

# XXIII Congresso Nazionale CIRIAF

*Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana*

## Determinazione dell'impronta di carbonio di edifici pubblici: due casi di studio di impianti sportivi di nuova progettazione

Claudia Pacchiega<sup>1</sup>, Agnese Marcazzani<sup>2</sup>, Laura Mazzini<sup>2</sup>, Carlotta Tasca<sup>2</sup>, Patrizio Fausti<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Libera professionista, Ferrara, 44122.

<sup>2</sup> Università degli Studi di Ferrara, Dipartimento di Ingegneria, Via Saragat 1, 44122, Ferrara.

\* Autore di riferimento. E-Mail: patrizio.fausti@unife.it

---

**Abstract:** Lo studio si è proposto di analizzare ed applicare le procedure per la quantificazione degli impatti ambientali, in particolare dell'impronta di carbonio, nella realizzazione e gestione di edifici pubblici. A tale scopo sono stati studiati due edifici sportivi di nuova progettazione: un palazzetto dello sport e l'edificio di supporto ad una pista per atletica, ubicati rispettivamente in Lombardia ed in Emilia-Romagna. Le procedure per la valutazione dell'impronta di carbonio sono ampiamente descritte in letteratura e nelle applicazioni professionali correnti, soprattutto per l'ambito industriale (UNI EN ISO 14064-1:2019) [1] e per le certificazioni di prodotto (UNI EN ISO 14067:2018) [2]. Per la filiera dell'edilizia, invece, tali procedure sono ancora in fase di sviluppo ed alcuni protocolli di sostenibilità ambientale internazionale applicano analisi basate sulla metodologia del Life Cycle Assessment (LCA). A tale scopo è stata applicata la metodologia LCA, secondo le procedure proposte dalle norme UNI EN 15978 del 2011 [3] e UNI EN ISO 14040 del 2021 [4]. Nei due casi studiati tale metodologia ha consentito di calcolare la quantità totale di emissioni generate, in termini di anidride carbonica (CO<sub>2</sub>), da materiali, lavorazioni, consumi energetici, attività antropica e rifiuti. Gli obiettivi sono quelli di applicare la metodologia di analisi della Carbon Footprint, tipica dell'ambito industriale, al contesto edile, oltre che di fornire utili indicazioni a progettisti e tecnici del settore. Dall'applicazione delle procedure è emersa la necessità di avere a disposizione dati dettagliati solitamente disponibili ad un livello di progettazione avanzata. Questo rappresenta un elemento di criticità se si pensa che, in ambito nazionale, è necessario fornire informazioni sugli impatti ambientali già per la prima fase di progettazione relativa allo studio di fattibilità tecnico economica.

**Parole chiave:** Carbon footprint; Life Cycle Assessment; Sustainability; Operational energy; Embodied energy.

## 1. Introduzione

La sostenibilità di una soluzione edilizia è strettamente correlata ai materiali utilizzati, al contenimento dei consumi energetici e delle emissioni di gas serra. Il primo passo verso una progettazione sostenibile consiste nel determinare la soluzione progettuale migliore che deve possedere un edificio, le soluzioni impiantistiche, la scelta di materiali e lavorazioni, l'utilizzo del verde.

La metodologia del Life Cycle Assessment (LCA), permette di valutare l'impatto ambientale di un prodotto o di un servizio durante tutto il suo ciclo di vita: dall'estrazione delle materie prime, allo smaltimento o fine vita.

Tra i possibili indicatori ambientali calcolabili mediante tale metodologia, quello di interesse nell'ambito di questo studio è il potenziale di riscaldamento globale, strettamente correlato alla carbon footprint.

La carbon footprint o "impronta di carbonio" è un indicatore che quantifica le emissioni di gas climalteranti che hanno effetto sul riscaldamento globale e si misura in KgCO<sub>2</sub> equivalente o tonnellate di CO<sub>2</sub> equivalente. Per quanto riguarda la determinazione della carbon footprint di un prodotto o di un'organizzazione vi sono diverse normative [1-2]. Al contrario, per gli edifici, ritenuti responsabili dalla commissione europea del 40% di emissioni di gas climalteranti, non vi sono normative specifiche. Come normativa di riferimento ai fini dell'analisi è stata usata la Norma UNI EN 15978 [3] che fornisce una metodologia di calcolo per la prestazione ambientale di un edificio, basata sull'analisi LCA, applicabile sia a edifici di nuova costruzione sia soggetti a ristrutturazione.

A livello Europeo uno dei requisiti richiesti dalla versione non ancora approvata della EPBD recast v.4 è il calcolo del potenziale di riscaldamento globale sull'intero ciclo di vita dell'edificio per le nuove costruzioni a partire dal 2030 [5].

A livello nazionale, ad oggi, le linee guida emesse dal Ministero delle infrastrutture e della mobilità sostenibile e dal Consiglio superiore dei lavori pubblici per la redazione del progetto di fattibilità tecnica ed economica da porre a base dell'affidamento di contratti pubblici di lavori del PNRR e del PNC, prevedono che all'interno dell'analisi di sostenibilità dell'opera vi sia "una stima della Carbon Footprint dell'opera in relazione al ciclo di vita e il contributo al raggiungimento degli obiettivi climatici"[6-7].

Nel presente studio sono stati presi in esame due edifici pubblici di recente progettazione. Per effettuare il calcolo della carbon footprint si è utilizzato l'ausilio del software OneClick LCA basato sulla norma UNI EN 15978 [3].

## 2. Procedure operative

Per svolgere l'analisi in riferimento alla normativa, oltre alla definizione dell'obiettivo e dell'ambito di applicazione, sono stati raccolti i dati necessari al calcolo tramite analisi di inventario, sono stati poi implementati i calcoli ed infine si sono analizzati i risultati.

Complementarmente, sono stati effettuati dei confronti al fine di valutare eventuali scelte progettuali volte a ridurre le emissioni e si è verificata l'avvenuta compensazione.

## 2.1 Life Cycle Assessment

La metodologia LCA si suddivide principalmente in tre fasi:

- a. La definizione dell'obiettivo e dell'ambito di applicazione
- b. L'analisi di inventario LCI.
- c. L'analisi degli impatti e interpretazione dei risultati.

### 2.1.1 Definizione dell'obiettivo e dell'ambito di applicazione

In questa fase si definiscono l'obiettivo, l'ambito di applicazione, il periodo di riferimento e i confini del sistema dell'analisi.

L'obiettivo dello studio è stato quello di determinare l'impronta di carbonio di due edifici pubblici di recente progettazione ai fini della contabilizzazione e della compensazione delle emissioni di CO<sub>2</sub>.

