



Ricerca di Sistema elettrico

Sviluppo di piattaforme innovative per il calcolo dell'energia incorporata nell'edilizia e di modelli per la quantificazione del potenziale *Ventilative Cooling* nell'edilizia

M.Cellura, F. Guarino, V. La Rocca, S. Longo



SVILUPPO DI PIATTAFORME INNOVATIVE PER IL CALCOLO DELL'ENERGIA INCORPORATA NELL'EDILIZIA E DI MODELLI PER LA QUANTIFICAZIONE DEL POTENZIALE VENTILATIVE COOLING NELL'EDILIZIA

M. Cellura, F. Guarino, V. La Rocca, S. Longo (Università di Palermo, Dipartimento di Energia, Ingegneria dell'Informazione e Modelli Matematici – DEIM)

Settembre 2015

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2014

Area: Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica

Progetto: Sviluppo di modelli per la realizzazione di interventi di efficienza energetica sul patrimonio immobiliare pubblico

Obiettivo: Edifici pubblici tipo, Indici di benchmark di consumo per tipologie di edificio ad uso ufficio e scuole, Applicabilità di tecnologie innovative e modelli per la realizzazione di interventi di efficienza energetica

Responsabile del Progetto: arch. Gaetano Fasano ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione tra ENEA e Università di Palermo, Dipartimento di Energia, Ingegneria dell'Informazione e Modelli Matematici (DEIM) per attività di ricerca dal titolo: *"Sviluppo di piattaforme innovative per il calcolo dell'energia incorporata nell'edilizia e di modelli per la quantificazione del potenziale Ventilative Cooling nell'edilizia"*.

Responsabile scientifico ENEA: Dott. Gaetano Fasano

Responsabile scientifico Prof. Maurizio Cellura

Indice

SOMMARIO.....	5
PARTE A	7
2 INTRODUZIONE	7
3 DEFINIZIONI, CONFINI DEL SISTEMA E METODI DI CALCOLO PER L'ENERGIA INCORPORATA NEGLI EDIFICI.....	9
3.1 ENERGIA INCORPORATA	9
3.2 CONFINI DEL SISTEMA.....	10
3.3 METODOLOGIE DI CALCOLO.....	10
3.3.1 <i>Life Cycle Assessment</i>	11
3.3.2 <i>Input – Output (I – O) con estensione energetica</i>	13
3.3.3 <i>Metodo ibrido I – O/LCA</i>	15
3.3.4 <i>Riferimenti normativi</i>	15
4 STATO DELL'ARTE SULL'ENERGIA INCORPORATA NEGLI EDIFICI	17
4.1 INTRODUZIONE	17
4.2 CASO STUDIO N. 1: EDIFICIO AD USO RESIDENZIALE – ITALIA [5]	17
4.3 CASO STUDIO N. 2: EDIFICIO AD USO RESIDENZIALE – INDIA [37].....	22
4.4 CASO STUDIO N. 3: EDIFICIO AD USO RESIDENZIALE – BRASILE [38].....	24
4.5 CASO STUDIO N. 4: EDIFICIO PER UFFICI, AUSTRIA [39, 40].....	26
4.6 CASO STUDIO N. 5: EDIFICIO PER UFFICI – DANIMARCA [41, 42]	29
4.7 CASO STUDIO N. 6: EDIFICIO PER UFFICI – TAILANDIA [43]	31
4.8 CASO STUDIO N. 7: EDIFICIO PER USO SCOLASTICO – REGNO UNITO [45].....	33
4.9 CASO STUDIO N. 8: EDIFICIO PER USO SCOLASTICO – GERMANIA [46]	34
4.10 CASO STUDIO N. 9: EDIFICIO SCOLASTICO/ALBERGHIERO – MICHIGAN [47].....	36
4.11 COMPARAZIONE TRA I CASI STUDIO SELEZIONATI	38
5 CONCLUSIONI.....	43
6 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	45
PARTE B.....	47
1 INTRODUZIONE	47
2 VENTILATIVE COOLING: STATO DELL'ARTE DELLA MODELLIZZAZIONE	48
2.1 STATO DELL'ARTE DELLA MODELLIZZAZIONE	48
2.2 MODELLI SEMPLIFICATI.....	48
2.2.1 <i>Principali assunzioni</i>	48
2.2.2 <i>Apertura localizzata su un solo lato dell'edificio, ventilazione causata dall'azione del vento</i>	49
2.2.3 <i>Apertura localizzata su un solo lato dell'edificio, ventilazione causata dalla differenza di temperatura</i> ...	50
2.2.4 <i>Apertura localizzata in un solo lato dell'edificio, ventilazione causata dall'azione combinata del vento e della differenza di temperatura</i>	51
2.2.5 <i>Aperture localizzate su un solo lato, ventilazione causata dall'azione del vento</i>	52
2.2.6 <i>Aperture localizzate su due lati, ventilazione causata dalla differenza di temperatura</i>	53
2.2.7 <i>Aperture localizzate in un solo lato dell'edificio, ventilazione causata dall'azione combinata del vento e della differenza di temperatura</i>	56
2.3 MODELLI AIRFLOW NETWORK	59
2.3.1 <i>Principali assunzioni</i>	59
2.3.2 <i>Modellazione matematica</i>	59
2.3.3 <i>Limiti della modellizzazione AFN</i>	60

2.4	MODELLI DI FLUIDODINAMICA COMPUTAZIONALE (COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS – CFD).....	61
3	INDICATORI DI PRESTAZIONE E APPLICABILITÀ DEL “VENTILATIVE COOLING”	64
4	ATTIVITÀ DEL DEIM NELL’AMBITO DELL’IEA ANNEX 62 – VENTILATIVE COOLING	69
5	CONCLUSIONI.....	71
6	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	73
	CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO IMPEGNATO NELL’ATTIVITÀ.....	75

Sommario

Il presente report si inserisce nell'ambito dell'accordo di Collaborazione tra ENEA e il Dipartimento di Energia, Ingegneria dell'informazione e Modelli Matematici (DEIM), per l'attività dal titolo "Sviluppo di piattaforme innovative per il calcolo dell'energia incorporata nell'edilizia e di modelli per la quantificazione del potenziale del *ventilative cooling* nell'edilizia", nel contesto del Piano annuale di Realizzazione 2014 del progetto "Sviluppo di modelli per la realizzazione di interventi di efficienza energetica sul patrimonio immobiliare pubblico".

L'attività prevede due linee di ricerca interne, sviluppate, rispettivamente, nelle Parti A e B del presente report: "Sviluppo di piattaforme innovative per il calcolo dell'energia incorporata nell'edilizia" e "Sviluppo di modelli per la quantificazione del potenziale *ventilative cooling* nell'edilizia".

Nella Parte A, è stata svolta l'analisi delle principali metodologie di calcolo dell'energia incorporata nei materiali e nelle tecnologie energetiche, riferiti prevalentemente al sistema edificio-impianto e allo stato dell'arte sull'energia incorporata negli edifici.

La prima fase dell'attività ha riguardato l'analisi degli studi disponibili in letteratura sulle metodologie per la quantificazione dell'energia incorporata, ovvero l'energia spesa durante le fasi di produzione dei materiali e dei componenti edili, di trasporto, di costruzione, di manutenzione e demolizione.

Dall'analisi è risultato che le metodologie più diffuse sono le seguenti:

1. La *Life Cycle Assessment* (LCA);
2. L'analisi *Input – Output* (I – O) con estensione energetica;
3. I metodi ibridi.

Inoltre, sono stati esaminati i principali riferimenti normativi in tema di sostenibilità delle costruzioni, ovvero:

- UNI EN 15978: 2011 - Sostenibilità delle costruzioni. Valutazione della prestazione ambientale degli edifici. Metodi di calcolo;
- UNI EN 15804:2012 - Sostenibilità delle costruzioni - Valutazione della prestazione ambientale degli edifici - Metodo di calcolo.

Nella seconda fase dell'attività si è proceduto con l'analisi dello stato dell'arte sull'energia incorporata negli edifici che è strettamente connessa al ciclo di vita dei materiali e dei componenti edili adoperati. In particolare, è stato esaminato un campione di studi di letteratura da cui sono stati selezionati 9 casi studio; i casi studio sono stati identificati in riferimento a criteri di completezza dello studio effettuato (fasi del ciclo di vita incluse nei confini del sistema), di diversificazione della tipologia edilizia, di destinazione d'uso degli ambienti e caratteristiche climatiche del sito. Per ogni studio è stato analizzato il consumo di energia incorporata complessiva espressa in MJ/(m²anno) e, quando possibile, l'incidenza delle diverse fasi del ciclo di vita.

Con riferimento alla seconda attività (Parte B), nel corso della prima annualità si sono sviluppate le seguenti analisi:

- 1) Analisi dello stato dell'arte sulla modellizzazione a livello internazionale del "*ventilative cooling*", ovvero l'insieme di tecniche di ventilazione naturale, meccanica o ibrida aventi per obiettivo il raffrescamento degli ambienti indoor tramite utilizzo di aria esterna;
- 2) Analisi di indicatori di prestazione e applicabilità del "*ventilative cooling*" in funzione di opportuni parametri meteo-climatici.

L'analisi dello stato dell'arte degli strumenti di modellizzazione esistenti ha considerato le seguenti tre categorie:

1. Modelli semplificati;
2. Modelli di *AirFlow Network* (AFN);
3. Modelli di fluidodinamica computazionale (CFD).

Con riferimento agli indicatori di prestazione e applicabilità del “*ventilative cooling*” sono stati analizzati 4 strumenti differenti rivolti alla quantificazione del potenziale di “*ventilative cooling*” stimabile in una fase di “*early design*” sulla base delle caratteristiche meteo-climatiche del sito. Le applicazioni descritte nel report approfondiscono metodi differenti, basati esclusivamente sulle condizioni climatiche esterne, o sulla modellizzazione schematica e semplificata delle interazioni tra ambiente confinato ed esterno. Infine, sono state descritte le attività svolte dal DEIM nell’ambito dell’IEA Annex 62 – Ventilative Cooling.

Parte A

2 Introduzione

L'edilizia rappresenta uno dei settori economici più significativi in termini di impatti energetici e ambientali, contribuendo a livello europeo per circa il 40% dei consumi finali di energia e per il 35% delle emissioni di gas serra [1].

La crescita della popolazione con il conseguente aumento della richiesta di abitazioni e l'aumento dei livelli di comfort all'interno degli edifici inducono un continuo aumento del consumo energetico del settore. In Europa negli ultimi 20 anni si è registrato un incremento dal valore di 400 Mtep al valore di 450 Mtep [2]. Per via della notevole quota di consumo ad esso ascrivibile, l'efficienza energetica nel settore edilizio è stata indicata come una delle priorità assolute nel "Piano d'azione per l'efficienza energetica: concretizzare le potenzialità" della Commissione europea [3]. In dettaglio, nel Piano d'azione si afferma che il maggior potenziale di risparmio energetico si potrebbe realizzare nei settori residenziale e commerciale, per i quali le stime sul potenziale massimo di risparmio energetico sono rispettivamente del 27% e 30%. Pertanto, la riduzione dei consumi energetici e la produzione di energia da fonti energetiche rinnovabili nel settore edile sono misure importanti per il raggiungimento degli obiettivi della politica energetico – ambientale dell'Unione Europea di riduzione della dipendenza energetica e delle emissioni di gas a effetto serra.

L'energia consumata da un edificio nel corso del suo ciclo di vita può essere suddivisa in energia consumata durante la fase d'uso (energia per il riscaldamento, il raffrescamento, l'illuminazione, ecc.) ed energia spesa nella fase di costruzione, manutenzione e demolizione, ossia l'energia incorporata (*EI*) [4, 5]. La fase d'uso, in genere, rappresenta la quota maggiore del consumo energetico connesso al ciclo di vita dell'edificio [6]. In particolare, negli edifici standard essa rappresenta una quota variabile tra il 70 e il 90% dei consumi energetici complessivi. Di conseguenza, l'energia incorporata dei materiali da costruzione e nei componenti è stata, generalmente, trascurata nelle analisi energetiche degli edifici e nella maggior parte dei regolamenti e direttive [7]. L'approccio generalmente condiviso sulla riduzione del fabbisogno energetico e la mitigazione degli impatti ambientali causati dal settore edile si è focalizzato sulla riduzione dei consumi energetici nella fase d'uso. Negli anni, gli standard previsti sono stati sempre più stringenti fino a introdurre il concetto di "Edificio a Energia Netta Zero" (Net Zero Energy Building – Net ZEB). Un Net ZEB è definito come un edificio caratterizzato da elevate prestazioni termofisiche in grado di produrre energia da fonti rinnovabili, in sito, al fine di soddisfare il proprio fabbisogno energetico [8].

Il concetto di edificio a energia netta zero si sta progressivamente diffondendo nel panorama scientifico internazionale, soprattutto in relazione all'emanazione della Direttiva 2010/31/UE (EPBD recast) sulla prestazione energetica nell'edilizia [9] che stabilisce che entro il 1° gennaio 2021 tutti gli edifici di nuova costruzione, pubblici e privati, dovranno essere edifici a Energia Netta Quasi Zero (*Nearly Net ZEB*).

Nei Net ZEB e in generale negli edifici a basso consumo energetico, a fronte di una marcata riduzione dei consumi nella fase operativa, si assiste ad una crescita dell'Energia Incorporata di materiali e tecnologie impiegati nel sistema edificio - impianto [7, 8, 10]. Di conseguenza, assume una rilevante importanza la valutazione delle prestazioni energetico – ambientali degli edifici tramite bilanci energetici che comprendano tutte le fasi del ciclo di vita dell'edificio stesso, e non si limitino alla sola fase d'uso. In particolare si rimanda alla norma UNI EN 15978: 2011 [11].

In uno scenario di diffusione degli edifici *Nearly Net ZEB* e in una prospettiva di riduzione dei consumi energetici connessi al settore delle costruzioni, la corretta quantificazione dell'energia incorporata e l'individuazione di tecniche e materiali costruttivi che consentano una sua riduzione assumono un ruolo di primaria importanza nella lotta agli sprechi energetici e ai cambiamenti climatici.

Nel presente report, in una prima fase, sono state descritte le principali metodologie di calcolo dell'energia incorporata nei materiali e nei sistemi energetici in ogni fase del ciclo di vita. In particolare, a seguito di un'analisi dello stato dell'arte, sono state individuate e analizzate le metodologie di calcolo più diffuse, ossia la *Life Cycle Assessment* (LCA), l'analisi di *Input – Output* (I – O) con estensione energetica e i metodi

ibridi. In una seconda fase è stata svolta l'analisi dello stato dell'arte sull'energia incorporata in alcuni edifici campione selezionati, computata grazie all'impiego delle metodologie LCA e ibride, e che ha compendiato anche l'EI dei materiali e delle tecnologie impiegati nei cicli di vita degli edifici indagati.

3 Definizioni, confini del sistema e metodi di calcolo per l'energia incorporata negli edifici

3.1 Energia incorporata

Per energia incorporata si intende la somma dei consumi energetici, diretti e indiretti, associati al ciclo di vita di un prodotto o di un servizio [12]. La sua definizione, tuttavia, non è univoca ed è strettamente connessa alle fasi del ciclo di vita considerate nella sua quantificazione. Adottando un approccio "life cycle", l'energia incorporata di un prodotto o di un servizio può essere definita come la quantità totale di energia primaria richiesta per tutti i processi connessi alla sua produzione, al suo trasporto fino al luogo di utilizzo, alla sua manutenzione e al suo fine vita [4, 5].

Nel caso specifico degli edifici l'energia incorporata può essere definita come l'energia primaria consumata in tutti processi di fabbricazione dei materiali e dei componenti edili, durante le fasi di costruzione in cantiere, di ristrutturazione, di demolizione/decostruzione e di smaltimento finale [13].

L'energia incorporata di un qualsiasi materiale può essere distinta in due componenti, una diretta e una indiretta [14].

Negli edifici, la componente diretta dell'energia incorporata è fornita dalla somma dell'energia consumata nelle seguenti fasi del ciclo di vita:

- Costruzione;
- Trasporto.

L'energia incorporata indiretta si ottiene dalla somma dell'energia consumata nelle seguenti fasi:

- Manifattura dei materiali e dei componenti edili;
- *Upstream*;
- *Downstream*;
- Manutenzione;
- Ristrutturazione;
- Demolizione.

Le fasi di *upstream* e di *downstream* si riferiscono, rispettivamente, ai processi a monte e a valle della catena produttiva principale.

È possibile classificare i vari termini che costituiscono l'energia incorporata in tre categorie [14]:

1. Energia incorporata iniziale - energia utilizzata durante la produzione di materiali e componenti di un edificio e nella fase di costruzione: comprende l'approvvigionamento delle materie prime, la produzione dei materiali e dei componenti edili, la consegna finale del prodotto presso il cantiere e tutti i processi di costruzione;
2. Energia incorporata periodica o per manutenzione - energia utilizzata in vari processi per la manutenzione e la ristrutturazione dell'edificio (materiali e componenti per l'edilizia) nel corso della loro vita utile;
3. Energia per la demolizione - energia necessaria per la demolizione/decostruzione dell'edificio e lo smaltimento dei materiali e dei componenti edili.

L'analisi delle definizioni disponibili in letteratura sull'energia incorporata ha confermato l'assenza di una definizione univoca. Ad esempio, Crowther [15] definisce l'energia incorporata come "l'energia totale necessaria per la costruzione di un edificio, compresa la componente diretta utilizzata nel processo di costruzione e montaggio, e quella indiretta, richiesta per la fabbricazione dei materiali e componenti";

Treloar et al. [16] afferma che “l’energia incorporata è l’energia (diretta e indiretta) richiesta dai processi di “upstream” di un prodotto”; infine, altri autori forniscono una definizione più completa esprimendo l’energia incorporata come la somma dell’energia consumata durante l’estrazione, la trasformazione e il trasporto delle materie prime, la fabbricazione dei materiali e dei componenti e durante i vari processi delle fasi di costruzione e demolizione dell’edificio [13, 17, 18].

3.2 Confini del sistema

Dall’analisi di letteratura dell’energia incorporata degli edifici è emerso che sono disponibili numerose definizioni che si differenziano, essenzialmente, per le fasi del ciclo di vita incluse nei confini del sistema dello studio. Gli approcci di calcolo per l’energia incorporata degli edifici e dei singoli componenti edilizi sulla base dei confini del sistema stabiliti per lo studio sono [19, 20, 21, 22, 23]:

1. Dalla culla al cancello (*from cradle to gate*) – Tale approccio considera l’energia primaria richiesta per l’estrazione delle materie prime, per la loro lavorazione, per la fase di assemblaggio in prodotti finiti;
2. Dalla culla al sito (*from cradle to site*) – Tale approccio considera l’energia primaria richiesta per l’estrazione delle materie prime, per la loro lavorazione, per la fase di assemblaggio in prodotti finiti 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 delle materie prime, per la loro lavorazione, per la fase di assemblaggio in prodotti finiti, il trasporto dei prodotti finiti al sito di costruzione, la costruzione e l’assemblaggio dell’edificio nel sito di costruzione;
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 delle materie prime, per la loro lavorazione, per la fase di assemblaggio in prodotti finiti, il trasporto dei prodotti finiti al sito di costruzione, la costruzione e l’assemblaggio dell’edificio nel sito di costruzione, le attività di manutenzione, restauro e ristrutturazione;
5. Dalla culla alla tomba (*from cradle to grave*) – Tale approccio considera l’energia primaria richiesta per l’estrazione delle materie prime, per la loro lavorazione, per la fase di assemblaggio in prodotti finiti, il trasporto dei prodotti finiti al sito di costruzione, la costruzione e l’assemblaggio dell’edificio nel sito di costruzione, le attività di manutenzione, restauro e ristrutturazione, la fase di fine vita dell’edificio che consiste nella decostruzione o demolizione dell’edificio e nel trattamento e smaltimento dei rifiuti;
6. Dalla culla alla culla (*from cradle to cradle*) – Tale approccio considera l’energia primaria richiesta per l’estrazione delle materie prime, per la loro lavorazione, per la fase di assemblaggio in prodotti finiti, il trasporto dei prodotti finiti al sito di costruzione, la costruzione e l’assemblaggio dell’edificio nel sito di costruzione, le attività di manutenzione, restauro e ristrutturazione, la fase di fine vita dell’edificio e la conversione, quando possibile, dei materiali e dei componenti edili, giunti a fine vita, in nuove materie prime della stessa qualità o di qualità inferiore.

3.3 Metodologie di calcolo

La procedura di calcolo dell’energia incorporata in un edificio è molto complessa. Infatti, un edificio è realizzato con diverse tipologie di materiali edili e ad ogni materiale sono associati i consumi energetici connessi alla fase di produzione, assemblaggio, manutenzione, demolizione e smaltimento. A seguito di un’analisi dello stato dell’arte [12, 13, 24], è emerso che le metodologie di calcolo più diffuse a livello internazionale per la quantificazione dell’energia incorporata sono:

1. La *Life Cycle Assessment* (LCA) [25, 26];
2. L'Input – Output (I – O) con estensione energetica [27, 28];
3. Metodo ibrido che combina elementi della LCA e della I – O [29].

3.3.1 *Life Cycle Assessment*

La **metodologia LCA** rappresenta un metodo oggettivo di valutazione e quantificazione dei carichi energetici ed ambientali e degli impatti potenziali associati ad un prodotto/processo/attività lungo l'intero ciclo di vita, dall'acquisizione delle materie prime fino alla fine della vita utile [30]. Attualmente, il riferimento normativo internazionale per lo sviluppo degli studi LCA è rappresentato dalle seguenti norme della serie ISO 14040: 2006:

- *UNI EN ISO 14040:2006 "Gestione ambientale – Valutazione del ciclo di vita – Principi e quadro di riferimento"*, che fornisce in un quadro generale le pratiche, le applicazioni e le limitazioni della LCA, ed è destinata ad una vasta gamma di potenziali utenti e parti interessate, anche con una conoscenza limitata della valutazione del ciclo di vita [25];
- *UNI EN ISO 14044:2006 "Gestione ambientale – Valutazione del ciclo di vita – Requisiti e linee guida"*, che è stata elaborata per la preparazione, la gestione e la revisione critica del ciclo di vita e rappresenta il principale supporto per l'applicazione pratica di uno studio di LCA [26].

Le fasi di una LCA sono le seguenti:

1. Definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione dello studio (*Goal and scope definition*);
2. Analisi di inventario (*Life Cycle Inventory*);
3. Valutazione dell'impatto (*Life Cycle Impact Assessment*);
4. Interpretazione dei risultati (*Life Cycle Interpretation*).

Durante la **definizione degli obiettivi** occorre definire le finalità dello studio LCA. Gli obiettivi nella redazione della LCA possono essere molteplici: ad esempio, la formulazione di linee guida "eco – orientate" per policy makers, imprenditori, tecnici e operai; la valutazione delle performance ambientali dei prodotti; l'ottenimento di dichiarazioni ambientali di prodotto; ecc. Le caratteristiche dello studio e la quantità di risorse umane ed economiche impiegate sono strettamente connesse agli obiettivi da perseguire, che devono essere definiti con chiarezza.

Nel definire il **campo di applicazione** devono essere considerati e descritti i seguenti punti:

- **Le funzioni del sistema/prodotto**, che rappresentano le caratteristiche prestazionali del sistema in esame;
- **L'unità funzionale (UF)**, che rappresenta il parametro cui riferire tutti gli elementi che compongono il bilancio del sistema in esame;
- **I confini del sistema e le regole di cut – off**. I confini del sistema definiscono le unità di processo che devono essere incluse nella LCA. Le unità di processo che in genere sono comprese in uno studio LCA sono: estrazione delle risorse, produzione dei prodotti intermedi, produzione del manufatto principale, uso del prodotto e manutenzione; smaltimento del prodotto a fine vita; processi di trasporto. I criteri adottati nello stabilire i confini del sistema devono essere chiaramente indicati. Le regole di *cut – off* permettono di identificare i flussi di massa e di energia, in ingresso e in uscita dal sistema, che devono essere considerati. I criteri di adottati sono, generalmente basati su contributi di "massa", di "energia" o di "rilevanza ambientale".

- **Le procedure di allocazione**, ossia il procedimento attraverso il quale i flussi di materia e di energia in ingresso nei processi multifunzionali 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 metodologia di valutazione dell'impatto ambientale**, ossia la definizione delle categorie di impatto, degli indicatori di categoria e dei modelli di caratterizzazione adoperati nello studio;
- **I requisiti di qualità dei dati**, i parametri che definiscono la qualità dei dati sono la rappresentatività geografica, temporale e tecnologica, la precisione, la completezza, la coerenza, la riproducibilità, il grado di incertezza e le fonti.

Nella fase di **analisi di inventario** sono contabilizzati i flussi di materia ed energia in input e output, dei reflui di processo e di eventuali co – prodotti in output dal sistema. Al fine di rendere più agevole il lavoro di raccolta dati può essere utile definire un diagramma di flusso che schematizzi le fasi salienti del ciclo di vita e gli input e output per ogni singola fase [31]. Durante questa fase sono definiti gli aspetti critici del sistema per i quali lo studio e le indagini di campo dovranno essere approfonditi perché di importanza maggiore rispetto ad altri. Sulla base dei criteri stabiliti nella fase di definizione del campo di applicazione, sono stabiliti i limiti funzionali del sistema, identificando le fasi marginali del ciclo di vita e i flussi di massa e di energia, in input e in output, che possono essere trascurati.

L'output della fase di inventario è costituito dalla Tabella di Inventario che riporta i flussi di materie prime ed energia, le emissioni in aria, acqua e suolo e i rifiuti prodotti riferiti all'UF.

Le informazioni ottenute nell'analisi di inventario costituiscono la base di partenza per la **valutazione dell'impatto ambientale**. Essa si articola in 4 fasi:

1. Classificazione;
2. Caratterizzazione;
3. Normalizzazione;
4. Ponderazione.

Le prime due fasi costituiscono elementi obbligatori di una LCA, mentre le ultime due sono opzionali.

Nella **fase di classificazione** i flussi inventariati sono classificati nelle categorie di impatto selezionate, in relazione agli impatti indotti sui comparti ambientali indagati (acqua, aria, suolo, ecc.) [31]. Alla fine di questa fase, in ciascuna categoria di impatto ambientale saranno contenuti tutti i flussi in ingresso e in uscita del ciclo di vita che potenzialmente possono contribuire all'impatto considerato.

Nella **fase di caratterizzazione** gli input ed output, precedentemente classificati, sono moltiplicati per i "fattori di caratterizzazione" che sono rappresentativi dell'incidenza di ciascuna sostanza sulla categoria di impatto ambientale considerata. I dati, moltiplicati per i corrispondenti fattori di caratterizzazione costituiscono delle quantità omogenee che, sommate, forniscono l'impatto in ciascuna categoria.

Nella **fase di normalizzazione** i valori precedentemente ottenuti vengono normalizzati, ovvero rapportati ad un valore di riferimento rappresentato, in genere, da dati medi su scala mondiale, europea o regionale e riferiti ad un determinato intervallo di tempo.

Infine, nella **fase di ponderazione** i valori normalizzati sono prima moltiplicati per dei fattori peso, che esprimono la criticità attribuita a ciascun problema ambientale e, successivamente, addizionati fra di loro allo scopo di ottenere un valore globale dell'impatto.

Durante la **fase di interpretazione** i risultati ottenuti nell'analisi di inventario e nella valutazione degli impatti sono opportunamente analizzati, allo scopo di trarre conclusioni e raccomandazioni in conformità con gli obiettivi dello studio. In questa fase sono identificati gli aspetti ambientali più significativi, è valutata l'attendibilità dello studio attraverso verifiche di completezza, sensibilità e consistenza.

La LCA è una metodologia che consente di ottenere informazioni dettagliate sul ciclo di vita dei singoli prodotti e servizi; essa può costituire un valido strumento di supporto alle decisioni e può essere impiegata

per la valutazione degli impatti energetico – ambientali, in particolare dell'energia incorporata, dei sistemi analizzati e per migliorarne l'eco – profilo.

