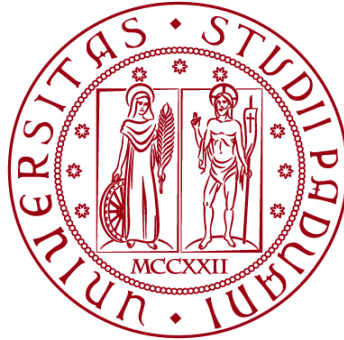


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE
Department Of Civil, Environmental and Architectural Engineering

Corso di Laurea in Ingegneria Edile - Architettura



TESI DI LAUREA

**OTTIMIZZAZIONE DELL'IMPATTO AMBIENTALE DI UN
EDIFICIO OSPEDALIERO TRAMITE INTEGRAZIONE DELLE
METODOLOGIE LCA E OPENBIM-IFC**

Relatore: prof. Carlo Zanchetta

**Laureando:
Russo Pauline
1151679**

ANNO ACCADEMICO 2021-2022

SOMMARIO

ABSTRACT	3
INTRODUZIONE	3
CAPITOLO PRIMO LIFE CYCLE ASSESSMENT	9
1 INTRODUZIONE ALLA METODOLOGIA LCA	10
1.1 <i>Storia della LCA dalle origini al giorno d'oggi</i>	10
1.2 <i>Normativa vigente</i>	12
2 STRUTTURA DELLA LIFE CYCLE ASSESSMENT	13
2.1 <i>Goal and Scope definition</i>	14
2.2 <i>Life Cycle Inventory Analysis</i>	16
2.3 <i>Life Cycle Impact Assessment</i>	18
2.4 <i>Interpretazione, report e revisione critica</i>	20
3 LCA NEL SETTORE AEC	21
CAPITOLO SECONDO OTTIMIZZAZIONE DELL'IMPATTO AMBIENTALE IN BASE AI PRINCIPI LCA	27
1 INTEGRAZIONE TRA BIM E LCA: STATO DELL'ARTE	27
2 EMBODIED VS OPERATIONAL CARBON	36
2.1 <i>Materiali maggiormente impattanti</i>	40
2.2 <i>Distribuzione dell'impatto ambientale fra gli elementi di un edificio</i>	46
2.3 <i>Influenza di involucro e impianto nelle emissioni della fase operativa</i>	65
3 OTTIMIZZAZIONE	78
3.1 <i>I principi dell'ottimizzazione e la frontiera di Pareto</i>	79
3.2 <i>Fase preliminare - ottimizzazione funzionale-spaziale</i>	92
3.3 <i>Fase definitiva - ottimizzazione dell'involucro</i>	96
3.4 <i>Fase esecutiva - ottimizzazione dell'impianto</i>	109
CAPITOLO TERZO SPERIMENTAZIONE: OTTIMIZZAZIONE DEI REPARTI DI DEGENZA OSPEDALIERA	115
1 LA DEGENZA OSPEDALIERA	115
2 PREMESSE ALLA MODELLAZIONE	121
3 MODELLAZIONE DEI PROTOTIPI	125
4 ANALISI ENERGETICA	126
CAPITOLO QUARTO ANALISI CRITICA DEI RISULTATI	139
1 ANALISI DEI RISULTATI	139
CAPITOLO QUINTO CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI	143
APPENDICI	145
1 APPENDICE 1 – PIANTE DEI PROTOTIPI ANALIZZATI	145
BIBLIOGRAFIA	149

INDICE DELLE TABELLE	157
INDICE ICONOGRAFICO.....	161

ABSTRACT

Il settore AEC – *Architecture, Engineering and Construction* – è ritenuto uno dei maggiori responsabili del consumo di risorse ed emissioni di gas serra che negli ultimi anni stanno peggiorando l'emergenza climatica attualmente in atto: si ritiene, infatti, che esso sia la causa del 35% del consumo energetico e del 38% di emissioni di CO₂ a livello globale. Per far fronte a questa problematica, è in atto il tentativo di realizzare edifici sostenibili e che siano energeticamente performanti. In tale contesto, un valido apporto può essere dato dalla metodologia LCA. La *Life Cycle Assessment* è infatti uno strumento in grado di quantificare gli impatti ambientali degli edifici durante tutto il loro ciclo di vita: dall'estrazione delle materie prime per la produzione delle componenti, alla demolizione e smaltimento dei rifiuti, considerando anche le fasi di costruzione ed utilizzo del manufatto. Se implementata negli stadi iniziali della progettazione, essa permette l'individuazione delle fasi più impattanti del ciclo di vita; nonostante ciò, a causa delle difficoltà legate al reperimento dei dati e alla computazione, spesso questa viene svolta a posteriori.

Lo scopo della presente tesi di laurea è innanzitutto quello di indagare, tramite un'intensa analisi di letteratura, quali aspetti del ciclo di vita di un edificio hanno maggiore peso sull'impatto ambientale totale, con particolare riferimento alla *embodied carbon*, ovvero il carbonio incorporato derivante dai materiali utilizzati, e la *operational carbon*, cioè le emissioni prodotte durante la fase operativa. Successivamente, si cercherà di capire come è possibile svolgere un'ottimizzazione di tali impatti e consumi durante le tre fasi progettuali dell'edificio – preliminare, definitiva ed esecutiva – grazie all'integrazione della metodologia LCA con quella open-BIM e con alcuni algoritmi di ottimizzazione.