Il periodo di studio di riferimento adottato è un arco temporale di 50 anni in quanto si ritiene che nel contesto italiano questo sia uno standard di vita utile per gli edifici pubblici sportivi di questo tipo.

L'ambito è costituito da:

- Un edificio sportivo destinato ai servizi e alla tribuna di una nuova pista di atletica comunale. Il blocco dei servizi è costituito da un'area destinata al pubblico in cui si trova una sala polivalente/bar, l'infermeria e i servizi igienici; ed un'area riservata agli atleti e ai giudici in cui sono presenti gli spogliatoi, servizi igienici, le docce, l'infermeria, il locale tecnico e un deposito. Il blocco servizi è caratterizzato da un volume lordo riscaldato di 5385 m<sup>3</sup>.
- Un edificio sportivo destinato a palazzetto comunale dello sport. Esso è caratterizzato da un'area a doppio volume destinata al campo da gioco e alle tribune per il pubblico e da un'area servizi ad un piano comprendente. L'edificio è caratterizzato da un volume lordo riscaldato di 16773 m<sup>3</sup>.

Per determinare i confini del sistema sono state prese in considerazione le seguenti fasi, come indicato nella norma UNI EN 15978 [3]:

- La fase di produzione dei materiali (A1-A3) che comprende estrazione delle materie prime (A1), trasporto di queste al sito di produzione (A2) e la loro lavorazione (A3).
- La fase di costruzione (A4-A5) che comprende il trasporto dei materiali dal sito di produzione al cantiere (A4) e il processo di costruzione/installazione (A5)
- La fase d'uso (B1-B6) che comprende utilizzo, manutenzione e sostituzione (B1-B5) e utilizzo di energia operativa (B6).
- La fase di fine vita (C1-C4) che comprende: demolizione/decostruzione dell'edificio (C1), trasporto (C2), trattamento (C3) e smaltimento (C4) dei rifiuti.
- La fase di quantificazione dei benefici ambientali (D). Tale modulo non è stato conteggiato nell'impatto complessivo in quanto in tale modulo si quantificano i benefici ambientali considerati come potenziali risorse per un uso futuro. Essi sono dovuti al riutilizzo, riciclo o recupero energetico dei materiali e all'energia esportata. Il valore è espresso come valore negativo in quanto non costituisce un impatto, bensì un beneficio.

### 2.1.2 Analisi di inventario LCI e fattori di emissione dei materiali

In tale fase si raccolgono i dati necessari ai fini del calcolo, suddivisi per le varie fasi del ciclo di vita. È la fase in cui, a fronte della quantificazione e definizione delle attività, devono essere associati ad esse i fattori di emissione.

Per quanto riguarda la fase di produzione dei materiali (A1-A3), i dati e le quantità relative sono state ricavate dai computi metrici estimativi di progetto; perciò, in quanto tali, sono da considerarsi accurate. I coefficienti di emissione dei materiali, ricavabili solitamente da banche dati online [8] e dai certificati EPD dei produttori [9], nel caso in esame sono stati ricavati dalle banche dati presenti nel software (Ecoinvent e Gabi).

Per le fasi di: trasporto al cantiere, costruzione e installazione, manutenzione e sostituzione, demolizione e decostruzione, trasporto, trattamento e smaltimento dei rifiuti, non disponendo di dati certi relativi a progetto sono state fatte delle ipotesi e delle stime sulla base di dati medi presenti nelle banche dati dei software sopra menzionati.

### 2.1.3 Analisi della fase operativa e fattori di emissione dei vettori energetici

I dati degli usi energetici della fase operativa sono stati ricavati dalle relazioni energetiche di progetto, in termini di fabbisogno di combustibile (gas naturale ed energia elettrica da rete) e di energia elettrica prodotta on-site. Questi valori sono il risultato della valutazione energetica di tipo A1 "Design Rating" prevista dalla UNI TS 11300-1 [10] per applicazioni "sul progetto", cioè caratterizzate da uso standard, clima standard ed edificio di progetto.

I dati di consumo dell'energia elettrica di progetto e di produzione dell'energia elettrica da fonte rinnovabile, riscontrabile negli elaborati di progetto, sono calcolati applicando il metodo mensile di cui alla UNI TS 11300-5 [11]. Tale metodo prevede che il fabbisogno annuale di energia primaria per ogni servizio considerato è dato dalla somma dei fabbisogni di energia primaria dei singoli servizi per ogni intervallo di tempo assunto come base di calcolo (il mese). Pertanto, il bilancio mensile tra energia esportata ed energia prodotta prevede che il fabbisogno di energia primaria per ogni servizio considerato sia dato dalla differenza dell'energia mensilmente consegnata (delivered) e dell'energia mensilmente esportata (exported). Ne risulta che, se mensilmente ci sono dei casi di energia esportata maggiore di quella consegnata per tutti i servizi energetici, si ottiene l'azzeramento del fabbisogno ed un eventuale surplus di energia prodotta e non utilizzata (per alcun servizio energetico). Possono però essere presenti dei mesi in cui accade il contrario in cui cioè i risultati del bilancio mostrano meno energia prodotta di quella consegnata e pertanto un consumo di energia elettrica diverso dallo zero.

I dati di consumo dell'energia elettrica utilizzati nella presente analisi LCA, invece, pur partendo dai risultati di progetto di tipo A.1, considerano come base di calcolo l'anno e pertanto il bilancio energetico fra energia esportata e consegnata è valutato sul totale annuo. In tal modo, se ci sono mesi con surplus di produzione e mesi con fabbisogno di energia consegnata diverso da zero, i primi andranno a compensare i secondi costituendo di fatto un bilancio annuale.

I fattori di emissione dei vettori energetici sono definiti a livello nazionale ed aggiornati periodicamente sulla base degli sviluppi energetici nazionali riguardanti la produzione lo stoccaggio e il trasporto dei combustibili e dell'energia elettrica [12]. Nel presente studio sono stati usati i fattori di emissione del medesimo data base utilizzato per i materiali sebbene non siano i più aggiornati a livello nazionale.