3.3.2 Input – Output (I – O) con estensione energetica

La metodologia input – output è stata originariamente sviluppata da Wassily Leontief e mostra le interrelazioni economiche tra i diversi settori produttivi e tra quest'ultime e i consumatori finali [27].

L'economia di una specifica area geografica (regione, stato, ecc.) è rappresentata da un insieme di unità produttive (industrie) che svolgono una duplice transazione:

- Produzione di beni o servizi (output);
- Consumo di beni e servizi forniti da altre industrie (input) per i propri processi produttivi.

Un modello di input – output è realizzato utilizzando i dati sui flussi di prodotti da ogni settore produttivo ad ogni settore d'acquisto. Questi flussi interindustriali sono misurati in un determinato periodo e sono espressi in termini monetari.

I risultati del modello sono riportati in una tavola denominata tavola input-output simmetrica, ottenuta combinando le informazioni contenute in altre due tavole, denominate rispettivamente tavola delle risorse e tavola degli impieghi.

Una tavola delle risorse mostra la disponibilità totale di risorse classificate per prodotto e per branca di attività economica, distinguendo tra produzione interna e importazioni. Esse forniscono un quadro dettagliato dell'offerta di beni e servizi (sia di produzione interna che di importazione).

Una tavola degli impieghi presenta gli impieghi dei beni e servizi per prodotto e per tipo di impiego (intermedio e finale) e illustra le componenti del valore aggiunto lordo. Essa è suddivisa in tre parti: impieghi intermedi, impieghi finali e valore aggiunto.

A partire dalle informazioni contenute nelle tavole delle risorse e degli impieghi si costruiscono le tavole di input – output.

Una tavola input-output descrive i flussi di beni e servizi tra tutti i settori dell'economia nazionale nell'arco temporale di un anno. La lettura verticale della tavola input-output indica in che modo si formano le risorse ed in particolare quanta parte delle risorse è prodotta internamente e quanta è importata, evidenziando per la parte prodotta nel paese quali input intermedi e primari sono stati utilizzati. La lettura orizzontale della tavola input-output, invece, fornisce l'indicazione sulla destinazione (impiego) delle risorse disponibili, ossia l'analisi del mercato degli utilizzatori.

L'equazione di base del modello input – output è la seguente [32, 33, 34]:

$$X = (I - A)^{-1} \cdot Y \quad (1)$$

dove:

Y è il vettore che rappresenta la domanda finale di beni e servizi;

X è il vettore che rappresenta gli output necessari a soddisfare la domanda finale;

I è la matrice identità;

A è la matrice dei coefficienti tecnologici, il cui generico elemento a_{ij} rappresenta la quantità di output del settore i assorbita dal settore j per unità di output totale del settore j.

La metodologia input – output, opportunamente adattata, può essere utilizzata per l'analisi energetica di un sistema economico.

L'analisi energetica consiste nell'individuazione dell'energia richiesta dai processi produttivi di beni e servizi all'interno di una struttura economica, ed in particolare nella determinazione dell'energia richiesta per la produzione di un materiale, per la manifattura di un prodotto o per la fornitura di un servizio; essa riguarda

non solo l'energia direttamente utilizzata per la manifattura di un bene o servizio, ma anche l'energia indiretta richiesta dal processo di produzione, ad esempio per la produzione e il trasporto dei beni e servizi utilizzati come input in quel processo produttivo.

Il modello, definito "Input – Output con estensione energetica" [27], è basato sull'utilizzo delle tavole input – output e sui dati riguardanti i consumi energetici dei vari processi produttivi e dei consumatori finali di un sistema economico e consente di esaminare le interrelazioni tra economia ed energia attraverso l'elaborazione di dati monetari, energetici e ambientali.

Combinando i valori dei consumi energetici per unità di output dei diversi settori economici con i consumi intermedi e finali di beni e servizi (derivabili dalle tavole input-output) è possibile stimare il fabbisogno energetico, sia diretto che indiretto, degli utilizzatori finali.

L'approccio di seguito descritto è tratto dallo studio presentato da Cellura et al. [27].

La quantità di energia totale connessa al ciclo di vita di un sistema è data dalla somma dell'aliquota di energia indiretta utilizzata dal settore industriale per la produzione dei beni e servizi connessi al ciclo di vita del sistema (eccetto la fase d'uso) e dell'aliquota di energia diretta consumata dagli utenti finali durante l'uso del sistema.

$$E_{ind} = E^T \cdot X \quad (2)$$

in cui il generico elemento indica l'energia k consumata dal settore i per la produzione dell'output x_i .

Nella (2) X è il vettore degli output totali ottenuto dalla relazione (1), E^T è la trasposta di una matrice E il cui generico elemento (espresso come energia/unità monetaria, ad esempio in MJ/€) indica la quantità di energia k (espressa in unità fisiche) consumata dall'industria i , per unità di output totale dell'industria i (espresso in unità monetarie). Sostituendo l'espressione (1) nella (2) si ottiene:

$$E_{ind} = E^T \cdot (I - A)^{-1} \cdot Y \quad (3)$$

dove Y è il vettore della domanda.

Il consumo di energia diretta da parte degli utenti finali è espresso dalla matrice E_{fin} il cui generico elemento rappresenta la quantità di energia k impiegata per uso finale.

Il consumo totale di energia, diretta e indiretta, del sistema economico sarà dato dalla matrice:

$$E_{tot} = E_{ind} + E_{fin} = E^T \cdot (I - A)^{-1} \cdot Y + E_{fin} \quad (4)$$

La metodologia proposta presenta i seguenti limiti [27]:

- Assume che i coefficienti tecnologici siano costanti, per cui il quantitativo di input necessario per produrre una unità di output è considerata costante nel breve termine e si trascura quindi l'effetto del prezzo, dell'innovazione tecnologica e delle economie di scala;
- Assume che le funzioni di produzione siano lineari;
- Assume che ogni settore economico produca e venda un solo bene omogeneo;
- Non considera vincoli sulle risorse, l'offerta è considerata infinita e perfettamente elastica;
- Assume che le risorse locali sono impiegate in modo efficiente;
- Le tavole di input – output descrivono un'economia in un determinato periodo e non evidenziano l'andamento delle interrelazioni economiche nel lungo periodo.

L'analisi energetica degli edifici eseguita con la metodologia input – output consente la contabilizzazione degli input energetici, diretti e indiretti, coinvolti nel ciclo di vita di materiali e componenti edili [14]. Nonostante la metodologia fornisca risultati ad un elevato livello di aggregazione e non consenta di ottenere informazioni dettagliate relative al singolo prodotto/servizio, presenta il grande vantaggio di una semplice applicabilità poiché si basa sull'elaborazione di dati regolarmente pubblicati da organismi pubblici.

- Le regole per l'elaborazione degli scenari di valutazione;
- Le regole per l'elaborazione dell'inventario e la valutazione di impatto nell'analisi del ciclo di vita, alla base della EPD, comprese le specifiche da applicare sulla qualità dei dati;
- Le regole per la comunicazione delle informazioni predefinite di carattere ambientale e sanitario, che non sono contenute nella valutazione del ciclo di vita di prodotto (LCA), di processo e di servizio;
- Le condizioni per le quali i prodotti da costruzione possono essere confrontati sulla base delle informazioni fornite nella EPD.

Per quanto riguarda le EPD di servizi per le costruzioni, si applicano regole e requisiti identici a quelli dei prodotti.

4 Stato dell'arte sull'energia incorporata negli edifici

4.1 Introduzione

In questo capitolo sono stati analizzati degli studi di letteratura riguardanti l'energia incorporata negli edifici. In dettaglio, è stato esaminato un campione di studi di letteratura da cui sono stati selezionati 9 casi studio; in particolare sono stati selezionati dei casi studio che presentavano una maggiore completezza in termini di fasi del ciclo di vita incluse nei confini del sistema e che consentivano di ottenere un campione sufficientemente rappresentativo delle tipologie di edifici esistenti. Gli studi sono stati catalogati sulla base delle seguenti caratteristiche:

- Tipologia edilizia;
- Destinazione d'uso (residenziali (R), scolastici (S) uffici (U), alberghiero (A));
- Condizioni climatiche del sito.

Nei paragrafi successivi sono analizzati i seguenti casi studio:

1. Edificio a uso residenziale sito in Italia;
2. Edificio a uso residenziale sito in India;
3. Edificio a uso residenziale sito in Brasile;
4. Edificio per uffici sito in Austria;
5. Edificio per uffici sito in Danimarca;
6. Edificio per uffici sito in Thailandia;
7. Edificio a uso scolastico sito nel Regno Unito;
8. Edificio a uso scolastico sito in Germania;
9. Edificio a uso scolastico/commerciale sito nel Michigan.

Per ogni caso studio sono state riportate, quando disponibili, informazioni riguardanti le tecniche costruttive, i materiali adottati, le fasi del ciclo di vita incluse all'interno dei confini del sistema e la loro incidenza sull'energia incorporata complessiva.

4.2 Caso studio n. 1: Edificio ad uso residenziale – Italia [5]

Il presente caso studio è un'abitazione residenziale mono – familiare situata a Palermo, nell'Italia meridionale nella fascia climatica mediterranea.

L'edificio ha una superficie di 110 m² ed è costituito da un solo piano. La struttura è realizzata in cemento armato, i muri esterni sono realizzati con mattoni da 20 cm con un'intercapedine di 9 cm riempita con schiuma di vermiculite. Il pavimento ha uno spessore di 20 cm ed è costituito da mattoni forati e travi prefabbricate in cemento armato; il tetto ha una struttura di legno costituita con materiali compositi, la copertura è realizzata con tegole in argilla. Le pareti esterne hanno un valore di trasmittanza termica U di 0,96 W/(m² K), il tetto e il piano terra di 0,60 W/(m² K) e 1,6 W/(m² K), rispettivamente (Tabella 2). Per quanto riguarda le superfici trasparenti, l'edificio è dotato di finestre con doppi vetri (U = 2,8 W/(m² K)) con telai di legno.

L'edificio è stato sottoposto alle seguenti azioni di retrofit allo scopo di migliorarne le prestazioni energetiche:

- Isolamento termico della facciata attraverso una copertura in polistirene espanso (EPS) dello spessore di 12 cm. Questo intervento consente di ridurre la trasmittanza termica da 0,96 W/(m² K) a 0,27 W/(m² K);

- Isolamento termico del tetto con lana di roccia dello spessore di 8 cm. Questo intervento consente di ridurre la trasmittanza termica da 0,60 W/(m² K) a 0,27 W/(m² K);
- Isolamento del pavimento con uno strato di polistirene estruso di 8 cm di spessore. Questo intervento consente di ridurre la trasmittanza termica da 1,60 W/(m² K) a 0,39 W/(m² K);
- Installazione su tetto di un impianto fotovoltaico da 2,16 kW_p connesso alla rete;
- Sostituzione della caldaia esistente con una caldaia più efficiente ($\eta = 0,92$).

Nella Figura 1 è riportato uno schema dell'edificio oggetto di studio.

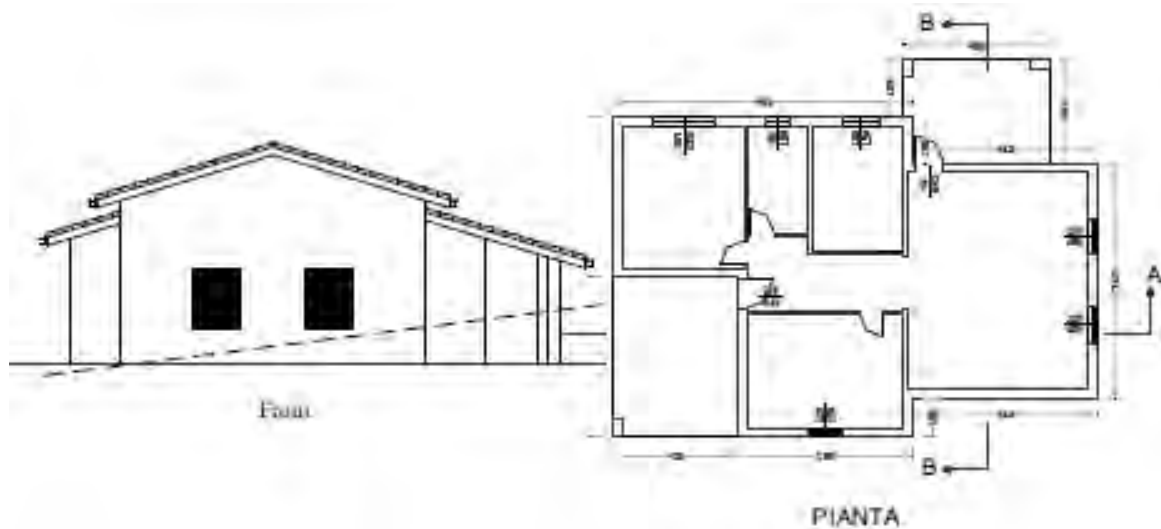


Figura 1: Edificio ad uso residenziale in Italia [5]

Tabella 2: Parametri caratteristici dell'edificio

Tipologia d'uso	Residenziale
Località	Palermo, Italia
Superficie riscaldata (m ²)	110
Area delle pareti esterne (m ²)	411
Piani	1
Trasmittanza termica delle pareti esterne (W/(m ² K))	0,96
Trasmittanza termica del tetto (W/(m ² K))	0,6
Trasmittanza termica del pavimento (W/(m ² K))	1,6

La stima dell'energia incorporata nell'edificio è stata eseguita con la metodologia LCA [25, 26]. Applicando il metodo *Cumulative Energy Demand* [36]. L'unità funzionale dello studio è l'edificio. Per consentire la comparabilità tra i casi studio esaminati i risultati sono stati espressi, inoltre, per m² di superficie all'anno. Gli impatti sono stati calcolati considerando una vita utile dell'edificio di 50 anni. Lo studio è del tipo "from cradle to grave" e comprende le seguenti fasi del ciclo di vita:

- Produzione di materiali e componenti;
- Trasporto al sito di costruzione;
- Fine vita.

La produzione dei materiali e dei componenti include l'estrazione delle materie prime, la loro lavorazione e la fabbricazione dei materiali edili e dei componenti tecnici; la fase di fine vita include la demolizione dell'edificio e lo smaltimento dei rifiuti.

Nelle Tabella 3 sono riportati i valori di energia incorporata per l'edificio riferiti all'unità funzionale e per m² di superficie all'anno. Dall'analisi dei dati si evince che l'energia incorporata dell'edificio è pari a **1,32E+06 MJ** (239,64 MJ/(m²anno)) di cui il 90,5% è costituito da energia primaria non rinnovabile.

Tabella 3: Energia incorporata nelle diverse fasi del ciclo di vita dell'edificio

Fasi del ciclo di vita	Consumo di energia primaria non rinnovabile		Consumo di energia primaria rinnovabile		Consumo di energia primaria totale	
	MJ/UF	MJ/(m ² anno)	MJ/UF	MJ/(m ² anno)	MJ/UF	MJ/(m ² anno)
Produzione	1,09E+06	198,94	1,23E+05	22,41	1,22E+06	221,35
Fine vita	9,92E+04	18,04	1,42E+03	0,26	1,01E+05	18,29
Totale	1,19E+06	216,98	1,25E+05	22,66	1,32E+06	239,64

Nelle Figure 2, 3 e 4 è riportata l'incidenza percentuale delle due fasi del ciclo di vita considerate sull'energia incorporata non rinnovabile, rinnovabile e complessiva.

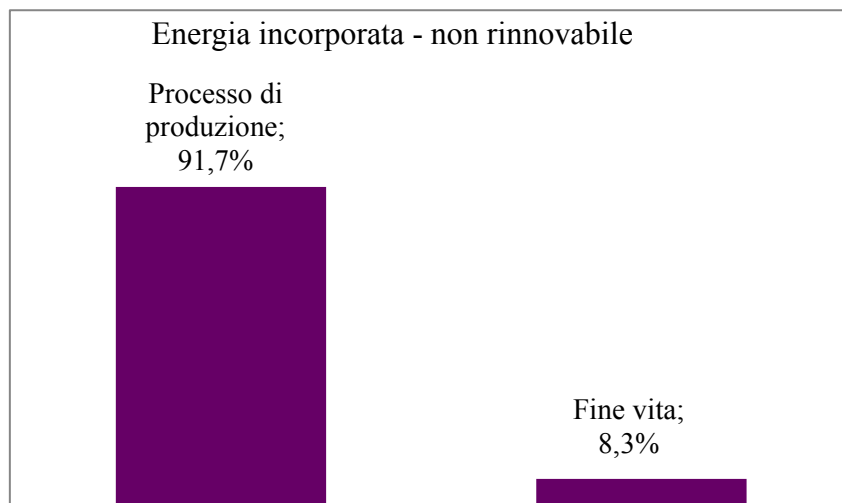


Figura 2: Incidenza delle fasi del ciclo di vita sull'energia incorporata non rinnovabile

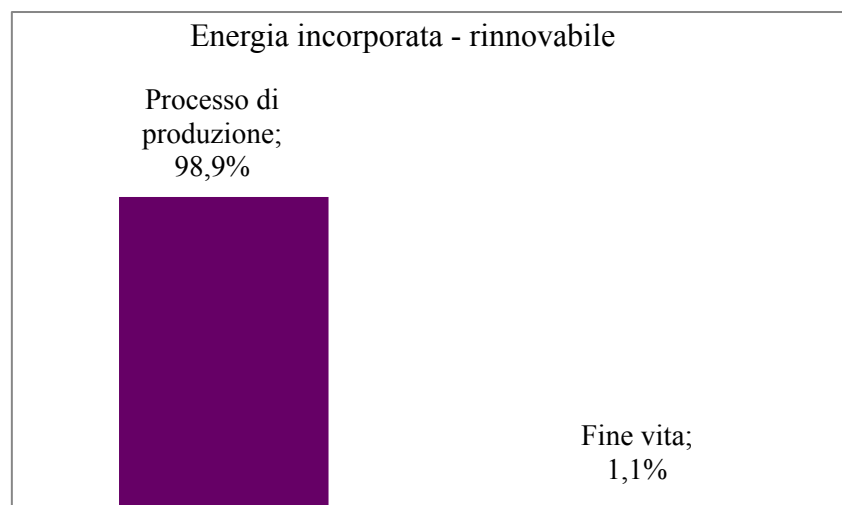


Figura 3: Incidenza delle fasi del ciclo di vita sull'energia incorporata rinnovabile

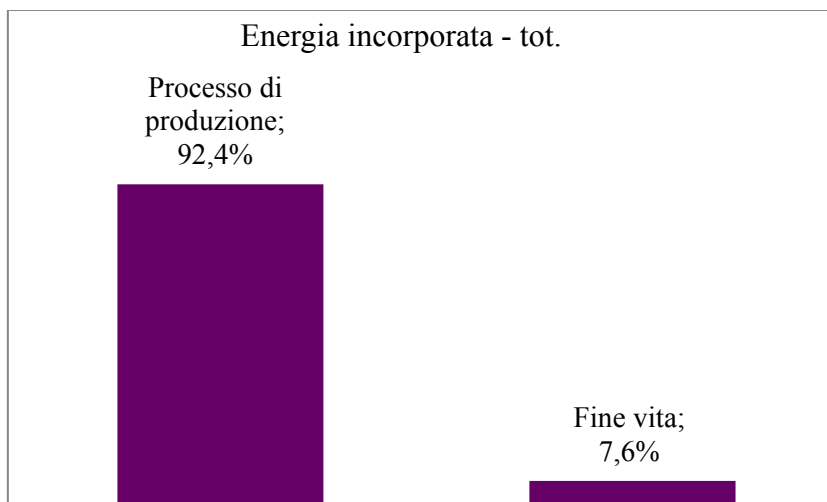


Figura 4: Incidenza delle fasi del ciclo di vita sull'energia incorporata complessiva

Il processo di produzione è quello responsabile del maggiore impatto sull'energia incorporata, pari al 91,7% dell'energia incorporata non rinnovabile, al 98,9% dell'energia incorporata rinnovabile e al 92,4% dell'energia incorporata complessiva.

L'energia incorporata delle azioni di retrofit è stata quantificata assumendo come unità funzionale ogni singola azione implementata. Lo studio segue l'approccio from "cradle to grave" e include le seguenti fasi del ciclo di vita:

- Produzione di componenti e impianti;
- Sostituzione;
- Demolizione/decostruzione;
- Trasporto in discarica e/o all'impianto di riciclo.

Sono state escluse dai confini del sistema la fase di trasporto presso l'edificio e la fase di installazione poiché la loro incidenza è risultata inferiore all'1%. Per tutte le azioni di retrofit è stata assunta una durata del ciclo di vita pari a 50 anni ad eccezione dell'impianto fotovoltaico e della caldaia per i quali si è prevista la necessità di una sostituzione in questo arco temporale.

Nella Tabella 4 è riportato il consumo di energia primaria connesso ad ogni azione di retrofit.

Tabella 4: Energia incorporata delle azioni di retrofit riferita all'UF

Azioni di Retrofit	Energia incorporata (MJ)
Retrofit dell'involucro	
<i>Pareti</i>	70.100
<i>Tetto</i>	39.100
<i>Pavimento</i>	112.000
Retrofit degli impianti	
<i>Impianto PV</i>	98.200
<i>Caldaia</i>	13.700
Totale	333.100

Le azioni di retrofit determinano un aumento dell'energia incorporata dell'intero edificio di una quantità pari a 331.100 MJ (60,01 MJ/(m² anno)) L'intervento responsabile del maggior consumo di energia primaria è il retrofit del pavimento, con un'incidenza pari al 33,6%; seguono l'installazione dell'impianto PV e il retrofit delle pareti con incidenze pari, rispettivamente, al 29,5% e al 21% (Figura 5).

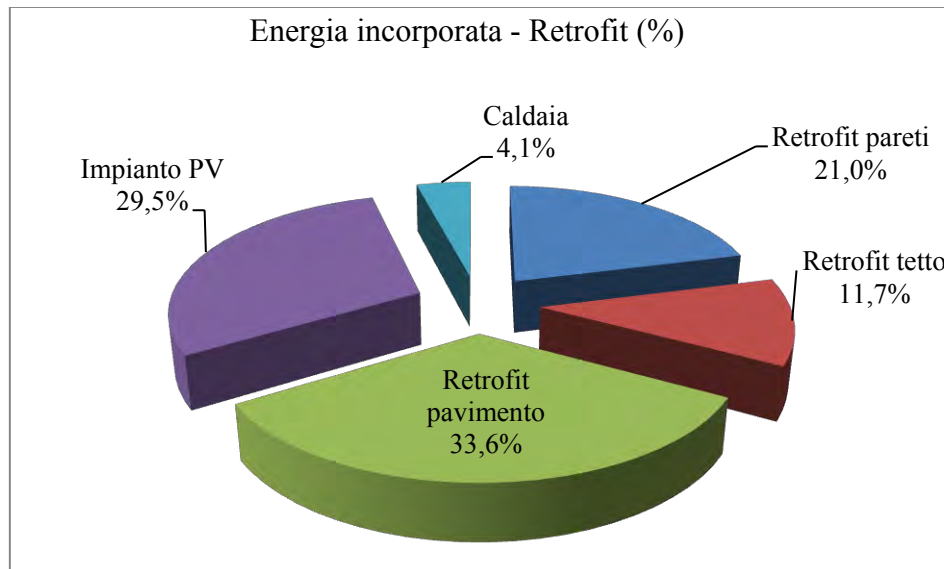


Figura 5: Incidenza delle singole azioni di retrofit sull'energia incorporata

Nella Tabella 5 è riportato il consumo di energia primaria espresso in MJ/(m² anno), connesso alle fasi del ciclo di vita dell'edificio oggetto di analisi, prima e dopo l'implementazione degli interventi di retrofit. Dall'analisi dei dati emerge che gli interventi di retrofit energetico causano l'aumento dell'energia incorporata dell'edificio di circa il 25%. A tale incremento corrisponde una riduzione dell'energia consumata nella fase d'uso pari a circa il -58%.

Tabella 5: Consumo di energia primaria del ciclo di vita dell'edificio prima e dopo il retrofit energetico

Fasi del ciclo di vita	Consumo di energia primaria – prima del retrofit MJ/(m ² anno)	Consumo di energia primaria – dopo il retrofit MJ/(m ² anno)
Produzione	221,35	281,36
Uso	604,93	255,09
Fine vita	18,29	18,82
Totale	844,57	555,27

Nelle Figure 6 e 7, si riporta, rispettivamente, l'incidenza percentuale delle diverse fasi del ciclo di vita sui consumi energetici complessivi prima e dopo gli interventi di retrofit energetico.

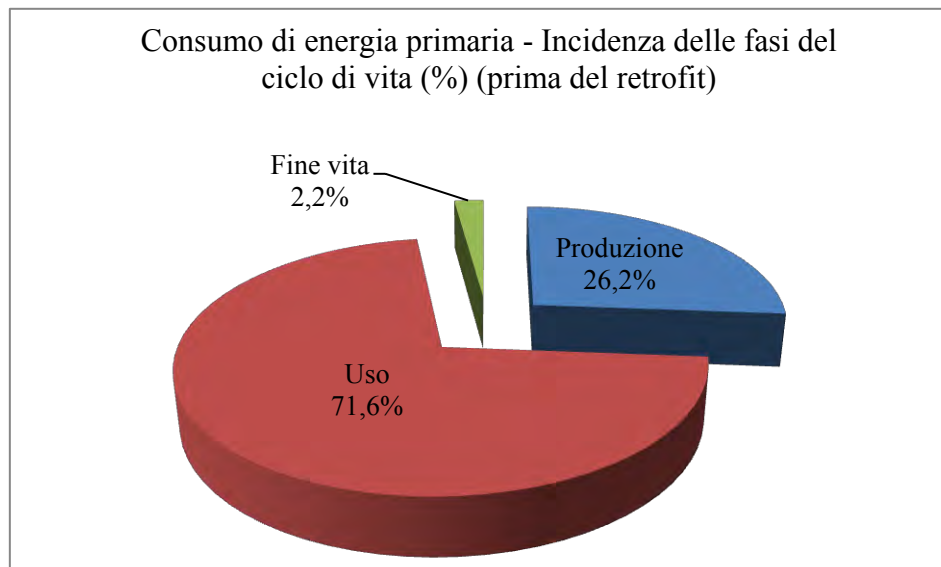


Figura 6: Incidenza delle fasi del ciclo di vita sull'energia incorporata complessiva – prima del retrofit energetico

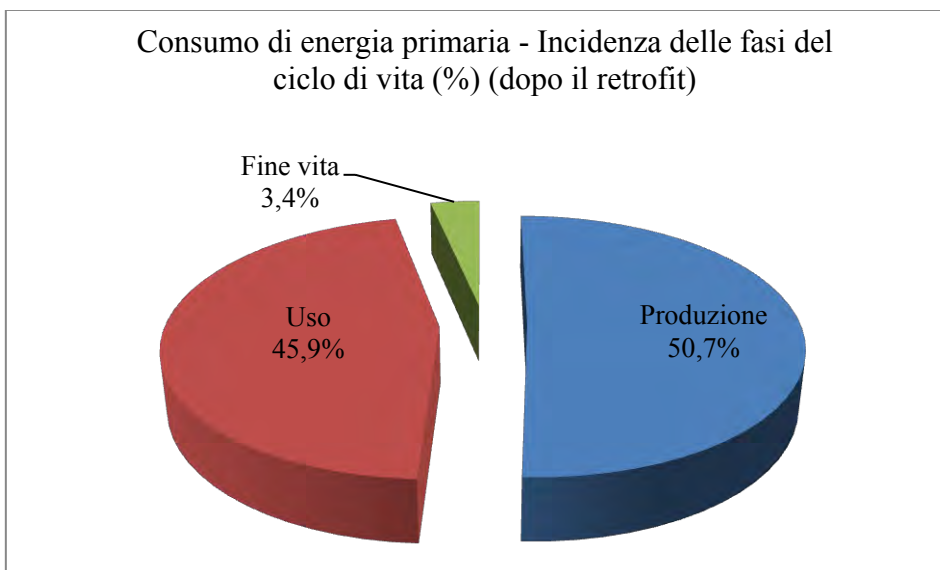


Figura 7: Incidenza delle fasi del ciclo di vita sull'energia incorporata complessiva – dopo il retrofit energetico

4.3 Caso studio n. 2: Edificio ad uso residenziale – India [37]

Nel presente paragrafo è stato analizzato un complesso residenziale multipiano nella città di Chennai in India, all'interno dell'Istituto Tecnologico di Madras. Chennai si trova nella costa sud – est dell'India nella fascia climatica tropicale (caldo umido). Il complesso residenziale è costituito da quattro edifici, ognuno di essi presenta un piano terra adibito a parcheggio su cui si elevano 6 piani; su ogni piano ci sono quattro appartamenti, quindi in totale il complesso è costituito da 96 appartamenti. La superficie utile di ogni appartamento è pari a 112,15 m².