Verrà infine svolto un focus sull'ambito ospedaliero, e in particolare sulle zone di degenza, per capire come variano i consumi medi annui a seconda delle scelte fatte in fase preliminare e riguardanti l'aspetto formale-geometrico e tecnologico. Nella fase sperimentale verranno infatti confrontati quattro prototipi di degenza ospedaliera con diverse configurazioni, ciascuno di questi collocato in due città italiane – Bergamo e Palermo – per un totale di otto modelli, elaborati tramite il software BIM Revit. Di tali prototipi verrà svolta un'analisi energetica tramite la piattaforma online di Insight 360, permettendo di dimostrare come già questi accorgimenti preliminari sulla sola degenza possono portare ad un margine di riduzione dei consumi di circa il 3% sul totale

dell'edificio ospedaliero.

Dei possibili sviluppi futuri legati all'ambito della presente tesi sono lo studio di come l'ottimizzazione possa essere svolta anche nelle fasi successive, nonché come considerare il comfort umano nelle scelte progettuali, essendo quest'ultimo un fattore imprescindibile nell'edilizia ospedaliera.

INTRODUZIONE

Il fenomeno del cambiamento climatico è stato oggetto di grande attenzione negli ultimi anni, a causa della sua rapida evoluzione; infatti, secondo i dati raccolti dall'*Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2014), il periodo compreso tra il 1983 e il 2012 è considerato il più caldo degli ultimi 1400 anni. Indagini più recenti indicano come la temperatura media globale registrata nel 2020 sia stata di $1,2 \pm 0,1$ °C superiore rispetto a quella presente in epoca pre-industriale (World Meteorological Organisation, 2021). Ciò colloca il 2020 nella lista dei tre anni più caldi mai registrati, e l'aumento della temperatura media degli ultimi decenni è stato esponenziale. Come si può vedere dal grafico in fig. 0.1, infatti, l'aumento di temperatura rilevato negli anni '50 dello scorso secolo è di circa 0,1 °C, meno di un decimo rispetto ad oggi.

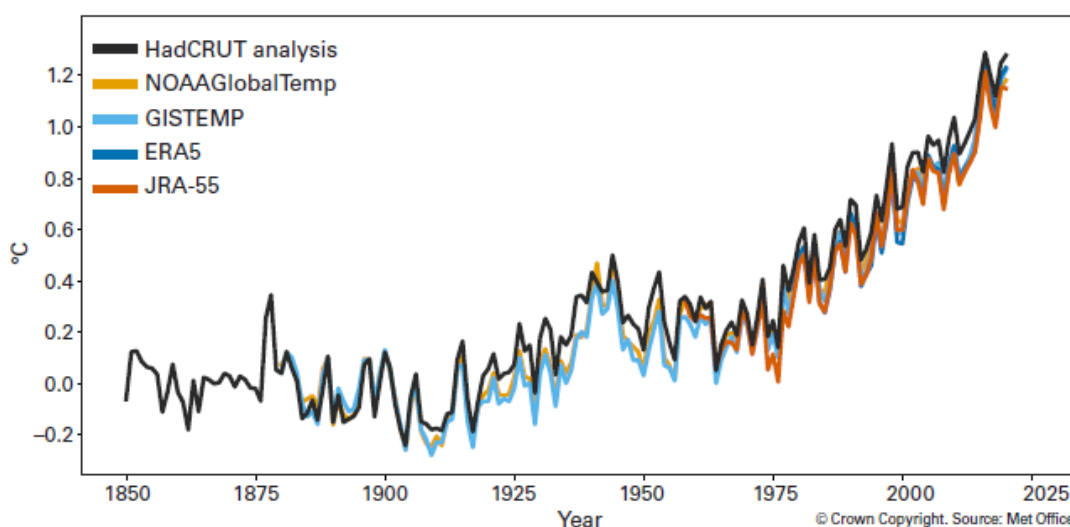


fig. 0.1 – Differenza di temperatura media globale rispetto alle condizioni preindustriali. Include cinque differenti set di dati. Fonte: WMO, 2021

Questo drastico aumento è dovuto soprattutto alla crescita di emissione di gas serra, in inglese *Green House Gasses* (GHG), dovuta all'attività umana: la concentrazione di anidride carbonica, metano e ossido di diazoto è infatti la più alta degli ultimi 800.000 anni. (IPCC, 2014). In particolare, nel 2019 la *World Meteorological Organisation* (WMO) ha registrato una concentrazione molare di anidride carbonica (CO₂) di $410,5 \pm 0,2$ parts per million (ppm), di metano (CH₄) di 1877 ± 2 parts per billion (ppb) e di ossido di diazoto (N₂O) di $332,0 \pm 0,1$ ppb. Tali valori corrispondono rispettivamente al 148%, 260% e 123% del livello preindustriale.

Altri fenomeni dovuti all'alta concentrazione di gas serra nell'ambiente e all'aumento della temperatura media globale sono:

- Il rapido scioglimento delle calotte artiche ed antartiche. Infatti, la minima estensione del ghiaccio marino artico registrata nel settembre 2020 è anche la seconda minima mai registrata. Per quanto riguarda invece l'Antartide, si stima una perdita annuale di ghiaccio di circa 175-225 Gt (WMO, 2021). Una conseguenza di tale scioglimento è l'innalzamento del livello degli oceani.
- L'acidificazione delle acque marine, che assorbono il 23% delle emissioni antropogeniche annuali di CO₂. Questo fenomeno diminuisce la capacità dell'oceano di moderare i cambiamenti climatici, rendendo più frequenti fenomeni atmosferici di grande entità come ad esempio gli uragani.
- Peggioramento delle condizioni del buco nell'ozono. La riduzione ciclica dello strato di ozono stratosferico registrata nel 2020 è stata la più duratura e profonda mai registrata (WMO, 2021).