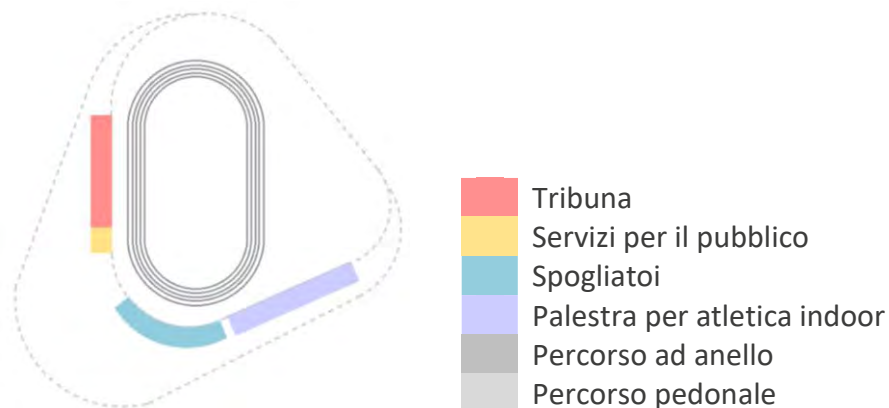
**Tabella 1.** Fattori di emissione utilizzati nell'analisi

Gas naturale	2,26 KgCO <sub>2</sub> eq/Nm <sup>3</sup>
Energia elettrica	0,49 KgCO <sub>2</sub> /kWh
Energia elettrica da produzione fotovoltaica	0,01 KgCO <sub>2</sub> eq/kWh

### 3. Caso studio: Stadio di atletica, Reggio Emilia.

Il primo edificio studiato è un edificio ad uso sportivo, inserito nel nuovo Stadio di atletica del comune di Reggio Emilia, in Emilia-Romagna.

**Figura 1.** Schema planimetrico dello Stadio di atletica del comune di Reggio Emilia.



L'edificio è stato recentemente (2022) progettato dallo studio Teco+ Partners STP Srl, ma non è stato ancora realizzato. L'intero contesto è composto dalla pista di atletica, dal blocco servizi e tribuna e dalla palestra indoor è inserito in un ambito urbano sostenibile pienamente accessibile con percorsi di accesso sia carrabili che ciclo pedonali e prevede inoltre la piantumazione di nuovi alberi.

Lo studio LCA è stato condotto sulla sola parte di servizi all'attività sportiva che è contenuta all'interno di un elemento lineare che circonda la pista di atletica. Essa è composta da spogliatoi e servizi per atleti ed arbitri, servizi igienici per il pubblico, palestra indoor e atrio/bar. La tecnologia costruttiva dell'edificio è di tipo a telaio in c.a. e tamponamenti in laterizio con cappotto in lana minerale e rivestimento in lamiera ondulata per formare una facciata ventilata. Per i tamponamenti interni è prevista la tecnologia a secco. I solai di copertura, con struttura di tipo predalles, saranno caratterizzati da isolamento in estradosso e finitura in parte con tetto a verde intensivo e in parte con lamiera graffiata. I controsoffitti, accessibili per la manutenzione degli impianti saranno realizzati in cartongesso, mentre nella zona adibita a palestra il controsoffitto sarà in lamiera microfonata

fonoassorbente. La pavimentazione sarà in gres porcellanato in tutti gli ambienti fatto salvo per la palestra dove è previsto un rivestimento in materiale sintetico, adatto per l'attività sportiva indoor. I serramenti esterni saranno in alluminio a taglio termico, con vetrocamera di sicurezza mentre quelli interni in alluminio con pannello in laminato plastico. La tribuna è realizzata in gradoni di cemento armato e una finitura superficiale lisciata.

Non è previsto l'uso né di gas naturale né di altri tipi di combustibili fossili. Inoltre, è previsto un sistema di recupero delle acque piovane per il completo soddisfacimento del fabbisogno irriguo delle aree verdi, volto al contenimento del consumo idrico. L'obiettivo di queste soluzioni impiantistiche è quello di raggiungere le prestazioni di un edificio NZEB, come richiesto, per gli edifici pubblici di nuova costruzione, dalla Deliberazione di Giunta Regionale Emilia-Romagna concernente i requisiti minimi di risparmio energetico in edilizia [13].

Per quanto riguarda gli impianti sono presenti i seguenti servizi energetici: riscaldamento, raffrescamento, acqua calda sanitaria, ventilazione ed illuminazione. Relativamente agli impianti termici il progetto prevede la generazione combinata per riscaldamento e acqua calda sanitaria mediante un sistema di pompe di calore aria-acqua ad assorbimento elettrico. Il fluido termovettore viene accumulato nel serbatoio inerziale, da tale accumulo partono i circuiti di produzione ACS, riscaldamento e UTA.

La regolazione del riscaldamento è di tipo climatica e di zona; la distribuzione è a collettori; il sottosistema di emissione è composto da radiatori, ventilconvettori e bocchette in sistemi di aria calda. L'acqua calda sanitaria prevede un accumulo da 2000 litri con due scambiatori a fascio tubiero in acciaio inox alimentati dal fluido termovettore riscaldato dalla pompa di calore. Nella zona bar e infermeria l'ACS è garantita da due ulteriori accumuli dedicati in pompa di calore.

Nel blocco servizi è presente un impianto ad aria primaria, in cui il trattamento dell'aria è fornito da unità termoventilante UTA completa di sistema di recupero a flussi incrociati; nella zona palestra l'impianto è a tutt'aria tramite un UTA con recuperatore di calore ad alta efficienza.

Il progetto è conforme alla legislazione regionale dell'Emilia Romagna del 2022 [13] in materia di requisiti minimi di prestazione energetica degli edifici e pertanto, in materia di fonti energetiche rinnovabili, l'impianto termico e l'impianto tecnologico idrico-sanitario è progettato e realizzato in modo da garantire il contemporaneo rispetto della copertura, tramite il ricorso ad energia prodotta da impianti alimentati da fonti rinnovabili di almeno il 66% dei consumi previsti per l'acqua calda sanitaria e di almeno il 66% della somma dei consumi previsti per la produzione di acqua calda sanitaria e la climatizzazione invernale e la climatizzazione estiva. Per quanto riguarda le fonti rinnovabili elettriche, sempre in rispondenza della legislazione Regionale [13], è previsto un impianto fotovoltaico della potenza complessiva di picco pari a 74 kW.

Come richiamato al par. 2.1.4, si considera per il presente studio un bilancio annuale dell'energia elettrica prodotta on-site da fonti rinnovabili e dell'energia elettrica consegnata. Dagli elaborati di progetto risulta una produzione di energia elettrica dall'impianto fotovoltaico pari a 77856 kWh/anno e il fabbisogno annuale di energia elettrica dell'edificio pari a 77426 kWh/anno.

### 3.1 Analisi degli impatti

L'analisi effettuata ha determinato che per l'edificio l'impronta di carbonio totale è di 2446 tCO<sub>2</sub>eq corrispondente a 15,49 KgCO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>anno.