Il telaio è realizzato in cemento armato, l'involucro è realizzato con blocchi in cemento da 23 cm e malta cementizia, mentre le pareti interne con blocchi da 11 cm contenenti ceneri leggere. Le finestre dell'edificio sono realizzate con telai di legno di 35 mm e vetri con uno spessore di 6 mm. Nella Figura 8 è riportata la planimetria degli appartamenti.

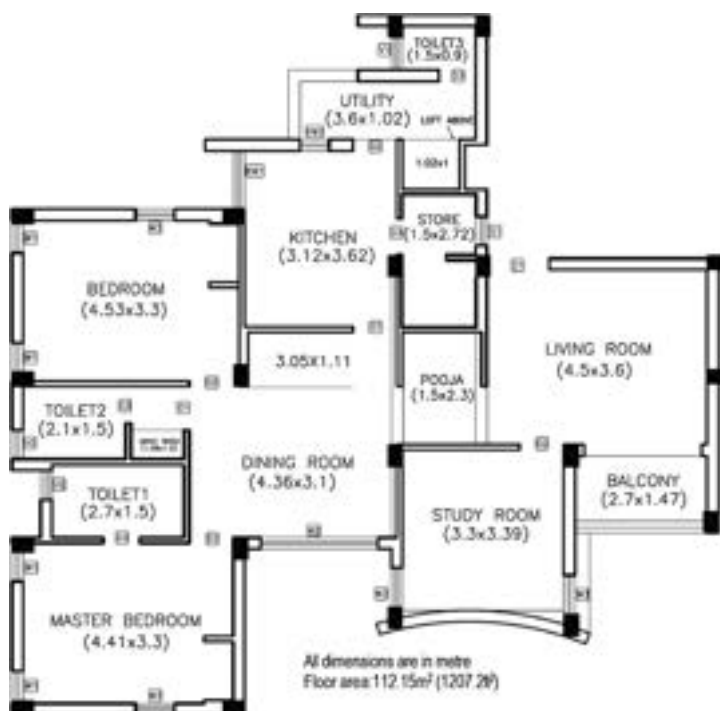


Figura 8: Planimetria edificio ad uso residenziale in India [37]

Nella Tabella 6 sono sintetizzati i parametri caratteristici dell'edificio.

Tabella 6: Parametri caratteristici dell'edificio

Tipologia d'uso	Residenziale
Località	Chennai, India
Superficie singolo appartamento (m ²)	112,5
Numero appartamenti	96
Piani	6
Involucro	Blocchi di cemento (23 cm)
Struttura dell'edificio	Cemento armato

L'analisi di LCA è stata effettuata in accordo alle norme della serie ISO 14040 [25, 26]. L'unità funzionale dello studio è l'intero complesso residenziale, l'energia incorporata è stata valutata assumendo confini del sistema del tipo "from cradle to grave" considerando la produzione dei materiali, la fase di costruzione e il fine vita e assumendo una durata del ciclo di vita pari a 50 anni.

Per stimare l'energia consumata per la produzione dei materiali si è fatto ricorso al progetto dell'edificio e alle specifiche dei materiali utilizzati, per la fase di costruzione si è proceduto valutando il consumo energetico connesso ad ogni tipo di attività e al trasporto dei materiali in cantiere nel fine vita è stata considerata l'energia connessa alla demolizione/decostruzione, al trasporto dei rifiuti demoliti e al conferimento in discarica. Si è assunto che l'energia consumata nel fine vita sia pari al 3% dell'energia incorporata iniziale. Nella valutazione dell'energia incorporata non sono state incluse le fasi di manutenzione e riparazione.

Nella Tabella 7 sono riportati i valori di energia incorporata nelle diverse fasi del ciclo di vita sia riferite all'unità funzionale che espresse per unità di superficie e per anno. Dallo studio è emerso che l'energia incorporata dell'intero complesso residenziale è pari a 1,34E+08 MJ (249,44 MJ/(m²anno)). Nella Figura 9 è riportata l'incidenza percentuale delle diverse fasi del ciclo di vita considerate. La fase di produzione è responsabile del maggior contributo all'energia incorporata con una quota pari all'86,6%. Nella Tabella 8 si riporta il valore dell'energia incorporata dei materiali e componenti edili impiegati nella costruzione dell'edificio. Dall'analisi dei dati si evince che la realizzazione del telaio strutturale in cemento armato è responsabile del maggior impatto sull'energia incorporata connessa alla fase di produzione dell'edificio, con un'incidenza pari al 73,9%.

Tabella 7: Energia incorporata nelle diverse fasi del ciclo di vita dell'edificio

	Produzione	Costruzione	Fine vita	Totale
MJ/UF	1,16E+08	1,41E+07	3,91E+06	1,34E+08
MJ/(m ² anno)	216,03	26,14	7,27	249,44

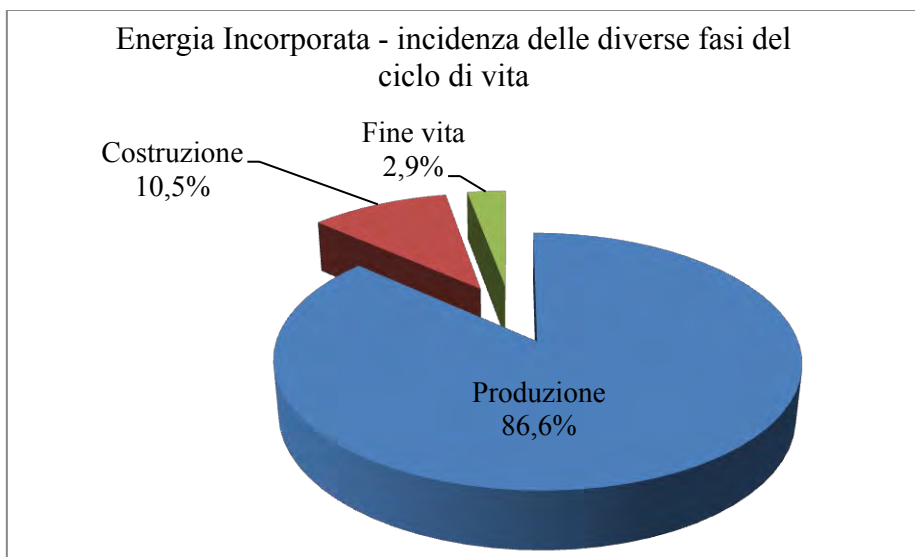


Figura 9: Incidenza delle fasi del ciclo di vita sull'energia incorporata complessiva

Tabella 8: Energia incorporata nella fase di produzione dei materiali e componenti edili (MJ)

Materiali e componenti edili	Energia Incorporata (MJ)	Energia Incorporata (%)
Telaio strutturale (cemento armato, compattazione con vibratore)	85.953.973	73,9%
Involucro edilizio (blocchi di cemento, malta cementizia)	9.573.402	8,2%
Lavori di finitura (intonaco, piastrelle, pittura)	15.018.685	12,9%
Porte e finestre	2.118.264	1,8%
Installazione dei sanitari	990.084	0,9%
Condotte e accessori	690.904	0,6%
Tubi e accessori in acciaio	1.949.575	1,7%
Totale	116.294.886	100%

4.4 Caso studio n. 3: Edificio ad uso residenziale – Brasile [38]

Il presente caso studio riguarda un edificio mono - piano ad uso residenziale sito vicino Brasilia, nella fascia climatica tropicale. L'edificio è una casa mono – familiare con una area interna di 48 m². La casa dispone di due camere da letto, un soggiorno, una cucina e un bagno, è dotata di due porte esterne, tre porte interne e cinque finestre. I muri (sia esterni che interni) sono realizzati con blocchi di ceramica dello spessore di 14 cm e da uno strato di intonaco costituito da cemento, calce e sabbia di 2,5 cm su ogni lato. I blocchi in ceramica svolgono anche una funzione strutturale. Il tetto è costituito da una struttura in legno ricoperta da tegole in ceramica e da fogli in PVC. Il pavimento è costituito da uno strato di calcestruzzo di 5 cm di spessore ed è ricoperto da piastrelle in ceramica. Le porte e le finestre esterne sono in metallo e sono dotate di grate in acciaio, le porte interne sono realizzate in legno. Nella Figura 10 è rappresentato l'edificio oggetto dello studio, mentre nella Tabella 9 sono sintetizzati i suoi parametri caratteristici.

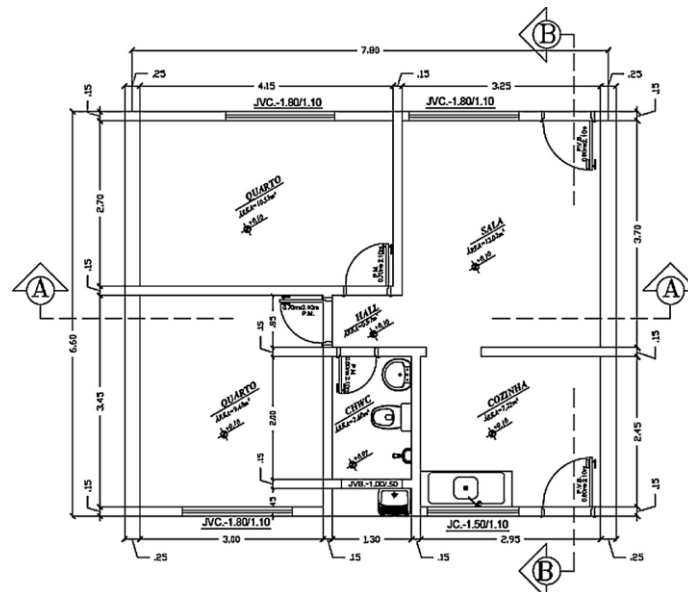


Figura 10: Edificio ad uso residenziale in Brasile [38]

Tabella 9: Parametri caratteristici dell'edificio

Tipologia d'uso	Residenziale
Località	Brasilia, Brasile
Superficie interna (m ²)	48
Involucro	Blocchi di ceramica (14 cm)
Struttura dell'edificio	Blocchi di ceramica (14 cm)
Struttura dell'edificio	Blocchi di ceramica (14 cm)

L'analisi di LCA è stata eseguita in accordo alle norme della serie ISO 14040 [25, 216]. L'unità funzionale dello studio è l'intero edificio, escluse le fondazioni, con area interna di 48 m² e una durata del ciclo di vita pari a 50 anni. I confini del sistema sono del tipo "from cradle to grave". L'energia incorporata è stata quantificata considerando le seguenti fasi del ciclo di vita:

- Fase di Pre – uso
 - Estrazione delle materie prime;
 - Produzione dei materiali da costruzione;
 - Trasporto dei materiali al sito di costruzione;
 - Costruzione dell'edificio;
- Fase d'uso

- Manutenzione e sostituzione dei materiali;
- Fase di fine vita:
 - Demolizione dell'edificio e dei materiali;
 - Trasporto dei materiali demoliti.

Nella Tabella 10 sono riportati i valori di energia incorporata nell'edificio riferiti all'U.F. e per unità di superficie per anno. L'energia incorporata dell'edificio è pari a **3,80E+05 MJ** (159,6 MJ/(m² anno)). Nella Figura 11 è riportata l'incidenza percentuale delle diverse fasi del ciclo di vita sull'energia incorporata complessiva. Nella fase di pre – uso è l'estrazione e la produzione dei materiali a causare il maggiore impatto (40,1%). L'energia richiesta per la costruzione dell'edificio è considerata trascurabile perché questo tipo di edificio è realizzato a mano, tuttavia una parte significativa di energia incorporata è connessa ai materiali e ai prodotti danneggiati durante il processo di costruzione che comporta la produzione di una percentuale extra di materiali che si trasforma in rifiuto durante la fase di costruzione. La fase di manutenzione rappresenta una quota pari al 39,7%, infatti questa tipologia di casa richiede frequenti manutenzioni delle pareti interne ed esterne. Si stima che queste superfici richiedano una ritinteggiatura leggera ogni 2 anni e una riverniciatura completa ogni 10 anni.

Tabella 10: Energia incorporata nelle diverse fasi del ciclo di vita dell'edificio

Fasi del ciclo di vita	MJ/UF	MJ/(m ² anno)
Estrazione materiali, produzione	1,52E+05	63,5
Trasporto in cantiere	3,08E+04	12,8
Costruzione	3,30E+04	13,8
Manutenzione	1,51E+05	62,8
Trasporto in discarica	1,00E+04	4,2
Demolizione	3,00E+03	1,3
Totale	3,80E+05	158,3

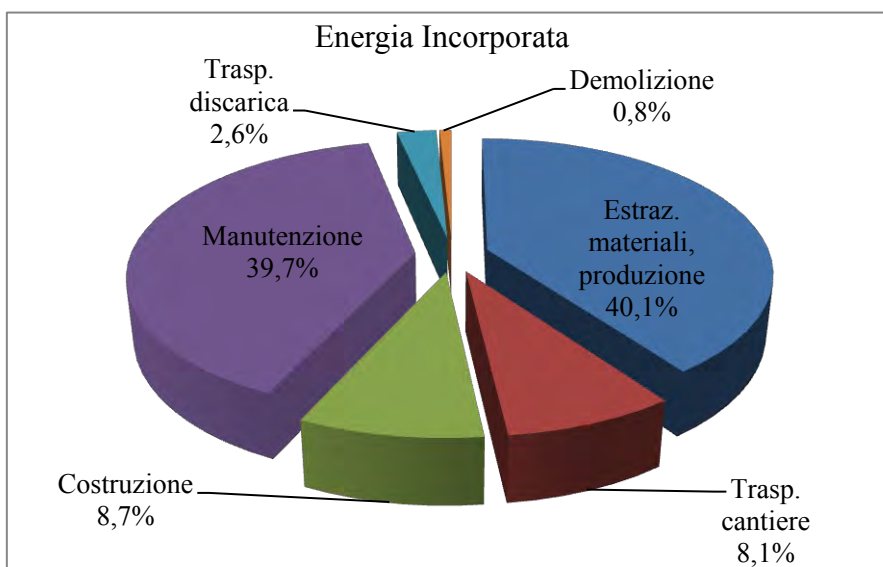


Figura 11: Incidenza delle fasi del ciclo di vita sull'energia incorporata complessiva

4.5 Caso studio n. 4: Edificio per uffici, Austria [39, 40]

Di seguito è stato analizzato un edificio multi - piano sito nella città di Graz in Austria, zona a clima continentale. L'edificio è di nuova costruzione ed è stato realizzato per ospitare uffici, ha una superficie lorda di 2.310 m² e una superficie netta di 2.037 m². Il valore di superficie utilizzata nello studio come riferimento per il calcolo dell'energia incorporata specifica è pari a 2.034 m². L'edificio è realizzato in cemento armato e mattoni ed è isolato esternamente da pannelli in polistirene espanso da 16 cm. Il tetto è

realizzato con uno strato di 20 cm di cemento armato, 16 cm di isolamento e da pannelli in fibre di cemento. Le pareti interne sono realizzate in cartongesso. L'edificio è dotato di doppi vetri con telaio in alluminio. Nella Figura 12 è rappresentato l'edificio, mentre nella Tabella 11 sono riassunti i suoi parametri caratteristici.



Figura 12: Edificio per uffici in Austria [39, 40]

Tabella 11: Parametri caratteristici dell'edificio

Tipologia d'uso	Uffici
Località	Graz, Austria
Superficie lorda (m ²)	2.310
Superficie netta (m ²)	2.037
Superficie di riferimento per il calcolo dell'energia incorporata(m ²)	2.034
Piani	5+1
Involucro	Cemento armato, mattoni
Valore medio di trasmittanza termica W/(m ² K)	0,565

L'analisi di LCA è stata effettuata in accordo alle norme della serie ISO 14040 [25, 26] e, in particolare, il calcolo dell'energia primaria consumata durante il ciclo di vita è stato effettuato con il metodo *Cumulative Energy Demand* [36].

L'unità funzionale dello studio è il singolo edificio, i confini del sistema sono del tipo "from cradle to grave". Gli elementi dell'edificio considerati nello studio sono:

- Basamento;
- Fondamenta;
- Pareti esterne;
- Pareti interne;
- Soffitti;
- Tetto;
- Porte;
- Finestre;

- Sistema di riscaldamento.

Gli impatti sono stati calcolati considerando una vita utile dell'edificio di 50 anni. L'unità funzionale è pari 1 m² di superficie per anno. Nello studio sono stati considerati tutti gli impatti connessi all'estrazione delle materie prime, al loro trasporto e ai processi di manifattura dei singoli prodotti edilizi. Il processo di costruzione è stato escluso dai confini del sistema. Gli impatti di fase d'uso sono connessi unicamente alla sostituzione di materiali e componenti edili con vita utile inferiore rispetto a quella dell'edificio. La vita utile e i tassi di sostituzione dei prodotti di costruzione (componenti/materiali) sono stati stimati sulla base della norma ISO 15686 (parti 1 e 8)¹. Nella modellazione del fine vita si è ipotizzato che l'edificio sia disassemblato e che, in base alla tipologia, i prodotti da costruzione siano riusati, riciclati, recuperati o conferiti in discarica.

Nella Tabella 12 sono riportati i valori di energia incorporata in ogni fase del ciclo di vita. Dall'analisi dei dati emerge che l'edificio ha un'energia incorporata specifica pari a **379,16 MJ/(m²anno)**.

Tabella 12: Energia incorporata nelle diverse fasi del ciclo di vita dell'edificio

Fasi del ciclo di vita	Energia Incorporata non rinn.	Energia Incorporata rinn.	Energia incorporata totale
	MJ/(m ² anno)	MJ/(m ² anno)	MJ/(m ² anno)
Produzione	313,00	12,90	325,90
Sostituzione	97,30	23,00	120,30
Fine vita	-64,50	-2,54	-67,04
Totale	345,80	33,36	379,16

Nelle Figure 13, 14 e 15 è riportata, rispettivamente, l'incidenza percentuale delle diverse fasi del ciclo di vita sull'energia incorporata non rinnovabile, rinnovabile e totale. La fase di costruzione è responsabile del maggiore impatto sull'energia incorporata: la sua incidenza sull'energia incorporata non rinnovabile è pari al 90,5%, sull'energia incorporata rinnovabile è pari al 68,9%, mentre sull'energia incorporata complessiva è pari all'86,0%. Il fine vita ha un impatto negativo a causa dell'energia incorporata che viene recuperata dai materiali riusati e/o riciclati.

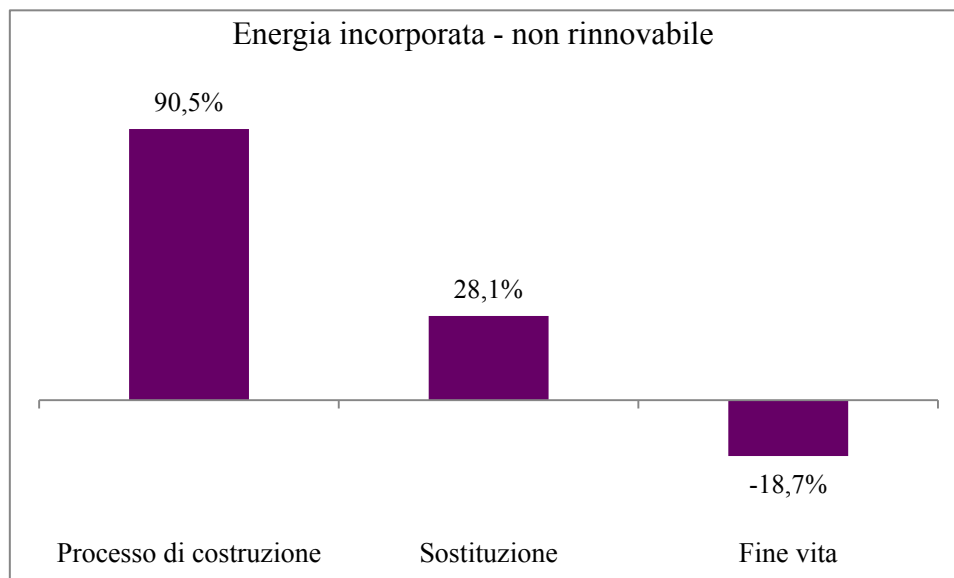


Figura 13: Incidenza delle fasi del ciclo di vita sull'energia incorporata non rinnovabile

¹ ISO 15686 – 1: Buildings and constructed assets .Service life planning – Part 1: General principles; ISO 15686 – 8: Service life planning – Part 8: Reference service life

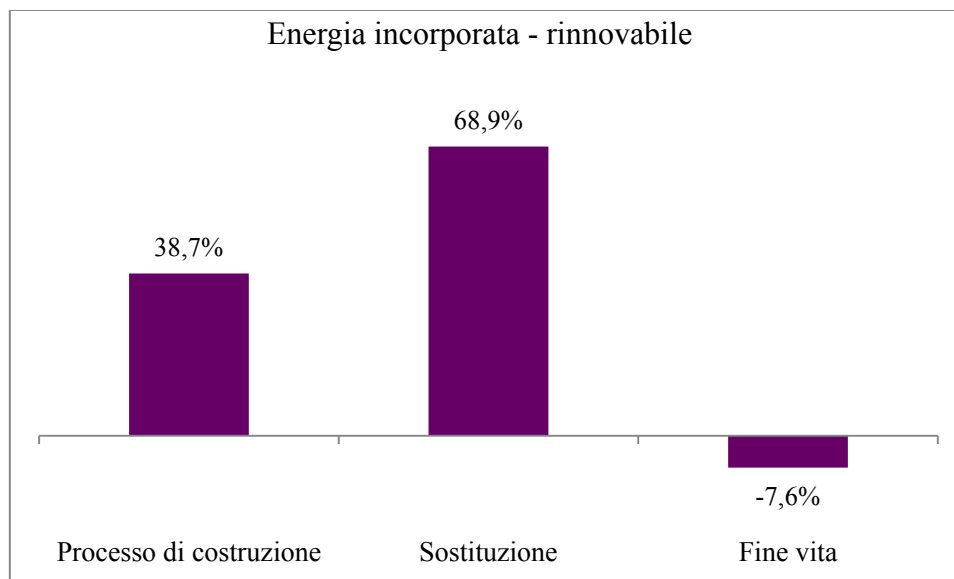


Figura 14: Incidenza delle fasi del ciclo di vita sull'energia incorporata rinnovabile

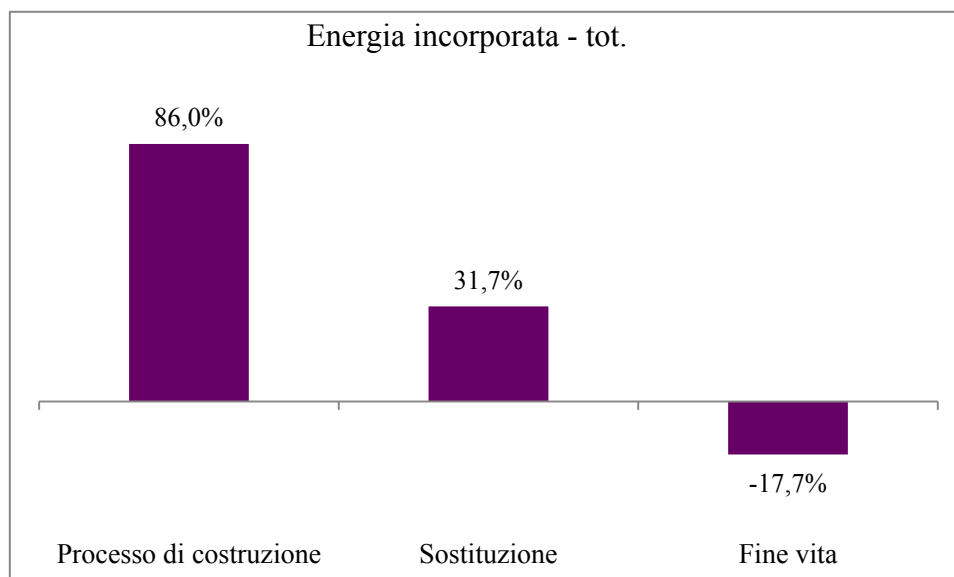


Figura 15: Incidenza delle fasi del ciclo di vita sull'energia incorporata totale

4.6 Caso studio n. 5: Edificio per uffici – Danimarca [41, 42]

In questo paragrafo viene analizzato un edificio multi – piano di nuova costruzione per uffici sito a Bagsværd in Danimarca.

L'edificio presenta un'area lorda di 33.000 m² e un'area netta di 24.300 m². L'area della superficie di riferimento scelta per il calcolo dell'energia incorporata è di 33.000 m². I componenti strutturali sono realizzati in cemento armato e in acciaio da costruzione, la facciata è costituita da vetro, piastrelle smaltate bianche e lamelle in alluminio bianche. Il tetto sopra l'atrio è costituito da una cupola in vetro. Nella Figura 16 sono riportate due immagini dell'edificio oggetto di studio, mentre nella Tabella 13 sono riportati i parametri caratteristici dell'edificio.



Figura 16: Edificio per uffici in Danimarca [41, 42]

Tabella 13: Parametri caratteristici dell'edificio

Tipologia d'uso	Uffici
Località	Bagsværd, Danimarca
Superficie lorda (m ²)	33.000
Superficie riscaldata (m ²)	24.300
Superficie di riferimento per il calcolo dell'energia (m ²)	33.000
Piani	8
Struttura dell'edificio	Cemento e acciaio
Isolamento termico	Tetto e pareti

L'energia incorporata è stata quantificata con la metodologia LCA in accordo con le norme della serie ISO 14040 [25, 26]. Gli impatti sono stati calcolati considerando due valori di 50 e 100 anni e assumendo l'unità funzionale pari a 1 m² di superficie per anno. Lo studio è del tipo "from cradle to grave" e comprende le seguenti fasi del ciclo di vita:

- Produzione di materiali e componenti;
- Sostituzione dei componenti nella fase d'uso;
- Fine vita;
- Riutilizzo, recupero o riciclo.

Gli elementi dell'edificio considerati nell'analisi energetica sono:

- Fondazioni;
- Tetto;
- Pilastri/colonne;

- Pareti esterne;
- Finestre e porte;
- Pareti interne;
- Porte interne e pareti divisorie;
- Pavimento;
- Copertura delle pareti e del tetto;
- Principali componenti tecnici (unità di ventilazione, ecc.).

Per la costruzione dell'edificio sono state utilizzate 51.000 t di materiale da costruzione corrispondenti a 1.550 kg/m². Nella Tabella 14 sono riportati i valori di energia incorporata relativi alle due durate del ciclo di vita. L'analisi è stata eseguita con riferimento ai due valori di vita utile considerati per l'edificio di 50 e di 100 anni, l'energia incorporata specifica riferita alla superficie lorda è risultata, rispettivamente, pari a **89 MJ/(m²anno)** e **60 MJ/(m²anno)**, mentre i valori riferiti alla superficie netta sono pari a **120,9 MJ/(m² anno)** e **81,5 MJ/(m² anno)**, rispettivamente

Tabella 14: Energia incorporata nelle diverse fasi del ciclo di vita dell'edificio

Indicatore	Vita utile 50 anni	Vita utile 100 anni
Energia incorporata riferita alla superficie lorda (MJ/(m ² anno))	89	60
Energia incorporata riferita alla superficie riscaldata (MJ/(m ² anno))	120,9	81,5

4.7 Caso studio n. 6: Edificio per uffici – Thailandia [43]

Il presente paragrafo riporta l'analisi dell'energia incorporata in un edificio multi – piano per uffici, sito a Bangkok in Thailandia, nella fascia climatica tropicale.