Le emissioni di *Green House Gasses*, ed in particolare di anidride carbonica, sono dovute principalmente all'attività economica, al consumo di energia, allo sfruttamento del suolo e alle politiche ambientali. Basandosi su questi fattori, gli studiosi del *Working Group III* dell'IPCC sono riusciti ad individuare per il ventunesimo secolo quattro *Representative Concentration Pathways* (RCPs), ovvero previsioni sull'andamento delle emissioni a seconda delle scelte che verranno operate. Di queste previsioni, rappresentate graficamente in fig. 0.2, una è da considerarsi ottimistica (RCP2.6), due intermedie (RCP4.5 e RCP6.0) e una critica (RCP8.5) (IPCC, 2014).

I rapidi cambiamenti qui descritti hanno attirato le attenzioni di governi ed istituzioni internazionali, ed in particolare il 2015 è stato un anno decisivo per le iniziative atte ad affrontare e limitare il cambiamento climatico. Tra queste, si segnalano *The Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030*, adottato alla terza *United Nations World Conference on Disaster Risk Reduction, The 2030 Agenda for Sustainable Development*, stilata dalle Nazioni Unite, e soprattutto il *Paris Agreement* raggiunto alla ventunesima *Conference of the Parties* (COP21) del *United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC) (GlobalABC/IEA/UNEP, 2020).

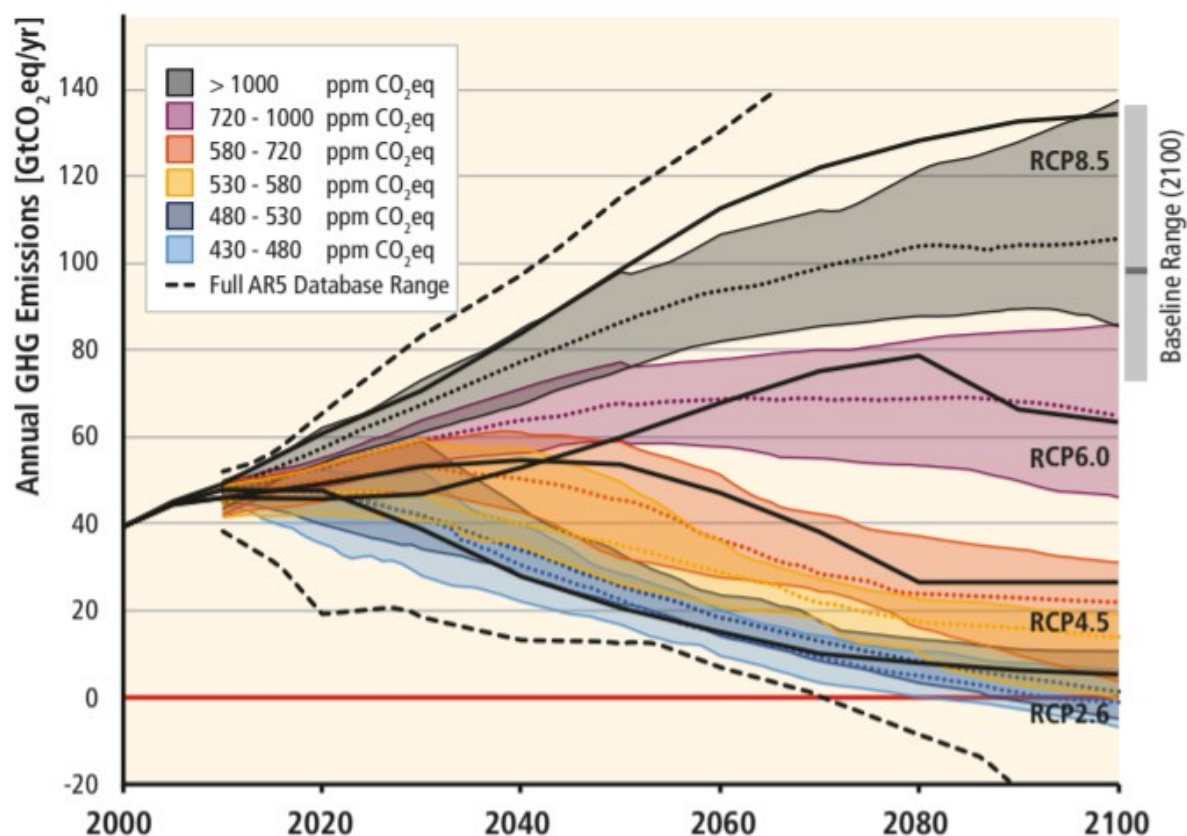


fig. 0.2 – Sviluppo previsto delle emissioni di GHG dagli anni 2000 al 2100. Il range considera tra il 10% e il 90% dei possibili scenari. Fonte: IPCC, 2014

Il *Paris Agreement* segna un punto fondamentale nel processo di contenimento dell'impatto umano sull'ambiente, poiché è il primo accordo che riunisce 196 Paesi che si impegnano ad attuare azioni concrete volte a combattere il cambiamento climatico, realizzando trasformazioni economiche e sociali organizzate in piani quinquennali. L'obiettivo principale dell'accordo prevede il mantenimento dell'aumento di temperatura globale a valori inferiori ai 2 °C, e preferibilmente sotto i 1,5 °C, per la fine del ventunesimo secolo.

Come sottolinea l'*Emissions Gap Report* rilasciato dall'*United Nations Environment Programme* (UNEP, 2020), al momento i *Nationally Determined Contributions* (NDCs), ovvero gli obiettivi climatici che le nazioni si sono autoimposte, non riuscirebbero a rispettare quanto enunciato nell'accordo di Parigi; le emissioni previste per il 2030 lascerebbero infatti presagire un aumento di temperatura di ben 3,2 °C per la fine del secolo.