In particolare, la fase del ciclo di vita più incidente è quella relativa alla fase di produzione (A1-A3) dei materiali con il 77% di incidenza sul totale, ed inoltre risulta che il consumo di energia è la componente che ha il minor impatto con il 2% di incidenza sul totale (Figura 2).

Analizzando poi l'incidenza delle componenti strutturali dell'edificio emerge che le strutture orizzontali (solai, travi e tetti) sono le più impattanti con il 32% di incidenza e, a seguire, le strutture verticali e fondazioni rispettivamente con il 26% e il 25%.

Questo è dovuto al fatto che tali strutture sono in cemento armato e, come si può vedere dal grafico (successivo) relativo agli impatti sui materiali, il calcestruzzo è il materiale più impattante con il 53%, a seguire l'acciaio con il 13%, tutti gli altri materiali hanno invece impatti minori (Figura 3).

Figura 2. Impatto delle fasi del ciclo di vita. Caso studio: Stadio di atletica, Reggio Emilia.

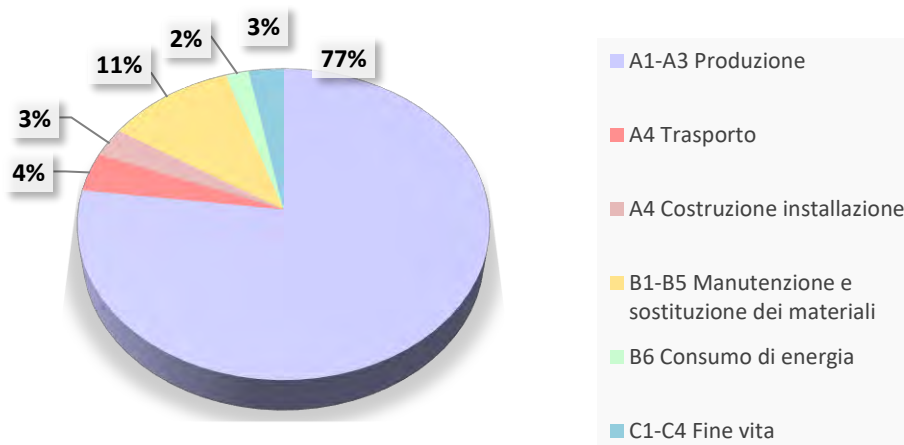
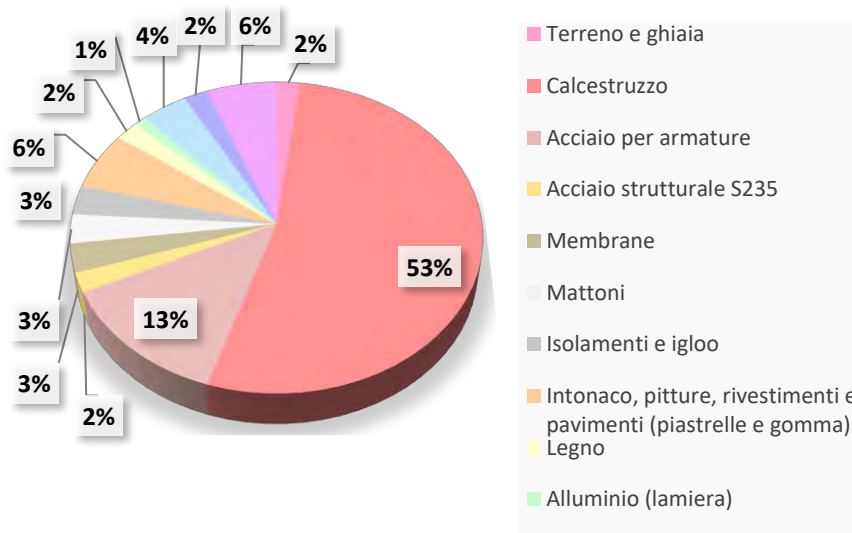


Figura 3. Impatto dei materiali dell'edificio. Caso studio: Stadio di atletica, Reggio Emilia.



Un'ultima valutazione riguarda il carbonio operativo e quello incorporato dove si evidenzia come il carbonio operativo, relativo alla componente energetica, abbia un minimo impatto (2%) rispetto al carbonio incorporato, relativo a tutte le altre fasi del ciclo di vita la cui incidenza è pari al 98%.

### 3.2 Confronti tra modelli

Il modello di base è stato confrontato con altri due modelli:

- modello con bilancio energetico mensile
- modello con materiali sostenibili.

#### 3.2.1 Confronto tra modello di base con bilancio energetico annuale e modello con bilancio energetico mensile

Questo modello differisce dal caso base per la valutazione energetica di cui al par. 2.1.3. In particolare, invece di considerare un bilancio annuale fra energia elettrica esportata ed energia elettrica consegnata, sono stati considerati i consumi derivanti dagli elaborati di progetto, ovvero relativi al bilancio mensile effettuato ai sensi della UNI TS 11300-5 [11]. In tal modo l'energia consegnata non risulta più compensata dalla produzione, perché alcuni mesi sono caratterizzati da una produzione da fonte rinnovabile inferiore al fabbisogno.

Ne risulta pertanto un consumo di energia elettrico totale annuale, richiesto alla rete nazionale non più nullo ma pari a 29227 kWh/anno, a fronte di una produzione di energia elettrica da fotovoltaico consumata dai servizi energetici pari a 48199 kWh/a, determinata dalla somma dei contributi mensili, e ad una produzione di energia elettrica da fotovoltaico ma non consumata di 29652 kWh/a, determinata dalla somma dei surplus mensili. Tali dati sono ricavati dalla documentazione di progetto.

**Tabella 2.** Fabbisogno e produzione annuali di energia elettrica, calcolo mensile.

Caso studio: Stadio di atletica, Reggio Emilia.

Produzione energia elettrica impianto fotovoltaico	77856 kWh/anno
Energia elettrica da produzione fotovoltaica utilizzata dai servizi di riscaldamento, acqua calda sanitaria, raffrescamento, ventilazione, illuminazione (somma dei contributi mensili)	48199 kWh/anno
Energia elettrica da produzione fotovoltaica non consumata (somma dei surplus mensili)	29652 kWh/anno

L'impronta di carbonio totale del modello di confronto è di 3123 tCO<sub>2</sub>eq corrispondente a 19,77 KgCO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>anno; relativamente alle fasi del ciclo di vita è aumentata la componente energetica, in percentuale si passa dal 2% nel modello di base con bilancio annuale ad un 23% nel modello di confronto con calcolo energetico mensile.