L'edificio è costituito da 38 piani, presenta una superficie lorda di 60.000 m², la struttura è realizzata in cemento armato, l'involucro è costituito da mattoni e muri non portanti, la fondazione è realizzata in calcestruzzo, le pareti interne sono realizzate con mattoni, mentre le pareti esterne da mattoni e rivestimenti non portanti (pareti in alluminio/vetro e mattoni in cemento). I pavimenti sono realizzati con calcestruzzo gettato in opera e rifiniti con piastrelle in PVC e in ceramica. Il tetto, piano, è realizzato in calcestruzzo. Nella Tabella 15 sono riportati i parametri caratteristici dell'edificio.

Tabella 15: Parametri caratteristici dell'edificio

Tipologia d'uso	Uffici
Località	Bangkok, Thailandia
Superficie lorda (m ²)	60.000
Volume (m ³)	9.120.000
Piani	38
Involucro	Mattoni e muri non portanti
Struttura dell'edificio	Cemento armato

L'energia incorporata è stata quantificata utilizzando due diverse metodologie di calcolo: la LCA [25, 26] e la I – O LCA. In dettaglio, la LCA è stata adottata per la quantificazione dell'energia incorporata nella fase di costruzione, mentre la I – O LCA per la quantificazione dell'energia incorporata nelle fasi di produzione dei materiali edili e di manutenzione; per la fase di fine vita, a causa della mancanza di dati specifici, sono stati utilizzati dati di letteratura [44].

Lo studio è stato svolto assumendo una durata dell'edificio pari a 50 anni e considerando i principali materiali edilizi, ossia il cemento, l'acciaio da costruzione, l'acciaio per il cemento armato e i laterizi. L'unità funzionale selezionata è l'intera superficie dell'edificio 60.000 m². I confini del sistema includono la produzione dei materiali edilizi, la costruzione dell'edificio, la manutenzione e la demolizione. Inoltre, sono inclusi i trasporti connessi a tutte le fasi del ciclo di vita. Dallo studio è risultato che l'energia incorporata è pari a **2,20E+09 MJ**. Il valore di energia incorporata per m² anno è pari a 136,4 MJ/(m² anno) (Tabella 16).

Tabella 16: Energia incorporata nelle diverse fasi del ciclo di vita dell'edificio

	Produzione	Costruzione	Manutenzione	Demolizione	Totale
Energia Incorporata (MJ)	3,70E+08	1,32E+07	1,76E+07	8,80E+06	4,09E+08
Energia Incorporata (MJ/(m² anno))	123,2	4,40	5,87	2,93	136,4

Nella Figura 17 è riportata l'incidenza percentuale delle diverse fasi del ciclo di vita: la fase di produzione contribuisce per il 90,3%, seguono le fasi di manutenzione, costruzione e demolizione con incidenze pari al 4,3%, 3,2% e 2,2%, rispettivamente. Nella Figura 18 è riportato il contributo percentuale dei materiali adoperati sull'energia incorporata iniziale. Dall'analisi emerge che i materiali edili responsabili del maggiore impatto sono il cemento e l'acciaio, con incidenze pari al 35,4% e al 42,4%, rispettivamente.

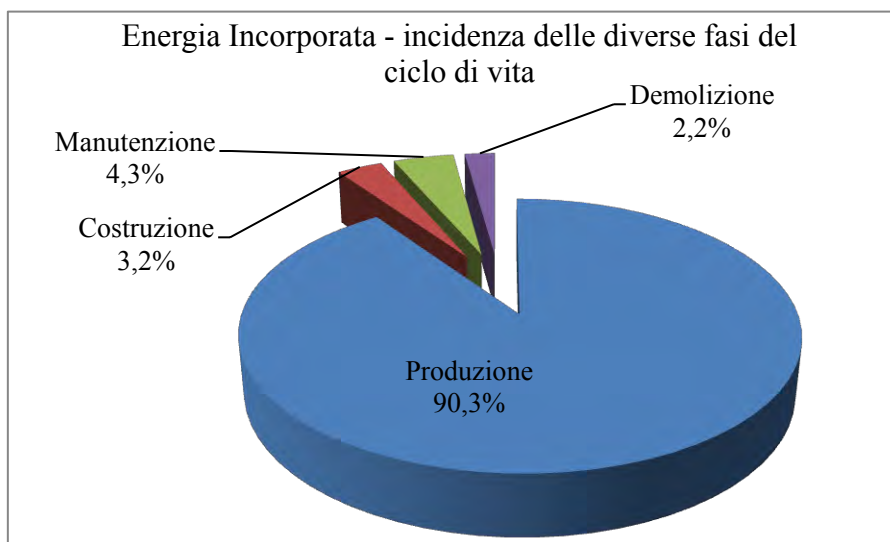


Figura 17: Incidenza delle fasi del ciclo di vita sull'energia incorporata complessiva

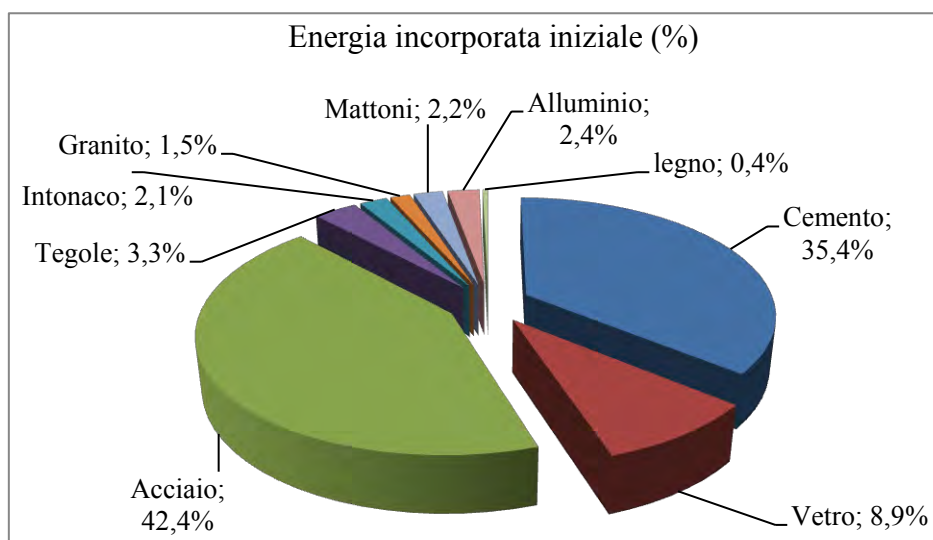


Figura 18: Incidenza dei diversi materiali edili sull'energia incorporata iniziale

4.8 Caso studio n. 7: Edificio per uso scolastico – Regno Unito [45]

Di seguito è analizzato un edificio ad una elevazione destinato ad uso scolastico e sito a Cambridge nel Regno Unito, nella fascia climatica atlantica. L'edificio è stato completato nel 2012 ed ha una superficie lorda di 195 m² e una superficie interna di 171 m². L'edificio è stato progettato seguendo i principi della casa passiva, la struttura è costituita da travi prefabbricate in legno riempite di cellulosa per l'isolamento delle pareti esterne e del tetto. La facciata è realizzata in cartongesso e con legno non trattato (cedro). Inoltre è presente anche un tetto verde. Nella Figura 19 sono riportati uno schema e una foto dell'edificio indagato, mentre nella Tabella 17 sono sintetizzati i parametri caratteristici dell'edificio.

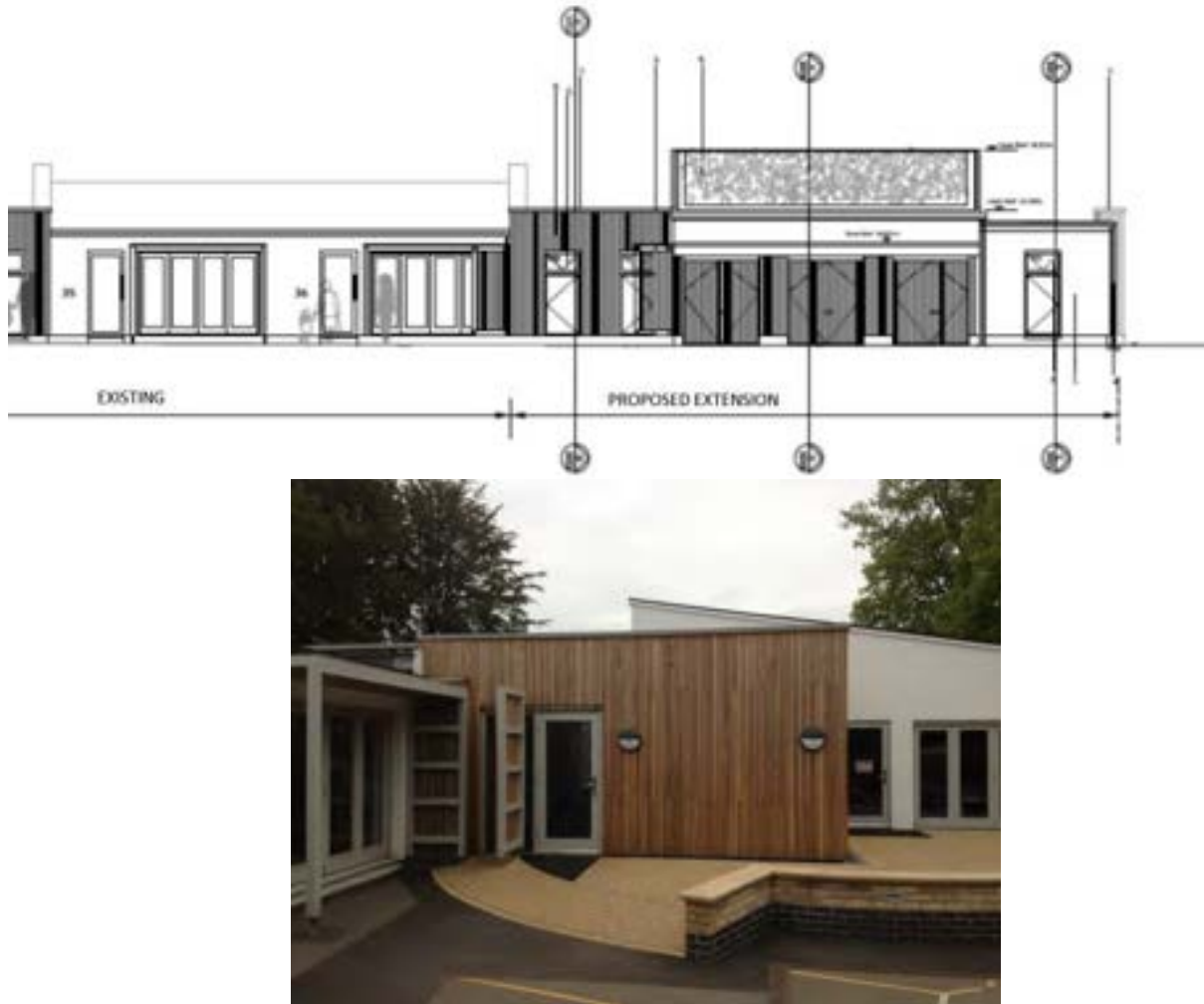


Figura 19: Edificio scolastico in Gran Bretagna [45]

Tabella 17: Parametri caratteristici dell'edificio

Tipologia d'uso	Scolastico
Località	Cambridge, Regno Unito
Superficie lorda (m ²)	195
Superficie interna (m ²)	171
Piani	1
Struttura dell'edificio	Travi prefabbricate in legno
Isolamento termico	Pareti esterne e tetto (Cellulosa)

L'energia incorporata è stata quantificata con la metodologia LCA in accordo alle norme della serie ISO 14040 [25, 26]. L'unità funzionale selezionata è 1 m² con una vita utile di 68 anni. I confini del sistema sono del tipo "from cradle to grave". In dettaglio, nello studio sono stati considerati tutti gli impatti connessi alla fase di costruzione, ossia la fornitura delle materie prime, il trasporto dei materiali da costruzione presso il cantiere, la costruzione dell'edificio e la produzione di rifiuti. Inoltre, sono stati inclusi gli impatti connessi alla produzione e al trasporto dei materiali persi o danneggiati durante i processi di installazione e costruzione.

L'energia incorporata specifica riferita alla superficie lorda è pari a **204,6 MJ/(m²anno)**, mentre se si considera la sola superficie interna risulta pari a **233,32 MJ/(m²anno)**. Nella Tabella 18 è riportato il valore di energia incorporata connessa ad ogni fase del ciclo di vita e nella Figura 20 è riportata l'incidenza percentuale delle stesse. Dall'analisi dei dati emerge che le fasi responsabili del maggiore impatto sono la fase di produzione (estrazione e lavorazione delle materie prime) e la fase di sostituzione/manutenzione con un'incidenza sull'impatto complessivo pari all'83,4%.

Tabella 18: Energia incorporata nelle diverse fasi del ciclo di vita dell'edificio

Fasi del ciclo di vita	MJ/m ² anno (Sup. lorda)	MJ/m ² anno(Sup. Interna)
Produzione	104,98	119,72
Trasporto	9,55	10,89
Costruzione	15,23	17,37
Sostituzione/manutenzione	65,7	74,95
Fine vita	9,1	10,39
Totale	204,6	233,32

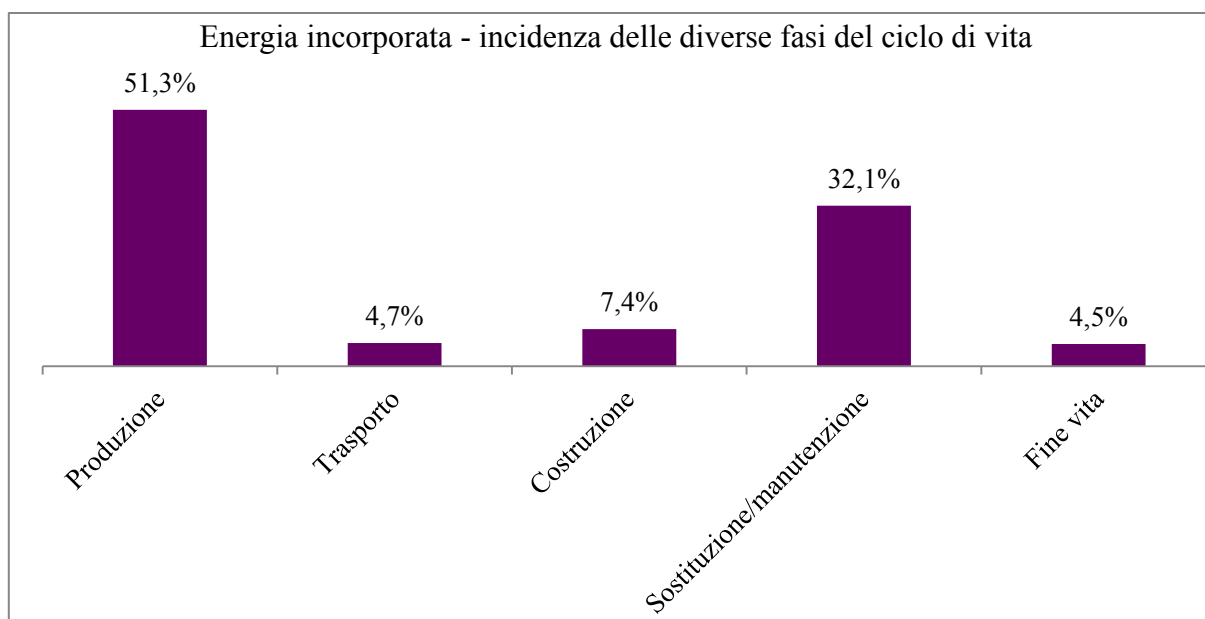


Figura 20: Incidenza delle fasi del ciclo di vita sull'energia incorporata

4.9 Caso studio n. 8: Edificio per uso scolastico – Germania [46]

Di seguito si descrive un edificio multi – piano ad uso scolastico sito a Diedorf, in Germania, nella fascia climatica continentale. La costruzione ha una superficie lorda di 17.292 m² e una superficie netta di 15.711 m². Le parti strutturali delle fondazioni e del basamento sono realizzate in cemento armato, mentre le altre parti strutturali sono realizzate in legno e prodotti a base di legno. La facciata è realizzata in legno e vetro ed è dotata di schermature solari costituite da lastre in alluminio. Il tetto è coperto da una membrana a tenuta e su di esso è installato un impianto fotovoltaico di 2.600 m².

Nella Figura 21 sono riportati uno schema e una foto dell'edificio oggetto di studio, mentre nella Tabella 19 sono sintetizzati i parametri caratteristici dell'edificio.

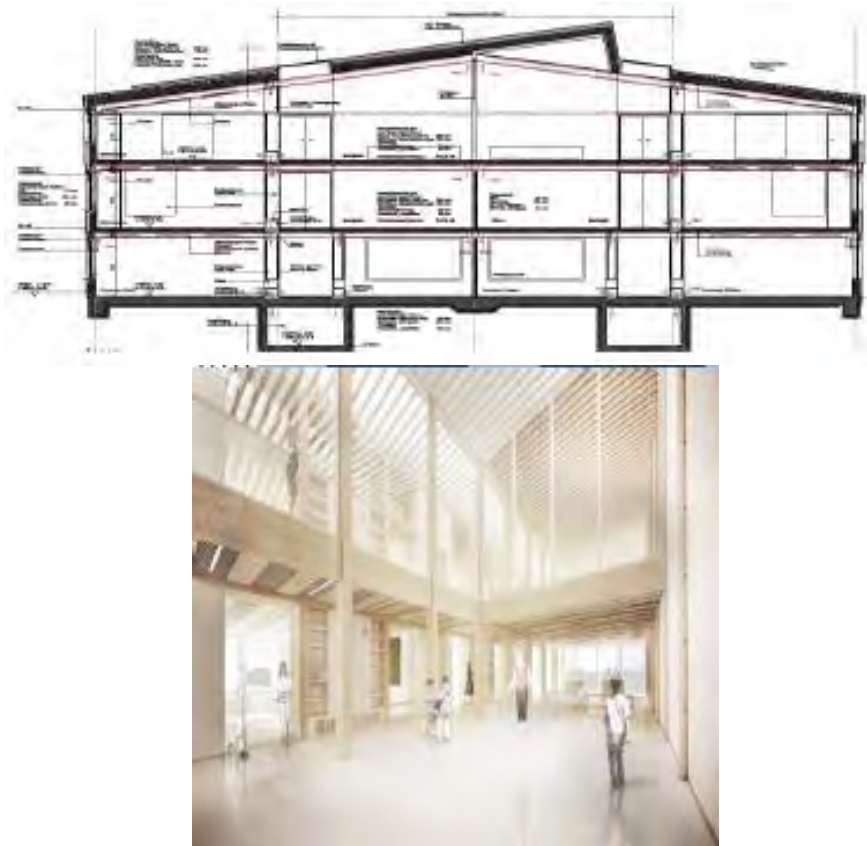


Figura 21: Edificio scolastico in Germania [46]

Tabella 19: Parametri caratteristici dell'edificio

Tipologia d'uso	Scolastico
Località	Diedorf, Germania
Superficie lorda (m ²)	17.292
Superficie netta (m ²)	15.711
Piani	4
Struttura dell'edificio	Cemento armato/legno

L'energia incorporata è stata quantificata con la metodologia LCA in accordo con le norme della serie ISO 14040 [25, 26]. L'unità funzionale selezionata è l'intero edificio, i confini del sistema sono del tipo "from cradle to grave" e la vita utile dell'edificio è assunta pari a 50 anni. In dettaglio, all'interno dei confini del sistema sono stati considerati tutti gli impatti connessi all'estrazione delle materie prime, al loro trasporto e alla realizzazione dei materiali da costruzione, mentre sono stati esclusi gli impatti connessi alle fasi di trasporto in cantiere e di costruzione dell'edificio. L'impatto connesso alla sostituzione durante la fase d'uso dell'edificio è stato quantificato considerando due volte il carico indotto dei materiali edili e componenti con durata del ciclo di vita inferiore ai 50 anni. Nel fine vita, si è ipotizzato che i metalli e i materiali da costruzione a base di minerali sono riciclati secondo tassi di riciclo pre – definiti, i materiali con potere calorifico (ad esempio, legno e plastica) sono inceneriti, il resto degli altri materiali è conferito in discarica. Lo studio considera i crediti energetici del riciclo e della produzione di energia rinnovabile dall'impianto fotovoltaico.

Dallo studio è emerso che per la realizzazione dell'edificio sono state consumate 15.910 t di materiali da costruzione corrispondenti a 920,1 kg/m². L'energia incorporata specifica riferita all'area lorda è pari a **97,02 MJ/(m²anno)**, riferita all'area netta **102,38 MJ/(m²anno)** (Tabella 20).

Tabella 20: Energia incorporata nell'edificio

	MJ/(m ² anno)
Energia incorporata riferita alla superficie lorda	93,02
Energia incorporata riferita alla superficie netta	102,38

4.10 Caso studio n. 9: Edificio scolastico/alberghiero – Michigan [47]

Il presente caso studio è la Sam Wyly Hall, un edificio multi – piano adibito in parte a uso scolastico e in parte a hotel sito campus dell'Università del Michigan, ubicato nella città di Ann Arbor, nella fascia climatica continentale. L'edificio è costituito da sei piani e ha un'area complessiva di 7.300 m². Il piano terra, il primo, il secondo e il terzo piano sono utilizzati come aule e uffici "open space", mentre nei piani rimanenti ci sono camere d'albergo. La struttura dell'edificio è costituita da pilastri in acciaio e travi, il pavimento del piano terra, del secondo e del terzo piano è realizzato con cemento gettato in opera su lamiere ondulate zincate, mentre i pavimenti degli altri piani sono realizzati con strutture pre – fabbricate in cemento con elementi alveolari. Le pareti esterne del piano terra, del secondo e terzo piano sono costituite in parte da facciate in vetro e alluminio e in parte da mattoni e cemento; il quarto, il quinto e il sesto piano sono costituiti da pannelli in calcestruzzo prefabbricati. L'isolamento termico è costituito da fibre di vetro con valore di trasmittanza termica pari a 0.134 W/(m²K). Le pareti interne sono realizzate in cartongesso e contengono fibre di vetro per incrementare l'isolamento acustico; le finestre sono realizzate con telaio in alluminio e doppi vetri e con riempimento in argon, la trasmittanza è pari a 1,55 W/(m²K)

La Figura 22 riporta l'edificio, mentre nella Tabella 21 sono riportati i relativi parametri caratteristici.



Figura 22: Edificio ad uso scolastico e alberghiero in Michigan [47]

Tabella 21: Parametri caratteristici dell'edificio

Tipologia d'uso	Scolastico/alberghiero
Località	Ann Arbor, Michigan
Superficie totale dell'edificio	7.300
Piani	6
Involucro	Alluminio, vetro, mattoni, pannelli in calcestruzzo
Struttura dell'edificio	Pilastri in acciaio e travi

La LCA è stata eseguita in accordo alle norme della serie ISO 14040 [25, 26]. L'energia incorporata è stata quantificata assumendo come unità funzionale l'edificio (struttura, involucro, interni) e come confini del sistema "from cradle to grave". La durata del ciclo di vita dell'edificio è stata assunta pari a 75 anni. In dettaglio, la quantificazione dell'energia incorporata è stata eseguita considerando le seguenti fasi del ciclo di vita:

- Estrazione delle materie prime;
- Trasporto dal sito di estrazione al sito di lavorazione;
- Lavorazione delle materie prime;
- Fabbricazione dei materiali e dei componenti edilizi;
- Trasporto nel cantiere;
- Preparazione del sito e costruzione dell'edificio;
- Smantellamento dei materiali e demolizione;
- Trasporto dei rifiuti in base alla loro destinazione di fine vita (riciclo, riuso e discarica).

Inoltre, nello studio è stata considerata la produzione dei materiali e dei componenti edilizi di ricambio. Dallo studio è emerso che l'energia incorporata nell'edificio è pari a **5,54E+07 MJ** (101,24 MJ/(m² anno)) (Tabella 22). L'energia incorporata nella fase di produzione è pari all'83% dell'energia incorporata complessiva (Figura 23). I trasporti connessi alla fase di produzione (trasporto dal sito di estrazione al sito di lavorazione e da quest'ultimo al cantiere) rappresentano una quota dell'energia incorporata pari al 4,4%. Il valore di energia incorporata nella fase di fine vita include sia l'energia connessa alla demolizione dell'edificio che l'energia connessa al trasporto delle diverse tipologie di materiali alla loro destinazione finale.

Tabella 22: Energia incorporata nelle diverse fasi del ciclo di vita dell'edificio

	Produzione	Trasporto	Costruzione	Fine vita	Totale
Energia Incorporata (MJ)	4,60E+07	2,46E+06	2,37E+06	4,60E+06	5,54E+07
Energia Incorporata (MJ/(m² anno))	84,0	4,5	4,3	8,4	101,2

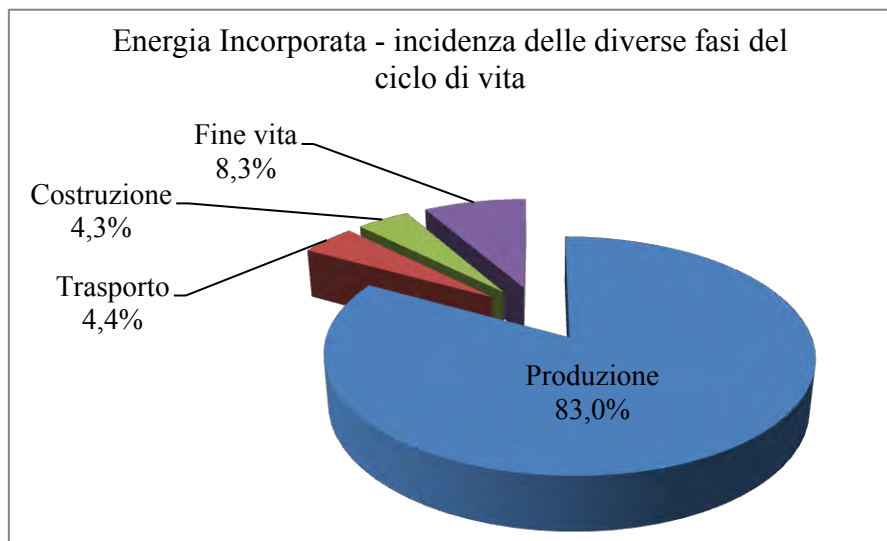


Figura 23: Incidenza delle fasi del ciclo di vita sull'energia incorporata complessiva

4.11 Comparazione tra i casi studio selezionati

Nei paragrafi precedenti sono stati analizzati 9 casi studio. Gli edifici oggetto di analisi sono caratterizzati da diverse destinazioni d'uso e sono realizzati con diverse tecniche costruttive e adoperando differenti tipologie di materiali edili. In sintesi sono stati analizzati i seguenti casi studio:

1. Caso studio n.1: edificio residenziale (R) mono – piano, sito in Italia. La struttura è in cemento armato, l'involucro è costituito da blocchi in cemento da 20 cm riempiti da vermiculite (isolante termico);
2. Caso studio n.2: edificio a uso residenziale (R) multi – piano, sito in India. La struttura è realizzata in cemento armato e l'involucro da blocchi di cemento da 23 cm;
3. Caso studio n.3: edificio mono – piano a uso residenziale (R), sito in Brasile. L'edificio è realizzato con blocchi in ceramica con funzione strutturale;
4. Caso studio n.4: edificio multi – piano per uffici (U), sito in Austria. La struttura è realizzata in cemento armato e mattoni, l'edificio è isolato esternamente da pannelli in polistirene espanso da 16 cm;
5. Caso studio n.5: edificio multi – piano per uffici (U), sito in Danimarca. La struttura dell'edificio è realizzata in cemento armato, la facciata è costituita da vetro, piastrelle smaltate bianche e lamelle in alluminio;
6. Caso studio n.6: edificio multi – piano per uffici (U), sito in Thailandia. La struttura dell'edificio è realizzata in cemento armato, l'involucro è costituito da una combinazione di mattoni e muri non portanti (pareti in alluminio/vetro e mattoni in cemento);
7. Caso studio n.7: edificio mono – piano a uso scolastico (S), sito nel Regno Unito. La struttura è costituita da travi prefabbricate in legno riempite di cellulosa per l'isolamento delle pareti esterne e del tetto, la facciata è realizzata in cartongesso e in legno (cedro) non trattato;
8. Caso studio n.8: edificio scolastico (S) multi – piano, sito in Germania. La struttura è realizzata in parte cemento armato e in parte di legno e prodotti a base di legno. La facciata è realizzata in legno e vetro;
9. Caso studio n.9: edificio multi – piano adibito in parte a uso scolastico e in parte a uso alberghiero(S/A). La struttura è realizzata in cemento armato, mentre l'involucro è realizzato con differenti tipologie di materiali: vetro, alluminio, mattoni e cemento e pannelli in calcestruzzo prefabbricati.

