



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile



MINISTERO DELLA TRANSIZIONE ECOLOGICA



Ricerca di Sistema elettrico

Analisi degli impatti energetici e delle emissioni di gas climalteranti di tecnologie e componenti per l'efficienza energetica degli edifici in un'ottica di ciclo di vita

M. Cellura, M.A. Cusenza, F. Guarino, V. La Rocca, S. Longo,
I. Marotta, D. Panno

Report RdS/PTR2020/111

ANALISI DEGLI IMPATTI ENERGETICI E DELLE EMISSIONI DI GAS CLIMALTERANTI DI TECNOLOGIE E COMPONENTI PER L'EFFICIENZA ENERGETICA DEGLI EDIFICI IN UN'OTTICA DI CICLO DI VITA

M. Cellura, M.A. Cusenza, F. Guarino, V. La Rocca, S. Longo, I. Marotta, D. Panno (Dipartimento di Ingegneria - Università degli Studi di Palermo)

Aprile 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico (oggi Ministero della Transizione Ecologica) - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - II annualità

Obiettivo: *N. 1 - Tecnologie*

Progetto: *1.5 - Tecnologie, tecniche e materiali per l'efficienza energetica ed il risparmio di energia negli usi finali elettrici degli edifici nuovi ed esistenti*

Work package: *1 - Edifici ad alta efficienza energetica*

Linea di attività: *LA1.4 - Analisi degli impatti energetici e delle emissioni di tecnologie e componenti per l'efficienza energetica di edifici residenziali in ottica LCA*

Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi, ENEA

Responsabile del Work package: Domenico Iatauro, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Analisi degli impatti energetici e delle emissioni di gas climalteranti di tecnologie e componenti per l'efficienza energetica degli edifici in un'ottica di ciclo di vita"

Responsabile scientifico ENEA: Ing. Carmen Lavinia

Responsabile scientifico Dipartimento di Ingegneria - Università degli Studi di Palermo: Prof. Maurizio Cellura

Indice

SOMMARIO	5
LA METODOLOGIA LCA E IL CONCETTO DI ENERGIA INCORPORATA	7
1 INTRODUZIONE	7
2 INTRODUZIONE ALLA LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA)	9
3 LA METODOLOGIA LCA E L'APPLICAZIONE AGLI EDIFICI.....	10
3.1 OBIETTIVO DELLO STUDIO LCA.....	11
3.2 CAMPO DI APPLICAZIONE	12
3.2.1 <i>Sistema di prodotto esaminato, funzione, unità funzionale e flusso di riferimento.....</i>	<i>12</i>
3.2.2 <i>Confini del sistema e regole di cut-off.....</i>	<i>14</i>
3.2.3 <i>Periodo di riferimento dello studio.....</i>	<i>18</i>
3.2.4 <i>Gestione della multifunzionalità.....</i>	<i>19</i>
3.2.5 <i>Principi di modellizzazione dell'inventario di ciclo di vita</i>	<i>20</i>
3.2.6 <i>Metodologia di valutazione degli impatti ambientali e categorie di impatto ambientale</i>	<i>20</i>
3.2.7 <i>Requisiti di qualità dei dati</i>	<i>26</i>
3.2.8 <i>Format per la comunicazione dei risultati della valutazione dell'impatto ambientale.....</i>	<i>26</i>
3.3 INVENTARIO DEL CICLO DI VITA	27
3.3.1 <i>Fase di produzione dei materiali (moduli A1-A3)</i>	<i>28</i>
3.3.2 <i>Fase di costruzione (moduli A4-A5).....</i>	<i>29</i>
3.3.3 <i>Fase d'uso (moduli B1-B7).....</i>	<i>29</i>
3.3.4 <i>Fase di fine vita (moduli C1-C4).....</i>	<i>30</i>
3.3.5 <i>Benefici e oneri oltre i confini del sistema (modulo D).....</i>	<i>31</i>
3.4 VALUTAZIONE DEGLI IMPATTI AMBIENTALI (LIFE CYCLE IMPACT ASSESSMENT - LCIA)	31
3.5 INTERPRETAZIONE (LIFE CYCLE INTERPRETATION)	32
3.6 LIMITI DELLA LCA.....	35
4 ANALISI ENERGETICA DI UN EDIFICIO: IL CONCETTO DI ENERGIA INCORPORATA	35
ANALISI DEGLI IMPATTI ENERGETICI E DELLE EMISSIONI DI GAS CLIMALTERANTI DI TECNOLOGIE E COMPONENTI PER L'EFFICIENZA ENERGETICA DI UN EDIFICIO ZEB AD USO RESIDENZIALE IN UN'OTTICA DI CICLO DI VITA	42
1 INTRODUZIONE	42
2 DESCRIZIONE DEL CASO STUDIO.....	43
2.1 DESCRIZIONE DEL CASO STUDIO: INVOLUCRO.....	43
2.2 DESCRIZIONE DEL CASO STUDIO: LAYOUT D'IMPIANTO TERMICO.....	53
2.3 DESCRIZIONE DELL'EDIFICIO: IMPIANTI DI GENERAZIONE ALIMENTATI DA FONTI RINNOVABILI E SISTEMI DI ACCUMULO ELETTRICO	57
2.4 DESCRIZIONE DEL CASO-STUDIO: SINTESI DELLE CARATTERISTICHE DEI DUE SCENARI DI ANALISI.....	57
3 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE.....	58
3.1 STRUMENTI DI MODELLIZZAZIONE	58
3.2 MODELLIZZAZIONE GEOMETRICA	60
3.3 VENTILAZIONE NATURALE	71
3.4 ULTERIORI ASSUNZIONI DI MODELLIZZAZIONE E SIMULAZIONE	72
4 DISCUSSIONE DEI RISULTATI.....	73
4.1 SCENARIO A: CONSUMI DI ENERGIA ELETTRICA.....	73
4.2 CONFRONTO TRA SCENARIO A E B: CONSUMI E GENERAZIONE DI ENERGIA.....	75

4.3	LOAD MATCHING E INTERAZIONE CON LA RETE: SCENARIO A.....	76
4.4	SINTESI SCENARIO A E B.....	77
5	LIFE CYCLE ASSESSMENT.....	80
5.1	DEFINIZIONE DELL'OGGETTO E DESCRIZIONE DEL SISTEMA DI PRODOTTO.....	80
5.2	DEFINIZIONE DEL CAMPO DI APPLICAZIONE.....	81
5.2.1	<i>Funzione, unità funzionale e flusso di riferimento</i>	81
5.2.2	<i>Confini del sistema</i>	82
5.2.3	<i>Metodologia di valutazione degli impatti ambientali e categorie di impatto ambientale</i>	83
5.3	ANALISI DI INVENTARIO DI CICLO DI VITA E QUALITÀ DEI DATI.....	84
5.3.1	<i>Analisi di inventario – Fase di produzione (Modulo A)</i>	84
5.3.2	<i>Analisi di inventario – Fase d'uso (Modulo B)</i>	91
5.3.2.1	Analisi di inventario – Fase di sostituzione (Modulo B4).....	91
5.3.2.2	Analisi di inventario – Usi energetici (Modulo B6).....	92
5.3.3	<i>Analisi di inventario – Fase di fine vita (Modulo C)</i>	93
5.3.4	<i>Analisi di inventario – Benefici e oneri oltre i confini del sistema (Modulo D)</i>	98
5.4	VALUTAZIONE DEGLI IMPATTI ENERGETICI E AMBIENTALI DI CICLO DI VITA: RISULTATI E DISCUSSIONE.....	98
5.4.1	<i>Impatti energetico – ambientali – Modulo A</i>	98
5.4.2	<i>Impatti energetico – ambientali – Modulo B</i>	125
5.4.3	<i>Impatti energetico – ambientali – Modulo C</i>	140
5.4.4	<i>Impatti energetico – ambientali – Modulo D</i>	147
5.4.5	<i>Impatti energetico – ambientali di ciclo di vita</i>	148
6.	CONCLUSIONI.....	156
7.	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	157

Sommario

Il presente report tecnico-scientifico descrive le attività svolte dal Dipartimento di Ingegneria dell'Università di Palermo nell'ambito dell'accordo di collaborazione di ricerca stipulato tra il Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi di Palermo e l'Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile (ENEA), per lo sviluppo della ricerca dal titolo "Analisi degli impatti energetici e delle emissioni di gas climalteranti di tecnologie e componenti per l'efficienza energetica degli edifici in un'ottica di ciclo di vita", nell'ambito del Progetto 1.5 "Tecnologie, tecniche e materiali per l'efficienza energetica ed il risparmio di energia negli usi finali elettrici degli edifici nuovi ed esistenti" di cui al Piano Triennale della Ricerca nell'ambito del Sistema Elettrico Nazionale 2019-2021.

Il presente report è suddiviso in due sezioni, come indicato nell'Allegato tecnico all'accordo di collaborazione di ricerca suddetto:

- 1) "La metodologia LCA e il concetto di energia incorporata";
- 2) "Analisi degli impatti energetici e delle emissioni di gas climalteranti di tecnologie e componenti per l'efficienza energetica di un edificio ZEB ad uso residenziale in un'ottica di ciclo di vita".

La sezione 1 si propone di descrivere le fasi attraverso le quali si sviluppa uno studio di Life Cycle Assessment (LCA) e di fornire degli indirizzi metodologici per l'applicazione della LCA agli edifici con particolare riferimento all'analisi degli impatti energetici (energia incorporata).

La sezione 2 descrive le seguenti attività:

- Selezione di due casi studio di edifici ad uso residenziale nei quali individuare differenti caratteristiche termofisiche di involucro edilizio e modellizzazione energetica per la stima dei consumi energetici in fase d'uso;
- Modellizzazione e simulazione in regime dinamico dei due casi studio con configurazioni impiantistiche basate sul vettore elettrico, con utilizzo di tecnologie alimentate da fonti rinnovabili con accumulo elettrico e senza accumulo elettrico;
- Analisi del bilancio di energia elettrica annuo, in termini di generazione e consumo, e dei livelli di flessibilità energetica dell'edificio;
- Stima, attraverso l'applicazione della metodologia Life Cycle Assessment, degli impatti energetici e delle emissioni di gas climalteranti e altri impatti ambientali incorporati nei componenti principali e basilari del sistema involucro-impianto.

Nella sezione 2 sono state approfondite le attività relative alla selezione degli edifici campione e alla modellizzazione e simulazione energetica degli edifici in ottica del raggiungimento del livello di *Net Zero Energy Building* (nZEB) e/o di *Zero Energy Building* (ZEB).

In dettaglio sono stati identificati due edifici campione aventi le stesse caratteristiche morfo-volumetriche e soluzioni impiantistiche, differenziati tuttavia dall'utilizzo di differenti materiali isolanti (XPS nello scenario A e cellulosa nello scenario B) modulati in spessori differenti per ottenere trasmittanze termiche dell'involucro equivalenti. Un'ulteriore differenza tra i due scenari risiede nella presenza di un sistema di accumulo di energia elettrica, disponibile soltanto nello scenario A.

La simulazione dei due scenari è stata sviluppata in regime non-stazionario tramite l'utilizzo di TRNSYS considerando anche l'aspetto della generazione di energia da tecnologie alimentate da fonti rinnovabili.

I risultati evidenziano una sostanziale equivalenza termofisica dei due edifici ma significative differenze nella contemporaneità di consumi e generazione e nei flussi di energia in ingresso e uscita dai confini dell'edificio a causa della presenza (scenario A) del sistema di accumulo di energia elettrica.

Entrambi gli scenari raggiungono il target di nZEB secondo le definizioni proposte dall'Agenzia Internazionale dell'Energia e ulteriori approfondimenti sono forniti sul raggiungimento del livello di ZEB secondo la definizione di ASHRAE.

Successivamente, la metodologia LCA è stata applicata per la valutazione delle prestazioni energetico – ambientali di ciclo di vita di un edificio ad uso residenziale ad energia netta zero (Net Zero Energy Building), esaminando due diverse configurazioni:

- Scenario A o configurazione 1: si è considerato un edificio residenziale in cui l'isolamento termico dell'involucro è realizzato con polistirene espanso estruso e che presenta un sistema impiantistico costituito da due pompe di calore, un impianto solare termico, due accumuli termici, un impianto fotovoltaico connesso alla rete e integrato con un sistema di accumulo elettrico.
- Scenario B o configurazione 2: si è considerato un edificio residenziale in cui l'isolamento termico dell'involucro è realizzato con fibre di cellulosa e che presenta un sistema impiantistico costituito da due pompe di calore, un impianto solare termico, due accumuli termici e un impianto fotovoltaico connesso alla rete.

La metodologia LCA è stata applicata in accordo alle norme della serie ISO 14040 e ISO 14044 e con riferimento alle norme UNI EN 15978: 2011 e UNI EN 15804:2019 sulla sostenibilità delle costruzioni.

Il report si articola in tre parti. Nella prima parte sono descritti gli obiettivi dello studio e le assunzioni metodologiche connesse all'applicazione della metodologia LCA all'edificio esaminato.

Nella seconda parte è descritto l'inventario di ciclo di vita dell'edificio. In dettaglio, sono descritti i dati primari e i dati secondari utilizzati per la modellizzazione di ciclo di vita dei componenti d'involucro e di impianto e per la modellizzazione della fase d'uso dell'edificio.

Infine, nella terza parte, sono illustrati gli impatti energetico – ambientali connessi ai componenti d'involucro e d'impianto e al sistema edificio – impianto nelle due configurazioni esaminate.

L'applicazione della metodologia LCA ha consentito di stimare gli impatti energetico – ambientali di ciclo di vita connessi all'unità funzionale e di identificare il contributo connesso ad ogni fase del ciclo di vita.

Inoltre sono stati confrontati gli impatti energetico – ambientali ottenuti nelle due configurazioni esaminate. Dallo studio è emerso che in entrambe le configurazioni la fase d'uso dell'edificio, che include gli impatti connessi alla fase di sostituzione dei componenti di involucro e di impianto e agli usi energetici, è responsabile del maggior contributo agli impatti su quasi tutte le categorie esaminate, seguita dalla fase di produzione dei componenti di involucro e di impianto.

Dal confronto degli impatti energetico – ambientali è emerso che la configurazione 1 ha migliori performance in quasi tutte le categorie esaminate poiché i benefici energetico - ambientali connessi alla riduzione dell'import di energia elettrica dalla rete sono superiori degli impatti energetico - ambientali connessi alla fase di produzione e di sostituzione dell'accumulo elettrico e all'impiego del materiale isolante in polistirene espanso estruso, che incide sugli impatti in misura maggiore rispetto al materiale isolante in fibre di cellulosa.

La metodologia LCA e il concetto di energia incorporata

1 Introduzione

Il settore dell'edilizia rappresenta circa il 40% dei consumi di energia e il 36% delle emissioni di CO₂ dell'Unione Europea (UE) [1], è responsabile di oltre il 50% del consumo di materiali estratti [2] e del 38% dei rifiuti generati [3]. Uno studio condotto dall'Organizzazione per la Cooperazione e lo Sviluppo Economico (OECD) ha evidenziato che l'estrazione e la trasformazione dei materiali da costruzione, quali calcestruzzo, sabbia e ghiaia, contribuiscono, anche significativamente, a diversi impatti ambientali quali acidificazione, tossicità umana, uso del suolo, distruzione dello strato di ozono, ecc. [4]. In particolare, con riferimento al calcestruzzo, dallo studio dell'OECD è emerso che esso è responsabile del 9% delle emissioni di gas ad effetto serra a livello globale.

Migliorare le prestazioni ambientali del settore edile è quindi fondamentale per raggiungere gli obiettivi europei in tema di clima ed energia e in generale per la transizione verso un modello di economia sostenibile e circolare. In questo contesto, il ruolo chiave del settore edile è stato confermato recentemente nel Green Deal Europeo, in cui è stata sottolineata l'importanza di una applicazione rigorosa della normativa relativa alla prestazione energetica nel settore dell'edilizia e del regolamento sui prodotti da costruzione al fine di raggiungere gli obiettivi dello sviluppo sostenibile [5]. Pertanto, è fondamentale consolidare le strategie intese a promuovere l'efficienza energetica e l'uso di energie rinnovabili e integrarle con strategie per promuovere l'efficienza delle risorse.

La valutazione di un edificio in termini di qualità ambientale non è di facile determinazione a causa della molteplicità dei fattori che intervengono durante il ciclo di vita dell'opera stessa. Pertanto, il raggiungimento dell'obiettivo di sostenibilità presuppone l'adozione di un approccio multidisciplinare che prenda in considerazione non solo la fase operativa dell'edificio ma anche tutte le altre fasi del suo ciclo di vita, quali la produzione e il trasporto dei materiali edili al sito di costruzione, la realizzazione dell'edificio, le fasi di manutenzione, ristrutturazione, demolizione e trattamento/smaltimento dei rifiuti [6].

In generale, gli impatti connessi ad un sistema di prodotto possono essere classificati in impatti incorporati ed impatti connessi alla fase operativa del sistema stesso. Con riferimento agli edifici, gli impatti incorporati sono associati agli input e output in termini di consumo di materie prime ed emissioni di inquinanti relativi alle fasi di estrazione e trasformazione delle materie prime, produzione dei materiali e dei componenti edili, costruzione, manutenzione e demolizione dell'edificio e trattamento/smaltimento finale di tutti i materiali e i componenti, inclusi anche i processi di trasporto relativi ad ogni fase. Gli impatti della fase operativa sono relativi al consumo di energia durante la fase d'uso dell'edificio, ad esempio, per il riscaldamento, il raffrescamento, la produzione di acqua calda sanitaria, l'illuminazione, ecc. e al consumo di altre risorse, come ad esempio il consumo idrico.

Una valutazione affidabile ed esaustiva delle prestazioni ambientali del sistema edificio può essere condotta applicando la metodologia *Life Cycle Assessment* (LCA).

La LCA è considerata la migliore metodologia per la valutazione dei potenziali impatti ambientali di prodotti, processi e sistemi [7] e per supportare le decisioni verso modelli di consumo e produzione più sostenibili [8]. Essa è basata su un approccio sistemico e scientifico, standardizzato a livello internazionale dalle norme della serie ISO 14040 [9,10], che permette di stimare gli impatti ambientali associati a un prodotto o ad un servizio lungo l'intero ciclo di vita, dall'estrazione delle materie prime al fine vita. La LCA è inoltre basata su un approccio multicriteriale che consente di investigare le diverse dimensioni della sostenibilità ambientale.

La valutazione degli impatti ambientali di un prodotto/servizio lungo tutte le fasi del ciclo di vita e considerando diversi criteri ambientali consente di evitare il trasferimento dei carichi ambientali da una fase del ciclo di vita ad un'altra e/o da una categoria di impatto ambientale ad un'altra.

L'obiettivo prioritario dell'applicazione del metodo LCA in edilizia è quello di fornire informazioni ambientali di supporto alle scelte progettuali (*eco-design* ed *early-design*), tramite una valutazione integrale dei consumi

di risorse e delle emissioni inquinanti derivanti, a livello di sistema edificio, dalla scelta di materiali e componenti edilizi, dalle soluzioni tecnico-costruttive e impiantistiche.

Questo strumento quindi può essere utilizzato sia dai progettisti per confrontare le prestazioni ambientali di due prodotti alternativi, sia dai produttori che in questo modo individuano i miglioramenti lungo il ciclo di vita di un prodotto.

Il metodo permette di ottenere informazioni ambientali di supporto alla progettazione a diversa scala:

- edificio;
- materiali e componenti;
- soluzioni tecnico-costruttive;
- impianti.

La LCA in edilizia è stata usata a partire dal 1990, diventando, negli ultimi anni, uno strumento sempre più importante nell'ambito della progettazione edilizia. In uno studio effettuato da Weißenberger et al. [11] è stato osservato che dal 2000 al 2013 il numero di studi di LCA applicati agli edifici è cresciuto in misura significativa (Figura 1).

L'interesse crescente verso questa metodologia ha condotto alla definizione di standard di riferimento e normative europee a sostegno dei criteri progettuali e costruttivi dell'eco-edilizia, finalizzati al risparmio energetico e di risorse e alla riduzione degli impatti ambientali connessi al settore delle costruzioni.

Sebbene le prime normative a livello europeo abbiano avuto come obiettivo il miglioramento delle prestazioni energetiche degli edifici durante la fase d'uso [12,13] comportando notevoli riduzioni nell'energia consumata durante la fase operativa e degli impatti ambientali ad essa associati, questa riduzione ha evidenziato l'importanza degli impatti connessi alle altre fasi del ciclo di vita (impatti incorporati). Di conseguenza è risultata evidente la necessità di adottare un approccio *life cycle*.

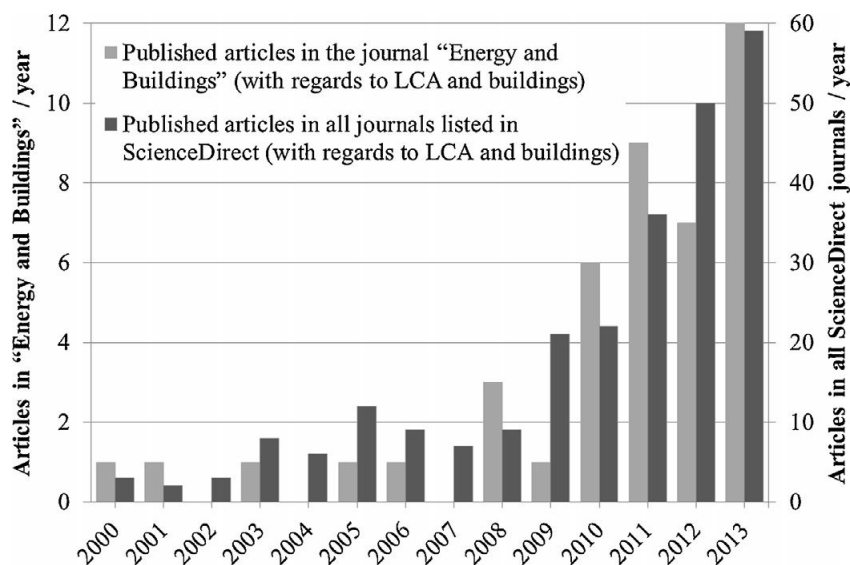


Figura 1: Articoli relativi alla LCA in campo edilizio pubblicati su riviste scientifiche internazionali dal 2000 al 2013 [11]

L'applicazione della metodologia LCA al settore delle costruzioni può rappresentare un utile strumento per valutare, secondo un approccio esaustivo e scientificamente affidabile, gli impatti ambientali di ciclo di vita di edifici, impianti e materiali da costruzione.

A livello normativo, l'importanza dell'adozione della LCA nella valutazione degli edifici è stata stabilita dal Comitato tecnico 350 "Sustainability of construction works" del Comitato Europeo di Normazione (CEN/TC 350) che ha emanato due norme. La norma EN 15978: 2011 [14] che specifica il metodo di calcolo, basato su un approccio di ciclo di vita, per valutare la prestazione ambientale di un edificio e la norma EN 15804: 2012

[15] (sostituita dalla norma EN 15804: 2019) che fornisce le regole quadro per categoria di prodotto (PCR) per l'elaborazione di dichiarazioni ambientali di tipo III per ogni tipo di prodotto e servizio per le costruzioni. Entrambe le norme sono state recepite in Italia come UNI.

Nel prosieguo, sono descritte le fasi attraverso le quali si sviluppa uno studio di LCA e i principi generali della metodologia in accordo agli standard internazionali della serie ISO 14040: 2006. Per ogni aspetto metodologico della LCA sono fornite delle indicazioni utili per l'applicazione della metodologia al sistema edificio. Inoltre, ove disponibili, sono riportate le corrispondenti indicazioni contenute nella norma UNI EN 15978.

Infine nella terza parte, viene discusso il tema dell'analisi energetica degli edifici con particolare riferimento all'energia incorporata.

2 Introduzione alla Life Cycle Assessment (LCA)

Uno studio di LCA si articola nelle quattro fasi illustrate in Figura 2 e di seguito elencate e descritte:

6. definizione degli obiettivi e del campo di applicazione (*goal and scope definition*): è la fase preliminare in cui sono esplicitate le finalità dello studio e sono definiti gli aspetti metodologici necessari allo svolgimento dell'analisi;
7. analisi di inventario (*life cycle inventory, - LCI*): è la fase in cui si ricostruisce il flusso dell'energia e dei materiali in ingresso e in uscita dal sistema in esame, inclusi tutti i processi di trasformazione e trasporto, e si stima l'eco – profilo del prodotto in termini di consumo di materie prime, emissioni in aria, acqua e suolo;
8. valutazione dell'impatto (*life cycle impact assessment, - LCIA*): in questa fase si effettua una valutazione dell'impatto ambientale provocato dal processo o dall'attività in esame quantificandone gli effetti a seguito del consumo di materie prime e dei rilasci di inquinanti nell'ambiente quantificati nella fase di analisi di inventario.
9. interpretazione dei risultati (*life cycle interpretation*): è la parte conclusiva dell'analisi in cui i risultati ottenuti nell'analisi di inventario e nella valutazione d'impatto sono combinati tra loro al fine di verificare l'affidabilità dello studio e di trarre conclusioni e raccomandazioni per agire verso il miglioramento delle prestazioni ambientali del sistema in esame.

A livello internazionale la metodologia LCA è standardizzata dagli standard della serie ISO 14040:

- UNI EN ISO 14040:2006 "Gestione ambientale – Valutazione del ciclo di vita – Principi e quadro di riferimento", che fornisce un quadro generale dei principi, delle pratiche, delle applicazioni e limitazioni della LCA [9];
- UNI EN ISO 14044:2006 "Gestione ambientale – Valutazione del ciclo di vita – Requisiti e linee guida", che rappresenta il principale supporto per l'applicazione pratica di uno studio di LCA [10] (sostituita dalla UNI EN ISO 14044: 2018).

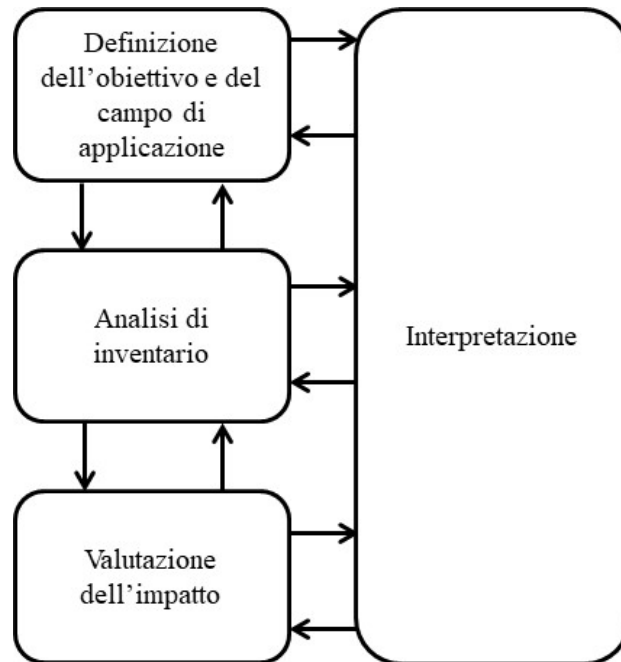


Figura 2: Fasi di uno studio LCA (elaborazione propria dallo standard ISO 14040 [9])

Inoltre, la Commissione Europea ha pubblicato due linee guida allo scopo di fornire un riferimento comune per lo svolgimento di studi LCA: 1) *l'International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Provisions and Action Steps* [16], e 2) *la Product Environmental Footprint (PEF) Guide* [17].

Uno studio LCA si basa sui principi generali elencati di seguito [9]:

- prospettiva di ciclo di vita: l'analisi considera l'intero ciclo di vita dei prodotti/servizi;
- trasparenza e scientificità: le assunzioni e le decisioni di una LCA devono essere dichiarate e devono basarsi su considerazioni valide scientificamente;
- completezza: l'analisi deve considerare tutti gli aspetti dell'ambiente naturale, della salute umana e delle risorse allo scopo di evitare potenziali spostamenti degli impatti.

La LCA costituisce un valido strumento di supporto per il confronto, dal punto di vista dell'impatto ambientale, di sistemi alternativi di prodotto e di servizi che svolgono la stessa funzione, per l'identificazione delle opportunità di miglioramento ambientale di un prodotto o di un servizio in fasi diverse del ciclo di vita o per la comunicazione delle prestazioni ambientali di un prodotto, di un servizio, di un segmento di mercato, ecc. Inoltre, può assistere il processo decisionale delle industrie e delle Pubbliche Amministrazioni nella definizione di priorità nella pianificazione di strategie volte al miglioramento delle proprie prestazioni ambientali.

3 La metodologia LCA e l'applicazione agli edifici

Nel presente capitolo è descritta la metodologia LCA e sono fornite delle indicazioni utili per l'applicazione della metodologia agli edifici. Inoltre, sono illustrate le indicazioni stabilite dalla norma UNI EN 15978 sul metodo di calcolo, basato sulla valutazione del ciclo di vita, per valutare la prestazione ambientale di un edificio. Nella Figura 3 è riportato il diagramma di flusso del processo per la valutazione delle prestazioni ambientali di un edificio definito nella norma UNI EN 15978.

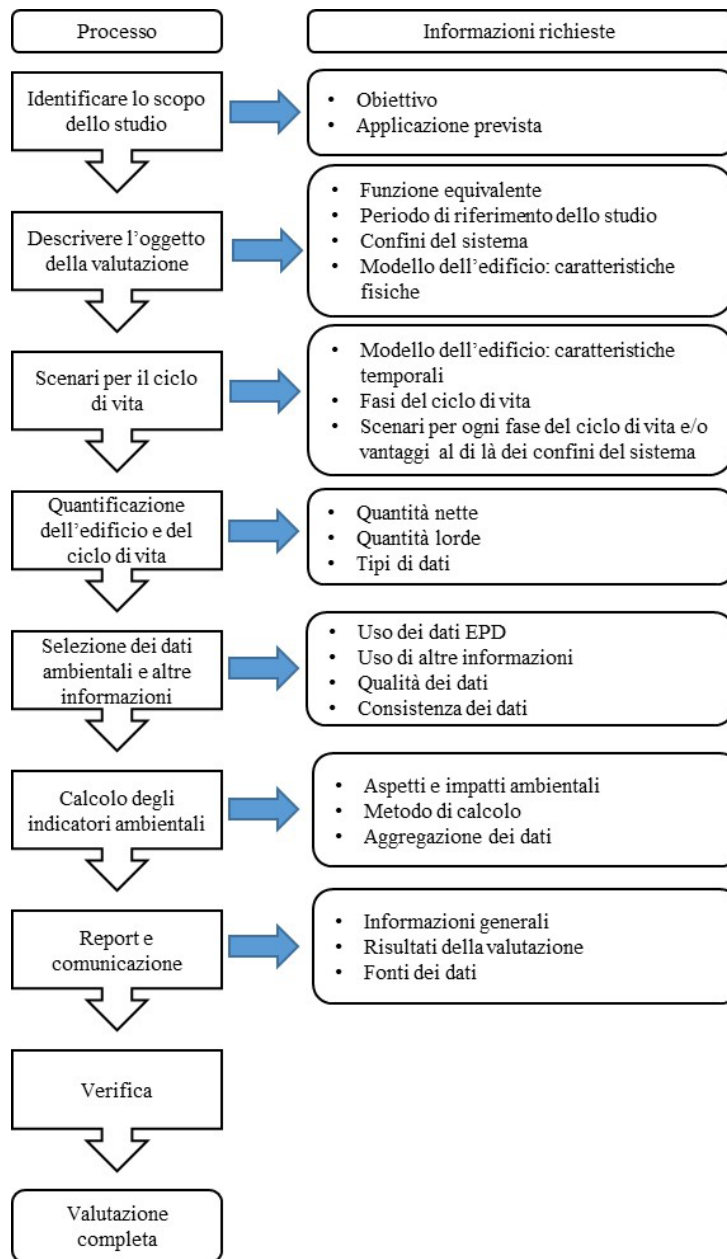


Figura 3. Diagramma di flusso del processo per la valutazione delle prestazioni ambientali (Elaborazione propria dalla UNI EN 15978 [14])

3.1 Obiettivo dello studio LCA

Durante la fase di definizione dell'obiettivo occorre definire l'applicazione prevista, le motivazioni che inducono a svolgere lo studio e il target di riferimento dello studio.

Nel caso degli edifici, la LCA può fornire un supporto nell'ambito dell'identificazione dei criteri per la progettazione eco-compatibile confrontando gli impatti ambientali connessi a diverse opzioni di progettazione nel caso di nuove costruzioni, e di ristrutturazione/manutenzione nel caso di edifici esistenti. Un'altra applicazione può riguardare l'identificazione delle fasi del ciclo di vita e dei materiali responsabili dei maggiori impatti ambientali e l'identificazione delle strategie più efficaci per il miglioramento delle prestazioni ambientali. Infine, può essere utile per documentare le prestazioni ambientali di un'impresa edile, da utilizzare per ottenere dichiarazioni ambientali di prodotto e acquisire quote nel mercato verde (ad esempio nell'ambito degli Acquisti verdi della Pubblica amministrazione).

La definizione del target di riferimento, ossia del tipo di pubblico cui lo studio è destinato, è importante per l'identificazione del livello di dettaglio dello studio e per stabilire la forma più appropriata per la comunicazione dei risultati ottenuti.

3.2 Campo di applicazione

Durante la fase di definizione del campo di applicazione occorre descrivere dettagliatamente le caratteristiche dell'oggetto dello studio LCA e le sue funzioni al fine di consentire la sua corretta identificazione. Inoltre, in questa fase sono stabiliti tutti gli aspetti metodologici necessari per condurre la LCA. In dettaglio, la definizione del campo di applicazione include l'identificazione dei seguenti aspetti:

- sistema esaminato, funzione, unità funzionale e flusso di riferimento;
- confini del sistema e regole di cut-off;
- gestione della multifunzionalità;
- principi di modellizzazione dell'inventario di ciclo di vita;
- metodologia di valutazione degli impatti ambientali e categorie di impatto ambientale;
- requisiti di qualità dei dati;
- format per la comunicazione dei risultati della valutazione dell'impatto ambientale.

3.2.1 Sistema di prodotto esaminato, funzione, unità funzionale e flusso di riferimento

Elemento di base per l'applicazione della LCA è la caratterizzazione delle componenti fondamentali oggetto della valutazione, definito dall'identificazione del sistema di prodotto e delle relative unità di processo. L'unità di processo trasforma le materie prime o i materiali intermedi in input in un prodotto semilavorato in output, attraverso il consumo di materiali ausiliari ed energia, contribuendo al rilascio di eventuali inquinanti nell'ambiente (Figura 4).

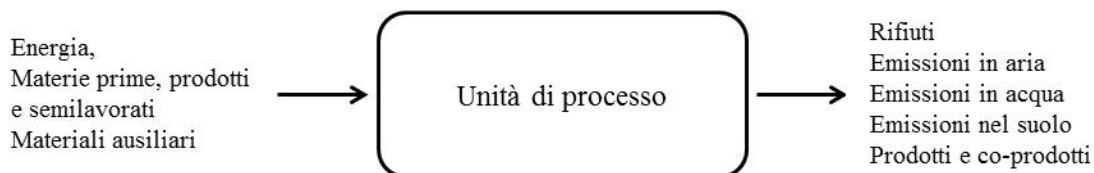


Figura 4. Esempio di unità di processo (elaborazione propria dallo standard ISO 14040 [9])

Un sistema di prodotto è costituito dall'insieme delle unità di processo necessarie al sistema in esame per svolgere la propria funzione (Figura 5). Le unità di processo sono collegate fra loro da flussi di prodotti intermedi e da rifiuti da trattare e sono collegate con altri sistemi da flussi di prodotto e con l'ambiente da flussi elementari.

I flussi elementari sono gli input in termini di consumo di materiali e risorse energetiche nel sistema oggetto di studio, che sono stati prelevati dall'ambiente senza alcuna preventiva trasformazione operata dall'uomo, e gli output che vengono rilasciati nell'ambiente [9]. I flussi elementari sono per esempio, le risorse estratte in natura o le emissioni in aria, acqua e suolo. I flussi di prodotto sono i flussi in entrata e in uscita di un sistema che hanno subito dei processi di trasformazione prima di essere utilizzati nel sistema di prodotto (per esempio, l'energia elettrica) o che devono subire altri trattamenti prima di essere trasformati in flussi elementari e rilasciati nell'ambiente.

Il sistema di prodotto oggetto dello studio LCA deve essere descritto dettagliatamente riportando tutte le informazioni necessarie alla sua corretta identificazione. Nel caso di LCA applicata agli edifici, l'oggetto della valutazione è generalmente l'edificio comprensivo delle fondazioni e delle opere esterne di pertinenza dell'edificio in esame. La descrizione dell'edificio deve includere informazioni relative alle sue dimensioni complessive (ad esempio numero di piani, altezza dell'interpiano, superficie totale lorda, ecc.) e l'elenco degli

elementi edilizi e degli impianti installati. Un elenco non esaustivo delle parti e degli elementi edilizi è riportato in Tabella 1.

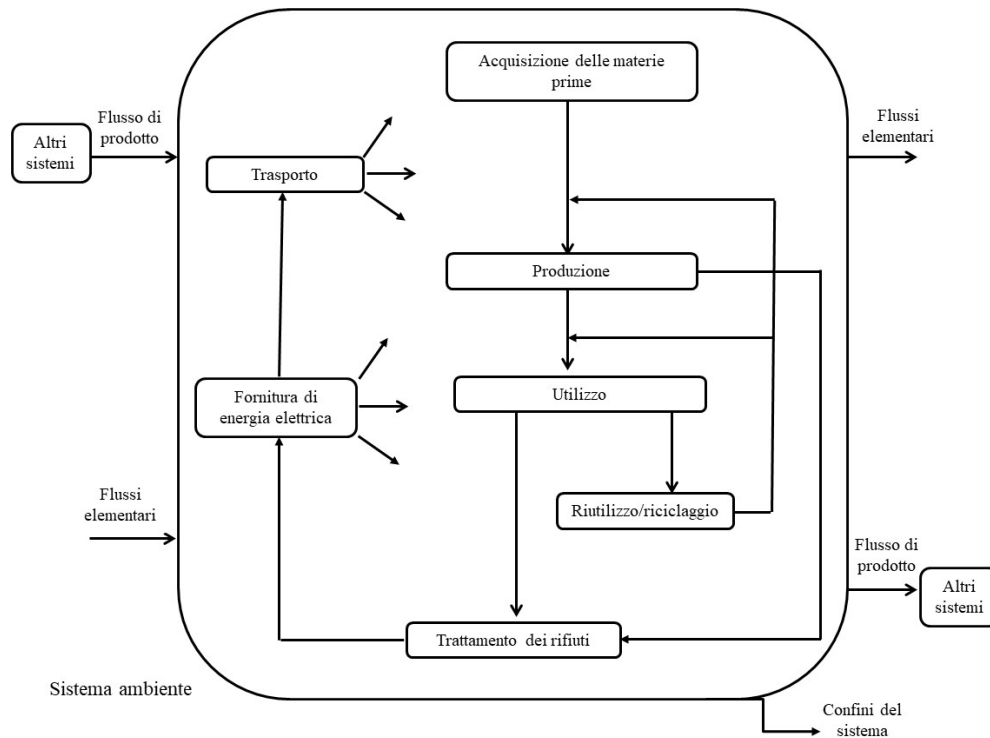


Figura 5. Esempio di sistema di prodotto (elaborazione propria dallo standard ISO 14040 [9])

La funzione rappresenta le caratteristiche prestazionali del sistema oggetto di studio. L'unità funzionale costituisce il riferimento cui legare i flussi in entrata in termini di consumo di materie prime, e in uscita in termini di emissioni di inquinanti in aria, acqua e suolo. L'unità funzionale deve essere chiaramente definita e quantificabile. Una volta definita l'unità funzionale occorre identificare il flusso di riferimento, ossia la quantità di prodotto necessaria per adempiere la funzione espressa tramite l'unità funzionale. Pertanto, oltre alla descrizione fisica dell'edificio occorre fornire anche la sua descrizione funzionale.

La descrizione funzionale deve includere informazioni sulla destinazione d'uso (ad esempio, ufficio, residenziale, ecc.), vita utile, densità e modello di occupazione e zona climatica.

Nello standard UNI EN 15978, la funzione, l'unità funzionale e il flusso di riferimento sono racchiusi nella definizione di "funzione equivalente".

La funzione equivalente include la descrizione delle caratteristiche tecniche e funzionali richieste all'edificio. In dettaglio, essa dovrebbe includere le seguenti informazioni:

- destinazione d'uso;
- requisiti tecnici e funzionali;
- condizioni d'uso (densità di occupazione, modello di occupazione);
- vita utile.

La definizione della funzione equivalente è necessaria per consentire la comparabilità dei risultati della LCA. Quando la LCA ha finalità comparative, gli impatti relativi alla funzione equivalente dovrebbero essere espressi con riferimento alla superficie totale lorda e alla vita utile dell'edificio, allo scopo di consentire una rapida comparazione tra soluzioni diverse in grado di fornire la stessa funzione equivalente [19].

Gli studi di LCA con finalità comparative hanno lo scopo di selezionare tra diversi prodotti e/o servizi che svolgono la stessa funzione quelli che presentano le migliori prestazioni energetico – ambientali. Nel caso della LCA applicata agli edifici, essa può essere applicata per confrontare diverse soluzioni progettuali per

uno stesso sito oppure per confrontare la stessa tipologia di edificio esposto a condizioni climatiche differenti. In questi casi si dovrà scegliere un'unità di riferimento comune e confrontare gli edifici sulla base della corrispondente funzione equivalente.

Per fornire la descrizione completa dell'oggetto della valutazione, oltre alla descrizione fisica dell'edificio, alla destinazione d'uso e alla vita utile occorre fornire informazioni sulle fasi di costruzione, uso e fine vita. Qualora non siano disponibili informazioni reali, occorre sviluppare degli scenari che rappresentino delle ipotesi da applicare nella modellizzazione.

Tabella 1. Elenco minimo delle parti di un edificio (adattato da UNI EN 15978 e da Dodd et al. [18])

Parti dell'edificio	Elementi edilizi relativi
Struttura (infrastruttura e sovrastruttura)	
Fondazioni (infrastruttura)	Pali, basamenti, muri di sostegno
Struttura portante	Telaio (travi, pilastri e solette), solai, muri esterni, balconi Soletta piano terra
Elementi non portanti	Muri interni, divisioni e porte Scale e rampe
Facciate	Sistemi di pareti esterne, rivestimenti e frangisole, aperture nella facciata (comprese finestre e porte esterne), tinteggiature, rivestimenti e intonacature
Tetto	Struttura Impermeabilizzazione
Parcheggi	In superficie e sotterranei
Opere interne	
Opere di finitura	Soffitti, opere di finitura per muri e soffitti, rivestimenti e opere di finitura per pavimenti
Impianti	Impianti sanitari, impianto di illuminazione integrato, impianti energetici (impianto di riscaldamento e distribuzione, impianto di raffreddamento e distribuzione, impianto elettrico)
Servizi igienici	Distribuzione dell'acqua fredda, distribuzione dell'acqua calda, impianti di trattamento dell'acqua, impianto di drenaggio
Altri impianti	Ascensori e scale mobili, impianti antincendio, impianti di comunicazione e sicurezza, impianti di telecomunicazione e trasmissione di dati
Opere esterne	
Architettura del paesaggio	Pavimentazione e altre coperture rigide, installazione di recinzioni, ringhiere e muri, impianti di drenaggio

3.2.2 Confini del sistema e regole di cut-off

Confini del sistema

I confini del sistema delimitano le fasi del ciclo di vita e le unità di processo che devono essere incluse nella valutazione ambientale del sistema di prodotto in esame perché necessarie per lo svolgimento della sua funzione. In generale, la LCA di un prodotto/servizio dovrebbe includere tutte le attività connesse al ciclo di vita, dall'approvvigionamento delle materie prime al fine vita.

Per ogni fase del ciclo di vita, i processi inclusi nei confini del sistema si possono suddividere in processi di *foreground*, per i quali è disponibile l'accesso diretto ad informazioni specifiche, e di *background*, per i quali non è possibile un accesso diretto alle informazioni specifiche da chi produce il bene/servizio.

La definizione dei confini del sistema è strettamente correlata all'obiettivo dello studio e all'applicazione prevista dei risultati della valutazione. Sulla base delle fasi del ciclo di vita incluse nella LCA è possibile classificare i confini del sistema nelle tipologie di seguito descritte:

- dalla culla al cancello (from cradle to gate). Tale approccio include nell'analisi le fasi di estrazione e trasformazione delle materie prime, il loro trasporto e la fase di assemblaggio del prodotto finito presso la fabbrica;
- dal cancello al cancello (from gate to gate). Tale approccio include nell'analisi la sola fase di assemblaggio del prodotto finito presso la fabbrica;
- dalla culla alla conclusione della fase d'uso (from cradle to end of use). Tale approccio include nell'analisi le fasi di estrazione e trasformazione delle materie prime, il loro trasporto e la fase di assemblaggio del prodotto finito presso la fabbrica, il trasporto del prodotto finito al consumatore finale, la fase d'uso, incluse le eventuali attività di manutenzione;
- dalla culla alla tomba (from cradle to grave). Tale approccio include nell'analisi le fasi di estrazione e trasformazione delle materie prime, il loro trasporto e la fase di assemblaggio del prodotto finito presso la fabbrica, il trasporto del prodotto finito al consumatore finale, la fase d'uso, incluse le eventuali attività di manutenzione, e la fase di fine vita.
- dalla culla alla culla (from cradle to cradle). Tale approccio include nell'analisi le fasi di estrazione e trasformazione delle materie prime, il loro trasporto e la fase di assemblaggio del prodotto finito presso la fabbrica, il trasporto del prodotto finito al consumatore finale, la fase d'uso, incluse le eventuali attività di manutenzione, la fase di fine vita e la conversione dei materiali riciclabili in materie prime seconde in grado di sostituire le materie prime vergini nei cicli produttivi.

Con riferimento agli edifici, in generale, si possono individuare le seguenti fasi del ciclo di vita:

10. fase di produzione dei materiali. Questa fase include l'approvvigionamento delle materie prime, il loro trasporto e la produzione dei materiali e dei componenti edili;
11. fase di costruzione. Il processo di costruzione include il trasporto dei prodotti da costruzione dal produttore fino al cantiere e la loro messa in opera nell'edificio;
12. fase d'uso. In questa fase sono inclusi i processi necessari per mantenere nel tempo inalterate le funzioni/caratteristiche dell'edificio, ad esempio la manutenzione, la sostituzione e la riparazione di componenti edili. Inoltre, sono inclusi i consumi di energia e di acqua connessi alla fase operativa dell'edificio;
13. fase di fine vita. Questa fase include il processo di demolizione dell'edificio giunto alla fine della sua vita utile, e i successivi processi di trattamento dei prodotti/materiali da costruzione.

Per ottimizzare le misure e tutte le fasi computazionali, la norma UNI EN 15978 suddivide il ciclo di vita dell'edificio in quattro moduli:

- modulo A: fase di produzione e costruzione;
- modulo B: fase d'uso;
- modulo C: fase di fine vita;
- modulo D: benefici e carichi ambientali oltre i confini del sistema.

Ciascun modulo è a sua volta suddiviso in sotto-moduli (Figura 6).

Nel prosieguo ogni modulo è descritto nel dettaglio.

Fase di produzione (moduli A1 – A3)

I moduli A1-A3 includono la produzione di tutti i materiali da costruzione utilizzati nelle fondamenta e nella struttura dell'edificio, dall'estrazione delle materie prime fino al cancello della fabbrica (approccio *from cradle to gate*). I dati necessari per la valutazione dell'impatto ambientale di questi moduli sono generalmente forniti dalla distinta dei materiali dell'edificio, mentre le regole da seguire nella fase di valutazione sono stabilite nella UNI EN 15804. In dettaglio, il modulo A1 include i processi di estrazione e trasformazione delle materie prime e/o il processo di trasformazione dei materiali secondari (ad es. processi di riciclaggio); il modulo A2 include il trasporto dal sito di estrazione/trasformazione o di riciclo alla fabbrica in cui avviene la produzione; il modulo A3 include l'approvvigionamento di tutti i materiali, dei prodotti e

dell'energia, nonché il trattamento o lo smaltimento dei rifiuti e dei residui connessi alla fase di produzione dei materiali/componenti edili. I moduli A1, A2 e A3 possono essere dichiarati come un modulo aggregato A1-A3.

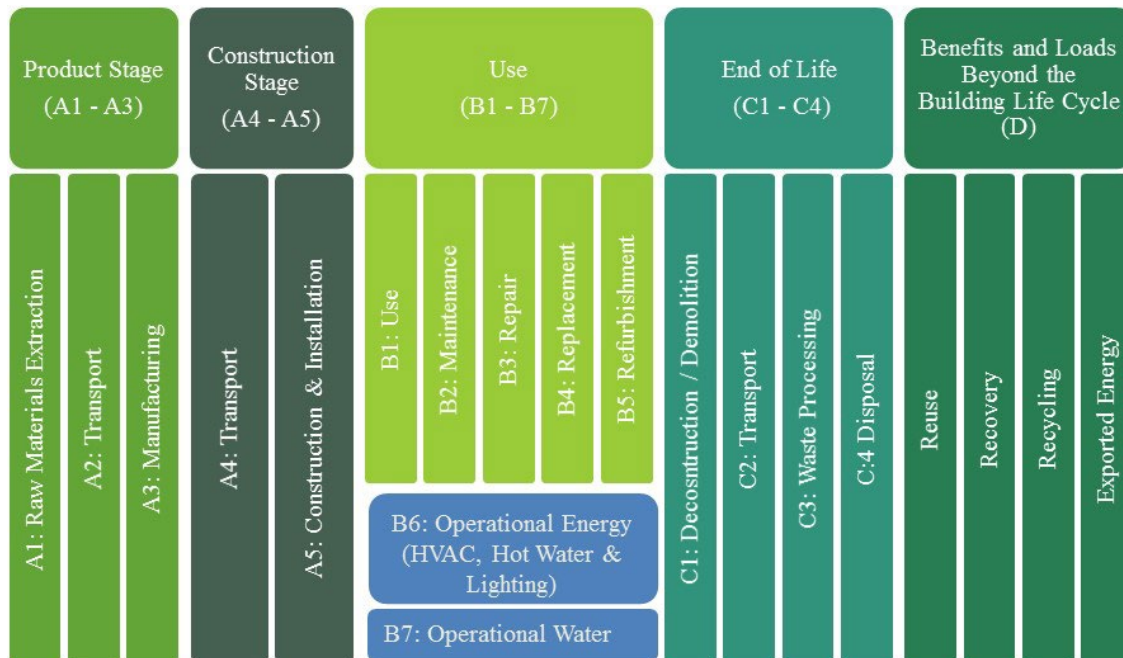


Figura 6. Confini del sistema secondo la UNI EN 15978 (elaborazione propria dalla UNI EN 15978 [14])

Fase di costruzione (moduli A4 e A5)

La fase di costruzione include le unità di processo comprese tra il cancello della fabbrica dei diversi prodotti da costruzione fino al completamento dei lavori di costruzione dell'edificio.

La produzione di beni strumentali utilizzati durante la fase di costruzione (camion, gru, ecc.) non deve essere considerata.

In dettaglio, il modulo "A4 – trasporto" include il trasporto dei materiali e dei prodotti da costruzione e dei materiali ausiliari dal cancello della fabbrica al cantiere e il trasporto (di andata e ritorno) dei macchinari e delle attrezzature utilizzati durante il processo di costruzione, quali gru, ponteggi, ecc. Inoltre, in questa fase devono essere inclusi la produzione, il trasporto e la gestione di fine vita dei materiali e dei prodotti che sono danneggiati o persi durante il trasporto dal sito di produzione al cantiere.

Il modulo "A5 – costruzione e installazione" comprende la messa in opera di materiali e di componenti edili nell'edificio (fondamenta, struttura portante, involucro dell'edificio, ecc.), lo stoccaggio dei prodotti, i trasporti interni al sito di costruzione, la realizzazione di opere temporanee e i processi di trasformazione dei prodotti che hanno luogo nel cantiere. Inoltre, sono inclusi i materiali ausiliari, ad esempio l'acqua usata per il raffreddamento dei macchinari da costruzione, detersivi per pulizia in loco, ecc. Infine, devono essere inclusi gli impatti della produzione, del trasporto e della gestione di fine vita delle perdite di materiale connesse al processo di costruzione e i processi di gestione dei rifiuti generati in cantiere.

Fase d'uso (moduli B1 – B7)

La fase d'uso comprende il periodo che va dal completamento dei lavori di costruzione al momento in cui l'edificio viene decostruito/demolito. Essa è suddivisa in sette moduli di seguito descritti.

Il modulo "B1 – fase d'uso" è relativo alla fase d'utilizzo dei materiali e componenti edili che costituiscono l'edificio. In questo modulo è incluso, ad esempio, il rilascio di sostanze (emissioni) dai materiali di rivestimento della facciata, del tetto e da altre superfici interne ed esterne.

Il modulo “B2 – manutenzione” include le unità di processo connesse agli interventi di manutenzione necessari all’edificio durante la propria vita utile al fine di garantire il mantenimento delle sue caratteristiche tecniche e funzionali. I confini del modulo B2 includono la produzione e il trasporto dei componenti e dei prodotti ausiliari utilizzati negli interventi di manutenzione sia dell’edificio che degli impianti e delle apparecchiature installate. Inoltre, sono inclusi tutti i processi di pulizia degli spazi interni ed esterni dell’edificio. Ad esempio, in questo modulo devono essere inclusi i lavori di verniciatura degli infissi, delle porte e della pavimentazione, gli interventi di manutenzione della caldaia e la sostituzione dei filtri nel condizionatore d’aria, ecc.

Il modulo “B3 – riparazione” include qualsiasi processo di riparazione dei componenti dell’edificio durante la fase d’uso. In dettaglio, il modulo B3 include la produzione e il trasporto del materiale/componente necessario durante il processo di riparazione e dei prodotti ausiliari, includendo le perdite di materiale durante il trasporto, il processo di riparazione, la gestione dei rifiuti generati durante il processo di riparazione e la fase di fine vita del componente rimosso e dei prodotti ausiliari.

Ad esempio, nel caso in cui il processo di riparazione riguardi una finestra con un vetro rotto, occorre includere la gestione dei rifiuti (vetro rotto), la produzione del vetro nuovo, dei materiali (ad esempio, la guarnizione in gomma) e delle risorse energetiche consumate durante il processo di riparazione. Inoltre, devono essere inclusi i processi di trasporto.

Il modulo “B4 – sostituzione” include i processi relativi agli interventi di sostituzione di elementi non strutturali (ad esempio, parete divisoria interna) ed impiantistici. In questo modulo sono inclusi la produzione e il trasporto dei materiali/componenti/dispositivi nuovi, il processo di sostituzione e la gestione di fine vita del materiale/componente/dispositivo sostituito e dei rifiuti generati durante il processo di sostituzione.

Il modulo “B5 – ristrutturazione” include le unità di processo connesse agli interventi di ristrutturazione dell’edificio, quali ad esempio una modifica sostanziale del layout interno (partizionamento) e/o dell’involucro dell’edificio, la modifica degli impianti di riscaldamento, raffreddamento e condizionamento dell’aria. In questo modulo sono inclusi i processi di produzione e trasporto dei componenti/impianti nuovi, il processo di ristrutturazione e la gestione dei rifiuti generati.

I moduli “B6 – consumo di energia” e “B7 – consumo di acqua” durante la fase operativa dell’edificio comprendono gli impatti ambientali connessi all’energia e all’acqua consumate durante la fase d’uso dell’edificio. In dettaglio, il modulo B6 include il consumo energetico connesso al riscaldamento, al raffrescamento, alla produzione di acqua calda sanitaria, all’illuminazione, ecc. Il consumo di energia connesso agli altri dispositivi integrati negli edifici (ad esempio ascensori, scale mobili, sistemi antincendio, di sicurezza e di comunicazione) e/o di quelli non integrati ad esso (ad esempio, computer, lavatrici, frigoriferi) può essere incluso nel calcolo dell’energia del modulo B6, ma i relativi consumi devono essere riportati separatamente come informazione aggiuntiva.

Fase di fine vita (moduli C1 – C4)

La fase di fine vita dell’edificio inizia quando esso viene messo fuori servizio e non è previsto che possa essere utilizzato ulteriormente. I componenti e i materiali devono essere rimossi dal sito, così da renderlo disponibile per il successivo utilizzo. La demolizione/decostruzione dell’edificio può essere considerata come un processo che fornisce in uscita materiali, prodotti ed elementi costruttivi che devono essere scartati, recuperati, riciclati o riutilizzati.

Il limite della fase di fine vita dell’edificio è fissato nel punto in cui i materiali e i componenti edili cessano di essere rifiuti (*end of waste stage*). Tutti i prodotti di scarto provenienti dallo smantellamento, dalla decostruzione o dalla demolizione di opere edili o dalla costruzione, manutenzione dell’edificio sono in prima istanza considerati rifiuti. Tuttavia, essi terminano di esserlo quando soddisfano le seguenti condizioni [20]:

- il materiale/prodotto/componente edile è comunemente utilizzato per scopi specifici;
- esiste un mercato o una domanda per tale materiale/prodotto/componente edile;
- il materiale/prodotto/componente edile soddisfa i requisiti tecnici per gli scopi specifici e rispetta la normativa e gli standard esistenti applicabili a tali prodotti;

- l'utilizzo del materiale/prodotto/componente edile non causa impatti complessivi negativi sull'ambiente o sulla salute umana.

I processi che si susseguono durante la fase di fine vita sono classificati nei quattro moduli di seguito descritti. Il modulo "C1 – decostruzione/demolizione" include le operazioni in loco dopo la messa fuori servizio dell'edificio fino alla sua decostruzione e/o demolizione. I processi intermedi includono lo smontaggio e lo smantellamento.

Il modulo "C2 – trasporto" deve includere tutti i processi di trasporto verso i siti di smaltimento.

Il modulo "C3 – trattamento dei rifiuti" include tutti i processi relativi alla raccolta, smistamento, trattamento e stoccaggio temporaneo dei flussi di materiali edili destinati al riuso, riciclo e recupero energetico.

Il modulo "C4 – smaltimento" include il processo di smaltimento finale, compreso il pretrattamento fisico e la gestione del sito di smaltimento. Il modulo C4 include tutti i carichi ambientali connessi al processo di smaltimento finale, ad esempio le emissioni dai materiali edili conferiti in discarica.

Modulo D - benefici e carichi ambientali oltre i confini del sistema

I materiali che hanno raggiunto lo stato di *end of waste* in genere richiedono ulteriori trattamenti prima di poter essere impiegati come materie prime secondarie e/o combustibili secondari in altri sistemi di prodotto. Questi ulteriori processi di trattamento (ad esempio, taglio in formati più piccoli, rifusione dei metalli, ecc.) devono essere inclusi nel modulo D. Inoltre, devono essere inclusi, in termini di crediti ambientali, i processi di produzione evitati grazie alla sostituzione delle materie prime vergini con materie prime seconde.

Regole di cut-off

Le regole di *cut-off* stabiliscono i criteri da applicare per la scelta dei flussi di massa in ingresso e in uscita da includere o escludere nell'analisi. In generale, tutti i processi e i flussi che sono attribuibili al sistema analizzato dovrebbero essere inclusi nei confini del sistema. Tuttavia non tutti questi processi e flussi elementari sono rilevanti. Per quelli meno rilevanti possono essere utilizzati dati di qualità inferiore e tra questi quelli meno significativi possono essere trascurati [21]. In generale i criteri di inclusione/esclusione possono essere basati sul principio della massa, dell'energia e della rilevanza ambientale. In dettaglio, con riferimento al criterio basato sulla massa occorre includere tutti i flussi in ingresso/uscita che contribuiscono, per più di una percentuale definita, al flusso di massa in ingresso/uscita nel sistema di prodotto; con riferimento all'energia occorre includere tutti i flussi energetici in ingresso che contribuiscono, per più di una percentuale definita, al flusso di energia in ingresso nel sistema di prodotto; e infine con riferimento alla rilevanza ambientale, il criterio prevede l'inclusione nello studio di tutti i flussi in ingresso/uscita che contribuiscono, per più di una percentuale definita, ad una specifica categoria di impatto ambientale.

Con riferimento alle regole di *cut-off*, lo standard UNI EN 15978 rimanda alla UNI EN 15804 in cui si afferma che tutti gli input e gli output di una unità di processo dovrebbero essere inclusi nell'analisi. Tuttavia, in caso di dati insufficienti possono essere trascurati tutti i flussi in ingresso nei processi unitari che costituiscono meno dell'1% del consumo di energia primaria e meno dell'1% della massa totale in ingresso di tale processo unitario. Il totale dei flussi in ingresso esclusi per ogni modulo non deve superare il 5% del consumo di energia primaria totale e di massa totale in ingresso in tale modulo del ciclo di vita. Nell'applicazione dei criteri di *cut-off* è necessario prestare particolare attenzione a includere i flussi di materiali ed energia che causano emissioni significative nell'aria e nell'acqua o nel suolo in relazione agli indicatori ambientali selezionati nello studio.

3.2.3 Periodo di riferimento dello studio

La valutazione dell'impatto ambientale di un edificio è rapportata ad un periodo di riferimento dello studio (PR_{LCA}).

In genere, il periodo di riferimento dello studio dovrebbe coincidere con la vita utile dell'edificio (VU_{Ed}). La scelta di un periodo di riferimento minore o maggiore della vita utile deve essere giustificata. Questa scelta può dipendere dall'applicazione prevista dei risultati dello studio LCA o può essere giustificata da specifici requisiti normativi o linee guida nazionali.

Nei casi in cui si sceglie un periodo di riferimento dello studio maggiore o minore della vita utile dell'edificio, gli impatti relativi alla produzione dei materiali da costruzione (moduli A1, A2, A3), alla fase di costruzione dell'edificio (moduli A4, A5) e alla fase di fine vita (moduli da C1 a C4) non variano poiché questi impatti sono indipendenti dal valore del periodo di riferimento dello studio. Gli impatti relativi alla fase d'uso (moduli da B1 a B7) e ai carichi e i crediti ambientali riportati nel modulo D devono essere moltiplicati per il rapporto tra il periodo di riferimento dello studio e la vita utile dell'edificio (PR_{LCA}/VU_{Ed}) allo scopo di essere rapportati al periodo di riferimento dello studio (Figura 7). Se il periodo di riferimento dello studio è maggiore della vita utile dell'edificio, devono essere sviluppati degli scenari di ristrutturazione o di demolizione e costruzione di un nuovo edificio che garantiscano un'estensione della durata utile che sommata alla vita utile dell'edificio oggetto di valutazione, sia pari o superiore al periodo di riferimento dello studio.

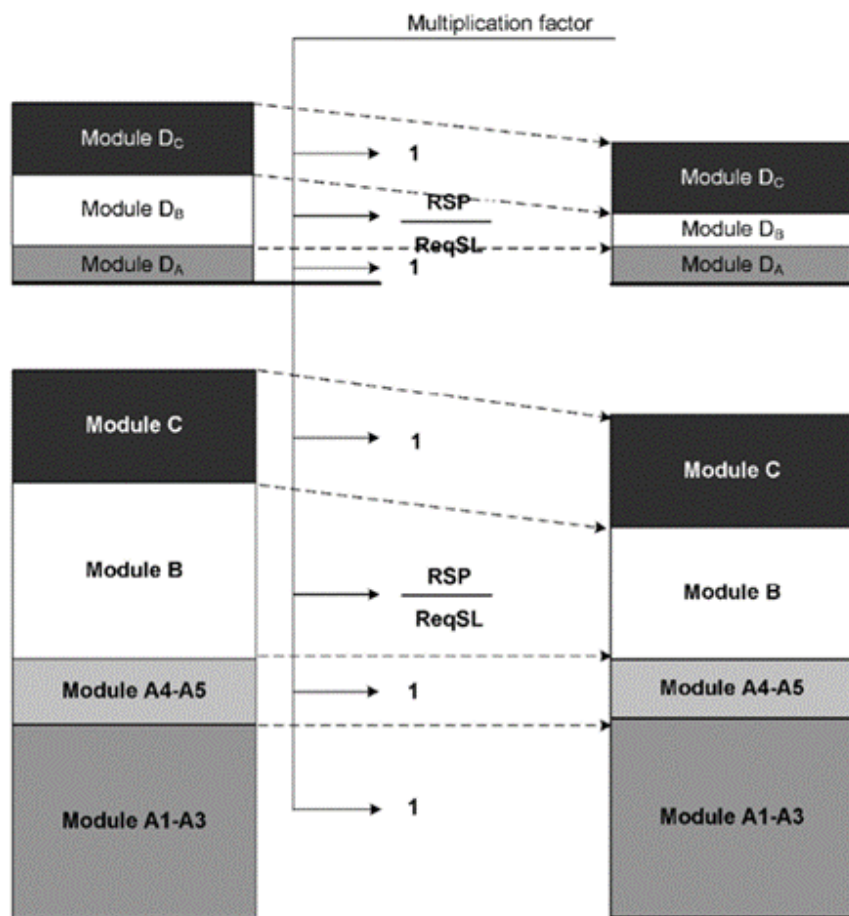


Figura 7. Riferimento dei carichi ambientali al periodo di riferimento dello studio nel caso in cui la vita utile dell'edificio è maggiore del periodo di riferimento dello studio [14]

3.2.4 Gestione della multifunzionalità

Una problematica che potrebbe insorgere nella fase di analisi di inventario riguarda la ripartizione di consumi e impatti relativi a prodotti differenti generati da uno stesso processo produttivo. In generale pochi processi industriali hanno un singolo prodotto in uscita. Un processo che fornisce più di una funzione, cioè più di un prodotto o di un servizio, è un processo multifunzionale.

Con riferimento ai processi multifunzionali, la norma ISO 14044 definisce il concetto di allocazione come il procedimento attraverso il quale i flussi di materia e di energia in ingresso in un'unità di un processo multifunzionale e i flussi in uscita in termini di emissioni in aria, acqua e suolo sono ripartiti tra i diversi

prodotti in uscita, in maniera tale da attribuire a ciascuno di essi le rispettive aliquote di risorse impiegate e di inquinanti emessi.

La norma ISO 14044 fornisce una procedura per la gestione dei processi multifunzionali. In dettaglio, essa stabilisce che quando possibile si dovrebbe evitare l'allocazione mediante: 1) la suddivisione dell'unità di processo multifunzionale in due o più sottoprocessi monofunzionali e collegamento dei dati in ingresso e in uscita relativi a tali sottoprocessi, 2) l'espansione dei confini del sistema per includere funzioni aggiuntive relative ai co-prodotti.

Se l'allocazione non può essere evitata, gli input e gli output del sistema dovranno essere ripartiti tra le diverse funzioni in uscita sulla base di relazioni fisiche. Ad esempio, si potrebbe ricorrere all'allocazione basata sulla massa, sull'entalpia, sull'exergia, ecc. Se non è possibile stabilire delle relazioni fisiche che siano rappresentative della funzione del sistema di prodotto in esame, gli input e gli output possono essere suddivisi ricorrendo ad altri tipi di relazioni, quali ad esempio un'allocazione sulla base del valore economico dei prodotti.

Con riferimento agli edifici, un caso di multifunzionalità si potrebbe presentare quando nell'edificio è installato un impianto fotovoltaico e parte della produzione di energia elettrica (surplus) viene utilizzata da altri consumatori finali. In questo caso, gli impatti connessi alla produzione, manutenzione e fine vita dell'impianto fotovoltaico devono essere attribuiti all'edificio in misura proporzionale alla quota di energia elettrica prodotta in loco e consumata dall'edificio stesso.

3.2.5 Principi di modellizzazione dell'inventario di ciclo di vita

La modellizzazione dell'inventario di ciclo di vita può essere effettuata secondo due diversi approcci: attribuzionale (attributional LCA) e consequenziale (consequential LCA) [21]. L'approccio da seguire deve essere indicato nella fase di definizione del campo di applicazione ed è connesso all'obiettivo dello studio.

Secondo quanto riportato nell'*ILCD Handbook*, una LCA attribuzionale ha l'obiettivo di identificare i potenziali impatti ambientali che possono essere attribuiti ad un sistema di prodotto nel suo intero ciclo di vita. Pertanto, nell'analisi sono incluse tutte le unità di processo necessarie al sistema di prodotto per svolgere la propria funzione. Una LCA consequenziale viene sviluppata con l'obiettivo di identificare i potenziali impatti ambientali connessi alle conseguenze che una decisione/cambiamento nel sistema di prodotto in esame induce sul sistema stesso e su altri sistemi dell'economia. Pertanto, nell'analisi sono inclusi il sistema di prodotto in esame e i sistemi di prodotto influenzati dalla decisione/cambiamento analizzato.

Con riferimento agli edifici, nei casi in cui la LCA è applicata a singoli edifici con lo scopo di valutare le prestazioni ambientali e identificare gli "hot – spot", un approccio attribuzionale è idoneo all'applicazione prevista. Se lo studio di LCA viene sviluppato in un contesto di pianificazione strategica finalizzata ad esempio al rinnovamento del parco edilizio o all'introduzione di una nuova tipologia di materiali da costruzione, un approccio consequenziale potrebbe essere più idoneo poiché in grado di cogliere le conseguenze ambientali in tutti i settori economici influenzati.

3.2.6 Metodologia di valutazione degli impatti ambientali e categorie di impatto ambientale

La definizione del campo di applicazione prevede l'identificazione dei metodi che saranno adoperati nella fase di valutazione degli impatti ambientali e delle categorie di impatto ambientale che saranno investigate. I metodi di valutazione dell'impatto ambientale sono basati sui modelli di caratterizzazione che permettono di stimare l'impatto connesso al consumo di risorse e alle emissioni di inquinanti in aria, acqua e suolo su specifiche categorie di impatto ambientale attraverso la quantificazione dell'indicatore di impatto ambientale relativo ad ogni categoria.

Le categorie di impatto ambientale si distinguono in categorie di *midpoint* e di *endpoint*. Nel primo caso, si adotta un approccio orientato al problema in cui le categorie di impatto traducono i carichi ambientali in fenomeni reali, ad esempio il cambiamento climatico, l'eutrofizzazione, la tossicità umana. Nel secondo caso, l'approccio è orientato al danno e le categorie di impatto traducono i carichi ambientali in problematiche quali, ad esempio, la salute umana, l'ambiente e le risorse naturali.

Secondo la norma ISO 14044 [10], la selezione delle categorie di impatto deve essere coerente con l'obiettivo dello studio e le applicazioni previste dei risultati e deve coprire tutte le principali questioni ambientali in relazione al sistema studiato. In generale, la selezione dovrebbe essere guidata dalle seguenti raccomandazioni:

- selezione di tutte le categorie di impatto rilevanti dal punto di vista ambientale su cui il sistema potrebbe potenzialmente agire;
- selezione di modelli di caratterizzazione basati su meccanismi ambientali chiaramente identificabili e validi dal punto di vista tecnico e scientifico;
- selezione di categorie di impatto, di indicatori di categoria e di modelli di caratterizzazione riconosciuti a livello internazionale;
- selezione di categorie di impatto, di indicatori di categoria e di modelli di caratterizzazione che evitino il doppio conteggio;
- selezione di un numero di categorie di impatto sufficiente ad evidenziare eventuali spostamenti dei carichi ambientali da una categoria ad un'altra.

La scelta del metodo di valutazione dell'impatto può essere fatta in accordo alle indicazioni della Commissione Europea riportate nell'*ILCD Handbook* [21] [22], oppure nella *Product Environmental Footprint – PEF* [17].

Nel caso in cui si debba eseguire uno studio di LCA applicato ad un edificio o ad un materiale edilizio che sia conforme alla PEF si riporta in

Tabella 2 l'elenco delle categorie di impatto ambientale e i rispettivi metodi di valutazione raccomandati da questo approccio.

Tabella 2. Categorie di impatto ambientale, indicatori di categoria e modelli di valutazione di impatto raccomandati dalla PEF [17]

Categoria di impatto	Modello di valutazione di impatto	Indicatore di categoria	Fonte
Cambiamenti climatici	Potenziale di riscaldamento globale in un arco di 100 anni	kgCO _{2eq}	[23]
Riduzione dello strato di ozono	Modello EDIP basato sui potenziali di riduzione dello strato di ozono dell'organizzazione meteorologica mondiale	kgCFC-11 _{eq}	[24]
Ecotossicità per l'ambiente acquatico di acqua dolce	Modello USEtox	CTUe (unità tossica comparativa per gli ecosistemi)	[25]
Tossicità per gli esseri umani - effetti cancerogeni	Modello USEtox	CTUh (unità tossica comparativa per gli esseri umani)	[25]
Tossicità per gli esseri umani - effetti non cancerogeni	Modello USEtox	CTUh (unità tossica comparativa per gli esseri umani)	[25]
Particolato/smog provocato dalle emissioni di sostanze inorganiche	Modello RiskPoll	kg di PM2.5 _{eq}	[26]
Radiazione ionizzante - effetti sulla salute umana	Modello di effetti sulla salute umana	kg U ²³⁵ _{eq} (nell'aria)	[27]

Formazione di ozono fotochimico	Modello LOTOS-EUROS	kg di NMVOC _{eq}	[28]
Acidificazione	Modello di superamento accumulato	moli di H ⁺ _{eq}	[29] [30]
Eutrofizzazione terrestre	Modello di superamento accumulato	moli di N _{eq}	[29] [30]
Eutrofizzazione delle acque	Modello EUTREND	Acqua dolce: kg di P _{eq} ; acqua di mare: kg di N _{eq}	[31]
Impoverimento delle risorse - acqua	Modello svizzero per la scarsità ecologica	Uso di m ³ di acqua connesso alla scarsità locale di acqua	[32]
Impoverimento delle risorse - minerali, fossili	Modello CML2002	kg di Sb _{eq}	[33]
Trasformazione del terreno	Modello della materia organica contenuta nel suolo	kg (deficit)	[34]

Con specifico riferimento agli edifici, la norma UNI EN 15978 fornisce l'elenco degli indicatori da quantificare per la valutazione di impatto ambientale a livello di edificio. Sia gli indicatori di categoria che i fattori di caratterizzazione sono conformi alla norma UNI EN 15804:2014.