### 3.2.2 Confronto tra modello di base con bilancio energetico annuale e modello con materiali sostenibili

Nel modello non è stata sostituita la tipologia costruttiva in cemento armato ma sono stati sostituiti i materiali più impattanti come calcestruzzo e acciaio con calcestruzzo contenente “cemento di scorie”, materiale cementizio, sottoprodotto degli alti forni utilizzati per la produzione del ferro e con acciaio contenente materiale riciclato. L'impronta di carbonio totale nel modello in cui sono stati utilizzati materiali sostenibili è di 1789 tCO<sub>2</sub>eq corrispondente a 11,33 KgCO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>anno ed in particolare si nota che per la fase di produzione in termini di tonnellate si passa da un valore di 1883 tCO<sub>2</sub>eq nel modello di base ad un valore di 1257 tCO<sub>2</sub>eq nel modello di confronto, con una riduzione complessiva del 33%.

Nel dettaglio si è visto che per ogni tipologia strutturale che nel modello di base aveva una maggiore incidenza, si ottiene una riduzione dell'impatto, in particolare per quanto riguarda fondazioni, strutture orizzontali e strutture verticali.

### 3.3. Verifica di compensazione

Si è inoltre verificata la compensazione dell'impronta di carbonio emessa dal complesso sportivo tramite la piantagione di alberi.

Da progetto, le tipologie di alberi previste sono di sei specie differenti:

- Acer Rubrum (acero rosso) - 12 piante
- Populus Alba (pioppo bianco) - 169 piante
- Quercus Palustris (quercia di palude) - 41 piante
- Quercus Rubra (quercia rossa) - 18 piante
- Morus Platanifolia – 47 piante
- Pyrus Calleriana (pero chanticleer) – 34 piante

Per prima cosa è stata determinata, per ogni specie di albero, la quantità di CO<sub>2</sub> che questo può assorbire, sia per quanto riguarda un albero maturo, sia per quanto riguarda un nuovo impianto. Tali dati sono stati ricavati dalle schede tecniche relative alla tipologia di albero [14]. È stata poi eseguita verifica di compensazione ipotizzando sia piantagione di alberi maturi che nuovi individui.

Per procedere alla verifica di compensazione da parte di tali specie arboree, si è ipotizzato inizialmente di piantare solo piante mature ed è risultato una quantità di assorbimento complessivo della CO<sub>2</sub> di 68,68 tCO<sub>2</sub>/anno. Tale verifica si è svolta, in primo luogo senza considerare lo stoccaggio di carbonio da parte dei materiali come il legno che ha proprietà di assorbimento.

Si stima, in media, che un albero raggiunga la sua maturità in un range temporale compreso tra i 20 e i 40 anni e che durante il suo accrescimento la capacità di assorbimento dell'anidride carbonica sia tra i 10 e i 30 KgCO<sub>2</sub>/anno [15]. Tali valori sono variabili in base alla tipologia di albero: alcune specie hanno velocità di accrescimento maggiori rispetto ad altre e, a sua volta, tale velocità può dipendere da altre variabili quali il clima e l'ambiente. Per questo motivo non si può calcolare con certezza la quantità di CO<sub>2</sub> effettivamente assorbita da un albero in fase di accrescimento, è possibile però effettuarne una stima sulla base di dati medi.

Si è ipotizzato, pertanto, che in media le diverse tipologie di albero raggiungano la maturità dopo trenta anni (questo dato è stato preso come valore intermedio di 20-40 anni) e che l'assorbimento medio di CO<sub>2</sub> durante l'accrescimento sia pari a 20 KgCO<sub>2</sub>/anno (media tra 10 e 30 KgCO<sub>2</sub>/anno). Per il primo anno, si è considerato come valore di riferimento il dato ricavato dalle schede tecniche relativo all'assorbimento di CO<sub>2</sub> da parte di un nuovo individuo, mentre al trentesimo anno si è considerato che la pianta sia matura. Pertanto, per i successivi venti anni, è stata utilizzata la capacità di assorbimento dell'albero pari al valore riportato nelle schede tecniche per una pianta matura.

**Tabella 3.** Verifica compensazione della CO<sub>2</sub>. Caso studio: Stadio di atletica, Reggio Emilia.

Verifica di compensazione	Con piante mature	Con nuovi individui	Con nuovi individui e stoccaggio di carbonio
Edificio di riferimento	Sì	No	No
Modello di confronto con vita utile di 80 anni	Sì	Sì	Sì
Modello di confronto con materiali sostenibili	Sì	No	Sì

Come si osserva dalla tabella 3, la verifica di compensazione risulta positiva o negativa in base alle ipotesi effettuate. Nell'ipotesi di ipotizzare fin dall'inizio l'utilizzo di piante mature, la verifica è sempre soddisfatta per qualsiasi condizione. Considerando nuovi individui, la verifica è soddisfatta solo considerando l'ipotesi di una vita utile maggiore. Con l'utilizzo della capacità di stoccaggio dei materiali utilizzati nella costruzione, in particolare de legno, la verifica risulta valida ad eccezione del caso iniziale di edificio senza materiali sostenibili.

#### 4. Caso studio: Palasport, Casalmaggiore.

Il secondo edificio studiato è un palasport sito a Casalmaggiore (CR), adibito ad ospitare manifestazioni sportive ed eventi pubblici. Anche questo edificio è stato recentemente progettato (2022) dallo studio Teco+ Partners STP Srl.

L'edificio si sviluppa prevalentemente su un solo piano con l'eccezione del volume collocato al di sopra del campo da gioco e delle tribune.

**Figura 4.** Planimetria funzionale del Palasport del comune di Casalmaggiore.

PT a sinistra, P1 a destra.



Costruttivamente l'edificio è caratterizzato da due tecnologie principali. Il doppio volume, con struttura prefabbricata in c.a. c.a.p. (pilastri, travi e strutture della gradonata), prevede dei tamponamenti in pannelli di calcestruzzo prefabbricato con coibentazione sia interposta che sul lato esterno a cappotto in lana di roccia. La parte più bassa dell'edificio, dedicata agli spogliatoi, è prevista in c.a. gettato in opera (fondazioni, pilastri, travi) e con tamponamenti in blocchi di laterizio termico rivestiti con cappotto in lana di roccia.

Le fondazioni sono costituite da: una sottofondazione in calcestruzzo C12/15, una fondazione in calcestruzzo C25/30 e ulteriori strutture in calcestruzzo armato C28/35.

Il solaio contro terra presenta un vespaio areato con elementi igloo; la copertura del blocco spogliatoi è piana e di tipo predalles isolata all'estradosso; la copertura del campo da gioco ha una struttura costituita da travi in legno lamellare ed un pacchetto di finitura di tipo sandwich a secco con isolamento interposto.