Una possibilità per invertire la rotta è rappresentata dalle misure che verranno adottate dai vari Paesi per il recupero post-pandemico: un *green pandemic recovery* potrebbe ridurre le emissioni del 2030 a 44 GtCO₂eq, ovvero il 25% in meno rispetto a

quanto ci si aspetterebbe dalle politiche pre-COVID. Vi è un incoraggiante numero di Paesi che si sono impegnati nel raggiungere le *net-zero emissions*, ovvero 126 nazioni che coprono il 51% delle emissioni di GHG. È tuttavia necessario che l'impegno sia presto tradotto in politiche a breve e lungo termine, poiché al momento gli sforzi vanno triplicati per raggiungere l'obiettivo dei 2°C e quintuplicati per rimanere sotto i 1,5 °C suggeriti dall'accordo di Parigi.

In questo contesto, grande attenzione va posta nei confronti del settore architettonico, ingegneristico e edilizio (*Architecture, Engineering and Construction*, abbreviato in AEC). Tale settore ha un notevole impatto a livello ambientale: nel 2018 è stato responsabile del 36% di consumo di energia a livello globale e del 39% di emissioni di CO₂, raggiungendo il massimo storico di 9,7 Gt di anidride carbonica emessa. Nel 2019, il settore edilizio è stato responsabile del 35% del consumo di energia globale e del 38% delle emissioni di CO₂ relative al consumo energetico; questi valori si mantengono stabili rispetto a quelli registrati nel 2018, poiché la diminuzione dell'1% di emissioni viene in realtà compensata con l'aumento nei trasporti ed industrie correlati all'attività edilizia (fig. 0.3). Attualmente, le normative che regolano l'impatto ambientale del settore delle costruzioni coprono solo il 40% dell'energia utilizzata e meno del 50% di CO₂ emessa (GlobalABC/IEA/UNEP, 2020). L'impatto ambientale legato alle emissioni di un edificio nel corso del suo ciclo di vita, definito *carbon footprint*, si compone di due fattori: l'*embodied carbon*, che rappresenta la CO₂ derivante dal processo di manifattura dei materiali e dalla costruzione, e l'*operational carbon*, ovvero le emissioni dovute al consumo di energia. Le emissioni derivate dalla produzione ed impiego dei materiali da costruzione sono causate per lo più da cemento e acciaio, e la crescita nel loro utilizzo ha segnato un aumento nelle *embodied carbon emissions*. Globalmente, il settore AEC è responsabile del 50% di domanda di

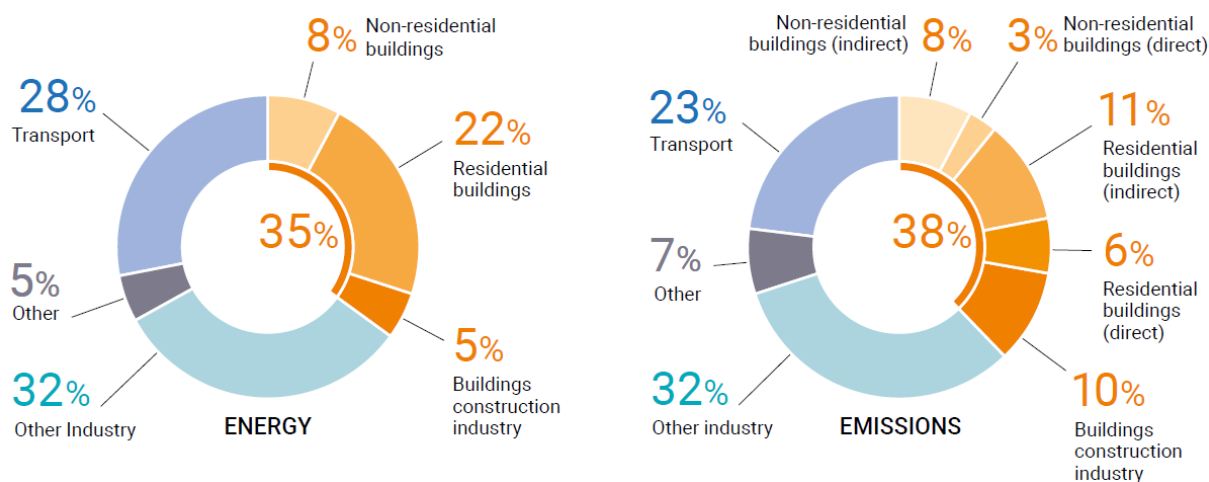


fig. 0.3 - Consumi ed emissioni dovuti al settore AEC nel 2019. Fonte: UNEP, 2020

cemento e 30% di acciaio (United Nations Environment Programme, 2020).

È possibile notare come nei Paesi in via di sviluppo la crescita del consumo di energia sia dovuto ad un sostanziale aumento della popolazione, oltre che ad un miglioramento generale delle condizioni di vita; contrariamente a quanto avviene in US ed EU, dove l'urbanizzazione tende ad essere stagnante, nelle nazioni cosiddette "BRIC" – ovvero Brasile, Russia, India e Cina - per ridurre i consumi è necessario concentrarsi sulle opere di nuova costruzione. Le previsioni dimostrano un aumento generale di consumo di energia nel settore di circa il 2,2% all'anno, e in particolare per la Cina, per cui nel 2050 sarà ben 15 volte tanto il consumo del 1970 (Berardi, 2015).

Per poter far fronte all'emergenza ambientale è richiesto un intervento sia sul piano normativo che operativo. In particolare, lo studio del ciclo di vita di un edificio può risultare un utile strumento per individuare le fasi più impattanti e tentare di ridurre tale contributo.

Capitolo Primo

LIFE CYCLE ASSESSMENT

La Life Cycle Assessment (LCA) viene definita in normativa come *compilazione e valutazione di input, output e potenziali impatti ambientali del sistema di un prodotto durante il suo ciclo di vita*¹ (British Standard Institution, 2020).