Per la valutazione ambientale sono previsti tre tipi principali di indicatori ambientali:

- indicatori relativi agli impatti su specifiche categorie di impatto ambientale;
- indicatori relativi al consumo di risorse;
- indicatori relativi alla produzione di rifiuti e di altri flussi in uscita.

Gli indicatori di categoria e i modelli di caratterizzazione raccomandati nella norma UNI EN 15978, elencati nella Tabella 3, sono basati sul metodo CML – IA versione 4.1. I fattori di caratterizzazione sono scaricabili dal sito dell'Università di Leiden che ha sviluppato il metodo¹.

Tabella 3. Categorie di impatto ambientale, indicatori di categoria del metodo CML-IA – Norma UNI EN 15978: 2010

Categoria d'impatto	Indicatore di categoria
Depauperamento delle risorse abiotiche (fossili)	MJ
Depauperamento delle risorse abiotiche (elementi)	kgSb _{eq}
Acidificazione potenziale di suolo e acque	kgSO _{2eq}
Depauperamento dello strato di ozono	kgCFC-11 _{eq}
Potenziale di riscaldamento globale	kg CO _{2eq}
Potenziale di formazione di ozono fotochimico	kg C ₂ H _{4eq}

Gli indicatori raccomandati per la descrizione dei flussi di risorse in ingresso sono sintetizzati nella Tabella 4.

¹<https://www.universiteitleiden.nl/en/research/research-output/science/cml-ia-characterisation-factors>

Tabella 4. Indicatori di consumo di risorse – Norma UNI EN 15978: 2010

Indicatori	Unità di misura
Consumo di risorse energetiche rinnovabili – energia primaria	MJ
Consumo di risorse energetiche non rinnovabili – energia primaria	MJ
Consumo di materie secondarie	kg
Consumo di combustibili secondari rinnovabili	MJ
Consumo di combustibili secondari non rinnovabili	MJ
Consumo di acqua	m ³

Nella Tabella 5 e nella Tabella 6 sono sintetizzati, rispettivamente, gli indicatori relativi alla descrizione dei rifiuti prodotti e degli altri flussi in uscita dal sistema.

Tabella 5. Indicatori relativi alla produzione di rifiuti – Norma UNI EN 15978: 2010

Indicatori	Unità di misura
Rifiuti pericolosi da inviare allo smaltimento finale	kg
Rifiuti non pericolosi da inviare allo smaltimento finale	kg
Rifiuti radioattivi inviati allo smaltimento finale	kg

Tabella 6. Indicatori relativi ai flussi in uscita dal sistema non classificabili come rifiuti – Norma UNI EN 15978: 2010

Indicatori	Unità di misura
Componenti riutilizzabili	kg
Materiali riciclabili	kg
Materiali destinati al recupero energetico	kg
Energia esportata	MJ

L'indicatore "Rifiuti non pericolosi da inviare allo smaltimento finale" comprende il deposito di rifiuti in depositi permanenti, ad esempio nelle discariche, e i rifiuti che possono essere smaltiti mediante incenerimento. I rifiuti da costruzione e demolizione che soddisfano i requisiti della direttiva quadro sui rifiuti dell'UE per il recupero di energia [35] devono essere assegnati all'indicatore "Materiali per il recupero energetico".

Con riferimento ai prodotti e servizi per le costruzioni, la norma UNI EN 15804: 2019 ha aumentato il numero di indicatori ambientali da calcolare per la descrizione delle loro prestazioni. In dettaglio, la norma raccomanda l'uso di 19 indicatori di impatto ambientale distinti in "core environmental impact indicators" (indicatori di impatto ambientale principali), elencati in Tabella 7, e in "additional environmental impact indicators" (indicatori di impatto ambientale supplementari), elencati in Tabella 8.

Tabella 7. Indicatori di impatto ambientale principali – Norma UNI EN 15804: 2019

Categoria d'impatto	Indicatore	Unità di misura	Acronimo
Cambiamento climatico - totale	Potenziale di riscaldamento globale - totale	kg CO _{2eq}	GWP _t
Cambiamento climatico - contributo fossile	Potenziale di riscaldamento globale - combustibili fossili	kg CO _{2eq}	GWP _f
Cambiamento climatico - contributo biogenico	Potenziale di riscaldamento globale - biogenico	kg CO _{2eq}	GWP _b
Cambiamento climatico - contributo dell'uso del suolo e del cambiamento dell'uso del suolo	Potenziale di riscaldamento globale - uso del suolo e del cambiamento dell'uso del suolo	kg CO _{2eq}	GWP _{LULUC}
Riduzione dello strato d'ozono	Potenziale di depauperamento dello strato di ozono stratosferico	kg CFC-11 _{eq}	ODP
Acidificazione	Acidificazione potenziale - superamento accumulato	mol H ⁺ _{eq}	AP
Eutrofizzazione delle acqua dolci	Eutrofizzazione potenziale, frazione di nutrienti che raggiungono il corpo idrico di acqua dolce ricettore	kg PO _{4eq}	EP _{FW}
Eutrofizzazione delle acqua marine	Eutrofizzazione potenziale, frazione di nutrienti che raggiungono il corpo idrico di acqua marina ricettore	kg N _{eq}	EP _M
Eutrofizzazione terrestre	Eutrofizzazione potenziale - superamento accumulato	molC N _{eq}	EP _T
Formazione di ozono fotochimico	Formazione potenziale di ozono troposferico	kg NMVOC _{eq}	POCP
Depauperamento delle risorse abiotiche - minerali e metalli	Potenziale di depauperamento delle risorse abiotiche non fossili	kg Sb _{eq}	ADP _{m&m}
Depauperamento delle risorse abiotiche - combustibili fossili	Potenziale di depauperamento delle risorse abiotiche fossili (potere calorifico netto)	MJ	ADP _{fossil}
Consumo della risorsa idrica	Potenziale di deprivazione idrico	m ³ _{world eq. deprived}	WDP

Gli indicatori raccomandati per la descrizione dei flussi di risorse in ingresso sono sintetizzati nella Tabella 9. Con riferimento alla descrizione dei rifiuti prodotti e degli altri flussi in uscita dal sistema, gli indicatori sono uguali a quelli raccomandati dalla norma UNI EN 15978 (Tabella 5 e Tabella 6). Inoltre, la norma UNI EN 15804 introduce due indicatori che descrivono il contenuto di carbone biogenico del prodotto al cancello dello stabilimento industriale (Tabella 10).

Considerato il ruolo chiave del settore dell'edilizia nella transizione verso un'economia circolare, il *Joint Research Centre* della Commissione europea ha recentemente sviluppato lo schema "Level(s)" che fornisce un quadro di riferimento comune dell'Unione Europea per i principali indicatori della sostenibilità degli edifici residenziali e a uso ufficio [18]. Con riferimento alle prestazioni ambientali, lo schema Level(s) classifica gli indicatori su tre macro-obiettivi di seguito elencati:

- macro-obiettivo 1, emissioni di gas serra lungo il ciclo di vita di un edificio;
- macro-obiettivo 2, cicli di vita dei materiali circolari ed efficienti nell'uso delle risorse;
- macro-obiettivo 3, uso efficiente delle risorse idriche.

Tabella 8. Indicatori di impatto ambientale supplementari – Norma UNI EN 15804: 2019

Categoria d'impatto	Indicatore	Unità di misura	Acronimo
Emissioni di particolato	Potenziale di incidenza delle malattie causate dalle emissioni di particolato	Potenziale di incidenza	PM
Riduzione ionizzante effetti sulla salute umana	Esposizione umana potenziale all' U^{235}	$\text{kBq } U^{235}_{\text{eq}}$	IR
Ecotossicità delle acque dolci	Unità tossica comparativa potenziale per gli ecosistemi	CTU _e	E _{FW}
Tossicità per gli esseri umani-effetti non cancerogeni	Unità tossica comparativa potenziale per gli esseri umani	CTU _h	HT-nce
Tossicità per gli esseri umani-effetti cancerogeni	Unità tossica comparativa potenziale per gli esseri umani	CTU _h	HT-ce
Impatti connessi all'uso del suolo/qualità del suolo	Indice di qualità del suolo potenziale	-	LU

Tabella 9. Indicatori di consumo di risorse – Norma UNI EN 15804: 2019

Parametro	Unità di misura
Consumo di energia primaria rinnovabile escluse le risorse di energia primaria rinnovabile usate come materie prime	MJ
Consumo di risorse di energia primaria rinnovabile usate come materie prime	MJ
Consumo totale di risorse di energia primaria rinnovabile (energia primaria e risorse di energia primaria usate come materie prime)	MJ
Consumo di energia primaria non-rinnovabile escluse le risorse di energia primaria rinnovabile usate come materie prime	MJ
Consumo di risorse di energia primaria non-rinnovabile usate come materie prime	MJ
Consumo totale di risorse di energia primaria non-rinnovabile (energia primaria e risorse di energia primaria usate come materie prime)	MJ
Consumo di materie secondarie	kg
Consumo di combustibili secondari rinnovabili	MJ
Consumo di combustibili secondari non rinnovabili	MJ
Consumo di acqua	m ³

Tabella 10. Indicatori relativi al contenuto di carbone biogenico – Norma UNI EN 15804: 2019

Contenuto di carbone biogenico	Unità di misura
Carbone biogenico nel prodotto	Kg C
Carbone biogenico nell'imballaggio	Kg C

Note: 1 kg di carbone biogenico equivale a 44/12 kg CO₂

Gli indicatori del macro-obiettivo 1 sono: 1) fabbisogno di energia primaria nella fase di utilizzo, e 2) potenziale di riscaldamento globale del ciclo di vita. Gli indicatori del macro-obiettivo 2 riguardano la comunicazione della distinta dei materiali, i kg di rifiuti da costruzione e demolizione. Infine, per il macro-obiettivo 3 l'indicatore è il consumo idrico totale.

3.2.7 Requisiti di qualità dei dati

I dati di input sono elementi fondamentali dello studio, la determinazione dei criteri di scelta e del loro livello di qualità è alla base dell'affidabilità dello studio. I dati possono essere misurati, calcolati e stimati, ma in ogni caso fondamentale è la definizione del loro livello di qualità, che va a condizionare in maniera significativa l'attendibilità dei risultati finali. Nell'*ILCD Handbook* [21] la qualità dei dati viene definita sulla base della valutazione delle seguenti caratteristiche: la rappresentatività tecnologica, geografica e temporale, la completezza dell'inventario con riferimento al livello di copertura delle categorie di impatto, la precisione dei dati di inventario raccolti o modellati e l'appropriatezza e consistenza metodologica.

La rappresentatività tecnologica di un processo o di un sistema esprime il grado con cui l'inventario riflette il sistema di prodotto modellizzato con riferimento alla tecnologia impiegata. La particolare tecnologia utilizzata e il modo in cui essa viene utilizzata influenzano significativamente l'impatto ambientale del processo. Questo vale sia per gli input (energia consumata, materiali, servizi utilizzati), che per gli output (ad esempio le emissioni specifiche di processo) che possono differire considerevolmente tra tecnologie che svolgono la stessa funzione.

Nel caso degli edifici, la rappresentatività tecnologica potrebbe riguardare le prestazioni dei materiali edili impiegati e degli impianti installati nell'edificio.

Per rappresentatività geografica di un processo o di un sistema si intende il grado di rappresentatività dell'inventario riguardo alla specifica ubicazione geografica del processo, infatti, il livello e il tipo di tecnologia adottata e le sue condizioni di funzionamento (ad esempio con riferimento ai parametri di processo influenzati dalle condizioni climatiche), sono influenzati dalla posizione geografica del processo.

Con riferimento agli edifici, l'uso di dati meteorologici che siano il più rappresentativi possibile dell'ubicazione dell'edificio potrebbe costituire un aspetto rilevante nel caso in cui i consumi energetici durante la fase operativa dell'edificio non sono disponibili e devono essere calcolati.

Per rappresentatività temporale si intende il grado di rappresentatività dell'inventario rispetto al contesto temporale dello studio. L'inventario di un processo o di un sistema, che rappresenta un determinato contesto temporale (presente, futuro), deve basarsi su dati che rappresentano in modo sufficientemente appropriato il periodo di tempo dichiarato.

L'appropriatezza e consistenza metodologica forniscono una valutazione della qualità dei dati di inventario sulla base dell'approccio e delle scelte metodologiche applicate per la sua derivazione in relazione all'obiettivo e al campo di applicazione dello studio.

Con riferimento alla qualità dei dati, la UNI EN 15978 raccomanda che i dati utilizzati per i calcoli siano i più aggiornati tra quelli disponibili e che in ogni caso non siano più vecchi di 10 anni. Gli input e gli output dal sistema devono essere calcolati su una scala temporale di 100 anni a partire dall'anno di riferimento del caso studio. Scale temporali più lunghe devono essere considerate solo se le potenziali emissioni possono essere ritenute rilevanti. I dati usati devono essere verificati per la copertura geografica e tecnologica. Infine, l'influenza dei dati scelti e delle assunzioni sui risultati ottenuti deve essere valutata e comunicata.

3.2.8 Format per la comunicazione dei risultati della valutazione dell'impatto ambientale

I requisiti della relazione tecnica per la comunicazione dei risultati della valutazione ambientale sono definiti nel campo di applicazione dello studio.

La base della valutazione è la trasparenza e la tracciabilità delle informazioni utilizzate per le diverse opzioni e scelte del valutatore durante tutto il processo di calcolo. Pertanto, i risultati della valutazione ambientale devono essere presentati attraverso la relazione scientifica dello studio in modo chiaro e trasparente.

Ciò richiede che le informazioni siano presentate in modo sufficientemente dettagliato da consentire di ripercorrere e verificare l'attendibilità dello studio e una corretta interpretazione dei risultati presentati. Con riferimento agli edifici, la norma UNI EN 15978 fornisce un elenco delle informazioni che devono essere incluse nella relazione scientifica dello studio LCA. In dettaglio:

- informazioni generali sullo studio (scopo della valutazione, uso previsto, identificazione dell'edificio, informazioni su chi ha eseguito lo studio LCA e sul periodo di validità dei dati presentati);
- informazioni generali sull'oggetto della valutazione (funzione equivalente, destinazione d'uso dell'edificio, livello di occupazione, vita utile, periodo di riferimento dello studio, numero di occupanti, impianti installati, ecc.);
- dichiarazione dei confini del sistema e degli scenari ipotizzati nella modellizzazione del ciclo di vita dell'edificio (descrizione delle fasi del ciclo di vita e delle unità di processo incluse nell'analisi e delle assunzioni e delle ipotesi alla base degli scenari utilizzati per la modellizzazione delle fasi del ciclo di vita per le quali non sono disponibili informazioni reali, quali ad esempio gli scenari di ristrutturazione o di demolizione dell'edificio.
- fonte dei dati;
- elenco degli indicatori utilizzati per la valutazione e la presentazione dei risultati.
- per ciascun modulo del ciclo di vita, i valori devono essere riportati per tutti gli indicatori raccomandati.
- gli indicatori che non sono stati stimati devono essere dichiarati.

3.3 *Inventario del ciclo di vita*

L'analisi di inventario si articola nelle fasi di raccolta dei dati e definizione dei procedimenti di calcolo necessari per la modellizzazione delle fasi del ciclo di vita del sistema di prodotto esaminato. Durante l'analisi di inventario è necessario ricostruire, con riferimento ad ogni fase del ciclo di vita ed ogni unità di processo inclusa nell'analisi, il flusso in ingresso, in termini di consumo di materiali e risorse energetiche, e in uscita, in termini di emissioni di inquinanti in aria, acqua e suolo, reflui, prodotti ed eventuali co-prodotti.

In questa fase può risultare utile suddividere le varie fasi del sistema in unità di processo, in questo modo risulta più semplice individuare e quantificare le entità in ingresso e in uscita dal sistema di prodotto. Oltre ai dati relativi al processo devono essere inclusi i dati riguardanti gli impatti e i consumi relativi ai vettori energetici usati nel sistema, ai mezzi impiegati nelle fasi di trasporto e ai processi di smaltimento dei rifiuti. La raccolta dati deve includere sia informazioni quantitative che qualitative allo scopo di ottenere una modellizzazione che sia rappresentativa del sistema di prodotto oggetto di analisi.

I dati raccolti si possono distinguere in:

- dati primari, ossia dati specifici di processo, provenienti da rilevamenti diretti, che in genere sono utilizzati per la modellizzazione dei flussi di risorse energetiche e materiali (flussi di prodotto) e delle emissioni dirette di inquinanti (flussi elementari) in ingresso e in uscita dei processi di *foreground*;
- dati secondari, ossia dati medi provenienti da database ambientali, che in genere sono utilizzati nella modellizzazione dei processi di *background*, ossia per la quantificazione dei flussi elementari (in termini di consumo di materie prime ed emissioni di inquinanti in aria, acqua e suolo) associati alle risorse energetiche e materiali dei processi di *foreground*.

Inoltre, se i dati primari e secondari non sono sufficienti per la modellizzazione del sistema di prodotto, la raccolta dati può essere completata attraverso studi di letteratura (dati terziari).

Dopo aver ricostruito il flusso di materiali e risorse energetiche impiegati nel sistema di prodotto, per ogni materiale e risorsa energetica (dati primari) occorre identificare il set di dati ambientali (eco-profilo del materiale o della risorsa energetica) che sarà utilizzato per modellizzare le rispettive catene di approvvigionamento (dati secondari) e la fonte dei dati.

Il risultato dell'analisi di inventario è la tabella di inventario, che descrive il profilo ambientale o eco-profilo del sistema in esame, in cui tutti i flussi di prodotto in ingresso e in uscita sono trasformati in flussi elementari classificati nelle seguenti quattro categorie:

- Consumo materie prime;
- Emissioni in aria;
- Emissioni in acqua;

- Emissioni al suolo.

In Figura 8 è schematizzata la procedura da seguire nella fase di analisi di inventario in accordo alla ISO 14044 [10].

Nel caso degli edifici la raccolta dei dati potrebbe essere organizzata seguendo lo schema modulare illustrato in Figura 6. Per la modellizzazione delle fasi del ciclo di vita per le quali non si hanno dati disponibili (ad esempio per le fasi di costruzione, uso e fine vita) occorre sviluppare degli scenari che rappresentino delle ipotesi da applicare nella modellizzazione. Gli scenari sono definiti dalla norma UNI EN 15978 come una raccolta di ipotesi e informazioni relative a una sequenza prevista di possibili eventi futuri.

Nel prosieguo è descritta la raccolta dei dati di inventario per tutte le fasi del ciclo di vita dell'edificio con riferimento ai confini del sistema illustrati nel Paragrafo 3.2.2.

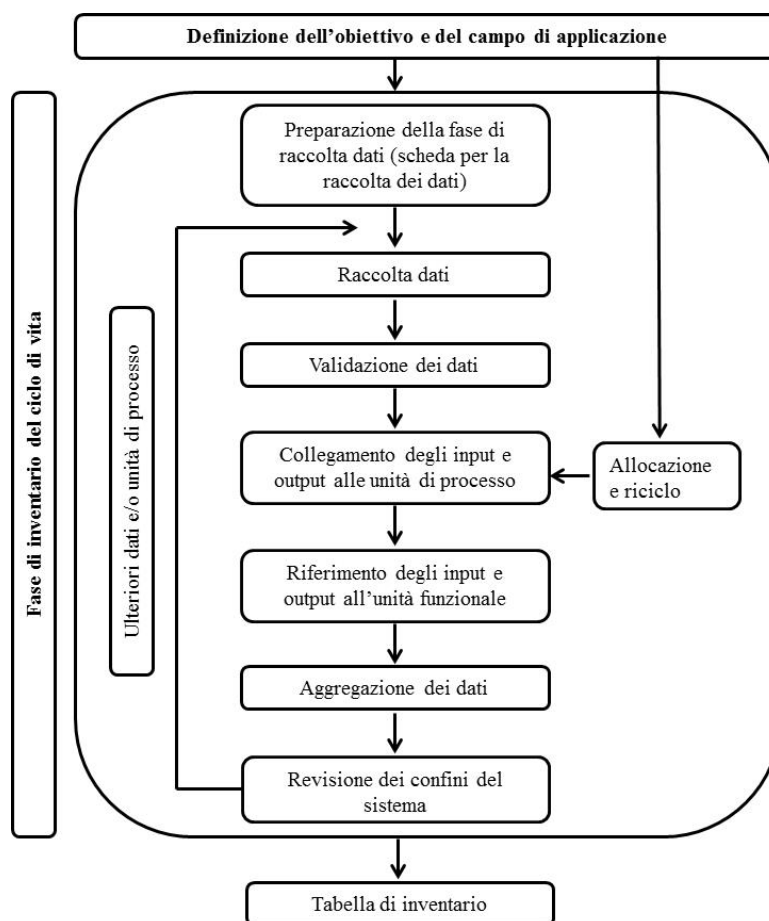


Figura 8. Procedura per l'analisi di inventario (elaborazione propria dalla ISO 14044 [10])

3.3.1 Fase di produzione dei materiali (moduli A1-A3)

Il computo metrico e la distinta dei materiali dell'edificio descrivono rispettivamente i quantitativi di materiali impiegati e le caratteristiche dei materiali stessi contenuti negli elementi tipologici di un edificio (ad esempio, nelle fondazioni, nei pilastri, pareti esterne, ecc.). In Tabella 11 è riportato a titolo semplificato una possibile organizzazione dei dati relativi ai moduli di produzione (A1-A3).

Tabella 11. Esempio di organizzazione dei dati raccolti con riferimento ai moduli di produzione (A1-A3)

Tipologia di materiale	Quantità	Elemento edilizio
Acciaio	1.200 kg	Fondazioni (1.000 kg)
		Pilastri (200 kg)
Cemento	257.000 kg	Fondazioni (225.000 kg)
		Pilastri (32.000 kg)
Legno	180 kg	Porte interne (135 kg)
		Porte esterne (45 kg)
...

3.3.2 Fase di costruzione (moduli A4-A5)

Con riferimento ai moduli di costruzione (A4-A5) i dati da raccogliere riguardano i seguenti aspetti:

- il trasporto dei materiali e dei prodotti da costruzione, dei materiali ausiliari e delle apparecchiature dalla fabbrica al cantiere;
- il trasporto in cantiere di macchinari e attrezzature utilizzati durante il processo di costruzione;
- il trasporto di materiali, prodotti, rifiuti e attrezzature all'interno del sito di costruzione;
- il quantitativo di materiale perso e/o danneggiato durante il trasporto;
- i consumi di energia elettrica, di combustibili e di materiali, inclusi i materiali ausiliari, per la realizzazione di opere temporanee, per i processi di trasformazione dei materiali effettuati in cantiere e per la messa in opera di materiali e di componenti edilizi nell'edificio;
- il quantitativo di rifiuti generati in cantiere.

I materiali ausiliari includono ad esempio l'acqua usata per i processi di trasformazione dei materiali che avvengono in cantiere, l'olio lubrificante utilizzato nelle attrezzature, i detersivi usati per le operazioni di pulizia eseguite in loco, ecc.

Per ciascun materiale/componente/attrezzatura occorre raccogliere informazioni relative all'ubicazione della fabbrica in cui è prodotto, allo scopo di poter stimare la distanza di approvvigionamento (fabbrica – cantiere), e al mezzo di trasporto utilizzato. Inoltre, in questa fase occorre stimare la distanza percorsa per inviare i rifiuti generati in cantiere agli impianti di trattamento e raccogliere informazioni sulla tipologia di trattamento finale (conferimento in discarica, riuso, riciclo, ecc.). Quando non è possibile disporre di dati primari, il calcolo può essere effettuato ipotizzando delle distanze medie.

I dati relativi ai consumi di energia elettrica e di materiali ausiliari relativi alla fase di costruzione possono essere ricostruiti a partire dalle fatture dei contratti di fornitura dei servizi e dei materiali ausiliari relativi al cantiere. Tuttavia, nei casi di valutazione preliminare di un edificio di nuova costruzione e in tutti i casi in cui i dati necessari per la modellizzazione della fase di costruzione non sono disponibili, essi possono essere stimati sulla base di studi specifici di settore oppure possono essere sviluppati degli scenari ipotetici di costruzione avvalendosi di esperti del settore.

3.3.3 Fase d'uso (moduli B1-B7)

Con riferimento ai moduli di fase d'uso (B1-B7) i dati da raccogliere riguardano i seguenti aspetti:

- emissioni di inquinanti dai materiali di rivestimento della facciata, del tetto e da altre superfici (modulo B1);
- quantitativi di materiali, inclusi i materiali ausiliari, il consumo di risorse energetiche, i trasporti e la gestione di fine vita dei rifiuti generati connessi alle fasi di manutenzione, riparazione, sostituzione e ristrutturazione (moduli B2-B5);

- il consumo di energia durante la fase operativa dell'edificio;
- il consumo idrico durante la fase operativa dell'edificio.

La quantificazione delle emissioni dai materiali edilizi può essere basata sui dati forniti dai produttori. Tuttavia, poiché il rilascio di sostanze dai materiali dipende dalle condizioni ambientali (temperatura, umidità, ecc.) si potranno sviluppare degli scenari che tengano conto dell'influenza di questi parametri. I moduli della fase di utilizzo relativi alla manutenzione, alla riparazione, alla sostituzione e alla ristrutturazione (B2-B5) dei materiali, prodotti e impianti, in genere di difficile reperimento, dovranno basarsi sullo sviluppo di scenari che tengono conto della vita utile richiesta dai clienti o della vita utile stimata per i vari componenti e materiali edili. Gli scenari possono essere basati su dati statistici o requisiti normativi nel caso di edifici di nuova costruzione. Mentre nel caso di edifici esistenti la modellizzazione può essere basata su dati reali, se disponibili.

Per la modellizzazione dei moduli B6 (consumo di energia) e B7 (consumo di acqua durante la fase operativa dell'edificio) occorre calcolare, rispettivamente, il fabbisogno energetico e idrico durante la fase operativa dell'edificio.

Il metodo di calcolo di base per la determinazione del fabbisogno energetico (energia finale) di un edificio è stabilito dalle norme CEN su cui si basa la direttiva 2010/31/UE [12] sulla prestazione energetica nell'edilizia. Un elenco non esaustivo di consumi energetici da compendiare, comunque non esaustivo, è il seguente:

- l'energia consumata dall'uso dei sistemi di riscaldamento, raffreddamento, ventilazione,
- acqua calda sanitaria,
- illuminazione e dispositivi di controllo automatico [12].

I consumi energetici connessi ad altri dispositivi integrati negli edifici (ad esempio ascensori, scale mobili, sistemi antincendio, di sicurezza e di comunicazione) e/o a quelli non integrati ad esso (ad es. computer, lavatrici, frigoriferi) dovranno essere riportati separatamente come informazione aggiuntiva.

Gli scenari per il consumo di energia nella fase operativa dell'edificio dovrebbero essere sviluppati sulla base della norma EN ISO 52000-1:2017 [36] recepita in Italia come UNI EN ISO 52000-1:2018 "Prestazione energetica degli edifici - Valutazione globale EPB - Parte 1: Struttura generale e procedure". Tuttavia, si possono applicare metodi alternativi che devono comunque essere descritti e documentati.

Nel caso di edifici esistenti i consumi energetici possono essere monitorati oppure possono essere stimati a partire dalle fatture dei contratti di fornitura dell'energia. Inoltre, possono essere utilizzati software per le simulazioni energetiche di sistemi edificio-impianto in regime dinamico [37].

Lo scenario relativo alla stima del consumo di acqua deve includere (ma non essere limitato a) il consumo di acqua potabile per scopi sanitari e ove possibile e opportuno altri usi dell'acqua direttamente correlati all'oggetto della valutazione (ad esempio l'acqua utilizzata a scopo irriguo), includendo sia i flussi d'acqua in ingresso che in uscita. Gli scenari dovrebbero essere basati su dati statistici, dati normativi o dati reali ove disponibili.

3.3.4 Fase di fine vita (moduli C1-C4)

Per la modellizzazione dei moduli di fine vita dell'edificio devono essere ricostruiti i flussi di risorse energetiche e di materiali in ingresso e le emissioni di inquinanti connessi alle attività di decostruzione/demolizione (modulo C1), di trasporto dei materiali/rifiuti ai siti di trattamento di fine vita (modulo C2), di trattamento dei rifiuti (modulo C3) e di smaltimento (modulo C4).

Per la modellizzazione dei moduli di fine vita dovranno essere sviluppati degli scenari sulla base della tipologia di edificio che riflettano nel modo più accurato possibile le pratiche locali.

Per la modellizzazione del modulo "C1 – decostruzione" devono essere ricostruiti i flussi di risorse energetiche, materiali ed emissioni di inquinanti in ingresso e in uscita e relativi alle attività che hanno luogo nel cantiere per la decostruzione dell'edificio. Lo scenario dovrebbe essere sviluppato consultando specialisti del settore.

La stima dei rifiuti e dei materiali derivanti dai processi di smantellamento deve basarsi su un'analisi della distinta dei materiali e del computo estimativo relativi all'edificio in questione.

Le ipotesi sulle pratiche di smontaggio, riutilizzo e riciclaggio devono basarsi su soluzioni e tecnologie esistenti.

In tale contesto, la Commissione Europea ha pubblicato una guida su come effettuare verifiche pre-demolizione, che fornisce alcuni orientamenti generali sul processo e una serie di modelli per compilare l'inventario degli elementi e dei materiali edilizi [38].

Per la modellizzazione del modulo "C2 – trasporto", gli scenari di trasporto devono specificare per ogni categoria di materiali o prodotti il tipo di trasporto utilizzato, le distanze percorse e il consumo di carburante necessario per il loro spostamento dal cantiere al sito di smaltimento finale o al confine del sistema per i materiali per i quali è previsto il riutilizzo, il riciclaggio e il recupero di energia.

Per la modellizzazione del modulo "C3 – trattamento dei rifiuti" devono essere ricostruiti i flussi di risorse energetiche, materiali ed emissioni di inquinanti in ingresso e in uscita e relativi a tutti i processi di trattamento dei rifiuti, ad esempio cernita, processi preparatori per il riutilizzo, il riciclaggio e il recupero di energia, fino al momento in cui essi non possono più essere considerati rifiuti o acquisiscono un valore economico positivo. Tali scenari devono basarsi su soluzioni e tecnologie esistenti.

Per la modellizzazione del modulo "C4 – smaltimento" devono essere ricostruiti i flussi di risorse energetiche, materiali ed emissioni di inquinanti in ingresso e in uscita connessi ai processi di smaltimento finale.

3.3.5 Benefici e oneri oltre i confini del sistema (modulo D)

Nel modulo D sono inclusi gli oneri o i benefici al di fuori dei confini del sistema. Questa fase in genere viene modellizzata sulla base di scenari. In dettaglio, devono essere ricostruiti i flussi di risorse energetiche, materiali ed emissioni di inquinanti in ingresso e in uscita connessi ai processi come il taglio in formati più piccoli o la pulizia per il riutilizzo, la rifusione dei metalli o la pulitura/selezione degli aggregati per il riciclaggio e i processi di combustione per il recupero energetico. Inoltre, devono essere conteggiati i flussi in uscita di combustibili e materiali secondari allo scopo di poter quantificare i benefici connessi ai processi primari di produzione sostituiti.

3.4 Valutazione degli impatti ambientali (Life Cycle Impact Assessment - LCIA)

La fase di valutazione dell'impatto ha lo scopo di valutare la portata di potenziali impatti ambientali connessi ai risultati dell'analisi di inventario di ciclo di vita.

La valutazione degli impatti ambientali si articola nelle quattro fasi di seguito elencate:

- classificazione (obbligatoria);
- caratterizzazione (obbligatoria);
- normalizzazione (opzionale);
- ponderazione (opzionale).

Nella fase di classificazione ciascun flusso elementare identificato nell'analisi di inventario viene classificato sulla base dei problemi ambientali a cui può potenzialmente contribuire. Alla fine di questa fase, all'interno di ciascuna categoria di impatto ambientale saranno contenuti tutti gli input e gli output del ciclo di vita che potenzialmente possono contribuire all'impatto considerato (la stessa sostanza o materiale potrà essere quindi contenuta all'interno di più categorie ambientali).

Nella fase di caratterizzazione le sostanze classificate nella fase precedente sono moltiplicate per il corrispondente fattore di caratterizzazione nella categoria di impatto considerata. Ciascuna sostanza contribuisce in maniera differente allo stesso problema ambientale, il fattore di caratterizzazione misura l'intensità dell'effetto di una sostanza sul problema ambientale considerato rispetto ad una sostanza di riferimento. I flussi in ingresso e in uscita, moltiplicati per i corrispondenti fattori di caratterizzazione, costituiscono delle quantità omogenee che, sommate, forniscono l'indicatore di impatto in ciascuna categoria.

Gli indicatori degli impatti ambientali potenziali sono calcolati mediante l'equazione 1:

$$Indicatore_j: \sum_{i=1}^n m_i \cdot FC_{i,j} \quad (1)$$

dove:

$Indicatore_j$ è l'indicatore di impatto ambientale nella categoria j ;

m_i è la massa della sostanza i -esima che contribuisce all'impatto nella categoria j ;

$FC_{i,j}$ è il fattore di caratterizzazione della sostanza i -esima nella categoria j ;

n è il numero delle sostanze inventariate che contribuiscono all'impatto nella categoria j .

Ad esempio, la sostanza di riferimento della categoria di impatto ambientale "Global Warming Potential - GWP" è il diossido di carbonio (CO_2). I fattori di caratterizzazione delle sostanze che contribuiscono al GWP forniscono una misura della capacità di ognuna di esse di assorbire calore, nell'arco di un periodo prestabilito di tempo, a seguito dell'emissione istantanea di 1 kg della sostanza nell'atmosfera odierna relativamente a quello generato da 1 kg del gas di riferimento. Questa operazione di standardizzazione consente di esprimere i quantitativi di gas ad effetto serra in $kg\ CO_{2equivalente}$. I quantitativi di gas ad effetto serra espressi in $kg\ CO_{2equivalente}$ sommati restituiscono l'impatto sul GWP.

Nella Tabella 12 sono riportati a titolo di esempio alcuni fattori di caratterizzazione per la categoria di impatto GWP di alcuni gas a effetto serra.

Tabella 12. Esempi di fattori di caratterizzazione per di alcuni gas a effetto serra [39]

Gas a effetto serra	Fattore di caratterizzazione ($kgCO_{2eq}/kg_{sostanza}$) (IPCC, 2013)
Diossido di carbonio	1
Metano	30,5
Protossido di azoto	265
Tricolorofluorometano	4.660

Le fasi di normalizzazione e ponderazione sono opzionali. Durante la fase di normalizzazione i risultati della caratterizzazione sono rapportati ad un valore di riferimento rappresentato generalmente da dati medi su scala mondiale, europea o nazionale e riferiti ad un determinato intervallo di tempo (ad esempio, un valore di riferimento può essere rappresentato dall'impatto causato da un individuo medio in una specifica categoria ambientale durante un prefissato lasso temporale).

Infine, nella fase di ponderazione i valori normalizzati sono prima moltiplicati per dei pesi, che esprimono la criticità attribuita a ciascun problema ambientale e, successivamente, addizionati fra loro allo scopo di esprimere l'impatto mediante un indice sintetico. Presentare i risultati attraverso un indice sintetico comporta la perdita di informazioni e la riduzione della trasparenza e ripercorribilità dello studio, di conseguenza è buona pratica presentare i risultati in maniera disaggregata.

Con riferimento agli edifici, in questa fase della metodologia LCA sono stimati gli indici identificati nella fase di definizione del campo di applicazione e riportati nella Tabella 3 e nella Tabella 4 con riferimento alla UNI EN 15978.

3.5 Interpretazione (Life Cycle Interpretation)

L'interpretazione è la fase della LCA nella quale i risultati ottenuti nelle fasi di analisi di inventario e di valutazione degli impatti di ciclo di vita vengono combinati fra loro al fine di trarre conclusioni e raccomandazioni in coerenza con l'obiettivo e il campo di applicazione dello studio.

La fase di interpretazione consiste in un procedimento iterativo di riesame dello studio LCA, delle assunzioni e dei dati utilizzati al fine di valutarne la correttezza e la consistenza rispetto agli obiettivi e al campo di applicazione dello studio e garantire la loro affidabilità nel trarre conclusioni che siano basate su considerazioni scientifiche e oggettive.

Secondo lo standard ISO 14044 [10] la fase di interpretazione deve prevedere l'identificazione degli aspetti significativi e una valutazione che consiste nella verifica di completezza, sensibilità e coerenza dello studio. Infine, sulla base del risultato delle fasi precedenti saranno tratte le conclusioni e raccomandazioni. Nella Figura 9 sono illustrati gli elementi della fase di interpretazione e le interrelazioni con le altre fasi della LCA. Nella fase di identificazione dei fattori significativi i risultati ottenuti nell'analisi d'inventario e nella valutazione degli impatti ambientali devono essere presentati con riferimento alla fase del ciclo di vita e al processo cui si riferiscono, allo scopo di facilitare l'individuazione degli aspetti significativi e fornire indicazioni su possibili azioni volte al miglioramento delle "performance" ambientali in relazione all'obiettivo della LCA.

Gli aspetti significativi possono comprendere dati di inventario, quali energia, emissioni, scarichi, rifiuti, ecc.; categorie di impatto, come l'uso delle risorse, i cambiamenti climatici, e contributi significativi dalle fasi del ciclo di vita ai risultati LCI o LCIA, come singole unità di processo o gruppi di processi come i trasporti e la produzione di energia.

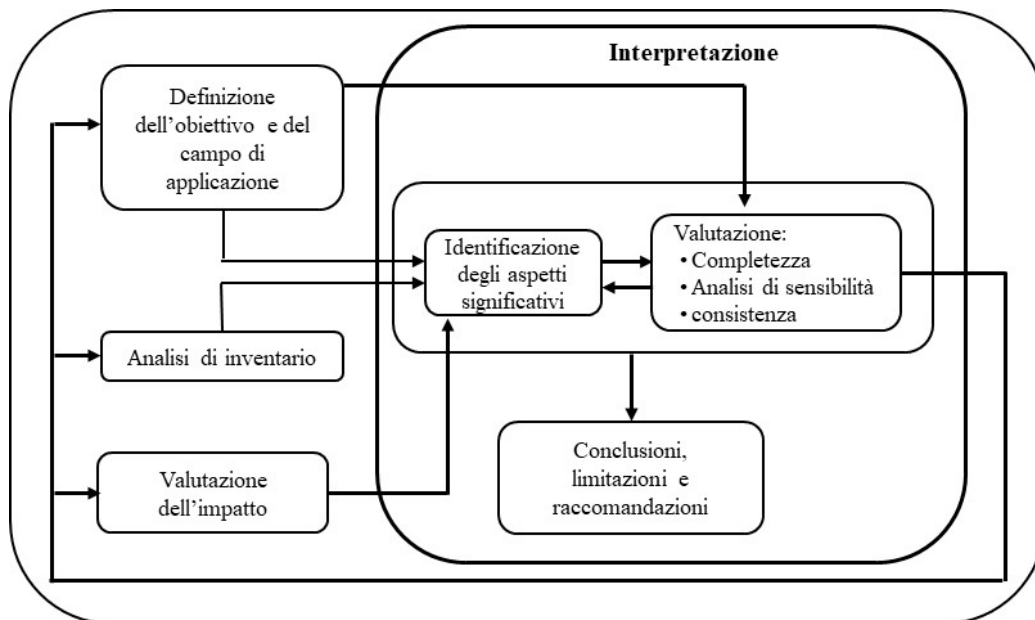


Figura 9. Schematizzazione della fase di interpretazione (Elaborazione propria dallo standard ISO 14044 [10]).

Con riferimento alla LCA applicata agli edifici, nella fase di interpretazione dovrebbe essere evidenziato il contributo delle singole fasi (produzione dei materiali, costruzione, fase d'uso e fine vita) negli impatti di ciclo di vita e, con riferimento agli impatti associati alle fasi di produzione e d'uso dovrebbe essere evidenziato, rispettivamente, il contributo di ogni componente e materiale edilizio e di ogni consumo energetico.

Inoltre, in questa fase si dovrebbero identificare le scelte metodologiche (regole di allocazione e di *cut-off*, confini del sistema, modelli di caratterizzazione e raggruppamento dei dati, ecc.) adottate durante le fasi di inventario e di valutazione degli impatti, che potrebbero aver influenzato maggiormente l'esito della LCA.

L'obiettivo della fase di valutazione è stabilire il grado di affidabilità dello studio di LCA e dei risultati ottenuti allo scopo di poter trarre conclusioni e fornire raccomandazioni.

La valutazione include:

- il controllo di completezza;
- l'analisi di sensibilità;
- il controllo di consistenza.

Il controllo della completezza ha lo scopo di stabilire se tutte le informazioni rilevanti e i dati necessari per l'interpretazione dei risultati sono disponibili e completi. Se qualche informazione, ritenuta necessaria per valutare gli aspetti significativi, risulta mancante o incompleta, le fasi di LCI e LCIA devono essere revisionate o, in alternativa, l'obiettivo e la definizione del campo di applicazione devono essere rivisti ed adeguati alla disponibilità di dati e quindi al massimo grado di completezza ottenibile. Se le informazioni mancanti sono considerate non necessarie, occorre indicarne il motivo. Come regola generale, si raccomanda di includere nell'inventario il maggior numero possibile di flussi elementari per consentire di eseguire una valutazione e un'analisi d'impatto esaustive. I controlli di completezza sull'inventario sono eseguiti al fine di determinare il grado di completezza dei dati raccolti e se i criteri di *cut-off* stabiliti della fase di definizione del campo di applicazione della LCA sono stati rispettati.

L'analisi di sensibilità ha lo scopo di valutare l'affidabilità dei risultati finali e delle conclusioni e raccomandazioni che derivano dallo studio determinando quanto essi sono influenzati dall'incertezza dei dati e dalle scelte e assunzioni effettuate. L'analisi di scenario e di incertezza sono i metodi quantitativi a supporto dell'analisi di sensibilità. Il controllo di sensibilità dovrebbe essere strutturato seguendo le fasi della LCA. Ad esempio, con riferimento al campo di applicazione l'analisi di sensibilità ha lo scopo di verificare l'appropriatezza e i limiti connessi alle scelte metodologiche effettuate. In particolare, l'analisi riguarda i seguenti aspetti:

- identificazione del sistema di prodotto da studiare;
- identificazione della funzione e dell'unità funzionale del sistema;
- identificazione del confine del sistema e quantificazione dei criteri di *cut-off*;
- gestione dei processi multifunzionali;
- selezione delle categorie di impatto ambientale e dei metodi di valutazione dell'impatto;
- identificazione dei requisiti di qualità dei dati;
- identificazione di possibili limiti all'uso e all'interpretazione dei risultati ottenuti.

L'analisi di sensibilità può essere effettuata confrontando diversi scenari, ad esempio con riferimento alla gestione dei processi multifunzionali applicando i diversi approcci disponibili e confrontando i risultati. Per gli altri aspetti, può essere eseguita un'analisi qualitativa basata sul giudizio di esperti e/o su esperienze precedenti.

Con riferimento all'analisi di inventario del ciclo di vita l'analisi di sensibilità ha lo scopo di verificare l'appropriatezza e i limiti connessi all'analisi di inventario in relazione:

- alla rappresentatività geografica, tecnologica e temporale per il sistema analizzato;
- alla completezza in relazione alle categorie di impatto considerate nell'analisi;
- alla loro precisione.

L'influenza dell'incertezza dei dati può essere valutata facendo variare i dati e i parametri entro i limiti indicati dalle stime di incertezza e analizzando l'influenza sui risultati ottenuti.

Con riferimento alla valutazione degli impatti ambientali di ciclo di vita, l'analisi di sensibilità riguarda i seguenti aspetti:

- appropriatezza delle categorie e dei metodi di valutazione dell'impatto selezionati;
- appropriatezza dei fattori di normalizzazione e pesatura selezionati e loro corretta applicazione;
- precisione ottenuta nei risultati di LCIA.

L'obiettivo dell'analisi di consistenza è determinare se le ipotesi, i metodi e i dati sono coerenti con l'obiettivo e il campo di applicazione. Le questioni metodologiche rilevanti sono in particolare gli approcci adottati nella modellazione LCI (ad esempio attribuzionale o consequenziale, gestione della multi-funzionalità) ma anche la definizione dei confini del sistema, la scelta delle categorie di impatto ambientale, ecc.

Infine, la fase dell'interpretazione "conclusioni, limitazioni e raccomandazioni" ha l'obiettivo di trarre conclusioni e raccomandazioni e di identificare i limiti dello studio.

Questa fase deve essere svolta in maniera interattiva con gli altri elementi della fase di interpretazione in modo da valutare e comunicare i fattori significativi, i limiti dello studio, la metodologia applicata e i risultati ottenuti nei controlli di completezza, sensibilità e coerenza e sulla base di essi trarre conclusioni preliminari. Una volta stabilito che esse sono coerenti con l'obiettivo e il campo di applicazione dello studio si può procedere con la redazione del rapporto conclusivo. Le raccomandazioni devono essere basate sulle conclusioni dello studio e correlate all'applicazione prevista.

3.6 Limiti della LCA

La norma ISO 14040 riconosce una serie di limiti della LCA, elencati sinteticamente di seguito:

- la natura delle scelte e delle assunzioni fatte nella LCA può essere soggettiva, per questo motivo, al fine di garantire la trasparenza e la ripercorribilità dello studio, il campo di applicazione, le assunzioni e le metodologie adottate devono essere chiaramente indicate;
- i modelli utilizzati per l'analisi di inventario o per valutare l'impatto ambientale vanno impiegati in relazione agli obiettivi dello studio e non sono generalizzabili per la computazione di qualsiasi impatto ambientale e per qualsivoglia applicazione;
- i risultati degli studi di LCA centrati su questioni regionali o globali possono non essere adatti alle applicazioni di prodotto e viceversa;
- l'accuratezza degli studi di LCA può essere limitata dall'accessibilità e dalla disponibilità dei dati e dalla loro qualità.

L'elenco sopra riportato, certamente non esaustivo, mostra come una chiara esplicitazione di limiti e assunzioni nella computazione dell'eco-profilo e della variabilità dei risultati che ne conseguono è essenziale nell'uso di questo metodo, di grande valenza come metrica della sostenibilità ma proprio per questo da fondare su basi tecniche e scientifiche robuste, trasparenti e ripercorribili. Fragili eco-gerarchie basate su dati incompleti, obsoleti, provenienti da luoghi geograficamente non rappresentativi, giusto per menzionare alcuni possibili carenze di generici studi, condurrebbero i decisori verso l'adozione di soluzioni e strategie non adeguate.

4 Analisi energetica di un edificio: il concetto di energia incorporata

Un edificio consuma energia in tutte le sue fasi del ciclo di vita, dall'estrazione delle materie prime fino alla demolizione a fine vita includendo le fasi di costruzione, uso, manutenzione e ristrutturazione.

In letteratura, l'energia consumata da un edificio viene spesso classificata in:

- energia incorporata (*embodied energy*);
- energia operativa (*operational energy*).

Per energia incorporata di un edificio si intende l'energia primaria complessivamente impiegata durante le fasi di approvvigionamento delle materie prime, produzione dei materiali e dei componenti edili, le fasi di costruzione, manutenzione, ristrutturazione e demolizione dell'edificio e di trattamento finale dei rifiuti [40–43].

In base a questa definizione l'energia incorporata include: 1) l'energia richiesta durante la fase di pre-costruzione, che consiste nell'energia necessaria per l'estrazione e la trasformazione delle materie prime e i processi di produzione dei materiali e componenti edili e degli impianti di servizio; 2) l'energia consumata nella fase di costruzione dell'edificio, ossia l'energia consumata per la messa in opera dei materiali e dei componenti edili e degli impianti di servizio; 3) l'energia consumata nelle fasi di manutenzione e ristrutturazione dell'edificio; 4) l'energia richiesta durante la fase di fine vita, che include l'energia necessaria per la demolizione dell'edificio e i trattamenti di fine vita dei materiali e dei componenti edili; 5) l'energia richiesta durante i processi di trasporto dall'estrazione delle materie prime al fine vita.

L'energia impiegata durante la fase operativa è l'energia consumata durante la fase d'uso per il riscaldamento, il raffrescamento, la produzione di acqua calda sanitaria, l'illuminazione e il funzionamento delle apparecchiature elettriche.

Con riferimento alla stima dell'energia incorporata e dell'energia operativa di un edificio, gli indicatori previsti dalla UNI EN 15978 sono riportati in Tabella 4.

Un'analisi energetica di ciclo di vita di un edificio dovrebbe includere sia l'energia incorporata che l'energia operativa. Tuttavia, l'attenzione della comunità scientifica sull'energia incorporata è piuttosto recente. Fino a poco tempo fa, la ricerca sul risparmio energetico nel settore edile era infatti focalizzata sull'energia operativa, poiché negli edifici standard essa è responsabile per il 70-90% dei consumi energetici di ciclo di vita. Di conseguenza, l'energia incorporata nei materiali da costruzione e nei componenti edili è stata tradizionalmente trascurata nelle analisi energetiche, poiché negli edifici standard rappresenta una piccola frazione del consumo energetico di ciclo di vita (10-20%) [41]. Tuttavia l'introduzione di stringenti normative di risparmio energetico a livello europeo nel comparto edilizio ha portato alla realizzazione di nuovi edifici molto efficienti in cui il consumo energetico in fase d'uso è talmente ridotto che le altre fasi del ciclo di vita, in particolare le fasi di produzione dei materiali e di manutenzione/ristrutturazione, hanno assunto una rilevanza crescente. In dettaglio, la Direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica dell'edilizia [44] (modificata dalla Direttiva 2018/31/UE [1]) ha introdotto il concetto di "Edificio a energia quasi zero" (*nearly zero-energy buildings* – NZEB), ossia un edificio ad altissima prestazione energetica, in cui il fabbisogno energetico molto basso o quasi nullo dovrebbe essere coperto in misura molto significativa da energia prodotta da tecnologie alimentate da fonti rinnovabili, compresa l'energia rinnovabile prodotta in loco o nelle vicinanze [44].

La transizione dagli edifici standard agli edifici a basso consumo energetico comporta la riduzione del contributo dell'energia operativa e l'aumento dell'incidenza dell'energia incorporata sui consumi energetici totali di ciclo di vita [45–48]. Pertanto, nell'analisi degli edifici a basso consumo energetico diventa necessario adottare un approccio basato sul ciclo di vita per confrontare i risparmi energetici ottenuti rispetto all'incremento dell'energia incorporata nei materiali e nei processi necessari per la costruzione, manutenzione e demolizione dell'edificio.

Diversi studi di letteratura hanno dimostrato l'aumento del contributo dell'energia incorporata nei consumi energetici di ciclo di vita negli edifici a basso consumo energetico [41,49–52]. In dettaglio, Sartori e Hestnes [50] affermano che, mentre in un edificio convenzionale l'energia incorporata contribuisce per il 2-38% al consumo energetico di ciclo di vita, in un edificio a basso consumo energetico il suo contributo può rappresentare fino al 46%. Thormark [51] afferma che in un edificio a basso consumo energetico l'energia incorporata può rappresentare il 40-60% dell'energia totale di ciclo di vita. Cellura et al. [41] applicano la LCA per eseguire un'analisi energetica di un edificio ad energia netta quasi zero e stimano che l'energia incorporata può contribuire per il 68% al consumo di energia primaria di ciclo di vita. Chastas et al. [52] affermano che negli edifici convenzionali la quota di energia incorporata sui consumi energetici di ciclo di vita è del 6-20%, mentre negli edifici a basso consumo energetico contribuisce per il 26-57%.

Da questi studi di letteratura risulta un'ampia gamma di variazione del contributo percentuale dell'energia incorporata sul consumo energetico di ciclo di vita degli edifici a basso consumo energetico.

L'energia incorporata in un edificio è strettamente connessa ai materiali e componenti edili impiegati per la sua costruzione e all'ubicazione geografica del caso studio [47,53].

I materiali edili sono caratterizzati da un'ampia variazione del contenuto di energia primaria (Figura 10), per cui la scelta di un materiale edile rispetto ad un altro contribuisce significativamente all'ammontare complessivo dell'energia incorporata in un edificio.

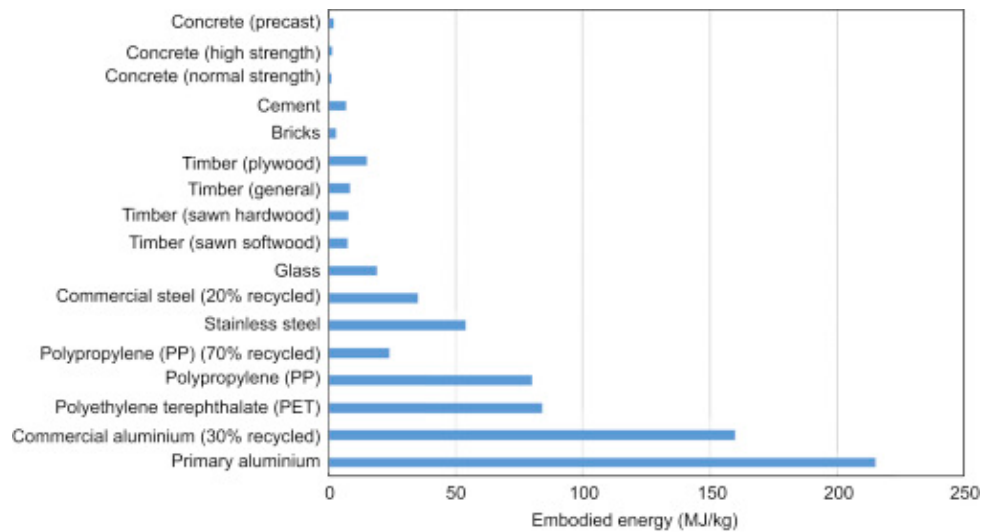


Figura 10. Energia incorporata per diversi materiali da costruzione [54]

Il sito geografico influenza il contenuto di energia incorporata poiché le pratiche di produzione dei materiali e componenti edili, le tecniche costruttive, il mix energetico di produzione impiegato, ecc. sono caratteristiche specifiche [47,53] e influenzano il contenuto di energia incorporata di tutte le fasi del ciclo di vita dell'edificio.

La quantificazione dell'energia incorporata dipende anche da una serie di aspetti metodologici che possono altresì influenzare in modo significativo i risultati ottenuti. I parametri metodologici chiave nella quantificazione dell'energia incorporata comprendono la definizione dei confini del sistema, i metodi di quantificazione adoperati, la forma di energia e le tipologie di energia incluse nei calcoli.

Con riferimento ai principali aspetti metodologici, l'analisi di letteratura sull'energia incorporata negli edifici ha evidenziato l'assenza di una definizione univoca. Una delle principali differenze riscontrate è, essenzialmente, connessa alle fasi del ciclo di vita incluse nei confini del sistema. In dettaglio, sulla base dei confini del sistema stabiliti nello studio è possibile calcolare l'energia incorporata negli edifici in accordo ai seguenti approcci:

1. dalla culla al cancello (*from cradle to gate*). Tale approccio considera l'energia primaria richiesta per l'estrazione e la trasformazione delle materie prime e per le fasi di produzione dei materiali e dei componenti edili;
2. dalla culla al sito (*from cradle to site*). Tale approccio considera l'energia primaria richiesta per l'estrazione e la trasformazione delle materie prime e per le fasi di produzione dei materiali e dei componenti edili e il trasporto dei prodotti finiti al sito di costruzione;
3. dalla culla alla fine della fase di costruzione (*from cradle to end of construction*). Tale approccio considera l'energia primaria richiesta per l'estrazione e la trasformazione delle materie prime e per le fasi di produzione dei materiali e dei componenti edili e il trasporto dei prodotti finiti al sito di costruzione e la costruzione dell'edificio;
4. dalla culla alla conclusione della fase d'uso (*from cradle to end of use*). Tale approccio considera l'energia primaria richiesta per l'estrazione e la trasformazione delle materie prime e per le fasi di produzione dei materiali e dei componenti edili e il trasporto dei prodotti finiti al sito di costruzione e la costruzione dell'edificio, le attività di manutenzione e ristrutturazione;
5. Dalla culla alla tomba (*from cradle to grave*). Tale approccio considera l'energia primaria richiesta per l'estrazione e la trasformazione delle materie prime e per le fasi di produzione dei materiali e dei componenti edili e il trasporto dei prodotti finiti al sito di costruzione e la costruzione dell'edificio, le attività di manutenzione e ristrutturazione, la fase di fine vita dell'edificio che include la demolizione dell'edificio e il trattamento e smaltimento dei rifiuti.

La Figura 11 illustra i moduli della UNI EN 15978 da includere nell'analisi in base all'approccio selezionato nella definizione dei confini del sistema dello studio.

Un'altra differenza relativa alla definizione dei confini del sistema è la classificazione dell'energia incorporata in termini di componenti energetiche incorporate dirette e indirette.

L'energia incorporata in un edificio, e più in generale in un materiale, può essere classificata in energia incorporata diretta ed indiretta [55].

Con riferimento all'edificio, l'energia incorporata diretta è l'energia consumata nelle operazioni che avvengono in cantiere, ossia le attività di pre-costruzione, i processi di trasformazione in situ di materiali edili, la costruzione e tutte le attività di trasporto connesse alle attività interne al cantiere. L'energia indiretta è l'energia consumata nella produzione dei materiali da costruzione, nei processi di ristrutturazione e demolizione degli edifici. L'energia incorporata indiretta può essere a sua volta classificata in:

- energia incorporata iniziale (*initial embodied energy*), che include i processi di estrazione e trasformazione delle materie prime, il trasporto dal sito di estrazione/trasformazione alla fabbrica in cui avviene la produzione, la fase di produzione dei materiali da costruzione e la consegna del prodotto finito al cantiere;
- energia incorporata periodica relativa alla manutenzione e ristrutturazione dell'edificio (*recurrent embodied energy*);
- energia incorporata di demolizione consumata nelle fasi di demolizione e smaltimento dei materiali da costruzione (*demolition embodied energy*), che include l'energia necessaria per riciclare e riutilizzare alcuni componenti e smaltirne altri trasportando detriti e rifiuti negli impianti prescelti (ad esempio discariche o inceneritori).



Figura 11. Moduli della UNI EN 15978 inclusi nell'analisi in base all'approccio selezionato nella definizione dei confini del sistema dello studio

Con riferimento alla forma di energia e alle tipologie di energia incluse nei calcoli, in letteratura l'energia incorporata viene in genere espressa sia in termini di energia primaria che in termini di energia finale [50,56]. L'energia primaria è convenzionalmente definita come l'energia contenuta in una risorsa energetica naturale (fonte primaria) (ad esempio, carbone, petrolio greggio, energia solare, uranio) che non ha subito nessuna conversione o trasformazione da parte dell'uomo. L'energia finale è l'energia resa disponibile all'utenza. Pertanto, l'energia primaria e quella finale non sono direttamente comparabili.

In Figura 12 è riportato uno schema relativo alla produzione di energia finale (E_{fin}) a partire dallo sfruttamento di una fonte energetica primaria.

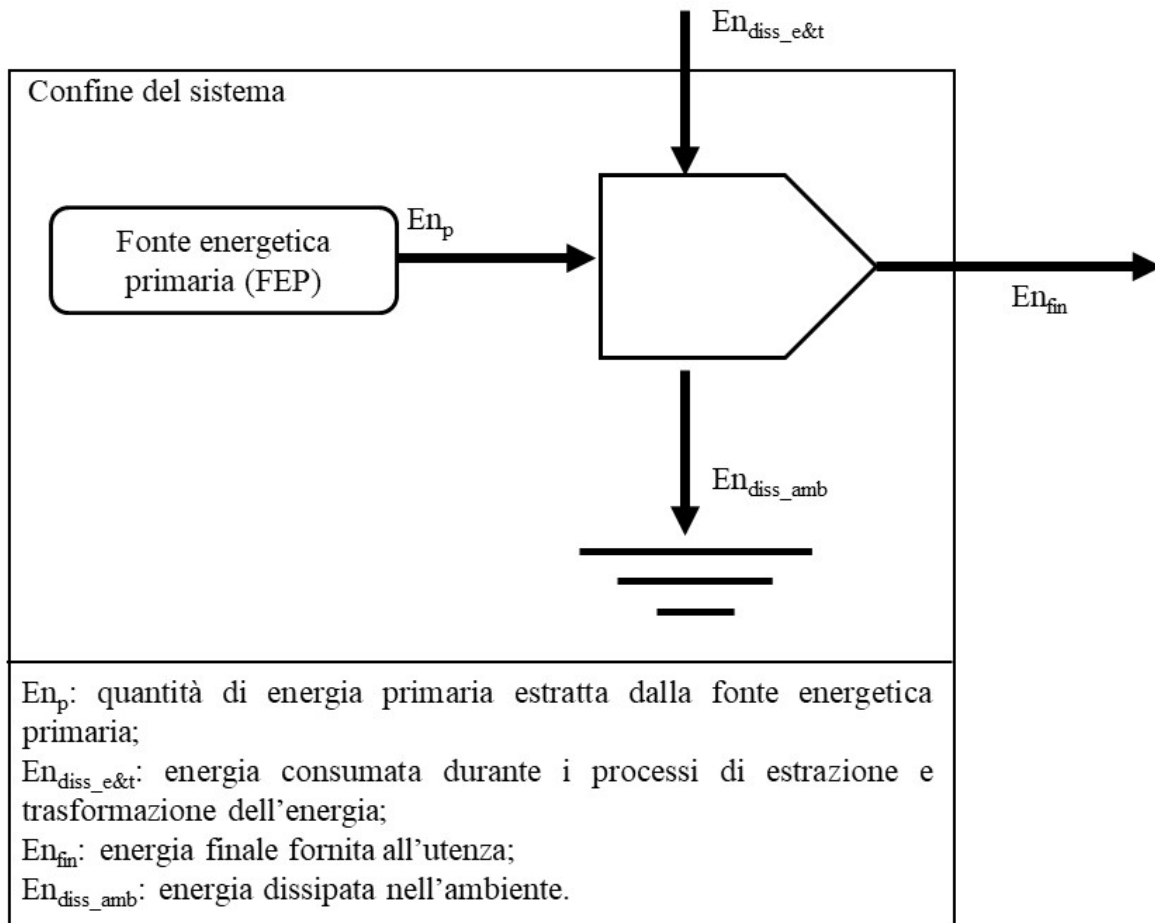


Figura 12: Diagramma dello sfruttamento di una fonte di energia primaria per la produzione di un vettore energetico utile (elaborazione propria dal Report T12-07:2016 dell'IEA-PVPS Task 12 [57])

Nella generalità dei casi le comparazioni di energia incorporata sono effettuate nella forma convenzionale di energia primaria.

Un altro aspetto dell'analisi energetica riguarda l'inclusione dell'energia di *feedstock* nel calcolo dell'energia incorporata. La ISO 14040 [9] definisce l'energia di *feedstock* come la quantità di calore prodotta dalla combustione delle materie prime potenzialmente combustibili che nel sistema di prodotto in esame sono usate come materiali e non come risorse energetiche.

Ad esempio, i prodotti petroliferi e il legno sono usati come materie prime per fabbricare, rispettivamente, prodotti in gomma e plastica e componenti in legno per l'edilizia. Il contenuto energetico di queste materie prime rappresenta l'energia di *feedstock*.

Sartori e Hestnes [50] hanno definito l'energia incorporata come l'energia totale richiesta per produrre un prodotto e hanno affermato che può includere o meno l'energia di *feedstock*. Thormark [58][51], Lucuik et al. [59], Ardente et al. [60], Gustavsson et al. [61], e Dixit et al. [62] hanno incluso l'energia di *feedstock* nel calcolo dell'energia incorporata. Tuttavia, alcuni di essi hanno disaggregato i valori di energia incorporata diretta, indiretta e di *feedstock* per evidenziare il contributo di ognuna di esse. Ad esempio, Ardente et al. [60] hanno applicato la LCA con un approccio *from cradle to gate* al processo di produzione dei pannelli isolanti in fibra di Kenaf e hanno evidenziato che quasi il 50% dell'energia totale incorporata del prodotto è energia di *feedstock*. Lazzarin et al. [63] hanno dimostrato che nei materiali termoisolanti comunemente usati, come la lana di roccia, la schiuma di polistirene espanso, la schiuma di poliuretano espanso e i pannelli di sughero, l'energia di *feedstock* costituisce, rispettivamente, una percentuale pari al 16%, 48%, 59% e 88% dell'energia totale del materiale.

Un altro aspetto metodologico dell'analisi energetica riguarda i metodi utilizzati per la quantificazione dell'energia incorporata. Oltre alla LCA descritta nei paragrafi precedenti, gli altri metodi più diffusi in letteratura sono [42,43]:

- l'analisi Input – Output con estensione energetico-ambientale (I-O) [64,65];
- il metodo ibrido I-O – LCA.

La scelta del metodo dipende dall'obiettivo e dal campo di applicazione dello studio, dal livello di dettaglio richiesto, dal livello di incertezza ritenuto accettabile e dalle risorse disponibili.

La quantificazione dell'energia incorporata di un sistema di prodotto attraverso l'applicazione della metodologia LCA deve essere sviluppata seguendo le quattro fasi introdotte nel Capitolo 2 e in accordo agli standard ISO 14040: 2006 [9] e 14044: 2006 [10]. Con riferimento agli edifici, l'energia incorporata può essere quantificata in accordo alla UNI EN 15978 escludendo dai confini del sistema i moduli B6 e B7 (Figura 9).

La LCA è basata sulla raccolta di dati di input e di output energetici dei singoli processi della catena produttiva del sistema di prodotto in esame e consente di ottenere l'energia incorporata specifica dell'edificio. Il principale limite della LCA è il livello di complessità e incertezza nella raccolta e nell'analisi dei dati quando vengono considerati confini del sistema più ampi, allo scopo di includere nell'analisi tutti i processi delle catene produttive a monte e a valle di quella principale. Di conseguenza, i confini del sistema possono escludere parti della catena di approvvigionamento comportando una sottostima dei risultati.

L'analisi I-O con estensione energetico-ambientale si basa sull'uso dei modelli input-output economici, che possono essere applicati utilizzando dati economici regolarmente pubblicati da organismi pubblici, e mette in relazione i valori monetari dei settori industriali (come il settore delle costruzioni) con i loro input/output energetici e ambientali. L'analisi è relativamente completa poiché si basa su dati economici relativi all'intero settore industriale in esame. Tuttavia, questo tipo di analisi restituisce risultati ad un elevato livello di aggregazione e non consente di ottenere informazioni dettagliate relative al singolo prodotto. Per cui, nel caso degli edifici, i risultati sono riferiti ad un segmento del settore delle costruzioni, ad esempio il settore degli edifici residenziali di una determinata nazione, e non al singolo edificio. Inoltre, questo tipo di analisi presuppone una correlazione diretta tra il flusso di energia e o di inquinanti e il flusso monetario dei diversi settori economici trascurando l'effetto del prezzo, dell'innovazione tecnologica e delle economie di scala [65].

I metodi LCA ibridi combinano tecniche LCA basate sul processo e sull'I-O con l'obiettivo di trarre vantaggio dai punti di forza ed eliminare i limiti di ciascun metodo [43]. In questo metodo, i dati di processo vengono utilizzati fino al livello in cui sono disponibili informazioni affidabili e complete. La modellizzazione dei processi a monte e a valle della catena produttiva principale, per i quali il reperimento di dati è un processo oneroso, viene completata tramite l'utilizzo di tabelle di input e output [55].

Analisi degli impatti energetici e delle emissioni di gas climalteranti di tecnologie e componenti per l'efficienza energetica di un edificio ZEB ad uso residenziale in un'ottica di ciclo di vita

1 Introduzione

Nel corso della conferenza sul clima di Parigi (COP21) del dicembre del 2015, 195 paesi hanno adottato il primo accordo mondiale sul clima [1]. L'articolo 2 del Paris Agreement definisce come obiettivo a lungo termine quello di mantenere l'aumento della temperatura media globale ben al di sotto di 2°C rispetto ai livelli pre-industriali e di puntare a limitare l'aumento a 1,5°C, dato che ciò ridurrebbe in maniera significativa rischi verso l'uomo connessi al cambiamento climatico. Negli ultimi decenni l'*Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) ha definito quattro diversi scenari di emissione (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5) denominati *Representative Concentration Pathways* (RCP). Tali scenari rappresentano differenti concentrazioni di CO₂ nell'atmosfera e permettono di stimare l'incremento della temperatura media del pianeta.

L'entità dello scostamento, rispetto allo scenario pre-industriale, della temperatura media dell'aria varia significativamente: da 2,1°C nello scenario RCP2.6 a 5,3°C nello scenario RCP8.5. Pertanto è necessario ridurre significativamente le emissioni climalteranti connesse alle attività umane e intraprendere un processo di decarbonizzazione dell'economia. Poiché il settore dell'edilizia è responsabile di circa il 42% del consumo di energia dell'Unione Europea e produce circa il 36% delle emissioni di carbonio dell'UE [2], è imprescindibile immaginare di raggiungere tali ambiziosi obiettivi prescindendo dal comparto edile.

In questa direzione si inscrivono le azioni dell'Unione europea, sia nelle più recenti declinazioni del *New Green Deal*, della *Clean Energy Transition* così come nel costante aggiornamento dell' *Energy Performance of Buildings Directive* [2] o negli sforzi profusi verso il *SET Plan* con particolare riferimento al gruppo di lavoro *IWG5 – Energy Efficiency in Buildings*.

Risulta pertanto fondamentale sostenere il nuovo paradigma della generazione di energia distribuita, legato alla diffusione di edifici *prosumer*, ossia edifici che sono allo stesso tempo *consumer* e *producer* di energia, cui la diffusione anzidetta si ascrive. Il concetto di edificio a Energia Quasi Zero, *Nearly Zero Energy Building* (NZEB), ha acquisito una crescente attenzione internazionale sia nella ricerca sia nel potenziale trasformativo in ottica di decarbonizzazione dell'intero patrimonio edilizio.

In questo contesto si inseriscono le attività dell'accordo di Collaborazione tra ENEA e il Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi di Palermo, per una attività di ricerca dal titolo "Analisi degli impatti energetici e delle emissioni di gas climalteranti di tecnologie e componenti per l'efficienza energetica degli edifici in un'ottica di ciclo di vita".

Questa sezione del report, in particolare, include la sintesi degli "step" operativi seguenti:

- Selezione di due casi studio di edifici ad uso residenziale nei quali saranno individuate differenti caratteristiche termofisiche di involucro edilizio e modellizzazione energetica per la stima dei consumi energetici in fase d'uso nel Caso 1 (involucro A) e nel Caso 2 (involucro B). Al fine di garantire una migliore comparabilità dei risultati si è optato per l'utilizzo di caratteristiche morfo-volumetriche identiche nei due scenari, facendo variare esclusivamente i materiali costituenti l'involucro;
- Modellizzazione e simulazione in regime non stazionario degli edifici utilizzando configurazioni impiantistiche basate sul vettore energetico elettricità in combinazione con soluzioni di generazione di energia da tecnologie alimentate da fonti rinnovabili. Il caso A presenterà l'utilizzo di sistemi di accumulo di elettricità, a differenza del caso B che ne sarà sprovvisto;
- Calcolo del bilancio di energia elettrica annuo, in termini di generazione e consumo al fine di verificare l'eventuale raggiungimento di un bilancio energetico annuale nullo;
- Applicazione della metodologia Life Cycle Assessment per la stima degli impatti energetici e delle emissioni di gas climalteranti e altri impatti ambientali incorporati nei componenti principali e basilari del sistema involucro-impianto

2 Descrizione del caso studio

Si riporterà nel seguito la descrizione del caso studio, dei principali componenti di impianto e dei sistemi alimentati da fonti rinnovabili utilizzati nelle analisi.

2.1 Descrizione del caso studio: Involucro

Il caso-studio è un edificio residenziale nuovo sito in Italia, a Roma (RM) (Zona climatica D, Gradi Giorno: 1415). L'edificio è una villa bifamiliare isolata e consta di tre elevazioni: piano terra (altezza utile: 3,70 m; superficie netta: 155,24 m²), primo piano (altezza utile: 2,95 m; superficie netta: 151,54 m²), secondo piano (altezza utile: 2,95 m; superficie netta: 152,50 m²) e soffitta non riscaldata (altezza utile variabile tra 1 e 2,62 m; superficie netta: 151,84 m²), per una superficie complessiva di 611,12 m². Il piano terra non è sopraelevato e comprende due garage e l'androne di ingresso, non riscaldati. I due appartamenti occupano il primo ed il secondo piano e sono climatizzati (superficie climatizzata totale 279,30 m², di cui 139,17 per il primo piano e 140,13 per il secondo). Le viste esterne dell'edificio sono mostrate dalla Figura 13 alla Figura 16; le sezioni dei vari piani dalla Figura 17 alla Figura 20.