Come finiture esterne, oltre all'intonaco del cappotto, sono previsti anche listelli di mattone facciavista nella parte di basamento.

I tamponamenti interni sono progettati in laterizi forato rivestiti su entrambi i lati con intonaco. Le finiture interne comprenderanno: controsoffitto a "lastra unica" intonacato e tinteggiato nella zona spogliatoi; controsoffitto modulare nell'atrio di ingresso e nei distributivi; pavimentazione in gres negli spogliatoi e nei distributivi; listoni in legno massello posati in modo flottante su piedini nel campo da gioco.

Per i serramenti esterni è previsto un tipo di serramento in alluminio a taglio termico e vetrocamera di sicurezza; per i serramenti interni è previsto un tipo di serramento in alluminio anodizzato con pannello in laminato plastico.

Gli impianti previsti all'interno dell'edificio oggetto di studio sono i seguenti:

- Riscaldamento: è presente un impianto bivalente in pompa di calore aria-acqua ad assorbimento elettrico e uno scambiatore del teleriscaldamento locale alimentato dalla centrale termica esistente (caldaie a gas metano). L'emissione nei locali avviene tramite bocchette in sistemi a tutt'aria (campo da gioco), radiatori (per spogliatoi e servizi igienici) e ventilconvettori (per l'atrio, infermeria, ufficio e antidoping).
- Acqua calda sanitaria: La generazione è combinata con il riscaldamento ed inoltre sono presenti due accumuli, uno di preriscaldamento da 1000 litri alimentato prevalentemente dalla pompa di calore ed uno ad alta temperatura con scambiatore esterno.
- Ventilazione: la zona campo da gioco ha un sistema a tutt'aria, con UTA a batterie idroniche alimentate dalla centrale termica. Nella zona spogliatoi e servizi igienici è presente un impianto ad aria primaria con UTA dedicata posta in copertura. Le UTA sono dotate di recuperatori a flussi incrociati.

L'edificio ha visto la progettazione definitiva ante giugno 2022 pertanto per i requisiti minimi di risparmio energetico risponde alla legislazione regionale di riferimento [16] e per quanto riguarda le fonti energetiche rinnovabili risponde al Decreto Legislativo 3 marzo 2011 n. 28 [17]. In rispondenza a

quest'ultimo riferimento l'edificio è pertanto dotato di un impianto fotovoltaico costituito da 140 moduli in silicio monocristallino aventi potenza di picco di 360 W ciascuno, per un totale di 50,40 kWp. La produzione di energia elettrica annuale dell'impianto fotovoltaico risulta in progetto pari a 57228 kWh/a, a fronte di un fabbisogno di energia elettrica annuale dell'edificio di 106771 kWh/a. Ne risulta un fabbisogno di energia elettrica annuale da rete pari a 49543 kWh/a. Oltre al consumo di energia elettrica è presente anche un consumo di gas metano per riscaldamento e ACS pari a 1266 Nm<sup>3</sup>/anno.

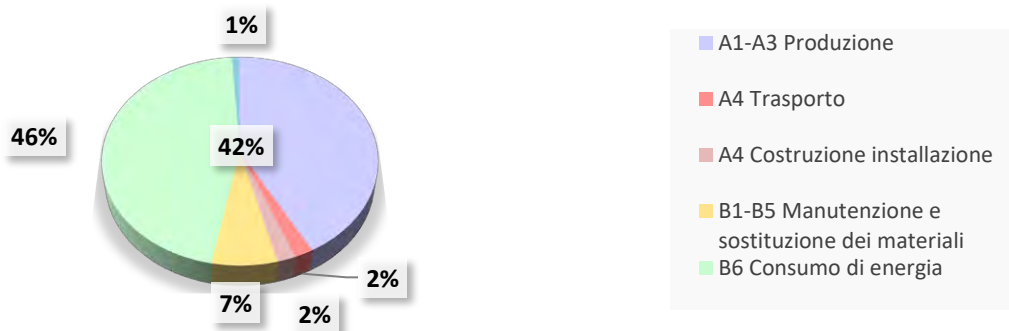
#### 4.1 Analisi degli impatti

L'analisi effettuata ha determinato che per l'edificio l'impronta di carbonio totale è di 3014 tCO<sub>2</sub>eq corrispondente a 21,70 KgCO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>anno.

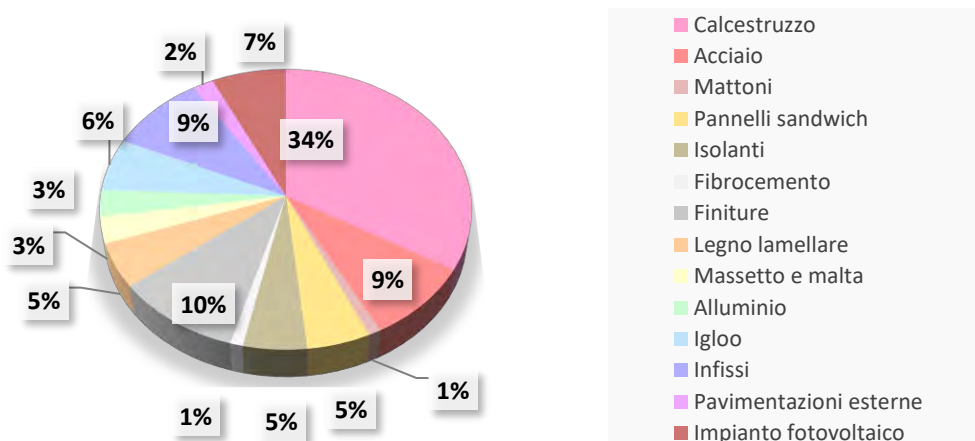
In particolare, la fase del ciclo di vita più incidente è quella relativa al consumo di energia con il 46% di incidenza sul totale, ed inoltre risulta che il fine vita è la componente che ha il minor impatto con l'1% di incidenza sul totale (Figura 5).

Analizzando l'incidenza dei materiali utilizzati emerge che le opere in calcestruzzo sono le più impattanti con il 34% di incidenza e, a seguire, le finiture e gli infissi rispettivamente con il 10% e il 9% (Figura 6).

**Figura 5.** Impatto delle fasi del ciclo di vita. Caso studio: Palasport, Casalmaggiore.



**Figura 6.** Impatto dei materiali costruttivi dell'edificio. Caso studio: Palasport, Casalmaggiore.



Un'ultima valutazione riguarda il carbonio operativo e quello incorporato e i risultati mostrano che il carbonio operativo, relativo alla componente energetica, ha un impatto del 46% rispetto al carbonio incorporato, relativo a tutte le altre fasi del ciclo di vita la cui incidenza è pari al 54%.