Nelle Tabelle 23 e 24 sono descritti, brevemente, i casi studio. Per ognuno di essi si riportano il sito di ubicazione, la destinazione d'uso, la fascia climatica, la superficie, la vita utile, i principali materiali costruttivi, i confini del sistema e i risultati ottenuti.

Tabella 23: Sintesi Casi Studio n. 1 - 5

Caso Studio	Principali materiali costruttivi	Confini del sistema	Energia incorporata (MJ)/(m ² anno)	Rif. Bibl.
<p>N.1 Sito: Italia Destinazione d'uso: Uso residenziale Clima: Mediterraneo Superficie: 110 m² Vita utile: 50 anni</p>	<p>Struttura: Cemento armato Involucro: Mattoni da 20 cm, intercapedine di 9 cm con schiuma di vermiculite</p>	<p>Prodotto: Estrazione delle materie prime, lavorazione, fabbricazione di materiali edili e componenti tecnici Costruzione: Trasporto al sito di costruzione Fine vita: Demolizione dell'edificio, trasporto, smaltimento dei rifiuti</p>	<p>EI - complessiva: 239,64 EI - produzione e costruzione: 221,35 (92,4%) EI - fine vita: 18,29 (7,6%)</p>	[5]
<p>N.2 Sito: India; Destinazione d'uso: Uso residenziale; Clima: Tropicale; Superficie: 10.800 m²; Vita utile: 50 anni</p>	<p>Struttura: Cemento armato Involucro: Blocchi in cemento da 23 cm e malta cementizia</p>	<p>Prodotto: Estrazione, trasporto, manifattura Costruzione: Trasporto al sito, processo di costruzione Fine vita: Demolizione dell'edificio, trasporto, smaltimento dei rifiuti</p>	<p>EI - complessiva: 249,44 EI - produzione: 216,03 (86,6%) EI - costruzione: 26,14 (10,5%) EI - fine vita: 7,27 (2,9%)</p>	[37]
<p>N.3. Sito: Brasile Destinazione d'uso: Uso residenziale; Clima: Tropicale Superficie: 48 m² Vita utile: 50 anni</p>	<p>Struttura: Blocchi in ceramica da 14 cm Involucro: Blocchi di ceramica da 14 cm</p>	<p>Prodotto: Estrazione, trasporto, manifattura Costruzione: Trasporto al sito, processo di costruzione Fase d'uso: Manutenzione/sostituzione Fine vita: Demolizione dell'edificio, trasporto dei rifiuti</p>	<p>EI - complessiva: 158,3 EI - produzione: 63,5 (40,1%); EI - trasporto in cantiere: 12,8 (8,1%); EI - costruzione: 13,8 (8,7%); EI - manutenzione: 62,8 (39,7%); EI - demolizione: 1,3 (0,8%); EI - trasporto in discarica: 4,2 (2,6%);</p>	[38]
<p>N.4. Sito: Austria; Destinazione d'uso: Uffici; Clima: Continentale; Superficie: 2.037 m²; Vita utile: 50 anni</p>	<p>Struttura: Cemento armato Involucro: Mattoni</p>	<p>Prodotto: Estrazione, trasporto, manifattura Fase d'uso: Sostituzione Fine vita: Trattamento dei rifiuti, conferimento in discarica</p>	<p>EI - complessiva: 379,16 EI - produzione: 325,9 (86,0%); EI - sostituzione: 120,3 (31,7%); EI - fine vita: -67,04 (-17,7%)</p>	[39, 40]
<p>N.5. Sito: Danimarca; Destinazione d'uso: Uffici; Clima: Atlantico; Superficie: 24.300 m²; Vita utile: 50 anni</p>	<p>Struttura: Cemento armato e in acciaio da costruzione Involucro: Vetro, piastrelle smaltate bianche e lamelle in alluminio bianche</p>	<p>Prodotto: Estrazione, trasporto, manifattura Fase d'uso: Sostituzione Fine vita: Trattamento dei rifiuti, conferimento in discarica, riuso, recupero o riciclo potenziale</p>	<p>EI - complessiva: 120,9</p>	[41,42]

Tabella 24: Sintesi Casi Studio n. 6 - 9

Caso Studio	Principali materiali costruttivi	Confini del sistema	Energia incorporata (MJ/(m ² anno))	Rif. Bibl.
<p>N.6. Sito: Tailandia Destinazione d'uso: Uffici Clima: Tropicale Superficie: 60.000 m² Vita utile: 50 anni</p>	<p>Struttura: Cemento armato Involucro: Mattoni e muri non portanti Fondazione: Calcestruzzo</p>	<p>Prodotto: Estrazione, trasporto, manifattura Costruzione: Trasporto al sito, processo di costruzione Fase d'uso: Manutenzione Fine vita: Demolizione dell'edificio, trasporto dei rifiuti</p>	<p>EI - complessiva: 136,4 EI - produzione: 123,2 (90,3%); EI - costruzione: 4,4 (3,2%); EI - manutenzione: 5,87 (4,3%); EI - demolizione: 2,93 (2,2%);</p>	[43]
<p>N.7. Sito: Regno Unito Destinazione d'uso: Uso scolastico Clima: Atlantico Superficie: 171 m² Vita utile: 68 anni</p>	<p>Struttura: Travi prefabbricate in legno Involucro: Cartongesso e legno (cedro) non trattato</p>	<p>Prodotto: Estrazione, trasporto, manifattura Costruzione: Trasporto al sito, processo di costruzione Fase d'uso: Riparazione, sostituzione, ristrutturazione Fine vita: Demolizione dell'edificio, trasporto dei rifiuti</p>	<p>EI - complessiva: 233,32 EI - produzione: 119,72 (51,3%); EI - costruzione: 17,37 (7,4%); EI - trasporto: 10,89 (4,7%); EI - sostituzione: 74,95 (32,1%); EI - fine vita: 10,39 (4,5%)</p>	[45]
<p>N.8. Sito: Germania; Destinazione d'uso: Uso scolastico Clima: Continentale Superficie: 15.711 m² Vita utile: 50 anni</p>	<p>Struttura: Cemento armato, legno e prodotti a base di legno Involucro: Legno e vetro</p>	<p>Prodotto: Estrazione, trasporto, manifattura Fase d'uso: Sostituzione Fine vita: Trattamento dei rifiuti, conferimento in discarica, riuso, recupero o riciclo potenziale</p>	<p>EI - complessiva: 102,38</p>	[46]
<p>N.9. Sito: Michigan Destinazione d'uso: Uso scolastico/alberghiero; Clima: Continentale Superficie: 7.300 m² Vita utile: 75 anni</p>	<p>Struttura: Pilastrini di acciaio e travi Involucro: Vetro, alluminio mattoni e cemento, pannelli in calcestruzzo prefabbricati</p>	<p>Prodotto: Estrazione, trasporto, manifattura Costruzione: Trasporto al sito, processo di costruzione Fase d'uso: manutenzione Fine vita: demolizione dell'edificio, trasporto dei rifiuti</p>	<p>EI - complessiva: 101,2 EI - produzione: 84,0 (83%); EI - trasporto: 4,5 (4,4%); EI - costruzione: 4,3 (4,3%); EI - fine vita: 8,4 (8,3%)</p>	[47]

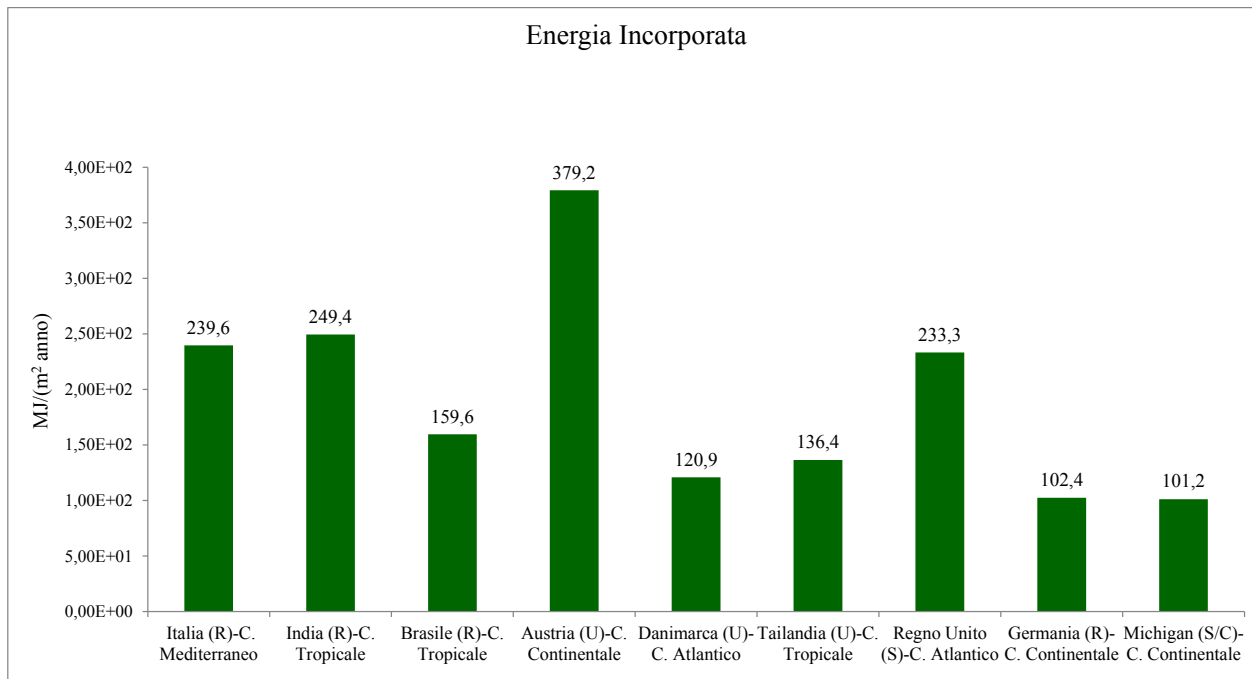


Figura 24: Energia incorporata complessiva negli edifici analizzati

Dall'analisi dei casi studio si evince che l'energia incorporata negli edifici può assumere valori significativamente differenti al variare della tipologia di edificio. In dettaglio, i valori variano da un minimo di 101,2 MJ/(m² anno) a un massimo di 379,2 MJ/(m² anno) (Figura 24).

Dall'analisi dell'incidenza delle diverse fasi del ciclo di vita sull'energia incorporata complessiva è emerso che la fase di produzione dei materiali e componenti edili presenta un contributo variabile tra il 40,1% e il 90,3%; la fase di costruzione tra il 3,2% e il 12,1%; il fine vita tra il 2,2% e l'8,3%. La fase di manutenzione è stata inclusa nei confini del sistema solo con riferimento ai casi studio n. 3, 4, 5, 6 e 7. Il contributo percentuale è indicato solo per i casi studio 3, 4, 6 e 7 ed è risultato pari al 39,7%, al 31,7%, al 4,3% e al 32,1%, rispettivamente.

Dall'analisi delle informazioni riportate nelle Tabelle 23 e 24 emerge che i casi studio sono caratterizzati da assunzioni differenti in relazione alle fasi del ciclo di vita incluse nei confini del sistema. Pertanto, il confronto tra i diversi edifici esaminati è stato eseguito solo con riferimento alla fase di produzione, che è inclusa nei confini del sistema di tutti i casi studio esaminati. Inoltre, allo scopo di ottenere valori confrontabili, tutti i dati sull'energia incorporata sono stati espressi in MJ/(m² anno). I casi studio 5 e 8 non riportano il dettaglio dell'incidenza delle fasi del ciclo di vita sull'energia incorporata complessiva, per cui non è stato possibile effettuare il confronto in funzione della fase di produzione.

Si è proceduto con l'analisi dell'energia incorporata in relazione alla tecnica costruttiva. Gli edifici dei casi studio 1, 2 e 4 presentano la struttura realizzata in cemento armato e l'involucro con mattoni. Dall'analisi dell'energia incorporata è emerso che i casi studio 1 e 2 sono caratterizzati da valori confrontabili di energia incorporata, pari, rispettivamente, a 221,35 MJ/(m² anno) e a 216,03 MJ/(m² anno), mentre il caso studio 4 presenta un valore di energia incorporata pari a 325,9 MJ/(m² anno). Il caso studio 3 ha la struttura realizzata con blocchi in ceramica con funzione strutturale e l'involucro con blocchi in ceramica rossi, l'energia incorporata è pari a 63,5 MJ/(m² anno). Nel caso studio 6 la struttura è realizzata in cemento armato, mentre l'involucro è realizzato da una combinazione di mattoni e muri non portanti. Il valore di energia incorporata nella fase di produzione è pari a 123,2 MJ/(m² anno). Nel caso studio 7 la struttura è realizzata con travi prefabbricate in legno, mentre l'involucro è costituito in parte in cartongesso e in parte con cedro non trattato. L'energia incorporata è pari a 119,72 MJ/(m² anno). Il caso studio n. 9 presenta una struttura realizzata con pilastri e travi in acciaio mentre, l'involucro è costituito da diversi materiali: vetro, alluminio, mattoni e pannelli in calcestruzzo prefabbricate. L'energia incorporata nella fase di produzione è pari a 84 MJ/(m² anno).

Dal confronto in funzione della fascia climatica è emerso che, per gli edifici tradizionali esaminati, l'energia incorporata è scarsamente influenzata dalla fascia climatica di insediamento. In particolare, dallo studio è risultato che edifici ubicati nella stessa fascia climatica presentano un range di variazione dell'energia incorporata abbastanza ampio; ad esempio, nella fascia climatica tropicale, i valori variano da 63,5 MJ/(m² anno) a 216,03 MJ/(m² anno). Di contro, edifici ubicati in fasce climatiche differenti presentano valori di energia incorporata confrontabili; ad esempio, gli edifici dei casi studio 1 e 2, presentano valori che differiscono di 10 MJ/(m² anno), pur appartenendo a fasce climatiche differenti.

Infine, dall'analisi in funzione della destinazione d'uso è emerso che gli edifici ad uso scolastico presentano i valori più bassi di energia incorporata nella fase di produzione. In dettaglio il caso studio 7 presenta un valore pari a 119,7 MJ/(m² anno), il caso studio 9 pari a 84 MJ/(m² anno), mentre il caso studio 8, per il quale non è disponibile il dettaglio sull'energia incorporata nella sola fase di produzione, presenta un'energia incorporata complessiva pari a 102,4 MJ/(m² anno). Gli edifici ad uso residenziale presentano valori di energia incorporata variabili da 63,5 MJ/(m² anno) a 221,35 MJ/(m² anno). Anche gli edifici destinati ad uffici presentano un range di valori ampio, variabile da 123,2 MJ/(m² anno) a 325,9 MJ/(m² anno).

Dall'analisi del caso studio 1 è emerso un aspetto interessante. In dettaglio, per l'edificio oggetto di analisi sono riportati i valori di energia incorporata e di energia consumata nella fase d'uso prima e dopo l'implementazione di una serie di interventi di retrofit energetico. Gli interventi previsti, mirati alla riduzione dei consumi energetici della fase d'uso e all'utilizzo di fonti energetiche rinnovabili per il soddisfacimento della domanda energetica, hanno comportato un aumento dell'energia incorporata. In dettaglio, a seguito del retrofit energetico i consumi della fase d'uso si sono ridotti del 58%, mentre l'energia incorporata nell'edificio è aumentata del 25%.

Di seguito si riporta una descrizione sintetica di alcuni studi di letteratura dai quali è emerso che gli edifici costruiti con materiali e componenti edili caratterizzati da prestazioni energetiche elevate presentano valori più alti di energia incorporata rispetto agli edifici tradizionali.

Blengini e Di Carlo [10] hanno confrontato i consumi energetici di un edificio tradizionale e di un edificio a basso consumo energetico. Le principali differenze riguardano lo spessore e il tipo di isolamento, la tipologia e le dimensioni della superficie vetrata e degli impianti. Dallo studio è emerso che i consumi energetici della fase d'uso sono inferiori per l'edificio a basso consumo energetico ma, di contro, esso presenta un valore dell'energia incorporata più elevato. Dixit et al. [14] affermano che, a causa della diffusione di tecnologie a più alta efficienza energetica e di materiali isolanti più avanzati e più efficienti, è aumentato il peso dell'energia incorporata nei materiali e componenti edili nel bilancio energetico del sistema edificio e quindi appare consigliabile includerla nelle analisi atte a valutare le prestazioni energetiche degli edifici. Winter e Hestnes [44] e Feist [45] analizzano il consumo di energia primaria connesso al ciclo di vita di edifici convenzionali e a basso consumo energetico siti, rispettivamente, in Norvegia e in Germania; da entrambi gli studi è apparso che l'energia incorporata è maggiore negli edifici a basso consumo energetico. Ding [17] afferma che la produzione *off-site* di materiali e componenti edili contribuisce per il 75% sull'energia incorporata negli edifici e che questa quota è in graduale aumento a causa dell'utilizzo di materiali a più elevata intensità energetica.

5 Conclusioni

Il report ha analizzato il concetto di energia incorporata focalizzando l'attenzione sulle metodologie di calcolo più diffuse per la sua quantificazione e sugli edifici. Dall'analisi dello stato dell'arte è emerso che le metodologie più diffuse per il calcolo dell'energia incorporata sono:

- La *Life Cycle Assessment* (LCA);
- L'analisi di *Input – Output* (I – O) con estensione energetica;
- Il metodo ibrido che combina elementi della LCA e della I – O.

La LCA applicata alla quantificazione dell'EI nel sistema edificio – impianto consente di ottenere risultati accurati, poiché analizza in modo sistematico gli input e gli output di tutti i processi inclusi all'interno dei confini del sistema utilizzando dati specifici dei processi. Inoltre, l'analisi condotta con approccio "*from cradle to grave*" consente di valutare l'energia incorporata di tutti i materiali e componenti edili nel corso del loro ciclo di vita e di studiarne l'incidenza sul consumo energetico complessivo. Tuttavia, la complessità del sistema legata all'elevato numero di catene produttive coinvolte richiede un numero elevato di dati specifici, spesso non disponibili.

L'analisi I – O con estensione energetica consente di effettuare un'analisi completa dell'energia incorporata negli edifici poiché considera la maggior parte dei processi, diretti e indiretti, coinvolti nella produzione di un bene e può essere sviluppata rapidamente utilizzando dati divulgati da enti di ricerca o istituti di statistica. Di contro, essa fornisce risultati ad un elevato livello di aggregazione e non consente di ottenere informazioni dettagliate relative al singolo prodotto/servizio.

Infine, il metodo ibrido combina i vantaggi della LCA e della I – O. In genere, si applica l'analisi LCA ai processi della catena produttiva principale, per i quali è opportuno, ai fini di garantire una maggiore accuratezza dello studio, utilizzare dati specifici di processo, mentre si applica l'analisi I – O per la valutazione degli impatti connessi ai processi, diretti e indiretti, per i quali sarebbe onerosa la raccolta di dati specifici.

In una seconda fase, si è proceduto con l'analisi dello stato dell'arte dell'energia incorporata negli edifici. L'analisi è stata svolta in relazione ai principali materiali costruttivi impiegati, alla fascia climatica di insediamento e alla destinazione d'uso. Con riferimento ai materiali costruttivi è emerso che, tra i casi esaminati, gli edifici realizzati con struttura in cemento armato e involucro in mattoni presentano valori di EI leggermente più elevati.

In funzione della fascia climatica di appartenenza è emerso che l'energia incorporata appare scarsamente influenzata dal clima per gli edifici tradizionali esaminati.

Infine, dall'analisi in funzione della destinazione d'uso è emerso che gli edifici a uso scolastico presentano i valori più bassi di energia incorporata e un *range* ristretto di variazione dei valori, mentre gli edifici destinati ad uso residenziale e ad uffici presentano *range* di variazione dei risultati più ampi.

Dallo studio è possibile trarre una serie di conclusioni e di suggerimenti per lo sviluppo di futuri indirizzi di ricerca.

Dall'analisi degli studi di letteratura è emerso che vi è un'elevata discrepanza tra i metodi utilizzati per la valutazione dell'energia incorporata; le differenze riguardano il metodo di calcolo, la definizione dei confini del sistema e la tipologia di dati. In tale contesto, sarebbe necessario sviluppare una procedura di calcolo standardizzata allo scopo di ottenere risultati confrontabili; sarebbe altresì auspicabile definire linee guida sulle tecniche costruttive e sui materiali e componenti edili che consentano di computare l'EI degli edifici. A tale scopo un importante riferimento per i futuri sviluppi di ricerca può essere costituito dalla già esistente norma UNI EN 15978:2011 [11].

Lo studio ha evidenziato come la realizzazione di misure di retrofit energetico, mirate alla riduzione dei consumi energetici nella fase operativa, possono indurre un aumento dell'incidenza dell'energia incorporata sul bilancio energetico complessivo dell'edificio. Questo risultato, in un'ottica di diffusione degli edifici a basso consumo energetico e, con un orizzonte temporale di breve medio periodo, *Nearly Net*

ZEB, sottolinea la necessità di estendere l'analisi energetica dell'edificio all'intero ciclo di vita dello stesso al fine di valutare il contributo dell'energia incorporata.

Di particolare ausilio appaiono i tool di integrazione della metodologia LCA ai software di simulazione energetica degli edifici, allo scopo di valutarne le prestazioni energetiche complessive.

6 Riferimenti bibliografici

- [1] Communication from the Commission to the Council, the European Parliament, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, "A lead market initiative for Europe", December 2007;
- [2] Buildings Performance Institute Europe (BPIE), 2011. Europe's buildings under the microscope. A country – by – country review of the energy performance of buildings. ISBN: 9789491143014;
- [3] EC – European Commission, COM (2006) 545 final, Action Plan for Energy Efficiency: Realising the Potential, 2006;
- [4] G. Bin, P. Parker, Measuring buildings for sustainability: comparing the initial and retrofit ecological footprint of a century home—the REEP house. *Applied Energy*, 93 (2012): 24–32;
- [5] M. Beccali, M. Cellura, M. Fontana, S. Longo, M. Mistretta, Energy retrofit of a single-family house: Life cycle net energy saving and environmental benefits. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27 (2013): 283 – 293;
- [6] T. Ramesh, R. Prakash, & K. K. Shukla, Life cycle energy analysis of buildings: An overview. *Energy and Buildings*, 42(10) (2010), 1592-1600;
- [7] 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 and Buildings*, 72 (2014): 371-381;
- [8] M. Cellura, G. Guarino, I. Sartori, A. Scognamiglio, Progettare i Net Zeb. *Aicarr Journal*, 21(2013): pp. 36 – 44;
- [9] Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast), *Official Journal of the European Union*, L 153/2010;
- [10] G.A. Blengini, T. Di Carlo, The changing role of life cycle phases, subsystems and materials in the LCA of low energy buildings, *Energy Buildings* 42: (2010), 869–880;
- [11] UNI EN 15978:2011 - Sustainability of construction works. Assessment of environmental performance of buildings. Calculation method;
- [12] Cleveland, C.J. & Morris, C.G. (2009) – *Dictionary of Energy: Expanded Edition*; Elsevier Science;
- [13] K.I. Praseeda, B. V.V. Reddy, & M. Mani, (2015). Embodied energy assessment of building materials in India using process and input-output analysis. *Energy and Buildings*, 86 (2015): 677-686;
- [14] M.K Dixit, J.L. Fernández-Solís, S. Lavy, & C. H. Culp, Identification of parameters for embodied energy measurement: A literature review. *Energy and Buildings*, 42 (8): (2010), 1238-1247;
- [15] P. Crowther, Design for disassembly to recover embodied energy, in: *The 16th Annual Conference on Passive and Low Energy Architecture*, Melbourne/Brisbane/Cairns, Australia, 1999.
- [16] G.J. Treloar, P.E.D. Love, G.D. Holt, Using national input output data for embodied energy analysis of individual residential buildings, *Construction Management and Economics* 19 (1) (2001) 49– 61;
- [17] G. Ding, 2004 The development of a multi-criteria approach for the measurement of sustainable performance for built projects and facilities, Ph.D. Thesis, University of technology, Sydney, Australia;
- [18] B. Lawson, LCA and embodied energy: some contentious issues, in: *Proceedings of Embodied Energy: The Current State of Play*, Deakin University, Geelong, Australia, 28–29 November, 1996;
- [19] G.P. Hammond, C.I. Jones, Embodied energy and carbon in construction materials. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, *Energy* 161 (2) (2008), pp.87–98;
- [20] P. Frey, Building reuse: finding a place on American climate policy agendas. *National Trust for Historic Preservation*. Washington, DC (2008);
- [21] G.F Menzies, (2011). Embodied energy considerations for existing buildings. *Historic Scotland Technical Paper 13*, available at: www.historic-scotland.gov.uk/technical_papers/;
- [22] RICS (2012), Methodology to calculate embodied carbon of materials, Information paper;
- [23] European Union (2013). Commission Recommendation of 9 April 2013 on the use of common methods to measure and communicate the life cycle environmental performance of products and organization, *Official Journal of the European Union*, 2013/179/EU, Available at: <http://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/>;

- [24] A. Rauf, R.H. Crawford, Building service life and its effect on the life cycle embodied energy of buildings. *Energy* (79) (2015): 140 – 148;
- [25] ISO 14040, 2006. Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principles and Framework;
- [26] ISO 14044, 2006. Environmental Management – Life Cycle Assessment – Requirements and Guidelines;
- [27] M. Cellura, S. Longo, & M. Mistretta, The energy and environmental impacts of Italian households consumptions: An input-output approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8): (2011), 3897-3908;
- [28] 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 and Buildings*, 62 (2013), 97-106;
- [29] M. Jang, T. Hong, & C. Ji, Hybrid LCA model for assessing the embodied environmental impacts of buildings in South Korea. *Environmental Impact Assessment Review*, 50: (2015), 143-155;
- [30] I. Boustead. LCA, how it came about. The beginning in the UK. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 1(3) (1996):147-150;
- [31] F. Ardente, G. Beccali, M. Cellura, La metodologia dell'analisi del ciclo di vita (LCA) applicata alle tecnologie per le energie rinnovabili. (2006). Energeticamente, Editore ORSA. SBN Pa0204638;
- [32] W. Leontief, *The structure of American Economy: 1919–1929*. New York: Oxford University Press; 1941;
- [33] W. Leontief, *Input–output economics*. New York: Oxford University Press; 1966;
- [34] W. Leontief, 1970. Environmental repercussions and the economic structure: an input–output approach. *Review of Economics and Statistics*; 52(3);
- [35] UNI EN 15804: 2012. Sostenibilità delle costruzioni - Dichiarazioni ambientali di prodotto - Regole quadro di sviluppo per categoria di prodotto;
- [36] R. Frischknecht, N. Jungbluth, H.J. Althaus, C. Bauer, G. Doka, R. Dones, R. Hirschler, S. Hellweg, S. Humbert, T. Köllner, Y. Loerincik, M. Margni, T. Nemecek, 2007. Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods. *Ecoinvent report No. 3, v2.0*. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf;
- [37] D.L. Pinky, S. Palaniappan, A case study on life cycle energy use of residential building in Southern India, *Energy and Buildings*, Volume 80, September 2014, Pages 247-259
- [38] J.S. Paulsen, R.M. Spoto, A life cycle energy analysis of social housing in Brazil: Case study for the program “MY HOUSE MY LIFE”, *Energy and Buildings*, 57 (2013): 95-102;
- [39] H. Kreiner, A. Passer, P. Maydl, H. Wallbaum, Sustainable building optimization – A systemic approach
- [40] H. Kreiner, A. Passer, Interdependency of LCCA and LCA in the assessment of buildings. In: *Third International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering : TAYLOR and FRANCIS GROUP, 2012 — ISBN 9780415621267, S. 1794–1801*
- [41] F.N. Rasmussen, Certification of sustainable buildings in a life cycle assessment perspective. (2012) M.Sc. Thesis, Environmental Engineering, Technical University of Denmark, Lyngby;
- [42] F.N. Rasmussen, H. Birgisdottir, M. Birkved, System and scenario choices in the life cycle choices of a building: changing impacts of the environmental profile, *Proceedings of the Sustainable Buildings – Construction Products and Technologies*. Verlag der Technischen Universität Graz, (2013), pp. 994 – 1003;
- [43] O.F. Kofoworola, S. H. Gheewala, Life cycle energy assessment of a typical office building in Thailand, *Energy and Buildings*, 41(2009): 1076-1083
- [44] A.R. Chini, S.F. Bruening, Report 10—Deconstruction and Materials Reuse in the United States, 2003, <http://web.dcp.ufl.edu/ckibert/deconstructionbook/countryreports/10.us2003f.doc>.
- [45] E. Gavotsis, The way forward for practical measurement and reduction of embodied energy and carbon in UK buildings: The case study of St Faith’s School. (2013) University of Cambridge;
- [46] H. König, L. De Cristofaro Benchmarks for life cycle costs and life cycle assessment of residential buildings, *Building Research & Information* Vol.40, Issue 5, (2012), pages 558-580 –ISSN: 0961-3218, doi: 10.1080/09613218.2012.702017;
- [47] C. Scheuer, G.A Keoleian, P. Reppe, Life cycle energy and environmental performance of a new university building: modeling challenges and design implications, *Energy and Buildings*, 35, Issue 10 (2003): 1049-1064;

Parte B

1 Introduzione

Il settore edile rappresenta a livello europeo una quota pari a circa il 40% dei consumi finali di energia [1]. Pertanto, il rendimento energetico degli edifici e l'uso efficiente delle risorse nella fabbricazione, nel trasporto e nell'impiego di prodotti per la costruzione sono temi chiave della politica energetica europea in vista del raggiungimento degli obiettivi definiti nel Pacchetto Clima Energia 2030.