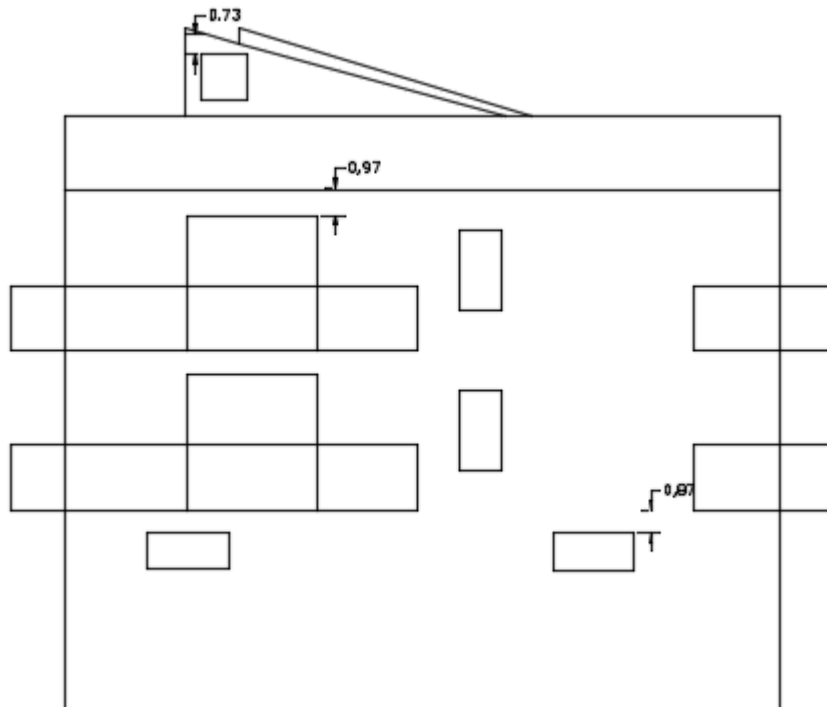


Figura 13: Vista Sud del caso-studio

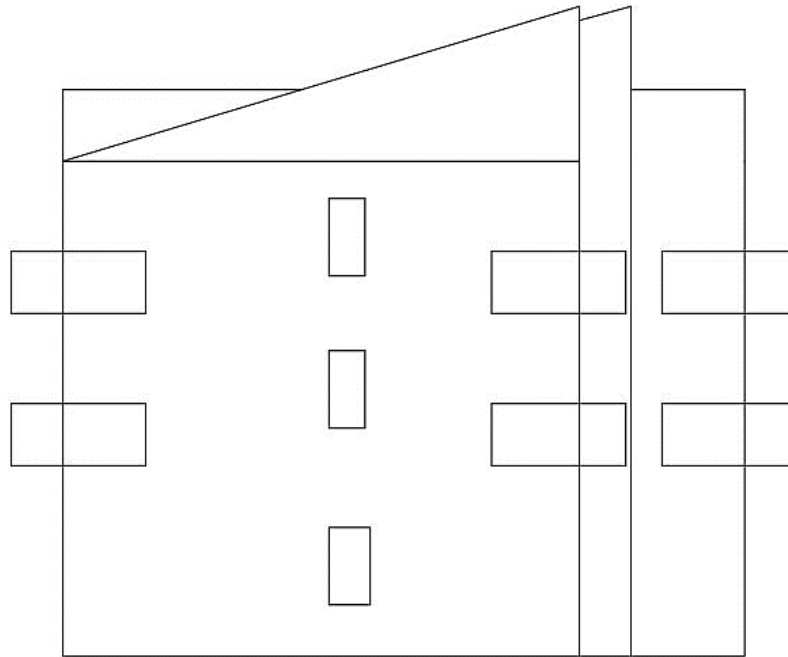


Figura 14: Vista Nord del caso-studio

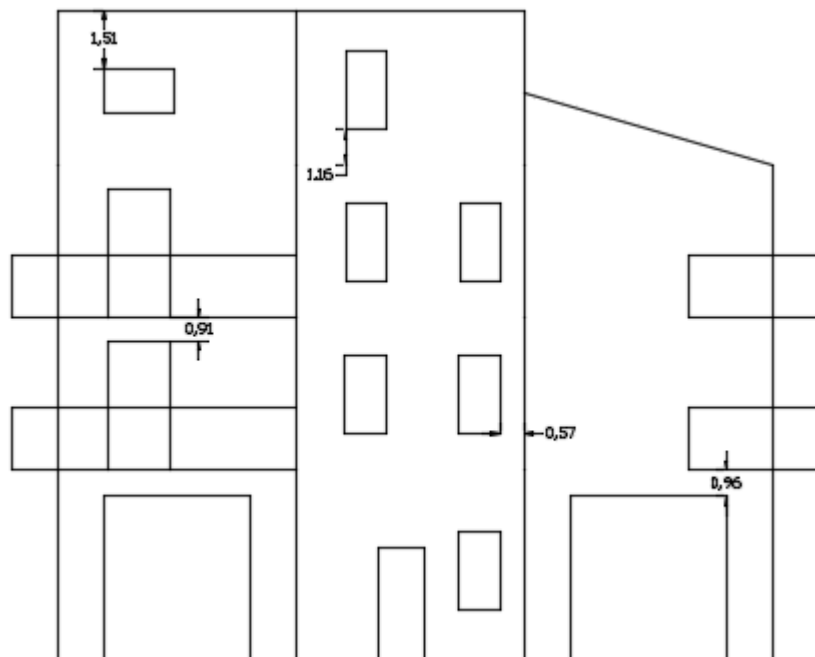


Figura 15: Vista Ovest del caso-studio

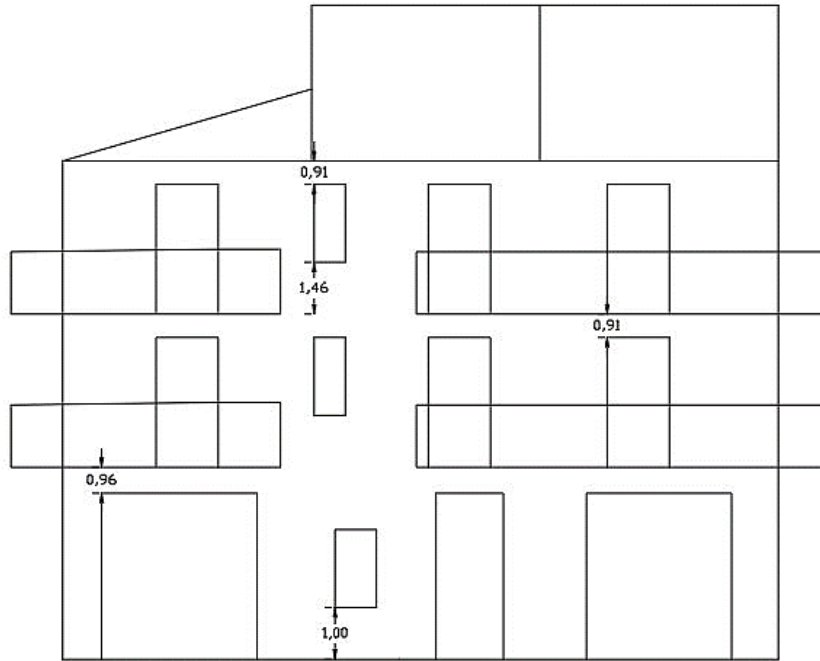


Figura 16: Vista Est del caso-studio

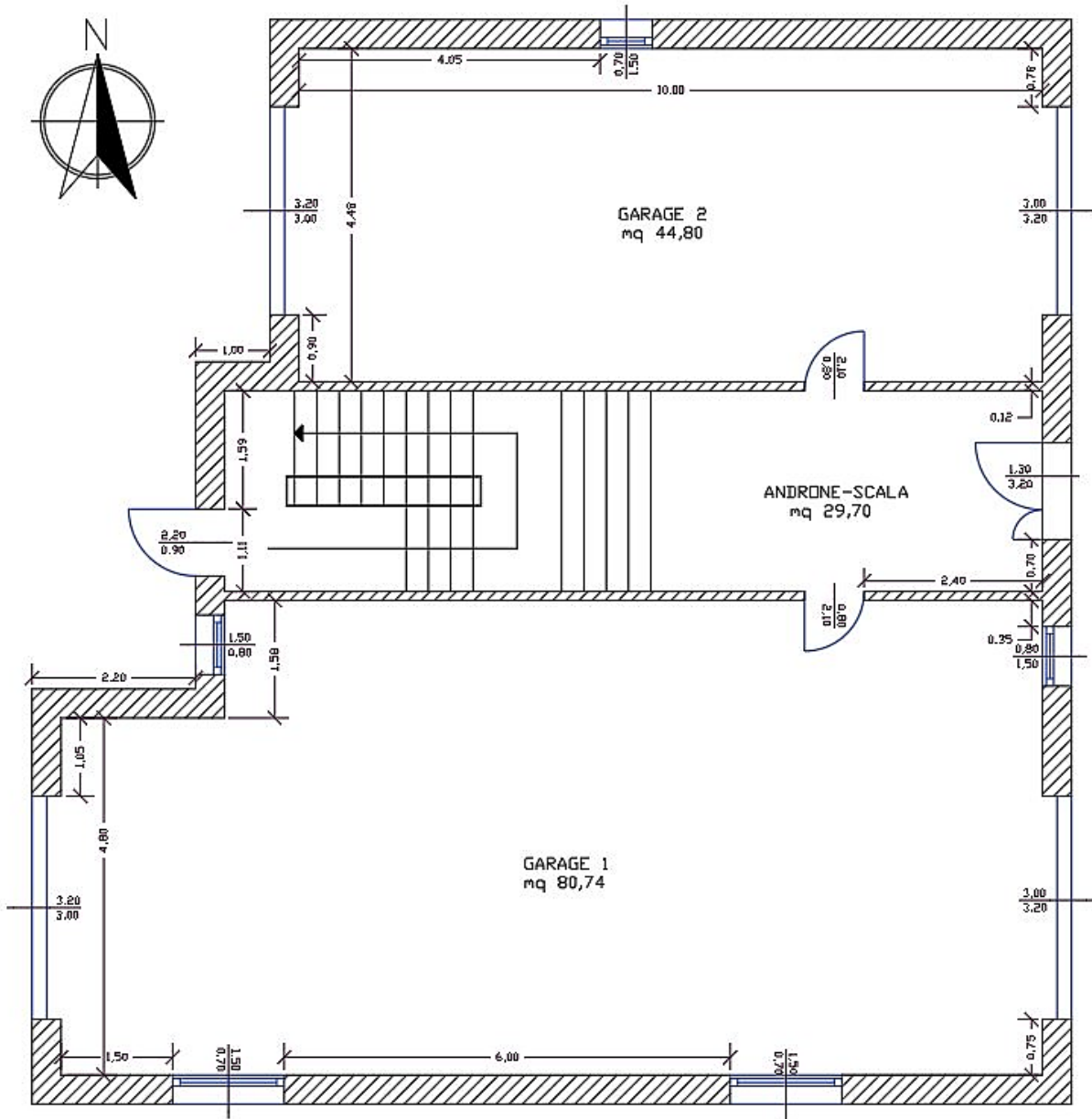


Figura 17: Vista in pianta del piano terra

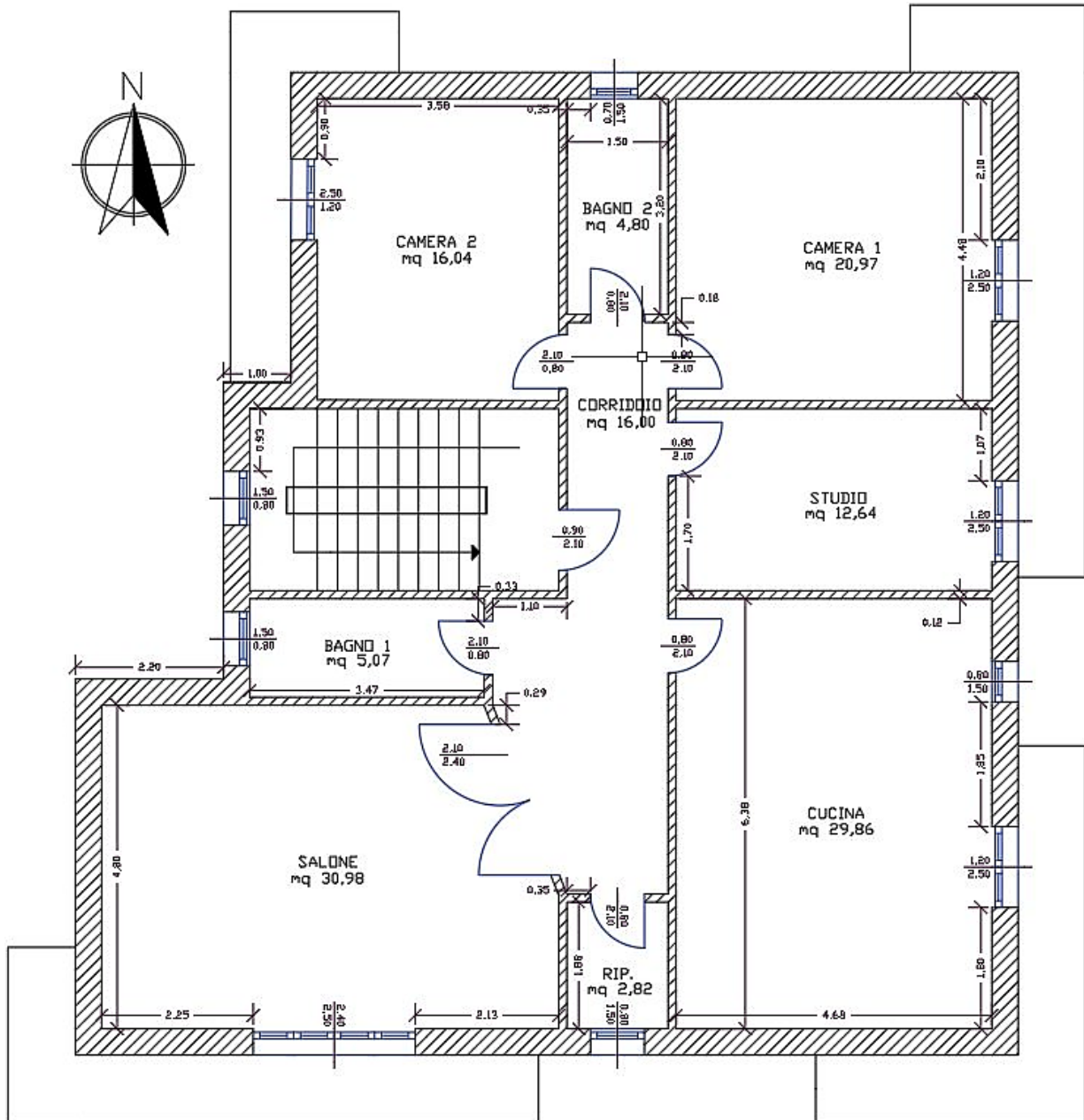


Figura 18: Vista in pianta del primo piano

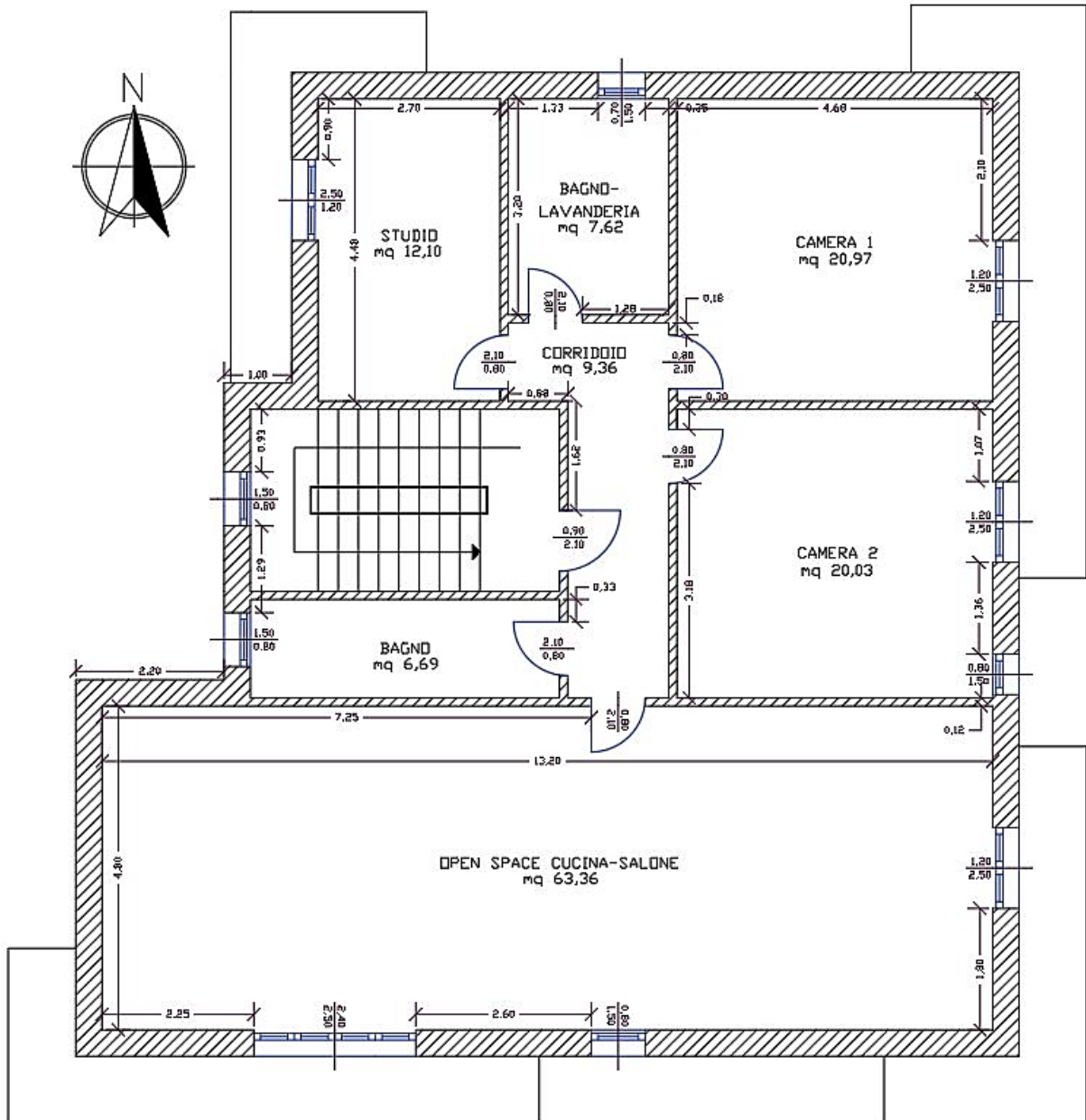


Figura 19: Vista in pianta del secondo piano

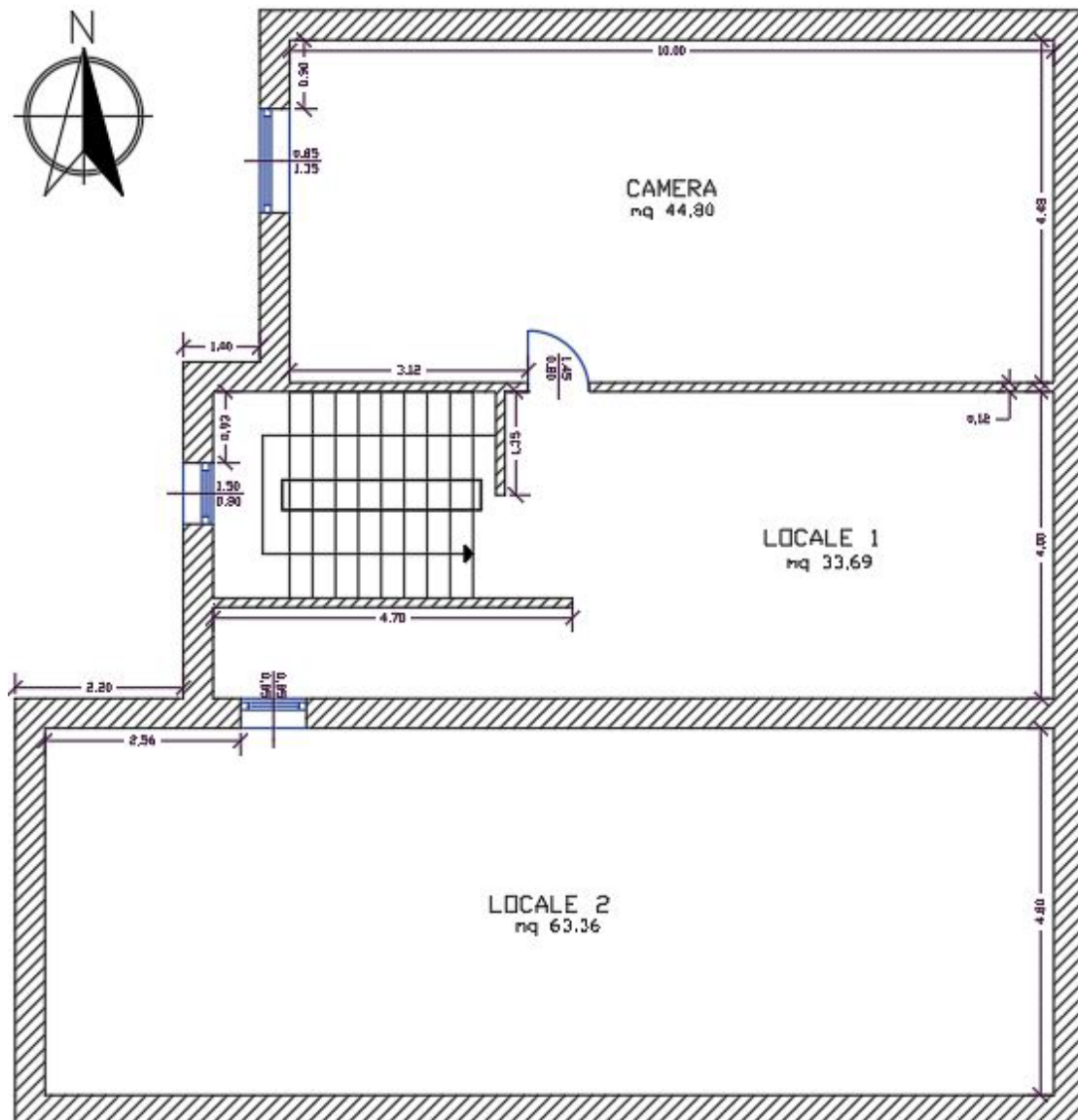


Figura 20: Vista in pianta della soffitta

Di seguito si riportano le stratigrafie di involucro considerate. In particolare, in Tabella 13 si riporta la prima ipotesi di involucro esaminata (involucro A), in Tabella 14 la seconda (involucro B), in Tabella 15 sono illustrate le caratteristiche termiche dei materiali impiegati. In Tabella 16 si riportano inoltre i limiti normativi per trasmittanza termica dell'involucro edilizio (U_{rif}) relativi all'edificio di riferimento, come indicato nel Decreto "Requisiti Minimi" del 26 Giugno 2015, e ai valori calcolati della trasmittanza termica degli elementi di involucro (U).

Tabella 13: Stratigrafia dell'involucro edilizio A

Pavimento contro terra	Pavimento interpiano	Pareti divisorie	Pareti perimetrali verticali	Copertura esterna
<i>Interno:</i> Piastrelle di ceramica Spessore: [m] 0,015	<i>Interno:</i> Piastrelle di ceramica Spessore: [m] 0,015	<i>Interno:</i> Gesso-Intonaco Spessore: [m] 0,02	<i>Interno:</i> Gesso-Intonaco Spessore: [m] 0,02	<i>Interno:</i> Legno Spessore: [m] 0,20
Malta cementizia Spessore: [m] 0,08	Malta cementizia Spessore: [m] 0,08	Laterizio forato Spessore: [m] 0,08	Laterizio forato Spessore: [m] 0,06	Isolante XPS Spessore: [m] 0,10
Cemento armato Spessore: [m] 0,50	Cemento armato Spessore: [m] 0,25	Gesso-Intonaco Spessore: [m] 0,02	Aria Resistenza termica: [m ² K/W] 0,11 Spessore: [m] 0,01	Guaina impermeabilizzante Spessore: [m] 0,065
	Isolante XPS Spessore: [m] 0,10		Laterizio forato Spessore: [m] 0,23	Tegole di copertura Spessore: [m] 0,01
	Gesso-Intonaco Spessore: [m] 0,02		Isolante XPS Spessore: [m] 0,06	
			Gesso-Intonaco Spessore: [m] 0,02	

Tabella 14: Stratigrafia dell'involucro edilizio B

Pavimento contro terra	Pavimento interpiano	Pareti divisorie	Pareti perimetrali verticali	Copertura esterna
<i>Interno:</i> Piastrelle di ceramica Spessore: [m] 0,015	<i>Interno:</i> Piastrelle di ceramica Spessore: [m] 0,015	<i>Interno:</i> Gesso-Intonaco Spessore: [m] 0,02	<i>Interno:</i> Gesso-Intonaco Spessore: [m] 0,02	<i>Interno:</i> Legno Spessore: [m] 0,20
Malta cementizia Spessore: [m] 0,08	Malta cementizia Spessore: [m] 0,08	Laterizio forato Spessore: [m] 0,08	Laterizio forato Spessore: [m] 0,06	Isolante fibra cellulosa Spessore: [m] 0,11
Cemento armato Spessore: [m] 0,50	Cemento armato Spessore: [m] 0,25	Gesso-Intonaco Spessore: [m] 0,02	Aria Resistenza termica: [m ² K/W] 0,11 Spessore: [m] 0,01	Guaina impermeabilizzante Spessore: [m] 0,065
	Isolante fibra cellulosa Spessore: [m] 0,11		Laterizio forato Spessore: [m] 0,23	Tegole di copertura Spessore: [m] 0,01
	Gesso-Intonaco Spessore: [m] 0,02		Isolante fibra cellulosa Spessore: [m] 0,07	
			Gesso-Intonaco Spessore: [m] 0,02	

Tabella 15: Caratteristiche termiche dei materiali

Materiale	Conducibilità [W/(m K)]	Calore specifico [J/(kg K)]	Densità [kg/m ³]
Ceramica	1	455	1800
Malta cementizia	0,15	840	2000
Cemento armato	0,73	840	2400
Isolante XPS	0,035	1450	35
Isolante in fibra cellulosa	0,038	2544	45
Gesso-Intonaco	0,29	850	1530
Laterizio forato	0,109	1000	725
Legno	0,15	1630	608
Guaina impermeabilizzante	0,17	840	615
Tegole di copertura	0,99	455	1800

Tabella 16: Valori di trasmittanza termica degli involucri edilizi e della legislazione vigente

Elemento strutturale	U [W/(m ² K)] Involucro A	U [W/(m ² K)] Involucro B	U _{rif} [W/(m ² K)]
Pareti perimetrali verticali	0,20	0,20	0,29
Tetto esterno	0,21	0,209	0,26
Pavimento del primo piano (confinante con ambienti non climatizzati)	0,25	0,248	0,29
Copertura del secondo piano (confinante con ambienti non climatizzati)	0,25	0,248	0,26
Chiusure trasparenti verso l'esterno	1,4	1,4	1,8

Per ciascun appartamento la superficie disperdente totale S (comprendente le superfici verticali esterne, le superfici verticali interne a contatto con gli ambienti non climatizzati scala, piano terra o soffitta) è pari a 338,17 m². Per l'appartamento sito al primo piano il volume climatizzato V è di 410,55 m³ mentre per quello sito al secondo piano è di 413,38 m³. Il valore del coefficiente globale di scambio termico, H'_T , calcolato per ognuno degli appartamenti è pari a 0,284 W/(m² K). Dal momento che il valore massimo ammissibile di H'_T , come indicato nel Decreto Requisiti minimi, è di 0,53 W/(m² K), il valore del coefficiente globale di scambio termico rispetta i limiti normativi.

Gli infissi sono caratterizzati dalla presenza di doppio vetro con argon nell'intercapedine (4/16/4) e da un *Solar Heat Gain Coefficient* (SHGC) pari a 0,589 con trasmittanza al visibile (T_{vis}) pari a 0,706.

In relazione all'involucro dei due appartamenti si riportano, in Tabella 17, le aree delle superfici opache e di quelle vetrate per ciascuna orientazione verticale dell'immobile. La geometria dell'edificio è simmetrica tra primo e secondo piano, pertanto tali valori sono validi per entrambi gli appartamenti.

Nello specifico, per ciascun ambiente di ogni piano sono riportate nella Tabella 18 (primo piano) e Tabella 19 (secondo piano) le superfici opache e vetrate costituenti l'involucro esterno, in funzione dell'esposizione.

Tabella 17: Caratteristiche dell'involucro di ciascun appartamento per esposizione

Orientamento	Superficie opaca [m ²]	Superficie vetrata [m ²]	Superficie disperdente totale [m ²]
Est	30,82	9,9	40,72
Sud	31,75	7,2	38,94
Ovest	35,32	5,4	40,72
Nord	38,94	1,05	39,99

Tabella 18: Dettaglio dell'involucro per il primo piano

Orientamento	Locale	Superficie opaca [m ²]	Superficie vetrata [m ²]
Est	Cucina	12,33	3,9
	Studio	7,92	3
	Camera 1	10,57	3
Sud	Salone	14,36	6
	Ripostiglio	3,23	1,19
	Cucina	14,16	
Ovest	Camera 2	10,57	3
	Scala	6,77	1,2
	Bagno	3,82	1,2
	Salone	14,16	
Nord	Camera 1	14,16	
	Bagno	3,37	1,05
	Camera 2	10,92	
	Salone	6,49	
	Scala	2,95	

Tabella 19: Dettaglio dell'involucro per il secondo piano

Orientamento	Locale	Superficie opaca [m ²]	Superficie vetrata [m ²]
Est	Open space Cucina-Salone	11,16	3
	Camera 1	10,57	3
	Camera 2	9,08	3,9
Sud	Open space Cucina-Salone	31,75	7,19
Ovest	Studio	10,57	3
	Scala	6,77	1,2
	Bagno	3,82	1,2
	Open space Cucina-Salone	14,16	
Nord	Camera 1	14,16	
	Bagno-Lavanderia	6,32	1,05
	Studio	7,96	
	Scala	2,95	
	Open space Cucina-Salone	6,49	

2.2 Descrizione del caso studio: Layout d'impianto termico

Una descrizione dell'impianto di climatizzazione e di produzione dell'acqua calda sanitaria (ACS) previsto per entrambi gli scenari A e B è fornita di seguito.

In particolare si utilizzeranno i seguenti componenti: tre collettori solari piani, ciascuno di superficie pari a 2,5 m², sono usati per la produzione di ACS. Il sistema è a circolazione forzata ed è dotato di un bollitore d'acqua avente capacità d'accumulo pari a 800 l. Una pompa di calore aria-acqua, di taglia pari a 8,81 kW e C.O.P. 4,24, è inclusa nel layout, al fine di assicurare la produzione di ACS quando il collettore solare è inattivo o la sua produzione insufficiente rispetto alla domanda. L'acqua fredda, proveniente dal primo e dal secondo piano, è convogliata verso il collettore di ritorno; il quale alimenta il bollitore d'acqua mediante una tubazione collegata alla parte inferiore del serbatoio. L'acqua calda sanitaria viene prelevata dalla parte superiore del bollitore e indirizzata verso il collettore di mandata, il quale a sua volta la distribuisce ai due appartamenti. Una pompa di calore aria-acqua, adibita alla produzione di acqua refrigerata/riscaldata, è usata per la climatizzazione degli ambienti. La pompa di calore, avente E.E.R. e C.O.P. rispettivamente pari a 2,85 e 3,08, è a compressione di vapore ed ha una potenza frigorifera pari a 22,3 kW ed una potenza in riscaldamento pari a 23,9 kW. La stessa è collegata, tramite le opportune connessioni, ad un accumulo inerziale per acqua di riscaldamento e refrigerata di capacità pari a 300 l. Il fluido termovettore acqua viene poi distribuito ai terminali installati presso ciascun locale da climatizzare. La tipologia di terminali impiegata per il primo piano è di seguito elencata:

- n.3 ventilconvettori (camera 1, camera 2 e studio) con batteria a tre ranghi, avente una potenzialità massima in raffrescamento e riscaldamento rispettivamente pari a 1,53 kW ed a 1,70 kW;
- n.1 ventilconvettore (salone) con batteria a quattro ranghi, avente una potenzialità massima in raffrescamento e riscaldamento rispettivamente pari a 5,48 kW ed a 5,59 kW;
- n.1 ventilconvettore (cucina) con batteria a quattro ranghi avente una potenzialità massima in raffrescamento e riscaldamento rispettivamente pari a 4,71 kW ed a 4,92 kW;
- n.2 scaldasalviette, ciascuno avente una resa termica di 380 W.

Per maggiori dettagli si rimanda alla Figura 21: Impianto di climatizzazione del primo piano.

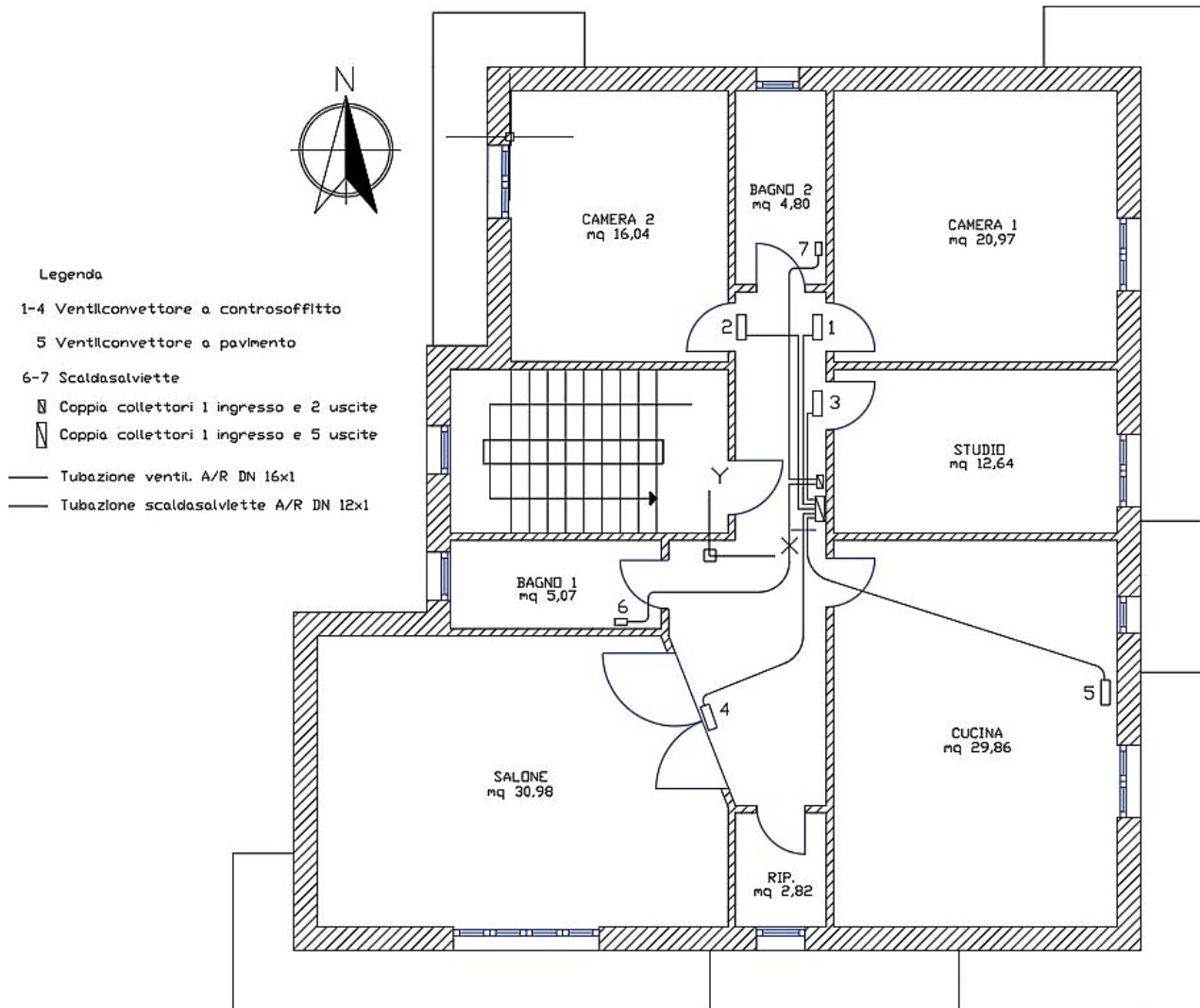


Figura 21: Impianto di climatizzazione del primo piano

I terminali adottati per la climatizzazione del secondo piano sono i seguenti:

- n.1 ventilconvettore (studio) con batteria a tre ranghi avente una potenzialità massima di raffrescamento e riscaldamento rispettivamente pari a 1,53 kW e 1,70 kW;
- n. 1 ventilconvettore (camera 1) con batteria a quattro ranghi, avente una potenzialità massima in raffrescamento e riscaldamento rispettivamente pari a 1,92 kW ed a 1,86 kW;
- n. 3 ventilconvettore (camera 2, cucina-salone) con batteria a tre ranghi, avente una potenzialità massima in raffrescamento e riscaldamento rispettivamente pari a 2,83 kW ed a 2,97 kW;
- n.2 scaldasalviette, ciascuno avente una resa termica di 380 W.

Per maggiori dettagli si rimanda alla Figura 22. La Figura 23 riporta infine uno schema d'impianto riportante i componenti anzidetti.

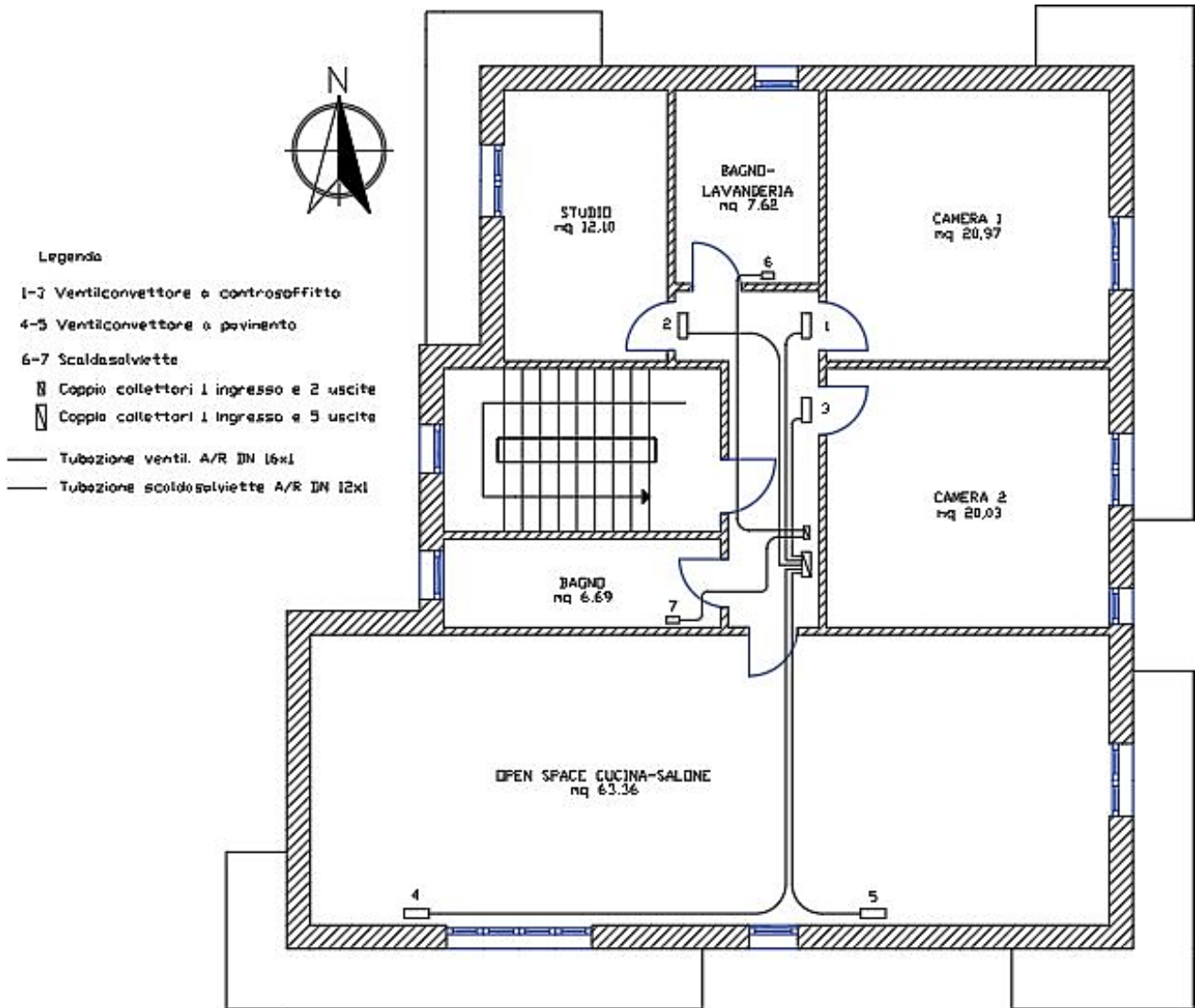


Figura 22: Impianto di climatizzazione del secondo piano

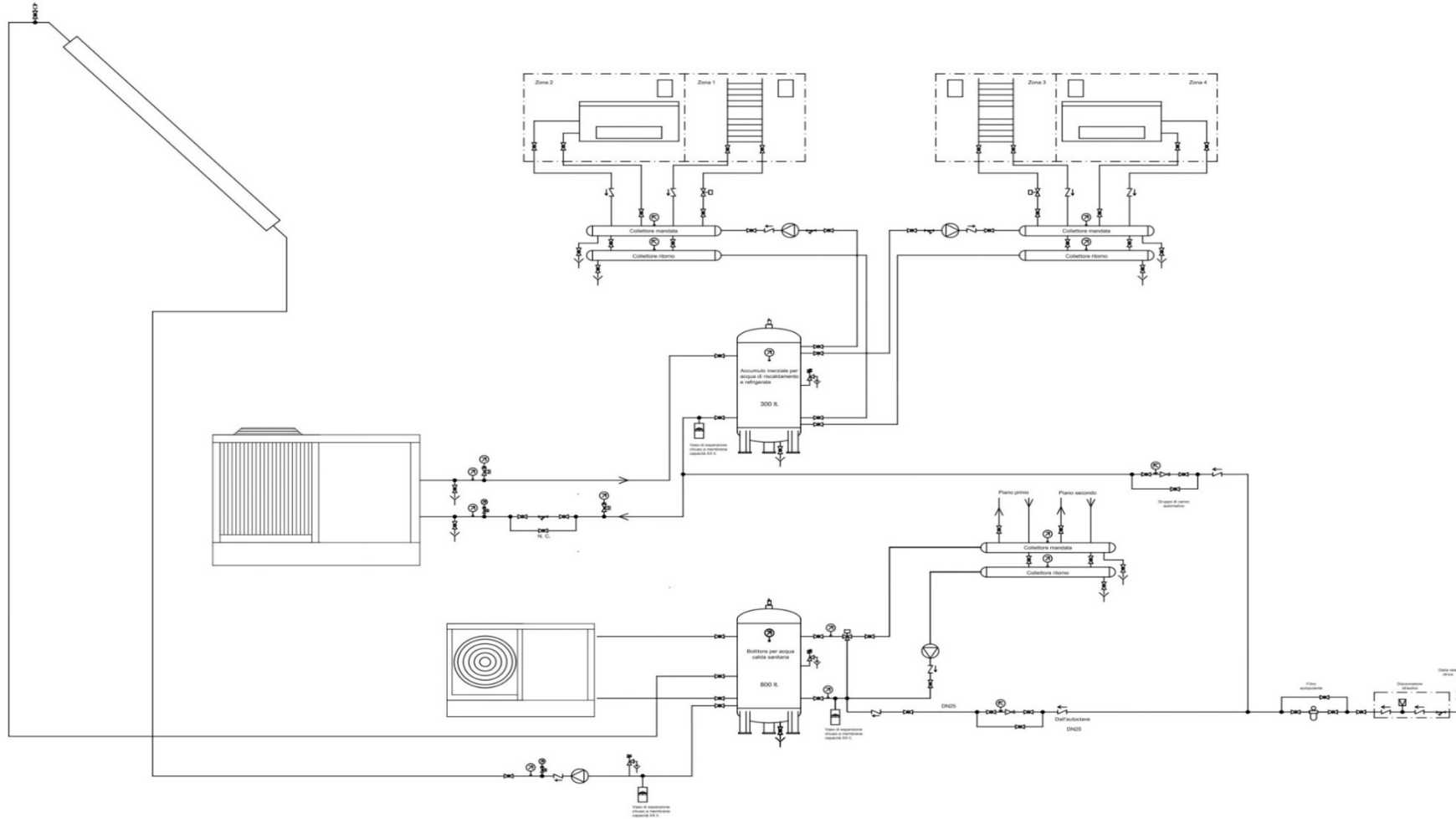


Figura 23: Schema di funzionamento dell' impianto termico

2.3 Descrizione dell'edificio: impianti di generazione alimentati da fonti rinnovabili e sistemi di accumulo elettrico

Dal punto di vista degli impianti di generazione da fonti rinnovabili si utilizzerà un sistema fotovoltaico di generazione avente le seguenti caratteristiche succintamente riportate in Tabella 20.

Tabella 20: Sintesi delle principali caratteristiche dell'impianto fotovoltaico

	Quantità	Unità
N° Moduli fotovoltaici:	36	
Potenza elettrica singolo modulo	300	W
Potenza totale sistema fotovoltaico:	10800	W
Area	59.4	m ²
Generazione elettricità	13509.99	kWh

Il fotovoltaico è considerato come integrato nell'involucro edilizio (nel tetto) e pertanto assume un'inclinazione pari a quella del tetto, pari circa a 25°.

Inoltre si prevede l'ulteriore differenziazione tra le due configurazioni con riferimento all'utilizzo di sistemi di accumulo elettrici:

- Configurazione A: presenza di un sistema di accumulo dell'energia elettrica da 30 kWh nel layout d'impianto;
- Configurazione B: assenza del sistema di accumulo dell'energia elettrica.

2.4 Descrizione del caso-studio: Sintesi delle caratteristiche dei due scenari di analisi

La successiva Tabella 21 riporta un quadro sinottico complessivo riportante le principali differenze tra i due scenari di analisi definiti sulla base di tutti gli elementi discussi nei paragrafi pregressi.

Tabella 21: Quadro sinottico finale – Confronto tra scenario A e B

	Scenario A	Scenario B
Caratteristiche dell'edificio	Edificio residenziale sito a Roma: villetta bifamiliare dalla superficie complessiva di circa 600 m ² .	
Isolante termico utilizzato	XPS	Cellulosa
Impianto termico	Solare termico, Pompa di calore aria - acqua per ACS e riscaldamento/raffrescamento. Utilizzo di Ventilconvettori come terminali di distribuzione.	
Sistema di accumulo elettrico	30 kWh	-

3 Descrizione delle attività svolte

Si riporta nel seguito il dettaglio sulle principali assunzioni operative effettuate nel corso della modellizzazione del sistema edificio impianto, una succinta descrizione dei modelli matematici adoperati e dei principali strumenti di modellizzazione prescelti. Va altresì menzionato che si riporteranno in questa sede esclusivamente informazioni aggiuntive rispetto a quanto già riportato nel paragrafo 2.

3.1 Strumenti di modellizzazione

TRNSYS² (TRaNsient Energy SYStem) è un software sviluppato dalla University of Wisconsin Madison e dall'Università del Colorado capace di eseguire simulazioni termiche in regime dinamico di edifici multi-zona e dei relativi impianti termici. Tale *tool* rappresenta attualmente uno degli standard più noti e adottati in tutto il mondo per la simulazione in regime dinamico di edifici e sistemi energetici.

Grazie alla sua struttura modulare e alla logica di programmazione aperta è altresì possibile creare e/o modificare moduli e componenti a seconda delle proprie necessità.

Inoltre, TRNSYS può essere facilmente connesso con molte altre applicazioni (ad esempio Microsoft Excel e Matlab) per operazioni di pre e post-processing dei dati.

La struttura di TRNSYS è riassumibile nell'interazione di due differenti strutture informatiche di seguito riportate:

TRNSYS Simulation Studio: è la principale interfaccia grafica del software, nella quale si connettono i vari componenti modulari prescelti per la simulazione (cosiddetti *Types*). I *Types* rappresentano modelli di specifici componenti di sistemi energetici (ad esempio pompe di calore, condotte, sistemi fotovoltaici etc.) che è possibile connettere tra loro al fine di garantire connessioni affini al sistema realmente modellizzato (ad esempio connettere il modello del solare termico con quello del serbatoio d'accumulo). Un esempio è riportato in Figura 24.

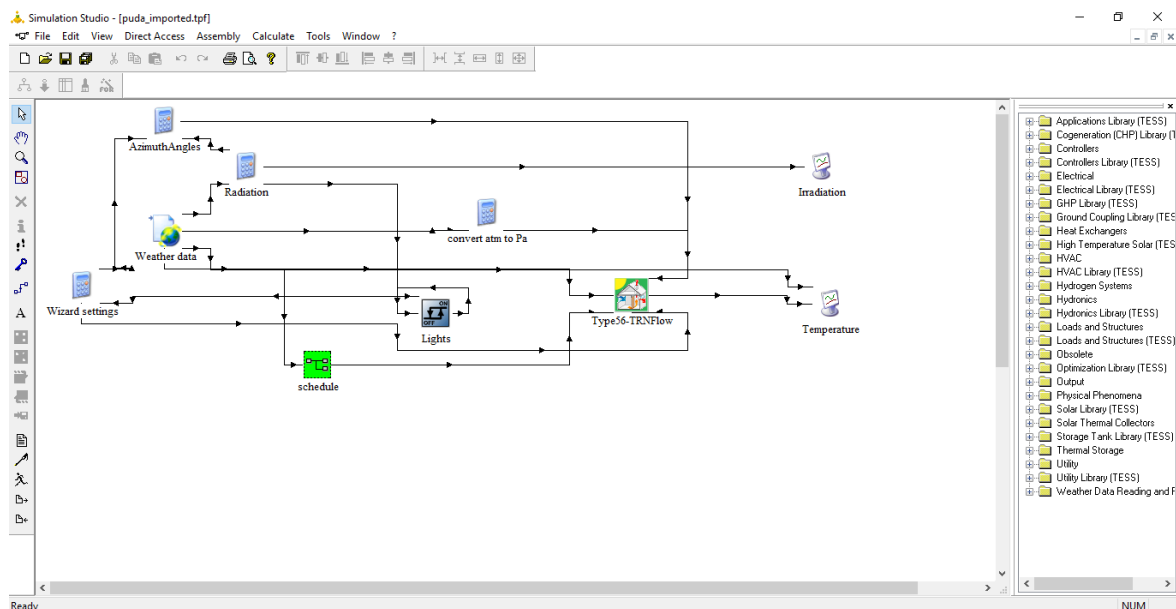


Figura 24: Interfaccia grafica di TRNSYS simulation studio

Ogni *Type* è descritto da un modello matematico e presenta una serie di parametri, input e output che possono essere impostati dall'analista. I risultati delle simulazioni possono essere successivamente integrati

² <http://www.trnsys.com/>, ultimo accesso 5 Febbraio 2021

su file, stampati o semplicemente visualizzati in forma di grafici e diagrammi (Esempio in Figura 25).

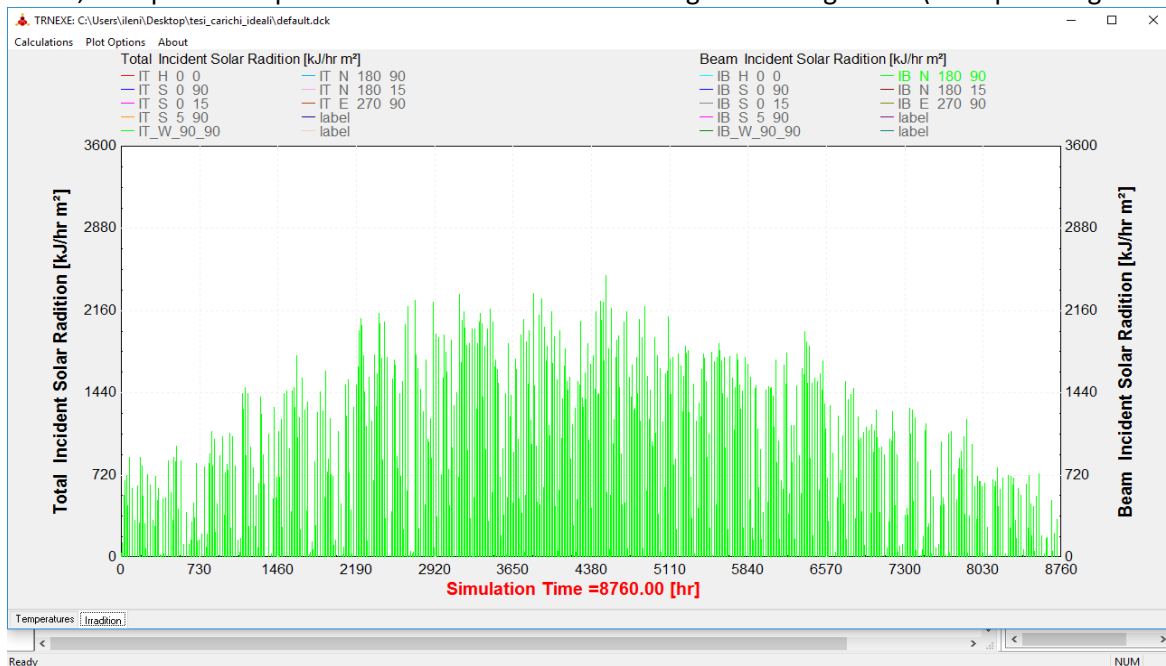


Figura 25: Andamento dinamico dei risultati di una simulazione TRNSYS 17 – radiazione solare oraria, per 8760 ore

TRNBuild.exe: è l'interfaccia grafica (Figura 26) che, attraverso l'inserimento di specifici input, è utilizzata per modellizzare l'edificio e la sua struttura. I dati di input inseriti servono a analizzare le prestazioni termofisiche dell'edificio e tutti i parametri correlati.

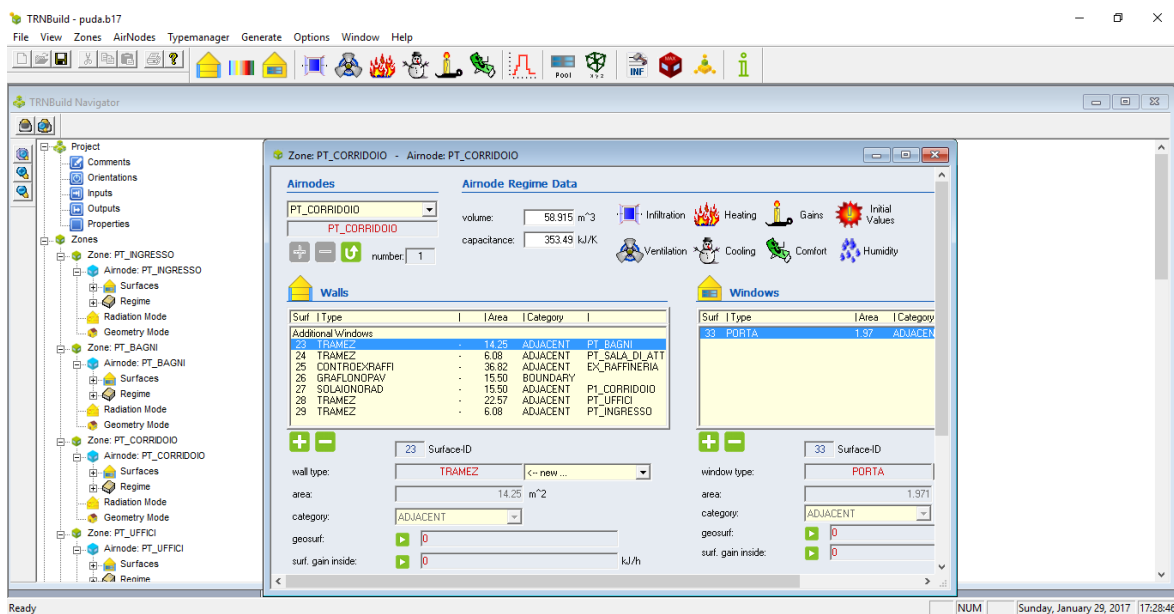


Figura 26: interfaccia grafica di TRNBuild in TRNSYS 17

La simulazione in ambiente TRNSYS avviene mediante l'interazione contemporanea di una serie di componenti, individuati in una libreria già esistente, all'interno dell'interfaccia *Simulation Studio*.

Questi devono essere successivamente interconnessi attraverso link di collegamento, secondo una sequenza ordinata di operazioni che dipende dal tipo di analisi e dal tipo di simulazione che si intendono eseguire. TRNSYS utilizza il cosiddetto *Heat Balance Method* (HBM) [66] per la modellazione degli ambienti confinati, basato sulla creazione di bilanci di energia estesi alle superfici interne ed esterne delle pareti oltre che all'aria interna a ciascuna zona termica e su differenti assunzioni semplificative (ad esempio miscelamento perfetto dell'aria all'interno delle zone termiche con conseguente uniformità di temperatura, flusso termico monodimensionale nelle superfici verticali etc.) che non si approfondiranno nel dettaglio per brevità.

3.2 Modellizzazione Geometrica

La modellazione geometrica dell'edificio campione, comune allo scenario A e al B, è stata realizzata in ambiente *Google sketchup*³ tramite l'ausilio del plugin *Euclid*⁴. La geometria così definita è stata infine importata in ambiente TRNSYS Simulation Studio per lo sviluppo della modellazione degli impianti termici e la caratterizzazione termofisica dell'edificio. Si riportano nel seguito dei dettagli estrapolati direttamente in ambiente *Google Sketchup* di ciascuna zona termica del modello geometrico. Sono stati altresì modellizzati in dettaglio gli elementi schermanti verticali presenti nelle facciate principali dell'edificio ed eventuali edifici adiacenti in grado di indurre ombre sui prospetti principali del caso-studio. Le seguenti figure (Da Figura 27 a Figura 48) sono *screenshot* di ciascuna zona termica del modello energetico, generato in ambiente *google sketchup*.



Figura 27: Zona termica 1 (Garage A)

³ <https://www.sketchup.com/>, ultimo accesso 5 Febbraio 2021

⁴ <https://bigladdersoftware.com/projects/euclid/>, ultimo accesso 5 Febbraio 2021

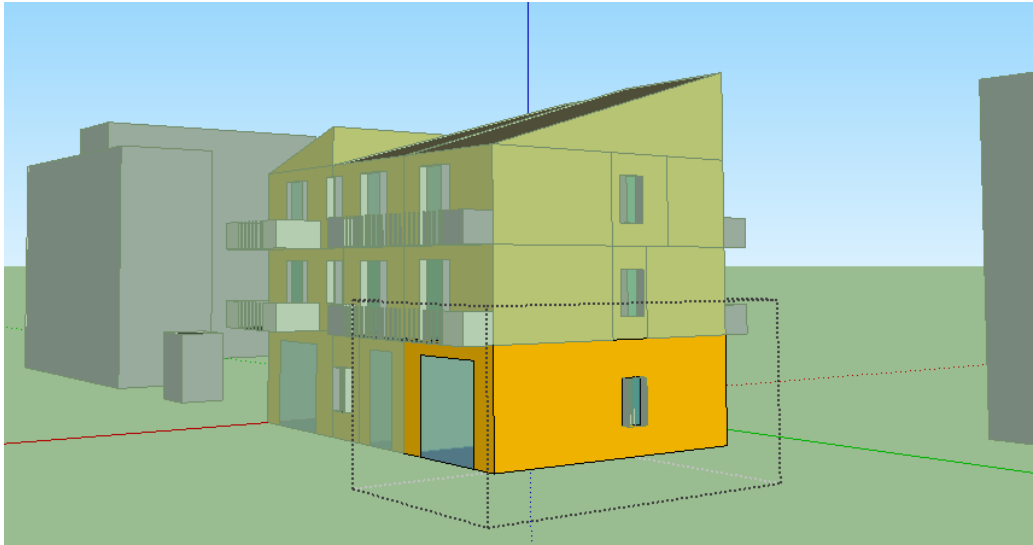


Figura 28: Zona termica 2 (Garage B)



Figura 29: Zona termica 3 (Androne-scala)

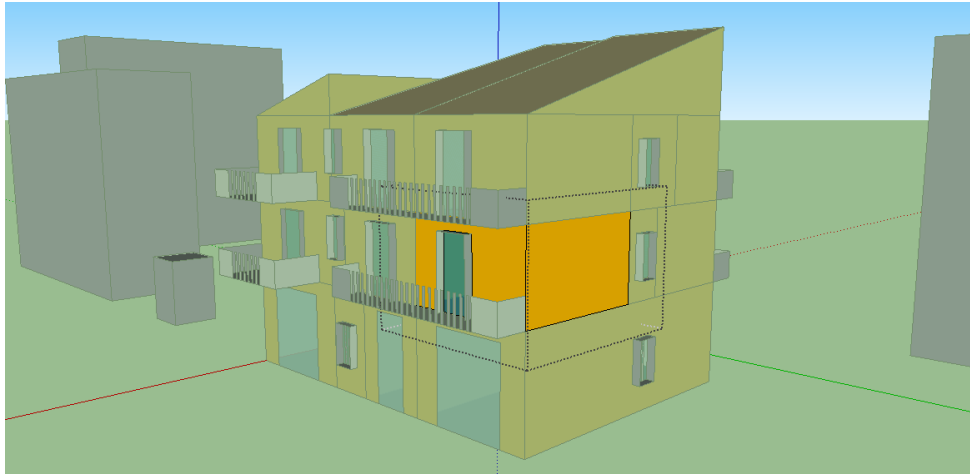


Figura 30: Zona termica 4 (Camera A)

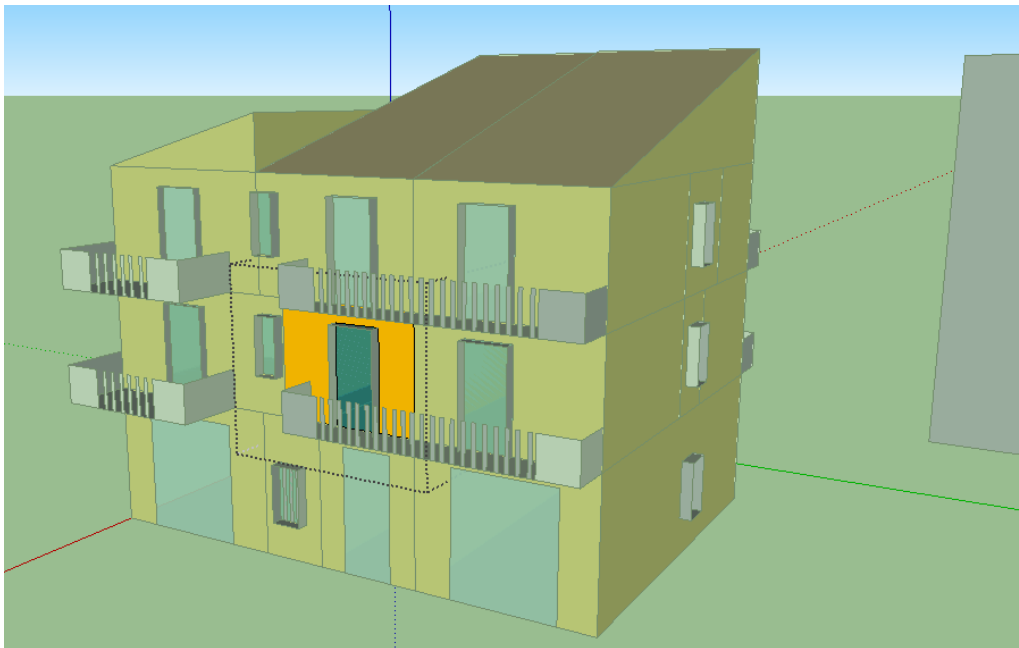


Figura 31: Zona termica 5 (Studio)

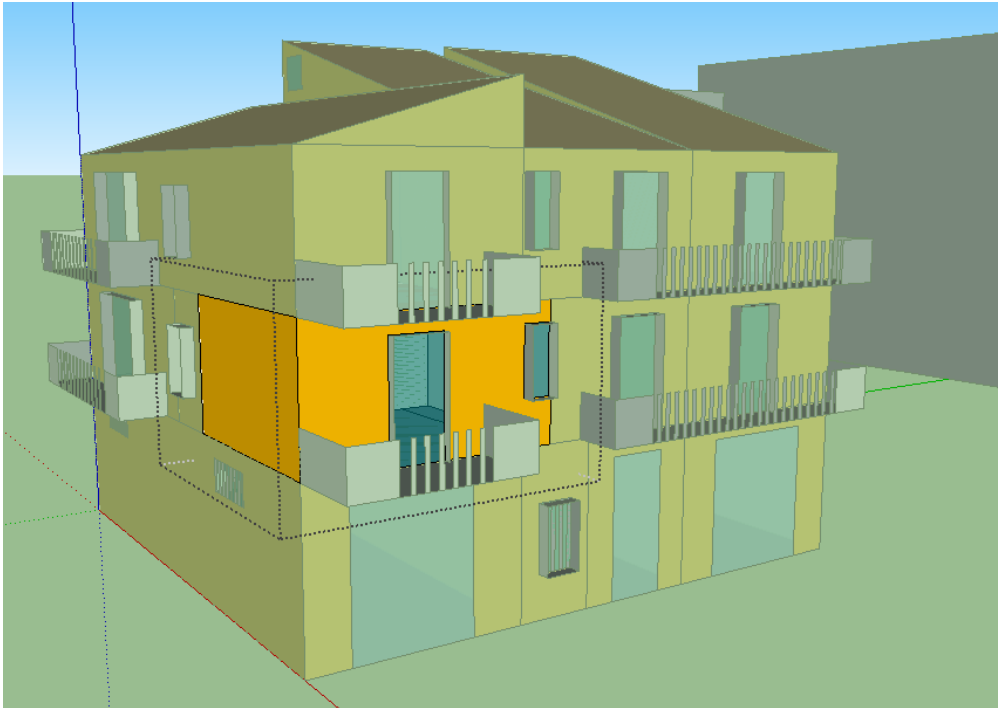


Figura 32: Zona termica 6 (Cucina)

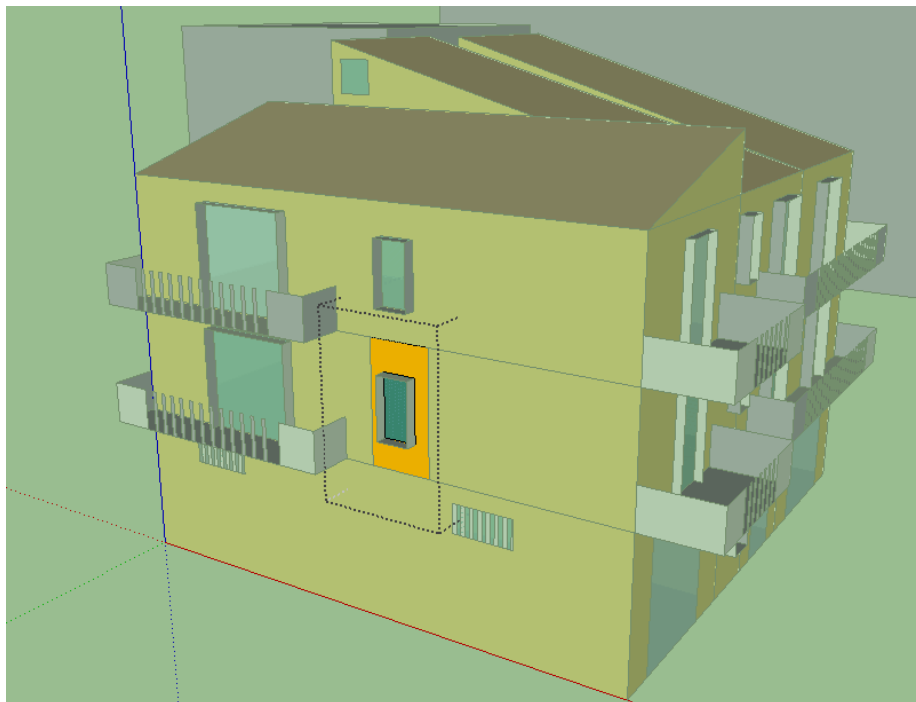


Figura 33: Zona termica 7 (Ripostiglio)

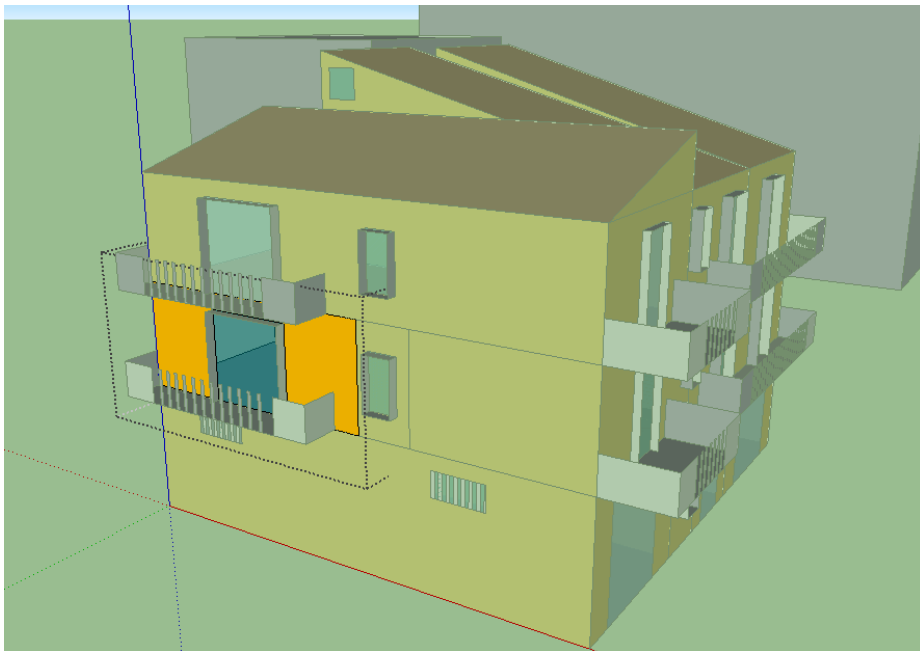


Figura 34: Zona termica 8 (Salone)



Figura 35: Zona termica 9 (Camera B)



Figura 36: Zona termica 10 (Bagno)

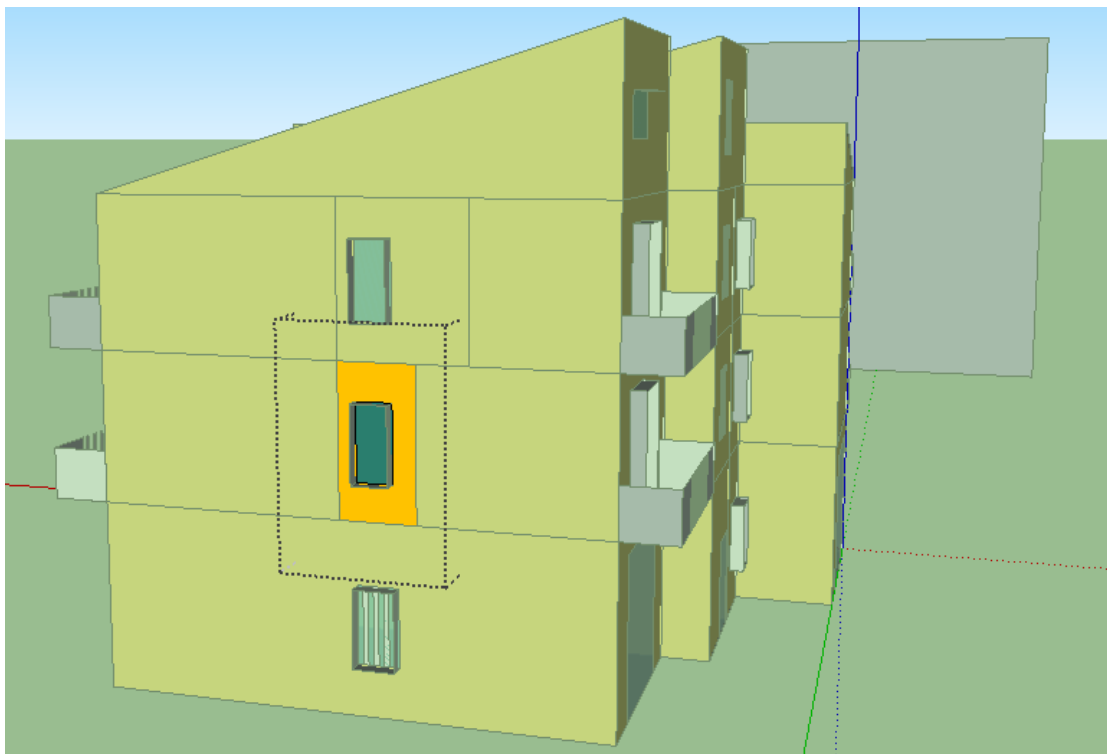


Figura 37: Zona termica 11 (Bagno B)