Nello studio della LCA vi sono quattro fasi (fig. 1.1):

1. “the goal and scope definition phase”, ovvero la definizione di obiettivi e scopi.
2. “the inventory analysis phase” (LCI), cioè la redazione di un inventario di input e output riguardo al sistema studiato.
3. “the impact assessment phase” (LCIA). Lo scopo di tale fase è di provvedere informazioni aggiuntive in modo da poter meglio valutare l’impatto ambientale dei risultati prodotti dalla LCI.
4. “the interpretation phase”, in cui vengono riassunti e discussi i risultati ottenuti nelle fasi precedenti, nonché utilizzati come base per conclusioni, raccomandazioni e decisioni, in accordo con quanto

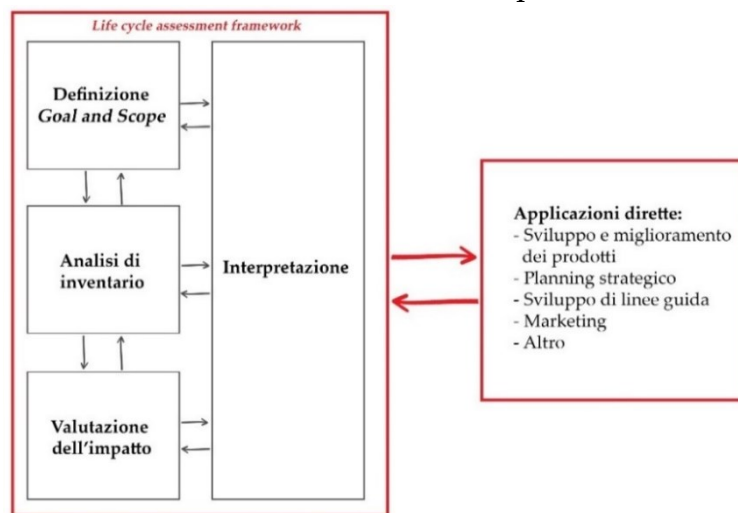


fig. 1.1 - Fasi della LCA e relazione che intercorre tra di esse. Fonte: BS EN ISO 14040:2006+A1:2020, schema dell'autrice

¹ « *Compilation and evaluation of the inputs, outputs and the potential environmental impacts of a product system throughout its life cycle* »

BS EN ISO 14040:2006+A1:2020, traduzione dell'autrice

1 INTRODUZIONE ALLA METODOLOGIA LCA

Viene di seguito esposta l'evoluzione della metodologia LCA, dalle sue prime applicazioni fino agli studi attuali, trattando anche le normative che la regolano.

1.1 Storia della LCA dalle origini al giorno d'oggi

Nonostante la scarsità di documentazioni a riguardo, Baumann e Tillman nella loro *Hitch Hiker's Guide to LCA* (Baumann & Tillman, 2004) ritengono che la prima *life cycle analysis* della storia sia stata svolta nel 1969 dal Midwest Research Institute negli Stati Uniti per conto della Coca-Cola. Inoltre, si ritiene che le prime LCA degli anni '70 siano state favorite dalla crisi di petrolio ed energia di quel periodo. Tra il 1969 ed il 1972 vennero svolti i primi studi riguardanti gli incarti usa e getta di vari prodotti e il loro smaltimento, soprattutto per questioni di mercato. Nonostante non vi fosse particolare interesse pubblico riguardo alle LCA, le aziende private cominciarono a svolgerle internamente per ottimizzare la produzione. I legislatori iniziarono ad interessarsi alle LCA sia in Germania che USA, e ne commissionarono alcune tra il 1972 e '74.

La metodologia era simile a quella utilizzata oggi, anche se i termini erano differenti e l'assenza di computer rendeva il processo molto più lento e faticoso. Il periodo compreso tra il 1970 e il 1990 può essere visto come una fase di sviluppo dello studio LCA, poiché le varie analisi erano svolte usando metodi differenti e senza un framework teorico comune: vi era, infatti, la mancanza di discussioni scientifiche internazionali a riguardo e soprattutto di piattaforme di scambio di informazioni (Guinée, 2011).

Gli anni '90 sono considerati un periodo di armonizzazione per la metodologia LCA; la *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* (SETAC) iniziò infatti ad organizzare conferenze annuali a tema *life cycle analysis* e definì, inoltre, dei gruppi di lavoro che affinassero alcuni aspetti dell'approccio. Ciò contribuì a trasformarlo in un campo di studi accademico. In alcuni paesi, le autorità iniziarono a richiedere che le industrie attuassero strategie ambientali che fossero *product-oriented*; in tale contesto le LCA si dimostrarono utili anche per le aziende stesse. L'incremento di pubblicazioni su casi studio reali aumentò la quantità di dati disponibili a livello internazionale. In questi anni l'ambito di applicazione delle LCA si diversificò ulteriormente, estendendosi alla produzione di cibo, prodotti da costruzione, prodotti chimici, automobili ecc. Con la diffusione del metodo LCA si è diffuso anche il principio del *life cycle thinking*, ovvero lo studio di differenti attività "dalla culla alla tomba";

similmente, la pratica manageriale che ingloba questo principio viene definita *life cycle management*. Il *life cycle thinking* è spesso incorporato anche nel processo legislativo. Nel 1992 la *Society for the Promotion of Life Cycle Development* (SPOLD) fu formata con l'obiettivo di migliorare la disponibilità pubblica di informazioni relative alla *life cycle inventory*: nacque quindi la necessità di avere un formato di database che fosse il più uniforme possibile. Il primo *database format* venne chiamato SPINE, e anche uno SPOLD format fu creato; i due format sono stati trasformati poi in una serie ISO (ISO/TS14048). Dopo vari workshop internazionali tra il 1990 e 1993, la prima linea guida per la LCA fu pubblicata da SETAC nella *Code of Practice*: tale guida, in forma di norma, stabiliva le quattro fasi obbligatorie della LCA. Dal 1993 inoltre iniziò la standardizzazione della metodologia (Baumann & Tillman, 2004).