Se si considera un approccio di ciclo di vita, il consumo energetico connesso alla fase d'uso di un edificio (riscaldamento, raffrescamento, illuminazione, ecc.) rappresenta mediamente una quota significativa dei consumi energetici; infatti esso raggiunge una percentuale variabile tra il 70 – 90% dei consumi complessivi nel caso di un edificio standard [2].

In questo contesto è stato sviluppato il concetto di “Edificio a Energia Netta Quasi Zero” definito come un edificio dalle elevate prestazioni energetiche in grado di coprire una rilevante quota dei propri consumi di energia primaria tramite generazione in sito da fonti energetiche rinnovabili, introdotto nel contesto dell'Unione Europea dalla Direttiva 2010/31/UE (EPBD recast) [3]. In dettaglio, la Direttiva EPBD recast suggerisce che, dal 1° gennaio 2021, tutti gli edifici di nuova costruzione dovranno essere a energia netta quasi zero [3]. Il tema del retrofit degli edifici esistenti è invece affrontato dalla Direttiva 2012/27/UE [4]; in particolare essa stabilisce che il 3% della superficie coperta utile totale degli edifici pubblici sia ristrutturata ogni anno per rispettare i requisiti minimi di prestazione energetica stabiliti dalla Direttiva 2010/31/UE.

In Europa, il retrofit degli edifici ricopre un ruolo chiave in una politica mirata all'aumento dell'efficienza energetica del settore edile, nel medio e nel lungo termine, soprattutto se si considera che la costruzione di nuovi edifici procede con un tasso molto basso, variabile dall'1 al 3% annuo [5], e che una quota superiore al 40% degli edifici esistenti è stata realizzata prima del 1960 [6].

Gli interventi previsti allo scopo di aumentare l'efficienza energetica degli edifici sono per lo più mirati alla riduzione dei consumi energetici connessi al riscaldamento attraverso l'adozione di alti livelli di isolamento e alla riduzione delle infiltrazioni d'aria [3]. Questi interventi potrebbero comportare tuttavia, l'aumento dell'energia incorporata dell'edificio, intesa come energia consumata nella produzione dei materiali da costruzione, nei processi di trasporto e costruzione e necessaria per la demolizione (smaltimento/riciclaggio) [7]. Inoltre, alla riduzione dei consumi connessi alla fase d'uso nel periodo invernale, potrebbe corrispondere un aumento dei consumi energetici per il raffrescamento nel periodo estivo qualora non si ricorra a opzioni di ventilazione efficaci.

Questi fattori, raramente considerati durante la fase di “*early design*” nonostante siano strettamente connessi all'aumento del consumo energetico per il raffrescamento, spesso incidono in misura elevata sui risultati causando discomfort termico negli ambienti indoor.

In tale contesto, il “*ventilative cooling*” può rappresentare una soluzione promettente, in grado di garantire le condizioni di comfort riducendo i consumi energetici indotti dal condizionamento estivo dell'aria.

Generalmente, il “*ventilative cooling*” si riferisce all'uso di strategie di ventilazione naturale, meccanica o ibrida aventi per obiettivo il raffrescamento degli ambienti indoor tramite utilizzo di aria esterna. Queste tecniche possono essere adottate in tutte le tipologie di edifici (residenziali, commerciali, industriali, ecc.) e possono contribuire al raggiungimento dello standard di edificio a energia netta zero sia nel caso di nuove costruzioni che nel caso di edifici esistenti sottoposti a retrofit energetico.

2 Ventilative Cooling: stato dell'arte della modellizzazione

2.1 Stato dell'arte della modellizzazione

Lo studio della quantificazione del potenziale di raffrescamento ottenibile dall'utilizzo di aria esterna è un problema complesso per via dei numerosi fenomeni coinvolti.

In letteratura esiste un'ampia gamma di modelli rivolti alla modellizzazione del “*ventilative cooling*”, variabili per profondità di modellizzazione, tipologia di assunzioni da effettuare, caratteristiche della ventilazione e del sistema edificio modellizzato e natura delle correlazioni utilizzate.

In questo capitolo sono approfonditi metodi e strumenti di modellizzazione del “*ventilative cooling*”. L'analisi dello stato dell'arte ha permesso di identificare modelli e tecniche riassumibili nella classificazione seguente:

- Strumenti semplificati, rivolti alla fase iniziale della progettazione (*early design*) e principalmente ad applicazioni di ventilazione naturale, basati su correlazioni analitiche o empiriche. Questi modelli richiedono un numero limitato di dati in input e permettono il calcolo della portata d'aria attraverso una o più aperture causate dal vento e/o dalla differenza di temperatura tra l'ambiente interno ed esterno;
- Strumenti di modellizzazione dettagliata: modelli *AirFlow Network*, in applicazioni singole e in connessione a strumenti di simulazione termofisica degli edifici. L'approccio AFN modella l'edificio come una rete in cui i nodi rappresentano le diverse zone dell'edificio e le connessioni tra i nodi i percorsi delle portate d'aria. Essi richiedono un numero elevato di dati in input e si basano sull'ipotesi che in ogni zona la temperatura sia uniforme e la pressione sia idrostatica [8]. In output forniscono la pressione, la temperatura e la portata d'aria in ogni nodo della rete. La connessione intersoftware di Software di Simulazione Energetica degli Edifici con i modelli AFN consente di quantificare le prestazioni del “*ventilative cooling*” nei modelli termofisici dettagliati;
- Strumenti di modellizzazione basati sulla fluidodinamica computazionale (*Computational Fluid Dynamics* – CFD). Questi modelli consentono di analizzare sistemi che coinvolgono la fluidodinamica dei fluidi, risolvendo numericamente un sistema costituito da equazioni differenziali alle derivate parziali relative alla conservazione della massa, della quantità di moto e dell'energia. Richiedono un numero elevato di dati in input e forniscono in output la distribuzione spaziale dei campi di velocità istantanea, pressione e temperatura dell'intero dominio di calcolo.

2.2 Modelli semplificati

2.2.1 Principali assunzioni

I modelli semplificati rappresentano in genere delle correlazioni derivate analiticamente o sperimentalmente dalle equazioni di conservazione della massa e dell'energia [9]. Questi modelli consentono di stimare le portate di ventilazione e indirettamente i benefici ottenibili tramite il “*ventilative cooling*”, grazie all'accoppiamento con modelli di simulazione termofisica o a semplici modellizzazioni delle interazioni edificio – ambiente.

Tali modelli consistono spesso in semplici espressioni algebriche che consentono di calcolare le portate d'aria attraverso una o più aperture, considerando l'effetto del vento, o del gradiente termico, o una combinazione di entrambe le forzanti. I dati in input richiesti sono, generalmente, la dimensione delle aperture, la velocità del vento, la temperatura interna ed esterna e le dimensioni geometriche delle aperture.

A causa della loro semplicità, questo genere di modelli è utilizzato nella fase preliminare della progettazione [10]. Il vantaggio connesso all'utilizzo di tali strumenti risiede nella capacità di effettuare una

stima rapida delle portate d'aria, e quindi nella possibilità di poter valutare, in prima approssimazione, l'effetto del "ventilative cooling" sulle condizioni di comfort termometrico.

I modelli semplificati possono essere applicati per calcoli in regime stazionario dell'aria in condizioni definite o per computazioni in stato transitorio. In entrambi i casi occorre generalmente fornire in input i valori di temperatura interna, che possono essere determinati applicando diversi approcci, ad esempio:

- La temperatura dell'edificio può essere stimata tramite bilanci semplificati di energia calcolati per gli ambienti confinati;
- Si può assumere che la temperatura dell'edificio oscilli armonicamente secondo una funzione predefinita per simulare l'effetto dell'accumulo di calore nella massa termica dell'edificio;
- La temperatura dell'edificio può essere stimata usando dei metodi di calcolo semplificati descritti dalla norma EN 13792: 2005 [11] o dei metodi complessi descritti nella norma EN 13791: 2005 [12];
- Si può utilizzare l'output di un software di simulazione termofisica dettagliato.

Si riporta nel seguito la descrizione di alcuni modelli semplificati adottati per il calcolo della portata d'aria utile ai fini del "ventilative cooling"; i modelli sono stati suddivisi nelle seguenti categorie:

1. Apertura localizzata su un solo lato dell'edificio, ventilazione causata dall'azione del vento;
2. Apertura localizzata su un solo lato dell'edificio, ventilazione causata dalla differenza di temperatura;
3. Apertura localizzata su un solo lato dell'edificio, ventilazione causata dall'azione combinata del vento e della differenza di temperatura;
4. Aperture localizzate su un solo lato dell'edificio, ventilazione causata dall'azione del vento;
5. Aperture localizzate su due lati dell'edificio, ventilazione causata dalla differenza di temperatura;
6. Aperture localizzate in un solo lato dell'edificio, ventilazione causata dall'azione combinata del vento e della differenza di temperatura.

2.2.2 Apertura localizzata su un solo lato dell'edificio, ventilazione causata dall'azione del vento

Warren et al., [13] hanno eseguito una campagna sperimentale in due edifici allo scopo di determinare un'espressione per la quantificazione della portata d'aria attraverso un'apertura, causata dalla sola azione del vento.

Il primo edificio è costituito da un solo piano, gli esperimenti sono stati eseguiti in due stanze ventilate da un solo lato attraverso due aperture:

- Finestre scorrevoli verticali, sia con una che con due aperture (stanza A);
- Due finestre a battente (stanza B).

Il monitoraggio comprende la quantificazione della portata, della velocità e direzione del vento all'altezza di riferimento di 10 m (UR), della temperatura interna ed esterna.

Il secondo edificio è adibito a uso scolastico ed è costituito da tre piani. Il monitoraggio è stato eseguito in due stanze al secondo piano, ventilate da un solo lato attraverso le seguenti aperture:

- Sette finestre scorrevoli verticali (misure eseguite considerando 4 diverse configurazioni di apertura delle finestre);
- Sette finestre a battente con angolo di apertura di 65° (misure eseguite considerando 4 diverse configurazioni di apertura delle finestre).

Il monitoraggio comprende la quantificazione della portata d'aria, della temperatura dell'aria interna ed esterna e della velocità e direzione del vento in una stazione meteorologica situata a una distanza di 8,5 km dall'edificio.

Il monitoraggio delle condizioni interne ha permesso di formulare le seguenti correlazioni:

$$Q_v = 0,025 \cdot A \cdot U_R \quad (1)$$

$$Q_v = 0,1 \cdot A \cdot U_L \quad (2)$$

dove:

Q_v è la portata d'aria (m³/s);

A è l'area dell'apertura (m²);

U_R è la velocità del vento misurata all'altezza di riferimento di 10 m (m/s);

U_L è la velocità del vento misurata in una stazione meteorologica (m/s).

Nell'ASHRAE Handbook [14] è riportata la seguente espressione per la determinazione della portata d'aria causata dalla sola azione del vento, in un edificio che riporti aperture finestrate da un solo lato:

$$Q_v = 88 \cdot C \cdot A \cdot U \quad (3)$$

dove:

Q_v è la portata d'aria (cfm);

C è il coefficiente di scarico (Discharge coefficient) (-);

A è l'area dell'apertura (ft²);

U è la velocità del vento (mph).

2.2.3 Apertura localizzata su un solo lato dell'edificio, ventilazione causata dalla differenza di temperatura

Warren et al. [15] hanno determinato un'espressione per la quantificazione della portata d'aria, attraverso una singola apertura, causata dalla sola azione della differenza di temperatura. In questo caso la portata d'aria attraverso l'apertura è bi-direzionale, infatti la sua direzione si inverte in corrispondenza del piano a pressione neutra dell'apertura (Figura 1).

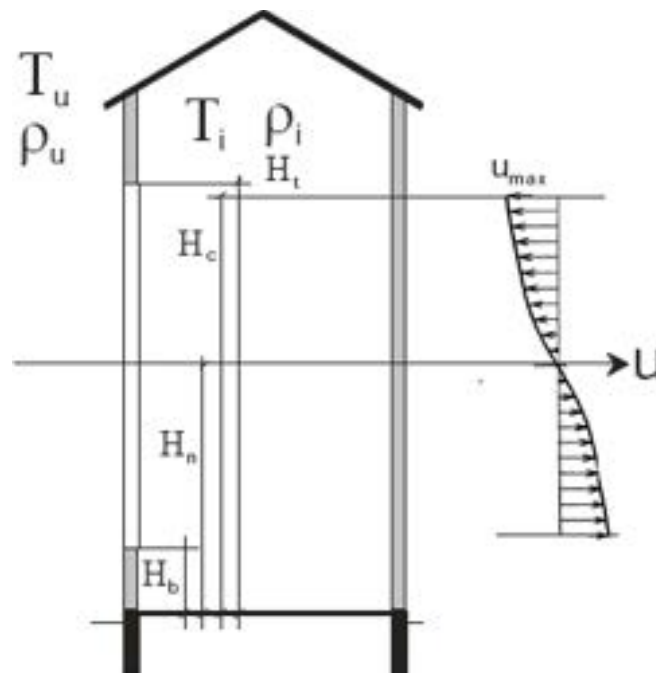


Figura 1. Rappresentazione del flusso bi-direzionale, causato dalla differenza di temperatura, attraverso un'apertura di grandi dimensioni

L'espressione ottenuta è la seguente:

$$Q_v = \frac{C_d \cdot A}{3} \sqrt{\frac{(T_i - T_e) \cdot g \cdot (H_t - H_b)}{\left(\frac{T_i + T_e}{2}\right)}} \quad (4)$$

dove:

Q_v è la portata d'aria (m^3/s);

C_d è il coefficiente di scarico (-);

A è l'area dell'apertura (m^2);

T_i è la temperatura interna (K);

T_e è la temperatura esterna (K);

H_t, H_b (m) sono descritti in Figura 1.

2.2.4 Apertura localizzata in un solo lato dell'edificio, ventilazione causata dall'azione combinata del vento e della differenza di temperatura

Lersen [16] ha effettuato dei test sperimentali in galleria del vento allo scopo di studiare l'effetto della velocità e dell'angolo di incidenza del vento, della differenza di temperatura e delle fluttuazioni della pressione sulla portata d'aria ottenibile in condizioni di ventilazione naturale. L'espressione ottenuta è la seguente:

$$Q_v = A \sqrt{C_1 f(\beta^2) |C_p| U^2(z = BH) + C_2 H \Delta t + C_3 \frac{\Delta C_{p, \text{opening}} \Delta t}{U^2(z = BH)}} \quad (5)$$

dove:

Q_v è la portata d'aria (m^3/s);

C_p è il coefficiente di pressione;

$U(z = BH)$ è la velocità del vento all'altezza dell'edificio (m/s);

H è l'altezza dell'apertura (m);

C_1 , C_2 e C_3 sono tre coefficienti adimensionali che dipendono, rispettivamente, dall'effetto del vento, della differenza di temperatura e dalla turbolenza. Inoltre, i tre coefficienti sono funzione della direzione del vento.

I termini $\Delta C_{p,opening}$ e $f(\beta)$ sono calcolati con le seguenti espressioni:

$$\Delta C_{p,opening} = 9,184 \cdot 10^{-9} \beta^3 - 2,62610 \cdot 10^{-6} \beta^2 - 0,0002354 \beta + 0,113 \quad (6)$$

$$f(\beta) = -3,284312 \cdot 10^{-9} \beta^4 + 2,363134 \cdot 10^{-6} \beta^3 - 5,24549 \cdot 10^{-4} \beta^2 + 3,581077 \cdot 10^{-2} \beta + 0,3017574 \quad (7)$$

Nelle espressioni (6) e (7) β è l'angolo di incidenza del vento.

Gids e Phaff [17] forniscono la seguente espressione:

$$Q_v = \frac{A}{2} \sqrt{C_1 U(10)^2 + C_2 h \Delta T + C_3} \quad (8)$$

dove:

Q_v è la portata d'aria (m^3/s);

A è l'area dell'apertura (m^2);

h è l'altezza dell'apertura (m);

$U(10)$ è la velocità di riferimento misurata in una stazione meteorologica all'altezza di 10 m (m/s);

ΔT è la differenza di temperatura tra l'esterno e l'interno (K);

C_1 , C_2 e C_3 sono delle costanti valutate empiricamente che dipendono, rispettivamente, dall'effetto del vento, della differenza di temperatura e dalla turbolenza.

2.2.5 Aperture localizzate su un solo lato, ventilazione causata dall'azione del vento

La portata d'aria attraverso più di un'apertura può essere causata sia dalla differenza di temperatura (se le aperture si trovano a diverse altezze dell'edificio) che dal vento [18].

Nel caso in cui la ventilazione attraverso le due aperture sia dovuta alla sola azione del vento è possibile ricorrere alla seguente formula per il calcolo della portata d'aria di ventilazione [19]:

$$Q_V = C_D A_w U(z = BH) \sqrt{|C_{P,1} - C_{P,2}|} \quad (9)$$

$$\frac{1}{A_w^2} = \frac{1}{(\sum_{n=1}^n A_n)^2} + \frac{1}{(\sum_{m=1}^m A_m)^2} \quad (10)$$

dove:

Q_V è la portata d'aria (m^3/s);

C_D è il coefficiente di scarico (-);

A_w è l'area delle aperture calcolata con l'espressione (10) (in questo modello le aperture con pedice n sono quelle con coefficiente di pressione (C_p) positivo) (m^2);

$U(z = BH)$ è la velocità del vento all'altezza dell'edificio (m/s);

$C_{P,1,2}$ sono i coefficienti di pressione delle due aperture (-).

2.2.6 Aperture localizzate su due lati, ventilazione causata dalla differenza di temperatura

Una formulazione per calcolare la portata d'aria causata dalla differenza di temperatura attraverso $m + n$ aperture collocate a due diverse altezze è riportata come Eq.11 [18]:

$$Q_v = C_D A_b \sqrt{\frac{2\Delta T g h}{T_M}} \quad (11)$$

dove:

Q_v è la portata d'aria (m^3/s);

C_D è il coefficiente di scarico per le aperture che, in genere, assume valori compresi tra 0,60 e 0,75;

ΔT è la differenza di temperatura tra l'esterno e l'interno (K);

g è l'accelerazione di gravità (m/s^2);

h è la distanza tra l'altezza delle due aperture (m);

T_M è la media tra la temperatura dell'ambiente esterno e di quello interno (K);

A_b è l'area delle $m + n$ aperture (m^2).

Anderson [20] ha derivato un modello per la stima della portata d'aria causata dalla differenza di temperatura in un edificio costituito da un'unica zona (Figura 2).

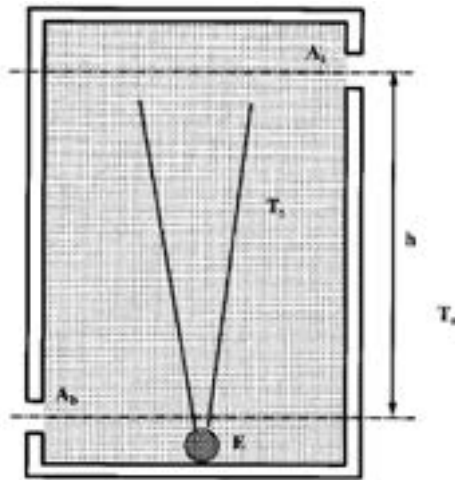


Figura 2. Rappresentazione del modello completamente miscelato [20]

Il modello, basato sull'ipotesi che l'aria contenuta nel volume di analisi sia completamente miscelata, assume che la temperatura all'interno dell'edificio sia uniforme, che le pareti siano adiabatiche, che siano presenti dei carichi interni e che la temperatura interna sia sempre maggiore di quella esterna. Le equazioni risultanti sono:

$$q = C_d A^* \sqrt{\frac{T_i - T_o}{T_o}} g h \quad (12)$$

$$A^* = \frac{\sqrt{2} A_t A_b}{\left(\sqrt{A_t^2 + A_b^2}\right)} \quad (13)$$

dove:

q è la portata d'aria (m^3/s);

C_d è il coefficiente di scarico (-);

A^* è l'area calcolata attraverso l'espressione (13) (m^2);

T_i è la temperatura interna (K);

T_o è la temperatura esterna (K);

g è l'accelerazione gravitazionale (m/s^2);

h (m) è descritta in Figura 2.

Linden [21] ha studiato la ventilazione naturale considerando due modelli: il primo modello "emptying water filling model" è rappresentato nella Figura 3. L'edificio è diviso in due zone, nella zona inferiore la temperatura è uguale a quella esterna mentre, nella zona superiore la temperatura è più elevata.

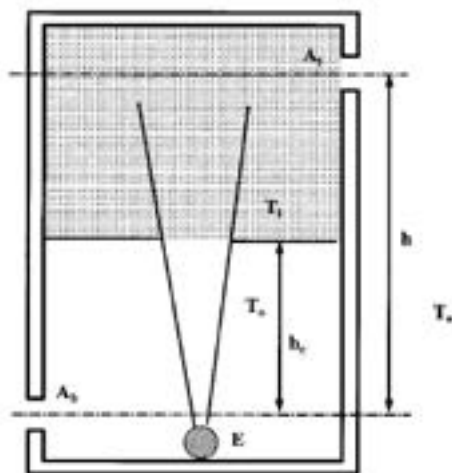


Figura 2. Rappresentazione del modello "emptying water filling" [20]

L'espressione ottenuta è la seguente:

$$q = C_d A^* \sqrt{\frac{T_i - T_o}{T_o}} g(h - h_c) \quad (14)$$

dove:

q è la portata d'aria (m^3/s);

C_d è il coefficiente di scarico (-);

A^* è l'area calcolata attraverso l'espressione (13) (m^2);

T_i è la temperatura interna (K);

T_o è la temperatura esterna (K);

g è l'accelerazione gravitazionale (m/s^2);

Il significato dei termini geometrici h , h_c (m) è evidenziato in Figura 3.

Nel secondo modello "emptying air – filling box – Model I" (Figura 4), Linden [21] assume che la temperatura dell'aria nella parte inferiore dell'edificio sia uguale alla temperatura dell'aria in prossimità del pavimento mentre, la temperatura dell'aria nella zona superiore sia uguale alla temperatura dell'aria in prossimità del soffitto.

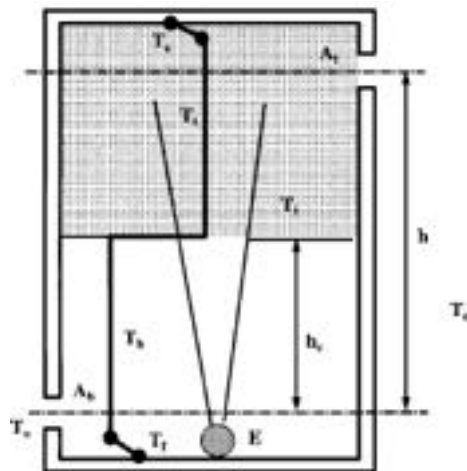


Figura 4: Rappresentazione del modello “emptying air – filling box – Model I”[20]

L’espressione ottenuta è la seguente:

$$q = C_d A^* \sqrt{\frac{T_b - T_o}{T_o} g h_c + \frac{T_t - T_o}{T_o} g (h - h_c)} \quad (15)$$

dove:

q è la portata d’aria (m^3/s);

C_d è il coefficiente di scarico (-);

A^* è l’area calcolata attraverso l’espressione (13) (m^2);

T_b è la temperatura della zona inferiore della stanza (K);

T_t è la temperatura della zona superiore della stanza (K);

T_o è la temperatura esterna (K);

Il significato dei termini geometrici h , h_c (m) è rappresentato in Figura 4.

Li [22] studia la ventilazione naturale considerando un modello “emptying air – filling box – Model II” ma a differenza del modello precedente l’autore assume un profilo di temperatura lineare lungo l’altezza (Figura 5).

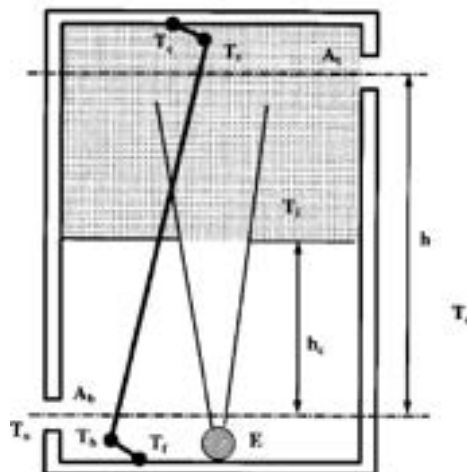


Figura 5: Rappresentazione del modello “emptying air – filling box – Model II”[20]

L'espressione ottenuta è la seguente:

$$q = C_d A^* \sqrt{\frac{1}{2}gh \frac{T_b - T_o}{T_o} + \frac{1}{2}gh \frac{T_t - T_o}{T_o}} \quad (16)$$

dove:

q è la portata d'aria (m³/s);

C_d è il coefficiente di scarico (-);

A^* è l'area calcolata attraverso l'espressione (13) (m²);

T_b è la temperatura in prossimità del pavimento (K);

T_t è la temperatura in prossimità del soffitto (K);

T_o è la temperatura esterna (K);

Il significato del termine geometrico h (m) è rappresentato in Figura 5.