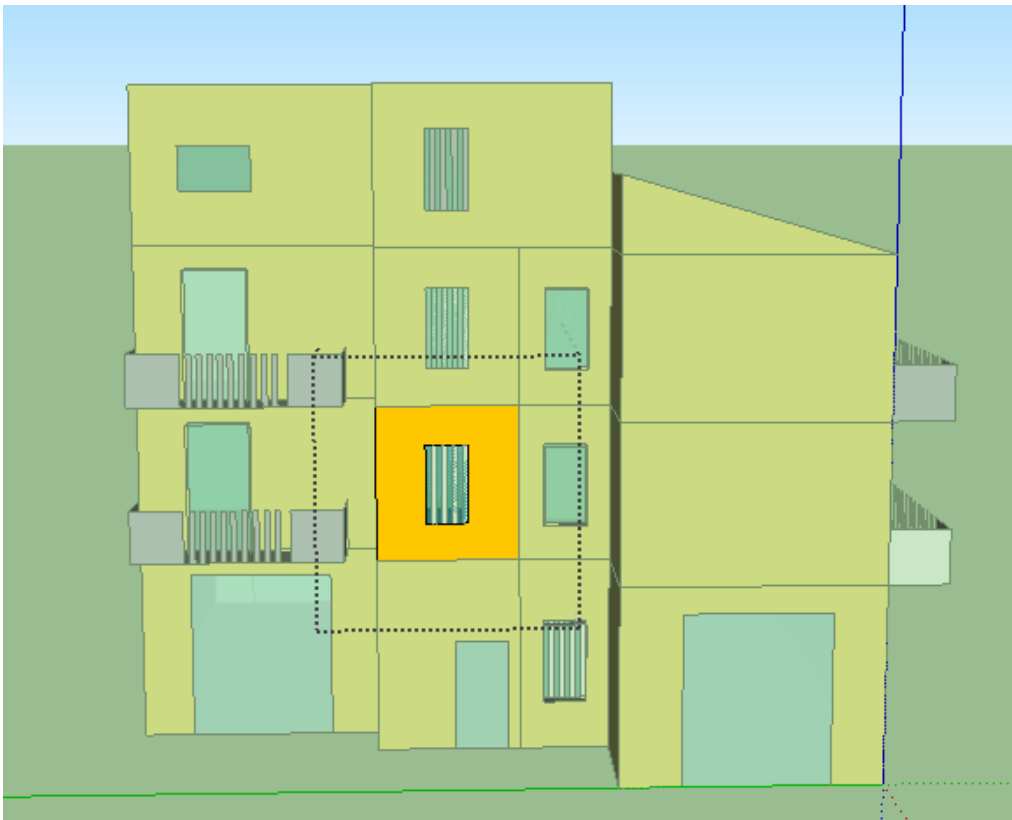


Figura 38: Zona termica 12 (Scala)

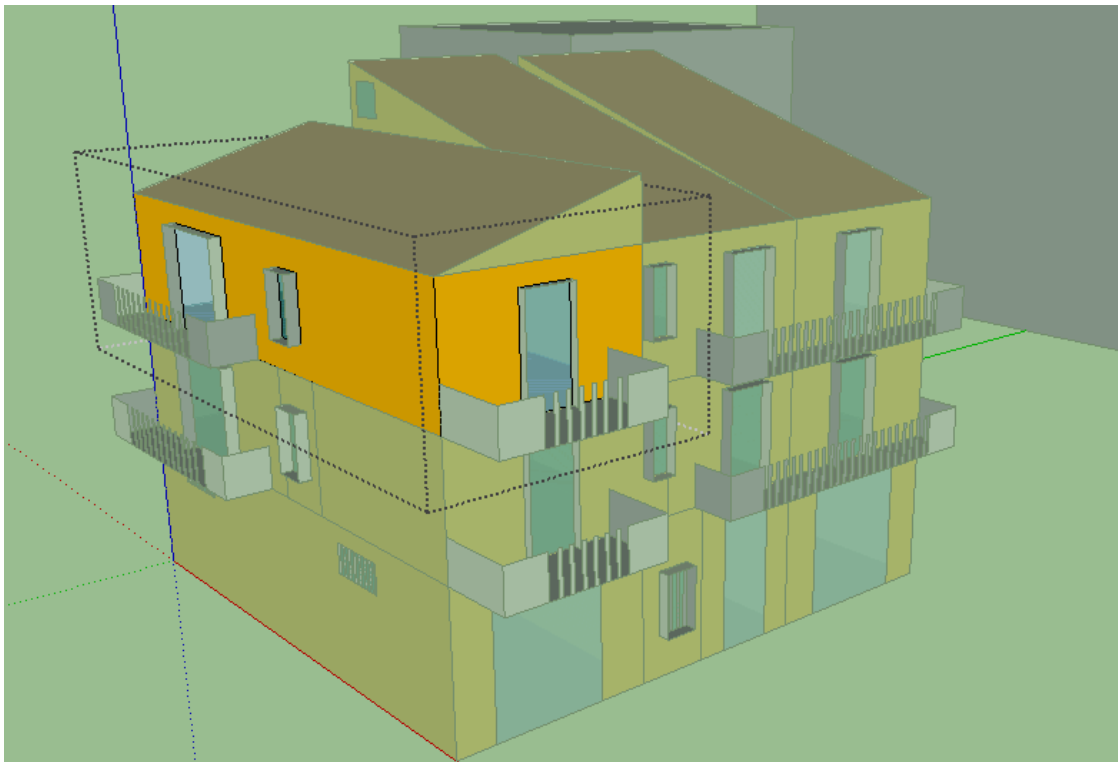


Figura 39: Zona termica 13 (Open space)



Figura 40: Zona termica 14 (Camera A)

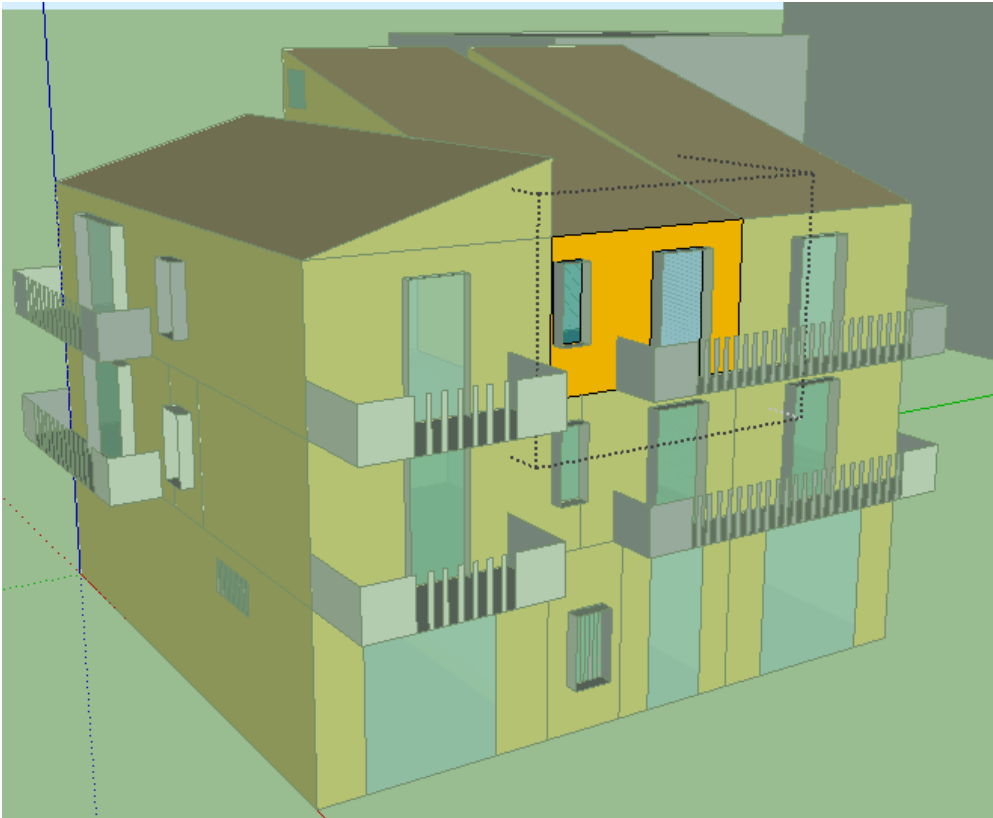


Figura 41: Zona termica 15 (Camera B)

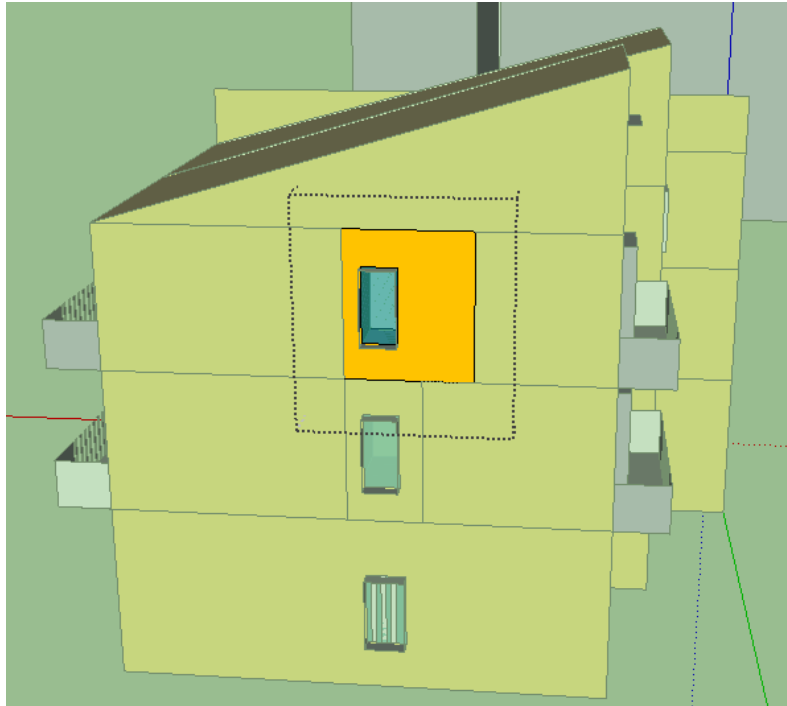


Figura 42: Zona termica 16 (Bagno – Lavanderia)

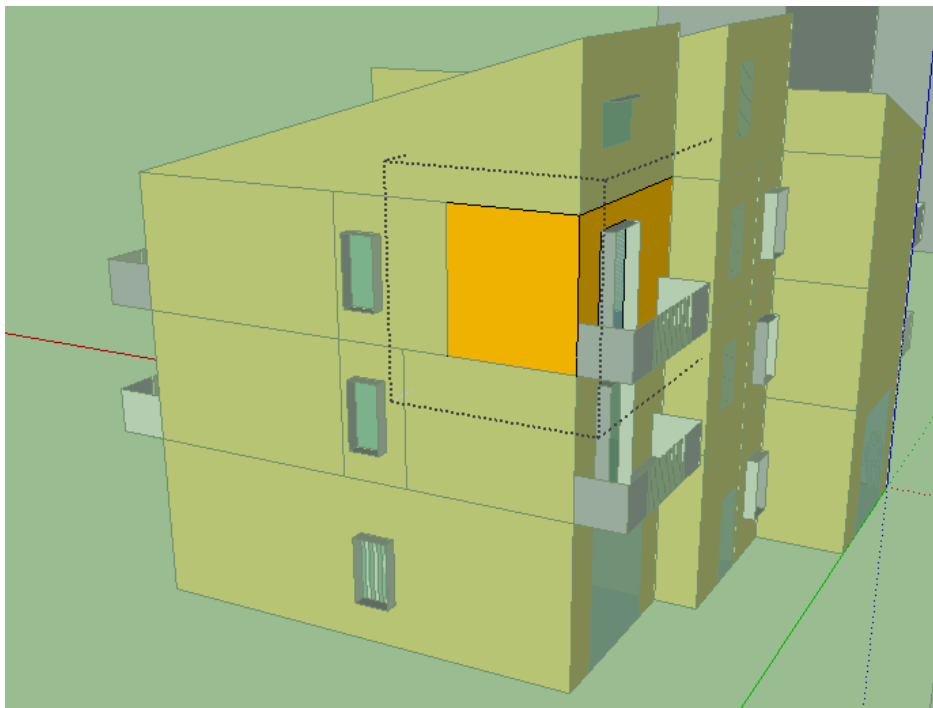


Figura 43: Zona termica 17 (Studio B)



Figura 44: Zona termica 18 (Scala B)

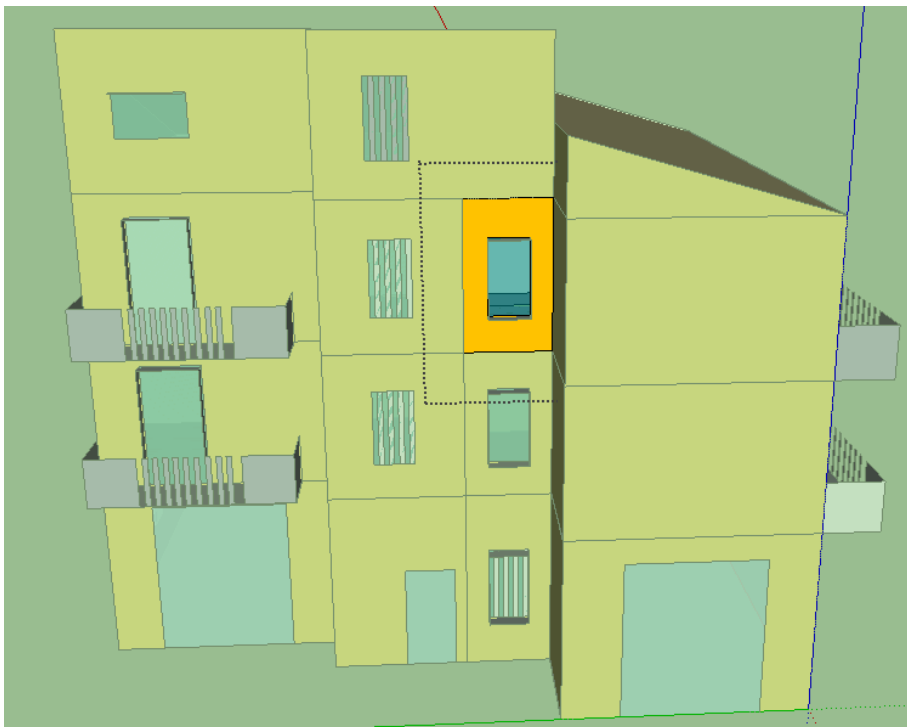


Figura 45: Zona termica 19 (Bagno B)

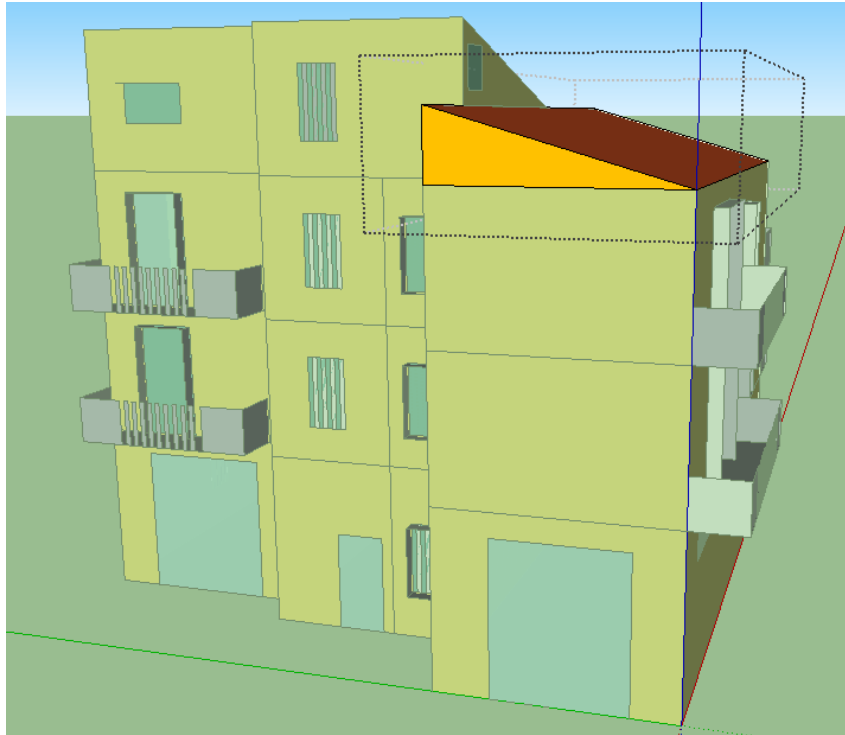


Figura 46: Zona termica 20 (Sottotetto locale 1)

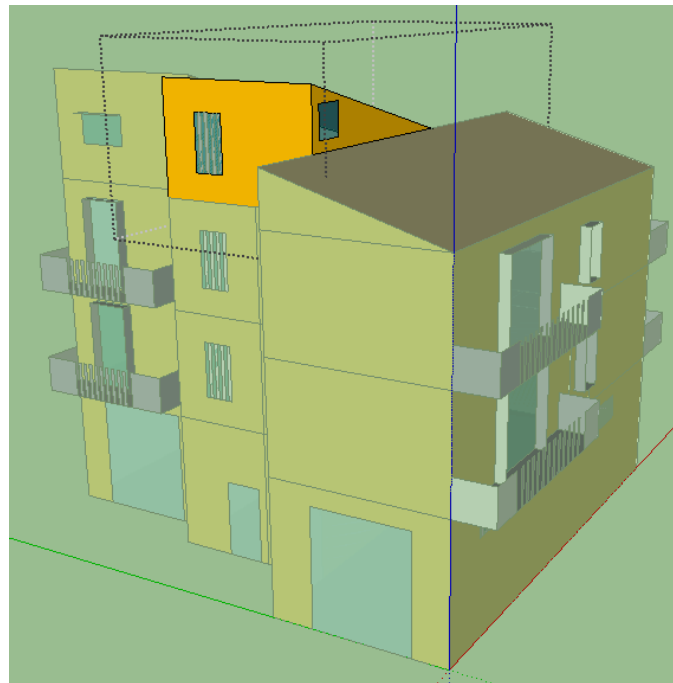


Figura 47: Zona termica 21 (Sottotetto locale 2)



Figura 48: Zona termica 22 (Sottotetto locale 3)

3.3 Ventilazione naturale

Le portate di ventilazione naturale sono state stimate utilizzando il modello *Wind and Stack* [67]. Il numero di ricambi d'aria per ciascuna zona termica è calcolato sulla base di alcuni parametri adimensionali funzione della geometria del sito, delle aperture e delle variabili meteorologiche locali.

La portata complessiva di ventilazione naturale è calcolata identificando due contributi separati, causati rispettivamente dal vento (*wind*) e dalle differenti densità dell'aria nell'ambiente indoor (*stack*).

La portata d'aria per ventilazione naturale causata dal vento per ciascuna zona termica è determinata dalle seguenti equazioni:

$$Q_w = C_w A_{\text{opening}} F_{\text{schedule}} V \quad (4)$$

Dove:

- Q_w è la Portata volumetrica dell'aria [m^3/s];
- C_w è un coefficiente adimensionale funzione della geometria, delle caratteristiche e dell'orientazione dell'apertura [adimensionale];
- A_{opening} è l'area dell'apertura [m^2];
- F_{schedule} è la frazione di area attraversata dal flusso d'aria [adimensionale];
- V è la velocità del vento [m/s].

La formulazione usata per calcolare la portata di ventilazione naturale determinata dall'effetto *stack* è riportata in Eq.5 :

$$Q_s = C_D A_{\text{opening}} F_{\text{schedule}} \sqrt{2g\Delta H_{NPL} (T_{\text{zone}} - T_{\text{odb}}) / T_{\text{zone}}} \quad (5)$$

Dove:

- Q_s è la portata volumetrica dell'aria dovuta all'effetto galleggiamento [m^3/s];
- C_D è il coefficiente di scarico dell'apertura [adimensionale];
- ΔH_{NPL} è l'altezza dal punto medio inferiore dell'apertura al livello di pressione neutra [m];

- T_{zone} è la temperatura a bulbo secco dell'aria della specifica zona termica esaminata [K];
- T_{odb} è la temperatura a bulbo secco dell'aria esterna [K].

La seguente equazione viene utilizzata per calcolare il coefficiente di scarico:

$$C_D = 0,40 + 0,0045 | T_{zone} - T_{odb} | \quad (6)$$

La portata complessiva di ventilazione naturale è invece determinata data dalla somma quadratica dei due componenti:

$$Q_{tot} = \sqrt{Q_S^2 + Q_w^2} \quad (7)$$

Le equazioni sono calcolate per ogni *timestep* della simulazione energetica in parallelo a opportune logiche di controllo dell'apertura delle finestre in relazione alle temperature dell'aria interna ed esterna.

3.4 Ulteriori assunzioni di modellizzazione e simulazione

Le prestazioni energetiche di ogni edificio sono influenzate in misura relativamente significativa anche dai carichi termici endogeni legati agli occupanti, alle apparecchiature elettriche e all'illuminazione. Anche la scelta dei dati climatici impiegati nelle simulazioni numeriche e le modalità ipotizzate di gestione dell'impianto termico influiscono sui risultati conseguiti.

Di seguito alcune assunzioni e ipotesi formulate:

- L'occupazione dell'edificio è nulla nel sottotetto e nel piano terra. L'occupazione massima nei due appartamenti è pari a tre e quattro occupanti nel primo e nel secondo piano rispettivamente. Si sono adottati dei profili di occupazione variabili, sia nella dimensione giornaliera sia nella mensile e stagionale, per modellizzare la complessità effettivamente esistente in un edificio reale;
- La densità di potenza elettrica per illuminazione e per apparecchiature elettriche installate per ciascuna zona termica è variabile nelle varie zone termiche. La densità di potenza per apparecchiature elettriche raggiunge un massimo di 65 W/m² circa nella cucina, mentre per l'illuminazione non si superano i 5 W/m²;
- L'accensione e lo spegnimento dei corpi illuminanti e delle apparecchiature è subordinata alla presenza degli occupanti, è soggetta a variabilità oraria e stagionale ed è determinata dalla destinazione d'uso degli ambienti analizzati;
- Si è operato con un *timestep* di simulazione di 30 minuti;
- La gestione dell'impianto termico si riferisce alla zona climatica D, pertanto l'impianto termico per riscaldamento è attivo per 12 ore giornaliere dal 1 novembre al 15 aprile. Per l'impianto di raffrescamento si è ipotizzata un'accensione di durata simile nei mesi di giugno, luglio, agosto, settembre;
- Si ipotizza la presenza di termostati per ogni zona termica, al fine di attivare opportunamente i circolatori e i fan-coil in dipendenza dalla temperatura dell'aria di ciascuna zona;
- I file climatici standard .EPW del database di *Energy Plus*⁵ sono utilizzati per la simulazione;
- La modellizzazione dei consumi di acqua calda sanitaria è basata su valori di fabbisogno tipici per edifici residenziali calcolati in riferimento alla norma UNI TS 11300.

⁵ <https://www.energyplus.net/weather>, ultimo accesso 09/02/2021

4 Discussione dei risultati

La presente sezione riporta in dettaglio i risultati ottenuti per le due configurazioni di sistema fabbricato-impianto prescelte e descritte in precedenza. Si presenteranno pertanto i consumi stimati a seguito della simulazione energetica dinamica per entrambe le configurazioni proposte, con uno specifico focus relativo alla generazione di energia in sito e l'interazione con il carico. Si calcoleranno infine bilanci di energia estesi all'esclusiva fase d'uso dell'edificio con particolare riferimento alle metodologie di calcolo definite in seno al gruppo di lavoro IEA EBC Annex 52 / SHC Task 40 *Towards solar net zero energy buildings* e alla definizione di *Zero Energy Building* sviluppata da ASHRAE.

4.1 Scenario A: consumi di energia elettrica

In questo paragrafo si approfondisce il dettaglio dei consumi energetici dello scenario A con particolare riferimento al contributo di ciascun utilizzo energetico del vettore energetico elettricità.

In particolare la Figura 49 riporta i consumi di energia elettrica per l'edificio con dettaglio mensile riportando anche la suddivisione relativa ai singoli contributi dovuti ad apparecchiature elettriche, pompa di calore per riscaldamento/raffrescamento, illuminazione, ausiliari e *fancoils*, acqua calda sanitaria.

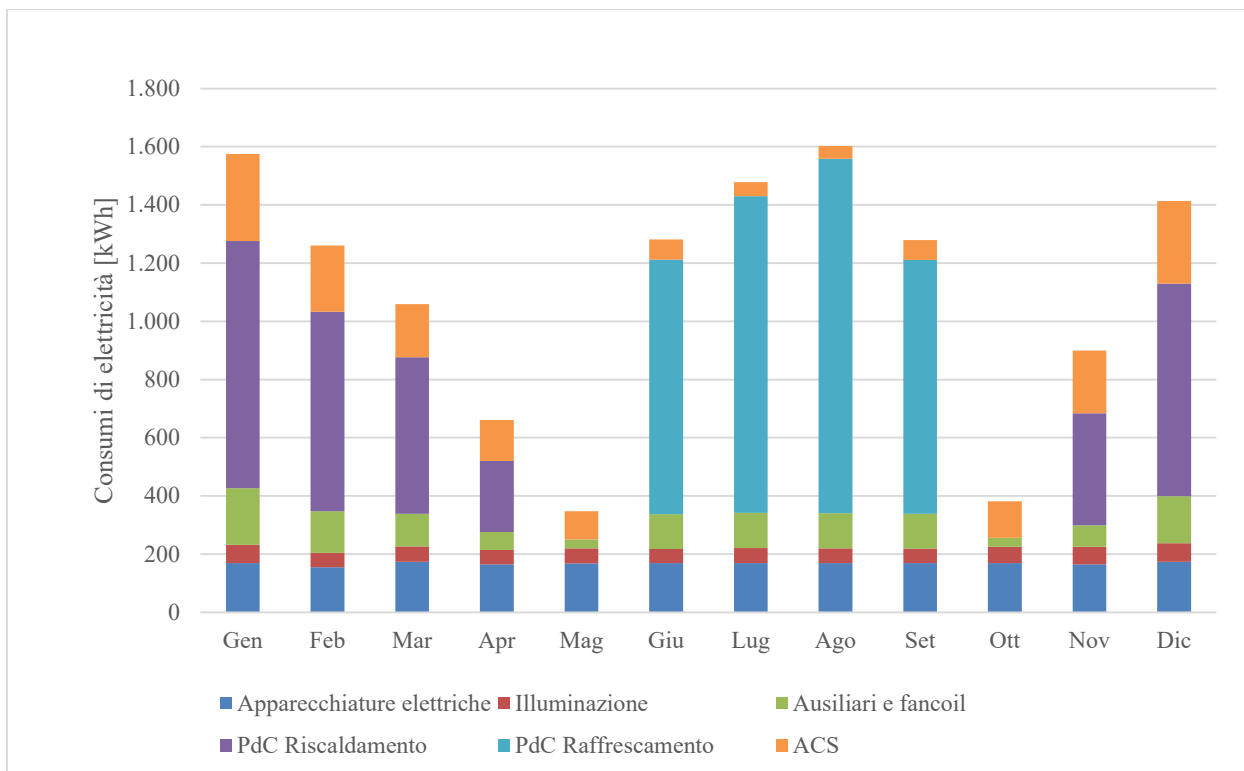


Figura 49: Consumi di elettricità dell'edificio, dettaglio mensile - Scenario A [kWh]

Si evidenzia un'incidenza prominente dei consumi per riscaldamento e raffrescamento rispettivamente nei mesi invernali e estivi, un'incidenza mediamente più costante di acqua calda sanitaria, illuminazione e consumi per apparecchiature elettriche. La moderata variabilità nel caso dei consumi acqua calda sanitaria dipende evidentemente dal più alto contributo fornito dal sistema solare termico nei mesi estivi, rispetto a quelli invernali. La *solar fraction* complessiva per il sistema di generazione dell'acqua calda sanitaria raggiunge in un anno il valore medio di 52%, con valori variabili su base annua che si attestano su percentuali minime del 25% a Gennaio e Dicembre e massime di 81% in Agosto (Si faccia riferimento alla Figura 49 e alla Figura 50).

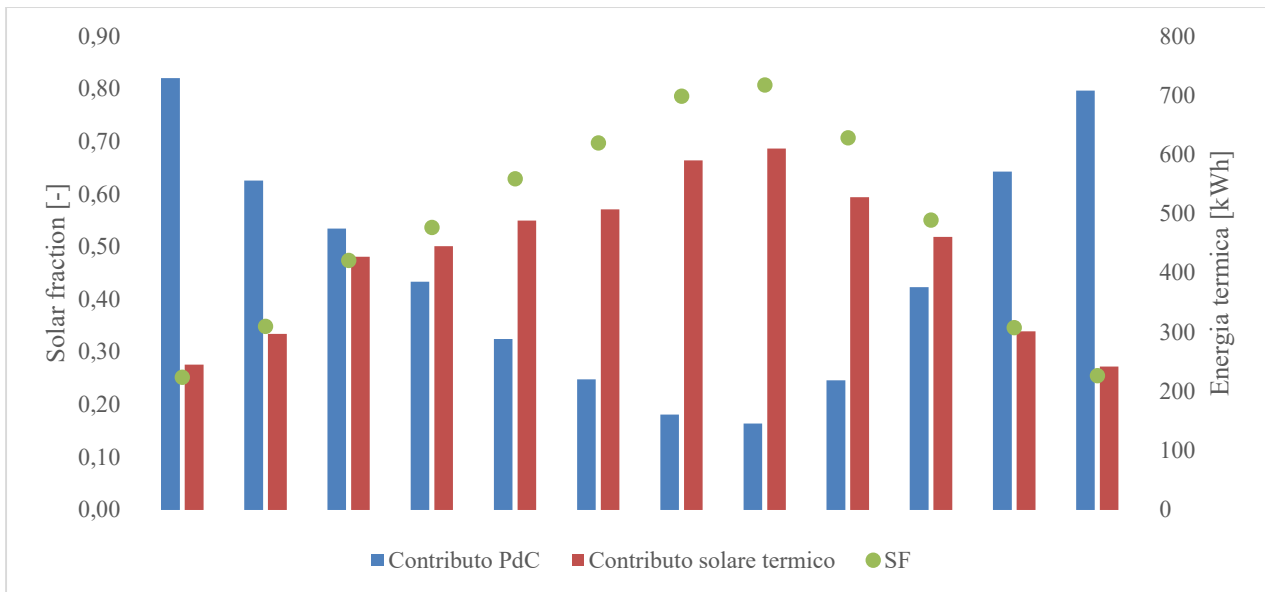


Figura 50: Energia generata da pompa di calore e sistema solare termico e corrispondente Solar Fraction – Acqua calda sanitaria

La distribuzione percentuale dei consumi è riportata in Figura 51. In particolare le apparecchiature elettriche incidono per il 15,22% dei consumi di elettricità complessivi, l'illuminazione per il 4,88%, gli ausiliari e i *fancoil* per il 7,05%, la pompa di calore in modalità riscaldamento per il 25,93%, la pompa di calore in modalità raffrescamento per il 33,32%, l'acqua calda sanitaria per il 5,92%.

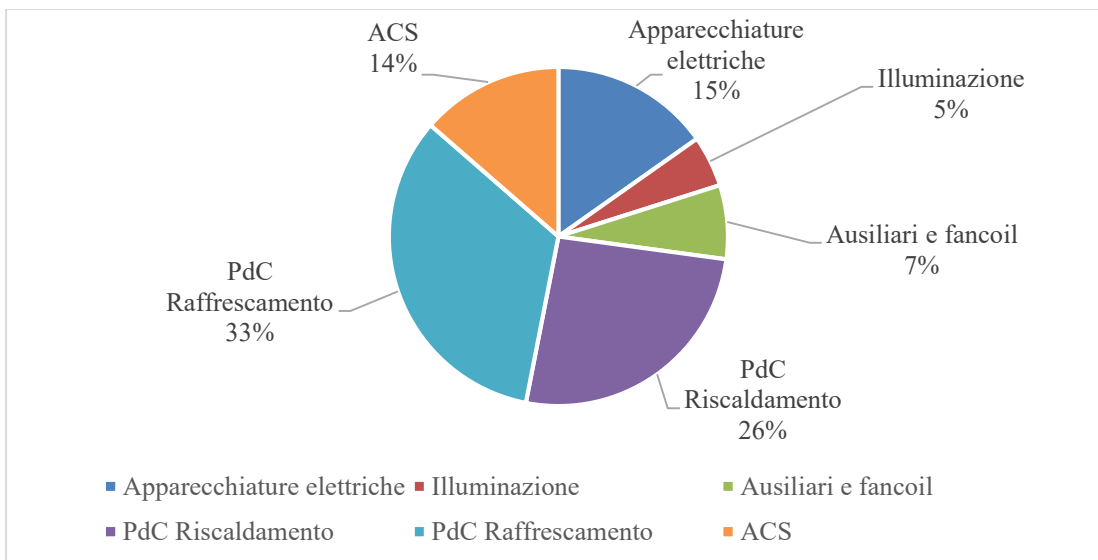


Figura 51: Consumi di elettricità dell'edificio, Scenario A

I valori appena discussi sono altresì riportati in Tabella 22, sia complessivamente che in termini specifici, con riferimento al primo e secondo piano pari a 304,04 m².

Tabella 22: Dettaglio dei consumi complessivi per elettricità – Scenario A

Consumi di elettricità	kWh/anno	kWh/(anno m ²)
Apparecchiature elettriche	2014,71	6,95
Illuminazione	646,62	2,23
Ausiliari e <i>fancoil</i>	933,39	3,22
PdC Riscaldamento	3432,46	11,84
PdC Raffrescamento	4411,65	15,21
ACS	1800,04	6,21
Totale	13238,87	45,65

4.2 Confronto tra scenario A e B: consumi e generazione di energia

Dal punto di vista strettamente termofisico gli scenari A e B sono sostanzialmente equivalenti. La variabilità introdotta dall'utilizzare come isolante termico il polistirene XPS o la cellulosa naturale è connessa all'utilizzo di spessori differenti di materiale che garantiscano una trasmittanza termica equivalente nei due casi.

Con queste premesse appare pertanto evidente che i risultati, riportati in Tabella 23, siano effettivamente equivalenti e riportino differenze contenute e sostanzialmente trascurabili tra i due scenari alternativi di analisi.

Tabella 23: Dettaglio dei consumi complessivi per elettricità – confronto tra Scenario A e B

	Scenario A		Scenario B	
	kWh / a	kWh/(a m ²)	kWh / a	kWh/(a m ²)
Apparecchiature elettriche	2.014,71	6,63	2.014,71	6,63
Illuminazione	646,62	2,13	646,62	2,13
Ausiliari e <i>fancoil</i>	933,39	3,07	926,20	3,05
PdC Riscaldamento	3.432,46	11,29	3.414,55	11,23
PdC Raffrescamento	4.411,65	14,51	4.470,93	14,71
ACS	1.800,04	5,92	1.800,04	5,92
Totale	13.238,87	43,54	13.273,04	43,66

La generazione da fotovoltaico per il sistema in esame, e per entrambi gli scenari A e B, è pari a 13509,99 kWh/anno. La generazione con dettaglio mensile è riportata inoltre in Figura 52.

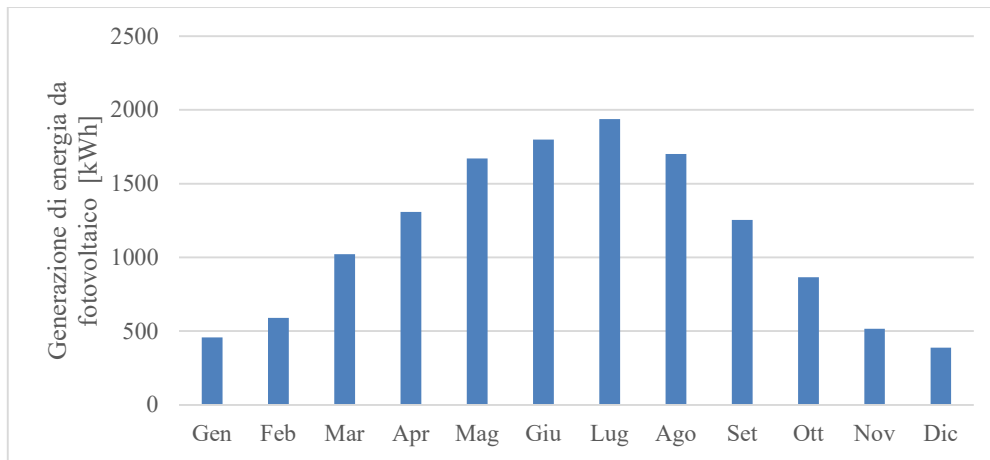


Figura 52: Generazione di energia da sistema fotovoltaico: dettaglio mensile

Risultati comparabili sono altresì riscontrabili se, in luogo dell'analisi proposta tramite file climatici di *energy plus*, si utilizzassero file climatici CTI – UNI 10349 per la località di Roma. Il risultato ottenuto per i consumi dello scenario A, ma queste considerazioni sono estendibili anche allo scenario B, è pari a 13.117, 30 kWh/anno. L'opzione di simulare anche con dati climatici CTI – UNI 10349 è pervenuta dalla committenza.

4.3 Load matching e interazione con la rete: Scenario A

La presenza del sistema di accumulo energetico nello scenario A ha indotto gli autori del presente report a sviluppare un'analisi ancor più accurata della generazione e della domanda di energia dell'edificio. In particolare, ci si è avvalsi dell'ausilio dei seguenti indicatori [68]:

$$\gamma_{load} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \min[g(t) - S(t) - \delta(t), l(t)] dt}{\int_{t_1}^{t_2} l(t) dt} \quad (8)$$

$$LOLP = \frac{\int_{t_1}^{t_2} dt \cdot 1(t) > (g(t) - S(t) - \delta(t))}{t_2 - t_1} \quad (9)$$

Dove:

- $g(t)$: è la generazione di energia in sito,
- $S(t)$: è il bilancio di energia del sistema di accumulo energetico,
- $\delta(t)$: rappresenta le perdite energetiche nel sistema,
- $l(t)$: rappresenta i consumi energetici istantanei,
- t_1 e t_2 : rappresentano il tempo di analisi.

L'indicatore *load cover factor* - γ_{load} fornisce un'indicazione del grado di contemporaneità tra consumi e generazione a livello istantaneo nel corso dell'anno di analisi. Un valore unitario suggerirebbe una contemporaneità perfetta tra le due grandezze, un valore nullo un'assenza totale di sovrapposizione temporale.

L'indicatore *loss of load probability* – *LOLP* identifica invece la percentuale di ore di consumi che non sono soddisfatti dalla generazione in sito. Differentemente dal *load cover factor* non fornisce indicazioni quantitative sul grado di copertura della domanda ma si limita a fornire indicazioni sulla percentuale di ore dell'anno durante le quali la copertura da tecnologie alimentate da fonti rinnovabili non è completa. Per quanto simili nella formulazione e nel concetto ispiratore, gli indicatori sono pertanto complementari e sono stati entrambi adoperati nello sviluppo dello studio.

La Figura 53 riporta un'analisi di sensibilità sulla taglia dell'accumulo elettrico. Si segnala che il caso di accumulo pari a 0 kWh coincide sostanzialmente con lo scenario B: si evidenzia per questo caso un LCF pari a circa il 40%, come spesso accade per applicazioni di sistemi fotovoltaici, e un LOLP pari a circa il 60% delle ore.

I trend mostrati dagli indici tendono ad assumere valori ovviamente migliorativi all'aumentare della taglia del sistema di accumulo: si osserva altresì una tendenza al raggiungimento di un plateau superato il valore di 30 kWh, che è stato assunto come valore della capacità del sistema di accumulo dello scenario A.

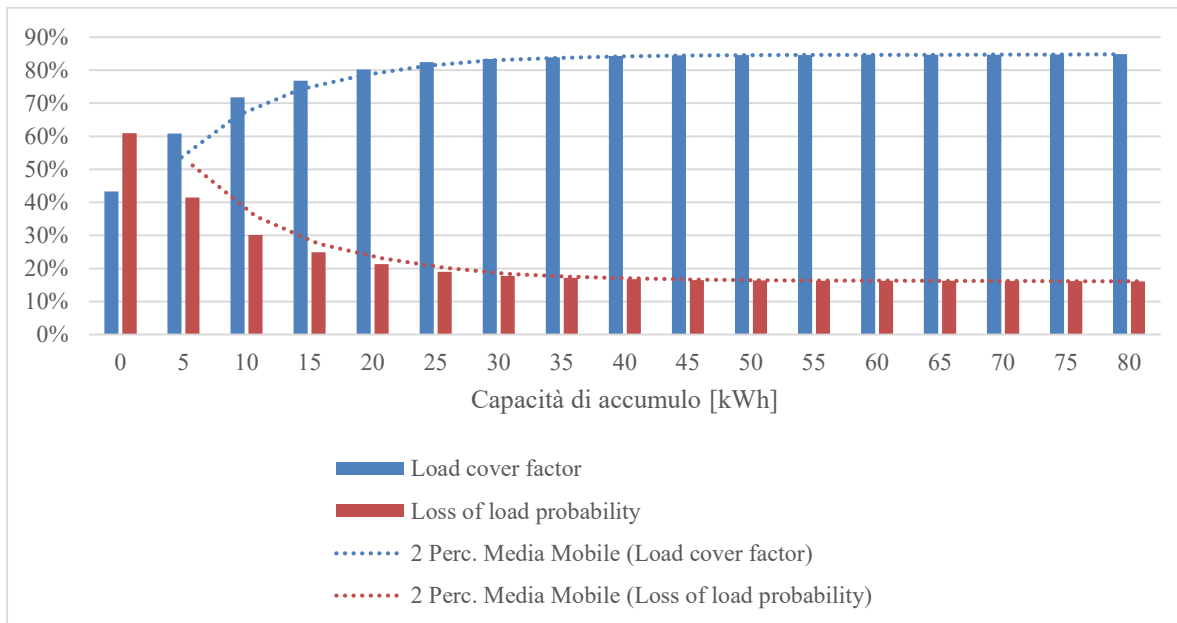


Figura 53: Load cover factor e loss of load probability per lo scenario A – Analisi di sensibilità sulla taglia dello scenario di accumulo

4.4 Sintesi scenario A e B

Gli aspetti salienti degli scenari A e B sono stati delineati, parallelamente ai principali risultati in termini di prestazioni energetiche del sistema fabbricato – impianto. Si riporta pertanto nella Tabella 24 una sintesi dei principali risultati legati a generazione di energia e consumi

Tabella 24 – Sintesi dei risultati energetici degli scenari A e B

	Scenario A [kWh]	Scenario B [kWh]
Generazione elettricità	13.509,99	13.509,99
Consumi elettricità	13.238,87	13.273,04
Import	4.110,62	9.993,59
Export	3.777,91	10.230,54
Autoconsumo da PV	3.292,77	3.292,77
Autoconsumo da batteria	5.835,48	-

Dai risultati si evince che l'edificio genera più energia di quanta ne consumi e pertanto verifica la seguente definizione di *Net Zero Energy Building* (Eq. 10 – Bilancio *Load - Generation*), sviluppata nell'ambito del gruppo di lavoro dell'Agenzia Internazionale dell'Energia IEA EBC Annex 52 – SHC Annex 52 "Towards net zero energy solar buildings".

$$\text{Bilancio} = \sum_{t=1}^{t=2} G(t) w_g - L(t) w_l \quad (10)$$

Dove:

t_1 e t_2 rappresentano gli estremi di calcolo per il periodo di interesse,

$G(t)$ è la generazione complessiva di energia in sito,

w_g è il fattore di conversione in energia primaria per la generazione di energia,

$L(t)$ rappresenta i consumi di energia in sito,

w_l è il fattore di conversione in energia primaria da utilizzarsi per i consumi energetici.

La Figura 54 mostra i risultati di un calcolo basato su un fattore di conversione in energia primaria $f_{p,tot}=2,42$, simmetrico tra generazione e carico, e basato sull'eq.10. In entrambi gli scenari il valore superiore della generazione rispetto ai consumi di energia e l'utilizzo di fattori di conversione in energia primaria simmetrici tra generazione e carico conducono a bilanci NZEB verificati[71-73].

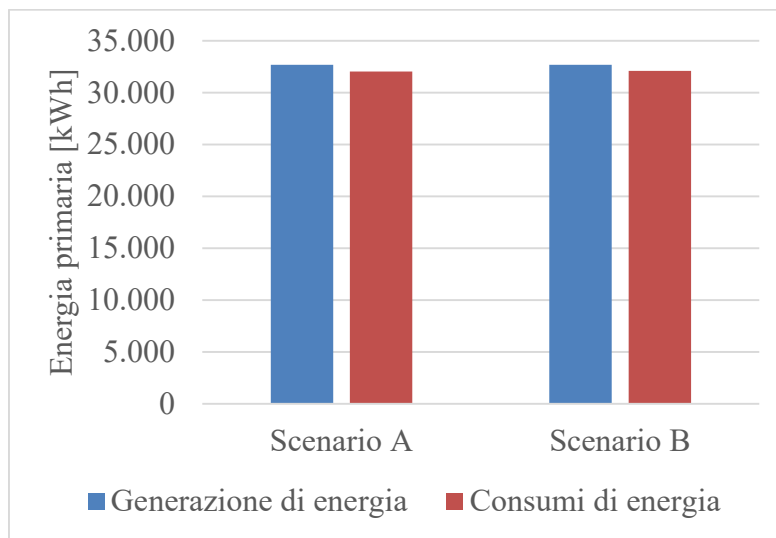


Figura 54: Bilancio di energia Load – generation

Se, viceversa si fosse adoperata la convenzione del bilancio *delivered – exported*, propria per altro anche della definizione di *Zero Energy Building*⁶ fornita da NREL e dal DOE, sarebbe stato necessario utilizzare la seguente formulazione.

$$\text{Bilancio} = \sum_{t=1}^{t=2} E_{del}(t) r_{del} - E_{exp}(t) r_{exp} \quad (11)$$

Dove:

$E_{del}(t)$ rappresenta l'energia importata per vettore energetico,

r_{del} il fattore di conversione in energia primaria per l'energia importata

6

<https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/09/f26/A%20Common%20Definition%20for%20Zero%20Energy%20Buildings.pdf> Ultimo accesso 14/02/2021, *A common definition for Zero Energy Buildings* – NREL – Settembre 2015

$E_{exp}(t)$ rappresenta l'energia esportata e generata da fonti rinnovabili,
 r_{exp} è il fattore di conversione in energia primaria per l'energia esportata.

Si noti che in questo caso si prende in considerazione energia esportata ed importata: i risultati di Figura 55 conducono ad uno scenario A in cui il bilancio è appena negativo (Import>Export di energia) e nel caso dello scenario B (Import<Export) al raggiungimento del target di NZEB.

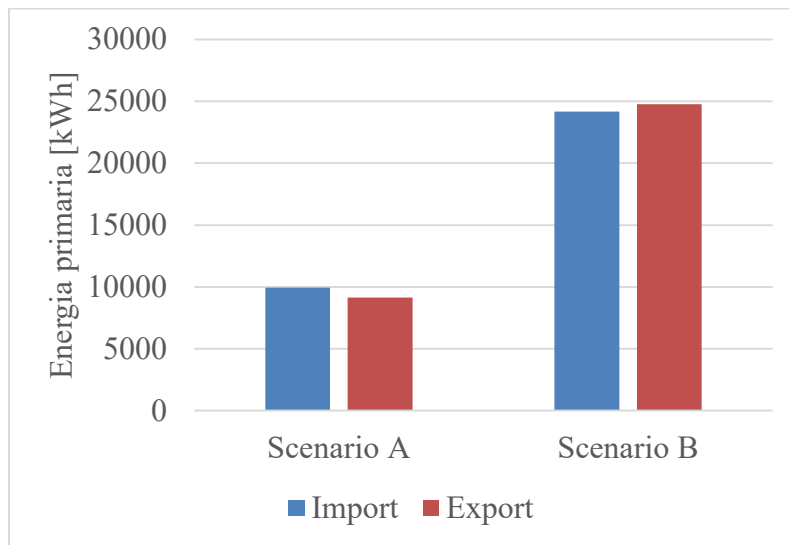


Figura 55: Bilancio di energia import – export

Va rimarcato che nello scenario A le perdite di energia legate alle efficienze di carica e scarica del sistema di accumulo riducano la disponibilità di energia esportata verso la rete.

Va altresì sottolineato, in conclusione, che le prestazioni termofisiche dell'involucro e degli impianti (es. $H't$ nella legislazione italiana corrente) risultino migliori rispetto ai valori fissati dal decreto "requisiti minimi"⁷ e che le definizioni adottate di (Net) Zero energy building rispetto a quella adottata dalla legislazione italiana di Nearly zero energy building sono senz'altro più stringenti e di più complesso raggiungimento⁸.

⁷ [Decreto interministeriale 26 giugno 2015 - Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici \(mise.gov.it\)](https://www.mise.gov.it/index.php/it/normativa/decreti-interministeriali/2032966-decreto-interministeriale-26-giugno-2015-applicazione-delle-metodologie-di-calcolo-delle-prestazioni-energetiche-e-definizione-delle-prescrizioni-e-dei-requisiti-minimi-degli-edifici) – Decreto interministeriale 26 Giugno 2015 – Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici – Ultimo accesso 14/02/2021

⁸ <https://www.mise.gov.it/index.php/it/normativa/decreti-interministeriali/2032966-decreto-interministeriale-26-giugno-2015-applicazione-delle-metodologie-di-calcolo-delle-prestazioni-energetiche-e-definizione-delle-prescrizioni-e-dei-requisiti-minimi-degli-edifici> - Decreto Legislativo 3 Marzo 2011, n.28. Attuazione della direttiva 2009/28/CE sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili, recante modifica e successiva abrogazione delle direttive 2001/77/CE e 2003/30/CE – pubblicato nella G.U. n.71 del 28/03/2011 – suppl. ord. N.81 – in vigore dal 29/03/2011 – Ultimo accesso 14/02/2021

5 Life Cycle Assessment

Lo studio LCA è stato sviluppato in conformità alle norme ISO 14040 e 14044 [9], [10] e con riferimento alla norma EN 15978: 2011 [14] e alla norma EN 15804: 2019 [15], recepite in Italia come UNI EN 15978: 2011 e UNI EN 15804:2019.

5.1 Definizione dell'obiettivo e descrizione del sistema di prodotto

L'obiettivo dello studio è la valutazione degli impatti energetico – ambientali connessi ad un edificio ad uso residenziale ad energia netta zero (Net Zero Energy Building – NZEB) nella fase d'uso. L'edificio consiste in una villetta bifamiliare che si sviluppa su due piani ed è sito nella zona climatica D.

Il sistema di prodotto è costituito dai componenti dell'involucro edilizio e dai componenti d'impianto integrati necessari all'edificio in esame per raggiungere il target di NZEB nella fase d'uso. Tali componenti sono elencati di seguito:

Componenti d'involucro

- aperture finestrate;
- copertura esterna (tetto);
- pareti perimetrali verticali;
- pareti divisorie interne;
- pavimenti di interpiano;
- pavimento contro terra;
- porte interne;
- porte blindate esterne;
- serrande dei garage.

Componenti d'impianto

- impianto fotovoltaico;
- accumulo elettrico (configurazione 1);
- centrale termica e componenti dell'impianto di climatizzazione;
- centrale termica e componenti dell'impianto di produzione dell'acqua calda sanitaria.

I componenti dell'involucro edilizio esterno sono stati progettati per garantire il rispetto dei valori massimi di trasmittanza termica stabiliti dal Decreto Requisiti Minimi del 26 giugno 2015. Con riferimento alla scelta del materiale per l'isolamento termico dell'edificio, sono stati valutati due scenari: isolamento termico realizzato con materiale termoplastico e isolamento termico realizzato con materiali a base biologica. In entrambi gli scenari, i componenti dell'involucro edilizio sono stati progettati per garantire lo stesso valore di trasmittanza termica. Più in dettaglio, gli scenari esaminati sono:

- Scenario XPS, che fa riferimento alla configurazione 1, in cui l'isolamento termico è realizzato con polistirene espanso estruso;
- Scenario FC, che fa riferimento alla configurazione 2, in cui l'isolamento termico è realizzato in fibre di cellulosa.

In Tabella 25 sono riportati i valori di trasmittanza termica degli elementi edilizi oggetto di analisi e i valori di trasmittanza massima stabiliti dal Decreto Requisiti Minimi.

Tabella 25: Valori di trasmittanza termica degli elementi dell'involucro edilizio nell'edificio oggetto di analisi e valori di trasmittanza massima stabiliti dal decreto requisiti minimi

Elemento edilizio	Classificazione - Decreto requisiti minimi	$U_{S-XPS/S-FC}$ [W/(m ² K)]	U_{rif} [W/(m ² K)]
Aperture finestrate	Chiusure tecniche trasparenti verso l'esterno	1,4	1,8
Tetto	Struttura opaca inclinata di copertura verso l'esterno	0,21	0,26
Pavimenti interpiano	Struttura opaca orizzontale di copertura confinante con ambienti non climatizzati	0,25	0,26
Pareti perimetrali verticali	Struttura opaca verticale verso l'esterno	0,20	0,29
Pavimento contro terra	Struttura opaca orizzontale confinante con ambienti non climatizzati	0,25	0,29

L'impianto di climatizzazione è costituito da una pompa di calore e da un accumulo termico. L'impianto di produzione dell'acqua calda sanitaria è costituito da un impianto solare termico, da una pompa di calore e da un accumulo termico. Con riferimento all'impianto fotovoltaico è stato valutato uno scenario in cui l'impianto è collegato alla rete elettrica e ad un accumulo elettrico (Scenario cAE, configurazione 1) e uno scenario in cui l'impianto è collegato solo alla rete elettrica, senza accumulo elettrico (Scenario sAE, configurazione 2).

In sintesi, sulla base degli scenari analizzati sono state investigate due possibili configurazioni per l'edificio in oggetto:

- Configurazione 1: edificio residenziale con isolamento termico realizzato con polistirene espanso estruso; sistema impiantistico costituito da due pompe di calore, un impianto solare termico, due accumuli termici, un impianto fotovoltaico connesso alla rete e integrato con un accumulo elettrico;
- Configurazione 2: edificio residenziale con isolamento termico realizzato con fibre di cellulosa; sistema impiantistico costituito da due pompe di calore, un impianto solare termico, due accumuli termici e un impianto fotovoltaico connesso alla rete.

Gli obiettivi specifici dello studio sono:

- valutare gli impatti energetico – ambientali connessi ai principali componenti costituenti l'involucro esterno e gli elementi divisorii interni dell'edificio;
- valutare gli impatti energetico – ambientali connessi ai principali componenti dell'impianto fotovoltaico e degli impianti di climatizzazione e di produzione dell'acqua calda sanitaria e dell'accumulo elettrico (solo per la configurazione 1);
- valutare l'incidenza dei singoli componenti di involucro e di impianto sulle prestazioni energetico – ambientali complessive;
- confrontare gli impatti energetico – ambientali connessi all'impiego di un materiale isolante termoplastico e di un materiale isolante a base biologica a parità di trasmittanza termica dei componenti d'involucro;
- confrontare gli impatti ambientali connessi al sistema edificio nelle Configurazioni 1 e 2.

5.2 Definizione del campo di applicazione

5.2.1 Funzione, unità funzionale e flusso di riferimento

L'unità funzionale dello studio è rappresentata da un edificio ad uso residenziale ad energia netta zero nella fase d'uso, abitato da 7 persone e avente una vita utile di 60 anni. L'analisi è stata focalizzata ai soli componenti di involucro e di impianto necessari all'edificio in esame per raggiungere il target di NZEB (edificio ad energia netta zero) nella fase d'uso. In Tabella 26 sono descritti i componenti edilizi costituenti l'involucro esterno e gli elementi divisorii interni nello scenario XPS e nello scenario FC e i componenti d'impianto negli scenari cAE e sAE.

Tabella 26: Componenti edilizi e d'impianto

Componenti edilizi	Scenari	
	XPS	FC
Componente		
Aperture finestrate [m ²]	58,12	58,12
Trasmittanza [W/(m ² K)]	1,4	
Tetto [m ²]	156,25	156,45
Trasmittanza [W/(m ² K)]	0,21	
Pavimenti di interpiano [m ²]	536,16	537,78
Trasmittanza [W/(m ² K)]	0,25	
Pareti perimetrali verticali [m ²]	606,85	609,54
Trasmittanza [W/(m ² K)]	0,20	
Pavimento a contatto con il terreno [m ²]	178,72	179,26
Trasmittanza [W/(m ² K)]	0,25	
Porte esterne blindate [m ²]	9,92	9,92
Serrande dei garage [m ²]	38,4	38,4
Pareti divisorie interne [m ²]	340,66	340,66
Trasmittanza [W/(m ² K)]	0,96	
Porte interne [m ²]	31,40	31,40
Componenti d'impianto (CI)		
Componenti per l'impianto di climatizzazione		1
Pompa di calore [unità]		1
Potenza in raffreddamento [kW]		22,3
Potenza in riscaldamento [kW]		23,9
Componenti per l'impianto di acqua calda sanitaria		
Pompa di calore [unità]		1
Potenza in riscaldamento [kW]		8,81
Impianto solare termico		
Collettori solari piani [m ²]		7,5
Sistema fotovoltaico	cAE	sAE
Pannello fotovoltaico – Potenza installata (kW)	10.8	10.8
Accumulo elettrochimico – Capacità energetica (solo per la configurazione 1) (kWh)	30	-

5.2.2 Confini del sistema

I confini del sistema sono *from cradle to grave* e includono le seguenti fasi di ciclo di vita:

- fase di estrazione e trasformazione delle materie prime, che include tutti i processi che avvengono a monte della produzione dei prodotti investigati;
- fase di trasporto delle materie prime presso la fabbrica in cui avviene la produzione;
- fase di produzione del prodotto finito presso la fabbrica;
- fase d'uso;
- fase di fine vita.

I confini del sistema sono stati definiti con riferimento alla struttura modulare prevista dalle norme UNI EN 15978 e UNI EN 15804. Relativamente ai moduli inclusi nell'analisi, le assunzioni specifiche del caso studio sono descritte di seguito:

- Modulo A – fase di produzione e costruzione. Sono stati inclusi i moduli A1 (processi di estrazione e trasformazione delle materie prime e/o il processo di trasformazione dei materiali secondari), A2 (trasporto dal sito di estrazione/trasformazione o di riciclo alla fabbrica in cui avviene la produzione dei materiali/componenti edili e di impianto) e A3 (produzione dei materiali/componenti edili e dei componenti di impianto). I moduli “A4 – trasporto” e “A5 – costruzione e installazione” non sono stati considerati perché al di fuori del campo di applicazione dello studio LCA.
- Modulo B – fase d’uso. Sono stati inclusi i moduli B4 (sostituzione di elementi non strutturali ed impiantistici) e B6 (usi energetici). Gli altri moduli sono stato esclusi dall’analisi poiché non rientrano nel campo di applicazione dello studio.
- Modulo C – fine vita. Sono stati inclusi il modulo C3 (processi di trasporto verso i siti di smaltimento) e il modulo C4 (processo di smaltimento finale degli componenti di involucro e di impianto).
- Modulo D – benefici e carichi ambientali oltre i confini del sistema. In questo modulo sono stati considerati i benefici ambientali connessi all’immissione in rete del surplus di produzione di energia elettrica dell’impianto fotovoltaico.

La descrizione dettagliata delle assunzioni relative alla modellizzazione delle fasi del ciclo di vita incluse nell’analisi è riportata nel Paragrafo 1.3.

5.2.3 Metodologia di valutazione degli impatti ambientali e categorie di impatto ambientale

La valutazione degli impatti ambientali è stata effettuata stimando il contributo del sistema di prodotto alle categorie ambientali, principali e supplementari, raccomandate dalla norma UNI EN 15804:2019 con l’eccezione della categoria “depauperamento delle risorse abiotiche - combustibili fossili”. La valutazione degli impatti energetici è stata effettuata stimando l’energia incorporata nel sistema di prodotto considerando sia il contributo di energia primaria non rinnovabile che quello rinnovabile.

In Tabella 27 sono elencate le categorie di impatto energetico - ambientali selezionate.

Gli impatti energetico – ambientali sono stati stimati utilizzando i seguenti metodi di calcolo:

- Cumulative Energy Demand (CED), per il calcolo dell’energia primaria incorporata suddivisa in energia primaria rinnovabile e non rinnovabile [74];
- EN 15804 +A2 Method V1.00 per il calcolo degli impatti ambientali, basato sul metodo EF 3.0 sviluppato da Fazio et al. [75].

La categoria “depauperamento delle risorse abiotiche - combustibili fossili” del metodo EN 15804 +A2 Method V1.00 è stata sostituita dalla categoria energia primaria incorporata calcolata con il metodo CED. Il metodo CED quantifica la parte di energia sottratta alla natura e immagazzinata nella formazione di un prodotto, espressa in MJ, e valuta i consumi energetici di un processo suddividendo le risorse energetiche in:

- energia non rinnovabile, fossile;
- energia non rinnovabile, nucleare;
- energia rinnovabile, biomasse;
- energia rinnovabile, eolica, geotermica e solare;
- energia rinnovabile, idroelettrica.

Tabella 27: Categorie d'impatto considerate nello studio

Categoria d'impatto	Unità di misura	Acronimo
Energia incorporata (<i>embodied energy</i>)	MJ	EE
Energia incorporata, non rinnovabile	MJ	EE _r
Energia incorporata, rinnovabile	MJ	EE _{nr}
Cambiamento climatico	kg CO _{2eq}	GWP
Cambiamento climatico - contributo fossile	kg CO _{2eq}	GWP _f
Cambiamento climatico - contributo biogenico	kg CO _{2eq}	GWP _b
Cambiamento climatico - contributo dell'uso del suolo e del cambiamento dell'uso del suolo	kg CO _{2eq}	GWP _{LULUC}
Riduzione dello strato d'ozono	kg CFC-11 _{eq}	ODP
Acidificazione	mol H ⁺ _{eq}	AP
Eutrofizzazione delle acqua dolci	kg PO _{4eq}	EP _{FW}
Eutrofizzazione delle acqua marine	kg N _{eq}	EP _M
Eutrofizzazione terrestre	molc N _{eq}	EP _T
Formazione di ozono fotochimico	kg NMVOC _{eq}	POCP
Depauperamento delle risorse abiotiche - minerali e metalli	kg Sb _{eq}	ADP _{m&m}
Consumo della risorsa idrica	m ³ _{world eq. deprived}	WDP
Emissioni di particolato	Potenziale di incidenza	PM
Radiazione ionizzante effetti sulla salute umana	kBq U ²³⁵ _{eq}	IR
Ecotossicità delle acque dolci	CTU _e	E _{FW}
Tossicità per gli esseri umani-effetti non cancerogeni	CTU _h	HT-nce
Tossicità per gli esseri umani-effetti cancerogeni	CTU _h	HT-ce
Impatti connessi all'uso del suolo/qualità del suolo	-	LU

5.3 Analisi di inventario di ciclo di vita e qualità dei dati

5.3.1 Analisi di inventario – Fase di produzione (Modulo A)

Durante la fase di analisi di inventario sono stati raccolti i dati necessari per la modellizzazione dei componenti dell'involucro edilizio, dei componenti del sistema fotovoltaico e dell'impianto di climatizzazione e di produzione dell'acqua calda sanitaria e sono stati identificati i dataset più appropriati per la modellizzazione del processo di produzione dei materiali di cui sono costituiti i diversi componenti. Nello studio sono stati utilizzati sia dati primari che secondari. In dettaglio, i dati primari relativi alle quantità e alle tipologie di materiali impiegati nella realizzazione dei componenti di involucro e di impianto (processi principali o di *foreground*) sono stati tratti dagli elaborati progettuali (Parte A). I dati secondari, relativi agli eco – profili dei materiali e delle risorse energetiche impiegati nelle fasi di produzione dei componenti del sistema di prodotto analizzato (dati secondari o di *background*) sono stati tratti dal database ambientale Ecoinvent 3.6 [76] e sono riferiti al contesto italiano, quando possibile, o a quello europeo.

I risultati della fase di raccolta e di elaborazione dei dati primari e i dataset ambientali selezionati per la modellizzazione dei processi di produzione dei materiali che costituiscono i componenti dell'involucro edilizio sono sintetizzati nella Tabella 28 e Tabella 29. I dati sono riferiti sia allo scenario XPS che allo scenario FC. Le differenze tra i valori ottenuti nei due scenari esaminati sono dovute al diverso spessore di strato isolante necessario nei componenti dell'involucro edilizio per ottenere lo stesso valore di trasmittanza al variare della tipologia di materiale isolante impiegato.

I dataset ambientali includono i carichi ambientali connessi all'approvvigionamento delle materie prime, ai trasporti, al processo di produzione dei materiali e dei componenti pronti per essere utilizzati nell'edificio e,

in alcuni casi, allo smaltimento degli scarti di produzione. Pertanto, sono rappresentativi dell'impatto ambientale connesso ai moduli A1, A2 e A3.

Tabella 28: Componenti dell'involucro edilizio – Scenario XPS e Scenario FC

Componente	Scenario XPS	Scenario FC
	Superficie [m ²]	Superficie [m ²]
Tetto	156,25	156,45
Pavimenti di interpiano	536,16	537,78
Pavimento contro terra	178,72	179,26
Pareti perimetrali verticali	606,85	609,54
Pareti divisorie interne	340,66	340,66
Finestre	58,12	58,12
Porte interne	31,40	31,40
Porte esterne	9,92	9,92
Saracinesche garage	38,4	38,4

Tabella 29: Materiali e dataset ambientali utilizzati per la modellizzazione dei processi di produzione dei componenti dell'involucro edilizio – Scenario XPS e Scenario FC

Componente	Materiali	Scenario XPS	Scenario FC	Dataset Ecoinvent 3.6 per la
				modellizzazione dei processi di produzione
Tetto	Legno [kg]	19.000,44	19.024,72	Wood chips, plywood production for outdoor use
	Isolante XPS [kg]	546,89	-	Polystyrene foam slab production
	Isolante in fibre di cellulosa [kg]	-	774,44	Cellulose fibre production
	Guaina impermeabilizzante bituminosa [kg]	6.246,24	6.254,22	Bitumen seal production
	Tegole [kg]	2.812,56	2.816,16	Roof tile production
Pavimenti di interpiano	Isolante XPS [kg]	1.876,56	-	Polystyrene foam slab production
	Isolante in fibre di cellulosa [kg]	-	2.662,02	Cellulose fibre production
	Ceramica [kg]	10.598,04	10.598,04	Ceramic tile production
	Malta cementizia [kg]	85.785,60	86.044,99	Cement mortar production
	Cemento armato [kg]	321.696,00	322.668,72	Fibre-reinforced concrete production
Pavimento contro terra	Gesso-intonaco [kg]	16.406,50	16.456,10	Gypsum quarry operation
	Ceramica [kg]	4.191,48	4.191,48	Ceramic tile production
	Malta cementizia [kg]	28.595,20	28.681,66	Cement mortar production
	Cemento armato [kg]	214.464,00	215.112,48	Fibre-reinforced concrete production
	Gesso-intonaco [kg]	37.139,29	37.303,82	Gypsum quarry operation
	Laterizio forato [kg]	127.590,47	128.155,69	Light clay brick production

Pareti perimetrali verticali	Isolante XPS [kg]	1.274,39	-	Polystyrene foam slab production
	Isolante in fibre di cellulosa [kg]	-	1.920,05	Cellulose fibre production
Pareti divisorie interne	Gesso-intonaco [kg]	20.848,45	20.848,45	Gypsum quarry operation
	Laterizio forato [kg]	19.758,34	19.758,34	Light clay brick production
Finestre	Vetrocamera, riempimento con gas Argon [m ²]	40,68		Glazing double production, U<1,1 W/(m ² K)
	Telaio in alluminio [m ²]	17,44		Windows frame aluminium production, U<1,6 W/(m ² K)
Porte interne	Porte in legno [m ²]	31,4		Door inner wood production
Porte esterne	Porte blindate in legno e acciaio [m ²]	9,92		Door outdoor wood – aluminium production
Saracinesche	Acciaio [kg]	3.045,12	3.045,12	Steel production

Nella Tabella 30 e Tabella 31 sono riportati i risultati della fase di raccolta e di elaborazione dei dati primari e i dataset ambientali selezionati per la modellizzazione dei processi di produzione dei materiali che costituiscono i componenti dell'impianto di climatizzazione. I risultati della fase di raccolta e di elaborazione dei dati primari e i dataset ambientali selezionati per la modellizzazione dei processi di produzione dei materiali che costituiscono i componenti dell'impianto di produzione dell'acqua calda sanitaria sono riportati nella Tabella 32 e Tabella 33.

I dataset selezionati per i componenti di impianto sono rappresentativi dei moduli A1, A2 e A3.

Per la modellizzazione della fase di produzione dei componenti di impianto, quali pompa di calore, circolatore, vaso di espansione, accumulo termico, addolcitore e ventilconvettore, poiché le dimensioni in termini di potenza, capacità o portata dei dispositivi installati nell'impianto in esame non coincidono con quelle dei dataset disponibili in Ecoinvent, i dati di inventario sono stati adattati proporzionalmente per riferirli, caso per caso, a valori di potenza, capacità e portata superiori o inferiori.

Per i componenti di impianto costituiti da più di un materiale, quali le valvole, i filtri a Y e i collettori, a causa della difficoltà connessa alla stima della quantità di tutti i materiali costituenti si è deciso di considerare solo il materiale del corpo principale di ogni dispositivo, che, sulla base di una stima basata su disegni Cad disponibili sui siti dei principali produttori di questi dispositivi, generalmente rappresenta circa il 96% del peso complessivo. Inoltre, sono stati esclusi dalla valutazione i termometri e i manometri a causa della mancanza di dati per la loro modellizzazione.