#### 4.2 Confronti tra modelli

In questo caso, oltre al modello di base con vita utile di 50 anni si sono analizzati altri due modelli: uno con vita utile 80 anni e uno nel quale il calcolo della potenza di picco dei pannelli fotovoltaici è rispondente al D.Lgs. 199/2021 [18].

**Tabella 4.** Impatto complessivo e confronto percentuale. Caso studio: Palasport, Casalmaggiore.

	<b>Impatto complessivo [tCO<sub>2</sub>/eq]</b>	<b>Confronto con modello base [%]</b>
Modello con vita utile 80 anni	4104	+36%
Modello con calcolo della potenza di picco dei pannelli fv mediante D.Lgs. 199/2021	1997	-34%

##### 4.2.1 Confronto tra modello di base e modello con vita utile 80 anni

Considerando una vita utile di 80 anni, l'aumento complessivo dell'impronta di carbonio rispetto al modello con vita utile 50 anni è del 40%. Tale valore è dovuto all'aumento del 130% dell'impatto per la fase B1-B5, ossia la fase di manutenzione e sostituzione dei materiali e all'aumento del 60% dell'impatto per la fase di consumo di energia operativo. Queste due fasi sono le uniche sensibili alla variazione di vita utile scelta per l'edificio oggetto di studio.

L'analisi così effettuata ha determinato che per l'edificio l'impronta di carbonio totale è di 4104 tCO<sub>2</sub>eq corrispondente a circa 18,47 KgCO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>anno.

##### 4.2.2 Confronto tra modello di base e modello con calcolo della potenza di picco complessiva dei pannelli fotovoltaici mediante il nuovo D.Lgs. 199/2021

Per il presente modello si è supposto di installare un impianto fotovoltaico conforme alle richieste minime del D.Lgs 199/2021 [18] cioè di aumentare la potenza di picco da installare da 50 kW a 125 kW.

Tale configurazione consente una produzione di energia elettrica annuale da fotovoltaico pari a 141436 kWh/a che copre l'intero fabbisogno annuale di energia elettrica dell'edificio.

**Tabella 5.** Confronto fabbisogni tra modello di base - modello con applicazione del D.Lgs. 199/2021. Caso studio: Palasport, Casalmaggiore.

	Modello di base	Modello con calcolo D.Lgs. 199/2021
Fabbisogno elettrico totale dell'edificio	106771 kWh/anno	106771 kWh/anno
Energia elettrica da produzione fotovoltaica	57228 kWh/anno	141436 kWh/anno
Energia elettrica da rete	49543 kWh/anno	0

L'analisi così effettuata ha determinato che per l'edificio l'impronta di carbonio totale è di 1997 tCO<sub>2</sub>eq corrispondente a circa 14,38 KgCO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>anno.

Sono stati inoltre confrontati i risultati relativi agli impatti delle fasi del ciclo di vita. Confrontando il modello di base con quello riportante l'applicazione del D.Lgs. 199/2021 [18], per quanto riguarda il confronto sulle fasi di vita, si nota che per il modello base, le fasi di produzione hanno un impatto del 42%, mentre nel secondo modello del 66%. Un'altra variazione importante riguarda la componente energia, quindi la fase d'uso che passa dal 46% del modello base all'11% del modello secondo D.Lgs. 199/2021.

Un'ultima valutazione su questo modello riguarda il carbonio operativo e quello incorporato che passano rispettivamente da 54% e 46% del caso base al 11% e 89% del caso alternativo.

#### 4.3. Verifica di compensazione

Il calcolo di compensazione è stato in primo luogo eseguito considerando l'impatto in termini di Kg di CO<sub>2</sub>eq annui, successivamente si è introdotta un'ulteriore ipotesi considerando lo stoccaggio di carbonio biogenico all'interno dei materiali costruttivi a base naturale, come i materiali in legno.

Sviluppando l'analisi è risultata evidente il non soddisfacimento della verifica compensazione in quanto il numero di individui da piantare si aggira attorno ai 300, numero non confrontabile con i 20 previsti dal progetto. Non si riporta l'analisi nel suo complesso in quanto non ritenuta rilevante.

### 5. Conclusioni

Lo studio evidenzia l'importanza di stabilire l'impronta di carbonio di un edificio ai fini di un'adeguata compensazione della CO<sub>2</sub> prodotta; tale compensazione gioca un ruolo fondamentale per il raggiungimento della neutralità climatica attraverso il bilanciamento dell'anidride carbonica prodotta e assorbita. Determinare l'impatto ambientale in fase di progettazione, tramite analisi LCA, consente di valutare, tra le opzioni possibili, quale sia la migliore in termini di ottimizzazione delle emissioni, prevedendo metodi di adeguata compensazione. Dallo studio emerge che la mole di dati per l'analisi della carbon footprint è disponibile ad un livello di progettazione avanzata. Infatti, per i casi studio analizzati, sono stati utilizzati gli elaborati di progetto della fase definitiva (computi metrici di ogni disciplina, analisi energetica, elaborati stratigrafici e delle finiture, schemi impianti meccanici ed elettrici). Questo è un primo elemento di criticità se si pensa che le prime richieste avanzate in ambito nazionale [6] vengono effettuate per la prima fase di progettazione relativa allo studio di fattibilità tecnico economica.

Per quanto riguarda la pista di atletica, la stima della carbon footprint mediante analisi LCA ha evidenziato quanto sia importante la scelta di materiali sostenibili ai fini di ridurre l'impatto ambientale. Nell'edificio, avente struttura portante in cemento armato, l'incidenza della fase di produzione dei materiali è del 77%, gravando per più della metà sull'impronta climatica dell'edificio mentre, la fase d'uso produce meno del 2% delle emissioni di CO<sub>2</sub> totali. Questo è un dato significativo se correlato alla legislazione energetica di riferimento con cui è stato progettato l'edificio, ovvero la

recente Delibera di Giunta Regionale 1261/2022 [13] che recepisce la direttiva europea sulle fonti energetiche rinnovabili [19] al pari del D.Lgs 199/2021 [18] a livello nazionale.