L'ASHRAE Handbook [14] riporta la seguente espressione per la quantificazione della portata d'aria che può essere adoperata sia nel caso di una che di più aperture:

$$Q = 60 C_d A \sqrt{2g\Delta H_{NPL} (T_i - T_o)/T_i} \quad (17)$$

dove:

Q è la portata d'aria (cfm);

C_d è il coefficiente di scarico dell'apertura (-), calcolabile con la seguente espressione nel caso di una singola apertura: $C_d = 0,40 + 0,0025 |T_i - T_o|$; e pari a 0,65 nel caso di più aperture;

A è l'area di ingresso della portata d'aria (ft²);

g è l'accelerazione gravitazionale (ft/s²);

ΔH_{NPL} nel caso di una sola apertura di altezza h è pari a $\frac{1}{2} h$; nel caso di più aperture è pari alla distanza tra il punto medio dell'apertura inferiore e il piano delle pressioni neutre (ft);

T_i è la temperatura interna (°R);

T_o è la temperatura esterna (°R).

2.2.7 Aperture localizzate in un solo lato dell'edificio, ventilazione causata dall'azione combinata del vento e della differenza di temperatura

Mahdavi e Pröglhöf [23] hanno eseguito una serie di esperimenti in un edificio del Politecnico di Vienna, e sulla base dei risultati ottenuti, hanno definito un modello empirico basato sui principali fattori che caratterizzano le condizioni dell'ambiente esterno (velocità dell'aria, temperatura, umidità) per determinare i valori di ricambio d'aria (Air Changes per Hour – ACH) e la velocità media dell'aria all'interno di una stanza ($v_{i,m}$). Le misure sono state eseguite in un ufficio universitario. Considerando diverse configurazioni di apertura delle finestre e diverse condizioni climatiche dell'aria esterna, gli autori hanno misurato la portata d'aria e la velocità media della stessa. Dall'elaborazione dei dati sperimentali sono state ottenute le seguenti espressioni:

$$ACH = f_1 \left(A_{GL} v_e \sqrt{|\Delta t|} \right) \quad (18)$$

$$v_{i,m} = f_2 \left(A_{GL} v_e \sqrt{|\Delta t|} \right) \quad (19)$$

dove:

A_{GL} è l'area della sezione aperta (m^2);

v_e è la velocità dell'aria esterna (m/s);

Δt è la differenza di temperatura tra l'aria esterna ed interna (K);

f_1 e f_2 sono due coefficienti.

Nella Tabella 1 riportati in maniera sintetica i modelli semplificati analizzati. Per ogni modello si riporta il campo di applicazione, inteso come il numero di aperture considerate nel calcolo della portata d'aria, le forzanti considerate, vento (V) e/o differenza di temperatura (T), e le principali assunzioni.

In tutti i modelli esaminati, la portata di ventilazione è proporzionale all'area dell'apertura. Nei casi in cui si considera come forzante la sola azione del vento e la presenza di una sola apertura, la portata è funzione della velocità del vento [13, 14]. Nel caso in cui siano presenti due aperture la portata d'aria è funzione dalla velocità del vento e dei coefficienti di pressione [19]. Nei modelli che studiano la ventilazione causata dal gradiente termico, la portata d'aria è funzione della differenza di temperatura tra l'interno e l'esterno dell'edificio nei casi in cui si considera la presenza di una sola apertura [15] o si ipotizza che la temperatura sia uniforme nella zona termica [14, 20]. Nei modelli che considerano la presenza di una stratificazione termica negli ambienti interni, la portata d'aria è funzione oltre che della differenza di temperatura tra l'interno e l'esterno anche della variazione interna di temperatura.

Tabella 1: Modelli semplificati

Aperture	Forzante	Assunzioni	Equazione	Rif. Bibl.
1	V	$\frac{Q_v}{A \cdot U_R} = K$ $U_R = \text{costante}$	$Q_v = 0,025 \cdot A \cdot U_R$	[13]
1	V	$\frac{Q_v}{A \cdot U_L} = K$ $U_L = f(\theta)$ $U_L = \text{costante}$	$Q_v = 0,1 \cdot A \cdot U_L$	[13]
1	V	U= costante $Q_v = f(C, A, U)$	$Q_v = 88 \cdot C \cdot A \cdot U$	[14]
1	T	Apertura di grandi dimensioni $Q_v = f(C_d, A, T, H)$	$Q_v = \frac{C_d \cdot A}{3} \sqrt{\frac{(T_i - T_e) \cdot g \cdot (H_t - H_b)}{\left(\frac{T_i + T_e}{2}\right)}}$	[15]
1	V, T	$Q_v = f(C_p, B, \Delta t, H, \Delta C_p)$	$Q_v = A \sqrt{C_1 f(\beta^2) C_p U(z = BH)^2 + C_2 H \Delta t + C_3 \frac{\Delta C_{p, \text{opening}} \Delta t}{U(z = BH)^2}}$	[16]
1	V, T	$Q_v = f(U, \Delta C_p, h, \Delta T)$	$Q_v = \frac{A}{2} \sqrt{C_1 U(10)^2 + C_2 h \Delta T + C_3}$	[17]
2	V	$Q_v = f(C_D, C_p, A, U)$	$Q_v = C_D A_w U(z = BH) \sqrt{ C_{p,1} - C_{p,2} }$	[19]
2+	T	$Q_v = f(C_D, A, \Delta T, H, T)$	$Q_v = C_D A_b \sqrt{\frac{2 \Delta T g H}{T_M}}$	[18]
2	T	T uniforme nella zona termica	$q = C_d A^* \sqrt{\frac{T_i - T_o}{T_o}} g h$	[20]
2	T	Modello <i>emptyng water filling box</i>	$q = C_d A^* \sqrt{\frac{T_i - T_o}{T_o}} g (h - h_c)$	[21]
2	T	Modello <i>emptyng air filling box I</i>	$q = C_d A^* \sqrt{\frac{T_b - T_o}{T_o} g h_c + \frac{T_t - T_o}{T_o} g (h - h_c)}$	[21]
2	T	Modello <i>emptyng air filling box II</i> <i>T varia linearmente lungo l'altezza</i>	$q = C_d A^* \sqrt{\frac{1}{2} g h \frac{T_b - T_o}{T_o} + \frac{1}{2} g h \frac{T_t - T_o}{T_o}}$	[22]
2	T	$Q = f(C_D, A, \Delta H_{NPL}, T)$	$Q = C_d A \sqrt{2 g \Delta H_{NPL} (T_i - T_o) / T_i}$	[14]
2+	V, T	$ACH = f(A, \Delta T, v)$ $v_{i,m} = f(A, \Delta T, v)$	$ACH = f_1(A_{GL} v_e \sqrt{ \Delta t })$ $v_{i,m} = f_2(A_{GL} v_e \sqrt{ \Delta t })$	[23]

2.3 Modelli AirFlow network

2.3.1 Principali assunzioni

Rispetto ai modelli semplificati i modelli AFN consentono una modellizzazione più rigorosa dei fenomeni che interessano il “ventilative cooling”. Essi non si limitano al calcolo della portata d’aria attraverso una o più aperture, ma consentono di quantificare le portate attraverso tutte le aperture presenti nell’involucro e quelle che si stabiliscono tra le zone interne dell’edificio, considerando sia il layout delle finestre che degli ambienti interni. Alla base della modellizzazione AFN vi è l’ipotesi che ogni zona dell’edificio sia ben miscelata, che al suo interno la temperatura sia uniforme e che la distribuzione delle pressioni sia di tipo idrostatico [8].

Questi strumenti consentono di simulare contemporaneamente l’effetto del vento e della differenza di temperatura sulla pressione interna ed esterna dell’edificio e l’effetto della ventilazione meccanica.

2.3.2 Modellizzazione matematica

L’edificio è modellizzato come una rete, in cui i nodi rappresentano le diverse zone e le connessioni tra i nodi i percorsi delle portate d’aria. Le finestre e ogni apertura dell’involucro sono rappresentate come “perdite” che collegano ciascun punto della rete causando variazioni di pressione. Ogni percorso della portata d’aria è descritto matematicamente dall’equazione di Bernoulli [8].

La soluzione numerica del problema fornisce i valori delle grandezze fisiche associate ai nodi e quando la temperatura e la pressione sono note il modello calcola le portate d’aria.

La modellizzazione AFN del “ventilative cooling” richiede un numero rilevante di dati in input. In dettaglio, tale approccio richiede dati meteo – climatici (pressione e temperatura esterna, velocità e direzione del vento e umidità), dati sulla temperatura interna, coefficienti ed esponenti di flusso delle aperture (ad esempio, i coefficienti e gli esponenti di pressione di porte, fessure e finestre), e infine dati geometrici dell’edificio.

Gli strumenti più diffusi per la modellazione tramite *AirFlow Network* sono COMIS [24] e CONTAM [25]. I due software sono basati sullo stesso modello teorico.

Le portate d’aria all’interno di un edificio sono causate da differenze di pressione dovute al vento, alla differenza di temperatura, ai sistemi di ventilazione meccanica, o da una combinazione di tutti questi fattori [26]. Le portate d’aria, inoltre, sono influenzate dalla distribuzione delle aperture nell’involucro dell’edificio. La correlazione di tali fenomeni con la modellizzazione AFN è approfondita nel seguito.

L’azione del vento produce un campo di velocità e di pressione attorno all’edificio. Il campo di pressione è caratterizzato da regioni di sovrappressione in corrispondenza delle facciate sopravento e regioni di depressione in corrispondenza delle facciate parallele alla direzione del vento e in quelle sottovento. La distribuzione della pressione attorno all’edificio è solitamente descritta da coefficienti di pressione adimensionali definiti dalla seguente espressione [27]:

$$c_p(x, y, z) = \frac{p(x, y, z) - p_o(z)}{P_{dyn}(z)} \quad (20)$$

$$P_{dyn}(z) = \frac{1}{2} \rho_{out}(z) v^2(z) \quad (21)$$

dove:

$c_p(x, y, z)$ è il coefficiente di pressione alle coordinate x , y e z (-);

$p(x, y, z)$ è la pressione di superficie alle coordinate x , y e z (Pa);

$p_o(z)$ è la pressione atmosferica al livello z (Pa);

$P_{dyn}(z)$ è la pressione dinamica nel flusso indisturbato all'altezza z (Pa);

$\rho_{out}(z)$ è la densità dell'aria esterna all'altezza z (kg/m^3);

$v(z)$ è la velocità del vento all'altezza z (m/s).

L'effetto termico può essere calcolato integrando l'equazione di Bernoulli considerando una condizione di assenza di vento [27]:

$$(p_{out} - p_{in})_{stack} = g(\rho_{in} - \rho_{out})(z - n) \quad (22)$$

dove:

$(p_{out} - p_{in})$ è la differenza di pressione dovuta al gradiente termico (Pa);

g è l'accelerazione dovuta alla gravità (m/s^2);

$(\rho_{in} - \rho_{out})$ è la differenza di densità tra la colonna d'aria interna ed esterna (kg/m^3);

$(z - n)$ è la differenza tra l'altezza z e il piano a pressione neutra (m).

I modelli di *AirFlow Network* consentono di simulare l'effetto della ventilazione meccanica. Il sistema di condotte può essere modellizzato come un percorso della portata d'aria, e quindi può essere rappresentato come una connessione tra nodi; il ventilatore può essere modellizzato come una differenza di pressione nota [27].

2.3.3 Limiti della modellizzazione AFN

La modellizzazione AFN presenta alcune limitazioni intrinseche nella sua natura. In primo luogo essa è caratterizzata da un'elevata dipendenza dalla definizione di alcuni coefficienti, quali l'esponente del profilo del vento, il coefficiente di pressione del vento e il coefficiente di scarico. Non è, altresì, generalmente possibile determinare la temperatura e la velocità dell'aria all'interno delle stanze e inoltre nella modellizzazione è trascurato l'effetto della componente turbolenta del vento.

Allo scopo di ottenere una modellizzazione più accurata del "*ventilative cooling*", tali modelli possono essere connessi a software di simulazione dinamica per valutare le prestazioni dell'edificio. L'approccio inter - software consente una modellizzazione più dettagliata dei carichi termici, della massa termica, del comportamento degli occupanti e dei carichi interni [28].

2.4 Modelli di fluidodinamica computazionale (Computational Fluid Dynamics – CFD)

I modelli di fluidodinamica computazionale rappresentano l'approccio più dettagliato per lo studio del "ventilative cooling" poiché simulano con un maggior grado di approfondimento i fenomeni analizzati. La modellizzazione CFD è in grado di fornire informazioni particolareggiate sulle portate d'aria che interessano l'interno e l'esterno dell'edificio causate dall'interazione delle diverse forzanti (azione del vento, gradiente di densità, ventilazione meccanica, ecc.) considerando sia le caratteristiche dell'edificio che dell'ambiente circostante.

Questi strumenti approfondiscono i campi di velocità e di temperatura nelle zone termiche, la distribuzione delle pressioni agenti sulle superfici, le caratteristiche della portata d'aria in prossimità delle aperture.

L'elevato grado di accuratezza nello studio dei fenomeni che interessano il "ventilative cooling" comporta la richiesta di un numero consistente di dati in input e tempi di calcolo più elevati rispetto ai modelli trattati in precedenza. Per questa ragione, generalmente le applicazioni di CFD allo studio della termofisica degli edifici e del "ventilative cooling" sono circoscritte a configurazioni geometricamente semplici e a limitati intervalli temporali.

La formulazione matematica generale di tali modelli può essere schematizzata in accordo alle Eq. 23 – 24 – 25:

Equazione di conservazione della massa [29]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (23)$$

dove:

ρ è la densità del fluido;

\vec{v} è il vettore velocità;

Equazione della conservazione della quantità di moto (Navier – Stokes) [29]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (24)$$

dove:

\vec{v} è il vettore velocità;

$\bar{\tau}$ è il tensore degli sforzi;

p è la pressione;

$\rho \vec{g}$ è la forza gravitazionale;

\vec{F} sono le forze esterne.

Bilancio termico [29]:

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v} (\rho E + p)) = \nabla \cdot \left(k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{j}_j + (\bar{\tau}_{eff} \cdot \vec{v}) \right) + S_h \quad (25)$$

dove:

ρ è la densità del fluido;

E è l'energia totale ($E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2}$);

\vec{v} è il vettore velocità;

p è la pressione;

k_{eff} è la conduttività effettiva ($k + k_t$, dove k è la conduttività termica e k_t è la conduttività termica turbolenta);

T è la temperatura;

h_j è l'entalpia sensibile;

\vec{J}_j è il flusso diffusivo della specie j .

Nell'espressione (25) i tre termini a secondo membro rappresentano l'energia scambiata per conduzione, per diffusione e per dissipazione viscosa, il termine S_h include il calore generato da reazioni chimiche.

Il sistema costituito dalle equazioni (23), (24) e (25) è un sistema di equazioni differenziali alle derivate parziali la cui risoluzione, per i problemi fisici più complessi (ad esempio lo studio dei fluidi caratterizzati da moto turbolento), può essere effettuata tramite CFD.

I metodi numerici risolvono le equazioni differenziali alle derivate parziali mediante discretizzazione dello spazio di analisi.

Il primo step della modellizzazione CFD consiste nella discretizzazione del dominio spaziale.[30]. L'unione dei punti nodali costituisce la griglia di calcolo, definita "grid" o "mesh". Ogni sotto – dominio dell'analisi è rappresentativo di una certa regione e le grandezze (pressione, temperatura, velocità dell'aria) definite al suo interno rappresentano dei valori medi per la regione di riferimento. I metodi di discretizzazione più utilizzati sono tre: il metodo alle differenze finite, il metodo ai volumi finiti e il metodo agli elementi finiti.

La discretizzazione non è arbitraria ma dipende dalla geometria del dominio di calcolo e dall'accuratezza desiderata nella risoluzione del problema. Le mesh possono essere statiche o dinamiche a seconda delle esigenze dettate dalla geometria del dominio spaziale di calcolo.

In letteratura si riscontra un'ampia gamma di tecniche e tipologie di modellizzazione basate sulla fluidodinamica computazionale. Un ulteriore approfondimento relativo alla soluzione del problema della turbolenza permettere di effettuare un ulteriore suddivisione negli approcci di modellizzazione:

1. RANS – *Reynolds Averaged Navier – Stokes*;
2. *Large Eddy Simulation* (LES);
3. Simulazione numerica diretta (*Direct Numerical Simulation* – DNS).

Nella modellizzazione RANS si applica un'operazione di media temporale delle equazioni di conservazione della massa, della quantità di moto e della quantità di energia.

Questo approccio risolve il problema della turbolenza esprimendo le variabili istantanee che compaiono nelle suddette equazioni come somma di una componente media e di una componente fluttuante.

Nel caso della velocità istantanea si ottiene:

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i \tag{26}$$

dove:

u_i è il valore istantaneo della velocità;

\bar{u}_i è la componente media della velocità;

u'_i è la componente fluttuante della velocità.

I modelli di turbolenza stabiliscono delle relazioni tra il campo di moto medio e il campo di moto turbolento attraverso la viscosità turbolenta μ_t . Pertanto, la modellizzazione delle componenti turbolente delle grandezze che governano il moto di un fluido è ricondotta alla determinazione della viscosità turbolenta.

L'applicazione delle RANS per lo studio della turbolenza si focalizza sul campo del moto medio e sugli effetti della turbolenza sulle proprietà di questo moto. La risoluzione numerica di questo sistema fornisce il campo

medio di velocità, di pressione e temperatura. Poiché con le RANS la simulazione si limita al campo di moto medio, i tempi di calcolo sono ridotti rispetto ad altri approcci.

Nella Figura 5 sono riportati i risultati della simulazione, eseguita con l'approccio RANS attraverso il codice di fluidodinamica numerica commerciale FLUENT [31], in relazione alle linee di flusso all'esterno e all'interno dell'edificio soggetto a ventilazione incrociata [32].

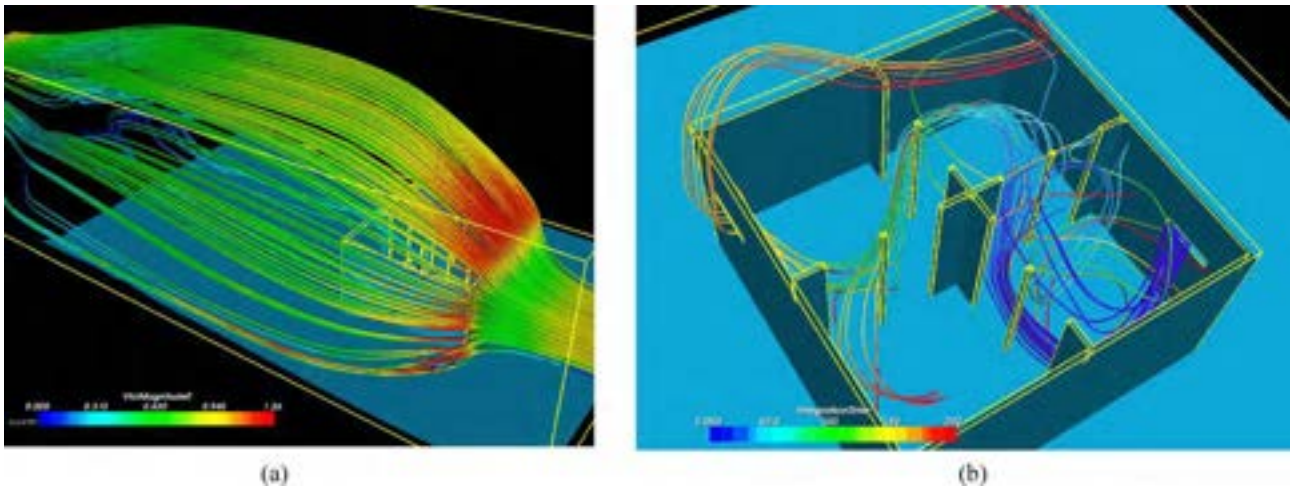


Figura 5: linee di flusso attorno (a) e all'interno dell'edificio (b) [32]

La modellizzazione LES consente un'analisi più dettagliata del moto turbolento rispetto alla modellizzazione RANS.

Questo metodo è basato sulla considerazione che le strutture turbolente di scala maggiore si comportano in modo diverso rispetto alle strutture turbolente di entità inferiore. In dettaglio, le prime interagiscono e ricevono energia dal campo di moto medio e quindi dipendono dal tipo di corrente, mentre si assume che le strutture turbolente di piccola scala abbiano un comportamento "universale", ossia presentano le medesime proprietà indipendentemente dal tipo di corrente.

In conformità a queste considerazioni l'approccio LES studia il moto turbolento dei fluidi attraverso la discretizzazione spaziale e temporale delle strutture turbolente di grande scala, risolte in simulazione dinamica diretta.

Un modello per la risoluzione della turbolenza di piccola scala è il modello di *Smagorinsky*.

Il modello ipotizza che le strutture turbolente di piccola scala siano proporzionali alle grandezze del campo risolto in DNS, attraverso la viscosità turbolenta, opportunamente calcolata. Pertanto, la risoluzione delle scale turbolente di piccola dimensione è ricondotta alla determinazione della viscosità turbolenta che dipende dalla velocità di deformazione del campo risolto e dalla dimensione della griglia di discretizzazione spaziale [33].

La modellizzazione DNS risolve direttamente il sistema delle equazioni di conservazione della massa, della quantità di moto e dell'energia.

Lo studio dei campi di moto turbolenti con la simulazione numerica diretta richiede che la risoluzione spaziale sia sufficientemente piccola da poter descrivere i vortici turbolenti di scala ridotta. Il numero di elementi discreti deve essere tale da poter descriverne in modo dettagliato il comportamento; allo stesso modo, il passo di avanzamento delle soluzioni nel tempo deve essere dimensionato per riprodurre in modo accurato il comportamento dinamico [33]. La modellizzazione DNS di configurazioni fluidodinamiche particolarmente complesse, come quelle che caratterizzano il "*ventilative cooling*", presenta, generalmente, lo svantaggio di richiedere tempi di calcolo eccessivamente lunghi.

3 Indicatori di prestazione e applicabilità del “*Ventilative Cooling*”

La seconda parte dell’attività ha come obiettivo l’analisi di indicatori di prestazione e applicabilità del “*ventilative cooling*”. In particolare, si sono analizzati strumenti e metodologie innovative per valutare la potenzialità del “*ventilative cooling*” in funzione di opportuni parametri meteo - climatici. Tali metodi e indicatori sono fondamentali nella fase iniziale del design, in questa fase è importante poter prendere decisioni sulla progettazione e sull’applicazione del “*ventilative cooling*”, basandosi su quantificazione sufficientemente affidabile del potenziale di raffrescamento ottenibile da tali tecniche, senza la necessità di ricorrere a simulazioni rigorose.

Nel presente studio è stata eseguita l’analisi dello stato dell’arte dei metodi sviluppati per la valutazione del potenziale climatico del “*ventilative cooling*”.

Nella Tabella 2 si riporta un elenco dei metodi analizzati con una descrizione sintetica della tipologia di dati di input richiesti e dei metodi di valutazione delle potenzialità e dell’applicabilità adottati da ciascuno di essi.

Tabella 2: metodi di valutazione della prestazione e dell’applicabilità del “*ventilative cooling*”

Dati climatici Modellizzazione edificio		Metodo per la valutazione del potenziale del <i>ventilative cooling</i>	Rif. Bibliografico
Si	No	Confronto tra la portata d’aria richiesta per stabilire le condizioni di comfort indoor e la portata d’aria ottenibile attraverso la ventilazione naturale	[34]
Si	Si	Confronto tra la temperatura interna all’edificio e l’intervallo delle temperature di comfort	[35]
Si	Si	Confronto tra temperatura interna ed esterna	[36]
Si	Si	Confronto tra temperatura interna ed esterna	[37]

Aynsley [34] ha sviluppato un metodo per la valutazione delle potenzialità del “*ventilative cooling*” basato sul monitoraggio di dati meteo – climatici. L’edificio utilizzato per l’applicazione del metodo è sito in Australia, i dati meteo – climatici sono monitorati nel periodo estivo. Il raffrescamento dell’ambiente interno è necessario quando la temperatura supera il valore di set point, pari a 27°C per il caso studio. Per l’applicazione del metodo occorre che siano misurate la temperatura di bulbo secco, l’umidità relativa, la velocità del vento misurata all’altezza di riferimento di 10 m e la sua direzione.

Sulla base dei dati misurati è possibile calcolare la velocità dell’aria, AFR, in grado di garantire le condizioni di comfort termico nell’ambiente indoor. Il potenziale del “*ventilative cooling*” è valutato considerando come forzante la sola azione del vento.

In dettaglio, utilizzando il valore della velocità del vento misurato all’altezza di riferimento di 10 m si calcola la velocità dell’aria che si stabilisce all’interno dell’edificio, AF_{VC}, all’altezza di 1 m dal pavimento. Dal confronto dei valori AFR e AF_{VC} risulta che il “*ventilative cooling*” avrà le potenzialità di garantire le condizioni di comfort termico quando AF_{VC} ≥ AFR.

Ghiaus e Allard [35] forniscono un metodo per la valutazione del potenziale del “*ventilative cooling*” in un edificio privo di impianto di condizionamento utilizzando un metodo basato sulla differenza di temperatura tra l’ambiente interno ed esterno e sui criteri di comfort adattivo. Il metodo utilizza il concetto di temperatura “*free-running*” (T_{fr}) definita come la temperatura che è possibile riscontrare all’interno di un edificio in assenza di sistemi tecnologici attivi.

La temperatura di “*free-running*” può essere calcolata mediante l’equazione di bilancio termico dell’edificio in condizioni stazionarie, riportata di seguito:

$$K_{tot}(T_{fr} - T_o) - q_{gain} = 0 \tag{27}$$

dove:

K_{tot} sono le perdite di raffreddamento dell'edificio per salto termico unitario (W/K);

T_{fr} è la temperatura di "free-running" (K);

T_o è la temperatura esterna (K);

q_{gain} sono i carichi termici totali (W).

Dall'equazione di bilancio termico (27) si ricava la temperatura di "free-running" attraverso la seguente espressione:

$$T_{fr} = T_o + \frac{q_{gain}}{K_{tot}} \quad (28)$$

Una volta calcolata la temperatura T_{fr} e noto il limite superiore dell'intervallo delle temperature di comfort, T_{cu} , si ottengono i gradi – ora di raffreddamento attraverso la seguente espressione:

$$dh_c = (T_{fr} - T_{cu}) \cdot \delta_c \quad (29)$$

Dove la condizione da verificare per garantire il raffreddamento è definita nel seguente modo:

$$\delta_c = \begin{cases} 1, & \text{se } T_{fr} > T_{cu} \\ 0, & \text{se } T_{fr} \leq T_{cu} \end{cases} \quad (30)$$

La domanda di raffreddamento può essere soddisfatta ricorrendo a strategie di ventilazione naturale o meccanica.

Se la temperatura esterna, T_o , è più bassa del limite superiore dell'intervallo di comfort, T_{cu} , allora è possibile ricorrere a tecniche di "ventilative cooling" naturali.

La condizione per la ventilazione naturale è:

$$\delta_{fr} = \begin{cases} 1, & \text{se } T_{fr} > T_{cu} \text{ e } T_o < T_{cu} \\ 0, & \text{in caso contrario} \end{cases} \quad (31)$$

I gradi – ora disponibili per il raffreddamento naturale possono essere calcolati ricorrendo alla seguente espressione:

$$dh_{fr} = (T_{fr} - T_{cu}) \cdot \delta_{fr} \quad (32)$$

dove:

dh_{fr} sono i gradi – ora disponibili per il raffreddamento naturale;

T_{fr} è la temperatura di "free – running";

T_{cu} è il limite superiore dell'intervallo di comfort.