Tabella 30: Centrale termica e componenti dell'impianto di climatizzazione per primo e secondo piano

Componente	Quantità
Pompa di calore aria-acqua, potenza frigorifera 22,3 kW, potenza in riscaldamento 23,9 kW [-]	1
Accumulo termico in acciaio zincato da 300 l [-]	1
Circolatore, potenza 80 W [-]	2
Vaso di espansione da 12 l [-]	1
Ventilconvettore, potenza in raffreddamento 1,53 kW, potenza in riscaldamento 1,70 kW (primo piano) [-]	3
Ventilconvettore, potenza in raffreddamento 5,48 kW, potenza in riscaldamento 5,59 kW (primo piano) [-]	1

Ventilconvettore esterno, potenza in raffreddamento 4,71 kW, potenza in riscaldamento 4,92 kW (primo piano) [-]	1
Ventilconvettore, potenza in raffreddamento 1,53 kW, potenza in riscaldamento 1,70 kW (secondo piano) [-]	1
Ventilconvettore, potenza in raffreddamento 1,92 kW, potenza in riscaldamento 1,86 kW (secondo piano) [-]	1
Ventilconvettore, potenza in raffreddamento 2,83 kW, potenza in riscaldamento 2,97 kW (secondo piano) [-]	1
Ventilconvettore esterno, potenza in raffreddamento 2,83 kW, potenza in riscaldamento 2,97 kW (secondo piano) [-]	1
Valvole a sfera in ottone (diametro nominale (DN) 42, DN 35, DN 28, DN16, DN20) [-]	30
Imbuto di scarico in alluminio per valvole a sfera DN20 [-]	7
Valvole di ritegno in ottone (DN 35, DN 28, DN25, DN16) [-]	7
Valvola di sicurezza in ottone [-]	1
Manometro completo di rubinetto in acciaio inox [-]	3
Termometro completo di custodia e pozzetto in ottone [-]	7
Giunti elastici in neoprene e ghisa sferoidale [-]	2
Elettrovalvole in ottone DN 16 [-]	2
Pozzetti in ottone per termometri campione [-]	2
Filtri raccogliatore a Y in ottone (DN42, DN35, DN28) [-]	3
Valvola automatica di sfogo aria in ottone [-]	1
Flussostato in ottone [-]	1
Collettori per la distribuzione dell'acqua calda/fredda in ottone [-]	12
Sistema di alimentazione in ottone [-]	1
Scalda salviette in acciaio (primo e secondo piano) [-]	4
Tubazioni in rame con guaina isolate in polietilene - DN42x1,5 [m]	24
Tubazioni in rame con guaina isolate in polietilene - DN35x1,5 [m]	34
Tubazioni in rame con guaina isolate in polietilene - DN28x1,5 [m]	34
Tubazioni in rame con guaina isolate in polietilene - DN22x1,5 [m]	4
Tubazioni in rame con guaina isolate in polietilene - DN16x1 (primo piano) [m]	52
Tubazioni in rame con guaina isolate in polietilene - DN12x1 (primo piano) [m]	24
Tubazioni in rame con guaina isolate in polietilene - DN16x1 (secondo piano) [m]	66
Tubazioni in rame con guaina isolate in polietilene - DN12x1 (secondo piano) [m]	20

Tabella 31: Materiali e dataset ambientali utilizzati per la modellizzazione dei processi di produzione dei componenti dell'impianto di climatizzazione per primo e secondo piano

Componente	Quantità	Dataset Ecoinvent 3.6 per la modellizzazione dei processi di produzione
Pompa di calore aria-acqua, potenza in raffreddamento 22,3 kW, potenza in riscaldamento 23,9 kW [-]	1	Heat pump, brine-water 10 kW production (dataset adattato al caso studio)
Accumulo termico in acciaio zincato da 300 l [-]	1	Hot water tank, 600 l production (dataset adattato al caso studio)
Circolatore, potenza 80 W	2	Pump, 40 W production
Vaso di espansione da 12 l	1	Expansion vessel, 25 l production (dataset adattato al caso studio)

Ventilconvettore, potenza in raffreddamento 1,53 kW, potenza in riscaldamento 1,70 kW (primo piano) [-]	3	
Ventilconvettore, potenza in raffreddamento 5,48 kW, potenza in riscaldamento 5,59 kW (primo piano) [-]	1	
Ventilconvettore, potenza in raffreddamento 4,71 kW, potenza in riscaldamento 4,92 kW (primo piano) (unità esterna) [-]	1	
Ventilconvettore, potenza in raffreddamento 1,53 kW, potenza in riscaldamento 1,70 kW (secondo piano) [-]	1	Ventilation system, decentralized, 6x120 m ³ /h, polyethylene ducts production" (dataset adattato al caso studio)
Ventilconvettore, potenza in raffreddamento 1,92 kW, potenza in riscaldamento 1,86 kW (secondo piano) [-]	1	
Ventilconvettore, potenza in raffreddamento 2,83 kW, potenza in riscaldamento 2,97 kW (secondo piano) [-]	1	
Ventilconvettore, potenza in raffreddamento 2,83 kW, potenza in riscaldamento 2,97 kW (secondo piano) (unità esterne) [-]	2	
Valvole a sfera (diametro nominale (DN) 42, DN 35, DN 28, DN16, DN20)		
Ottone [kg]	15,9	Brass production
Imbuto di scarico per valvole a sfera DN20		
Alluminio [kg]	0,70	Aluminium, production primary ingot
Valvole di ritegno (DN 35, DN 28, DN25, DN16)		
Ottone [kg]	2,00	Brass production
Valvola di sicurezza		
Ottone [kg]	0,70	Brass production
Manometro completo di rubinetto		
Acciaio inox (rubinetto)	1,97	Chromium steel, production
Termometro completo di custodia e pozzetto		
Ottone (pozzetto porta termometro) [kg]	1,99	Brass production
Giunti elastici		
Neoprene [kg]	0,24	Synthetic rubber, productio
Ghisa [kg]	4,56	Iron, production
Elettrovalvole (DN 16)		
Ottone [kg]	1,28	Brass production
Filtri raccogliatore a Y (DN42, DN35, DN28)		
Ottone [kg]	1,73	Brass production
Valvola automatica di sfogo aria		
Ottone [kg]	0,14	Brass production
Flussostato		
Ottone [kg]	0,54	Brass production

Collettori per la distribuzione dell'acqua calda/fredda		
Ottone [kg]	21,90	Brass production
Sistema di alimentazione		
Ottone [kg]	1,60	Brass production
Scalda salviette in acciaio (primo e secondo piano)		
Acciaio [kg]	76,82	Chromium steel, production
Tubazioni (DN42x1,5; DN35x1,5; DN28x1,5; DN22x1,5)		
Rame [kg]	203,31	Copper, production
Polietilene [kg]	37,48	Polyethylene, high density, granulate production

Tabella 32: Centrale termica e componenti dell'impianto di produzione dell'acqua calda sanitaria

Componente	Quantità
Pompa di calore aria-acqua, potenza in riscaldamento 8.81 kW [-]	1
Accumulo termico da 500 l [-]	1
Collettore solare piano - 2,5 m ² [-]	3
Stazione solare [-]	1
Vaso di espansione da 25 l [-]	1
Valvola automatica di sfogo aria in ottone [-]	4
Circolatore, potenza 50 W [-]	1
Valvole a sfera in ottone (DN 28, DN22, DN20) [-]	20
Imbuto di scarico in alluminio per valvole a sfera DN20 [-]	5
Valvole di ritegno in ottone (DN 28, DN25) [-]	2
Valvola di sicurezza in ottone [-]	1
Manometro completo di rubinetto in acciaio inox [-]	3
Termometro completo di custodia e pozzetto in ottone [-]	5
Giunti elastici in neoprene e ghisa sferoidale [-]	2
Pozzetti in ottone per termometri campione [-]	2
Filtro raccoglitore a Y in ottone (DN28) [-]	1
Flussostato in ottone [-]	1
Collettori per la distribuzione dell'acqua calda/fredda in ottone [-]	2
Addolcitore - portata 2,7 m ³ /h [-]	1
Tubazioni in rame con guaina isolate in polietilene - DN28x1,5 [m]	38
Tubazioni in rame con guaina isolate in polietilene - DN22x1,5 [m]	54

Tabella 33: Materiali e dataset ambientali utilizzati per la modellizzazione dei processi di produzione dei componenti dell'impianto di produzione dell'acqua calda sanitaria

Componente	Quantità	Dataset Ecoinvent per la modellizzazione dei processi di produzione
Pompa di calore aria-acqua, potenza in riscaldamento 8,81 kW [-]	1	Heat pump, brine-water 10 kW production (dataset adattato al caso studio)
Accumulo termico da 500 l [-]	1	Heat storage, 2000 l production (dataset adattato al caso studio)
Collettore solare piano - 2,5 m ² [-]	3	Flat plat solar collector, Cu absorber production

Stazione solare		Elaborazione propria
Circolatore	1	Pump, 40 W production
Valvole a sfera		
Acciaio inox [kg]	0,75	Chromium steel, production
Disaeratore		
Ottone [kg]	1,73	Brass production
Vaso di espansione da 25 l [-]	1	Expansion vessel, 25 l production
Circolatore, potenza 80 W	1	Pump, 40 W production
Valvola automatica di sfogo aria		
Ottone [kg]	0,54	Brass production
Valvole a sfera (DN 28, DN22, DN20)		
Ottone [kg]	8,71	Brass production
Imbuto di scarico per valvole a sfera DN20		
Alluminio [kg]	0,50	Aluminium, production primary ingot
Valvole di ritegno (DN 28, DN25)		
Ottone [kg]	0,47	Brass production
Valvola di sicurezza		
Ottone [kg]	0,72	Brass production
Manometro completo di rubinetto		
Acciaio inox (rubinetto)	1,97	Chromium steel, production
Termometro completo di custodia e pozzetto		
Ottone (pozzetto porta termometro) [kg]	1,45	Brass production
Giunti elastici		
Neoprene [kg]	0,14	Synthetic rubber, productio
Ghisa [kg]	2,66	Iron, production
Filtri raccogliatore a Y (DN28)		
Ottone [kg]	0,44	Brass production
Flussostato		
Ottone [kg]	0,54	Brass production
Collettori per la distribuzione dell'acqua calda/fredda		
Ottone [kg]	6,07	Brass production
Addolcitore - portata 2,7 m ³ /h	1	Ion-exchanger for water treatment production
Tubazioni (DN28x1,5, DN22x1,5, DN16x1, DN12x1)		
Rame [kg]	88,86	Copper, production
Polietilene [kg]	16,53	Polyethylene, high density, granulate production

I risultati della fase di raccolta e di elaborazione dei dati primari e i dataset ambientali selezionati per la modellizzazione dei processi di produzione dei componenti che costituiscono l'impianto fotovoltaico installato sul tetto dell'edificio in esame, nei due scenari esaminati, sono riportati nella Tabella 34.

Il dataset "Photovoltaic slanted-roof installation, 3 kWp, single-Si, panel mounted on roof" include la produzione dei componenti elencati di seguito:

- processo di produzione del pannello fotovoltaico in Silicio monocristallino (single-Si);

- processo di produzione dell'inverter;
- processo di produzione dei componenti necessari per l'installazione dei pannelli fotovoltaici sul tetto;
- processo di produzione dei componenti elettrici necessari per il collegamento del sistema fotovoltaico con la rete elettrica di distribuzione e con l'impianto elettrico dell'edificio;
- trattamento di fine vita degli scarti di produzione.

L'inventario di ciclo di vita del sistema fotovoltaico è stato scalato per essere adattato alla potenza di 10.8 kW installata nell'edificio.

Il sistema di accumulo elettrochimico è stato modellizzato sulla base dello studio condotto da Cusenza et al. [77]. La fase di produzione del sistema di accumulo include i processi di produzione di tutti i suoi componenti:

- celle;
- sistema di gestione della batteria (battery management system – BMS);
- sistema di raffreddamento;
- involucro.

Tabella 34: Componenti e dataset ambientali utilizzati per la modellizzazione dei processi di produzione del sistema fotovoltaico – Scenario cAE e Scenario sAE

Componente	Scenario cAE	Scenario sAE	Dataset per la modellizzazione dei processi di produzione	Fonte dei dati
Impianto fotovoltaico – 10.8 kW	1	1	Photovoltaic slanted-roof installation, 3 kWp, single-Si, panel mounted on roof	Ecoinvent 3.6
Accumulo elettrico – capacità 30 kWh	1	-	Batteria agli Ioni di Litio	[9]

5.3.2 Analisi di inventario – Fase d'uso (Modulo B)

Il modulo "B – fase d'uso" comprende il periodo che va dal completamento dei lavori di costruzione al momento in cui l'edificio viene decostruito/demolito. In accordo all'obiettivo e al campo di applicazione, nel modello LCA sono stati inclusi i moduli "B4 – sostituzione" e "B6 – consumo di energia". In questo paragrafo sono descritte le assunzioni specifiche del caso studio.

5.3.2.1 Analisi di inventario – Fase di sostituzione (Modulo B4)

Il modulo "B4 – sostituzione" include gli interventi di sostituzione di elementi non strutturali ed impiantistici. Esso comprende sia la fase di produzione degli elementi di involucro e di impianto sostituiti durante la vita utile dell'edificio che i trattamenti di fine vita degli scarti di produzione e dei componenti sostituiti.

La fase di produzione dei componenti di involucro e di impianto è stata modellizzata con i dataset descritti al Paragrafo 1.3.1. Per la descrizione della modellizzazione dei trattamenti di fine vita dei componenti di involucro e di impianto si rimanda al Paragrafo 1.3.3 "Modulo C".

Gli interventi di sostituzione previsti hanno incluso:

- sostituzione dell'isolamento termico degli elementi di involucro delimitanti il volume climatizzato. In dettaglio gli elementi coinvolti da questo intervento sono: la copertura esterna, i pavimenti di interpiano e le pareti perimetrali verticali. Per questi elementi è stata prevista la sostituzione dell'isolamento termico e del gesso-intonaco. Questo intervento di sostituzione è stato pianificato sulla base di una vita utile dell'isolamento termico di 30 anni;
- sostituzione di chiusure trasparenti. Questo intervento di sostituzione è stato pianificato considerando una vita utile degli infissi di 30 anni;
- sostituzione dell'impianto di climatizzazione e di produzione dell'acqua calda sanitaria. Questo intervento di sostituzione è stato pianificato sulla base di una vita utile degli impianti di 15 anni;
- sostituzione dell'impianto fotovoltaico. Questo intervento di sostituzione è stato pianificato sulla base di una vita utile degli impianti di 30 anni;

- sostituzione del sistema di accumulo. Questo intervento di sostituzione è stato pianificato sulla base di una vita utile degli impianti di 20 anni.

Nella Tabella 35 e Tabella 36 sono riportati gli interventi di sostituzione dei componenti di involucro e di impianto pianificati durante il ciclo di vita dell'edificio.

Tabella 35: Interventi di sostituzione dei componenti di involucro pianificati durante il ciclo di vita dell'edificio

Componente	Interventi di sostituzione pianificati	Materiali/componenti sostituiti	Scenario XPS	Scenario FC
Tetto	1	Isolante XPS [kg]	546,89	-
		Isolante in fibra cellulosa [kg]	-	774,44
		Guaina impermeabilizzante bituminosa [kg]	6.246,24	6.254,22
Pavimenti di interpiano	1	Isolante XPS [kg]	1.876,56	-
		Isolante in fibra cellulosa [kg]	-	2.662,02
		Gesso-intonaco [kg]	16.406,50	16.456,10
Pareti perimetrali verticali	1	Gesso-intonaco [kg]	37.139,29	37.303,82
		Isolante XPS [kg]	1.274,39	-
		Isolante in fibra cellulosa [kg]	-	1.920,05
Finestre	1	Vetrocamera, riempimento con gas Argon [m ²]	40,68	
		Telaio in alluminio [m ²]	17,44	

Tabella 36: Interventi di sostituzione dei componenti di involucro pianificati durante il ciclo di vita dell'edificio

Componente	Interventi di sostituzione pianificati		Materiali/componenti sostituiti
	Scenario CAE	Scenario SAE	
	Centrale termica e componenti dell'impianto di climatizzazione	3	
Centrale termica e componenti dell'impianto di produzione dell'acqua calda sanitaria per il primo e il secondo piano	3	3	Impianto comprensivo di tutti i componenti
Impianto fotovoltaico	1	1	Impianto comprensivo di tutti i componenti
Accumulo elettrico	2	0	Impianto comprensivo di tutti i componenti

5.3.2.2 Analisi di inventario – Usi energetici (Modulo B6)

Il modulo “B6 – Usi energetici” include il consumo di energia dell'edificio durante la fase d'uso.

Gli usi energetici dell'edificio sono stati stimati tramite simulazioni energetiche in regime non stazionario dell'edificio campione, effettuate tramite utilizzo del software dinamico TRNSYS (Parte A). Nella Tabella 37 si riportano i risultati delle simulazioni energetiche e i dataset utilizzati per la modellizzazione dei consumi energetici di fase d'uso. L'energia elettrica generata dall'impianto fotovoltaico e consumata direttamente dall'edificio, o accumulata nel sistema di accumulo elettrico, è stata modellizzata con il dataset "Electricity low voltage (IT) production, fotovoltaic, 3 kWp slanted-roof installation, single-Si panel" dal quale sono stati rimossi i processi relativi alla produzione dell'impianto e dei suoi componenti poiché computati nel modulo A. L'energia elettrica importata dalla rete è stata modellizzata con il dataset "Electricity, low voltage (IT)". La modellizzazione dell'energia elettrica immessa in rete, riportata in Tabella 37 per completezza, è inclusa nel "Modulo D – Benefici e impatto oltre il ciclo di vita".

Tabella 37: Risultati della simulazione energetica dell'edificio nello Scenario cEA e Scenario sAE e dataset selezionati per la modellizzazione dei consumi energetici di fase d'uso

Energia elettrica	Scenario cAE [kWh/anno]	Scenario sAE [kWh/anno]	Dataset Ecoinvent 3.6 per la modellizzazione dei consumi energetici di fase d'uso
Generata in situ dall'impianto fotovoltaico	13.509,99	13.509,99	-
Generata in situ dall'impianto fotovoltaico e consumata direttamente nell'edificio	3.292,77	3.279,46	Electricity low voltage (IT) production, fotovoltaic, 3 kWp slanted-roof installation, single-Si panel
Generata in situ dall'impianto fotovoltaico e fornita all'edificio attraverso il sistema di accumulo (sono inclusi i consumi connessi all'efficienza del sistema di accumulo)	5.835,48	0	Electricity low voltage (IT) production, fotovoltaic, 3 kWp slanted-roof installation, single-Si panel
Importata dalla rete elettrica	4.110,62	9.993,59	Electricity, low voltage (IT)
Immessa nella rete elettrica	3.777,91	10.230,54	Electricity, low voltage (IT)

5.3.3 Analisi di inventario – Fase di fine vita (Modulo C)

Il modulo "C – Fine vita" include le operazioni comprese tra la messa fuori servizio dell'edificio e lo smaltimento finale. Il fine vita dei componenti di involucro e di impianto è stato modellizzato secondo uno scenario che ha previsto diverse opzioni di trattamento, quali lo smaltimento in discarica, l'incenerimento o il recupero attraverso processi di riciclo. In dettaglio, per i componenti di involucro e per i componenti di impianto principali, ad eccezione dell'impianto fotovoltaico e dell'accumulo elettrico, si è considerato il conferimento in discarica. Per l'impianto fotovoltaico e l'accumulo elettrico si è ipotizzato, in accordo alle direttive vigenti [78] [79], che a fine vita siano inviati ad un trattamento di riciclo.

Il fine vita del sistema fotovoltaico è stato modellizzato in accordo alle regole di categoria relative all'impronta ambientale dei prodotti (Product Environmental Footprint Category Rules – PEFCRs) sugli impianti fotovoltaici [80] e agli studi sviluppati nel Photovoltaic Power System Programme dell'International Energy Agency (IEA – PVPS) nell'ambito della Task 12 "PV Sustainability" [81]. In dettaglio, il trattamento di fine vita del sistema fotovoltaico ha previsto il disassemblaggio dei singoli componenti e il recupero dei materiali quali il vetro, l'alluminio, il rame e l'acciaio, mentre per le celle fotovoltaiche si è ipotizzato il conferimento in discarica per inerti in accordo alle indicazioni riportate nelle PERCRs relative agli impianti fotovoltaici [80]. Per l'accumulo elettrochimico in accordo alla Direttiva 2006/66/CE relativa a pile e accumulatori e ai rifiuti di pile e accumulatori [78] si è ipotizzato un processo di riciclo. Inoltre, è stato considerato un trattamento di riciclo anche per i metalli costituenti le valvole, i collettori, filtri, ecc. Il fine vita delle materie plastiche di tutti i componenti di impianto è stato modellizzato secondo i trattamenti previsti dai dataset specifici di ogni impianto e ogni componente quando disponibili, oppure ipotizzando un

trattamento basato sul mix tecnologico riferito al contesto europeo che prevede principalmente il conferimento in discarica controllata e il trattamento termico (incenerimento), secondo i dataset disponibili su Ecoinvent 3.6 [76].

Per i processi di riciclo si è applicato l'approccio "Recycled content, cut-off" in base al quale gli impatti e i benefici ambientali connessi ai processi di riciclo sono attribuiti agli impieghi di seconda vita dei materiali riciclati [76]. Pertanto, per i materiali e i componenti avviati a riciclo è stato applicato un cut-off.

In sintesi, nel Modulo C sono stati inclusi i processi relativi al trasporto di materiali e rifiuti ai siti di trattamento di fine vita (Modulo "C3 – trasporto") e i processi connessi allo smaltimento in discarica o all'incenerimento (Modulo "C4 – smaltimento").

Nella Tabella 38 sono riportati i dataset utilizzati per la modellizzazione dei trattamenti di fine vita dei materiali costituenti l'involucro edilizio.

Tabella 38: Materiali e dataset ambientali utilizzati per la modellizzazione dei trattamenti di fine vita dei componenti dell'involucro edilizio – Scenario XPS e Scenario FC

Componente	Materiali	Scenario XPS	Scenario FC	Dataset ambientale
Tetto	Legno [kg]	19.000,44	19.024,72	Treatment of untreated waste wood, sanitary landfill
	Isolante XPS [kg]	546,89	-	Treatment of waste polystyrene, municipal incineration with fly ash extraction
	Isolante in fibra cellulose [kg]	-	774,44	Treatment of inert waste, inert material landfill
	Guaina impermeabilizzante bituminosa [kg]	6.246,24	6.254,22	Treatment of waste bitumen, sanitary landfill
	Tegole [kg]	2.812,56	2.816,16	Treatment of inert waste, inert material landfill
Pavimenti di interpiano	Isolante XPS [kg]	1.876,56	-	Treatment of waste polystyrene, municipal incineration with fly ash extraction
	Isolante in fibra cellulose [kg]	-	2.662,02	Treatment of inert waste, inert material landfill
	Ceramica [kg]	10.598,04	10.598,04	Treatment of inert waste, inert material landfill
	Malta cementizia [kg]	85.785,60	86.044,99	Treatment of inert waste, inert material landfill
	Cemento armato [kg]	321.696,00	322.668,72	Treatment of waste reinforced concrete, collection for final disposal
Pavimento contro terra	Gesso-intonaco [kg]	16.406,50	16.456,10	Treatment of inert waste, inert material landfill
	Ceramica [kg]	4.191,48	4.191,48	Treatment of inert waste, inert material landfill

	Malta cementizia [kg]	28.595,20	28.681,66	Treatment of inert waste, inert material landfill
	Cemento armato [kg]	214.464,00	215.112,48	Treatment of waste reinforced concrete, collection for final disposal
Pareti perimetrali verticali	Gesso-intonaco [kg]	37.139,29	37.303,82	Treatment of inert waste, inert material landfill
	Laterizio forato [kg]	127.590,47	128.155,69	Treatment of inert waste, inert material landfill
	Isolante XPS [kg]	1.274,39	-	Treatment of waste polystyrene, municipal incineration with fly ash extraction
	Isolante in fibra cellulosa [kg]	-	1.920,05	Treatment of inert waste, inert material landfill
Pareti divisorie interne	Gesso-intonaco [kg]	20.848,45	20.848,45	Treatment of inert waste, inert material landfill
	Laterizio forato [kg]	19.758,34	19.758,34	Treatment of inert waste, inert material landfill
Finestre	Vetrocamera, riempimento con gas Argon [m ²]		40,68	Treatment of used double glazing U<1.1 W/(m ² K), collection for final disposal
	Telaio in alluminio [kg]		692	Treatment of inert waste, inert material landfill
Porte interne	Porte in legno [m ²]		31,40	Treatment of used inner wood door, collection for final disposal
Porte esterne	Porte blindate in legno e acciaio [m ²]		9,92	Treatment of used outer wood-aluminium door, collection for final disposal
Saracinesche garage	Acciaio [kg]	3.045,12	3.045,12	Treatment of inert waste, inert material landfill

Nella Tabella 39 sono riportati i dataset utilizzati per la modellizzazione dei trattamenti di fine vita dei materiali costituenti l'impianto di climatizzazione e di produzione dell'acqua calda sanitaria. Il trattamento di fine vita dei componenti di impianto è stato modellizzato considerando i materiali che costituiscono ogni singolo impianto, identificati dai dataset utilizzati per la modellizzazione dei relativi processi di produzione.

Tabella 39: Modellizzazione dei trattamenti di fine vita dei componenti dell'impianto di climatizzazione e di produzione dell'acqua calda sanitaria

Componente	Dataset Ecoinvent 3.6 per la modellizzazione dei processi di produzione
Pompa di calore aria-acqua	
Acciaio	Treatment of scrap steel, inert material landfill
Acciaio rinforzato	Treatment of waste reinforcement steel, collection for final disposal
Rame	Treatment of scrap steel, inert material landfill
Olio lubrificante	Treatment of waste oil mineral

Polivinilcloruro	Treatment of waste polyvinylchloride
Refrigerante R134a	Treatment of hazardous waste, incineration
Tubo isolante in elastomero	Treatment of waste plastic mixture
Accumulo termico	
Acciaio	Treatment of scrap steel, inert material landfill
Polivinilcloruro	Treatment of waste polyvinylchloride
Lana di vetro	Treatment of waste mineral wool
Materie plastiche	Treatment of waste plastic mixture
Circolatore	
Alluminio	Treatment of inert waste, inert material landfill
Ghisa	Treatment of inert waste, inert material landfill
Rame	Treatment of scrap steel, inert material landfill
Polivinilcloruro	Treatment of waste polyvinylchloride
Acciaio	Treatment of scrap steel, inert material landfill
Gomma sintetica	Treatment of waste plastic mixture
Vaso di espansione	
Butilacrilato	Treatment of waste plastic mixture
Polipropilene	Treatment of waste polypropylene
Acciaio	Treatment of scrap steel, inert material landfill
Stazione solare	
Circolatore	
Ghisa	Treatment of inert waste, inert material landfill
Acciaio	Treatment of scrap steel, inert material landfill
Collettore solare piano	
Fluido termo-vettore	Treatment of heat carrier liquid, 40% C ₃ H ₈ O ₂
Vetro	Treatment for waste glass sheet
Lana di vetro	Treatment of waste mineral wool
Materie plastiche	Treatment of waste plastic mixture
Alluminio	Treatment of inert waste, inert material landfill
Rame	Treatment of scrap steel, inert material landfill
Acciaio	Treatment of scrap steel, inert material landfill
Addolcitore	
Resina anionica	Treatment of spent anionic exchange resin, municipal incineration with fly ash extraction
Resina cationica	Treatment of spent cationic exchange resin, municipal incineration with fly ash extraction
Polipropilene	Treatment for waste polypropylene
Acciaio	Treatment of scrap steel, inert material landfill
Ventilconvettore	
	Used air distribution terminal panel, steel
	Used blower and heat exchange unit decentralized
	Used ventilation control and wiring decentralized unit
Valvole a sfera (DN 42, DN 35, DN 28, DN16, DN20)	

Ottone	Cut-off
Imbuto di scarico per valvole a sfera DN20	
Alluminio	Cut-off
Valvole di ritegno (DN 35, DN 28, DN25, DN16)	
Ottone	Cut-off
Valvola di sicurezza	
Ottone	Cut-off
Manometro completo di rubinetto	
Acciaio inox (rubinetto)	Cut-off
Termometro completo di custodia e pozzetto	
Ottone (pozzetto porta termometro)	Cut-off
Giunti elastici	
Neoprene	Treatment of waste plastic mixture
Ghisa	Treatment of inert waste, inert material landfill
Elettrovalvole (DN 16)	
Ottone	Cut-off
Filtri raccogliore a Y (DN42, DN35, DN28)	
Ottone	Cut-off
Valvola automatica di sfogo aria	
Ottone	Cut-off
Flussostato	
Ottone	Cut-off
Collettori per la distribuzione dell'acqua calda/fredda	
Ottone	Cut-off
Sistema di alimentazione	
Ottone	Cut-off
Tubazioni (DN42x1,5; DN35x1,5; DN28x1,5; DN22x1,5)	
Rame	Cut-off
Polietilene	Treatment of waste plastic mixture

Nella Tabella 40 sono riportati i dataset utilizzati per la modellizzazione dei trattamenti di fine vita dei materiali costituenti il sistema fotovoltaico non avviati a processi di riciclo. Il modello di fine vita descritto è rappresentativo di entrambi gli scenari di impianto esaminati poiché per l'accumulo elettrico è stato considerato un cut-off.

Tabella 40: Modellizzazione dei trattamenti di fine vita dei componenti del sistema fotovoltaico

Componente	Dataset Ecoinvent 3.6 per la modellizzazione dei processi di produzione
Inverter	Treatment of waste plastic mixture Used printed wiring boards

Sistema di montaggio	Treatment of waste polyethylene/polypropylene product Treatment of waste polystyrene isolation, flame-retardant
Componenti elettrici	Treatment of scrap copper Treatment of scrap steel Treatment of waste polyethylene/polypropylene product Treatment of waste polyvinylchloride Treatment of waste electric wiring
Pannello fotovoltaico	Treatment of inert waste, inert material landfill Treatment of waste polyvinylchloride Treatment of waste plastic mixture

5.3.4 Analisi di inventario – Benefici e oneri oltre i confini del sistema (Modulo D)

Il modulo “D - Benefici e carichi ambientali oltre i confini del sistema” include i processi di riciclo e i potenziali benefici ambientali in termini di produzioni evitate grazie alla sostituzione delle materie prime vergini con materie prime seconde o all’immissione in rete del surplus di energia rinnovabile prodotta in situ.

Nel caso studio specifico, poiché è stato applicato un approccio “Recycled content, cut-off”, gli impatti e i benefici ambientali connessi ai materiali e componenti d’impianto avviati al riciclo non sono stati valutati. I benefici ambientali connessi all’immissione in rete del surplus di energia elettrica generata in situ dall’impianto fotovoltaico sono stati stimati assumendo che l’immissione di energia elettrica in rete eviti la produzione di una quantità equivalente di energia elettrica generata dal mix elettrico di produzione italiano.

Nella Tabella 41 è riportato il dataset utilizzato per la modellizzazione dei benefici ambientali connessi all’immissione in rete del surplus di energia elettrica generata in situ dall’impianto fotovoltaico.

Tabella 41: Dataset utilizzato per la modellizzazione dei benefici ambientali connessi all’immissione in rete del surplus di energia elettrica generata in situ dall’impianto fotovoltaico

Energia elettrica	Scenario cAE [kWh/anno]	Scenario sAE [kWh/anno]	Dataset Ecoinvent 3.6 per la modellizzazione dei consumi energetici di fase d’uso
Imnessa in rete elettrica	3.777,91	10.230,54	Electricity, low voltage (IT)

5.4 Valutazione degli impatti energetici e ambientali di ciclo di vita: risultati e discussione

5.4.1 Impatti energetico – ambientali – Modulo A

Energia incorporata – Componenti d’involucro

Nella Tabella 42 sono sintetizzati i valori di energia incorporata dell’involucro edilizio di entrambi gli scenari investigati. Dall’analisi è emerso che nello scenario XPS l’energia incorporata nei componenti edilizi analizzati è pari a 2,57E+06 MJ di energia primaria di cui l’81,6% costituito da energia primaria non rinnovabile. Nello scenario FC, l’energia incorporata nei componenti edilizi analizzati è pari a 2,23E+06 MJ di energia primaria di cui il 78,5% costituito da energia primaria non rinnovabile. L’impiego del materiale isolante in fibre di cellulosa consente di ridurre l’EE nello scenario FC del 13% rispetto allo scenario XPS, inoltre l’impatto sul consumo di energia primaria non rinnovabile si riduce del 16,5%.

Tabella 42: Modulo A: Energia incorporata nei componenti di involucro – Scenario XPS e Scenario FC

Categoria	Scenario XPS	Scenario FC
EE (MJ)	2,57E+06	2,23E+06
EE _{nr} (MJ)	2,09E+06	1,75E+06

EE _r (MJ)	4,72E+05	4,80E+05
----------------------	----------	----------

Nella Figura 56 e Figura 57 è illustrata, rispettivamente, l'incidenza dei componenti dell'involucro edilizio sull'EE negli scenari XPS e FC. Dall'analisi è emerso che, in entrambi gli scenari, i componenti che contribuiscono in misura maggiore sono i pavimenti di interpiano che rappresentano il 29% dell'EE nello scenario XPS e il 25,7% nello scenario FC, il tetto che incide sull'EE per il 23,7% nello scenario XPS e per il 25% nello scenario FC e le pareti perimetrali verticali che contribuiscono al 18,2% dell'EE nello scenario XPS e al 15,7% nello scenario FC. Complessivamente i pavimenti di interpiano, il tetto e le pareti perimetrali sono responsabili di circa il 70% dell'EE nello scenario XPS e di circa il 65% nello scenario FC. Il pavimento contro terra incide per l'11,6% nello scenario XPS e per il 13,4% nello scenario FC. Gli altri componenti incidono sul consumo di energia primaria per meno dell'8% in entrambi gli scenari esaminati.

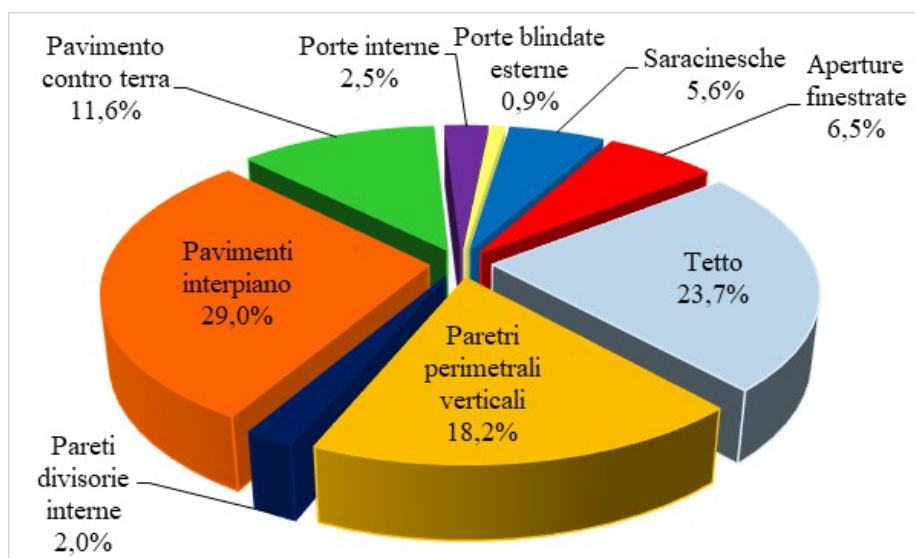


Figura 56: Modulo A: Incidenza dei componenti d'involucro sull'EE – Scenario XPS

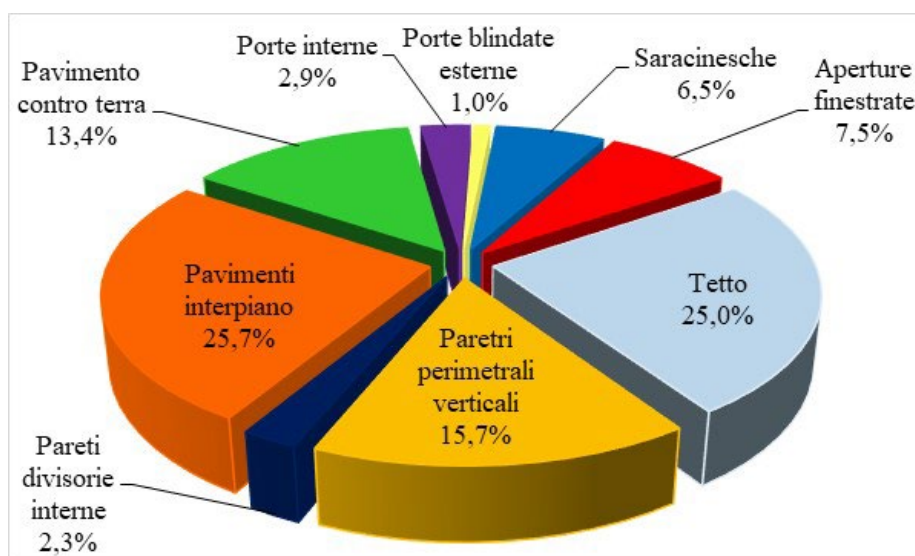


Figura 57: Modulo A: Incidenza dei componenti d'involucro sull'EE – Scenario FC

L'analisi dettagliata dei componenti edili ha consentito di identificare i materiali responsabili del maggior contributo al consumo di energia primaria. I risultati dell'analisi di contributo sono descritti di seguito.

Pavimenti di interpiano

Con riferimento ai pavimenti di interpiano i contributi più elevati sono associati al cemento armato (44%) e al polistirene espanso estruso (27%) nello scenario XPS, mentre nello scenario FC al cemento armato (58%) e alla malta cementizia (22%) (Figura 58). Il contributo dell'isolante (fibre di cellulosa) nello Scenario FC è pari al 4% mentre nello Scenario XPS è pari al 27%. Complessivamente, l'uso dell'isolante in fibre di cellulosa in sostituzione del polistirene espanso estruso consente di ridurre l'EE nei pavimenti di interpiano del 23%.

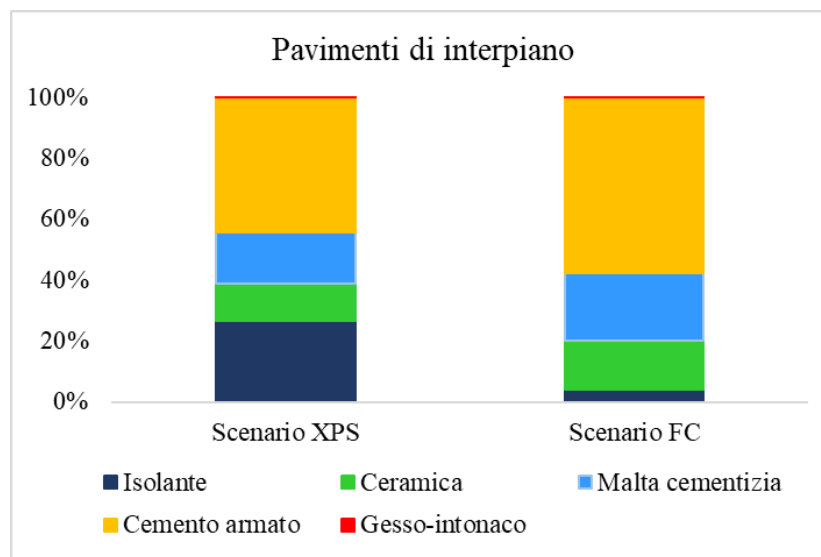


Figura 58: Analisi dell'EE dei materiali che costituiscono i pavimenti di interpiano – Scenari XPS e FC

Copertura esterna (tetto)

Nella copertura esterna, il legno e la guaina impermeabilizzante bituminosa rappresentano complessivamente l'88% dell'EE nello scenario XPS e il 97% nello scenario FC (Figura 59). L'isolamento termico realizzato in fibre di cellulosa riduce l'EE del tetto dell'8% rispetto all'impiego del polistirene espanso estruso.

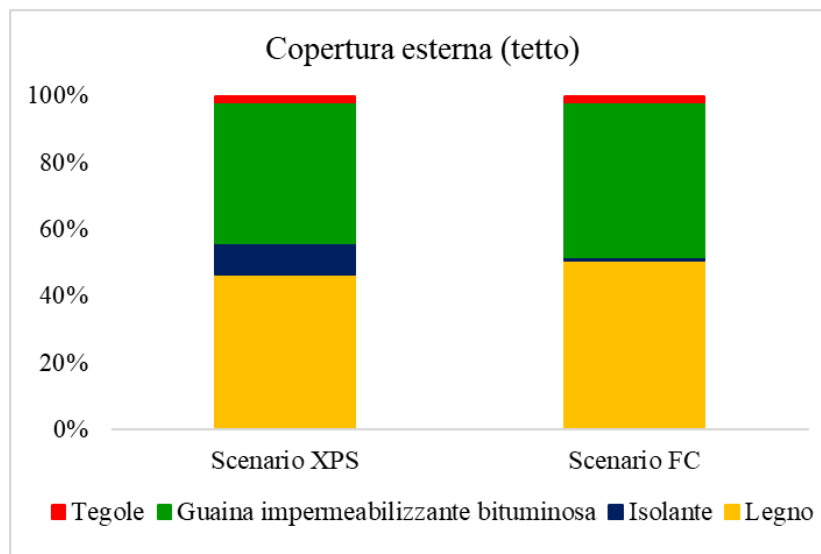


Figura 59: Analisi dell'EE dei materiali che costituiscono la copertura esterna – Scenari XPS e FC

Pareti perimetrali verticali

L'EE delle pareti perimetrali verticali è dovuta principalmente al laterizio forato che contribuisce per il 71% nello scenario XPS e per il 95% nello scenario FC (Figura 60).

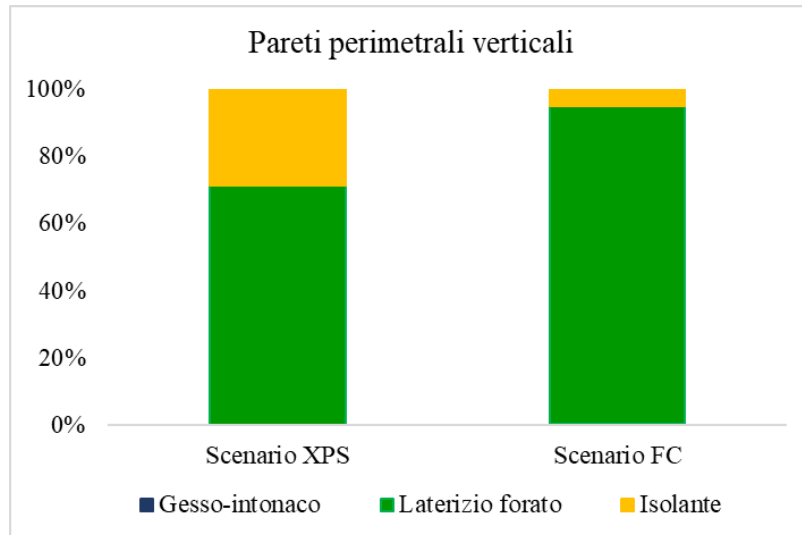


Figura 60: Analisi dell'EE dei materiali che costituiscono le pareti perimetrali verticali – Scenari XPS e FC

Pareti divisorie interne, le aperture finestrate e il pavimento contro terra

Nella Figura 61 è illustrata l'analisi dell'EE dei materiali che costituiscono le pareti divisorie interne, le aperture finestrate e il pavimento contro terra. I materiali che contribuiscono in misura maggiore a questo impatto sono:

- il laterizio forato nelle pareti divisorie interne, che è responsabile per il 99% dell'EE di questo componente;
- il telaio in alluminio nelle aperture finestrate, che è responsabile per il 90% dell'EE di questo componente;
- il cemento armato nel pavimento contro terra, che è responsabile per il 74% dell'EE di questo componente, seguito dalla malta cementizia che incide per il 20%.

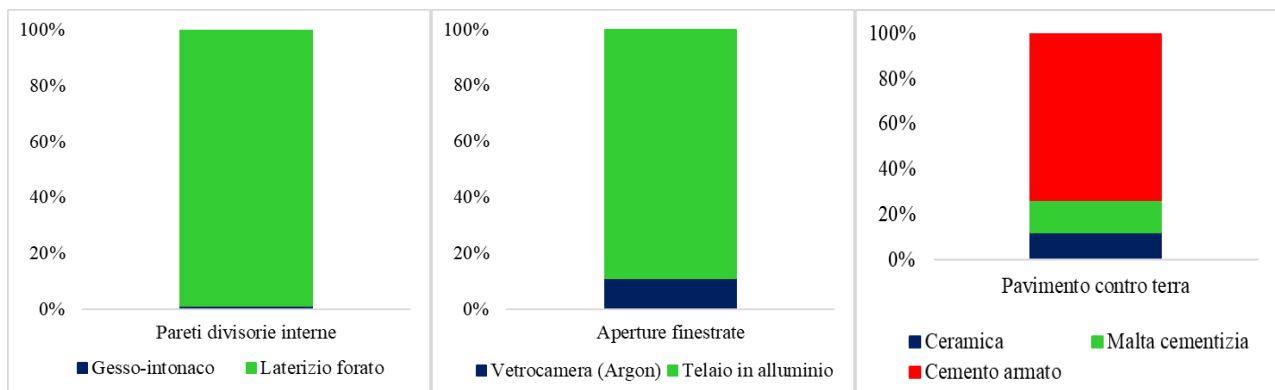


Figura 61: Analisi dell'EE dei materiali che costituiscono le pareti divisorie interne, le aperture finestrate e il pavimento contro terra

Saracinesche, porte interne e porte blindate esterne

L'EE delle saracinesche è interamente imputabile all'acciaio impiegato per la loro realizzazione. Dall'analisi di processo degli impatti associati alle porte interne e alle porte blindate esterne è emerso che in entrambi gli scenari il legno è il materiale responsabile del maggior contributo all'EE. Più nel dettaglio, il legno rappresenta il 41% dell'EE delle porte blindate esterne e il 35% delle porte interne.

Impatti ambientali – Componenti d'involucro

Nella Tabella 43 sono sintetizzati gli impatti ambientali connessi all'involucro edilizio per entrambi gli scenari esaminati e le variazioni percentuali degli impatti connessi allo scenario FC rispetto a quelli dello scenario XPS. Dall'analisi dei dati emerge che lo scenario FC presenta prestazioni ambientali migliori in quasi tutte le categorie di impatto esaminate ad eccezione delle categorie "cambiamento climatico – contributo dell'uso del suolo e del cambiamento dell'uso del suolo", "tossicità umana con effetti non cancerogeni", "uso e qualità del suolo" e "depauperamento delle risorse abiotiche - minerali e metalli". L'aumento dell'impatto nello scenario FC rispetto allo scenario XPS sulle categorie "cambiamento climatico – contributo dell'uso del suolo e del cambiamento dell'uso del suolo", "uso e qualità del suolo" e "depauperamento delle risorse abiotiche - minerali e metalli" è connesso principalmente all'impiego del materiale isolante in fibre di cellulosa che ha un impatto maggiore su queste categorie ambientali rispetto al polistirene espanso estruso. L'aumento dell'impatto sulla categoria "tossicità umana con effetti non cancerogeni" è dovuto alla maggiore quantità di laterizio forato impiegato nelle pareti perimetrali e alla maggiore quantità di malta cementizia e di cemento armato utilizzati nella costruzione del pavimento contro terra nello scenario FC. Tuttavia le variazioni percentuali tra gli impatti causati dai due scenari in queste categorie sono di entità trascurabile (inferiore al 3,6%). I maggiori benefici ambientali connessi all'uso dell'isolante in fibre di cellulosa in sostituzione del polistirene espanso estruso si hanno in corrispondenza delle seguenti categorie: "consumo della risorsa idrica" in cui si ottiene una riduzione dell'impatto del 15,7%, "formazione di ozono fotochimico" con una riduzione del 13%, "cambiamento climatico" e "cambiamento climatico – contributo fossile", in cui l'impatto si riduce, rispettivamente, del 9% e dell'8% e "acidificazione" in cui si registra una riduzione dell'impatto di circa il 6%. In tutte le altre categorie ambientali esaminate si hanno riduzioni inferiori del 3%. I valori negativi dell'impatto sulla categoria "cambiamento climatico – contributo biogenico" sono dovuti ai contributi delle aperture finestrate, del tetto, delle pareti perimetrali verticali, delle pareti divisorie interne e alle porte interne ed esterne (Tabelle 20 e 21). Un'analisi più dettagliata degli impatti su questa categoria è fornita nella sezione dedicata alla descrizione degli impatti connessi ai singoli componenti d'involucro. Nella Tabella 44 e Tabella 45 è riportato il contributo agli impatti di ogni componente edile, rispettivamente negli scenari XPS e FC.

Tabella 43: Modulo A: Impatti ambientali nei componenti d'involucro – Scenario XPS e Scenario FC

Categoria di impatto	Scenario XPS	Scenario FC	(Scenario FC-Scenario XPS)/ Scenario XPS
GWP (kg CO _{2eq})	1,59E+05	1,44E+05	-9,27%
GWP _f (kg CO _{2eq})	1,80E+05	1,66E+05	-7,80%
GWP _b (kg CO _{2eq})	-2,10E+04	-2,17E+04	3,30%
GWP _{LULUC} (kg CO _{2eq})	1,59E+02	1,61E+02	1,04%
ODP (kg CFC-11 _{eq})	1,42E-02	1,40E-02	-0,85%
AP (mol H ⁺ _{eq})	7,42E+02	7,00E+02	-5,76%
EP _{FW} (kg PO _{4eq})	4,05E+01	3,96E+01	-2,18%
EP _M (kg N _{eq})	1,91E+02	1,85E+02	-3,13%
EP _T (mol N _{eq})	1,83E+03	1,76E+03	-3,43%
POCP (kg NMVOC _{eq})	5,69E+02	4,94E+02	-13,13%

ADP _{m&m} (kg Sb _{eq})	1,10E+01	1,13E+01	2,46%
WDP (m ³ world eq. Deprived)	6,25E+04	5,27E+04	-15,66%
PM (Potenziale di incidenza)	3,90E-02	3,87E-02	-0,79%
IR (kBq U ²³⁵ _{eq})	1,29E+04	1,25E+04	-3,17%
E _{FW} (CTUe)	3,07E+06	3,07E+06	-0,02%
HT-nce (CTU _h)	3,07E-03	3,08E-03	0,37%
HT-ce (CTU _h)	2,07E-04	2,06E-04	-0,35%
LU (-)	2,22E+06	2,30E+06	3,55%

Tabella 44: Modulo A: Contributo in valore assoluto dei componenti d'involucro agli impatti ambientali – Scenario XPS

Categoria di impatto	Aperture finestrate	Tetto	Pareti perimetrali verticali	Pareti divisorie interne	Pavimenti interpiano	Pavimento contro terra	Porte interne, porte blindate esterne, saracinesche
GWP (kg CO _{2eq})	1,28E+04	-4,17E+03	1,77E+04	1,87E+03	8,02E+04	4,06E+04	1,00E+04
GWP _f (kg CO _{2eq})	1,28E+04	1,04E+04	2,28E+04	2,68E+03	7,84E+04	3,98E+04	1,30E+04
GWP _b (kg CO _{2eq})	-5,30E+01	-1,46E+04	-5,14E+03	-8,06E+02	1,73E+03	7,62E+02	-2,97E+03
GWP _{LULUC} (kg CO _{2eq})	3,71E+01	2,26E+01	6,76E+00	8,90E-01	2,75E+01	1,49E+01	4,93E+01
ODP (kg CFC-11 _{eq})	7,41E-04	4,10E-03	2,44E-03	3,65E-04	3,63E-03	1,91E-03	9,64E-04
AP (mol H ⁺ _{eq})	8,39E+01	7,57E+01	9,04E+01	1,14E+01	2,80E+02	1,34E+02	6,70E+01
EP _{FW} (kg PO _{4eq})	4,35E+00	3,46E+00	3,45E+00	4,37E-01	1,46E+01	7,62E+00	6,59E+00
EP _M (kg N _{eq})	1,40E+01	1,28E+01	4,95E+01	7,39E+00	6,23E+01	3,16E+01	1,36E+01
EP _T (mol N _{eq})	1,43E+02	1,64E+02	2,77E+02	4,11E+01	7,00E+02	3,55E+02	1,45E+02
POCP (kg NMVOC _{eq})	4,17E+01	6,14E+01	7,22E+01	7,33E+00	2,30E+02	1,04E+02	5,28E+01
ADP _{m&m} (kg Sb _{eq})	2,09E-01	2,00E-01	4,44E-01	6,83E-02	6,08E+00	2,50E+00	1,53E+00
WDP (m ³ _{world eq. Deprived})	3,16E+03	6,18E+03	2,43E+04	3,17E+03	1,64E+04	6,21E+03	3,17E+03
PM (Potenziale di incidenza)	9,17E-04	1,64E-03	8,96E-04	1,22E-04	2,45E-02	9,91E-03	9,52E-04
IR (kBq U ²³⁵ _{eq})	7,01E+02	2,37E+03	7,39E+02	8,12E+01	5,06E+03	2,40E+03	1,51E+03
E _{FW} (CTUe)	3,86E+05	3,00E+05	3,85E+05	8,80E+04	1,02E+06	5,12E+05	3,79E+05
HT-nce (CTU _h)	2,88E-04	2,02E-04	3,47E-04	5,13E-05	1,13E-03	6,28E-04	4,28E-04
HT-ce (CTU _h)	1,64E-05	2,39E-05	1,34E-05	1,90E-06	6,45E-05	3,87E-05	4,80E-05
LU (-)	3,82E+04	9,67E+05	2,35E+05	3,51E+04	4,31E+05	1,83E+05	3,31E+05

Tabella 45: Modulo A: Contributo in valore assoluto dei componenti d'involucro agli impatti ambientali – Scenario FC

Categoria di impatto	Aperture finestrate	Tetto	Pareti perimetrali verticali	Pareti divisorie interne	Pavimenti interpiano	Pavimento contro terra	Porte interne, porte blindate esterne, saracinesche
GWP (kg CO _{2eq})	1,28E+04	-6,40E+03	1,26E+04	1,87E+03	7,27E+04	4,07E+04	1,00E+04
GWP _f (kg CO _{2eq})	1,28E+04	8,23E+03	1,79E+04	2,68E+03	7,13E+04	3,99E+04	1,30E+04
GWP _b (kg CO _{2eq})	-5,30E+01	-1,46E+04	-5,40E+03	-8,06E+02	1,41E+03	7,64E+02	-2,97E+03
GWP _{LULUC} (kg CO _{2eq})	3,71E+01	2,28E+01	7,36E+00	8,90E-01	2,83E+01	1,49E+01	4,93E+01
ODP (kg CFC-11 _{eq})	7,41E-04	4,09E-03	2,41E-03	3,65E-04	3,56E-03	1,92E-03	9,64E-04
AP (mol H ⁺ _{eq})	8,39E+01	6,92E+01	7,58E+01	1,14E+01	2,58E+02	1,34E+02	6,70E+01
EP _{FW} (kg PO _{4eq})	4,35E+00	3,32E+00	3,14E+00	4,37E-01	1,41E+01	7,64E+00	6,59E+00
EP _M (kg N _{eq})	1,40E+01	1,19E+01	4,75E+01	7,39E+00	5,91E+01	3,17E+01	1,36E+01
EP _T (mol N _{eq})	1,43E+02	1,54E+02	2,56E+02	4,11E+01	6,67E+02	3,56E+02	1,45E+02
POCP (kg NMVOC _{eq})	4,17E+01	5,02E+01	4,64E+01	7,33E+00	1,91E+02	1,04E+02	5,28E+01
ADP _{m&m} (kg Sb _{eq})	2,09E-01	2,39E-01	5,42E-01	6,83E-02	6,21E+00	2,50E+00	1,53E+00
WDP (m ³ _{world eq. Deprived})	3,16E+03	4,72E+03	2,09E+04	3,17E+03	1,13E+04	6,23E+03	3,17E+03
PM (Potenziale di incidenza)	9,17E-04	1,59E-03	7,91E-04	1,22E-04	2,44E-02	9,92E-03	9,52E-04
IR (kBq U ²³⁵ _{eq})	7,01E+02	2,31E+03	5,97E+02	8,12E+01	4,85E+03	2,41E+03	1,51E+03
E _{FW} (CTU _e)	3,86E+05	2,99E+05	3,86E+05	8,80E+04	1,02E+06	5,13E+05	3,79E+05
HT-nce (CTU _h)	2,88E-04	2,03E-04	3,51E-04	5,13E-05	1,13E-03	6,30E-04	4,28E-04
HT-ce (CTU _h)	1,64E-05	2,37E-05	1,31E-05	1,90E-06	6,41E-05	3,88E-05	4,80E-05
LU (-)	3,82E+04	9,79E+05	2,64E+05	3,51E+04	4,70E+05	1,83E+05	3,31E+05

Inoltre per un'analisi più immediata, il contributo agli impatti di ogni componente edile è illustrato nei grafici riportati in Figura 62 e Figura 63, rispettivamente, per gli scenari XPS e FC. Il contributo percentuale dei singoli componenti edilizi sugli impatti totali presenta variazioni trascurabili tra i due scenari esaminati, per cui la trattazione che segue è descrittiva di entrambi. Dall'analisi dei dati riportati emerge che, in entrambi gli scenari considerati, i componenti dell'involucro edilizio responsabili del maggior impatto ambientale sono i pavimenti di interpiano e il pavimento contro terra.

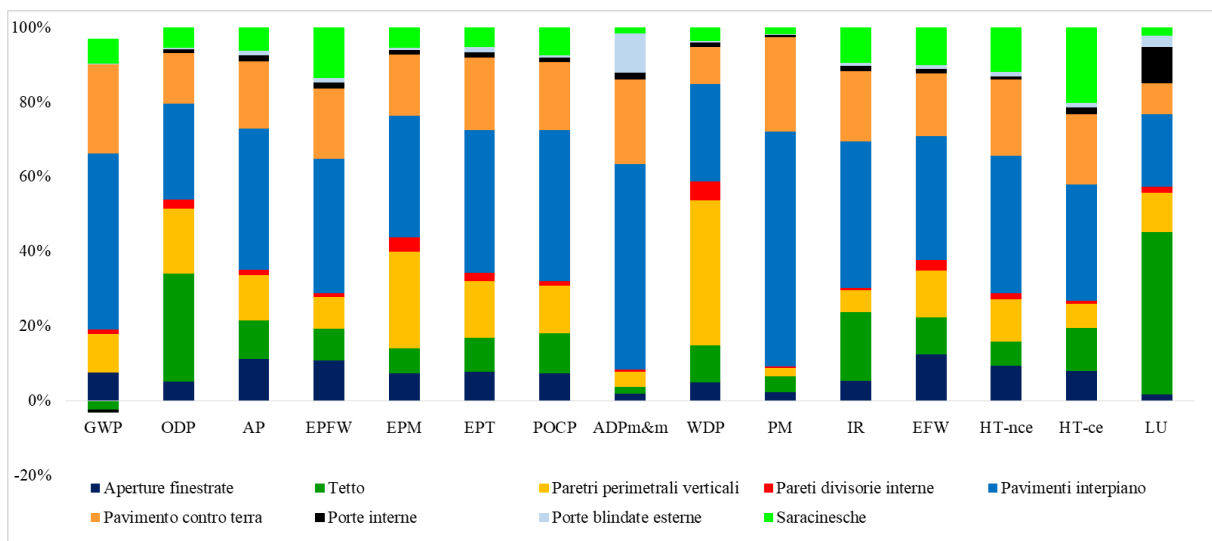


Figura 62: Modulo A: Analisi del contributo dei componenti di involucro agli impatti ambientali – Scenario XPS

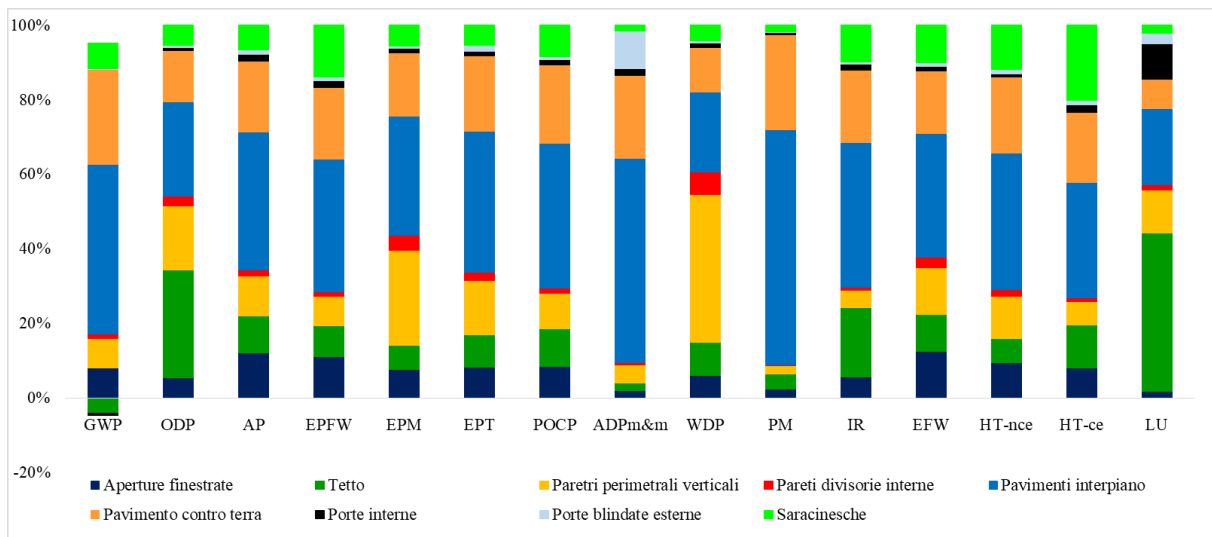


Figura 63: Modulo A: Analisi del contributo dei componenti d'involucro agli impatti ambientali – Scenario FC

Il contributo agli impatti di ogni componenti di involucro è descritto di seguito.

Pavimenti di interpiano

Il contributo agli impatti dei pavimenti di interpiano varia da un valore minimo pari a circa il 20% nelle categorie “cambiamento climatico – contributo dell’uso del suolo e del cambiamento dell’uso del suolo” e “uso qualità del suolo” ad un valore massimo pari al 63% nella categoria “emissione di particolato”. I pavimenti di interpiano incidono per circa il 50% sull’impatto relativo al “cambiamento climatico”, il 44% al “cambiamento climatico – contributo fossile” e il 55% al “depauperamento delle risorse abiotiche - minerali e metalli”. Inoltre, i pavimenti di interpiano contribuiscono in misura significativa (circa il 40%) alle categorie “acidificazione”, “formazione di ozono fotochimico”, “radiazione ionizzante”, “tossicità umana con effetti non cancerogeni” ed “eutrofizzazione terrestre”. L’analisi dettagliata del contributo dei materiali ha evidenziato che, in entrambi gli scenari, il cemento armato è responsabile del maggiore contributo agli impatti in quasi tutte le categorie investigate (Figura 64e Figura 65). In dettaglio, esso incide con percentuali comprese tra il 30% e l’80% in tutte le categorie ambientali investigate ad eccezione delle categorie “emissione di particolato” e “depauperamento delle risorse abiotiche - minerali e metalli”, alle quali contribuisce per il 6%, e della categoria “uso e qualità del suolo” in cui incide per il 26% nello scenario XPS e per il 24% nello scenario FC. La ceramica è responsabile del maggiore contributo all’impatto (circa il 90%) nelle categorie “emissione di particolato” e “depauperamento delle risorse abiotiche - minerali e metalli”, mentre la malta cementizia è responsabile di circa il 50% dell’impatto sull’“uso e qualità del suolo”. Il polistirene espanso estruso è responsabile di un contributo all’impatto pari al 34% sul “consumo della risorsa idrica”, al 20% sulla “formazione di ozono fotochimico”, pari a circa il 10% sul “cambiamento climatico” e sull’“acidificazione”. L’isolante in fibre di cellulosa contribuisce per il 10% all’impatto sulla categoria “uso e qualità del suolo” e con percentuali inferiori al 5% in tutte le altre categorie ambientali investigate.

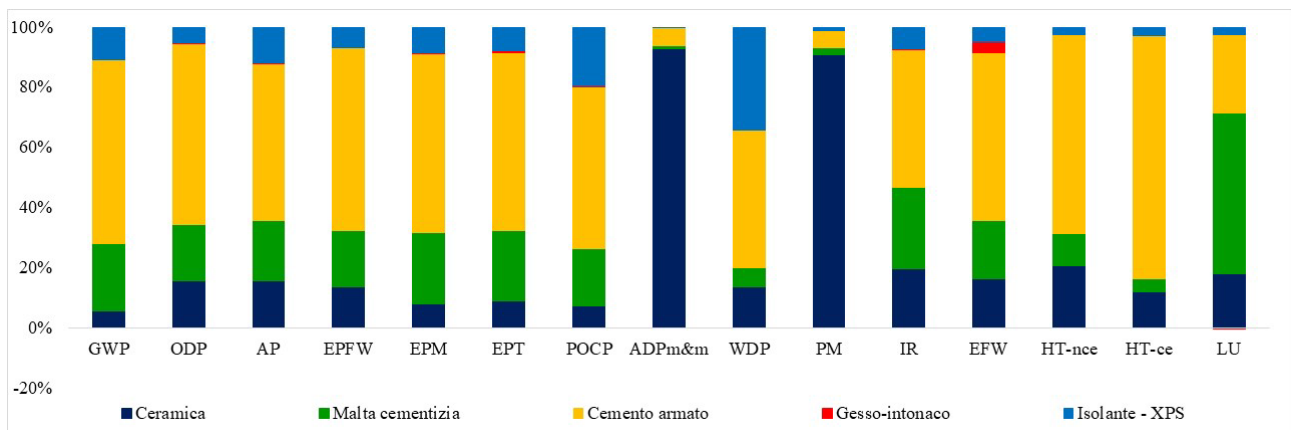


Figura 64: Modulo A: Analisi degli impatti ambientali dei materiali che costituiscono i pavimenti di interpiano – Scenario XPS

Il confronto tra gli impatti ambientali connessi ai due scenari esaminati ha evidenziato che l’uso dell’isolante in fibre di cellulosa in sostituzione del polistirene espanso estruso riduce gli impatti della produzione dei pavimenti di interpiano in tutte le categorie ad eccezione del depauperamento delle risorse abiotiche - minerali e metalli e della tossicità umana con effetti non cancerogeni, in cui si verifica un aumento anche se trascurabile dell’impatto. I benefici più significativi si ottengono per gli impatti sulle categorie “consumo della risorsa idrica” (-30%), “formazione di ozono fotochimico” (-16,6%), “cambiamento climatico” (-9,3%) e “uso e qualità del suolo” (-8,8%).

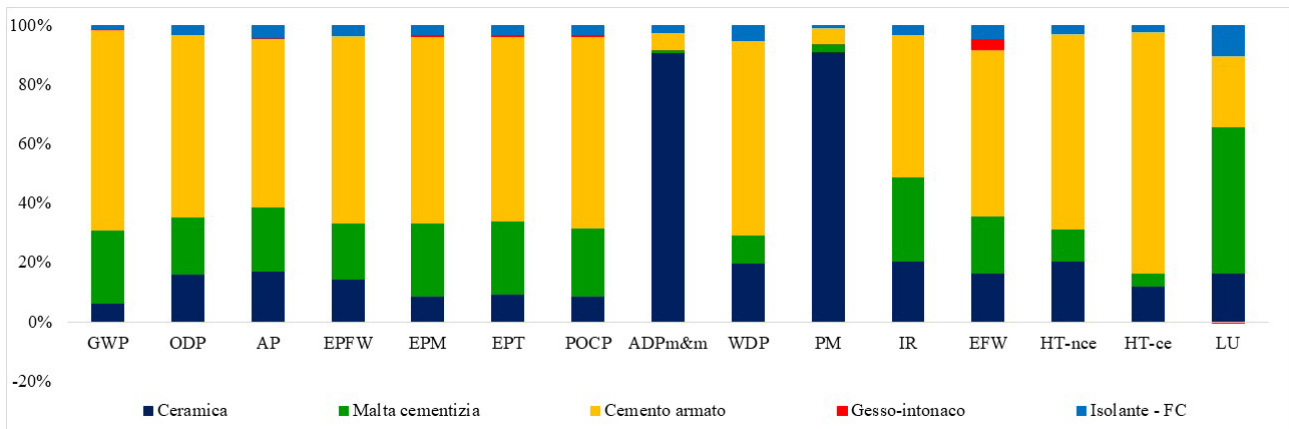


Figura 65: Modulo A: Analisi degli impatti ambientali dei materiali che costituiscono i pavimenti di interpiano – Scenario FC

Pavimento contro terra

Il pavimento contro terra incide sugli impatti con percentuali variabili da un valore minimo pari a circa l'8% per le categorie "uso e qualità del suolo" e "cambiamento climatico – contributo dell'uso del suolo e del cambiamento dell'uso del suolo" ad un valore massimo sul "cambiamento climatico" pari al 26% nello scenario XPS e al 28% nello scenario FC.

Copertura esterna (Tetto)

Il tetto è responsabile del maggiore contributo all'impatto sulla categoria "uso e qualità del suolo" (43%). Inoltre, incide per il 30% sulla "riduzione dello strato di ozono", per il 20% sulla "radiazione ionizzante" e per il 15% sul "cambiamento climatico – contributo dell'uso del suolo e del cambiamento dell'uso del suolo".

Nella Figura 66e Figura 67 è illustrata la distribuzione percentuale degli impatti associati ai materiali impiegati nella realizzazione del tetto.

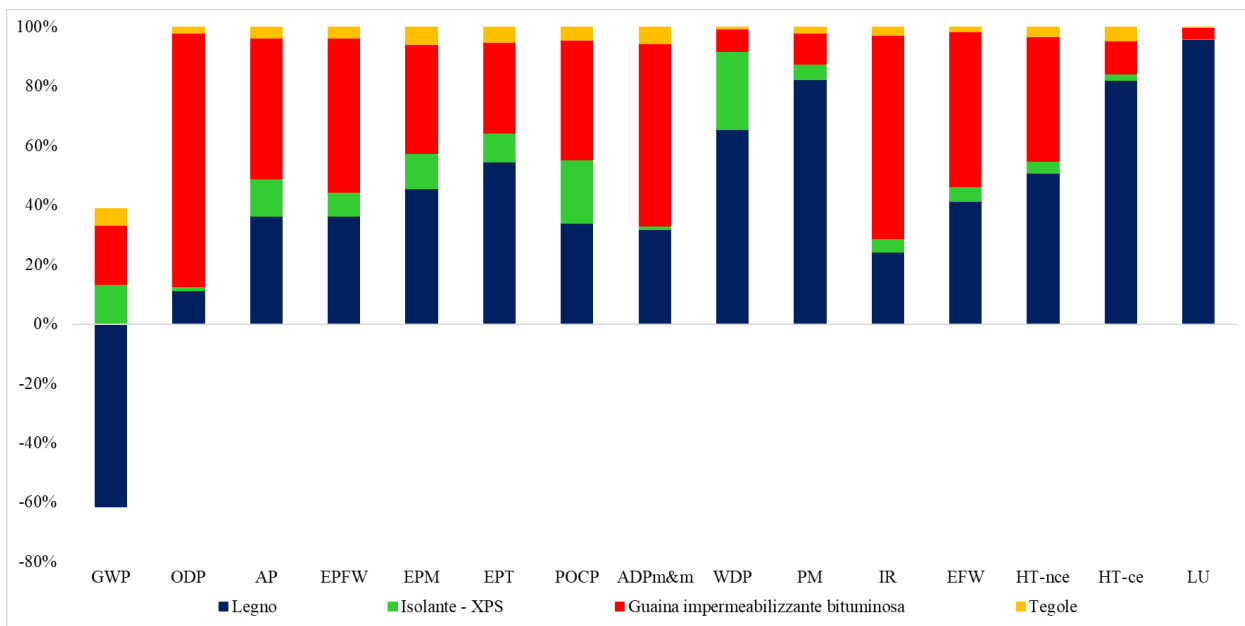


Figura 66: Modulo A: Analisi degli impatti ambientali dei materiali che costituiscono il tetto – Scenario XPS

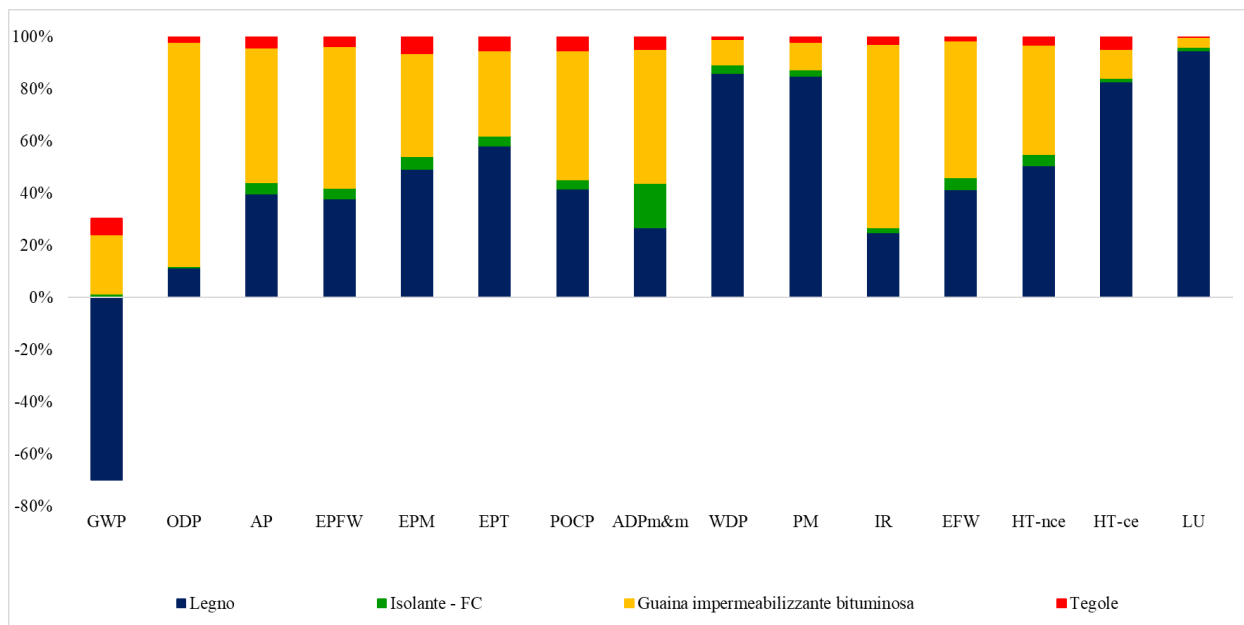


Figura 67: Modulo A: Analisi degli impatti ambientali dei materiali che costituiscono il tetto – Scenario FC

Dall'analisi dei dati emerge che, in entrambi gli scenari, il legno e la guaina impermeabilizzante bituminosa sono i materiali responsabili del maggior contributo agli impatti in tutte le categorie esaminate. L'analisi di contributo sulle categorie ambientali, escluso il cambiamento climatico che sarà trattato separatamente, ha evidenziato che la guaina impermeabilizzante bituminosa incide con percentuali che variano da un valore minimo pari a circa il 4% sulla categoria "uso e qualità del suolo" a circa l'85% sulla categoria "riduzione dello strato di ozono". Il legno presenta contributi agli impatti variabili tra l'11% sulla categoria "riduzione dello strato di ozono" al 95% sulla categoria "uso e qualità del suolo". Con riferimento allo scenario XPS, il materiale isolante è responsabile di un contributo all'impatto pari al 26% sul "consumo della risorsa idrica", al 21% sulla "formazione di ozono fotochimico" e pari circa il 10% sulle categorie "acidificazione", "eutrofizzazione terrestre" ed "eutrofizzazione delle acque dolci e delle acque marine". Il contributo sulle altre categorie di impatto è inferiore al 5%. Nello scenario FC, l'isolante ha un contributo pari al 17% sul "depauveramento delle risorse abiotiche - minerali e metalli", mentre è trascurabile l'impatto sulle altre categorie esaminate.

Nella Tabella 46 è riportato il contributo dei materiali impiegati nella realizzazione del tetto sulle categorie ambientali relative al "cambiamento climatico". Dall'analisi dei dati emerge che il legno e la guaina impermeabilizzante sono responsabili, rispettivamente, del 31% e del 35% dell'impatto sul "cambiamento climatico – contributo fossile" nello Scenario XPS, e del 39% e 40% nello Scenario FC. In entrambi gli scenari, il legno incide per circa l'80% sulla categoria "cambiamento climatico – uso del suolo e cambiamento dell'uso del suolo". Con riferimento al "cambiamento climatico", in entrambi gli scenari esaminati, il tetto presenta un impatto negativo dovuto all'assorbimento di CO₂ dall'atmosfera durante la fase di crescita della biomassa. Dai dati riportati nella Tabella 46 emerge che nello Scenario XPS l'impatto negativo sul "cambiamento climatico" è dovuto all'impatto sulla categoria "cambiamento climatico – contributo biogenico" connesso al legno, mentre nello Scenario FC oltre al legno anche le fibre di cellulosa contribuiscono alla riduzione dell'impatto sul "cambiamento climatico".

Tabella 46: Modulo A: Analisi di contributo dei materiali che costituiscono il tetto sulla categoria cambiamento – Scenari XPS e FC

Categoria ambientale	Legno	Isolante - XPS	Guaina impermeabilizzante bituminosa	Tegole
GWP (kgCO _{2eq})	-1,14E+04	2,48E+03	3,68E+03	1,01E+03
GWP _f (kgCO _{2eq})	3,24E+03	2,46E+03	3,66E+03	1,00E+03
GWP _b (kgCO _{2eq})	-1,46E+04	2,79E+01	1,98E+01	1,09E+00

GWP _{LULUC} (kgCO _{2eq})	1,80E+01	4,68E-01	3,81E+00	2,98E-01
Categoria ambientale	Legno	Isolante - FC	Guaina impermeabilizzante bituminosa	Tegole
GWP (kgCO _{2eq})	-1,14E+04	2,47E+02	3,69E+03	1,01E+03
GWP _f (kgCO _{2eq})	3,24E+03	3,15E+02	3,66E+03	1,01E+03
GWP _b (kgCO _{2eq})	-1,46E+04	-6,82E+01	1,98E+01	1,09E+00
GWP _{LULUC} (kgCO _{2eq})	1,80E+01	6,72E-01	3,82E+00	2,98E-01

Il confronto tra gli impatti ambientali connessi ai due scenari esaminati ha evidenziato che l'impiego del materiale isolante in fibre di cellulosa in sostituzione del polistirene espanso estruso riduce gli impatti della produzione del tetto in tutte le categorie ambientali ad eccezione della categoria "depauperamento delle risorse abiotiche - minerali e metalli", in cui si ha un incremento pari al 14%. I benefici ambientali più significativi si ottengono per le categorie "consumo della risorsa idrica" (-24%), "formazione di ozono fotochimico" (-22%), "acidificazione", "eutrofizzazione terrestre" ed "eutrofizzazione delle acque di mare" (-12%).