Nella prima decade del ventunesimo secolo l'attenzione sulla metodologia LCA ha continuato a crescere: nel 2002 l'UNEP e la SETAC hanno creato a riguardo una partnership internazionale chiamata *Life Cycle Initiative*, il cui scopo era quello di mettere in pratica il *life cycle thinking* e migliorare i tool di supporto disponibili tramite migliori database e indicatori. Nel 2005 a livello europeo venne creata la *European Platform on Life Cycle Assessment* (*European Commission Service Site*, s.d.), sempre al fine di promuovere la disponibilità, lo scambio e l'utilizzo di dati, metodi e studi *life cycle* la cui affidabilità fosse certificata. Analogamente, negli Stati Uniti la *U.S. Environmental Protection Agency* promosse una politica ambientale basata sull'uso della LCA (Guinée, 2011).

Nel periodo 2000-2010, nonostante la presenza delle standardizzazioni ISO, che comunque non si propongono di regolare nel dettaglio le LCA, si assistette di nuovo alla formulazione di metodologie differenti per quanto riguarda i confini del sistema e i metodi di allocazione, come ad esempio il *life cycle costing* (LCC) o il *social life cycle assessment* (SLCA).

Negli ultimi anni l'interesse riguardo agli studi LCA è cresciuto di pari passo con la riflessione sui cambiamenti climatici che caratterizzano il presente. Attualmente sono presenti database internazionali e nazionali piuttosto ricchi e software capaci di svolgere intere LCA più o meno dettagliate. Gli strumenti che concernono l'ambito edilizio verranno presentati nel paragrafo "LCA nel settore AEC". Secondo Baumann e Tillman (Baumann & Tillman, 2004), tra le LCA più comuni se ne possono distinguere tre tipi:

1. *Stand-alone LCA*, per descrivere un singolo prodotto ed individuare eventuali falle nella sua produzione;

2. *LCA studies of the accounting type*, di tipo comparativo e retrospettivo;
3. *LCA studies of the change-oriented type*, comparative e prospettive, utili per lo sviluppo del prodotto.

Le LCA non sono l'unico mezzo per lo studio dell'impatto ambientale; si segnalano anche MIPS, *Material flow accounting*, *Ecological footprint* ed *ecological risk assessment*.

1.2 Normativa vigente

Attualmente, a livello internazionale, la metodologia LCA è regolamentata dalle norme ISO della serie 14040's. Nello specifico, esse trattano:

- ISO 14040 – i principi ed il *framework* della metodologia;
- ISO 14041 – focus sulle prime due fasi della metodologia, ovvero la definizione del *goal and scope* e l'inventario;
- ISO 14042 – si concentra sulla fase *life cycle impact assessment*;
- ISO 14043 – dà dettagli sull'ultima fase di interpretazione del ciclo di vita;
- ISO 14044 – requisiti e linee guida per lo svolgimento della LCA.

Ai fini della pratica risultano quindi particolarmente utili la ISO 14040 e 14044.

Come verrà approfondito nel paragrafo "Life Cycle Inventory Analysis", spesso nello svolgimento di una LCA si attingono i dati riguardanti i materiali dalle dichiarazioni ambientali di III tipo denominate "EPDs" (Environmental Product Declarations), regolate da delle product category rules (PCR). Le norme ISO 15804 e 14025 si propongono di standardizzare le regole di categoria di prodotto e i principi delle EPDs (EN ISO 14025, 2006; EN ISO 15804, 2020).

2 STRUTTURA DELLA LIFE CYCLE ASSESSMENT

Una LCA si occupa di tutto il ciclo di vita di uno specifico prodotto, dall'estrazione del materiale grezzo, produzione di energia e manifattura, fino all'uso e lo smaltimento. Ciò permette di individuare e ridimensionare un eventuale passaggio particolarmente "caro" in termini ambientali. LCA è un approccio relativo strutturato attorno ad un'unità funzionale, che definisce ciò che viene studiato. Le analisi e tutti gli input e output sono correlati a tale unità. L'approccio per lo studio LCA è inoltre iterativo: ogni fase utilizza i risultati di quella precedente, e vengono sempre svolti dei report. Altre caratteristiche fondamentali di una LCA, come indica la normativa (British Standard Institution, 2020) sono la trasparenza, la comprensibilità e la natura scientifica del metodo.

Il ciclo di vita di un prodotto è modellato in una LCA tramite il suo sistema di prodotto (*product system*), che svolge una o più funzioni. Il sistema è suddiviso in una serie di processi unitari, collegati uno all'altro tramite flussi di prodotti intermedi e/o trattamento dei rifiuti, ad altri sistemi di prodotto tramite flussi di prodotti e all'ambiente tramite flussi elementari - uso di risorse ed emissioni in aria, acqua e suolo. Il livello di dettaglio richiesto dal modello determina i confini di un processo unitario. In fig. 1.2 viene illustrato schematicamente il *system environment* di un generico prodotto.