Osservando i risultati ottenuti, è importante sottolineare che dal punto di vista dell'impronta di carbonio, la progettazione di un edificio nZEB ha garantito la riduzione degli impatti relativi all'utilizzo di energia. La progettazione energetica, privilegiando l'uso di fonti rinnovabili, è dunque uno dei mezzi essenziali per ridurre le emissioni di carbonio nel periodo di vita utile dell'edificio. Per raggiungere gli obiettivi di "edificio a basse emissioni" non è tuttavia sufficiente limitarsi all'efficienza energetica, ma è necessario prevedere, già in fase di progettazione, l'uso di materiali eco-sostenibili ed innovativi che permettano di ridurre le emissioni anche in tutte le altre fasi del ciclo di vita. Inoltre, l'utilizzo di materiali riciclati, o con contenuto di riciclato consente di ridurre la quantità di "rifiuto" da conferire in discarica, favorendo un'economia circolare e riducendo le emissioni dovute alla fase di smaltimento del rifiuto stesso [21-22-23].

Relativamente al palasport invece, si evidenzia che la fase a maggior impatto è quella relativa al consumo operativo di energia, dunque alla fase d'uso, dovuto principalmente alla presenza di fonti fossili oltre che di energia elettrica da rete e al quantitativo di fotovoltaico previsto dai decreti nazionali ante 2021 (D.M. 26 giugno 2015 [20] e D.Lgs. 28/2011 [17]).

Ciò che emerge è che la componente energia non è più quella preponderante rispetto alle altre componenti dell'LCA (ma scende al terzo posto, dopo la fase di produzione e quella di manutenzione dei materiali costruttivi) applicando i decreti nazionali sull'uso delle fonti rinnovabili pubblicati nel 2021, in vigore dal 2022 (D.Lgs 199/2021 [18]), arrivando a pesare circa 11% sul totale LCA, in linea con altre esperienze bibliografiche [22].

È stato rilevato, inoltre, un impatto importante riguardante i materiali da costruzione utilizzati. Il ruolo più importante è quello del cemento e del calcestruzzo che ricoprono la percentuale maggiore di impatto [24].

Dalle due esperienze è dunque evidente che più si incrementano le tecnologie rinnovabili ed efficienti, limitando l'impatto associato all'energia della fase di esercizio, più diventa proporzionalmente impattante la componente dell'energia incarnata e quindi risulta importante analizzare i materiali ed agire su essi [22].

## Bibliografia

1. UNI EN ISO 14064-1:2019. Gas ad effetto serra - Parte 1: Specifiche e guida, al livello dell'organizzazione, per la quantificazione e la rendicontazione delle emissioni di gas ad effetto serra e della loro rimozione.
2. UNI EN ISO 14067:2018. Gas ad effetto serra - Impronta climatica dei prodotti (Carbon footprint dei prodotti) - Requisiti e linee guida per la quantificazione.
3. UNI EN 15978:2011. Sostenibilità delle costruzioni - Valutazione della prestazione ambientale degli edifici - Metodo di calcolo.
4. UNI EN ISO 14040: 2021. Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Principi e quadro di riferimento.

5. Commissione Europea, Proposta direttiva del parlamento europeo e del consiglio sulla prestazione energetica nell'edilizia (rifusione), COM (2021) 802 final.
6. MIMS - Ministero delle infrastrutture e dei Trasporti; Consiglio superiore dei lavori pubblici. Linee guida per la redazione del progetto di fattibilità tecnica ed economica da porre a base dell'affidamento di contratti pubblici di lavori del PNRR e del PNC. (Art. 48, comma 7, del decreto-legge 31 maggio 2021, n. 77, convertito nella legge 29 luglio 2021, n. 108), 2021.
7. Decreto-legge 31 maggio 2021, n. 77 (in Gazzetta Ufficiale - Serie generale - n. 129 del 31 maggio 2021 - Edizione straordinaria), coordinato con la legge di conversione 29 luglio 2021, n. 108 (in questo stesso S.O.), recante: «Governance del Piano nazionale di ripresa e resilienza e prime misure di rafforzamento delle strutture amministrative e di accelerazione e snellimento delle procedure.». GU Serie Generale n.181 del 30-07-2021 - Suppl. Ordinario n. 26.
8. The Clim'Foot databases available online [www.climfoot-project.eu/en/overview-0](http://www.climfoot-project.eu/en/overview-0)
9. Programma EPDIItaly available online [www.epditaly.it/](http://www.epditaly.it/)
10. UNI/TS 11300-1:2014 Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale.
11. UNI/TS 11300-5:2016 Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 5: Calcolo dell'energia primaria e della quota di energia da fonti rinnovabili.
12. ISPRA Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale. Fattori di emissione atmosferica di gas ad effetto serra nel settore elettrico nazionale e nei principali Paesi Europei. Rapporto 303/2019.
13. Deliberazione della giunta regionale 25 luglio 2022, N. 1261. Approvazione delle modifiche all'«Atto di Coordinamento Tecnico regionale per la definizione dei requisiti minimi di prestazione energetica degli edifici» di cui alla propria deliberazione n. 967/2015 e s.m.i.
14. Associazione vivaisti italiani. [www.vivaistiitaliani.it/qualiviva/consultazione-shede-tecniche](http://www.vivaistiitaliani.it/qualiviva/consultazione-shede-tecniche).
15. Assorbimento forestale di CO<sub>2</sub>,» [Online]. Available online: <https://www.reteclima.it/>
16. D.D.U.O. 18 dicembre 2019 - n. 18546. Aggiornamento delle disposizioni per l'efficienza energetica degli edifici approvate con decreto n. 2456 del 8 marzo 2017.
17. 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.
18. Decreto legislativo 8 novembre 2021, n. 199 Attuazione della direttiva (UE) 2018/2001 del Parlamento europeo e del Consiglio, dell'11 dicembre 2018, sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili.
19. Direttiva (ue) 2018/2001 del parlamento europeo e del consiglio dell'11 dicembre 2018 sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili (rifusione)
20. Decreto interministeriale 26 giugno 2015 - Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici
21. G. Lobaccaro; A. H. Wiberg; G. Ceci; M. Manni; N. Lolli; U. Berardi. Parametric design to minimize the embodied GHG emissions in a ZEB. Energy & Buildings 2018, 167, 106-123



22. C. Thiel. A material life cycle assessment of a net-zero energy building. *Energies*, 2013, 6, 1125-1141.
23. A. Houlihan Wiberg; L. Georges; T.H. Dokka; M. Haase; B. Time; A.G. Lien; S. Mellegård; M. Maltha. A net zero emission concept analysis of a single-family house. ZEB Project report. Publisher SINTEF Academic Press, Norway, 2013; Volume 9.
24. N. Lolli; S.M. Fufa; M. Inman. A parametric tool for the assessment of operational energy use, embodied energy and embodied material emissions in building. *Energy Procedia* 2017, 111, 21–30.