Pareti perimetrali verticali

Le pareti perimetrali verticali sono responsabili di circa il 40% dell'impatto sul "consumo della risorsa idrica", del 25% dell'impatto sull'"eutrofizzazione delle acque marine", del 17% dell'impatto sulla "riduzione dello strato di ozono" e del 15% dell'impatto sull'"eutrofizzazione terrestre". Nell'Figura 68 e Figura 69 è illustrata la distribuzione percentuale degli impatti associati ai materiali impiegati nella realizzazione delle pareti perimetrali verticali. In entrambi gli scenari il laterizio forato è il materiale responsabile del maggior contributo all'impatto. In dettaglio, nello scenario XPS esso incide con contributi che variano tra il 55% sulla categoria "formazione di ozono fotochimico" e il 99% sulla categoria "depauperamento delle risorse abiotiche - minerali e metalli", mentre nello scenario FC il contributo varia tra il 70% sulla categoria "ecotossicità delle acque dolci" e il 98% sulla categoria "consumo della risorsa idrica". Con riferimento ai materiali isolanti, il polistirene espanso estruso è responsabile del 42% dell'impatto sulla "formazione di ozono fotochimico", del 33% dell'impatto sul "cambiamento climatico" e sulla "radiazione ionizzante", del 25% dell'impatto sull'"acidificazione" e di circa il 20% dell'impatto sull'"eutrofizzazione delle acque dolci" e sulla categoria "emissione di particolato". Nello scenario FC, le fibre di cellulosa incidono per il 19% sulla categoria "depauperamento delle risorse abiotiche - minerali e metalli" e per il 17% sulla "radiazione ionizzante" e contribuiscono per il circa il 10% dell'impatto sulle categorie "eutrofizzazione delle acque dolci", "uso e qualità del suolo", "formazione di ozono fotochimico", "acidificazione" e "emissione di particolato". Nello scenario XPS l'impatto negativo sulla categoria "cambiamento climatico - contributo biogenico" è connesso al laterizio forato ed in particolare alla paglia e all'argilla utilizzate nel processo produttivo, mentre nello scenario FC oltre al laterizio forato anche alle fibre di cellulosa.

Il confronto tra gli impatti ambientali connessi ai due scenari esaminati ha evidenziato che l'uso delle fibre di cellulosa in sostituzione del polistirene espanso estruso riduce gli impatti della produzione delle pareti perimetrali verticali in tutte le categorie ambientali ad eccezione delle categorie depauperamento delle risorse abiotiche - minerali e metalli e uso e qualità del suolo, in cui si ha, rispettivamente, un incremento pari al 22% e al 12%. I benefici ambientali più significativi si ottengono per le categorie "formazione di ozono fotochimico" (-36%), "cambiamento climatico" (-30%), "radiazione ionizzante" (-19%) e "acidificazione" (-16%).

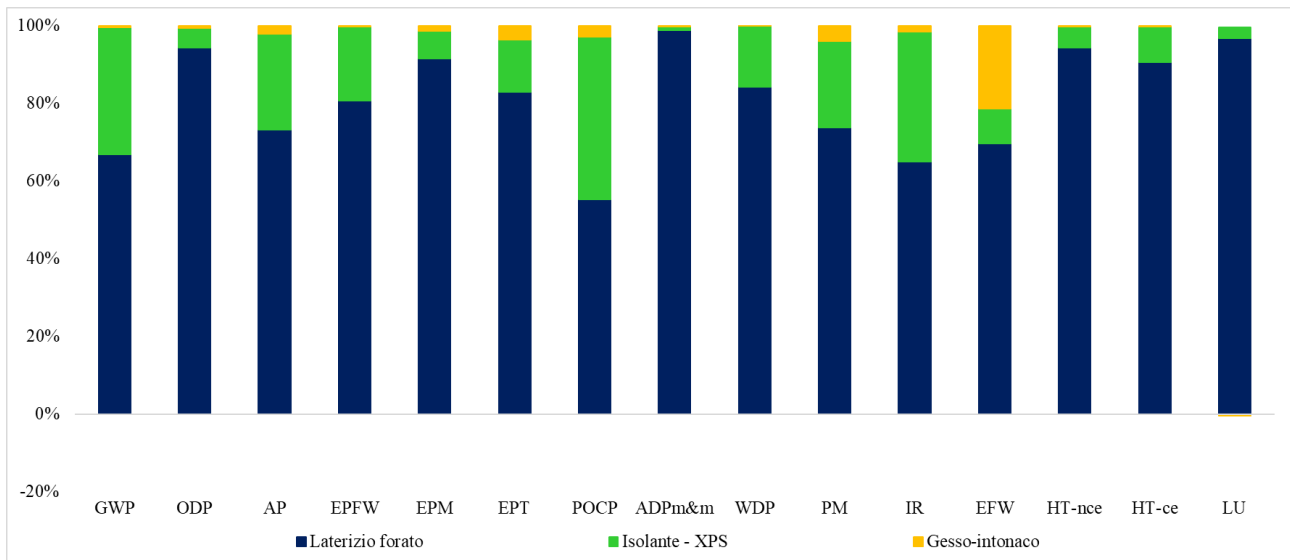


Figura 68: Modulo A: Analisi degli impatti ambientali dei materiali che costituiscono le pareti perimetrali verticali – Scenario XPS

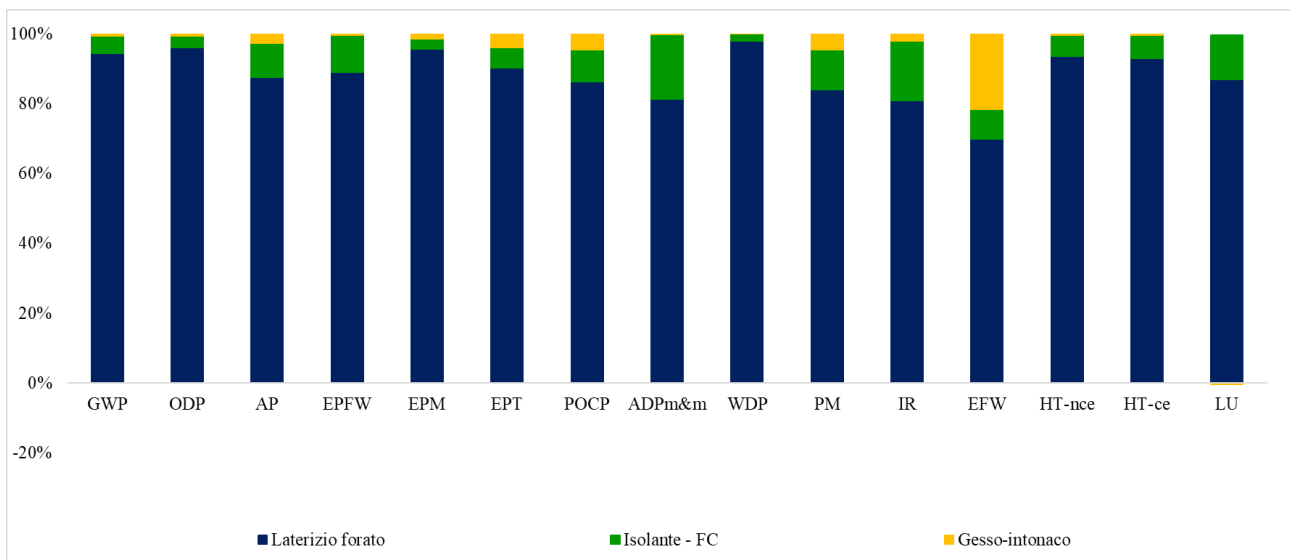


Figura 69: Modulo A: Analisi degli impatti ambientali dei materiali che costituiscono le pareti perimetrali verticali – Scenario FC

Pareti divisorie

Con riferimento alle pareti divisorie, in entrambi gli scenari, il laterizio forato è responsabile del maggior contributo agli impatti (superiore all'80%) in tutte le categorie esaminate ad eccezione dell'"ecotossicità delle acque dolci" in cui il gesso intonaco incide per il 53% (Figura 70). L'impatto negativo sulla categoria "cambiamento climatico – contributo biogenico" è connesso al laterizio forato in entrambi gli scenari esaminati ed in particolare all'argilla e alla paglia utilizzati nel processo produttivo.

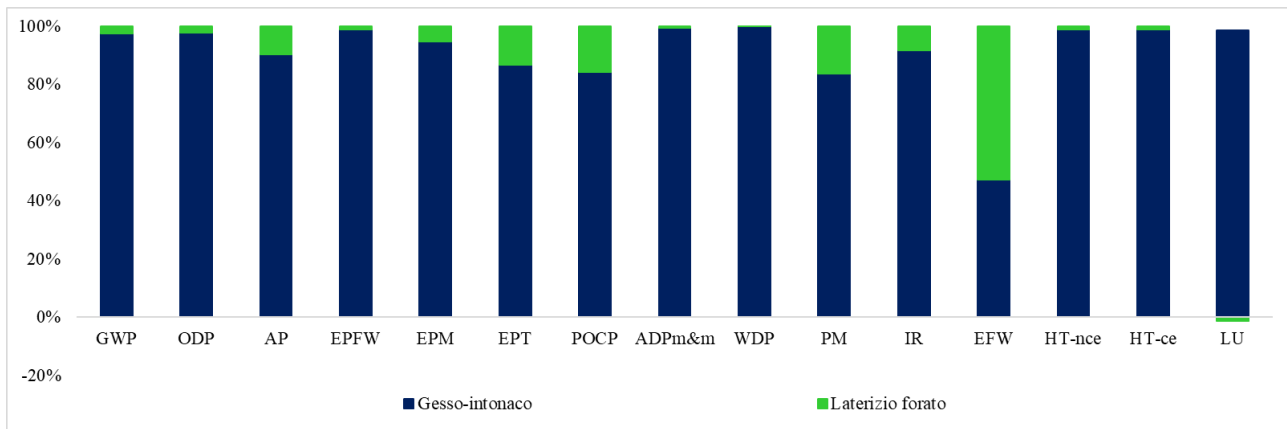


Figura 70: Modulo A: Analisi degli impatti ambientali dei materiali che costituiscono le pareti divisorie – Scenario XPS e Scenario FC

Aperture finestrate

Le aperture finestrate sono responsabili del 23% dell’impatto sul “cambiamento climatico – contributo dell’uso del suolo e del cambiamento dell’uso del suolo” e incidono per circa il 10% all’impatto sulle categorie “cambiamento climatico”, “acidificazione”, “eutrofizzazione delle acque dolci”, “ecotossicità delle acque dolci” e “tossicità umana con effetti non cancerogeni”. Il telaio in alluminio è responsabile di un contributo agli impatti maggiore del 70% in tutte le categorie esaminate (Figura 71). L’impatto negativo sulla categoria “cambiamento climatico – contributo biogenico” è connesso all’energia elettrica utilizzata nel processo di produzione del telaio in alluminio ed in particolare al contributo del legno utilizzato nelle infrastrutture della catena di approvvigionamento dell’energia elettrica da carbone.

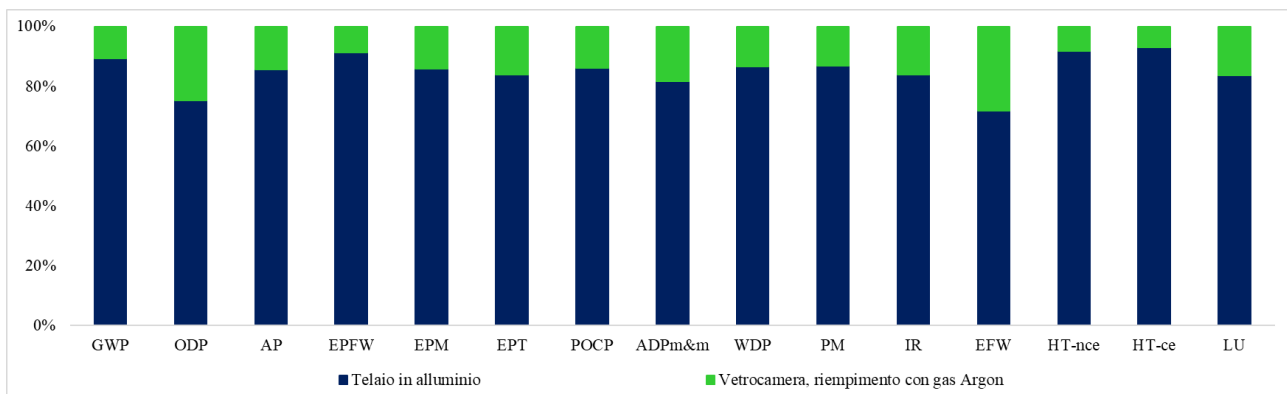


Figura 71: Modulo A: Analisi degli impatti ambientali dei materiali che costituiscono le aperture finestrate – Scenario XPS e Scenario FC

Saracinesche, porte interne e porte blindate esterne

Le porte esterne blindate hanno un impatto trascurabile in tutte le categorie ambientali esaminate ad eccezione del “depauperamento delle risorse abiotiche - minerali e metalli”, a cui contribuiscono per il 10%.

Le porte interne contribuiscono al 23% dell’impatto sul “cambiamento climatico – contributo dell’uso del suolo e del cambiamento dell’uso del suolo”, a circa il 10% dell’impatto sull’“uso e qualità del suolo” e per meno del 4% alle altre categorie ambientali. Infine, le saracinesche sono responsabili del 20% dell’impatto sulla tossicità umana con effetti cancerogeni e di circa il 10% dell’impatto sulle categorie radiazione ionizzante, ecotossicità delle acque dolci e tossicità umana con effetti non cancerogeni.

Per le porte interne, i materiali responsabili del maggiore contributo all'impatto sono:

- i pannelli di truciolato, che presentano un'incidenza compresa tra il 20% e il 37% sulle categorie "tossicità umana con effetti cancerogeni", "consumo della risorsa idrica", "riduzione dello strato di ozono", "emissione di particolato" e di "formazione di ozono fotochimico", "cambiamento climatico – contributo fossile";
- il legno di conifera piallato, che grazie alla CO₂ sottratta dall'atmosfera determina un contributo negativo sul "cambiamento climatico";
- i pannelli di legno, che presentano una incidenza compresa tra il 15% e il 20% sugli impatti nelle categorie "formazione di ozono fotochimico", "tossicità umana con effetti cancerogeni", "eutrofizzazione terrestre, delle acque marine e delle acque dolci", "acidificazione", "cambiamento climatico – contributo fossile" e "ecotossicità delle acque dolci";
- lo zinco, responsabile di circa il 70% dell'impatto sul "depauperamento delle risorse abiotiche - minerali e metalli";
- la vernice alchidica, che causa l'84% dell'impatto sulla categoria "cambiamento climatico – contributo fossile".

Nelle porte esterne blindate i materiali responsabili del maggiore contributo all'impatto sono:

- l'acciaio, che presenta un'incidenza compresa tra il 20% e il 53% sulle categorie "tossicità umana con effetti cancerogeni" e "tossicità con effetti non cancerogeni", "consumo della risorsa idrica", "riduzione dello strato di ozono", "emissione di particolato" e di "formazione di ozono fotochimico", "cambiamento climatico – contributo fossile", "eutrofizzazione delle acque dolci" ed "ecotossicità delle acque dolci";
- lo zinco, responsabile del 42% dell'impatto sul depauperamento delle risorse abiotiche - minerali e metalli, del 55% dell'impatto sull'eutrofizzazione terrestre e del 36% dell'impatto sull'"acidificazione";
- il legno di conifera, che grazie alla CO₂ sottratta dall'atmosfera riduce del 65% l'impatto sul "cambiamento climatico".

Infine, per le saracinesche gli impatti ambientali sono interamente causati dall'acciaio utilizzato nel processo produttivo.

Energia incorporata – Componenti d'impianto

Nella Tabella 47 sono sintetizzati i valori di energia incorporata dell'impianto costituito dai sistemi di climatizzazione, di produzione dell'acqua calda sanitaria e dell'impianto fotovoltaico negli scenari con e senza accumulo elettrico. Dall'analisi è emerso che nello scenario in cui è previsto l'accumulo elettrico (scenario cAE) l'energia incorporata nei componenti d'impianto analizzati è pari a 8,43E+05 MJ di energia primaria di cui l'87,8% costituito da energia primaria non rinnovabile. Nello scenario in cui non è previsto l'accumulo elettrico (scenario sAE), l'energia incorporata nei componenti d'impianto analizzati è pari a 7,42E+05 MJ di energia primaria di cui il 87,4% costituito da energia primaria non rinnovabile. L'installazione di un accumulo elettrico causa un incremento dell'EE nello scenario cAE del 14% rispetto allo scenario sAE, e un incremento dell'impatto sul consumo di energia primaria non rinnovabile e rinnovabile del 14% e del 10%, rispettivamente.

Tabella 47: Modulo A: Energia incorporata nei componenti d'impianto – Scenario cAE e Scenario sAE

Categoria	Scenario cAE	Scenario sAE
EE (MJ)	8,43E+05	7,42E+05
EE _{nr} (MJ)	7,41E+05	6,48E+05
EE _r (MJ)	1,03E+05	9,35E+04

Nella Figura 72 e Figura 73 è illustrata, rispettivamente, l'incidenza dei componenti dell'impianto sull'EE negli scenari cAE e sAE. Dall'analisi è emerso che, in entrambi gli scenari, i componenti che contribuiscono in misura maggiore sono l'impianto fotovoltaico e l'impianto di climatizzazione che rappresentano,

rispettivamente, il 49,3% e il 29,2% dell'EE nello scenario cAE, e il 56% e il 33,2% nello scenario sAE. L'impianto di produzione dell'acqua calda sanitaria incide sull'EE per il 9,5% nello scenario cAE e per l'10,8% nello scenario sAE.

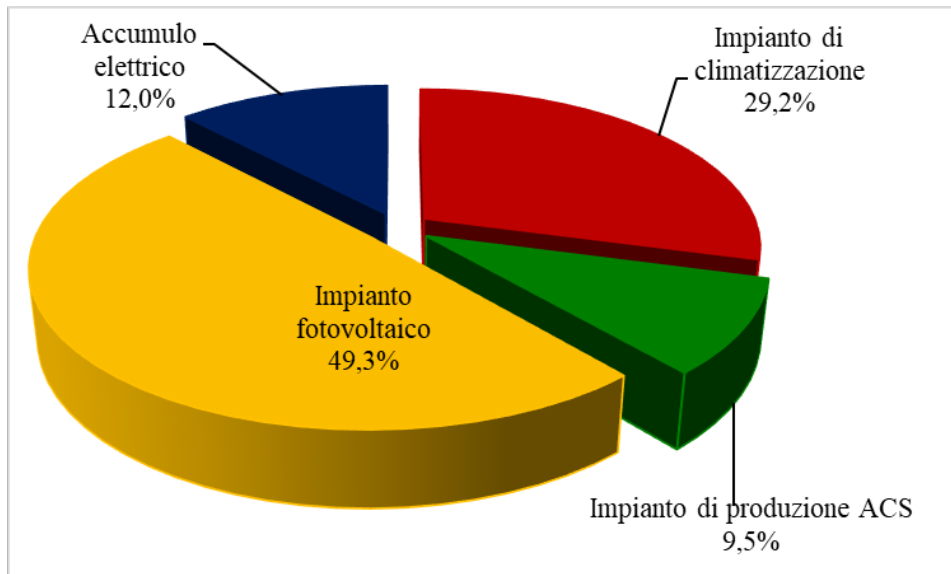


Figura 72: Modulo A: Incidenza dei componenti d'impianto sull'EE – Scenario cAE

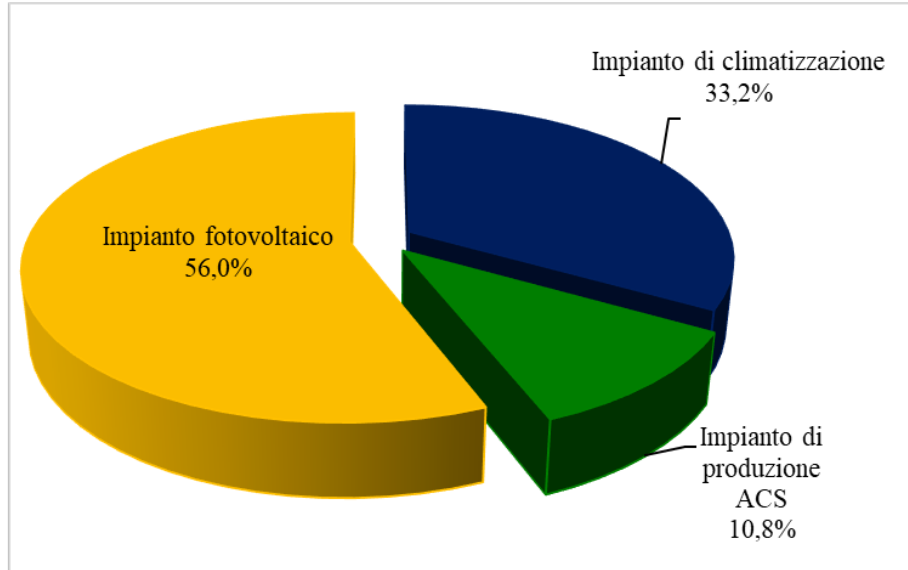


Figura 73: Modulo A: Incidenza dei componenti d'impianto sull'EE – Scenario sAE

L'analisi dettagliata dell'impianto ha consentito di identificare i componenti responsabili del maggior contributo al consumo di energia primaria. Poiché l'impianto ha le medesime caratteristiche in entrambi gli scenari esaminati, con l'unica eccezione del sistema fotovoltaico che nello scenario cAE include l'impianto fotovoltaico e l'accumulo elettrico mentre nello scenario sAE include solo l'impianto fotovoltaico, l'analisi del contributo dei singoli componenti di impianto riportata di seguito è valida per entrambi gli scenari.

Impianto fotovoltaico

Nell'impianto fotovoltaico il contributo più elevato all'EE è associato al processo di produzione dei pannelli fotovoltaici (81%), seguono il processo di produzione della struttura per l'installazione dei pannelli (10%) e quello dell'inverter (7%). I componenti elettrici e l'energia elettrica consumata per l'assemblaggio dell'impianto incidono, complessivamente, per meno del 3% (Figura 74).

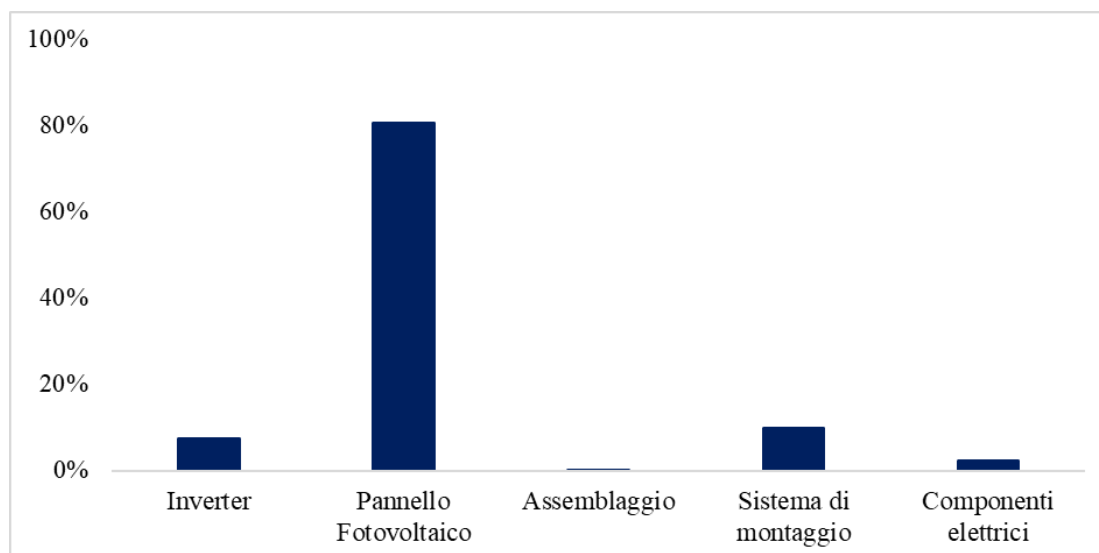
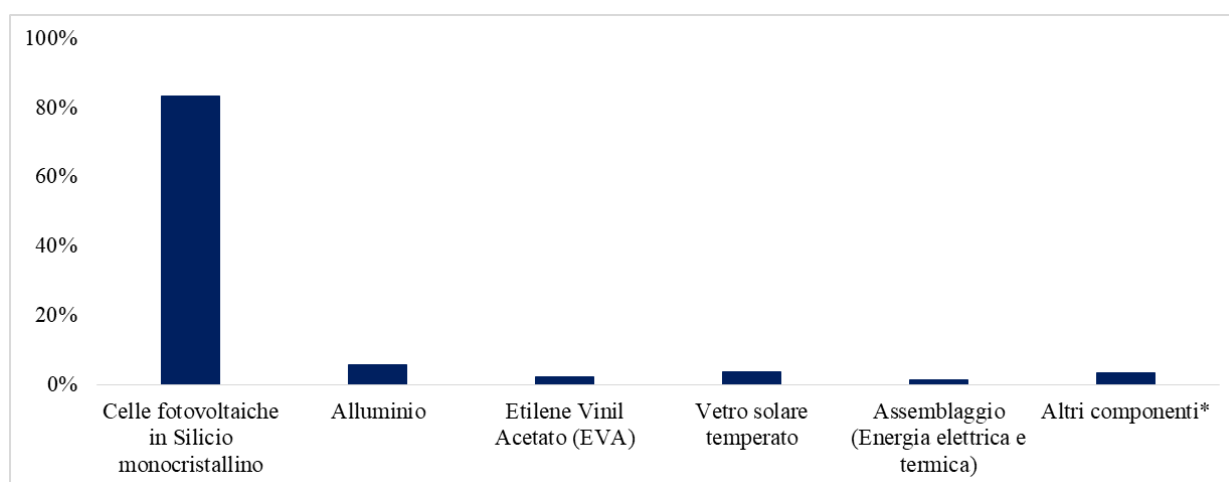


Figura 74: Modulo A: Analisi dell'EE dei componenti che costituiscono l'impianto fotovoltaico

Nella Figura 75 è illustrata l'analisi dettagliata del contributo all'EE del processo produttivo dei pannelli fotovoltaici. Dall'analisi dei dati è emerso che le celle fotovoltaiche in silicio monocristallino incidono con una percentuale superiore all'80%. Sotto la voce "altri componenti" sono raggruppati i materiali e i processi che singolarmente contribuiscono per meno dell'1% e che complessivamente rappresentano il 3,5% dell'EE del pannello.



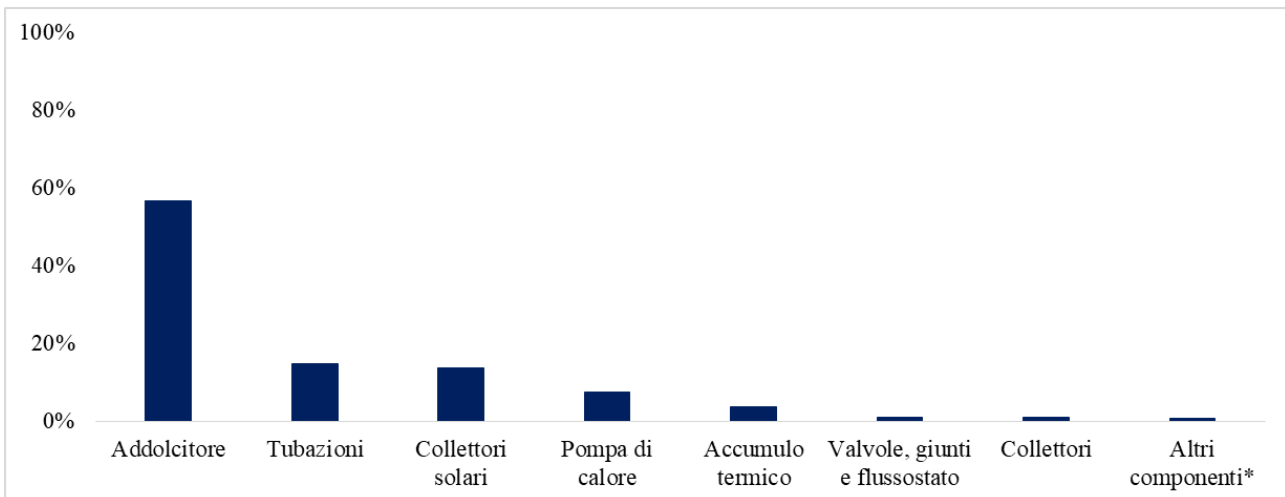
*Altri componenti: etanolo, metanolo, acqua di processo, infrastrutture, ecc.

Figura 75: Modulo A: Analisi dell'EE dei componenti che costituiscono un pannello fotovoltaico

Nella Figura 76 e Figura 77 è illustrata, rispettivamente, l'incidenza percentuale dei singoli componenti che costituiscono l'impianto di produzione dell'acqua calda sanitaria e l'impianto di climatizzazione. Sotto la voce "altri componenti" sono stati raggruppati i componenti che singolarmente contribuiscono per meno dell'1%. Essi rappresentano complessivamente lo 0,90% dell'EE dell'impianto di produzione dell'acqua calda sanitaria e l'1,5% dell'EE dell'impianto di climatizzazione.

Impianto di produzione dell'acqua calda sanitaria

Nell'impianto di produzione dell'acqua calda sanitaria, l'addolcitore è responsabile di circa il 56,8% dell'EE, seguono il collettore solare e le tubazioni che incidono per circa il 14%. Nell'addolcitore la resina cationica rappresenta circa il 40% dell'EE, mentre la resina anionica circa il 30%.

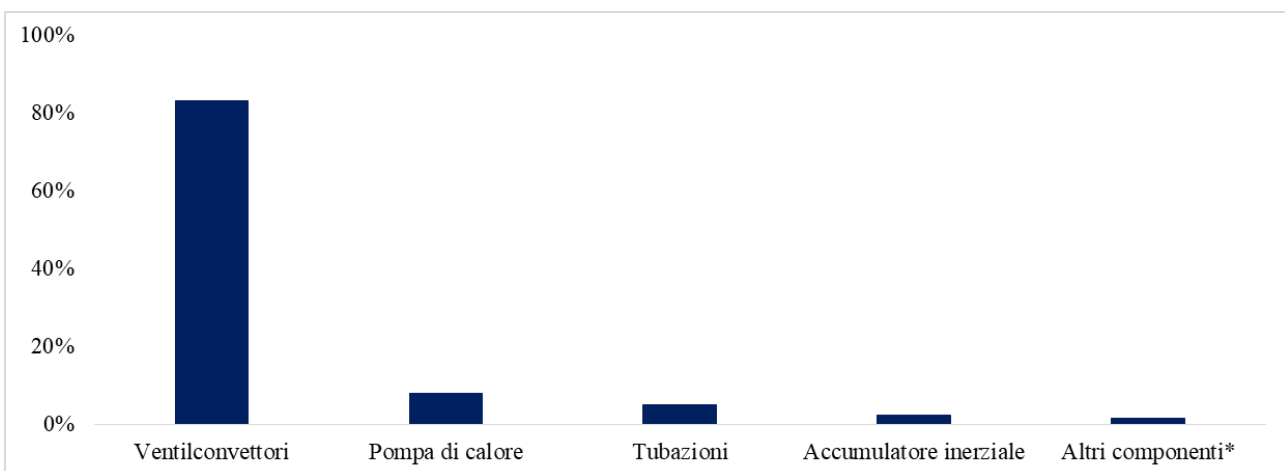


*Altri componenti: stazione solare, vaso di espansione, circolatori, pozzetti per termometri e manometri, filtri.

Figura 76: Modulo A: Analisi dell'EE dei componenti che costituiscono l'impianto di produzione dell'acqua calda sanitaria

Impianto di climatizzazione

Con riferimento all'impianto di climatizzazione, i ventilconvettori sono responsabili dell'83% dell'EE, segue la pompa di calore che incide per l'8%. In dettaglio, nel processo di produzione dei ventilconvettori il pannello terminale di distribuzione dell'aria, realizzato in acciaio, rappresenta il 70% dell'EE associata ai ventilconvettori, mentre i collettori solari e le tubazioni incidono, rispettivamente, per il 4,3% e il 4,6 dell'EE. Il rame e l'acciaio utilizzati per il compressore, i componenti elettrici e l'involucro esterno rappresentano complessivamente circa il 54% dell'EE delle pompe di calore, seguono l'assemblaggio, i tubi isolanti in elastomero e il fluido refrigerante R134a con contributi all'EE pari, rispettivamente, al 23%, 16% e 5%.



*Altri componenti: vaso di espansione, circolatori, sistema di alimentazione, pozzetti per termometri e manometri, filtri, valvole, giunti e flussostati, collettori.

Figura 77: Modulo A: Analisi dell'EE dei componenti che costituiscono l'impianto di climatizzazione

Accumulo elettrico

Con specifico riferimento allo scenario sAE, nel grafico riportato in Figura 78 è illustrato il contributo di ogni componente dell'accumulo elettrico sull'EE. Le celle sono responsabili di circa il 75% dell'EE, seguono l'involucro e il BMS, responsabili, rispettivamente, di circa il 14% e l'8% dell'EE. Il sistema di raffreddamento, le infrastrutture e l'energia consumata per l'assemblaggio dei componenti della batteria contribuiscono, complessivamente, per meno del 5%. L'incidenza sull'EE del sistema impianto fotovoltaico – accumulo elettrico è pari a circa il 62% dell'EE totale dell'impianto, di cui l'impianto fotovoltaico rappresenta circa l'80%.

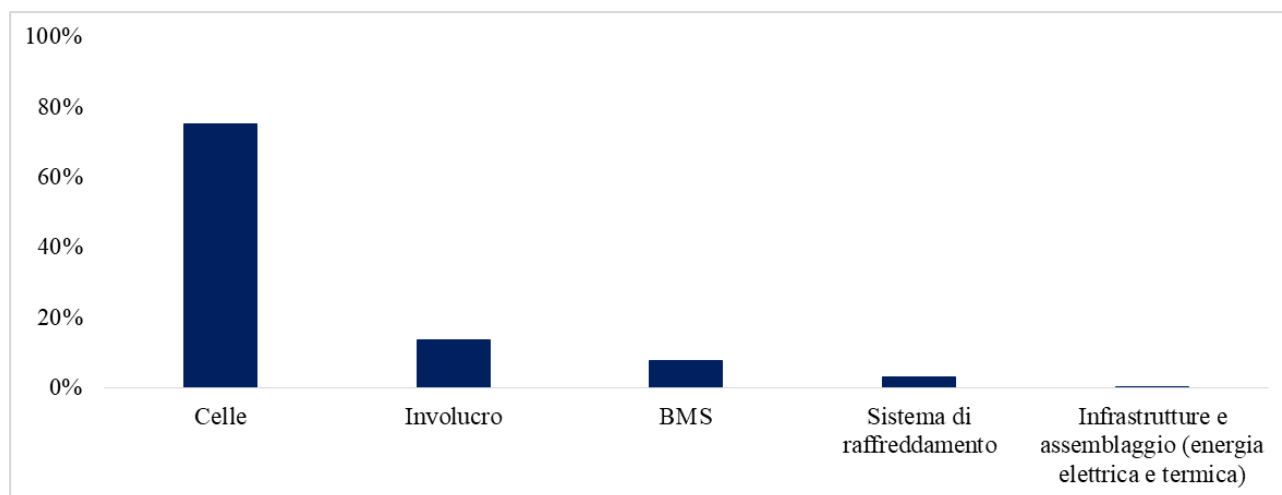


Figura 78: Modulo A: Analisi dell'EE dei componenti che costituiscono l'accumulo elettrico

Impatti ambientali – Componenti d'impianto

Nella Tabella 48 sono sintetizzati gli impatti ambientali connessi ai componenti di impianto per entrambi gli scenari esaminati e le variazioni percentuali degli impatti connessi allo scenario cAE rispetto a quelli dello scenario sAE. Dall'analisi dei dati emerge che l'incremento degli impatti ambientali nello scenario cAE rispetto allo scenario sAE varia da un valore minimo pari allo 0,67% sulla categoria "riduzione dello strato di ozono" ad un valore massimo di 24,8% sulla categoria "consumo della risorsa idrica". Sulla categoria "cambiamento climatico – contributo biogenico" si registra nello scenario cAE una riduzione dell'impatto pari a circa il 3% rispetto allo scenario sAE dovuto al maggior contributo al sequestro dei GHGs biogenici rispetto ai rilasci nello scenario cAE rispetto allo scenario sAE connesso all'impatto negativo sulla categoria dell'accumulo elettrico (Tabella 49).

Nella Tabella 49 e Tabella 50 è riportato il contributo agli impatti di ogni componente d'impianto, rispettivamente negli scenari cAE e sAE. Inoltre per un'analisi più immediata, il contributo agli impatti di ogni componente d'impianto è illustrato nei grafici riportati in Figura 79 e Figura 80, rispettivamente, per gli scenari cAE e sAE.

Dall'analisi dei dati riportati emerge che, in entrambi gli scenari considerati, l'impianto fotovoltaico e l'impianto di climatizzazione sono i componenti responsabili del maggior contributo all'impatto ambientale dell'impianto. L'analisi dettagliata degli impianti ha consentito di identificare i componenti responsabili del maggior contributo agli impatti ambientali. La trattazione che segue è descrittiva di entrambi gli scenari di impianto esaminati.

Tabella 48: Modulo A: Impatti ambientali dei componenti d'impianto – Scenario cAE e Scenario sAE

Categoria di impatto	Scenario cAE	Scenario sAE	(Scenario cAE-Scenario sAE)/Scenario sAE
GWP (kg CO _{2eq})	5,46E+04	4,82E+04	13,25%
GWP _f (kg CO _{2eq})	5,43E+04	4,80E+04	13,30%
GWP _b (kg CO _{2eq})	1,99E+02	2,04E+02	-2,81%

GWP _{LULUC} (kg CO _{2eq})	9,06E+01	7,58E+01	19,63%
ODP (kg CFC-11 _{eq})	5,48E-02	5,44E-02	0,67%
AP (mol H ⁺ _{eq})	6,27E+02	5,60E+02	11,93%
EP _{FW} (kg PO _{4eq})	5,38E+01	5,07E+01	6,17%
EP _M (kg N _{eq})	6,72E+01	6,07E+01	10,64%
EP _T (mol N _{eq})	1,09E+03	1,02E+03	6,89%
POCP (kg NMVOC _{eq})	2,26E+02	2,03E+02	11,11%
ADP _{m&m} (kg Sb _{eq})	2,09E+01	2,05E+01	2,21%
WDP (m ³ _{world eq. Deprived})	3,33E+04	2,67E+04	24,76%
PM (Potenziale di incidenza)	4,01E-03	3,63E-03	10,50%
IR (kBq U ²³⁵ _{eq})	6,64E+03	6,02E+03	10,24%
E _{FW} (CTUe)	4,06E+06	3,80E+06	6,92%
HT-nce (CTU _h)	4,76E-03	4,47E-03	6,37%
HT-ce (CTU _h)	1,41E-04	1,32E-04	7,26%
LU (-)	2,62E+05	2,37E+05	10,60%

Tabella 49: Modulo A: Contributo in valore assoluto dei componenti d'impianto agli impatti ambientali – Scenario cAE

Categoria di impatto	Impianto di climatizzazione	Impianto di produzione ACS	Impianto fotovoltaico	Accumulo elettrico
GWP (kg CO _{2eq})	1,93E+04	5,57E+03	2,34E+04	6,39E+03
GWP _f (kg CO _{2eq})	1,93E+04	5,56E+03	2,31E+04	6,38E+03
GWP _b (kg CO _{2eq})	-4,36E+01	3,82E+00	2,44E+02	-5,75E+00
GWP _{LULUC} (kg CO _{2eq})	2,59E+01	4,96E+00	4,49E+01	1,49E+01
ODP (kg CFC-11 _{eq})	7,16E-03	4,47E-02	2,56E-03	3,66E-04
AP (mol H ⁺ _{eq})	2,95E+02	7,07E+01	1,94E+02	6,68E+01
EP _{FW} (kg PO _{4eq})	2,20E+01	7,10E+00	2,16E+01	3,13E+00
EP _M (kg N _{eq})	2,55E+01	6,58E+00	2,86E+01	6,46E+00
EP _T (mol N _{eq})	6,50E+02	7,81E+01	2,91E+02	7,02E+01
POCP (kg NMVOC _{eq})	8,38E+01	2,35E+01	9,62E+01	2,26E+01
ADP _{m&m} (kg Sb _{eq})	1,65E+01	8,92E-01	3,14E+00	4,53E-01
WDP (m ³ _{world eq. Deprived})	5,57E+03	1,98E+03	1,92E+04	6,61E+03
PM (Potenziale di incidenza)	1,91E-03	3,59E-04	1,36E-03	3,81E-04
IR (kBq U ²³⁵ _{eq})	1,26E+03	3,78E+02	4,39E+03	6,17E+02
E _{FW} (CTUe)	1,87E+06	6,27E+05	1,30E+06	2,63E+05
HT-nce (CTU _h)	2,21E-03	7,92E-04	1,47E-03	2,85E-04
HT-ce (CTU _h)	6,92E-05	3,27E-05	2,97E-05	9,54E-06
LU (-)	9,13E+04	3,84E+04	1,07E+05	2,51E+04

Tabella 50: Modulo A: Contributo in valore assoluto dei componenti d'impianto agli impatti ambientali – Scenario SAE

Categoria di impatto	Impianto di climatizzazione	Impianto di produzione ACS	Impianto fotovoltaico
GWP (kg CO _{2eq})	1,93E+04	5,57E+03	2,34E+04
GWP _f (kg CO _{2eq})	1,93E+04	5,56E+03	2,31E+04
GWP _b (kg CO _{2eq})	-4,36E+01	3,82E+00	2,44E+02
GWP _{LU} (kg CO _{2eq})	2,59E+01	4,96E+00	4,49E+01
ODP (kg CFC-11 _{eq})	7,16E-03	4,47E-02	2,56E-03
AP (mol H ⁺ _{eq})	2,95E+02	7,07E+01	1,94E+02
EP _{FW} (kg PO _{4eq})	2,20E+01	7,10E+00	2,16E+01
EP _M (kg N _{eq})	2,55E+01	6,58E+00	2,86E+01
EP _T (mol N _{eq})	6,50E+02	7,81E+01	2,91E+02
POCP (kg NMVOC _{eq})	8,38E+01	2,35E+01	9,62E+01
ADP _{m&m} (kg Sb _{eq})	1,65E+01	8,92E-01	3,14E+00
WDP (m ³ world eq. Deprived)	5,57E+03	1,98E+03	1,92E+04
PM (Potenziale di incidenza)	1,91E-03	3,59E-04	1,36E-03
IR (kBq U ²³⁵ _{eq})	1,26E+03	3,78E+02	4,39E+03
E _{FW} (CTU _e)	1,87E+06	6,27E+05	1,30E+06
HT-nce (CTU _h)	2,21E-03	7,92E-04	1,47E-03
HT-ce (CTU _h)	6,92E-05	3,27E-05	2,97E-05
LU (-)	9,13E+04	3,84E+04	1,07E+05

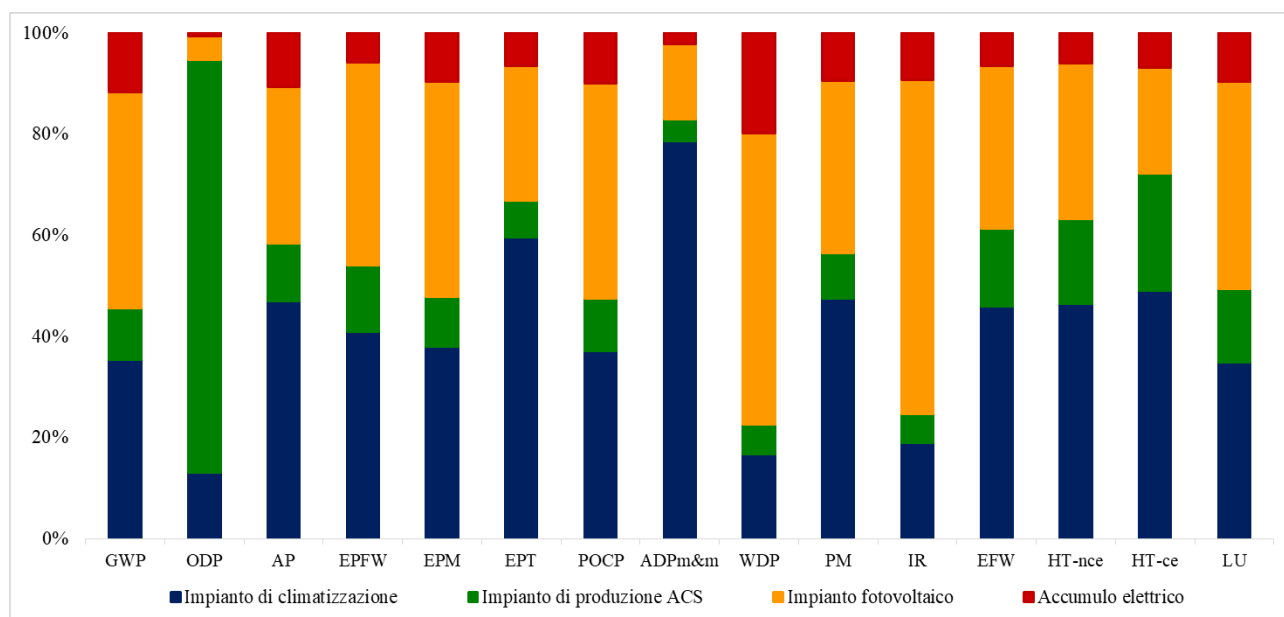


Figura 79: Modulo A: Analisi del contributo dei componenti d'impianto agli impatti ambientali – Scenario cAE

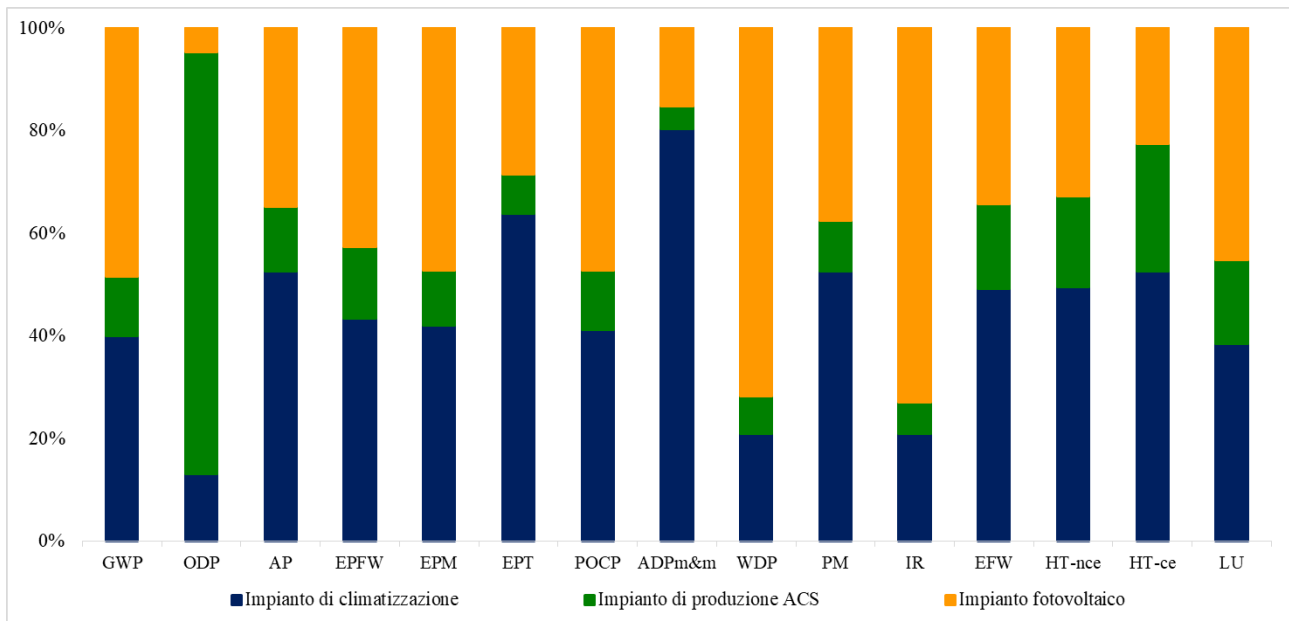


Figura 80: Modulo A: Analisi del contributo dei componenti d’impianto agli impatti ambientali – Scenario SAE

Impianto fotovoltaico

In dettaglio, il contributo agli impatti dell’impianto fotovoltaico varia da un valore minimo pari a circa il 5% sulla categoria “riduzione dello strato di ozono” in entrambi gli scenari esaminati ad un valore massimo pari al 66% sulla categoria “radiazione ionizzante” nello scenario cAE, e a circa il 70% nello scenario SAE sulle categorie “radiazione ionizzante” e “consumo della risorsa idrica”. Inoltre, l’impianto fotovoltaico è responsabile di un contributo all’impatto superiore al 40% sulle categorie “cambiamento climatico” e “eutrofizzazione delle acque marine” e “formazione di ozono fotochimico”, “uso e qualità del suolo” e “eutrofizzazione delle acque dolci”.

Un’analisi più dettagliata del contributo dei componenti ha evidenziato che il pannello fotovoltaico è responsabile del maggiore contributo agli impatti in quasi tutte le categorie investigate (Figura 81). In dettaglio, esso incide con percentuali comprese tra un valore minimo del 40% sulle categorie relative alla “tossicità umana” ad un valore massimo pari a circa il 90% sulle categorie “radiazione ionizzante”, “consumo della risorsa idrica” e “riduzione dello strato di ozono”. Inoltre, il pannello fotovoltaico contribuisce in misura significativa (maggiore del 60%) alle categorie “cambiamento climatico” (75%), “uso e qualità e suolo” (74%), “depauperamento delle risorse abiotiche - minerali e metalli” e “eutrofizzazione delle acque marine” (70%), “formazione di ozono fotochimico” (67%) e “eutrofizzazione terrestre” (64%).

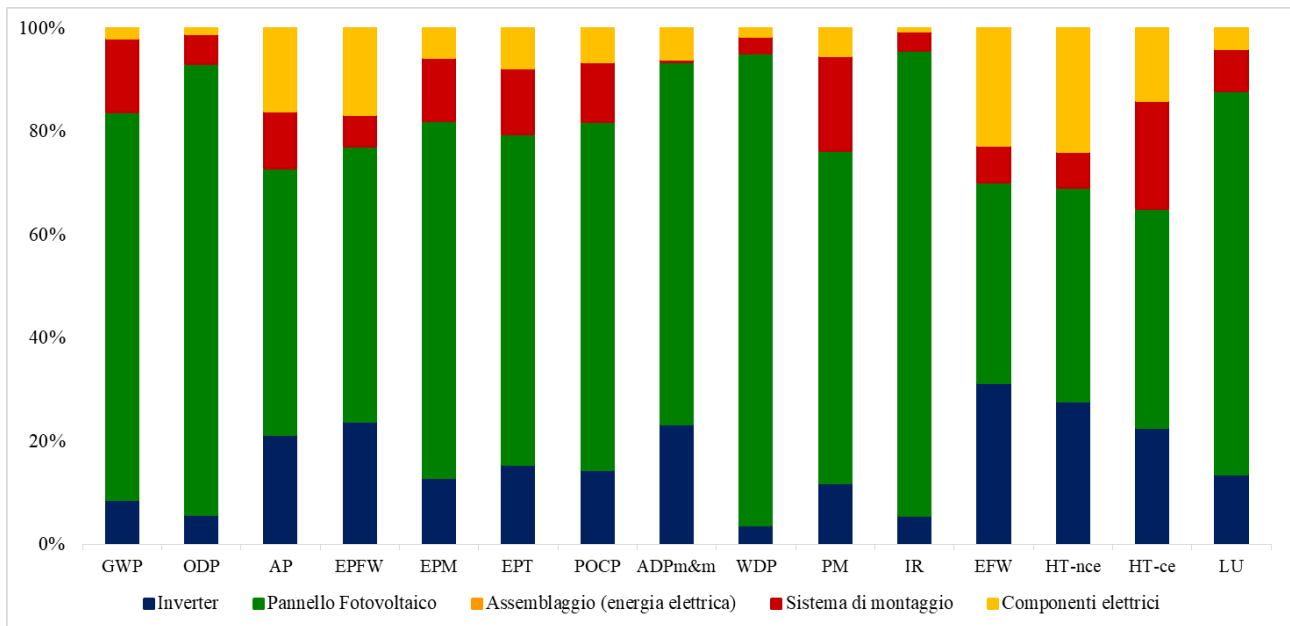
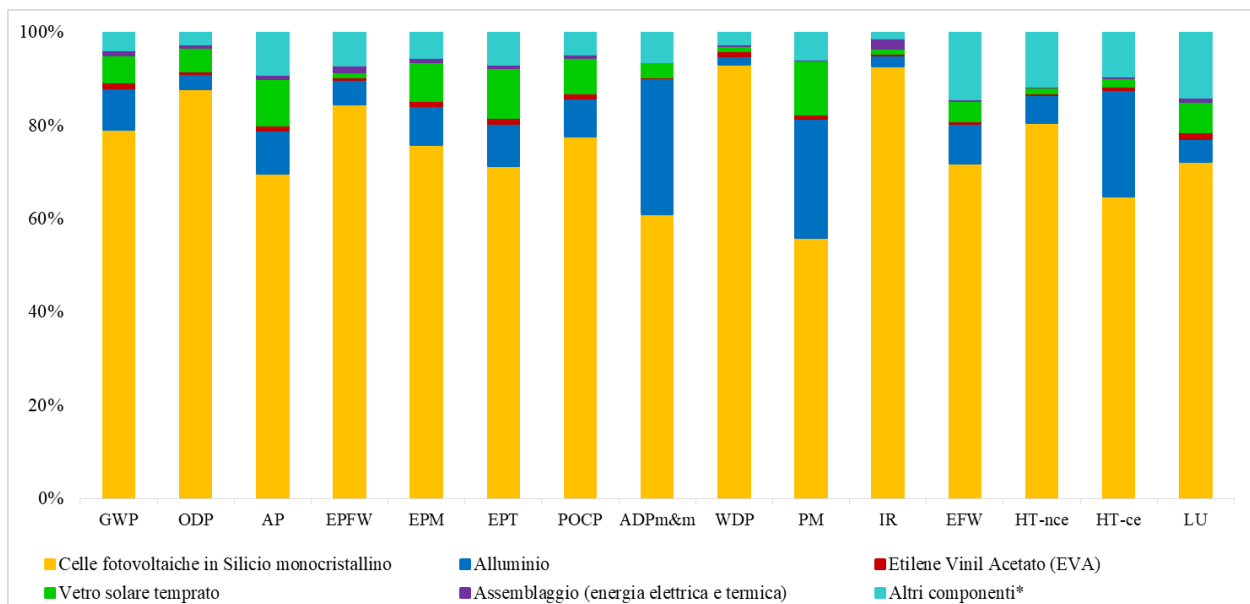


Figura 81: Modulo A: Analisi di contributo agli impatti ambientali dei componenti dell'impianto fotovoltaico

Nella Figura 82 è illustrata l'analisi dettagliata del contributo agli impatti dei pannelli fotovoltaici. Dall'analisi dei dati è emerso che le celle fotovoltaiche in silicio monocristallino sono responsabili del maggior contributo all'impatto in tutte le categorie ambientali esaminate. Segue l'alluminio con contributi significativi alle categorie "depauperamento delle risorse abiotiche - minerali e metalli" (29%), "emissione di particolato" (25%) e "tossicità umana con effetti cancerogeni" (22%).

L'inverter è responsabile di un contributo all'impatto pari al 31% sull'"ecotossicità delle acque dolci" e al 28% sulla "tossicità umana con effetti non cancerogeni". Inoltre, incide con percentuali variabili tra il 20% e il 24% sulle categorie "eutrofizzazione delle acque dolci", "tossicità umana con effetti cancerogeni", "depauperamento delle risorse abiotiche - minerali e metalli" e acidificazione. Il sistema di montaggio contribuisce per circa il 20% all'impatto sulle categorie "emissione di particolato" e "tossicità umana con effetti cancerogeni". I componenti elettrici sono responsabili di circa il 24% dell'impatto sulla "tossicità umana con effetti non cancerogeni" e sull'"ecotossicità delle acque dolci" e di circa il 17% dell'impatto sull'"acidificazione" e sull'"eutrofizzazione delle acque dolci". Infine il processo di assemblaggio presenta contributi trascurabili in tutte le categorie ambientali investigate.



*Altri componenti: etanolo, metanolo, acqua di processo, infrastrutture, ecc.

Figura 82: Modulo A: Analisi di contributo agli impatti ambientali dei componenti del pannello fotovoltaico

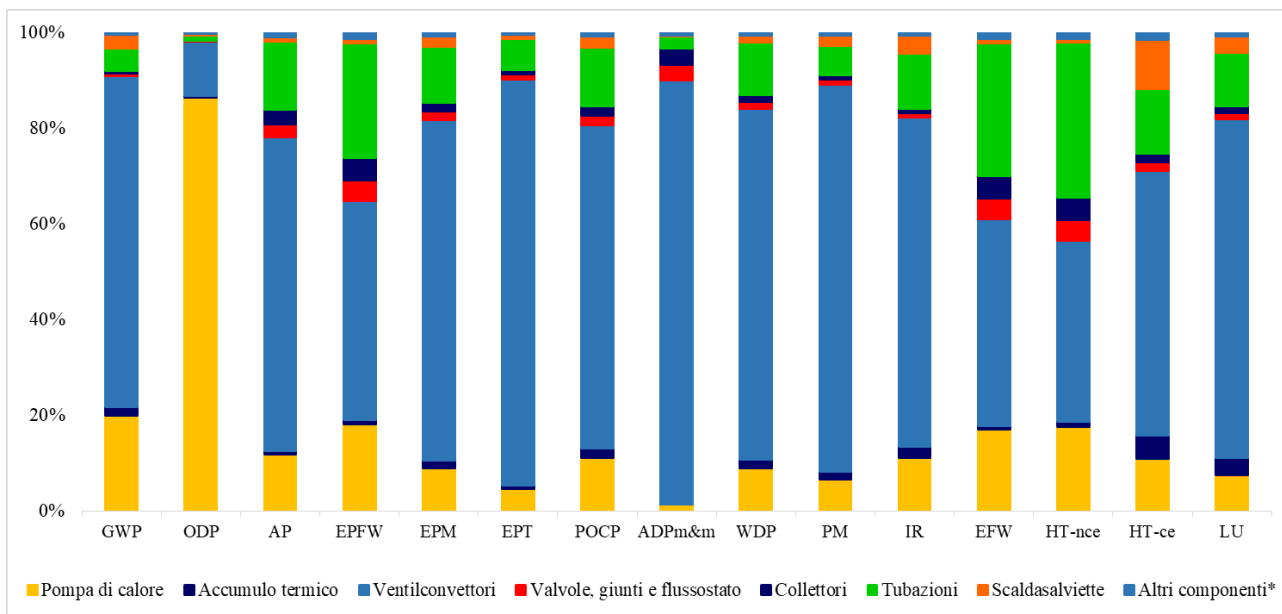
Impianto di climatizzazione

L'impianto di climatizzazione incide sugli impatti con percentuali variabili da un valore minimo pari al 13% per la categoria "riduzione dello strato di ozono" ad un valore massimo pari a circa l'80% sulla categoria "depauperamento delle risorse abiotiche - minerali e metalli" in entrambi gli scenari esaminati. Inoltre, esso incide in misura rilevante sull'"eutrofizzazione terrestre" (circa il 60%), sulla "tossicità umana con effetti cancerogeni" (49% nello scenario cAE e 53% nello scenario sAE) e sulla "emissione di particolato" (48% nello scenario cAE e 53% nello scenario sAE).

Nella Figura 83 è illustrata la distribuzione percentuale degli impatti associati ai componenti dell'impianto di climatizzazione. L'analisi del contributo dei componenti ha evidenziato che i ventilconvettori sono responsabili del maggiore contributo agli impatti in quasi tutte le categorie investigate (Figura 83). Essi incidono con percentuali comprese tra il 38% e il 91% in tutte le categorie ad eccezione della categoria "riduzione dello strato di ozono", alla quale contribuiscono per circa il 12%. Un'analisi più dettagliata ha evidenziato che i componenti responsabili del maggior contributo agli impatti sono il gruppo ventilatore e lo scambiatore di calore che rappresentano percentuali dell'impatto totale connesso ai ventilconvettori che variano da un valore minimo pari al 53% della categoria "depauperamento delle risorse abiotiche - minerali e metalli" a circa il 73% della categoria "cambiamento climatico". Inoltre, il processo produttivo di questi componenti, ed in particolare il legno utilizzato nelle infrastrutture della catena di approvvigionamento, contribuisce in misura maggiore all'impatto negativo sulla categoria "cambiamento climatico – contributo biogenico" connesso all'impianto di climatizzazione.

La pompa di calore incide sugli impatti con percentuali variabili da un valore minimo pari all'1,3% all'impatto sulla categoria "depauperamento delle risorse abiotiche - minerali e metalli" ad un valore massimo pari all'87% all'impatto sul "riduzione dello strato di ozono". Inoltre, rappresenta un contributo pari a circa il 20% sulle categorie "cambiamento climatico", "eutrofizzazione delle acque dolci", "ecotossicità delle acque dolci" e sulla "tossicità umana con effetti non cancerogeni". Un'analisi più dettagliata ha evidenziato che l'impatto sul "riduzione dello strato di ozono" è causato principalmente dal fluido refrigerante R134a (98,5%), mentre l'impatto sul "cambiamento climatico" dalle perdite (emissioni dirette) di refrigerante durante il processo produttivo della pompa di calore (70%). Il rame e l'acciaio utilizzati per il compressore, i componenti elettrici e l'involucro esterno della pompa di calore incidono con percentuali variabili da un valore minimo pari al 75% ad un valore massimo pari al 99% su tutti gli impatti ambientali ad l'eccezione delle categorie "cambiamento climatico", della "radiazione ionizzante" e del "riduzione dello strato di ozono" alle quali contribuiscono, rispettivamente, per circa il 20%, 28% e 0,7%.

Le tubazioni incidono per il 33% all'impatto sulla categoria "tossicità umana con effetti non cancerogeni", per circa il 28% sulla categoria "ecotossicità delle acque dolci" e per il 24% sulla categoria "eutrofizzazione delle acque dolci". Gli scaldi salviette incidono per il 10% sulla categoria "tossicità umana con effetti cancerogeni". Le valvole, i giunti e i flussostati incidono per circa il 4% sulle categorie "ecotossicità delle acque dolci", "eutrofizzazione delle acque dolci" e "tossicità umana con effetti non cancerogeni". I collettori e i componenti raggruppati nella categoria "altri componenti" presentano impatti trascurabili in tutte le categorie ambientali investigate.



*Altri componenti: circolatori, vaso di espansione, sistema di alimentazione, pozzetti per termometri e manometri, filtri.

Figura 83: Modulo A: Analisi di contributo agli impatti ambientali dei componenti dell'impianto di climatizzazione

Impianto di produzione dell'acqua calda sanitaria

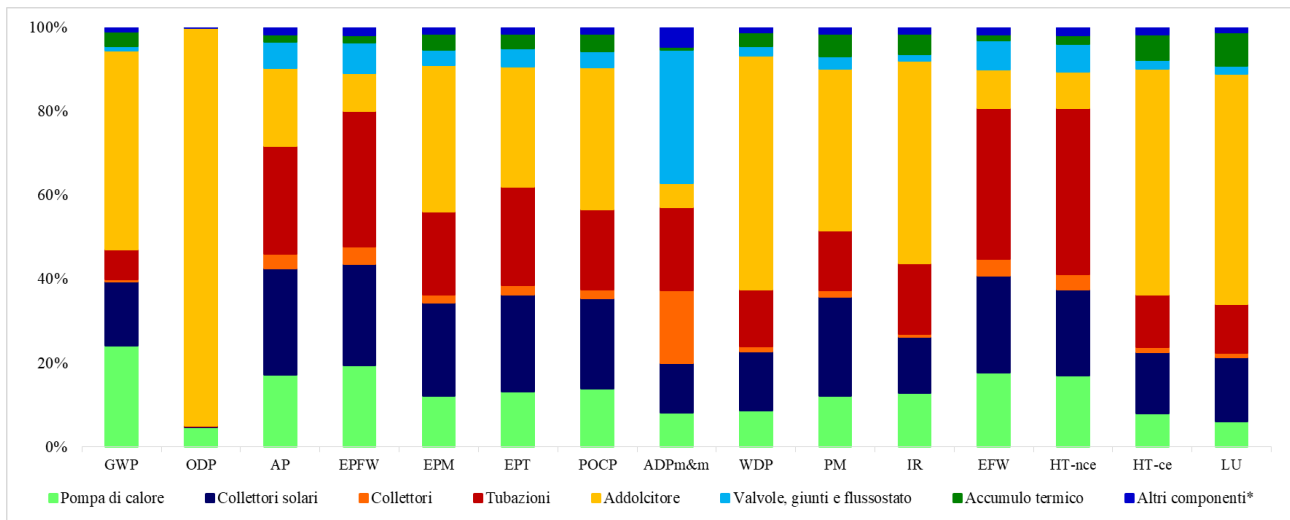
L'impianto di produzione dell'acqua calda sanitaria incide per circa l'80% sulla categoria "riduzione dello strato di ozono", per circa il 24% sulla "tossicità umana con effetti cancerogeni" ed è responsabile di circa il 14% dell'impatto sulla categoria "ecotossicità delle acque dolci" e per circa il 17% sulla categoria "tossicità umana con effetti non cancerogeni" in entrambi gli scenari esaminati. Nello scenario cAE, l'accumulo elettrico incide per circa il 20% sulla categoria "consumo della risorsa idrica" e per circa il 10% sulle categorie "cambiamento climatico", "acidificazione", "eutrofizzazione delle acque marine", "formazione di ozono fotochimico", "emissione di particolato", "radiazione ionizzante" e "uso e qualità del suolo".

Nella Figura 84 è illustrata la distribuzione percentuale degli impatti associati ai componenti dell'impianto di produzione dell'acqua calda sanitaria.

Nell'impianto di produzione dell'acqua calda sanitaria, la pompa di calore incide sugli impatti con percentuali variabili da un valore minimo pari al 5% all'impatto sulla categoria "depauperamento delle risorse abiotiche - minerali e metalli" ad un valore massimo pari al 24% all'impatto sul "cambiamento climatico". L'addolcitore incide sugli impatti con percentuali variabili da un valore minimo del 6% all'impatto sulla categoria "depauperamento delle risorse abiotiche - minerali e metalli" ad un valore massimo pari al 95% sulla categoria "riduzione dello strato di ozono". Con riferimento al "riduzione dello strato di ozono", il componente responsabile del maggior contributo all'impatto è la resina anionica (99,8%).

Le valvole, i giunti e i flussostati incidono per circa il 32% all'impatto sul "depauperamento delle risorse abiotiche - minerali e metalli". Le tubazioni incidono sugli impatti con percentuali variabili dal 7% sul "cambiamento climatico" a circa il 40% sulle categorie "ecotossicità delle acque dolci" e "tossicità umana con effetti non cancerogeni", ad eccezione della categoria "riduzione dello strato di ozono" alla quale contribuiscono in misura trascurabile (0,1%). L'impatto delle tubazioni è causato in misura maggiore dalle parti in rame. I collettori incidono per circa il 17% all'impatto sul "depauperamento delle risorse abiotiche - minerali e metalli", mentre l'accumulo termico è responsabile di circa l'8% dell'impatto sulla categoria "uso e qualità del suolo".

I componenti raggruppati nella categoria "altri componenti" presentano impatti trascurabili in tutte le categorie ambientali investigate.



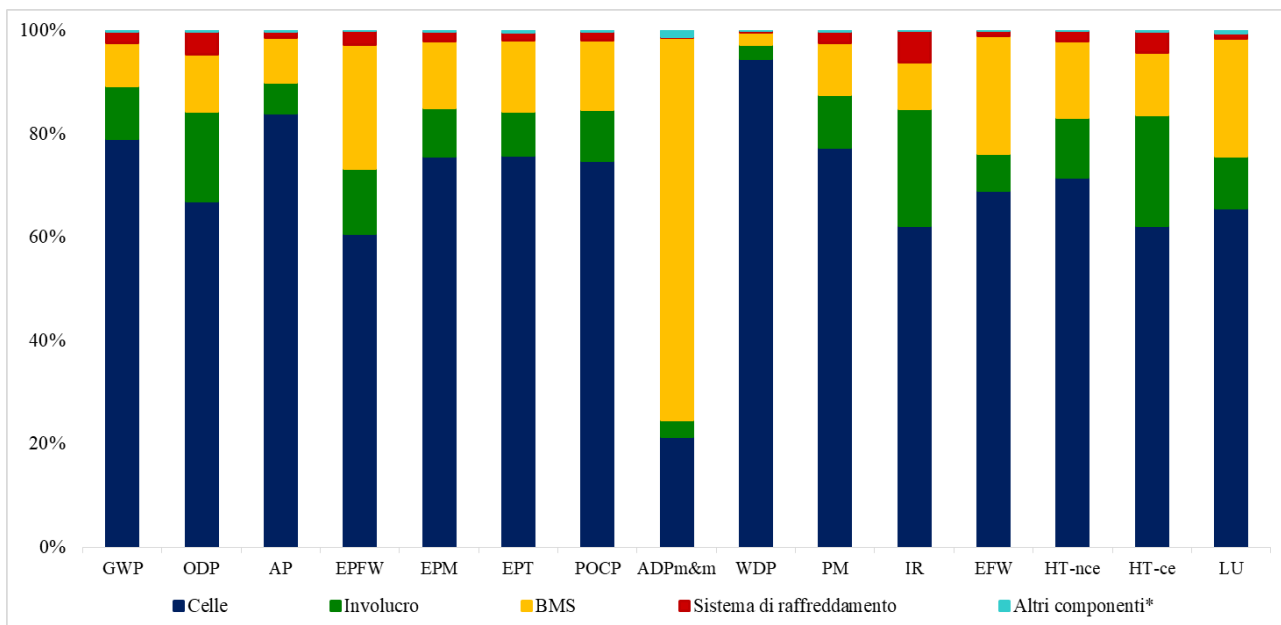
*Altri componenti: stazione solare, vaso di espansione, circolatori, pozzetti per termometri e manometri, filtri.

Figura 84: Modulo A: Analisi di contributo agli impatti ambientali dei componenti dell'impianto di produzione dell'acqua calda sanitaria

Accumulo elettrico

Nella Figura 85 è illustrata la distribuzione percentuale degli impatti associati ai componenti dell'accumulo elettrico. L'analisi del contributo dei componenti ha evidenziato che le celle sono responsabili del maggiore contributo agli impatti in quasi tutte le categorie investigate. Esse incidono con percentuali comprese tra il 61% e il 95% in tutte le categorie ambientali investigate ad eccezione della categoria "depauperamento delle risorse abiotiche - minerali e metalli", alla quale contribuisce per circa il 20%. L'involucro della batteria incide per circa il 20% all'impatto sulle categorie "tossicità umana con effetti cancerogeni" e "radiazione ionizzante" e per il 17% all'impatto sul "riduzione dello strato di ozono". Il BMS è responsabile del 74% dell'impatto sul "depauperamento delle risorse abiotiche - minerali e metalli", mentre il sistema di raffreddamento contribuisce per meno del 6% in tutte le categorie di impatto ambientale esaminate. L'energia consumata per l'assemblaggio dei componenti della batteria e le infrastrutture hanno un impatto trascurabile (minore dell'1,2%) in tutte le categorie ambientali esaminate.

Con riferimento all'impatto negativo sulla categoria "cambiamento climatico – contributo biogenico", esso è dovuto principalmente alle catene produttive del BMS e delle celle, ed in particolare al legno utilizzato nelle infrastrutture della catena di approvvigionamento dei componenti e dell'energia elettrica utilizzati nel processo produttivo.



*Altri componenti: assemblaggio (energia elettrica e termica) e infrastrutture.

Figura 85: Modulo A: Analisi di contributo agli impatti ambientali dei componenti dell'accumulo elettrico

5.4.2 Impatti energetico – ambientali – Modulo B

Modulo B4 – Sostituzione dei componenti di involucro

Nella Tabella 51 sono sintetizzati i valori di energia incorporata connessi agli interventi di sostituzione pianificati durante il ciclo di vita dell'edificio degli elementi di involucro di entrambi gli scenari investigati. I valori di EE includono l'EE relativa alle fasi di produzione e di trattamento di fine vita degli elementi sostituiti modellizzati in accordo agli inventari descritti ai Paragrafi 1.3.1 e 1.3.3. Dall'analisi è emerso che nello scenario XPS il consumo di energia primaria connesso agli interventi di sostituzione è pari a $8,30E+05$ MJ di cui il 96,4% costituito da energia primaria non rinnovabile. Nello scenario FC, l'energia incorporata negli interventi di sostituzione è pari a $4,89E+05$ MJ di energia primaria di cui il 92,4% costituito da energia primaria non rinnovabile. L'impiego del materiale isolante in fibre di cellulosa consente di ridurre l'EE relativa al modulo B4 nello scenario FC del 41% rispetto allo scenario XPS.