Come già accennato nell'introduzione del Capitolo Primo, lo svolgimento di una *life cycle analysis* si compone di quattro fasi: la definizione dello scopo ed obiettivo dello studio, la redazione di un inventario da cui attingere input e output, la descrizione delle conseguenze ambientali dovuti a tali fattori e l'interpretazione dei risultati, in accordo con quanto viene indicato in normativa (British Standard Institution, 2020). Secondo il manuale di Klöpffer e Grahl (Klöpffer & Grahl, 2014), quando uno studio esclude la fase LCIA, non viene più chiamato LCA, ma prende il nome di analisi LCI. Allo stesso modo, vengono chiamati "*carbon footprint (CF) studies*" gli studi che tengono conto di una sola categoria impattante, ovvero il cambiamento climatico, quantificato tramite il *global warming potential (GWP)*. Una LCA che ha lo scopo di essere "comparativa" deve essere dotata di una revisione critica (*critical review*), che può essere sia interattiva, ovvero inizia solitamente dopo la fase *goal and scope definition* e continua per tutta la durata del LCA, oppure a posteriori, basata quindi sui risultati finali.

Nei seguenti paragrafi vengono spiegati in maniera più dettagliata i suddetti passaggi.

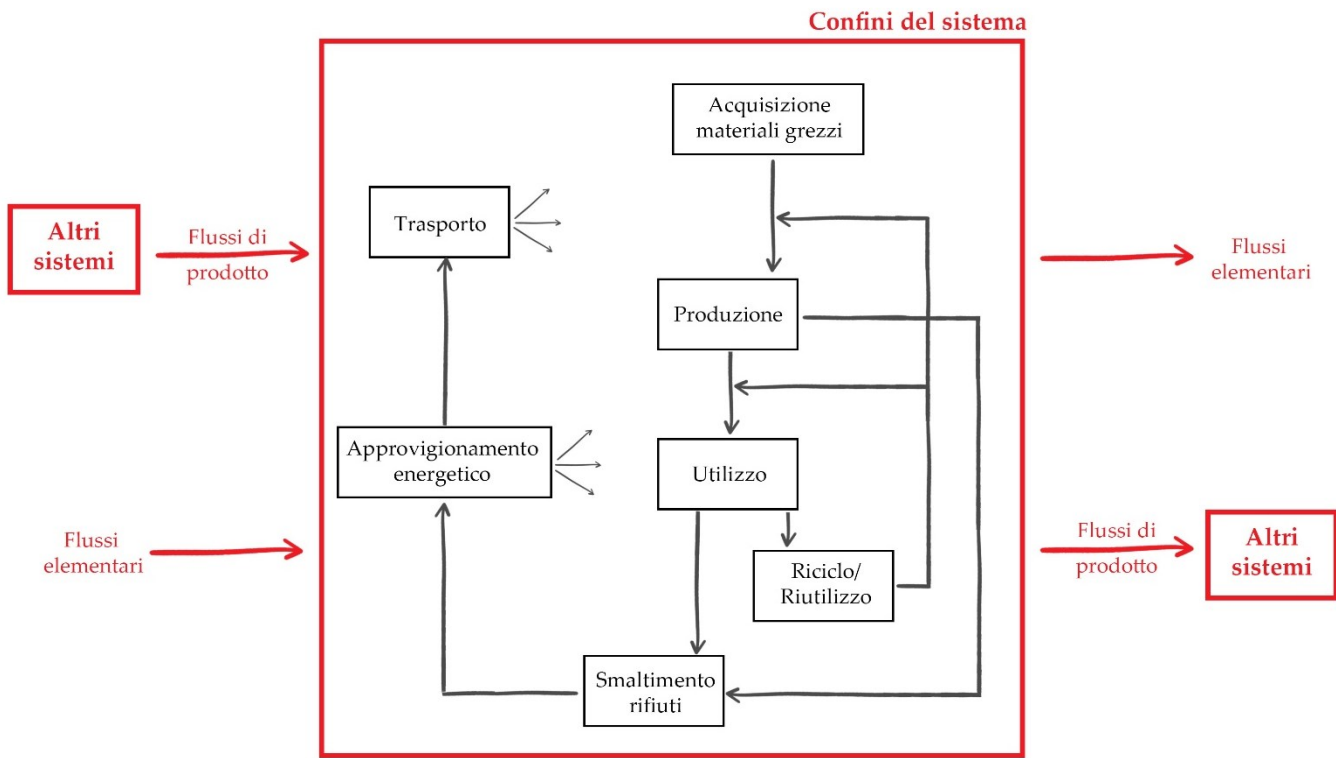


fig. 1.2 - Rappresentazione schematica di un product system generico. Fonte: BS EN ISO 14040:2006+A1:2020, schema dell'autrice

2.1 Goal and Scope definition

Secondo la normativa:

l'obiettivo e lo scopo di una LCA devono essere chiaramente definiti e coerenti con l'applicazione prevista. A causa della natura iterativa della LCA, potrebbe essere necessario ridefinire lo scopo durante il corso dello studio².

In accordo con lo standard ISO 14040, infatti, questa fase include l'affermazione dell'applicazione dello studio, le ragioni che hanno portato a svolgerlo e a chi si ha intenzione di comunicare i risultati. Sono inoltre formulate specificazioni sul modello che si andrà a realizzare e ne viene pianificato il progetto. In particolare, nella fase di *goal definition* vengono individuati quali dati saranno presumibilmente disponibili, in che modo verranno raccolti e se sarà necessario raccogliere informazioni su prodotti alternativi. Va specificato il livello di dettaglio che si intende raggiungere. Durante la

² «The goal and scope of an LCA shall be clearly defined and shall be consistent with the intended application. Due to the iterative nature of LCA, the scope may have to be refined during the study»

BS EN ISO 14044:2006+A2:2020, traduzione dell'autrice

scope definition è necessario indicare quali categorie di impatto, indicatori e fattori di caratterizzazione vengono tenuti in conto, oltre che ad esempio la valutazione del rischio in condizioni particolari. A tali categorie di impatto, come ad esempio il riscaldamento globale/cambiamento climatico, l'acidificazione eccetera, saranno assegnati i dati ricavati durante la fase di *LCI analysis*.