Dall'espressione (31) si evince che il raffreddamento mediante tecniche di "ventilative cooling" naturali è possibile solo nel caso di $T_{fr} > T_o$.

Se la temperatura esterna, T_o , è maggiore del limite superiore della temperatura di comfort, T_{cu} , allora è necessario ricorrere a tecniche di "ventilative cooling" meccaniche.

La condizione per il raffreddamento meccanico è la seguente:

$$\delta_{mc} = \begin{cases} 1, & \text{se } T_{fr} > T_{cu} \text{ e } T_o \geq T_{cu} \\ 0, & \text{in caso contrario} \end{cases} \quad (33)$$

I gradi – ora disponibili per il raffreddamento meccanico possono essere calcolati ricorrendo alla seguente espressione:

$$dh_{mc} = (T_{fr} - T_{cu}) \cdot \delta_{mc} \quad (34)$$

Le condizioni descritte sono riportate in Figura 6, dove con T_{cl} e T_{cu} sono indicati, rispettivamente, il limite inferiore e quello superiore dell'intervallo di comfort.

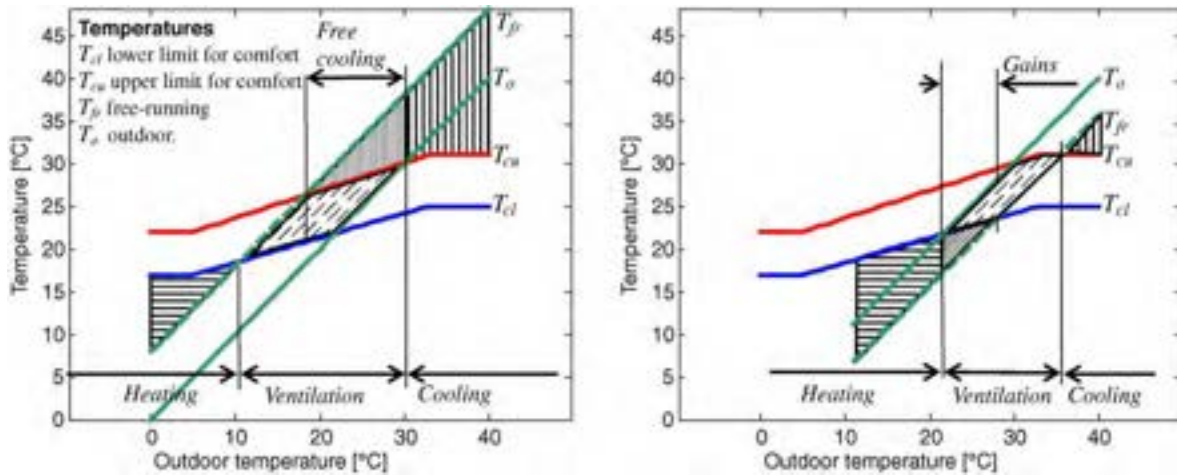


Figura 6: Intervalli per il riscaldamento, la ventilazione e il raffrescamento quando la temperatura di free-running è superiore e inferiore alla temperatura esterna [35].

Emmerich et al. [36] valutano l'idoneità del clima all'applicazione del "ventilative cooling" naturale considerando un modello di un edificio con una singola zona termica. La Figura 7 riporta la descrizione dell'edificio modellizzato.

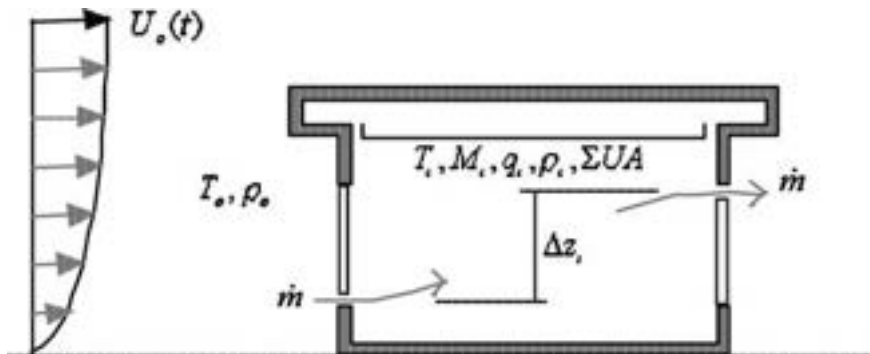


Figura 7: Modello dell'edificio [36]

Il metodo prevede, innanzitutto, la determinazione della temperatura esterna limite inferiore di applicabilità del "ventilative cooling", T_{o-hbp} . L'espressione per la determinazione della T_{o-hbp} è ottenuta a partire dall'equazione del bilancio termico dell'edificio scritta in condizioni stazionarie:

$$K(T_{i-hsp} - T_{o-hbp}) = q_i \tag{35}$$

$$K = \sum UA + \dot{m}c_p \tag{36}$$

dove:

T_{i-hsp} è la temperatura interna di set point di riscaldamento (°C);

T_{o-hbp} è la temperatura esterna limite inferiore di applicabilità del Ventilative Cooling (°C);

q_i sono i guadagni di calore interni e solari (W/m^2);

$\sum UA$ è la conduttanza termica dell'involucro dell'edificio (W/K);

\dot{m} è la portata massica dell'aria di ventilazione (kg/s);

c_p è il calore specifico (J/(kg K)).

Dall'espressione (35) è possibile calcolare la temperatura T_{o-hbp} :

$$T_{o-hbp} = T_{i-hsp} - \frac{q_i}{\dot{m}_{min}c_p + \sum UA} \quad (37)$$

Se la temperatura esterna è superiore a T_{o-hbp} è possibile ricorrere a tecniche di “*ventilative cooling*” naturali per bilanciare i guadagni termici e mantenere le condizioni di comfort. Se la temperatura esterna è minore o uguale alla T_{o-hbp} non vi è domanda di raffrescamento, anche se, è necessario mantenere la portata di ventilazione al livello minimo richiesto per il controllo della qualità dell'aria.

Definita la metodologia per la valutazione dell'idoneità climatica del “*ventilative cooling*” naturale, gli autori integrano il concetto del comfort termico adattivo.

La temperatura T_{o-hbp} , posta pari al limite inferiore di comfort T_i , stabilisce il limite inferiore delle temperature esterne, al di sotto del quale non vi è domanda di raffrescamento. La temperatura T_o , pari al limite superiore di comfort, stabilisce un limite superiore superato il quale non è più possibile ricorrere al “*ventilative cooling*”. La T_o è assunta pari alla temperatura interna di set point di raffrescamento, T_{i-csp} . Per valori superiori è necessario ricorrere a tecniche di “*ventilative cooling*” meccaniche per mantenere il comfort termico.

In dettaglio:

Se $T_{o-hbp} < T_o < T_{i-csp}$

$$\dot{m}_{cool} = \frac{q_i - \sum UA(T_i - T_o)}{c_p(T_i - T_o)} \quad (38)$$

Se $T_o < T_{o-hbp}$

$$\dot{m}_{cool} = 0 \quad (39)$$

Se $T_{o-hbp} \leq T_o \leq T_{o-hbp} + (T_{i-csp} - T_{i-hsp})$

$$\dot{m}_{cool} = \dot{m}_{min} \quad (40)$$

Se $T_{o-hbp} + (T_{i-csp} - T_{i-hsp}) < T_o < T_{i-csp}$

$$\dot{m}_{cool} = \frac{q_i - \sum UA(T_i - T_o)}{c_p(T_{i-csp} - T_o)} \quad (41)$$

Le equazioni (38), (39), (40), (41) possono essere utilizzate per determinare i periodi in cui è possibile ricorrere al “*ventilative cooling*” naturale e per stimare le portate di ventilazione necessarie al mantenimento del comfort termico durante questo periodo.

Quando la temperatura esterna diurna è superiore a T_{i-csp} il “*ventilative cooling*” non può essere applicato, in questo caso il raffrescamento dell'edificio può essere ottenuto sfruttando la ventilazione notturna se la temperatura, durante la notte raggiunge valori inferiori alla T_{i-csp} . Quando ciò è possibile, la potenza termica massima trasferibile dalla massa termica dell'edificio, q_{night} , è fornita dalla seguente espressione:

$$q_{night} = \dot{m}c_p(T_{i-csp} - T_o) + \sum UA(T_{i-csp} - T_o) \quad (42)$$

Artmann et al. [37] hanno sviluppato un metodo per la valutazione del potenziale climatico per il raffrescamento passivo degli edifici mediante la ventilazione notturna. Il metodo è stato sviluppato sulla base di dati climatici europei senza considerare i parametri specifici dell'edificio. Il potenziale di "ventilative cooling" in gradi - ora, definito *Climatic Cooling Potential - CCP*, per un periodo di N notti è stato stimato dalla sommatoria dei prodotti della differenza tra la temperatura dell'edificio, T_b , e la temperatura esterna, T_e e l'intervallo di tempo, $m_{n,h}$:

$$CCP = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sum_{h=h_i}^{h_f} m_{n,h} (T_{b,n,h} - T_{e,n,h}) \begin{cases} m = 1 h & \text{se } T_b - T_e \geq \Delta T_{crit} \\ m = 0 & \text{se } T_b - T_e < \Delta T_{crit} \end{cases} \quad (43)$$

Dove h rappresenta l'ora del giorno variabile da 0 a 24, h_i e h_f denotano i limiti temporali del "ventilative cooling" notturno e ΔT_{crit} (3 K) è il valore minimo per la differenza di temperatura. Per valori inferiori non è possibile ricorrere al "ventilative cooling" notturno.

4 Attività del DEIM nell'ambito dell'IEA Annex 62 – *Ventilative Cooling*

Nel contesto dell' Annex 62 (IEA EBC Annex 62 – *Ventilative Cooling*, 2014 – 2017) è in fase di sviluppo uno strumento che mira a valutare il potenziale del “*ventilative cooling*”. basandosi su dati climatici e tenendo conto anche delle proprietà termiche dell'involucro edilizio, dei carichi interni e della ventilazione necessaria . Nell'ambito di questa attività il DEIM ha partecipato alla fase di validazione e di testing del modello.

Lo strumento sviluppato si basa su un modello termico monozona che, applicato ai dati climatici in input su base oraria, stima il potenziale di “*ventilative cooling*”.

La valutazione dell'idoneità climatica al “*ventilative cooling*” è effettuata adottando un approccio simile a quello sviluppato da Emmerich et al. [36].

Il modello definisce la temperatura esterna limite inferiore di applicabilità del “*ventilative cooling*” T_{o-hbp} . Essa rappresenta un valore limite per la temperatura interna, infatti, per valori inferiori è necessario che l'edificio sia riscaldato per mantenere la temperatura dell'aria interna al valore di set point di riscaldamento T_{i-hsp} .

La domanda di raffrescamento è stabilita sulla base del confronto tra la T_{o-hbp} e la temperatura esterna di bulbo secco T_{o-db} . Per valori di T_{o-db} minori o uguali alla T_{o-hbp} non sarà presente alcuna domanda di raffrescamento. Per valori di T_{o-db} maggiori della T_{o-hbp} , è possibile ricorrere al “*ventilative cooling*” per mantenere le condizioni degli ambienti confinati all'interno della zona di comfort.

La temperatura T_{o-hbp} può essere calcolata scrivendo il bilancio energetico della singola zona termica dal quale si ottiene la seguente espressione:

$$T_{o-hbp} = T_{i-hsp} - \frac{q_i}{\dot{m}_{min}c_p + \sum UA} \quad (44)$$

dove:

T_{o-hbp} è temperatura esterna limite inferiore di applicabilità del Ventilative Cooling (°C);

T_{i-hsp} è la temperatura di riscaldamento di set point (°C);

q_i sono i guadagni totali termici interni (W/m²);

c_p è il calore specifico (J/(kg K));

\dot{m}_{min} è la portata massica d'aria minima richiesta (kg/s);

$\sum UA$ è lo scambio termico dell'involucro (W/K)

U è il valore medio di trasmittanza dell'involucro (W/(m² K)).

L'espressione (44) si basa sul presupposto che il termine di accumulo del bilancio energetico possa essere trascurato.

Tale assunzione è ammissibile nel caso in cui la massa termica della zona sia trascurabile.

In queste condizioni il bilancio energetico della zona si assume come stazionario e può fornire un mezzo sufficientemente dettagliato per caratterizzare il potenziale di “*ventilative cooling*” del clima.

La portata massica di aria minima di ventilazione richiesta si riferisce allo standard interno di qualità dell'aria stabilito dalla norma EN 15251: 2008 [38].

La zona di comfort viene determinata in base al modello di comfort termico adattivo proposto nella norma EN 15251: 2008 [38]. Il limite superiore e inferiore della temperatura della zona di comfort possono essere calcolati attraverso le seguenti espressioni:

$$T_{i-max} = 0,33 \cdot T_{rm} + 18,8 + K \quad (45)$$

$$T_{i-min} = 0,33 \cdot T_{rm} + 18,8 - K \quad (46)$$

dove:

T_{i-max} è il limite superiore della temperatura della zona comfort (°C);

T_{i-min} è il limite inferiore della temperatura della zona di comfort (°C);

T_{rm} è la temperatura media esterna (°C);

K è una costante dipendente dalla categoria di comfort richiesta, variabile da 2 a 4.

In dettaglio lo strumento, implementato in excel, utilizza una libreria pre-caricata di profili di carichi interni, utilizzo e occupazione selezionabili a piacimento in fase di utilizzo.

Ai fini del calcolo del modello semplificato di bilancio termico dell'edificio sono richiesti dati riguardanti la trasmittanza termica delle pareti opache e delle superfici vetrate, la densità di potenza dell'impianto di illuminazione e delle apparecchiature elettriche, la densità di occupazione e la portata minima di ventilazione richiesta.

I dati climatici richiesti in input sono la temperatura di bulbo secco e la radiazione solare globale orizzontale, con livello di dettaglio orario.

I requisiti di comfort fanno riferimento alle categorie di comfort definite dalla norma EN 15251:2008 [38].

L'applicazione dello strumento fornisce una serie di informazioni sul "*ventilative cooling*". Innanzitutto, una volta stabilito, per ogni mese, il periodo complessivo di occupazione dell'edificio esso consente di calcolare, in riferimento ad esso, le seguenti quantità:

- La percentuale delle ore dell'anno in cui non si ha necessità di "*ventilative cooling*";
- La percentuale delle ore dell'anno in cui è necessario ricorrere al "*ventilative cooling*" naturale con portate d'aria mantenute al valore minimo necessario per garantire la qualità dell'aria;
- La percentuale del tempo in cui è necessario ricorrere al "*ventilative cooling*" naturale ma con portate d'aria superiori rispetto a quelle minime;
- La percentuale del tempo in cui non è possibile ricorrere al "*ventilative cooling*" naturale poiché la temperatura dell'aria esterna è maggiore del limite superiore dell'intervallo delle temperature di comfort.

Inoltre lo strumento consente di determinare il potenziale di raffrescamento del "*ventilative cooling*" notturno, la portata di ventilazione richiesta per raffrescare l'edificio quando si ricorre al "*ventilative cooling*" naturale con portate d'aria superiori rispetto a quelle minime, i gradi ora di raffrescamento notturno, l'oscillazione della temperatura media mensile tra il giorno e la notte e la radiazione orizzontale globale media mensile.

5 Conclusioni

Nel contesto di una politica energetica europea mirata al raggiungimento di obiettivi ambiziosi nelle tematiche di riduzione dei consumi energetici e riduzione delle emissioni di gas ad effetto serra, il settore delle costruzioni occupa un ruolo chiave nel raggiungimento di tali obiettivi.

Negli ultimi anni sono stati definiti standard sempre più elevati sul consumo energetico degli edifici fino all'introduzione del concetto di "edificio a energia netta quasi zero", grazie alla Direttiva europea 2010/31/CE.

In questa tipologia di edifici l'aumento delle prestazioni energetiche, mirato alla riduzione dei consumi per il riscaldamento, si potrebbe tradurre in un aumento dei consumi energetici per il raffrescamento a causa del surriscaldamento degli edifici nel periodo estivo. In tale situazione il "*ventilative cooling*" è una delle strategie più promettenti in grado di ottimizzare i livelli raggiungibili di comfort termoigrometrico e allo stesso tempo di ridurre i consumi energetici per raffrescamento.

Il presente report ha analizzato lo stato dell'arte della modellizzazione del "*ventilative cooling*", in dettaglio, sono stati analizzati i modelli semplificati, i modelli di *Airflow Network* e i modelli di fluidodinamica computazionale.

Dall'analisi è emerso che i modelli semplificati sono prevalentemente usati nelle fasi preliminari della progettazione per la quantificazione, in prima approssimazione, dei fenomeni investigati. Si tratta di semplici espressioni algebriche che consentono di stimare le portate d'aria di ventilazione e quindi indirettamente i benefici ottenibili con il "*ventilative cooling*" grazie all'accoppiamento con modelli di simulazione termofisica o tramite modellizzazioni semplificate delle interazioni ambiente-edificio. Essi richiedono una limitata mole di dati in ingresso e tempi di calcolo brevi, a causa della loro semplicità possono essere adoperati esclusivamente nel range di applicazione per il quale sono stati formulati. I modelli di *AirFlow Network* sono dei modelli più dettagliati rispetto a quelli semplificati; infatti sono in grado di simulare l'intero edificio considerando le portate d'aria che interessano tutte le aperture presenti nell'involucro e i suoi percorsi interni. L'edificio è rappresentato attraverso una rete in cui i nodi rappresentano le diverse zone, le connessioni tra i nodi i percorsi delle portate d'aria e le resistenze rappresentano le finestre, le porte, le fessure, ecc. Tali modelli, pur basandosi sulla semplificazione della modellizzazione di *network* nodali di pressioni, raggiungono livelli di dettaglio maggiori rispetto ai modelli empirici ma richiedono una quantità maggiore di assunzioni e di dati in input. Sono spesso utilizzati in connessione a modelli di simulazione dinamica per valutare le prestazioni dell'edificio e l'impatto del "*ventilative cooling*" sulle dinamiche termofisiche approfondite in tali software.

I modelli di fluidodinamica computazionale risolvono numericamente un sistema costituito da equazioni differenziali alle derivate parziali di conservazione della massa, della quantità di moto e dell'energia. Essi forniscono la distribuzione spaziale dei campi di velocità, pressione e temperatura. Il numero di dati in input è elevato, la risoluzione richiede, infatti, la descrizione dettagliata delle caratteristiche geometriche e termofisiche dell'involucro.

Sono stati altresì analizzati gli indicatori di prestazione e applicabilità del "*ventilative cooling*" in funzione di alcuni parametri meteo – climatici. Questi indicatori sono usati nella fase iniziale della progettazione per valutare il potenziale di applicazione di determinate tecniche di "*ventilative cooling*" senza la necessità di eseguire analisi rigorose. Nell'analisi effettuata è emerso che questi approcci generalmente non modellizzano con sufficiente dettaglio l'edificio oggetto di analisi.

Dall'attività svolta è stato possibile individuare una serie di linee di ricerca che potrebbero essere approfondite.

L'analisi dei modelli semplificati e degli indicatori di prestazione ha evidenziato che essi si basano principalmente sulle caratteristiche meteo – climatiche esterne e su dati geometrici delle aperture, a riguardo sarebbe opportuno sviluppare degli strumenti più efficaci, in grado di considerare la massa

termica allo scopo di ottenere già nelle fasi di *early design* una valutazione più rigorosa delle prestazioni del “*ventilative cooling*”.

Riguardo alla modellizzazione AFN si è rilevata l'importanza dell'interconnessione con i software di simulazione energetica degli edifici come soluzione ai limiti intrinseci di tale approccio. Allo scopo di ottenere una previsione più accurata dei consumi energetici dell'edificio e delle condizioni indoor e quindi, una valutazione delle prestazioni del “*ventilative cooling*” in un'ottica di bilancio energetico dell'edificio, è auspicabile che siano sviluppati strumenti di modellizzazione che consentano un'interazione sempre più efficace tra i due approcci.

6 Riferimenti bibliografici

- [1] Communication from the Commission to the Council, the European Parliament, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, "A lead market initiative for Europe", December 2007;
- [2] 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 and Buildings*, 72, (2014), 371-381;
- [3] Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast), *Official Journal of the European Union*, L 153/2010;
- [4] Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012 on Energy Efficiency, amending Directives 2009/125/EC and 2010/30/EU and repealing Directives 2004/8/EC and 2006/32/EC;
- [5] F. Ascione, F. De Rossi, & G.P. Vanoli, Energy retrofit of historical buildings: Theoretical and experimental investigations for the modelling of reliable performance scenarios, *Energy and Buildings*, 43(8) (2011), 1925-1936;
- [6] Buildings Performance Institute Europe (BPIE), 2011. Europe's buildings under the microscope. A country – by – country review of the energy performance of buildings. ISBN: 9789491143014;
- [7] M. Beccali, M. Cellura, M. Fontana, S. Longo, M. Mistretta, Energy retrofit of a single-family house: Life cycle net energy saving and environmental benefits, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27: (2013), 283 – 293;
- [8] L. Lion, A. Belleri, R. Lollini, D. Zardi, L. Giovannini, Natural ventilation Strategy Potential Analysis in an existing school building. *Venticool*, 2013. Ventilative cooling: need, potential, challenges, strategies A selection of papers from the Proceedings of the 33rd AIVC- 2nd TightVent Conference, October 2012, Copenhagen;
- [9] Q. Chen, K. Lee, S. Mazumdar, S. Poussou, L. Wang, M. Wang, Z. Zhang, Ventilation performance prediction for buildings: Model assessment, *Building and Environment*, Volume 45, Issue 2 (2010), 295-303;
- [10] Q. Chen, Ventilation performance prediction for buildings: A method overview and recent applications, *Building and Environment*, Volume 44, Issue 4, (2009), 848-858;
- [11] UNI EN ISO 13792: 2005. Prestazione termica degli edifici - Calcolo della temperatura interna estiva di un locale in assenza di impianti di climatizzazione - Metodi semplificati;
- [12] UNI EN ISO 13791:2005. Prestazione termica degli edifici - Calcolo della temperatura interna estiva di un locale in assenza di impianti di climatizzazione - Criteri generali e procedure di validazione;
- [13] P.R. Warren, Ventilation through openings on one wall only, *Int. Conf. Heat and Mass Transfer in Buildings*, Dubrovnik, Yugoslavia. In: *Energy conservation in heating, cooling and ventilating buildings*, Vol 1. eds. C. J. Hoogendorn and N. H. Afgan, pp 189-209. Hemisphere, Washington DC, 1977;
- [14] ASHRAE, *ASHRAE Handbook Fundamentals*, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, 2009;
- [15] P.R. Warren, L.M. Parkins, Single-sided ventilation through open windows. In *conf. Proceedings, Thermal performance of the exterior envelopes of buildings*, Florida, ASHRAE SP 49, pp. 209-228, 1985;
- [16] T.S. Larsen, Ph.D. thesis. Aalborg University – Department of Civil Engineering, Group of Architectural Engineering. ISSN 1901 – 7294. Denmark, 2006;
- [17] W. de Gids, H. Phaff, Ventilation rates and energy consumption due to open windows, in: *A brief overview of research in the Netherlands*, vol. 1 (1982), *Proc. of the Third IEA Air Infiltration Center Conference*, pp. 4 – 5;
- [18] R.Z. Freire, M.O. Abadie, N. Mendes, On the improvement of natural ventilation models, *Energy and Buildings*, Volume 62 (2013), Pages 222 – 229;
- [19] British Standards, *Code of Practice for Design of Buildings: Ventilation Principles and Designing for Natural Ventilation*, 1st ed., British Standards Institution (BS5925), 1999;

- [20] K.T. Andersen, Theoretical considerations on natural ventilation by thermal buoyancy. ASHRAE Transactions, 1995; 101 (2):1103 – 1117;
- [21] P.F. Linden, G.F. Lane-Ser, D.A. Smeed, Emptying filling boxes: the fluid mechanics of natural ventilation. J Fluid Mech 1990; 212: 309 – 35;
- [22] Y. Li, Buoyancy-driven natural ventilation in a thermally stratified one-zone building, Building and Environment, Volume 35, Issue 3 (2000), 207-214;
- [23] A. Mahdavi, C. Pröglhöf, A model-based approach to natural ventilation, Building and Environment, Volume 43, Issue 4, (2008), 620-627;
- [24] P. Warren, "Multizone Airflow Modelling (COMIS)," Summary of IEA Annex 23, 1996;
- [25] G.N Walton, W.S. Dols, "CONTAM - User guide and program documentation," NISTIR 7251, NIST-National Institute of Standard and Technology, 2010;
- [26] H.E. Feustel, Beitrag zur theoretischen Beschreibung der Druck- und Luftmassenstromverteilung in natürlich und maschinell gelüfteten Gebäuden, Fortschritt-Berichte der VDI Zeitschriften, Reihe 6, Nr. 151, VDI Verlag, Düsseldorf, 1984.
- [27] H.E. Feustel, COMIS—an international multizone air-flow and contaminant transport model, Energy and Buildings, Volume 30, Issue 1 (1999), 3-18;
- [28] J. Huang, F.C. Winkelmann, F.F. Buhl, C.O. Pedersen, D.E. Fisher, R.J. Liesen, R.D. Taylor, R.K. Strand, B. Drury, D.B. Crawley, and L.K. Lawrie, Linking the COMIS multi-zone airflow model with the EnergyPlus building energy simulation program. In Proc. of the 6-th IBPSA Conference, volume II, pages 1065–1070, Kyoto, Japan, September 1999.
- [29] ANSYS, ANSYS Fluent Theory Guide. November 2013;
- [30] F.P. Incropera, D.P. DeWitt, A.S. Bergman, A.S. Lavine, 2006. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. John Wiley & Sons; 6th edition (March 10, 2006);
- [31] ANSYS, "ANSYS Fluent Flow Modeling Simulation Software," 2013. [Online]. Available: <http://www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Fluid+Dynamics/Fluid+Dynamics+Products/ANSYS+Fluent>.
- [32] K.S. Nikas, N. Nikolopoulos, A. Nikolopoulos, Numerical study of a naturally cross-ventilated building, Energy and Buildings, Volume 42, Issue 4, (2010), 422-434
- [33] La turbolenza e la previsione numerica delle correnti turbolente. [<http://www.aero.polimi.it/~belan/bacheca/FluidoAeroII/dispense/07A-TURBOL-01.pdf>];
- [34] R. Aynsley, Estimating summer wind driven natural ventilation potential for indoor thermal comfort, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Volume 83, Issues 1–3, November 1999, Pages 515-525;
- [35] C. Ghiaus, F. Allard, Potential for free-cooling by ventilation, Solar Energy, Volume 80, Issue 4, April 2006, Pages 402-413;
- [36] S.J. Emmerich, B. Polidoro, J.W. Axley, Impact of adaptive thermal comfort on climatic suitability of natural ventilation in office buildings, Energy and Buildings, Volume 43, Issue 9, September 2011, Pages 2101-2107;
- [37] N. Artmann, H. Manz, P. Heiselberg, Climatic potential for passive cooling of buildings by night-time ventilation in Europe, Applied Energy, Volume 84, Issue 2, February 2007, Pages 187-201;
- [38] UNI EN 15251:2008. Criteri per la progettazione dell'ambiente interno e per la valutazione della prestazione energetica degli edifici, in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica.

Curriculum scientifico del gruppo di lavoro impegnato nell'attività

Il gruppo di ricerca del Dipartimento di Energia, Ingegneria dell'Informazione e Modelli Matematici (DEIM) dell'Università di Palermo si occupa di simulazioni termofisiche in regime dinamico di edifici ad energia netta zero, di impianti basati su fonti energetiche rinnovabili e di Life cycle assessment (LCA).

In particolare, il gruppo di ricerca del DEIM è attivo nei gruppi di ricerca internazionali dell'IEA EBC Annex 57 "Evaluation of Embodied Energy and CO_{2eq} for Building Construction" e IEA EBC Annex 62 "Ventilative Cooling".