Tabella 51: Modulo B4: Energia incorporata nei componenti di involucro – Scenario XPS e Scenario FC

Categoria	Scenario XPS	Scenario FC
EE (MJ)	$8,30E+05$	$4,89E+05$
EE _{nr} (MJ)	$8,00E+05$	$4,52E+05$
EE _r (MJ)	$2,98E+04$	$3,72E+04$

In entrambi gli scenari esaminati, l'EE connessa ai trattamenti di fine vita, modellizzati secondo gli scenari descritti al Paragrafo 1.3.3, rappresenta circa il 3% dell'EE complessiva degli interventi di sostituzione dei componenti di involucro.

Nella Figura 86 e Figura 87 è illustrata, rispettivamente, l'incidenza dei componenti d'involucro sostituiti sull'EE negli scenari XPS e FC.

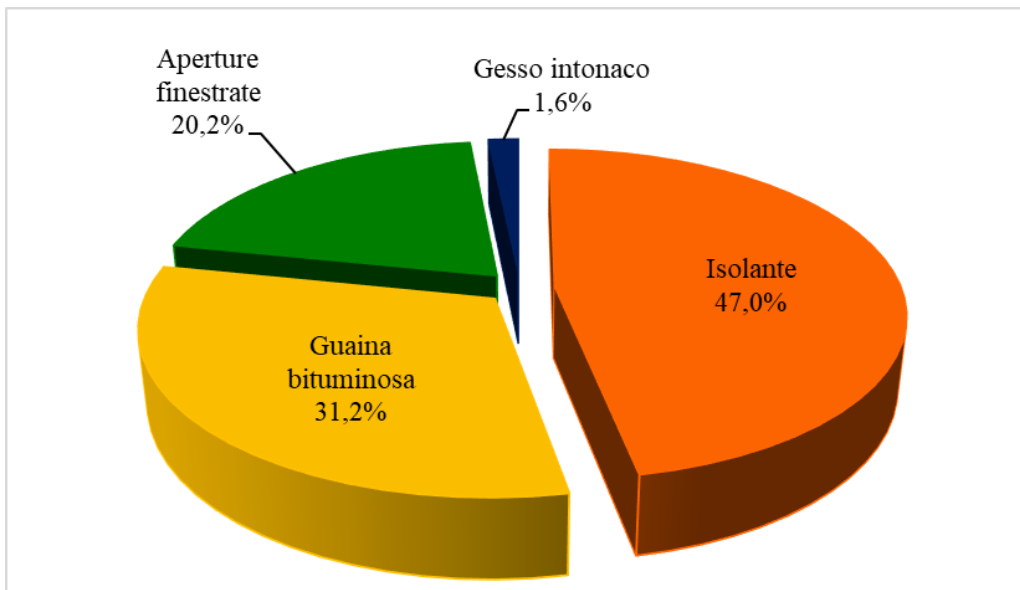


Figura 86: Modulo B4: Analisi di contributo dei componenti di involucro sostituiti sull'EE – Scenario XPS

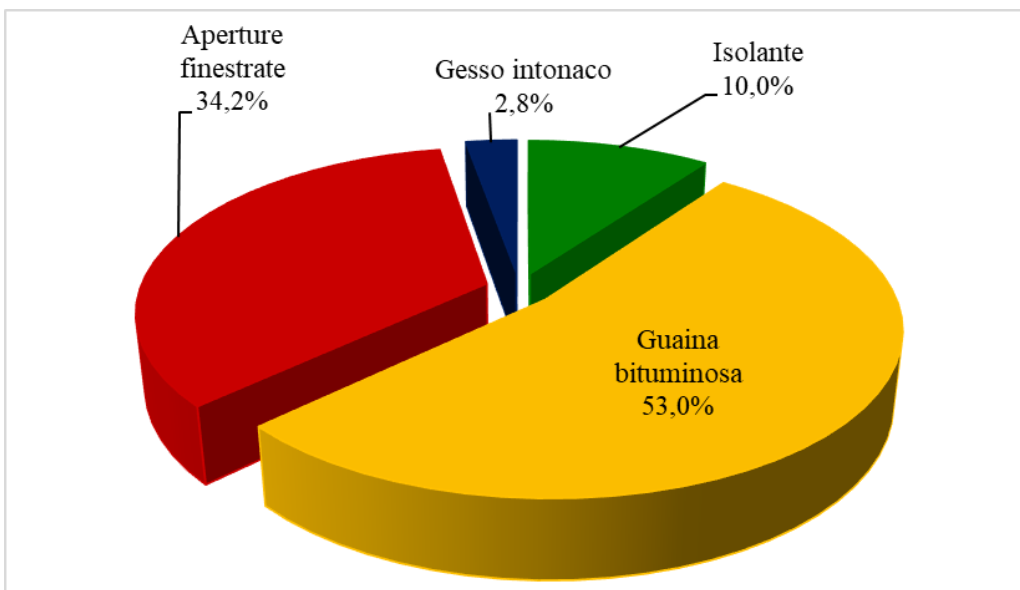


Figura 87: Modulo B4: Analisi di contributo dei componenti di involucro sostituiti sull'EE – Scenario FC

Dall'analisi è emerso che nello scenario XPS l'intervento di sostituzione del materiale isolante contribuisce al 47% del consumo di energia primaria complessivo degli interventi di sostituzione degli elementi di involucro, mentre nello scenario FC la sostituzione del materiale isolante è responsabile del 10% dell'EE connessa agli interventi di sostituzione degli elementi di involucro. La sostituzione della guaina bituminosa incide sull'EE per il 31,2% nello scenario XPS e per il 53% nello scenario FC. Le aperture finestrate sono responsabili di circa il 20% dell'EE nello scenario XPS e di circa il 34% nello scenario FC. La sostituzione del gesso intonaco presenta contributi trascurabili in entrambi gli scenari esaminati.

Nella Tabella 52 sono sintetizzati gli impatti ambientali connessi agli interventi di sostituzione degli elementi di involucro per entrambi gli scenari esaminati e le variazioni percentuali degli impatti connessi allo scenario FC rispetto a quelli dello scenario XPS. I valori presentati includono gli impatti connessi alla fase di produzione e al trattamento di fine vita degli elementi sostituiti.

Dall'analisi dei dati emerge che la fase di sostituzione degli elementi dell'involucro edilizio esaminati nello scenario FC presenta prestazioni ambientali migliori in quasi tutte le categorie di impatto esaminate ad eccezione delle categorie "cambiamento climatico – contributo biogenico", "cambiamento climatico – contributo dell'uso del suolo e del cambiamento dell'uso del suolo", "depauperamento delle risorse abiotiche - minerali e metalli" e "uso e qualità del suolo". Come emerso dalle analisi degli impatti relativi al modulo A, in queste categorie ambientali il materiale isolante realizzato in fibre di cellulosa causa un impatto più elevato rispetto a quello causato dal materiale isolante realizzato in polistirene espanso estruso. I maggiori benefici ambientali connessi all'uso dell'isolante in fibre di cellulosa in sostituzione del polistirene espanso estruso si hanno in corrispondenza delle seguenti categorie: "consumo della risorsa idrica" in cui si ottiene una riduzione dell'impatto del 67,2%, "formazione di ozono fotochimico" con una riduzione del 46,8%, "cambiamento climatico" e "cambiamento climatico – contributo fossile", in cui l'impatto si riduce, rispettivamente, del 57,7% e del 56,5% e "acidificazione" in cui si registra una riduzione dell'impatto pari al 23%.

Tabella 52: Modulo B4: Impatti ambientali componenti di involucro – Scenario XPS e Scenario FC

Categoria di impatto	Scenario XPS	Scenario FC	(Scenario FC-Scenario XPS)/Scenario XPS
GWP (kg CO _{2eq})	4,66E+04	1,97E+04	-57,70%
GWP _f (kg CO _{2eq})	4,64E+04	2,01E+04	-56,54%
GWP _b (kg CO _{2eq})	1,61E+02	-4,97E+02	-407,95%
GWP _{LULUC} (kg CO _{2eq})	4,42E+01	4,57E+01	3,29%
ODP (kg CFC-11 _{eq})	4,82E-03	4,68E-03	-2,99%
AP (mol H ⁺ _{eq})	1,94E+02	1,49E+02	-23,40%
EP _{FW} (kg PO _{4eq})	8,10E+00	7,14E+00	-11,93%
EP _M (kg N _{eq})	4,33E+01	3,62E+01	-16,40%
EP _T (mol N _{eq})	3,44E+02	2,71E+02	-21,23%
POCP (kg NMVOC _{eq})	1,65E+02	8,76E+01	-46,84%
ADP _{m&m} (kg Sb _{eq})	3,52E-01	6,17E-01	75,41%
WDP (m ³ world eq. Deprived)	1,48E+04	4,86E+03	-67,22%
PM (Potenziale di incidenza)	1,82E-03	1,50E-03	-17,85%
IR (kBq U ²³⁵ _{eq})	3,13E+03	2,70E+03	-13,73%
E _{FW} (CTUe)	8,25E+05	8,09E+05	-1,88%
HT-nce (CTU _h)	4,54E-04	4,39E-04	-3,36%
HT-ce (CTU _h)	2,33E-05	2,17E-05	-6,80%
LU (-)	1,19E+05	1,95E+05	63,80%

Nella Tabella 53 e Tabella 54 è riportato il contributo agli impatti della fase di sostituzione degli elementi di involucro, rispettivamente negli scenari XPS e FC. Inoltre per un'analisi più immediata, il contributo agli impatti di ogni componente d'involucro sostituito è illustrato nei grafici riportati in Figura 88 e Figura 89, rispettivamente, per gli scenari XPS e FC.

Dall'analisi dei dati emerge che, nello scenario XPS, la sostituzione del materiale isolante realizzato in polistirene espanso estruso contribuisce agli impatti ambientali con percentuale variabili da un valore minimo pari al 4% sulla categoria "depauperamento delle risorse abiotiche - minerali e metalli" ad un valore massimo pari a circa il 75% sulla categoria "consumo della risorsa idrica". Nello scenario FC, la sostituzione del materiale isolante realizzato in fibre di cellulosa contribuisce agli impatti ambientali con percentuale variabili da un valore minimo pari a circa il 5% sulla categoria "riduzione dello strato di ozono" ad un valore massimo pari a circa il 50% sulla categoria "uso e qualità del suolo. La sostituzione della guaina bituminosa incide in misura significativa sulle categorie "riduzione dello strato di ozono" (scenario XPS 73%, scenario FC 75%) e "radiazione ionizzante" (scenario XPS 52%, scenario FC 60%). Le aperture finestrate incidono con percentuali variabili da un valore minimo del 15% sulla categoria "riduzione dello strato di ozono" ad un valore massimo

pari a circa il 70% sulla categoria “tossicità umana con effetti cancerogeni”, in entrambi gli scenari esaminati. L’impatto negativo sulla categoria “cambiamento climatico – contributo biogenico” deriva dal processo produttivo del telaio in alluminio. Il contributo agli impatti dell’intervento di sostituzione del gesso intonaco varia da un valore minimo pari a circa lo 0,5% sulla categoria “eutrofizzazione delle acque dolci” ad un valore massimo superiore a circa il 20% sulla categoria “ecotossicità delle acque dolci”, in entrambi gli scenari esaminati.

Tabella 53: Modulo B4: Impatti ambientali componenti di involucro – Scenario XPS

Categoria	Isolante	Guaina bituminosa	Aperture finestrate	Gesso intonaco
GWP (kg CO _{2eq})	2,86E+04	4,62E+03	1,29E+04	4,83E+02
GWP _f (kg CO _{2eq})	2,84E+04	4,59E+03	1,29E+04	4,82E+02
GWP _b (kg CO _{2eq})	1,89E+02	2,04E+01	-4,95E+01	1,29E+00
GWP _{LULUC} (kg CO _{2eq})	3,18E+00	3,85E+00	3,71E+01	1,23E-01
ODP (kg CFC-11 _{eq})	3,74E-04	3,52E-03	7,47E-04	1,85E-04
AP (mol H ⁺ _{eq})	6,60E+01	3,68E+01	8,40E+01	7,08E+00
EP _{FW} (kg PO _{4eq})	1,91E+00	1,81E+00	4,35E+00	4,14E-02
EP _M (kg N _{eq})	1,10E+01	1,57E+01	1,41E+01	2,55E+00
EP _T (mol N _{eq})	1,16E+02	5,24E+01	1,44E+02	3,24E+01
POCP (kg NMVOC _{eq})	8,95E+01	2,57E+01	4,19E+01	7,78E+00
ADP _{m&m} (kg Sb _{eq})	1,41E-02	1,24E-01	2,09E-01	4,26E-03
WDP (m ³ world eq. Deprived)	1,11E+04	5,26E+02	3,16E+03	4,56E+01
PM (Potenziale di incidenza)	5,83E-04	1,82E-04	9,21E-04	1,38E-04
IR (kBq U ²³⁵ _{eq})	7,19E+02	1,63E+03	7,02E+02	7,47E+01
E _{FW} (CTUe)	1,09E+05	1,59E+05	3,86E+05	1,71E+05
HT-nce (CTU _h)	7,49E-05	8,55E-05	2,88E-04	5,30E-06
HT-ce (CTU _h)	4,04E-06	2,68E-06	1,64E-05	1,92E-07
LU (-)	1,99E+04	3,97E+04	3,88E+04	2,09E+04

Tabella 54: Modulo B4: Impatti ambientali componenti di involucro – Scenario FC

Categoria	Isolante	Guaina bituminosa	Aperture finestrate	Gesso intonaco
GWP (kg CO _{2eq})	1,72E+03	4,62E+03	1,29E+04	4,84E+02
GWP _f (kg CO _{2eq})	2,19E+03	4,60E+03	1,29E+04	4,83E+02
GWP _b (kg CO _{2eq})	-4,69E+02	2,04E+01	-4,95E+01	1,30E+00
GWP _{LULUC} (kg CO _{2eq})	4,63E+00	3,85E+00	3,71E+01	1,24E-01
ODP (kg CFC-11 _{eq})	2,24E-04	3,52E-03	7,47E-04	1,86E-04
AP (mol H ⁺ _{eq})	2,06E+01	3,68E+01	8,40E+01	7,10E+00
EP _{FW} (kg PO _{4eq})	9,37E-01	1,81E+00	4,35E+00	4,15E-02
EP _M (kg N _{eq})	3,87E+00	1,57E+01	1,41E+01	2,56E+00
EP _T (mol N _{eq})	4,25E+01	5,25E+01	1,44E+02	3,25E+01
POCP (kg NMVOC _{eq})	1,22E+01	2,57E+01	4,19E+01	7,80E+00
ADP _{m&m} (kg Sb _{eq})	2,79E-01	1,24E-01	2,09E-01	4,27E-03

WDP (m ³ world eq. Deprived)	1,12E+03	5,27E+02	3,16E+03	4,58E+01
PM (Potenziale di incidenza)	2,57E-04	1,82E-04	9,21E-04	1,38E-04
IR (kBq U ²³⁵ _{eq})	2,87E+02	1,63E+03	7,02E+02	7,50E+01
E _{FW} (CTU _e)	9,26E+04	1,59E+05	3,86E+05	1,72E+05
HT-nce (CTU _h)	5,95E-05	8,56E-05	2,88E-04	5,31E-06
HT-ce (CTU _h)	2,45E-06	2,68E-06	1,64E-05	1,92E-07
LU (-)	9,58E+04	3,97E+04	3,88E+04	2,09E+04

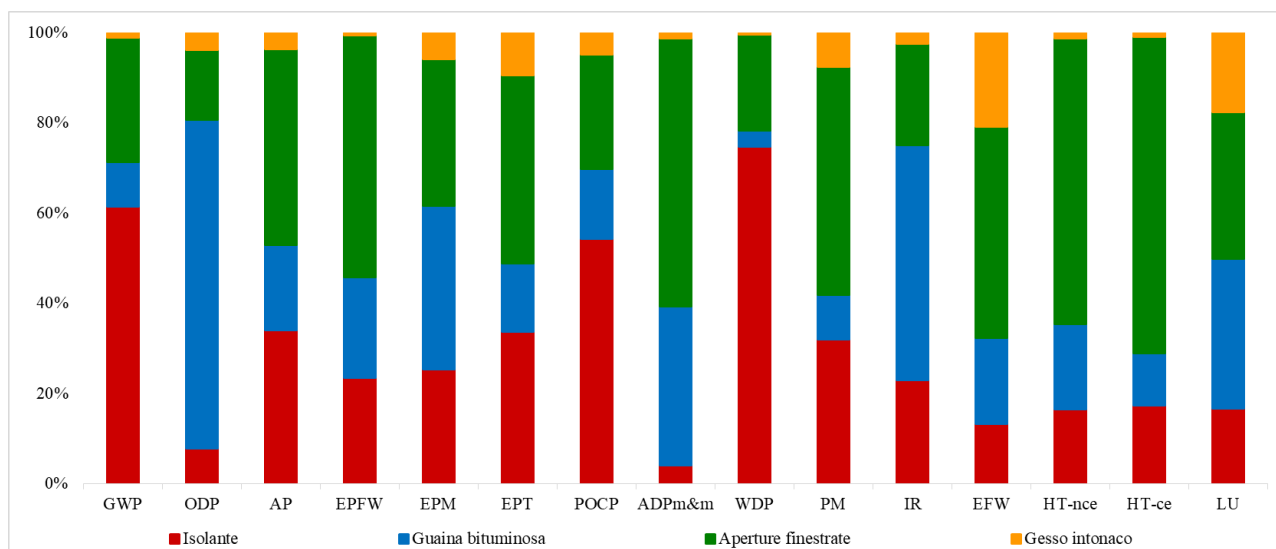


Figura 88: Analisi di contributo dei componenti di involucro sostituiti sugli impatti ambientali – Scenario XPS

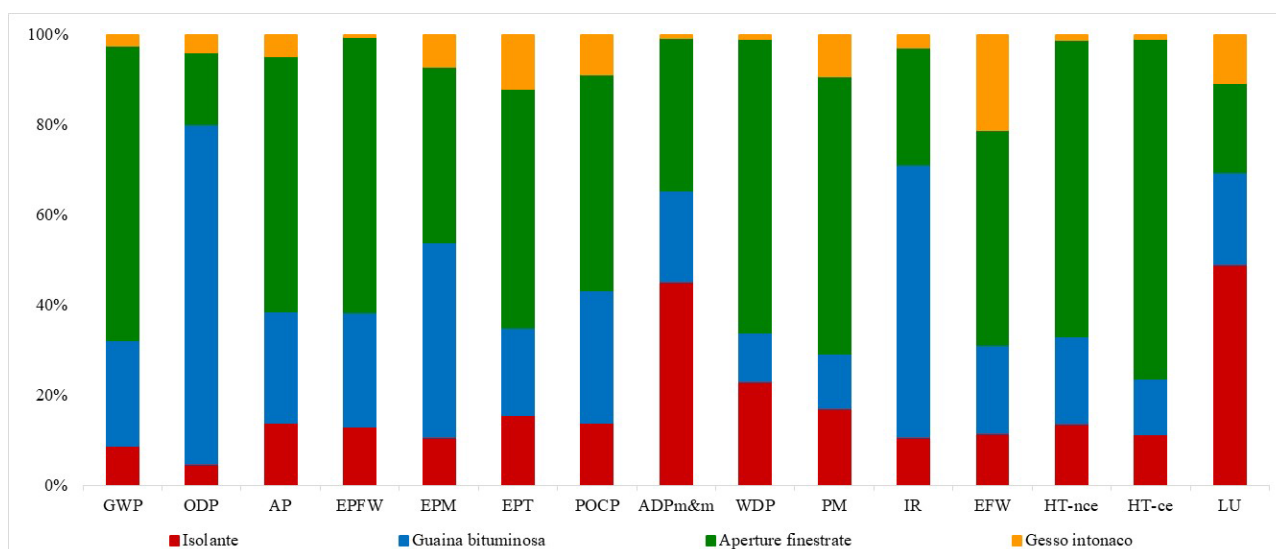


Figura 89: Analisi di contributo dei componenti di involucro sostituiti sugli impatti ambientali – Scenario FC

Nella Tabella 55 e Tabella 56 è riportato il contributo in valore assoluto agli impatti energetico – ambientali ripartito per fase di produzione e trattamento di fine vita di ogni componente sostituito, rispettivamente per gli scenari XPS e FC. Dall’analisi dei dati è emerso che i trattamenti di fine vita modellizzati secondo gli scenari descritti al Paragrafo 1.3.3 hanno un contributo trascurabile in quasi tutte le categorie ambientali in entrambi gli scenari esaminati, con le seguenti eccezioni:

- “cambiamento climatico” sul quale il trattamento di fine vita del polistirene espanso estruso incide per circa il 25%;
- “eutrofizzazione marina” alla quale il trattamento di fine vita della guaina bituminosa contribuisce per circa il 19% nello scenario XPS e per circa il 30% nello scenario FC;

- “uso e qualità del suolo” sul quale il trattamento di fine vita del gesso intonaco incide per circa il 19% nello scenario XPS e per circa il 12% nello scenario FC.
- Per la trattazione dettagliata dei trattamenti di fine vita dei componenti di involucro si rimanda al Paragrafo 1.4.3.

Tabella 55: Modulo B4: Analisi di contributo dei componenti di involucro sostituiti sugli impatti ambientali per fase di produzione e fase di trattamento di fine vita – Scenario XPS

Categoria di impatto	Isolante XPS		Guaina bituminosa		Aperture finestrate		Gesso intonaco	
	Produzione	Trattamento di fine vita	Produzione	Trattamento di fine vita	Produzione	Trattamento di fine vita	Produzione	Trattamento di fine vita
GWP (kg CO _{2eq})	1,68E+04	1,18E+04	3,68E+03	9,36E+02	1,28E+04	7,98E+01	1,63E+02	3,20E+02
GWP _f (kg CO _{2eq})	1,66E+04	1,18E+04	3,66E+03	9,35E+02	1,28E+04	7,63E+01	1,63E+02	3,19E+02
GWP _b (kg CO _{2eq})	1,89E+02	5,23E-01	1,98E+01	5,93E-01	-5,30E+01	3,56E+00	2,65E-01	1,03E+00
GWP _{LULUC} (kg CO _{2eq})	3,16E+00	1,38E-02	3,81E+00	3,41E-02	3,71E+01	5,89E-03	6,08E-02	6,25E-02
ODP (kg CFC-11 _{eq})	3,64E-04	9,13E-06	3,50E-03	2,06E-05	7,41E-04	5,63E-06	2,99E-05	1,55E-04
AP (mol H ⁺ _{eq})	6,46E+01	1,42E+00	3,58E+01	1,01E+00	8,39E+01	1,43E-01	3,97E+00	3,11E+00
EP _{FW} (kg PO _{4eq})	1,90E+00	1,03E-02	1,79E+00	1,24E-02	4,35E+00	2,64E-03	1,90E-02	2,24E-02
EP _M (kg N _{eq})	1,03E+01	7,42E-01	4,70E+00	1,10E+01	1,40E+01	5,16E-02	1,38E+00	1,17E+00
EP _T (mol N _{eq})	1,09E+02	7,30E+00	5,03E+01	2,16E+00	1,43E+02	5,63E-01	1,96E+01	1,28E+01
POCP (kg NMVOC _{eq})	8,77E+01	1,75E+00	2,48E+01	8,46E-01	4,17E+01	1,66E-01	4,10E+00	3,67E+00
ADP _{m&m} (kg Sb _{eq})	1,37E-02	3,99E-04	1,23E-01	7,18E-04	2,09E-01	3,06E-04	1,44E-03	2,82E-03
WDP (m ³ _{world eq. Deprived})	1,11E+04	2,32E+01	4,59E+02	6,74E+01	3,16E+03	2,57E+00	1,45E+01	3,12E+01
PM (Potenziale di incidenza)	5,77E-04	6,19E-06	1,70E-04	1,12E-05	9,17E-04	3,57E-06	7,18E-05	6,63E-05
IR (kBq U ²³⁵ _{eq})	7,16E+02	2,59E+00	1,62E+03	8,43E+00	7,01E+02	1,54E+00	2,42E+01	5,05E+01
E _{FW} (CTUe)	9,90E+04	9,78E+03	1,56E+05	2,13E+03	3,86E+05	8,21E+02	1,65E+05	5,66E+03
HT-nce (CTU _h)	5,41E-05	2,08E-05	8,46E-05	9,09E-07	2,88E-04	4,49E-07	2,20E-06	3,09E-06
HT-ce (CTU _h)	3,55E-06	4,95E-07	2,64E-06	4,45E-08	1,64E-05	3,26E-08	7,25E-08	1,19E-07
LU (-)	1,96E+04	2,21E+02	3,60E+04	3,71E+03	3,82E+04	6,45E+02	-1,77E+03	2,26E+04

Tabella 56: Modulo B4: Analisi di contributo dei componenti di involucro sostituiti sugli impatti ambientali per fase di produzione e fase di trattamento di fine vita – Scenario FC

Categoria di impatto	Isolante FC		Guaina bituminosa		Aperture finestrate		Gesso intonaco	
	Produzione	Trattamento di fine vita	Produzione	Trattamento di fine vita	Produzione	Trattamento di fine vita	Produzione	Trattamento di fine vita
GWP (kg CO _{2eq})	1,70E+03	2,29E+01	3,69E+03	9,37E+02	1,28E+04	7,98E+01	1,64E+02	3,21E+02
GWP _f (kg CO _{2eq})	2,16E+03	2,28E+01	3,66E+03	9,37E+02	1,28E+04	7,63E+01	1,63E+02	3,19E+02
GWP _b (kg CO _{2eq})	-4,69E+02	7,36E-02	1,98E+01	5,93E-01	-5,30E+01	3,56E+00	2,66E-01	1,03E+00
GWP _{LULUC} (kg CO _{2eq})	4,62E+00	4,47E-03	3,82E+00	3,41E-02	3,71E+01	5,89E-03	6,09E-02	6,27E-02
ODP (kg CFC-11 _{eq})	2,13E-04	1,11E-05	3,50E-03	2,06E-05	7,41E-04	5,63E-06	2,99E-05	1,56E-04
AP (mol H ⁺ _{eq})	2,04E+01	2,23E-01	3,58E+01	1,01E+00	8,39E+01	1,43E-01	3,98E+00	3,12E+00
EP _{FW} (kg PO _{4eq})	9,36E-01	1,60E-03	1,80E+00	1,25E-02	4,35E+00	2,64E-03	1,90E-02	2,25E-02
EP _M (kg N _{eq})	3,78E+00	8,38E-02	4,71E+00	1,10E+01	1,40E+01	5,16E-02	1,39E+00	1,17E+00
EP _T (mol N _{eq})	4,16E+01	9,20E-01	5,03E+01	2,16E+00	1,43E+02	5,63E-01	1,96E+01	1,29E+01
POCP (kg NMVOC _{eq})	1,20E+01	2,63E-01	2,49E+01	8,47E-01	4,17E+01	1,66E-01	4,12E+00	3,69E+00
ADP _{m&m} (kg Sb _{eq})	2,79E-01	2,02E-04	1,23E-01	7,19E-04	2,09E-01	3,06E-04	1,45E-03	2,83E-03
WDP (m ³ _{world eq. Deprived})	1,12E+03	2,23E+00	4,60E+02	6,74E+01	3,16E+03	2,57E+00	1,45E+01	3,12E+01
PM (Potenz. Incid.)	2,52E-04	4,75E-06	1,71E-04	1,12E-05	9,17E-04	3,57E-06	7,20E-05	6,65E-05
IR (kBq U ²³⁵ _{eq})	2,84E+02	3,62E+00	1,62E+03	8,44E+00	7,01E+02	1,54E+00	2,43E+01	5,07E+01
E _{FW} (CTU _e)	9,22E+04	4,06E+02	1,57E+05	2,13E+03	3,86E+05	8,21E+02	1,66E+05	5,68E+03
HT-nce (CTU _h)	5,93E-05	2,22E-07	8,47E-05	9,10E-07	2,88E-04	4,49E-07	2,21E-06	3,10E-06
HT-ce (CTU _h)	2,44E-06	8,54E-09	2,64E-06	4,46E-08	1,64E-05	3,26E-08	7,27E-08	1,20E-07
LU (-)	9,42E+04	1,62E+03	3,60E+04	3,72E+03	3,82E+04	6,45E+02	-1,77E+03	2,27E+04

Modulo B4 – Sostituzione dei componenti d’impianto

Nella Tabella 57 e Tabella 58 sono sintetizzati, rispettivamente, i valori di energia incorporata e gli impatti ambientali connessi agli interventi di sostituzione degli elementi di impianto per entrambi gli scenari esaminati e le variazioni percentuali degli impatti connessi allo scenario cAE rispetto a quelli dello scenario sAE. I valori presentati in Tabella 57 e Tabella 58 includono il contributo connesso alla fase di produzione e al trattamento di fine vita degli elementi sostituiti. Gli interventi di sostituzione pianificati negli scenari di impianto esaminati differiscono solo per quelli relativi all’accumulo elettrico non previsti nello scenario sAE. Pertanto, la variazione degli impatti energetico – ambientale nei due scenari esaminati è dovuta unicamente alla diversa configurazione impiantistica.

Tabella 57: Modulo B4: Energia incorporata componenti d’impianto– Scenario cAE e Scenario sAE

Categoria	Scenario cAE	Scenario sAE	(Scenario cAE-Scenario sAE)/Scenario sAE
EE (MJ)	1,30E+06	1,10E+06	18,5%
EE _{nr} (MJ)	1,17E+06	9,85E+05	18,8%
EE _r (MJ)	1,32E+05	1,14E+05	16,4%

Tabella 58: Modulo B4: Impatti ambientali componenti d’impianto – Scenario cAE e Scenario sAE

Categoria di impatto	Scenario cAE	Scenario sAE	(Scenario cAE-Scenario sAE)/Scenario sAE
GWP (kg CO _{2eq})	1,02E+05	8,90E+04	14,36%
GWP _f (kg CO _{2eq})	1,02E+05	8,89E+04	14,35%
GWP _b (kg CO _{2eq})	-5,76E+01	-4,61E+01	24,92%
GWP _{LULUC} (kg CO _{2eq})	1,35E+02	1,05E+02	28,25%
ODP (kg CFC-11 _{eq})	1,57E-01	1,56E-01	0,47%
AP (mol H ⁺ _{eq})	1,29E+03	1,16E+03	11,56%
EP _{FW} (kg PO _{4eq})	9,96E+01	9,33E+01	6,70%
EP _M (kg N _{eq})	1,19E+02	1,06E+02	12,20%
EP _T (mol N _{eq})	2,42E+03	2,28E+03	6,15%
POCP (kg NMVOC _{eq})	3,98E+02	3,52E+02	12,82%
ADP _{m&m} (kg Sb _{eq})	5,39E+01	5,30E+01	1,71%
WDP (m ³ world eq. Deprived)	4,14E+04	2,81E+04	47,02%
PM (Potenziale di incidenza)	7,99E-03	7,22E-03	10,54%
IR (kBq U ²³⁵ _{eq})	7,39E+03	6,16E+03	20,04%
E _{FW} (CTUe)	8,40E+06	7,87E+06	6,68%
HT-nce (CTU _h)	1,00E-02	9,45E-03	6,03%
HT-ce (CTU _h)	3,33E-04	3,14E-04	6,07%
LU (-)	4,72E+05	4,22E+05	11,91%

Dall’analisi è emerso che l’impiego dell’accumulo elettrico causa un incremento dell’EE della fase di sostituzione nello scenario cAE di circa il 19% rispetto allo scenario sAE. Con riferimento agli impatti ambientali si registra un incremento nello scenario cAE rispetto allo scenario sAE variabile da un valore minimo dello 0,47% sulla categoria “riduzione dello strato di ozono” ad un valore massimo pari al 47% sulla categoria “consumo della risorsa idrica”.

Nella Figura 90 e Figura 91 è illustrata, rispettivamente, l'incidenza dei componenti dell'impianto sostituiti sull'EE degli interventi di sostituzione negli scenari cAE e sAE. In entrambi gli scenari esaminati la sostituzione dell'impianto di climatizzazione è responsabile del maggior contributo all'EE.

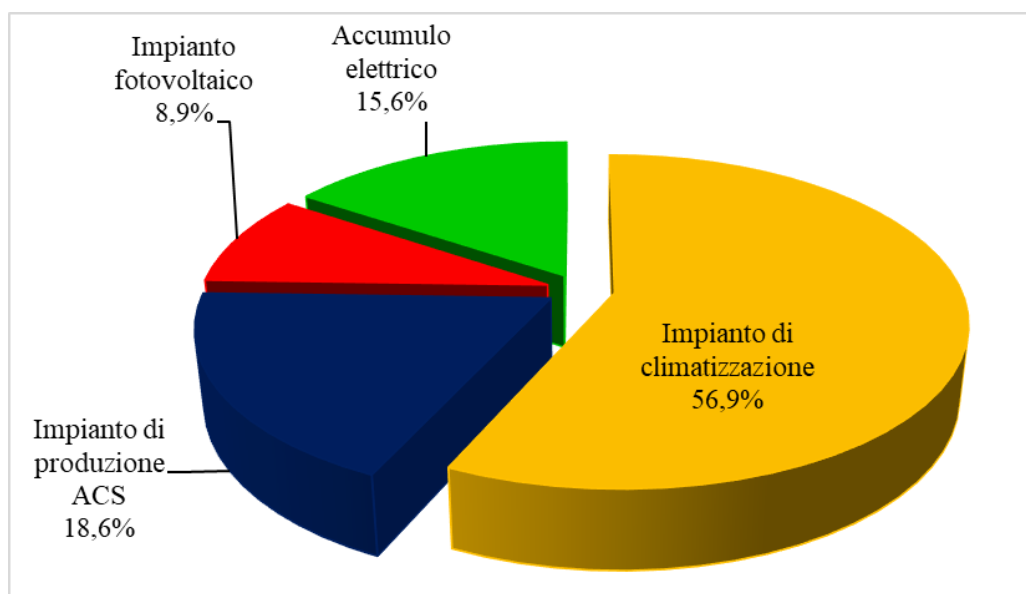


Figura 90: Modulo B4: Analisi di contributo dei componenti d'impianto sostituiti sull'EE – Scenario cAE

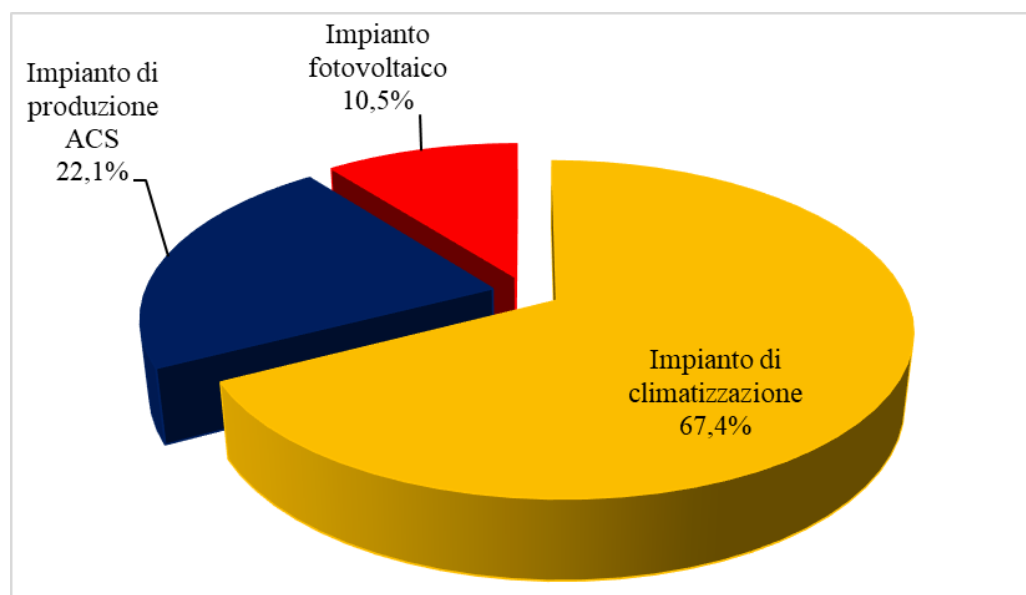


Figura 91: Modulo B4: Analisi di contributo dei componenti d'impianto sostituiti sull'EE – Scenario sAE

Nella Figura 92 e Figura 93 è illustrata, rispettivamente, l'incidenza dei componenti dell'impianto sostituiti sugli impatti ambientali degli interventi di sostituzione d'impianto negli scenari cAE e sAE. In entrambi gli scenari esaminati la sostituzione dell'impianto di climatizzazione è responsabile del maggior contributo in tutte le categorie ambientali.

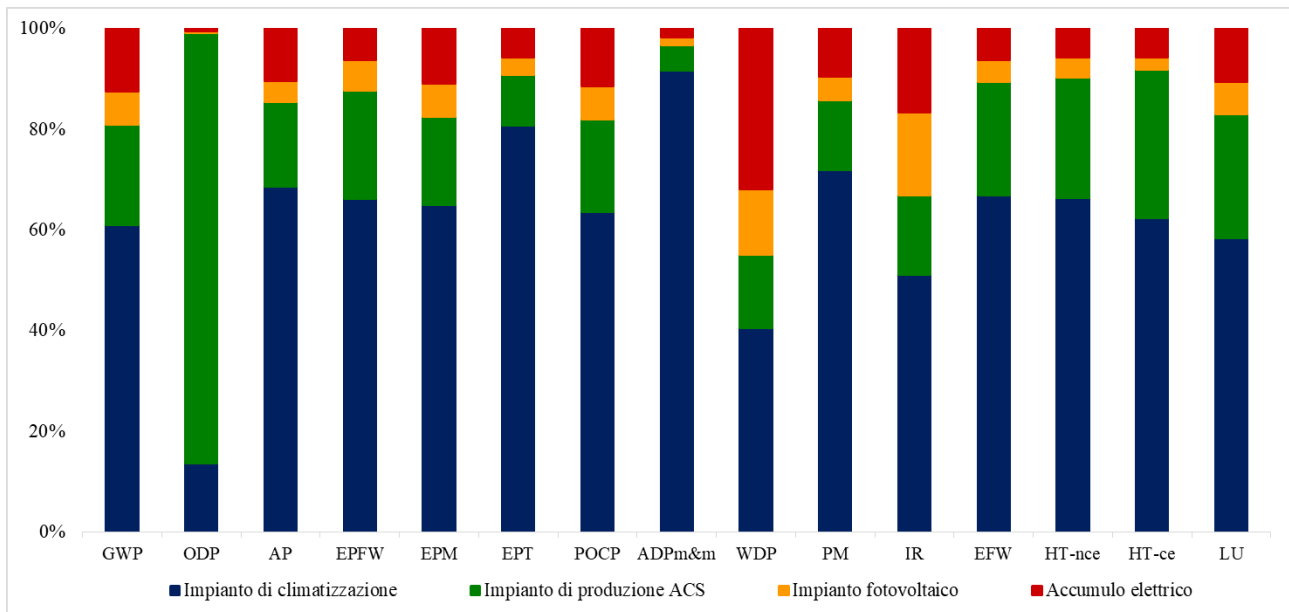


Figura 92: Modulo B4: Analisi di contributo dei componenti d'impianto sostituiti sugli impatti ambientali – Scenario CAE

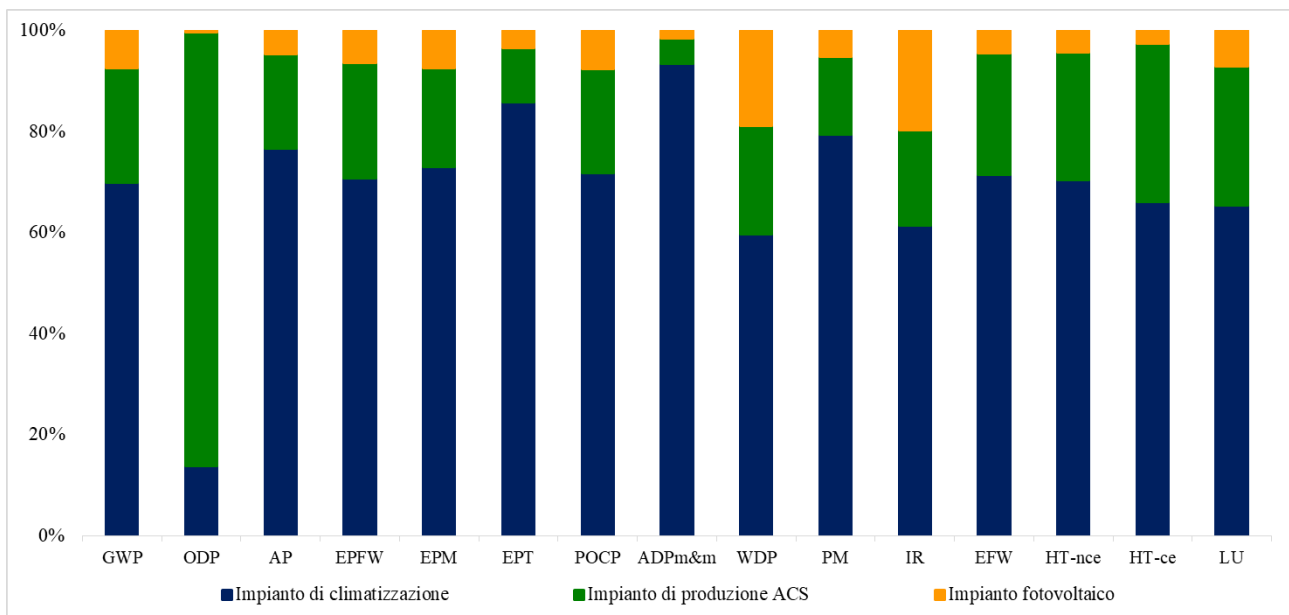


Figura 93: Modulo B4: Analisi di contributo dei componenti d'impianto sostituiti sugli impatti ambientali – Scenario SAE

Nella Tabella 59 e Tabella 60 è riportato il contributo in valore assoluto agli impatti energetico – ambientali ripartito per fase di produzione e trattamento di fine vita di ogni componente sostituito, rispettivamente per gli scenari CAE e SAE. Dall'analisi dei dati è emerso che i trattamenti di fine vita modellizzati secondo gli scenari descritti al Paragrafo 1.3.3 hanno un contributo trascurabile in quasi tutte le categorie esaminate.

Tabella 59: Modulo B4: Analisi di contributo dei componenti d'impianto sostituiti sugli impatti energetico - ambientali per fase di produzione e fase di trattamento di fine vita – Scenario cAE

Categoria di impatto	Impianto di climatizzazione		Impianto di produzione ACS		Impianto fotovoltaico		Accumulo elettrico
	Produzione	Trattamento di fine vita	Produzione	Trattamento di fine vita	Produzione	Trattamento di fine vita	Produzione
EE (MJ)	7,38E+05	2,53E+03	2,40E+05	2,89E+03	1,15E+05	8,21E+01	2,04E+05
GWP (kg CO _{2eq})	5,79E+04	4,32E+03	1,67E+04	3,39E+03	6,49E+03	1,41E+02	1,28E+04
GWP _f (kg CO _{2eq})	5,80E+04	4,31E+03	1,67E+04	3,39E+03	6,41E+03	1,41E+02	1,28E+04
GWP _b (kg CO _{2eq})	-1,31E+02	2,40E+00	1,15E+01	2,76E+00	6,78E+01	2,40E-01	-1,15E+01
GWP _{LULUC} (kg CO _{2eq})	7,78E+01	5,62E-02	1,49E+01	1,37E-01	1,25E+01	3,17E-03	2,97E+01
ODP (kg CFC-11 _{eq})	2,15E-02	3,51E-05	1,34E-01	6,18E-05	7,12E-04	1,40E-06	7,32E-04
AP (mol H ⁺ _{eq})	8,84E+02	1,55E+00	2,12E+02	3,90E+00	5,40E+01	4,64E-02	1,34E+02
EP _{FW} (kg PO _{4eq})	6,59E+01	3,98E-02	2,13E+01	6,48E-02	6,00E+00	1,54E-03	6,26E+00
EP _M (kg N _{eq})	7,66E+01	6,85E-01	1,97E+01	1,02E+00	7,96E+00	2,12E-02	1,29E+01
EP _T (mol N _{eq})	1,95E+03	6,69E+00	2,34E+02	8,27E+00	8,08E+01	1,81E-01	1,40E+02
POCP (kg NMVOC _{eq})	2,51E+02	1,79E+00	7,04E+01	2,21E+00	2,67E+01	4,67E-02	4,52E+01
ADP _{m&m} (kg Sb _{eq})	4,94E+01	2,04E-03	2,68E+00	2,72E-03	8,71E-01	8,79E-05	9,07E-01
WDP (m ³ _{world eq. Deprived})	1,67E+04	4,24E+01	5,93E+03	1,14E+02	5,32E+03	3,57E+00	1,32E+04
PM (Potenziale di incidenza)	5,72E-03	2,19E-05	1,08E-03	2,94E-05	3,78E-04	4,37E-07	7,61E-04
IR (kBq U ²³⁵ _{eq})	3,77E+03	1,44E+01	1,13E+03	2,02E+01	1,22E+03	5,46E-01	1,23E+03
E _{FW} (CTU _e)	5,60E+06	1,72E+04	1,88E+06	7,92E+03	3,62E+05	2,00E+03	5,26E+05
HT-nce (CTU _h)	6,64E-03	1,30E-05	2,38E-03	9,06E-06	4,07E-04	9,11E-07	5,70E-04
HT-ce (CTU _h)	2,08E-04	2,87E-07	9,80E-05	2,60E-07	8,24E-06	1,38E-08	1,91E-05
LU (-)	2,74E+05	1,56E+03	1,15E+05	1,58E+03	2,98E+04	4,52E+01	5,03E+04

Tabella 60: Modulo B4: Analisi di contributo dei componenti d'impianto sostituiti sugli impatti energetico - ambientali per fase di produzione e fase di trattamento di fine vita – Scenario sAE

Categoria di impatto	Impianto di climatizzazione		Impianto di produzione ACS		Impianto fotovoltaico	
	Produzione	Trattamento di fine vita	Produzione	Trattamento di fine vita	Produzione	Trattamento di fine vita
EE (MJ)	7,38E+05	2,53E+03	2,40E+05	2,89E+03	1,15E+05	8,21E+01
GWP (kg CO _{2eq})	5,79E+04	4,32E+03	1,67E+04	3,39E+03	6,49E+03	1,41E+02
GWP _f (kg CO _{2eq})	5,80E+04	4,31E+03	1,67E+04	3,39E+03	6,41E+03	1,41E+02
GWP _b (kg CO _{2eq})	-1,31E+02	2,40E+00	1,15E+01	2,76E+00	6,78E+01	2,40E-01
GWP _{LULUC} (kg CO _{2eq})	7,78E+01	5,62E-02	1,49E+01	1,37E-01	1,25E+01	3,17E-03
ODP (kg CFC-11 _{eq})	2,15E-02	3,51E-05	1,34E-01	6,18E-05	7,12E-04	1,40E-06
AP (mol H ⁺ _{eq})	8,84E+02	1,55E+00	2,12E+02	3,90E+00	5,40E+01	4,64E-02
EP _{FW} (kg PO _{4eq})	6,59E+01	3,98E-02	2,13E+01	6,48E-02	6,00E+00	1,54E-03
EP _M (kg N _{eq})	7,66E+01	6,85E-01	1,97E+01	1,02E+00	7,96E+00	2,12E-02
EP _T (mol N _{eq})	1,95E+03	6,69E+00	2,34E+02	8,27E+00	8,08E+01	1,81E-01
POCP (kg NMVOC _{eq})	2,51E+02	1,79E+00	7,04E+01	2,21E+00	2,67E+01	4,67E-02
ADP _{m&m} (kg Sb _{eq})	4,94E+01	2,04E-03	2,68E+00	2,72E-03	8,71E-01	8,79E-05
WDP (m ³ _{world eq. Deprived})	1,67E+04	4,24E+01	5,93E+03	1,14E+02	5,32E+03	3,57E+00
PM (Potenziale di incidenza)	5,72E-03	2,19E-05	1,08E-03	2,94E-05	3,78E-04	4,37E-07
IR (kBq U ²³⁵ _{eq})	3,77E+03	1,44E+01	1,13E+03	2,02E+01	1,22E+03	5,46E-01
E _{FW} (CTUe)	5,60E+06	1,72E+04	1,88E+06	7,92E+03	3,62E+05	2,00E+03
HT-nce (CTU _h)	6,64E-03	1,30E-05	2,38E-03	9,06E-06	4,07E-04	9,11E-07
HT-ce (CTU _h)	2,08E-04	2,87E-07	9,80E-05	2,60E-07	8,24E-06	1,38E-08
LU (-)	2,74E+05	1,56E+03	1,15E+05	1,58E+03	2,98E+04	4,52E+01

Modulo B6 – consumo di energia

Nella Tabella 61 e Tabella 62 sono sintetizzati, rispettivamente, gli impatti sull'EE e gli impatti ambientali connessi al consumo di energia elettrica durante la fase d'uso dell'edificio.

Tabella 61: Modulo B6: Energia incorporata – Scenario cAE e Scenario sAE

Categoria	Scenario cAE	Scenario sAE	(Scenario cAE-Scenario sAE)/Scenario sAE
EE (MJ)	4,23E+06	5,91E+06	-28%
EE _{nr} (MJ)	1,64E+06	3,99E+06	-59%
EE _r (MJ)	2,59E+06	1,92E+06	35%

Tabella 62: Modulo B6: Impatti ambientali – Scenario cAE e Scenario sAE

Categoria di impatto	Scenario cAE	Scenario sAE
GWP (kg CO _{2eq})	1,12E+05	2,72E+05
GWP _f (kg CO _{2eq})	1,03E+05	2,51E+05
GWP _b (kg CO _{2eq})	8,81E+03	2,14E+04
GWP _{LULUC} (kg CO _{2eq})	1,99E+01	4,84E+01
ODP (kg CFC-11 _{eq})	1,42E-02	3,45E-02
AP (mol H ⁺ _{eq})	5,64E+02	1,37E+03
EP _{FW} (kg PO _{4eq})	2,96E+01	7,19E+01
EP _M (kg N _{eq})	7,86E+01	1,91E+02
EP _T (mol N _{eq})	1,04E+03	2,54E+03
POCP (kg NMVOC _{eq})	2,40E+02	5,83E+02
ADP _{m&m} (kg Sb _{eq})	8,09E-01	1,97E+00
WDP (m ³ _{world eq. Deprived})	6,04E+04	1,47E+05
PM (Potenziale di incidenza)	2,22E-03	5,39E-03
IR (kBq U ²³⁵ _{eq})	1,27E+04	3,09E+04
E _{FW} (CTUe)	1,35E+06	3,28E+06
HT-nce (CTU _h)	9,67E-04	2,35E-03
HT-ce (CTU _h)	3,42E-05	8,32E-05
LU (-)	6,08E+05	1,48E+06

Dall'analisi dei dati emerge che nello scenario cAE si ha una riduzione del consumo di energia primaria rispetto allo scenario sAE pari al 28%. Infatti, la presenza dell'accumulo elettrico consente di incrementare la quota degli usi energetici soddisfatti con l'energia elettrica prodotta localmente dall'impianto fotovoltaico e di conseguenza di ridurre l'import di energia elettrica dalla rete. Nello scenario cAE, l'energia primaria rinnovabile rappresenta circa il 60% dell'EE complessiva relativa al modulo B6, mentre nello scenario sAE la percentuale di energia primaria rinnovabile sul totale dell'EE si riduce al 30%. Dall'analisi dei dati emerge che gli impatti ambientali connessi agli usi energetici di fase d'uso si riducono nello scenario cAE di circa il 60% rispetto allo scenario sAE.

L'energia elettrica prodotta dall'impianto fotovoltaico e consumata direttamente dall'edificio oppure attraverso l'accumulo elettrico incide esclusivamente sul consumo di energia primaria rinnovabile.

Gli impatti ambientali del modulo B6 sono causati esclusivamente dal consumo di energia elettrica importata dalla rete, infatti l'energia elettrica prodotta dall'impianto fotovoltaico e consumata direttamente nell'edificio oppure attraverso l'accumulo elettrico ha un impatto ambientale di fase d'uso nullo.

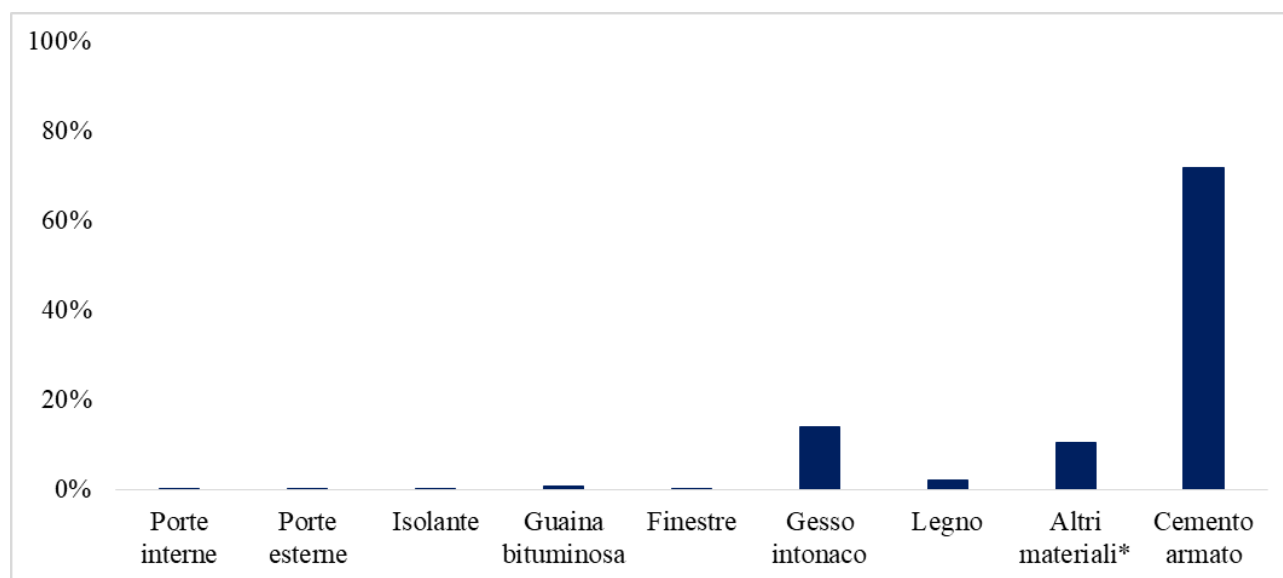
5.4.3 Impatti energetico – ambientali – Modulo C

Nella Tabella 63 e Tabella 64 sono sintetizzati, rispettivamente, i valori di energia incorporata e gli impatti ambientali connessi ai trattamenti di fine vita ipotizzati per i materiali costituenti l'involucro edilizio e le variazioni percentuali degli impatti connessi allo scenario FC rispetto a quelli dello scenario XPS. Dall'analisi dei dati è emerso che nello scenario XPS l'energia incorporata connessa ai trattamenti di fine vita dei componenti edilizi è pari a $2,169E+05$ MJ di energia primaria di cui il 98% costituito da energia primaria non rinnovabile, mentre nello scenario FC è pari a $2,175E+05$ MJ di energia primaria di cui il 98% costituito da energia primaria non rinnovabile. Le differenze tra valori di EE dei trattamenti di fine vita dei materiali dell'involucro edilizio connessi agli scenari esaminati sono di entità trascurabile.

Tabella 63. Modulo C: Energia incorporata nei trattamenti di fine vita dei componenti di involucro – Scenario XPS e Scenario FC

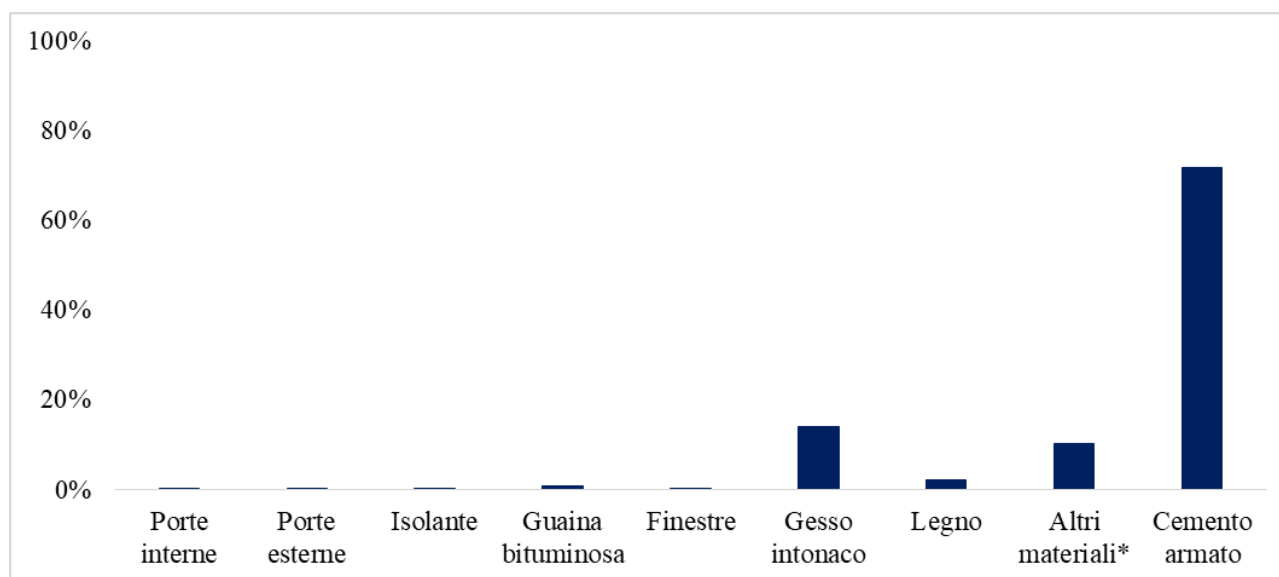
Categoria	Scenario XPS	Scenario FC	(Scenario FC-Scenario XPS)/Scenario XPS
EE (MJ)	2,169E+05	2,175E+05	0,26%
EE _{nr} (MJ)	2,135E+05	2,141E+05	0,27%
EE _r (MJ)	3,423E+03	3,420E+03	-0,08%

Nella Figura 94 e Figura 95 è illustrata, rispettivamente, l'incidenza dei componenti dell'involucro edilizio sull'EE negli scenari XPS e FC. Dall'analisi è emerso che, in entrambi gli scenari, il trattamento di fine vita del cemento armato contribuisce per circa il 72% al consumo di energia primaria causato dallo smaltimento finale dei componenti di involucro, seguono i trattamenti di fine vita del gesso intonaco e degli "altri materiali" che includono le tegole, la malta cementizia, la ceramica e il laterizio forato con un contributo all'EE pari a circa il 13%. Il trattamento di fine vita del legno incide sull'EE per circa il 2% in entrambi gli scenari, mentre il contributo del trattamento degli altri componenti di involucro è inferiore all'1%.



*Altri materiali: tegole, malta cementizia, ceramica, laterizio forato.

Figura 94: Modulo C: Analisi di contributo all'EE dei trattamenti di fine vita dei componenti di involucro – Scenario XPS



*Altri materiali: tegole, malta cementizia, ceramica, laterizio forato.

Figura 95: Modulo C: Analisi di contributo all'EE dei trattamenti di fine vita dei componenti di involucro – Scenario FC

Dall'analisi dei dati emerge che lo scenario FC presenta prestazioni ambientali migliori in quasi tutte le categorie di impatto esaminate. I maggiori benefici ambientali si hanno in corrispondenza delle categorie "cambiamento climatico", "cambiamento climatico – contributo fossile", "ecotossicità delle acque dolci" e sulle categorie relative alla "tossicità umana". In queste categorie di impatto ambientale il trattamento di fine vita ipotizzato per il polistirene espanso estruso presenta impatti più elevati rispetto al trattamento ipotizzato per le fibre di cellulosa. In tutte le altre categorie ambientali esaminate le variazioni percentuali degli impatti connessi allo scenario FC rispetto allo scenario XPS variano tra il -3% per la categoria "consumo della risorsa idrica" allo 0,7% per la categoria "uso e qualità del suolo".

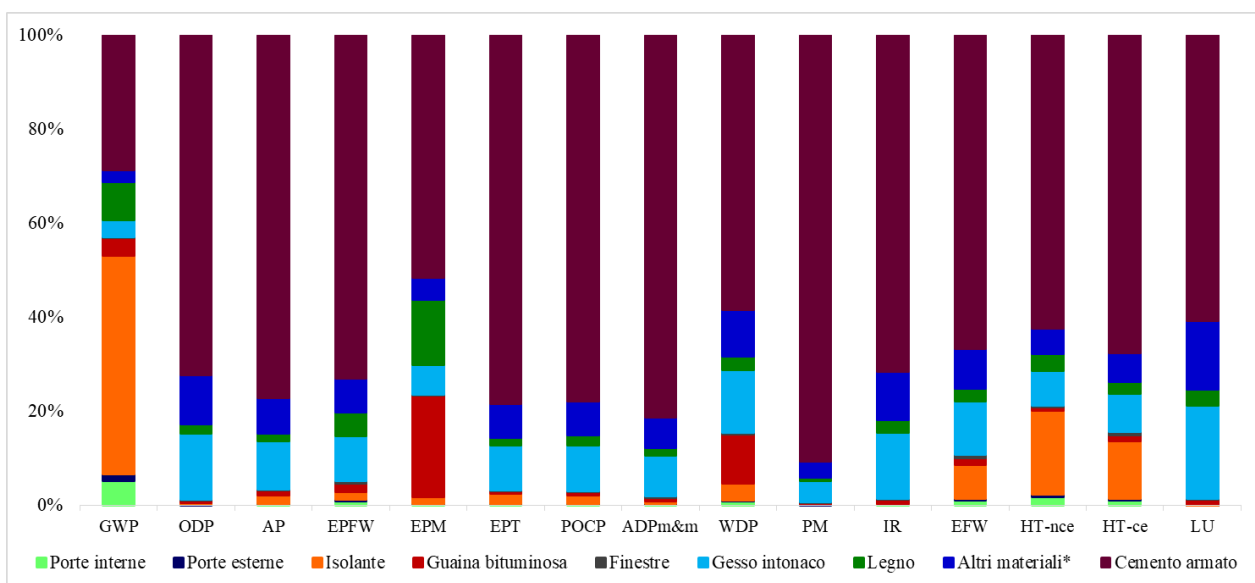
Tabella 64: Modulo C: Impatti ambientali dei trattamenti di fine vita dei componenti di involucro – Scenario XPS e Scenario FC

Categoria di impatto	Scenario XPS	Scenario FC	(Scenario FC-Scenario XPS)/Scenario XPS
GWP (kg CO _{2eq})	2,54E+04	1,36E+04	-46,33%
GWP _f (kg CO _{2eq})	2,19E+04	1,02E+04	-53,57%
GWP _b (kg CO _{2eq})	3,42E+03	3,42E+03	0,07%
GWP _{LULUC} (kg CO _{2eq})	1,79E+00	1,78E+00	-0,23%
ODP (kg CFC-11 _{eq})	3,04E-03	3,05E-03	0,37%
AP (mol H ⁺ _{eq})	8,38E+01	8,29E+01	-1,14%
EP _{FW} (kg PO _{4eq})	6,41E-01	6,34E-01	-1,07%
EP _M (kg N _{eq})	5,09E+01	5,03E+01	-1,06%
EP _T (mol N _{eq})	3,66E+02	3,61E+02	-1,45%
POCP (kg NMVOC _{eq})	1,03E+02	1,02E+02	-1,15%
ADP _{m&m} (kg Sb _{eq})	8,96E-02	8,97E-02	0,08%
WDP (m ³ _{world eq. Deprived})	6,48E+02	6,29E+02	-2,97%
PM (Potenziale di incidenza)	3,98E-03	3,99E-03	0,26%
IR (kBq U ²³⁵ _{eq})	1,00E+03	1,00E+03	0,40%
E _{FW} (CTU _e)	1,36E+05	1,27E+05	-6,61%
HT-nce (CTU _h)	1,17E-04	9,68E-05	-17,35%
HT-ce (CTU _h)	4,04E-06	3,56E-06	-11,79%
LU (-)	3,18E+05	3,20E+05	0,74%

Nei grafici riportati in Figura 96 e Figura 97 è illustrato il contributo agli impatti ambientali del trattamento di fine vita di ogni materiale edile, rispettivamente, per gli scenari XPS e FC.

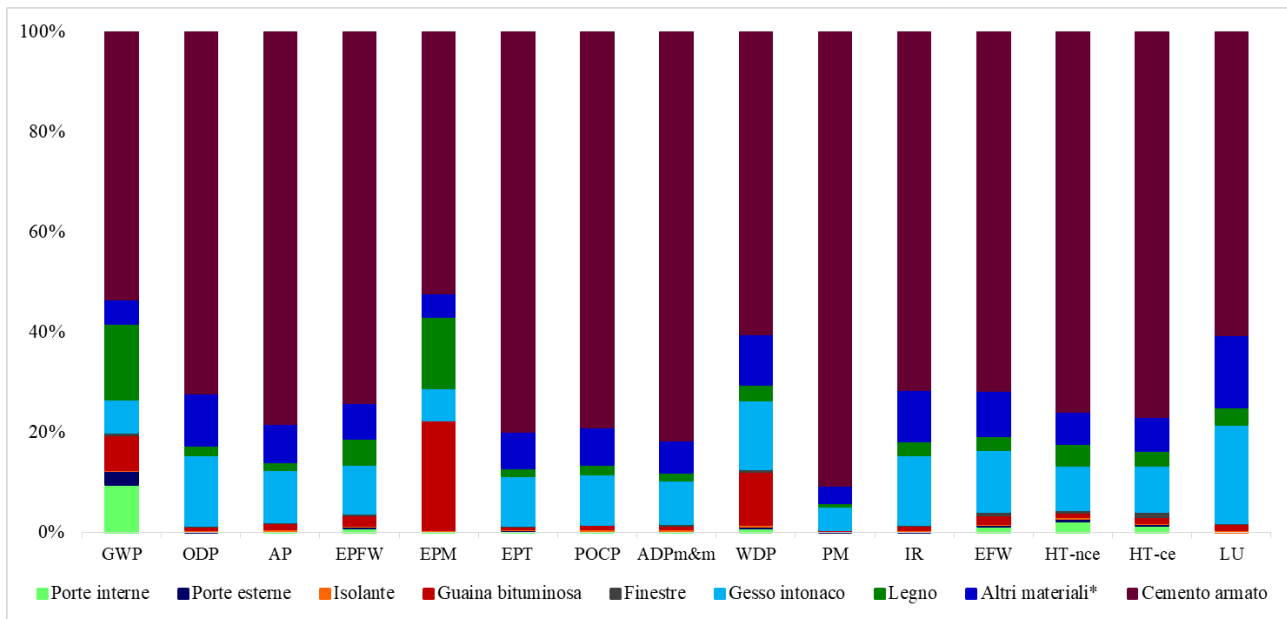
In entrambi gli scenari considerati, come già evidenziato, il trattamento di fine vita del cemento armato è responsabile del maggior contributo agli impatti ambientali. In dettaglio, nello scenario XPS il contributo agli impatti del cemento armato varia da un valore minimo pari a circa il 30% sulla categoria “cambiamento climatico” ad un valore massimo pari al 91% sulla categoria “emissione di particolato”, mentre nello scenario FC da un valore minimo pari a circa il 50% sulle categorie “cambiamento climatico” e “eutrofizzazione delle acque marine” ad un valore massimo pari al 91% sulla categoria “emissione di particolato”.

Nello scenario XPS, il trattamento di fine vita del polistirene estruso espanso (trattamento di rifiuti in polistirene in inceneritore per rifiuti solidi urbani con estrazione delle ceneri volatili) presenta un contributo significativo all’impatto sulle categorie “cambiamento climatico” (46%) e “tossicità umana con effetti non cancerogeni” (18%). Nello scenario FC, il trattamento di fine vita delle fibre di cellulosa (conferimento in discarica per inerti) incide in misura trascurabile (minore dell’1%) sugli impatti in tutte le categorie ambientali. Il trattamento di fine vita della guaina bituminosa è responsabile di un contributo di circa il 20% all’impatto sulla categoria “eutrofizzazione delle acque marine” e di circa il 10% sulla categoria “consumo della risorsa idrica”, in entrambi gli scenari esaminati. Il trattamento di fine vita del gesso intonaco incide con percentuali variabili da un valore minimo pari al 4% nello scenario XPS e al 7% nello scenario FC sulla categoria “cambiamento climatico” ad un valore massimo pari al 20% sulla categoria “uso e qualità del suolo”, in entrambi gli scenari. Il trattamento di fine vita delle tegole, della malta cementizia, della ceramica e del laterizio forato (“altri materiali”) incide con percentuali variabili tra un valore minimo pari a circa il 3% sulla categoria “emissione di particolato” ad un valore massimo pari a circa il 15% sulla categoria “uso e qualità del suolo”, in entrambi gli scenari esaminati. Il trattamento di fine vita del legno incide per il 14% all’impatto sulla categoria “eutrofizzazione delle acque marine” in entrambi gli scenari esaminati. Il contributo agli impatti del trattamento di fine vita degli altri componenti di involucro è trascurabile (minore del 3%) in quasi tutte le categorie ambientali con l’eccezione della categoria “cambiamento climatico” alla quale il trattamento di fine vita delle porte interne contribuisce per il 5% nello scenario XPS e per il 10% nello scenario FC.



*Altri materiali: tegole, malta cementizia, ceramica, laterizio forato.

Figura 96: Modulo C: Analisi di contributo agli impatti ambientali dei trattamenti di fine vita dei componenti di involucro – Scenario XPS



*Altri materiali: tegole, malta cementizia, ceramica, laterizio forato.

Figura 97: Modulo C: Analisi di contributo agli impatti ambientali dei trattamenti di fine vita dei componenti di involucro – Scenario FC

Nella Tabella 65 e Tabella 66 sono sintetizzati gli impatti energetico – ambientali connessi ai trattamenti di fine vita ipotizzati per i componenti di impianto, mentre nella Figura 98 e Figura 99 è illustrata, rispettivamente, l’incidenza dei componenti d’impianto sull’EE e sugli impatti ambientali connessi al trattamento di fine vita dell’impianto.

La trattazione che segue è valida sia per lo scenario CAE che per lo scenario SAE (Paragrafo 1.3.3). Infatti, in accordo all’approccio “Recycled content, cut-off” per l’accumulo elettrico, per il quale si è ipotizzato un trattamento di riciclo a fine vita, è stato applicato un cut-off. Pertanto, gli impatti del trattamento di fine vita dei componenti di impianto sono connessi, in entrambi gli scenari esaminati, allo smaltimento finale dell’impianto di produzione dell’acqua calda sanitaria, dell’impianto di climatizzazione e dell’impianto fotovoltaico.

Dall’analisi dei dati è emerso che il trattamento di fine vita dell’impianto di produzione dell’acqua calda sanitaria e dell’impianto di climatizzazione sono responsabili del maggior contributo agli impatti energetico – ambientali. In dettaglio, l’impianto di produzione dell’acqua calda sanitaria incide per il 46% sull’EE e rappresenta percentuali variabili da un valore minimo pari al 17% sulla categoria “ecotossicità delle acque dolci” ad un valore massimo pari al 66% sull’“acidificazione”. Il trattamento di fine vita dell’impianto di climatizzazione incide sugli impatti ambientali con percentuali variabili da un valore minimo pari al 22% sulla categoria “consumo della risorsa idrica” ad un valore massimo pari al 47% sulla categoria “cambiamento climatico”. Il trattamento di fine vita dell’impianto fotovoltaico contribuisce agli impatti ambientali con percentuali variabili da un valore minimo dell’8% sull’“acidificazione” ad un valore massimo pari al 46% sulla “ecotossicità delle acque dolci”.

Tabella 65: Modulo C: Energia incorporata dei trattamenti di fine vita dei componenti d’impianto – Scenario CAE e Scenario SAE

Categoria	Trattamento di fine vita dei componenti di impianto
EE (MJ)	2,10E+03
EE _{nr} (MJ)	1,98E+03
EE _r (MJ)	1,23E+02

Tabella 66: Modulo C: Impatti ambientali dei trattamenti dei trattamenti di fine vita dei componenti d'impianto – Scenario cAE e Scenario sAE

Categoria di impatto	Trattamento di fine vita dei componenti di impianto
GWP (kg CO _{2eq})	3,08E+03
GWP _f (kg CO _{2eq})	3,08E+03
GWP _b (kg CO _{2eq})	2,59E+00
GWP _{LULUC} (kg CO _{2eq})	7,59E-02
ODP (kg CFC-11 _{eq})	3,73E-05
AP (mol H ⁺ _{eq})	1,99E+00
EP _{FW} (kg PO _{4eq})	4,04E-02
EP _M (kg N _{eq})	6,45E-01
EP _T (mol N _{eq})	5,64E+00
POCP (kg NMVOC _{eq})	1,50E+00
ADP _{m&m} (kg Sb _{eq})	1,91E-03
WDP (m ³ world eq. Deprived)	6,49E+01
PM (Potenziale di incidenza)	1,87E-05
IR (kBq U ²³⁵ _{eq})	1,35E+01
E _{FW} (CTU _e)	1,56E+04
HT-nce (CTU _h)	1,06E-05
HT-ce (CTU _h)	2,32E-07
LU (-)	1,21E+03

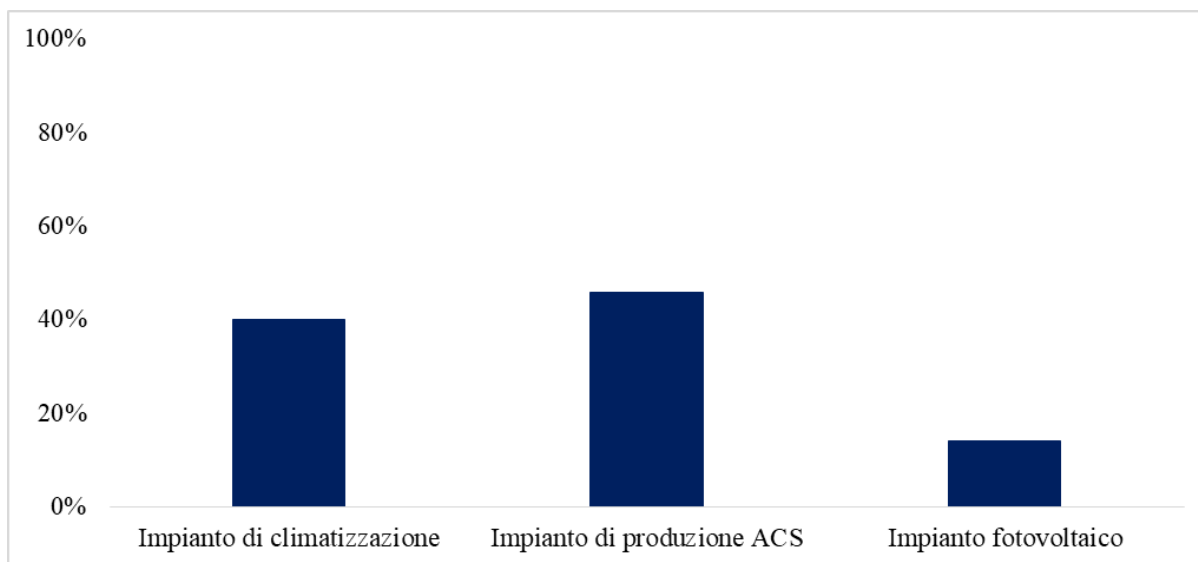


Figura 98: Modulo C: Analisi di contributo all'EE dei trattamenti di fine vita dei componenti di impianto

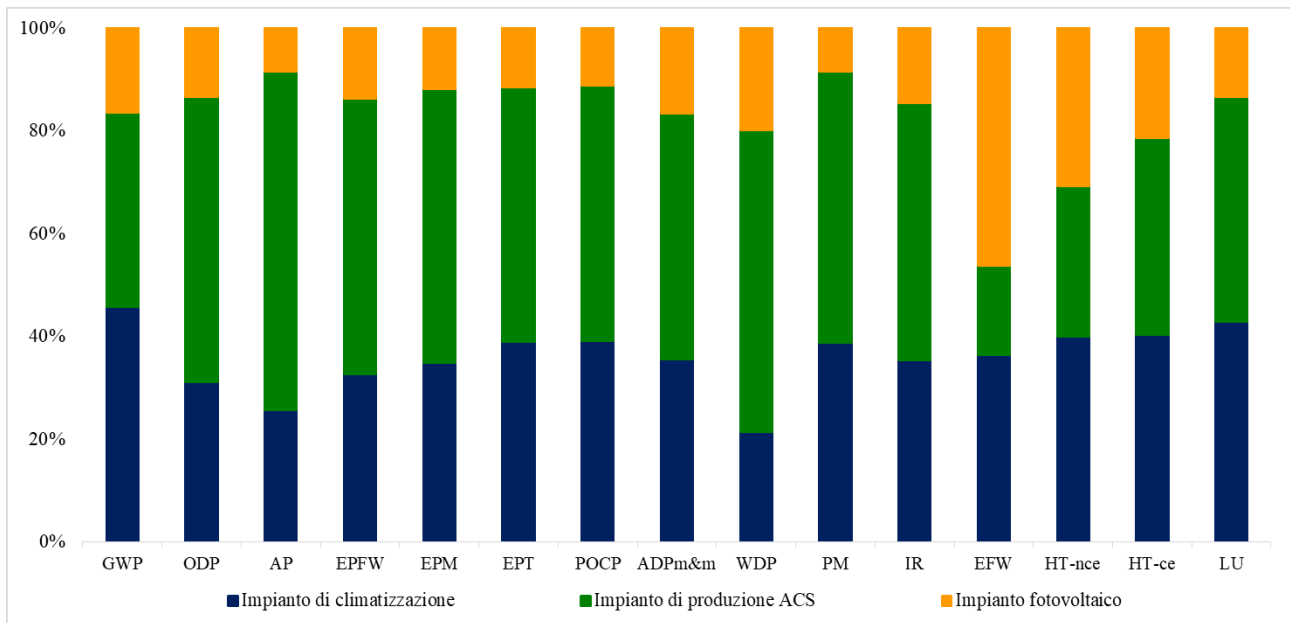


Figura 99: Modulo C: Analisi di contributo agli impatti ambientali dei trattamenti di fine vita dei componenti di impianto

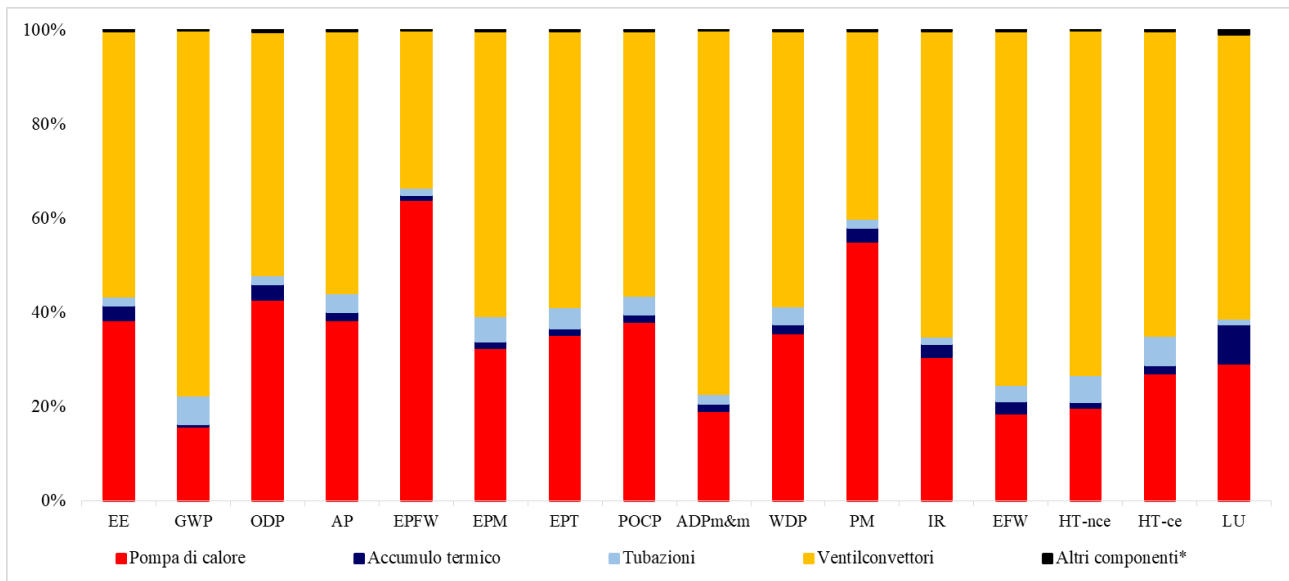
Di seguito è riportata la descrizione dettagliata dei contributi agli impatti energetico – ambientali relativi ai singoli componenti di impianto.

Impianto di climatizzazione

Nella Figura 100 è illustrata l’analisi di contributo dei singoli componenti dell’impianto di climatizzazione agli impatti energetico – ambientali connessi al trattamento di fine vita. Sotto la voce “altri componenti” sono raggruppati i componenti che singolarmente contribuiscono per meno dell’1%. Questi componenti complessivamente incidono con percentuali variabili da un valore minimo pari allo 0,1% sulla categoria “eutrofizzazione delle acque dolci” ad un valore massimo pari all’1% sulla categoria “uso e qualità del suolo”. Il trattamento di fine vita dei ventilconvettori è responsabile di un contributo variabile tra il 33% sulla categoria “eutrofizzazione delle acque dolci” ad un valore massimo pari al 77% sulle categorie “cambiamento climatico” e “depauperamento delle risorse abiotiche - combustibili fossili”. In dettaglio, il trattamento di fine vita del gruppo ventilatore e dello scambiatore di calore è responsabile del maggior contributo agli impatti energetico – ambientali con incidenze percentuali variabili da un valore minimo pari al 40% sulla categoria “consumo della risorsa idrica” ad un valore massimo pari al 90% sulla categoria “cambiamento climatico”.

Il trattamento di fine vita della pompa di calore contribuisce agli impatti ambientali con percentuali variabili da un valore minimo pari al 16% sulla categoria “cambiamento climatico” ad un valore massimo pari al 64% sulla categoria “eutrofizzazione delle acque dolci”. Un’analisi più dettagliata ha evidenziato che le perdite (emissioni dirette) di fluido refrigerante R134a sono responsabili del 53% dell’impatto sul “cambiamento climatico”, mentre il trattamento di fine vita del fluido refrigerante incide con percentuali variabili dal 9% sulla categoria “cambiamento climatico” ad un valore massimo pari all’82% sulla categoria “eutrofizzazione delle acque dolci”. Il trattamento di fine vita delle parti in rame e in acciaio della pompa di calore contribuiscono agli impatti con percentuali variabili da un valore minimo del 5% sulla categoria “cambiamento climatico” ad un valore massimo pari all’83% sulla categoria “emissione di particolato”.

L’accumulo termico contribuisce per circa l’8% all’impatto sulla categoria “uso e qualità del suolo”, mentre il trattamento di fine vita delle tubazioni incide con percentuali variabili da un valore minimo pari all’1,2% sulla categoria “uso e qualità del suolo” ad un valore massimo pari al 6% sulla categoria “cambiamento climatico”.



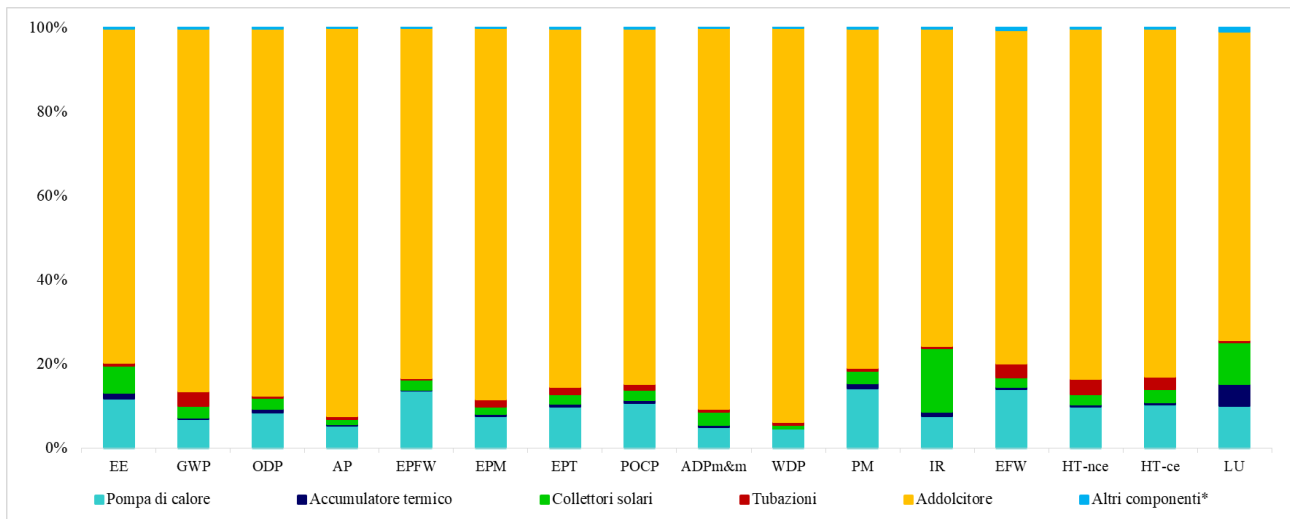
*Altri componenti: circolatori, vaso di espansione, valvole, giunti e flussostati.

Figura 100: Modulo C: Analisi di contributo agli impatti ambientali dei trattamenti di fine vita dei componenti dell'impianto di climatizzazione

Impianto di produzione dell'acqua calda sanitaria

Nella Figura 101 è illustrata l'analisi di contributo dei singoli componenti dell'impianto di produzione dell'acqua calda sanitaria agli impatti energetico – ambientali connessi al trattamento di fine vita. Sotto la voce "altri componenti" sono stati raggruppati i componenti che singolarmente contribuiscono per meno dello 0,3%. Essi incidono complessivamente con percentuali variabili da un valore minimo pari allo 0,07% sulla categoria "eutrofizzazione delle acque dolci" ad un valore massimo pari allo 0,9% sulla categoria "uso e qualità del suolo". Dall'analisi dei dati è emerso che il trattamento di fine vita dell'addolcitore è responsabile di un contributo significativo in tutte le categorie esaminate. In dettaglio, esso incide con percentuali comprese tra un valore minimo del 73% sulla categoria "uso e qualità del suolo" ad un valore massimo pari al 93% sulla categoria "consumo della risorsa idrica". In dettaglio, i trattamenti di fine vita delle resine anionica e cationica sono responsabili, complessivamente, di contributi agli impatti superiori all'80% in tutte le categorie esaminate.

Il trattamento di fine vita delle pompe di calore incide per circa il 14% sulle categorie "eutrofizzazione delle acque dolci", "emissione di particolato" ed "ecotossicità delle acque dolci", mentre i collettori solari contribuiscono per il 15% all'impatto sulla "radiazione ionizzante". Le tubazioni incidono per circa il 6% sulle categorie relative alla "tossicità umana", sul "cambiamento climatico" e sull'"ecotossicità delle acque dolci".



*Altri componenti: accumulo termico, stazione solare, circolatori, vaso di espansione, valvole, giunti e flussostati.

Figura 101: Modulo C: Analisi di contributo agli impatti ambientali dei trattamenti di fine vita dei componenti dell'impianto di produzione di acqua calda sanitaria

Impianto fotovoltaico

Nella Figura 102 è illustrata l'analisi di contributo dei singoli componenti dell'impianto fotovoltaico agli impatti energetico – ambientali connessi al trattamento di fine vita. Il trattamento di fine vita dei componenti elettrici è responsabile di un contributo agli impatti variabile da un valore minimo pari al 33% sulla categoria "cambiamento climatico" ad un valore massimo pari all'89% sulla categoria "ecotossicità delle acque dolci". Il trattamento di fine vita dei pannelli fotovoltaici incide con percentuali variabili da un valore minimo pari al 10% sulla categoria "ecotossicità delle acque dolci" ad un valore massimo pari al 66% sulla categoria "cambiamento climatico". I trattamenti di fine vita dell'inverter e del sistema di montaggio contribuiscono con percentuali inferiori al 5% all'impatto su tutte le categorie esaminate.

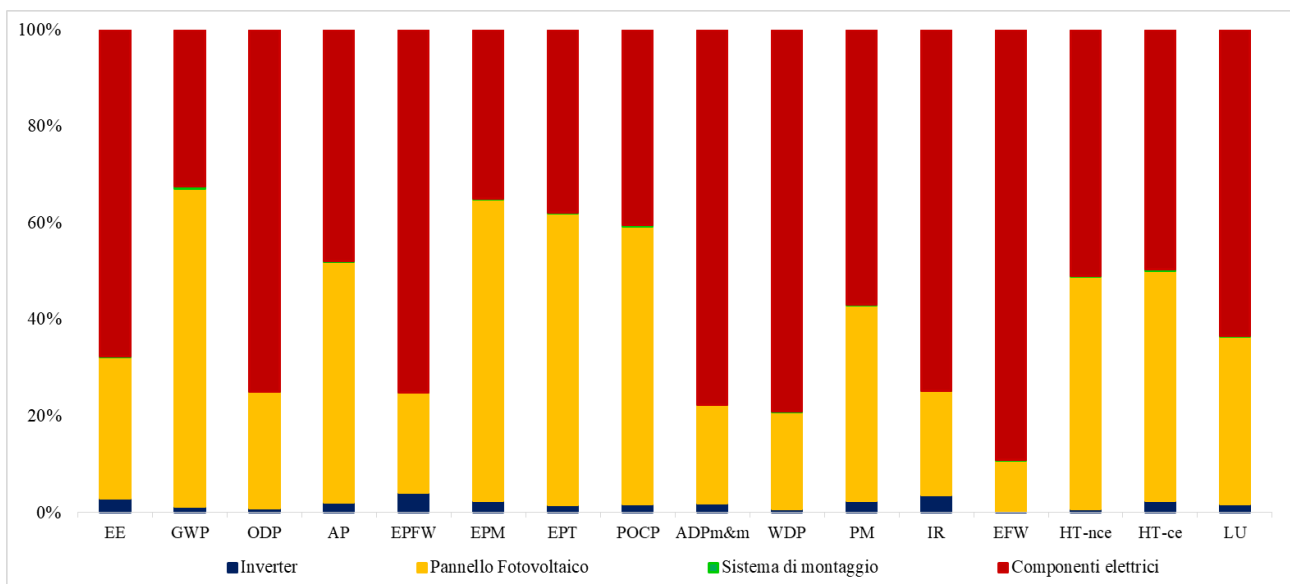


Figura 102: Modulo C: Analisi di contributo agli impatti ambientali dei trattamenti di fine vita dei componenti dell'impianto fotovoltaico

5.4.4 Impatti energetico – ambientali – Modulo D

Nella Tabella 67 sono riportati i benefici ambientali, espressi in termini di impatti ambientali evitati, connessi all'immissione in rete del surplus di energia elettrica generata in situ dall'impianto fotovoltaico. I benefici ambientali sono maggiori nello scenario sAE poiché in questo scenario è maggiore la quota di energia

rinnovabile generata in situ che viene immessa in rete rispetto allo scenario cAE in cui l'installazione di un accumulo elettrico consente di incrementare la quota di energia rinnovabile consumata dall'edificio.

Tabella 67: Modulo D: benefici ambientali in termini di impatti evitati connessi all'immissione in rete del surplus di energia elettrica generata in situ dall'impianto fotovoltaico

Categoria di impatto	Scenario cAE	Scenario sAE
EE (MJ)	-1,95E+06	-5,27E+06
GWP (kg CO _{2eq})	-1,03E+05	-2,79E+05
GWP _f (kg CO _{2eq})	-9,49E+04	-2,57E+05
GWP _b (kg CO _{2eq})	-8,10E+03	-2,19E+04
GWP _{LULUC} (kg CO _{2eq})	-1,83E+01	-4,95E+01
ODP (kg CFC-11 _{eq})	-1,30E-02	-3,53E-02
AP (mol H ⁺ _{eq})	-5,18E+02	-1,40E+03
EP _{FW} (kg PO _{4eq})	-2,72E+01	-7,36E+01
EP _M (kg N _{eq})	-7,22E+01	-1,96E+02
EP _T (mol N _{eq})	-9,59E+02	-2,60E+03
POCP (kg NMVOC _{eq})	-2,20E+02	-5,96E+02
ADP _{m&m} (kg Sb _{eq})	-7,44E-01	-2,01E+00
WDP (m ³ _{world eq. Deprived})	-5,55E+04	-1,50E+05
PM (Potenziale di incidenza)	-2,04E-03	-5,51E-03
IR (kBq U ²³⁵ _{eq})	-1,17E+04	-3,17E+04
E _{FW} (CTU _e)	-1,24E+06	-3,36E+06
HT-nce (CTU _h)	-8,89E-04	-2,41E-03
HT-ce (CTU _h)	-3,14E-05	-8,51E-05
LU (-)	-5,59E+05	-1,51E+06

5.4.5 Impatti energetico – ambientali di ciclo di vita

In questo paragrafo sono illustrati gli impatti energetico – ambientali di ciclo di vita riferiti all'unità funzionale nelle due configurazioni descritte al Paragrafo 1.1.1. In dettaglio, come già indicato nei paragrafi precedenti, le configurazioni analizzate sono:

- configurazione 1: un edificio residenziale in cui l'isolamento termico dell'involucro è realizzato con polistirene espanso estruso (XPS) e dotato di un sistema impiantistico costituito da due pompe di calore, un impianto solare termico, due accumuli termici e un impianto fotovoltaico connesso alla rete e ad un accumulo elettrico.
- configurazione 2: un edificio residenziale in cui l'isolamento termico dell'involucro è realizzato con fibre di cellulosa (FC) e dotato di un sistema impiantistico costituito da due pompe di calore, un impianto solare termico, due accumuli termici e un impianto fotovoltaico connesso alla rete.

Nella Tabella 68 sono sintetizzati i valori di energia incorporata riferiti all'unità funzionale in entrambe le configurazioni esaminate.

Dall'analisi è emerso che nella configurazione 1 l'EE di ciclo di vita è pari a 9,99E+06 MJ di energia primaria di cui il 66,7% costituito da energia primaria non rinnovabile. Nella configurazione 2, l'EE è pari a 1,07E+07

MJ di energia primaria di cui il 75,3% costituito da energia primaria non rinnovabile. La configurazione 1 presenta un valore di EE minore del 6,5% rispetto alla configurazione 2.

Tabella 68 44. Energia incorporata di ciclo di vita – Configurazione 1 e Configurazione 2

Categoria	Configurazione 1	Configurazione 2
EE (MJ)	9,99E+06	1,07E+07
EE _{nr} (MJ)	6,66E+06	8,98E+06
EE _r (MJ)	3,33E+06	2,75E+06

Per un'analisi più dettagliata, nella Tabella 69 sono riportati i contributi in valore assoluto delle fasi del ciclo di vita al consumo totale di energia primaria distinti per componenti d'impianto e di involucro, mentre nelle Figure 48 e 49 sono riportati i contributi percentuali delle fasi del ciclo di vita al consumo totale di energia primaria, rispettivamente, per la configurazione 1 e la configurazione 2.

Tabella 69: Energia incorporata di ciclo di vita – Analisi di contributo - Configurazione 1 e Configurazione 2

Categoria	Modulo A		Modulo B4		Modulo B6	Modulo C	
	Involucro	Impianto	Involucro	Impianto	Consumo energetico	Involucro	Impianto
EE – Conf. 1 (MJ)	2,57E+06	8,43E+05	8,30E+05	1,30E+06	4,23E+06	2,169E+05	2,103E+03
EE – Conf. 2 (MJ)	2,23E+06	7,42E+05	4,89E+05	1,10E+06	5,91E+06	2,175E+05	2,103E+03

Dall'analisi dei dati emerge che l'EE nella fase di produzione dei componenti di involucro e di impianto (modulo A) è minore nella configurazione 1 di circa il 13% rispetto alla configurazione 2. L'EE connessa agli interventi di sostituzione dei componenti di involucro e di impianto (modulo B4) è minore nella configurazione 1 di circa il 26% rispetto alla configurazione 2. Le variazioni di EE connesse ai trattamenti di fine vita dei componenti di involucro e di impianto sono trascurabili poiché gli scenari di fine vita delle due configurazioni esaminate differiscono solo per lo smaltimento finale del materiale isolante. L'EE dei trattamenti di fine vita connessa alla configurazione 2 è maggiore dello 0,3% rispetto alla configurazione 1. Infine, l'EE connessa alla fase d'uso (modulo B6) è maggiore nella configurazione 2 di circa il 40% rispetto alla configurazione 1. Pertanto, sebbene la configurazione 2 presenti valori inferiori di EE nelle fasi di produzione (modulo A) e di sostituzione (modulo B4), l'EE incorporata di ciclo di vita è maggiore per via del contributo elevato connesso alla fase d'uso. Il contributo dell'energia consumata durante la fase d'uso (modulo B6) all'EE di ciclo di vita è pari al 42% nella configurazione 1 e al 55% nella configurazione 2. Sebbene il consumo energetico di fase d'uso sia lo stesso in entrambe le configurazioni esaminate, nella configurazione 2 una quota maggiore di questo consumo è soddisfatto con energia elettrica importata dalla rete, che presenta per kWh un impatto maggiore in termini di consumo di energia primaria rispetto all'energia elettrica generata dall'impianto fotovoltaico.

Inoltre, dai grafici illustrati nella Figura 103 e Figura 104 emerge che in entrambe le configurazioni esaminate la fase d'uso (modulo B), che include gli interventi di sostituzione dei componenti di involucro e di impianto (modulo B4) e i consumi energetici (modulo B6), è responsabile del maggior contributo all'EE di ciclo di vita. In dettaglio, essa incide sull'EE con percentuali pari al 64% nella configurazione 1 e al 70% nella configurazione 2. La fase di produzione dei componenti di impianto e di involucro incide sull'EE con percentuali pari al 34% nella configurazione 1 e al 28% nella configurazione 2. I trattamenti di fine vita dei componenti di involucro ed impianto incidono sull'EE per meno del 2,5% in entrambe le configurazioni esaminate.

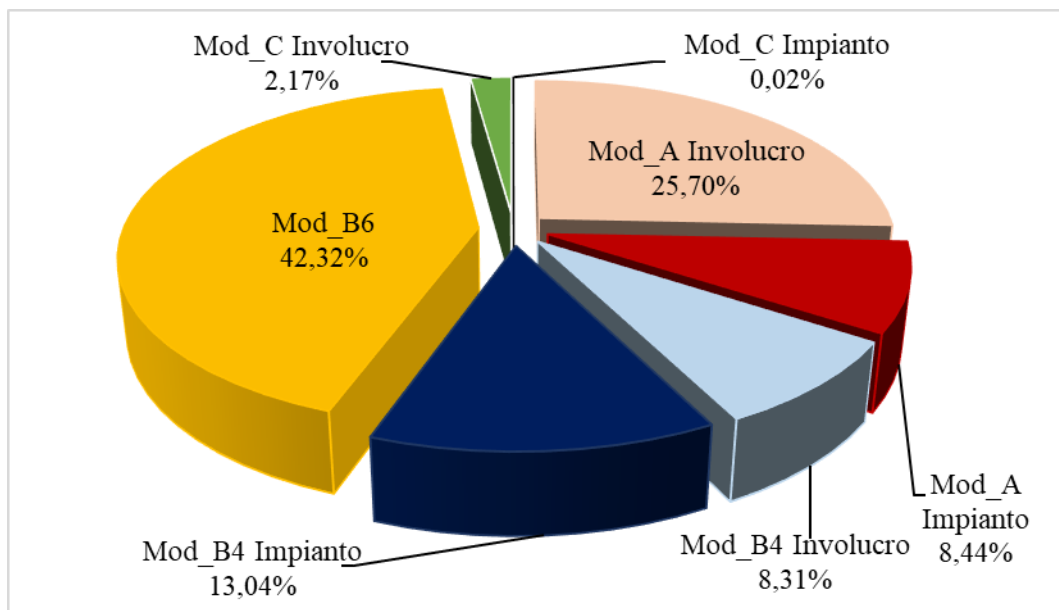


Figura 103: Energia incorporata di ciclo di vita – Analisi di contributo - Configurazione 1

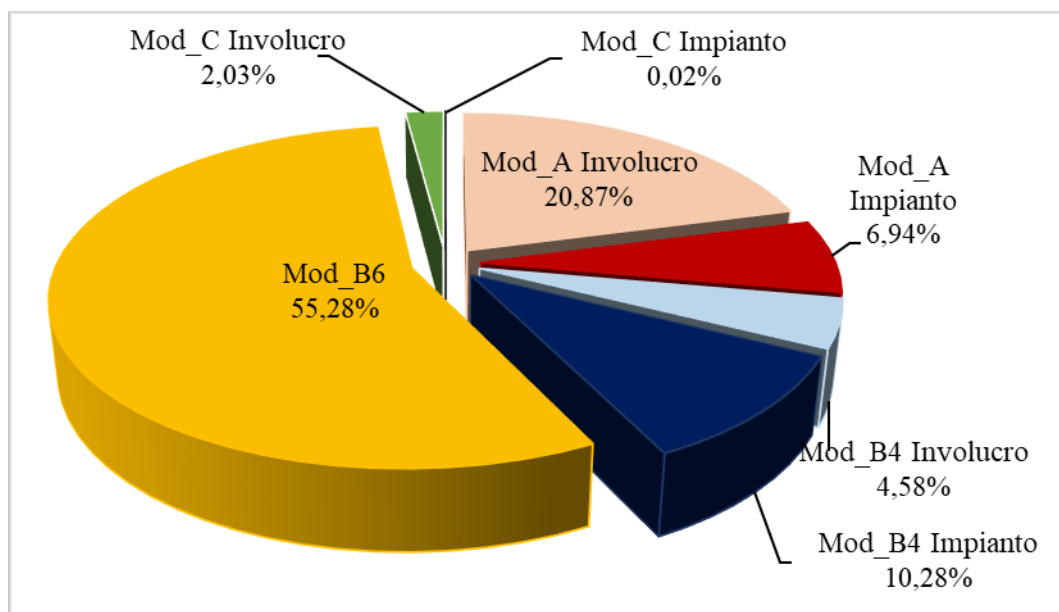


Figura 104: Energia incorporata di ciclo di vita – Analisi di contributo - Configurazione 2

Nella Tabella 70 sono sintetizzati gli impatti ambientali di ciclo di vita connessi all'UF in entrambe le configurazioni esaminate e le variazioni percentuali degli impatti connessi alla configurazione 1 rispetto a quelli della configurazione 2. Nella Tabella 71 e Tabella 72 sono riportati i contributi in valore assoluto delle fasi del ciclo di vita agli impatti ambientali distinti per componenti d'impianto e di involucro, rispettivamente per la configurazione 1 e la configurazione 2.

Dall'analisi dei dati emerge che la configurazione 1 presenta prestazioni ambientali migliori in quasi tutte le categorie di impatto esaminate ad eccezione della categoria "cambiamento climatico – contributo dell'uso del suolo e del cambiamento dell'uso del suolo". In questa categoria di impatto ambientale, i benefici ambientali connessi alla riduzione dell'import di energia elettrica dalla rete sono controbilanciati dal maggior contributo connesso alla presenza dell'accumulo elettrico. In tutte le altre categorie ambientali, la

configurazione 1 presenta impatti ambientali minori rispetto alla configurazione 2 grazie alla riduzione dell'importazione dalla rete elettrica. Inoltre, con riferimento alla categoria "cambiamento climatico – contributo biogenico" si evidenzia che nella configurazione 1 il contributo è negativo mentre nella configurazione 2 positivo.

Tabella 70: Impatti ambientali di ciclo di vita – Configurazione 1 e Configurazione 2

Categoria d'impatto	Configurazione 1	Configurazione 2	(Configurazione 1 - Configurazione 2)/ Configurazione 2
GWP (kg CO _{2eq})	5,02E+05	5,90E+05	-14,89%
GWP _f (kg CO _{2eq})	5,10E+05	5,87E+05	-13,06%
GWP _b (kg CO _{2eq})	-8,51E+03	2,76E+03	-408,54%
GWP _{LULUC} (kg CO _{2eq})	4,51E+02	4,38E+02	2,98%
ODP (kg CFC-11 _{eq})	2,48E-01	2,67E-01	-7,10%
AP (mol H ⁺ _{eq})	3,50E+03	4,02E+03	-12,87%
EP _{FW} (kg PO _{4eq})	2,32E+02	2,63E+02	-11,81%
EP _M (kg N _{eq})	5,51E+02	6,30E+02	-12,60%
EP _T (mol N _{eq})	7,10E+03	8,24E+03	-13,86%
POCP (kg NMVOC _{eq})	1,70E+03	1,82E+03	-6,70%
ADP _{m&m} (kg Sb _{eq})	8,71E+01	8,74E+01	-0,38%
WDP (m ³ _{world eq. Deprived})	2,13E+05	2,60E+05	-18,02%
PM (Potenziale di incidenza)	5,90E-02	6,04E-02	-2,33%
IR (kBq U ²³⁵ _{eq})	4,38E+04	5,93E+04	-26,19%
E _{FW} (CTUe)	1,79E+07	1,90E+07	-5,90%
HT-nce (CTU _h)	1,94E-02	1,99E-02	-2,54%
HT-ce (CTU _h)	7,43E-04	7,61E-04	-2,31%
LU (-)	4,00E+06	4,95E+06	-19,22%

Tabella 71: Impatti ambientali di ciclo di vita – Analisi di contributo - Configurazione 1

Categoria d'impatto	Modulo A		Modulo B4		Modulo B6	Modulo C	
	Involucro	Impianto	Involucro	Impianto	Consumo energetico	Involucro	Impianto
GWP (kg CO _{2eq})	1,59E+05	5,46E+04	4,66E+04	1,02E+05	1,12E+05	2,54E+04	3,08E+03
GWP _f (kg CO _{2eq})	1,80E+05	5,43E+04	4,64E+04	1,02E+05	1,03E+05	2,19E+04	3,08E+03
GWP _b (kg CO _{2eq})	-2,10E+04	1,99E+02	1,61E+02	-5,76E+01	8,81E+03	3,42E+03	2,59E+00
GWP _{LULUC} (kg CO _{2eq})	1,59E+02	9,06E+01	4,42E+01	1,35E+02	1,99E+01	1,79E+00	7,59E-02
ODP (kg CFC-11 _{eq})	1,42E-02	5,48E-02	4,82E-03	1,57E-01	1,42E-02	3,04E-03	3,73E-05
AP (mol H ⁺ _{eq})	7,42E+02	6,27E+02	1,94E+02	1,29E+03	5,64E+02	8,38E+01	1,99E+00
EP _{FW} (kg PO _{4eq})	4,05E+01	5,38E+01	8,10E+00	9,96E+01	2,96E+01	6,41E-01	4,04E-02
EP _M (kg N _{eq})	1,91E+02	6,72E+01	4,33E+01	1,19E+02	7,86E+01	5,09E+01	6,45E-01
EP _T (mol N _{eq})	1,83E+03	1,09E+03	3,44E+02	2,42E+03	1,04E+03	3,66E+02	5,64E+00
POCP (kg NMVOC _{eq})	5,69E+02	2,26E+02	1,65E+02	3,98E+02	2,40E+02	1,03E+02	1,50E+00
ADP _{m&m} (kg Sb _{eq})	1,10E+01	2,09E+01	3,52E-01	5,39E+01	8,09E-01	8,96E-02	1,91E-03
WDP (m ³ _{world eq. Deprived})	6,25E+04	3,33E+04	1,48E+04	4,14E+04	6,04E+04	6,48E+02	6,49E+01
PM (Potenziale di incidenza)	3,90E-02	4,01E-03	1,82E-03	7,99E-03	2,22E-03	3,98E-03	1,87E-05
IR (kBq U ²³⁵ _{eq})	1,29E+04	6,64E+03	3,13E+03	7,39E+03	1,27E+04	1,00E+03	1,35E+01
E _{FW} (CTUe)	3,07E+06	4,06E+06	8,25E+05	8,40E+06	1,35E+06	1,36E+05	1,56E+04

HT-nce (CTU _h)	3,07E-03	4,76E-03	4,54E-04	1,00E-02	9,67E-04	1,17E-04	1,06E-05
HT-ce (CTU _h)	2,07E-04	1,41E-04	2,33E-05	3,33E-04	3,42E-05	4,04E-06	2,32E-07
LU (-)	2,22E+06	2,62E+05	1,19E+05	4,72E+05	6,08E+05	3,18E+05	1,21E+03

In dettaglio, la configurazione 2 ha un contributo negativo sulla categoria “cambiamento climatico – contributo biogenico” maggiore rispetto alla configurazione 1 nella fase di produzione (modulo A) e di sostituzione (modulo B4) dei componenti di involucro, connesso principalmente alla presenza dell’isolante termico in fibra di cellulosa. Tuttavia, nella configurazione 1 la presenza dell’accumulo elettrico aumenta il contributo negativo su questa categoria nella fase di sostituzione (modulo B4) dei componenti d’impianto rispetto alla configurazione 2. Inoltre, grazie alla riduzione dell’import di energia elettrica dalla rete dovuto alla presenza dell’accumulo elettrico, la configurazione 1 ha un impatto positivo sul “cambiamento climatico – contributo biogenico” connesso agli usi energetici di ciclo di vita (modulo B6) minori di circa il 60% rispetto a quello della configurazione 2. Pertanto, l’impatto di ciclo vita risulta negativo per la configurazione 1 anche grazie alla riduzione dell’import di energia elettrica dalla rete.

Tabella 72: Impatti ambientali di ciclo di vita – Analisi di contributo - Configurazione 2

Categoria d'impatto	Modulo A		Modulo B4		Modulo B6	Modulo C	
	Involucro	Impianto	Involucro	Impianto	Consumo energetico	Involucro	Impianto
GWP (kg CO _{2eq})	1,44E+05	4,82E+04	1,97E+04	8,90E+04	2,72E+05	1,36E+04	3,08E+03
GWP _f (kg CO _{2eq})	1,66E+05	4,80E+04	2,01E+04	8,89E+04	2,51E+05	1,02E+04	3,08E+03
GWP _b (kg CO _{2eq})	-2,17E+04	2,04E+02	-4,97E+02	-4,61E+01	2,14E+04	3,42E+03	2,59E+00
GWP _{LULUC} (kg CO _{2eq})	1,61E+02	7,58E+01	4,57E+01	1,05E+02	4,84E+01	1,78E+00	7,59E-02
ODP (kg CFC-11 _{eq})	1,40E-02	5,44E-02	4,68E-03	1,56E-01	3,45E-02	3,05E-03	3,73E-05
AP (mol H ⁺ _{eq})	7,00E+02	5,60E+02	1,49E+02	1,16E+03	1,37E+03	8,29E+01	1,99E+00
EP _{FW} (kg PO _{4eq})	3,96E+01	5,07E+01	7,14E+00	9,33E+01	7,19E+01	6,34E-01	4,04E-02
EP _M (kg N _{eq})	1,85E+02	6,07E+01	3,62E+01	1,06E+02	1,91E+02	5,03E+01	6,45E-01
EP _T (mol N _{eq})	1,76E+03	1,02E+03	2,71E+02	2,28E+03	2,54E+03	3,61E+02	5,64E+00
POCP (kg NMVOC _{eq})	4,94E+02	2,03E+02	8,76E+01	3,52E+02	5,83E+02	1,02E+02	1,50E+00
ADP _{m&m} (kg Sb _{eq})	1,13E+01	2,05E+01	6,17E-01	5,30E+01	1,97E+00	8,97E-02	1,91E-03
WDP (m ³ _{world eq. Deprived})	5,27E+04	2,67E+04	4,86E+03	2,81E+04	1,47E+05	6,29E+02	6,49E+01
PM (Potenziale di incidenza)	3,87E-02	3,63E-03	1,50E-03	7,22E-03	5,39E-03	3,99E-03	1,87E-05
IR (kBq U ²³⁵ _{eq})	1,25E+04	6,02E+03	2,70E+03	6,16E+03	3,09E+04	1,00E+03	1,35E+01
E _{FW} (CTUe)	3,07E+06	3,80E+06	8,09E+05	7,87E+06	3,28E+06	1,27E+05	1,56E+04
HT-nce (CTU _h)	3,08E-03	4,47E-03	4,39E-04	9,45E-03	2,35E-03	9,68E-05	1,06E-05

HT-ce (CTU _h)	2,06E-04	1,32E-04	2,17E-05	3,14E-04	8,32E-05	3,56E-06	2,32E-07
LU (-)	2,30E+06	2,37E+05	1,95E+05	4,22E+05	1,48E+06	3,20E+05	1,21E+03

Nella Figura 105 e Figura 106 sono riportati i contributi percentuali delle fasi del ciclo di vita, rispettivamente, per la configurazione 1 e la configurazione 2. Dall'analisi dei dati emerge che in entrambi gli scenari esaminati la fase d'uso (modulo B), che include gli interventi di sostituzione (modulo B4) e i consumi energetici (modulo B6), è responsabile del maggior contributo agli impatti ambientali in tutte le categorie esaminate. In dettaglio, il contributo agli impatti di tale fase varia da un valore minimo pari a circa il 20% sulla categoria "emissione di particolato" ad un valore massimo pari a circa al 70% sul "riduzione dello strato di ozono" in entrambe le configurazioni esaminate. Un'analisi più dettagliata ha evidenziato che il modulo B4 incide sugli impatti con contributi variabili tra il 15% nella configurazione 1 e il 12% nella configurazione 2 sulla categoria "uso e qualità del suolo" e il 65% nella configurazione 1 e il 61% nella configurazione 2 sulla categoria "riduzione dello strato di ozono". Nella configurazione 1, l'energia consumata durante la fase d'uso è responsabile di un contributo agli impatti ambientali variabile da un valore minimo pari allo 0,9% sulla categoria "depauperamento delle risorse abiotiche - minerali e metalli" ad un valore massimo pari a circa il 30% sulle categorie "radiazione ionizzante" e "consumo della risorsa idrica", mentre nella configurazione 2 il suo contributo varia dal 2% sulla categoria "depauperamento delle risorse abiotiche - minerali e metalli" ad 56% sulla categoria "consumo della risorsa idrica". Nella configurazione 2 il contributo del modulo B6 all'impatto sulla "radiazione ionizzante" è pari al 52%.

La fase di produzione dei componenti d'involucro e di impianto incide con percentuali variabili da un valore minimo pari a circa il 27% sul "riduzione dello strato di ozono" ad un valore massimo pari al 70% sulla "emissione di particolato", in entrambe le configurazioni esaminate. Infine, i trattamenti di fine vita dei componenti di involucro e di impianto incidono sugli impatti ambientali con contributi inferiori al 5% in quasi tutte le categorie ambientali con le eccezioni dell'"eutrofizzazione delle acque marine", della "formazione di ozono fotochimico", della "emissione di particolato" e dell'"uso e qualità del suolo" alle quali contribuiscono con percentuali variabili tra il 6% e il 9%.

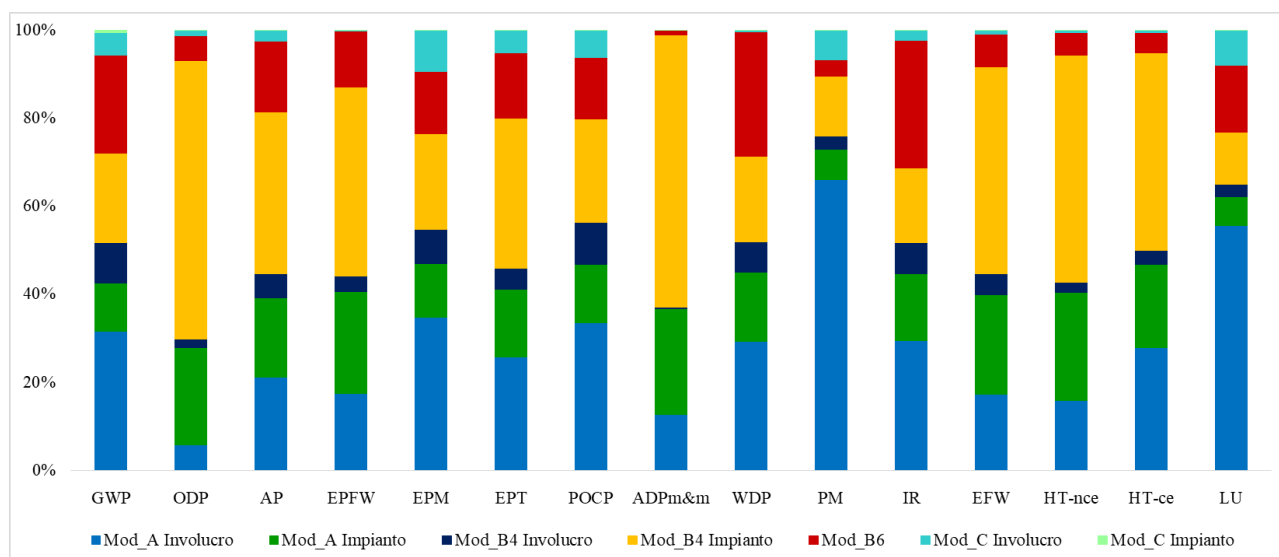


Figura 105: Impatti ambientali di ciclo di vita – Analisi di contributo - Configurazione 1

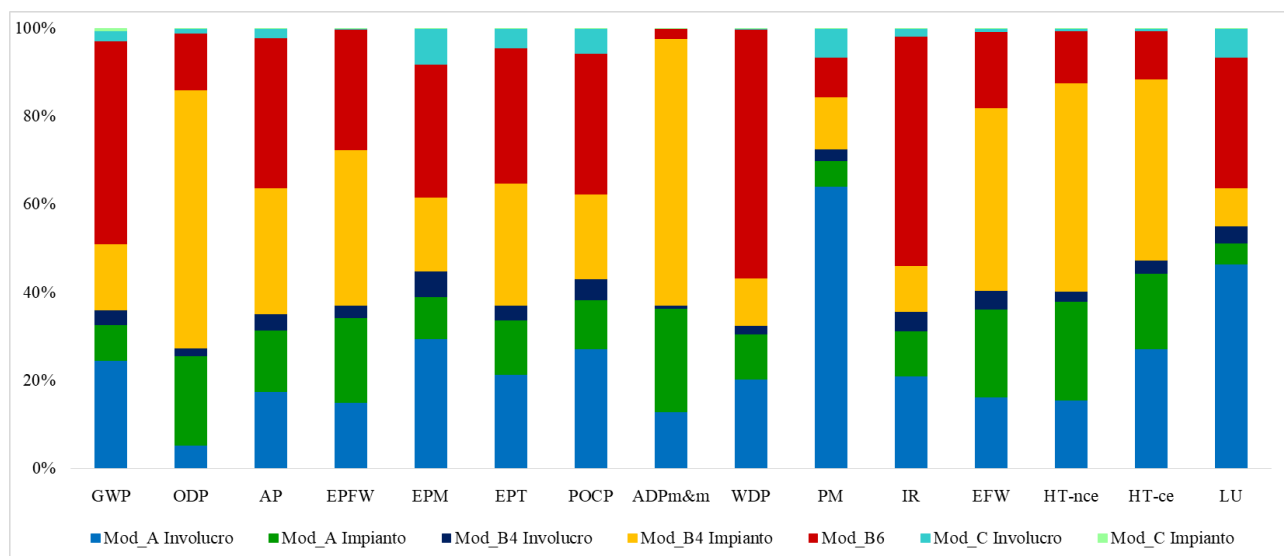


Figura 106: Impatti ambientali di ciclo di vita – Analisi di contributo - Configurazione 1

Nella Tabella 73 e Tabella 74 sono sintetizzati gli impatti energetico ambientale di ciclo di vita e i benefici ambientali in termini di impatti ambientali evitati connessi all'immissione in rete del surplus di energia elettrica generata in situ dall'impianto fotovoltaico, rispettivamente, per la configurazione 1 e la configurazione 2. I benefici ambientali sono maggiori nello scenario SAE poiché in questo scenario è maggiore la quota di energia rinnovabile generata in situ che viene immessa rete rispetto allo scenario CAE in cui l'installazione di un accumulo elettrico consente di incrementare la quota di energia rinnovabile consumata dall'edificio.

Tabella 73: Impatti ambientali di ciclo di vita e crediti ambientali - Configurazione 1

Categoria di impatto	Ciclo di vita	Crediti ambientali (Modulo D)
EE (MJ)	9,99E+06	-1,95E+06
GWP (kg CO _{2eq})	5,02E+05	-1,03E+05
GWP _f (kg CO _{2eq})	5,10E+05	-9,49E+04
GWP _b (kg CO _{2eq})	-8,51E+03	-8,10E+03
GWP _{LULUC} (kg CO _{2eq})	4,51E+02	-1,83E+01
ODP (kg CFC-11 _{eq})	2,48E-01	-1,30E-02
AP (mol H ⁺ _{eq})	3,50E+03	-5,18E+02
EP _{FW} (kg PO _{4eq})	2,32E+02	-2,72E+01
EP _M (kg N _{eq})	5,51E+02	-7,22E+01
EP _T (mol N _{eq})	7,10E+03	-9,59E+02
POCP (kg NMVOC _{eq})	1,70E+03	-2,20E+02
ADP _{m&m} (kg Sb _{eq})	8,71E+01	-7,44E-01
WDP (m ³ _{world eq. Deprived})	2,13E+05	-5,55E+04
PM (Potenziale di incidenza)	5,90E-02	-2,04E-03
IR (kBq U ²³⁵ _{eq})	4,38E+04	-1,17E+04
EFW (CTUe)	1,79E+07	-1,24E+06
HT-nce (CTU _h)	1,94E-02	-8,89E-04
HT-ce (CTU _h)	7,43E-04	-3,14E-05

Nella configurazione 1, i crediti ambientali riducono gli impatti energetico ambientali di ciclo di vita di percentuali variabili dallo 0,9% sulla categoria “depauperamento delle risorse abiotiche - minerali e metalli” al 27% sulla categoria “radiazione ionizzante”, mentre nella configurazione 2 gli impatti si riducono di percentuali variabili dall’2,3% sulla categoria “depauperamento delle risorse abiotiche - minerali e metalli” al 58% sulla categoria “radiazione ionizzante”. Il contributo al sequestro di carbonio biogenico (cambiamento climatico – contributo biogenico) aumenta di circa il 95% nella configurazione 1, mentre nella configurazione 2 il contributo alla categoria “cambiamento climatico – contributo biogenico” diventa negativo se si considerano i crediti ambientali.

Tabella 74: Impatti ambientali di ciclo di vita e crediti ambientali - Configurazione 2

Categoria di impatto	Ciclo di vita	Crediti ambientali (Modulo D)
EE (MJ)	1,07E+07	-5,27E+06
GWP (kg CO _{2eq})	5,90E+05	-2,79E+05
GWP _f (kg CO _{2eq})	5,87E+05	-2,57E+05
GWP _b (kg CO _{2eq})	2,76E+03	-2,19E+04
GWP _{LULUC} (kg CO _{2eq})	4,38E+02	-4,95E+01
ODP (kg CFC-11 _{eq})	2,67E-01	-3,53E-02
AP (mol H ⁺ _{eq})	4,02E+03	-1,40E+03
EP _{FW} (kg PO _{4eq})	2,63E+02	-7,36E+01
EP _M (kg N _{eq})	6,30E+02	-1,96E+02
EP _T (mol N _{eq})	8,24E+03	-2,60E+03
POCP (kg NMVOC _{eq})	1,82E+03	-5,96E+02
ADP _{m&m} (kg Sb _{eq})	8,74E+01	-2,01E+00
WDP (m ³ world eq. Deprived)	2,60E+05	-1,50E+05
PM (Potenziale di incidenza)	6,04E-02	-5,51E-03
IR (kBq U ²³⁵ _{eq})	5,93E+04	-3,17E+04
E _{FW} (CTUe)	1,90E+07	-3,36E+06
HT-nce (CTU _h)	1,99E-02	-2,41E-03
HT-ce (CTU _h)	7,61E-04	-8,51E-05
LU (-)	4,95E+06	-1,51E+06

6. Conclusioni

Il presente report si divide in due sezioni.

La prima sezione propone di descrivere le fasi attraverso le quali si sviluppa uno studio di *Life Cycle Assessment* con particolare riferimento all'applicazione della metodologia al sistema edificio. Il report è stato redatto sulla base di differenti studi di letteratura relativi alla metodologia LCA applicata agli edifici e alle norme internazionali sulla sostenibilità ambientale delle costruzioni.

La metodologia LCA è stata esaminata nel dettaglio e le regole generali sono state declinate al caso studio specifico degli edifici, allo scopo di fornire delle indicazioni metodologiche che consentano una corretta applicazione della metodologia.

Infine, nella parte finale della sezione è stato affrontato il tema dell'energia incorporata negli edifici e dei principali aspetti metodologici coinvolti nella sua quantificazione.

La seconda sezione del report ha analizzato i dettagli termofisici e prestazionali del caso studio modellizzato e simulato in regime dinamico, così come concordato con la committenza. La scelta è ricaduta su un edificio isolato multifamiliare conforme ai requisiti prestazionali della normativa Italiana in materia di nuove edificazioni. Per l'edificio sono stati sostanzialmente previsti due scenari caratterizzati tuttavia dalle stesse geometrie e scelte impiantistiche; nel primo caso si utilizza un isolante termico convenzionale e un accumulo energetico, nel secondo caso si utilizza un isolante naturale e non si è previsto l'uso di alcun sistema di accumulo.

Lo studio evidenzia come nel caso analizzato si riesca a raggiungere un sostanziale pareggio di bilancio tra l'energia generata in sito e quella consumata nel corso di un anno di analisi. Si tratta di un risultato potenzialmente estendibile a edifici di caratteristiche analoghe a quello indagato, anche con riferimento alle scelte e alle assunzioni illustrate in precedenza.

L'analisi termofisica ha inoltre evidenziato una sostanziale equivalenza tra le due configurazioni proposte in termini di prestazioni energetiche del sistema fabbricato – impianto, come era prevedibile vista la sostanziale equivalenza delle prestazioni termofisiche dell'involucro. Il sistema di accumulo modifica invece i risultati in termini di interazione con la rete e di *load match*: si evidenziano flussi di energia da e verso la rete significativamente inferiori nello scenario che implementa il sistema di accumulo elettrico rispetto a quello che ne è sprovvisto.

Con riferimento all'applicazione della metodologia LCA per la valutazione delle prestazioni energetico – ambientali di ciclo di vita di un edificio ad uso residenziale ad energia netta zero nella fase d'uso, l'analisi è stata effettuata con riferimento ai componenti edilizi e ai componenti d'impianto integrati, necessari all'edificio in esame per raggiungere il target di edificio ad energia netta zero nella fase d'uso considerando due diverse configurazioni. In una prima configurazione l'isolamento termico dell'involucro edilizio è realizzato con polistirene espanso estruso e l'impianto fotovoltaico è connesso alla rete e ad un accumulo elettrico. Nella seconda configurazione l'isolamento termico dell'involucro edilizio è realizzato con fibre di cellulosa e non è presente l'accumulo elettrico.

L'applicazione della metodologia LCA ha consentito di stimare gli impatti energetico – ambientali di ciclo di vita connessi all'unità funzionale e di identificare il contributo connesso ad ogni fase del ciclo di vita. Inoltre sono stati confrontati gli impatti energetico – ambientali ottenuti nelle due configurazioni esaminate. Dallo studio è emerso che in entrambe le configurazioni la fase d'uso dell'edificio, che include gli impatti connessi alla fase di sostituzione dei componenti di involucro e di impianto e agli usi energetici, è responsabile del maggior contributo agli impatti su quasi tutte le categorie esaminate, seguita dalla fase di produzione dei componenti di involucro e di impianto.

Dal confronto degli impatti energetico – ambientali è emerso che la configurazione 1 ha migliori performance in quasi tutte le categorie esaminate poiché i benefici energetico - ambientali connessi alla riduzione dell'import di energia elettrica dalla rete sono superiori degli impatti energetico - ambientali connessi alla fase di produzione e di sostituzione dell'accumulo elettrico e all'impiego del materiale isolante in polistirene espanso estruso, che incide sugli impatti in misura maggiore rispetto al materiale isolante in fibre di cellulosa.

7. Riferimenti bibliografici

- [1] European Union, Directive (EU) 2018/844 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings and Directive 2012/27/EU on energy efficiency, Off. J. Eur. Union. 2018 (2018) 75–91.
- [2] European Commission, Roadmap to a Resource Efficient Europe - COM(2011) 571 final, 2011. doi:COM(2011) 571 final.
- [3] European Commission, European Construction Sector Observatory. Analytical Report – Improving energy and resource efficiency, (2018).
- [4] OECD, Global Material Resources Outlook to 2060. Economic Drivers and Environmental Consequences, Glob. Mater. Resour. Outlook to 2060. (2018). doi:10.1787/9789264307452-en.
- [5] European Commission, Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. The European Green Deal. Brussels, 11.12.2019 COM(2019) 640 final COMMUNICATION, 2019. doi:10.2307/j.ctvd1c6zh.7.
- [6] M. Cellura, M. Fontana, F. Guarino, S. Longo, M. Mistretta, Valutare la qualità energetico-ambientale nell'edilizia pubblicato in Valutazione Ambientale - Dossier 23: valutazione della green economy. Rivista della Associazione analisti ambientali. Edicom edizioni., 2013.
- [7] EC, Integrated Product Policy: Building on Environmental Life-Cycle Thinking, Comm. Eur. Communities. COM(2003) 302 Final. (2003). doi:10.1080/13880290902938435.
- [8] D. Pennington, M.A. Wolf, R. Bersani, U. Pretato, Overcoming barriers to the broader implementation of life cycle thinking in business and public administration, Int. J. Life Cycle Assess. (2007). doi:10.1065/lca2007.07.355.
- [9] ISO, ISO 14040: Environmental management — Life Cycle Assessment — Principles and Framework, 2006. doi:10.1002/jtr.
- [10] ISO, ISO 14044: Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines, 2006. doi:10.1136/bmj.332.7555.1418.
- [11] M. Weißenberger, W. Jensch, W. Lang, The convergence of life cycle assessment and nearly zero-energy buildings: The case of Germany, Energy Build. (2014). doi:10.1016/j.enbuild.2014.03.028.
- [12] European Parliament, DIRETTIVA 2010/31/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO del 19 maggio 2010 sulla prestazione energetica nell'edilizia, Off. J. Eur. Union. (2010). doi:doi:10.3000/17252555.L_2010.153.eng.
- [13] Unione Europea, DIRETTIVA (UE) 2018/844 DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO del 30 maggio 2018 che modifica la direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell'edilizia e la direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica. Gazzetta ufficiale dell'Unione europea., 2018.
- [14] CEN/TC 350, EN 15978: 2011 - Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance of buildings - Calculation method, Int. Stand. (2011).
- [15] CEN/TC 350, EN 15804: 2012. Sustainability of construction works — Environmental product declarations — Core rules for the product category of construction products, 2012.
- [16] EC - JRC, European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability. International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance. First edition March 2010. EUR 24708 E, 2010.
- [17] European Commission, Recommendation 2013/179/EU on the use of common methods to measure and communicate the life cycle environmental performance of products and organisations, Off. J. Eur. Union. (2013) 210. doi:doi:10.3000/19770677.L_2013.124.eng.
- [18] N. Dodd, M. Cordella, M. Traverso, S. Donatello, Level(s) - Un quadro di riferimento comune dell'UE per i principali indicatori in materia di sostenibilità degli edifici residenziali e a uso ufficio: Parti 1 e 2, EUR 28899EN, Commissione europea, Lussemburgo, 2017, ISBN 978-92-79-76914-6, doi 10.2760/82, (2017).
- [19] H. Gervasio, S. Dimova, Model for Life Cycle Assessment (LCA) of buildings, EUR 29123 EN, Publications

- Office of the European Union, 2018, ISBN 978-92-79-79973-0, doi:10.2760/10016, JRC110082., 2018.
- [20] European Council, Directive 2008/98/CE of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives., Off. J. Eur. Union. (2008).
- [21] EC-JRC - Institute for Environment and Sustainability, International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook -- General guide for Life Cycle Assessment -- Detailed guidance, 2010. doi:10.2788/38479.
- [22] EC - JRC - Institute for Environment and Sustainability, Characterisation factors of the ILCD Recommended Life Cycle Impact Assessment methods. Database and Supporting Information. First edition. February 2012. EUR 25167. Luxembourg. Publications Office of the European Union; 2012., 2012. doi:10.2788/60825.
- [23] IPCC, IPCC Climate Change Fourth Assessment Report: Climate Change 2007. <http://www.ipcc.ch/ipcreports/assessments-reports.htm>, 2007.
- [24] WMO, Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1998. Global Ozone Research and Monitoring Project - Report No. 44, ISBN 92-807-1722-7, Geneva., (1999).
- [25] R.K. Rosenbaum, T.M. Bachmann, L.S. Gold, M.A.J. Huijbregts, O. Jolliet, R. Juraske, A. Koehler, H.F. Larsen, M. MacLeod, M. Margni, T.E. McKone, J. Payet, M. Schuhmacher, D. Van De Meent, M.Z. Hauschild, USEtox - The UNEP-SETAC toxicity model: Recommended characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in life cycle impact assessment, *Int. J. Life Cycle Assess.* (2008). doi:10.1007/s11367-008-0038-4.
- [26] S. Humbert, Geographically Differentiated Life-cycle Impact Assessment of Human Health. Doctoral dissertation, University of California, Berkeley, Berkeley, California, USA., 2009.
- [27] Dreicer, M., V. Tort, P. Manen, ExternE, Externalities of Energy, Vol. 5 Nuclear, Centr d'étude sur l'Evaluation de la Protection dans le domaine nucléaire (CEPN), edited by the European Commission DGXII, Science, Research and development JOULE, Luxembourg., (1995).
- [28] R. Van Zelm, M.A.J. Huijbregts, H.A. Den Hollander, S.F.J. Van Jaarsveld, H.A., J. Struijs, H.J. Van Wijnen, D. Van de Meent, European characterization factors for human health damage of PM10 and ozone in life cycle impact assessment. *Atmospheric Environment* 42, 441-453., (2008).
- [29] J. Seppälä, M. Posch, M. Johansson, J.P. Hettelingh, Country-dependent characterisation factors for acidification and terrestrial eutrophication based on accumulated exceedance as an impact category indicator, in: *Int. J. Life Cycle Assess.*, 2006. doi:10.1065/lca2005.06.215.
- [30] M. Posch, J. Seppälä, J.P. Hettelingh, M. Johansson, M. Margni, O. Jolliet, The role of atmospheric dispersion models and ecosystem sensitivity in the determination of characterisation factors for acidifying and eutrophying emissions in LCIA, *Int. J. Life Cycle Assess.* (2008). doi:10.1007/s11367-008-0025-9.
- [31] J. Struijs, A. Beusen, H. van Jaarsveld, M.A.J. Huijbregts, Aquatic Eutrophication. Chapter 6 in: Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M.A.J., De Schryver, A., Struijs, J., Van Zelm, R. (2009). *ReCiPe 2008 A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and t*, (2009).
- [32] R. Frischknecht, R. Steiner, N. Jungbluth, Methode der ökologischen Knappheit – Ökofaktoren 2006, ö.b.u. und Bundesamt für Umwelt, Bern., (2008).
- [33] L. Van Oers, A. De Koning, J.B. Guinée, G. Huppes, Abiotic resource depletion in LCA. Improving characterisation factors for abiotic resource depletion as recommended in the new Dutch LCA handbook. RWS-DWW: Delft, The Netherlands, 2002. Available online: <http://www.leidenuniv.nl/cml/ssp/projects/lca2/repo>, (2002).
- [34] L. Milà I Canals, C. Bauer, J. Depestele, A. Dubreuil, R.F. Knuchel, G. Gaillard, O. Michelsen, R. Müller-Wenk, B. Rydgren, Key elements in a framework for land use impact assessment within LCA, *Int. J. Life Cycle Assess.* (2007). doi:10.1065/lca2006.05.250.
- [35] European Parliament and Council, Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain directives, Off. J. Eur. Union. (2008) 3–30. doi:2008/98/EC.; 32008L0098.
- [36] ISO, ISO 52000-1:2017 Energy performance of buildings — Overarching EPB assessment — Part 1:

- General framework and procedures, ISO. (2017).
- [37] M. Cellura, F. Guarino, S. Longo, M. Mistretta, Modeling the energy and environmental life cycle of buildings: A co-simulation approach, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 80 (2017) 733–742. doi:10.1016/j.rser.2017.05.273.
- [38] European Commission, Directorate General for Internal market, Industry, Entrepreneurship and SMEs. EU Construction & Demolition Waste Management Protocol, *Off. J. Eur. Union.* (2016). doi:10.3390/su11133638.
- [39] IPCC, Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report, *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, Ippc. (2013).
- [40] Y.G. Yohanis, B. Norton, Life-cycle operational and embodied energy for a generic single-storey office building in the UK, *Energy.* (2002). doi:10.1016/S0360-5442(01)00061-5.
- [41] M. Cellura, F. Guarino, S. Longo, M. Mistretta, Energy life-cycle approach in Net zero energy buildings balance: Operation and embodied energy of an Italian case study, *Energy Build.* 72 (2014) 371–381. doi:10.1016/j.enbuild.2013.12.046.
- [42] International Energy Agency, Energy in Buildings and Communities Programme - IEA EBC ANNEX 57 - Evaluation of Embodied Energy and CO₂eq for Building Construction (Annex 57) - Overview of Annex 57 Results, 2016. doi:https://doi.org/10.3929/ethz-b-000238666.
- [43] R. Azari, N. Abbasabadi, Embodied energy of buildings: A review of data, methods, challenges, and research trends, *Energy Build.* (2018). doi:10.1016/j.enbuild.2018.03.003.
- [44] EU, Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast), *Off. J. Eur. Union.* (2010) 13–35. doi:doi:10.3000/17252555.L_2010.153.eng.
- [45] M. Optis, P. Wild, Inadequate documentation in published life cycle energy reports on buildings, *Int. J. Life Cycle Assess.* (2010). doi:10.1007/s11367-010-0203-4.
- [46] T. Ramesh, R. Prakash, K.K. Shukla, Life cycle energy analysis of buildings: An overview, *Energy Build.* (2010). doi:10.1016/j.enbuild.2010.05.007.
- [47] G.A. Blengini, T. Di Carlo, The changing role of life cycle phases, subsystems and materials in the LCA of low energy buildings, *Energy Build.* (2010). doi:10.1016/j.enbuild.2009.12.009.
- [48] Y.L. Langston, C.A. Langston, Reliability of building embodied energy modelling: An analysis of 30 Melbourne case studies, *Constr. Manag. Econ.* (2008). doi:10.1080/01446190701716564.
- [49] S. Copiello, Economic implications of the energy issue: Evidence for a positive non-linear relation between embodied energy and construction cost, *Energy Build.* (2016). doi:10.1016/j.enbuild.2016.04.054.
- [50] I. Sartori, A.G. Hestnes, Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article, *Energy Build.* (2007). doi:10.1016/j.enbuild.2006.07.001.
- [51] C. Thormark, The effect of material choice on the total energy need and recycling potential of a building, *Build. Environ.* (2006). doi:10.1016/j.buildenv.2005.04.026.
- [52] P. Chastas, T. Theodosiou, D. Bikas, Embodied energy in residential buildings-towards the nearly zero energy building: A literature review, *Build. Environ.* (2016). doi:10.1016/j.buildenv.2016.05.040.
- [53] F. Ardente, M. Beccali, M. Cellura, M. Mistretta, Energy and environmental benefits in public buildings as a result of retrofit actions, *Renew. Sustain. Energy Rev.* (2011). doi:10.1016/j.rser.2010.09.022.
- [54] G.P. Hammond, C.I. Jones, Embodied energy and carbon in construction materials, *Proc. Inst. Civ. Eng. Energy.* (2008). doi:10.1680/ener.2008.161.2.87.
- [55] M.K. Dixit, J.L. Fernández-Solís, S. Lavy, C.H. Culp, Identification of parameters for embodied energy measurement: A literature review, *Energy Build.* (2010). doi:10.1016/j.enbuild.2010.02.016.
- [56] M.K. Dixit, Life cycle embodied energy analysis of residential buildings: A review of literature to investigate embodied energy parameters, *Renew. Sustain. Energy Rev.* (2017). doi:10.1016/j.rser.2017.05.051.
- [57] M. Raugei, S. Sgouridis, D. Murphy, V. Fthenakis, R. Frischknecht, C. Breyer, U. Bardi, C. Barnhart, A. Buckley, M. Carbajales-Dale, D. Csala, M. de Wild-Scholten, G. Heath, A. Jæger-Waldau, C. Jones, A. Keller, E. Leccisi, P. Mancarella, N. Pearsall, A. Siegel, W. Sinke, P. Stolz, Energy Return on Energy

- Invested (ERoEI) for photovoltaic solar systems in regions of moderate insolation: A comprehensive response, *Energy Policy*. (2017). doi:10.1016/j.enpol.2016.12.042.
- [58] C. Thormark, A low energy building in a life cycle - Its embodied energy, energy need for operation and recycling potential, *Build. Environ.* (2002). doi:10.1016/S0360-1323(01)00033-6.
- [59] M. Lucuik, P. Seguin, A. Reid, Material and operational environmental impacts of building insulation: How much is enough?, in: 2006 IEEE EIC Clim. Chang. Technol. Conf. EICCCC 2006, 2006. doi:10.1109/EICCCC.2006.277206.
- [60] F. Ardente, M. Beccali, M. Cellura, M. Mistretta, Building energy performance: A LCA case study of kenaf-fibres insulation board, *Energy Build.* (2008). doi:10.1016/j.enbuild.2006.12.009.
- [61] L. Gustavsson, A. Joelsson, R. Sathre, Life cycle primary energy use and carbon emission of an eight-storey wood-framed apartment building, *Energy Build.* (2010). doi:10.1016/j.enbuild.2009.08.018.
- [62] M.K. Dixit, Embodied energy and cost of building materials: correlation analysis, *Build. Res. Inf.* (2017). doi:10.1080/09613218.2016.1191760.
- [63] R. Lazzarin, F. Busato, F. Castellotti, Life cycle assessment and life cycle cost of buildings' insulation materials in Italy, *Int J Low-Carbon Technol.* 3(1) (2008) 44–58.
- [64] M. Cellura, A. Di Gangi, S. Longo, A. Orioli, An Italian input-output model for the assessment of energy and environmental benefits arising from retrofit actions of buildings, *Energy Build.* 62 (2013) 97–106. doi:10.1016/j.enbuild.2013.02.056.
- [65] M. Cellura, S. Longo, M. Mistretta, The energy and environmental impacts of Italian households consumptions: An input-output approach, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 15 (2011) 3897–3908. doi:10.1016/j.rser.2011.07.025.
- [66] Jeffrey D. Spitler. *Load Calculation Applications Manual*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. ISBN 978-1-933742-72-4
- [67] ASHRAE Handbook of Fundamentals, Capitolo 16 “Ventilation and infiltration”
- [68] Analysis of Load Match and Grid Interaction Indicators in NZEB with High-Resolution Data. Jaume Salom (coordinator) A report of Subtask A IEA Task 40/Annex 52 Towards Net Zero Energy Solar Buildings.
- [69] Igor Sartori, Assunta Napolitano, Karsten Voss, Net zero energy buildings: A consistent definition framework, *Energy and Buildings*, Volume 48, 2012, Pages 220-232, ISSN 0378-7788, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.01.032>.
- [70] F. Noris, E. Musall, J. Salom, B. Berggren, S. Østergaard Jensen, K. Lindberg, I. Sartori, Implications of weighting factors on technology preference in net zero energy buildings, *Energy and Buildings*, Volume 82, 2014, Pages 250-262, ISSN 0378-7788, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.004>.
- [71] Maurizio Cellura, Francesco Guarino, Sonia Longo, Marina Mistretta, Different energy balances for the redesign of nearly net zero energy buildings: An Italian case study, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 45, 2015, Pages 100-112, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.048>.
- [72] Maurizio Cellura, Francesco Guarino, Sonia Longo, Marina Mistretta, Energy life-cycle approach in Net zero energy buildings balance: Operation and embodied energy of an Italian case study, *Energy and Buildings*, Volume 72, 2014, Pages 371-381, ISSN 0378-7788, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.12.046>.
- [73] Maria Anna Cusenza, Francesco Guarino, Sonia Longo, Marina Mistretta, Maurizio Cellura, Reuse of electric vehicle batteries in buildings: An integrated load match analysis and life cycle assessment approach, *Energy and Buildings*, Volume 186, 2019, Pages 339-354, ISSN 0378-7788, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.01.032>.
- [74] R. Frischknecht, N. Jungbluth, H. Althaus, C. Bauer, G. Doka, R. Dones, R. Hirschier, S. Hellweg, S. Humbert, T. Köllner, Y. Loerincik, M. Margni, T. Nemecek, Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods. Ecoinvent report No. 3, v2.0, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf., (2007).
- [75] S. Fazio, V. Castellani, S. Sala, E. Schau, M. Secchi, L. Zampori, Supporting information to the characterisation factors of recommended EF Life Cycle Impact Assessment methods, EUR 28888 EN,

- European Commission, Ispra, 2018. ISBN 978-92-79-76742-5., 2019. doi:10.2760/671368, JRC109369.
- [76] G. Wernet, C. Bauer, B. Steubing, J. Reinhard, E. Moreno-Ruiz, B. Weidema, The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology, *Int. J. Life Cycle Assess.* 21 (2016) 1218–1230. doi:10.1007/s11367-016-1087-8.
- [77] M.A. Cusenza, S. Bobba, F. Ardente, M. Cellura, F. Di Persio, Energy and environmental assessment of a traction lithium-ion battery pack for plug-in hybrid electric vehicles, *J. Clean. Prod.* 215 (2019) 634–649. doi:10.1016/j.jclepro.2019.01.056.
- [78] European Union, Directive 2006/66/EC of the European Parliament and of the Council of 6 September 2006 on batteries and accumulators and waste batteries and accumulators and repealing Directive 91/157/EEC, OJ L 266, 2006.
- [79] European Commission, Directive 2012/19/EU of the European Parliament and of the council of 4 July 2012 on waste electrical and electronic equipment (WEEE) (recast), *Fundam. Texts Eur. Priv. Law.* (2012).
- [80] European Commission, Photovoltaic modules used in photovoltaic power systems for electricity generation. Product Environmental Footprint Category Rules (PEFCR). Version 1.2, time validity: 31 December 2021, 2020.
- [81] R. Frischknecht, P. Stolz, L. Krebs, M. de Wild-Scholten, P. Sinha, V. Fthenakis, C.H. Kim, M. Raugei, M. Stucki, Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessment of Photovoltaic Systems, International Energy Agency (IEA) PVPS Task 12, Report T12-19:2020., 2020. www.iea-pvps.org.