Fra le specificazioni più importanti da fare sul modello vi è la definizione dell'unità funzionale (*functional unit*, fU). Una LCA, infatti, correla un impatto ambientale ad un prodotto o ad una funzione del sistema del prodotto, che quindi necessita di essere quantificata. Se, ad esempio, si sta svolgendo un'analisi sugli involucri per bevande, una fU adatta potrebbe essere i litri di bevanda incartata; o ancora, se il focus dello studio è il trasporto di passeggeri, si può scegliere come unità funzionale il numero di persone trasportate per chilometri percorsi (Baumann & Tillman, 2004).

Altre scelte svolte in questa fase e correlate al modello sono:

- La definizione dei confini del sistema (*system boundaries*), ovvero quali processi includere. Tali limiti influenzeranno e saranno cruciali per la seconda fase di raccolta dati. I confini del sistema sono anche di tipo geografico – ovvero gli Stati di provenienza e di lavorazione delle materie prime – e temporale.
- I tipi di impatti ambientali considerati, che determinano i parametri per cui i dati sono raccolti. Solitamente i più comuni sono uso di risorse, riscaldamento globale, acidificazione ed eutrofizzazione.
- Il livello di dettaglio dello studio e quindi la qualità dei dati raccolti, specifici o generici.

La norma ISO 14044 definisce tre *cut-off criteria*, ovvero i criteri per l'esclusione di input insignificanti, da applicare sia all'intero *product system* che alle singole *unit processes*: massa, energia e rilevanza ambientale. Solitamente si sceglie come soglia l'1% dei criteri indicati, e la porzione da tagliare non deve eccedere il 5% per *unit process*.

Ciò che va oltre il *system boundary* viene definito *system surrounding* e si compone di *ecosphere*, ovvero l'ambiente, e *technosphere*, cioè ciò che non è incluso nell'analisi.

Il sistema scambia input e output con il l'ambiente circostante. Alcuni esempi di input sono i processi necessari all'estrazione delle materie prime e l'energia in ingresso, mentre alcuni output sono i prodotti direttamente utilizzabili ricavati dai

processi svolti nel sistema, le emissioni di materiali di scarto e i rifiuti solidi.

2.2 Life Cycle Inventory Analysis

La fase di inventario è definita dalla normativa come una:

fase di valutazione del ciclo di vita che comporta la compilazione e la quantificazione di input e output per un prodotto durante l'intero ciclo di vita³

LCI è quindi un'analisi di materiali ed energia basata su un sistema lineare e semplificato, in cui i loop sono risolti tramite iterazione o matrici di inversione. Molto spesso i processi di calcolo vengono svolti tramite Excel. Una rappresentazione grafica del *product system* è il *product tree*, che consiste in un insieme di *product units*, e viene raffinato in questa fase (Klöpffer & Grahl, 2014). La LCI si basa su alcune leggi naturali scientifiche, come la conservazione di massa ed energia e l'aumento di entropia.

Come già detto, le *unit processes* sono le unità fondamentali che formano il *product tree*, che vengono racchiuse in box e collegate tra di loro. Sono i più piccoli elementi considerati in un LCI, per i quali input e output sono quantificati. In fig. 1.3 vi è un'illustrazione schematica di una *unit process*.

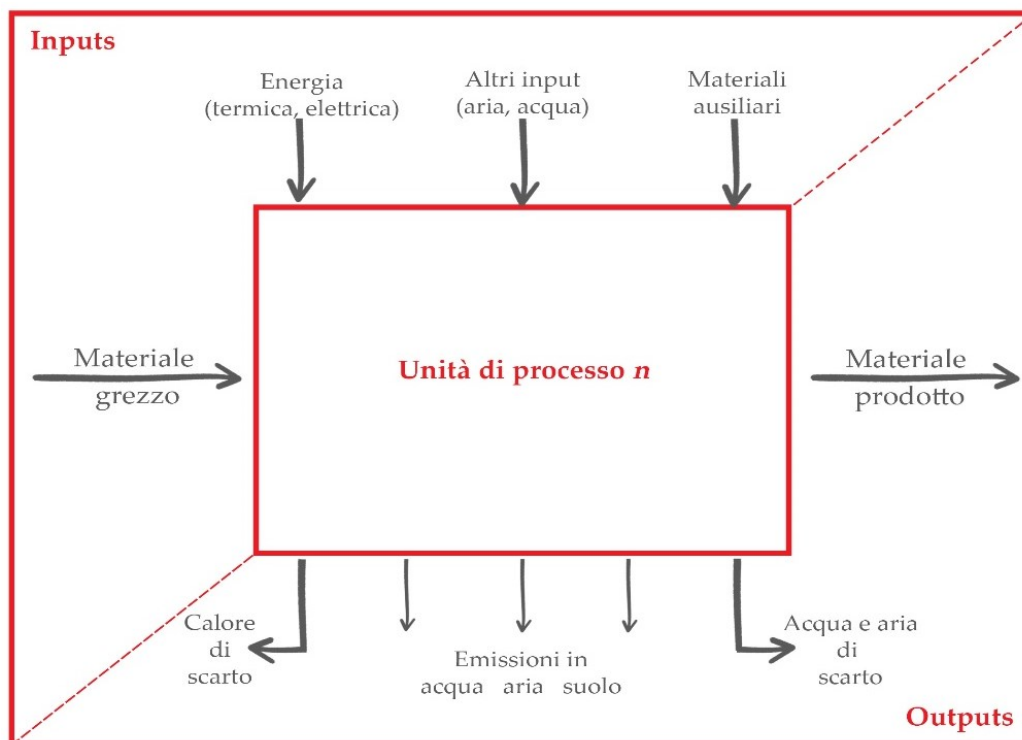


fig. 1.3 - Schema di una unità di processo generica. Fonte: Klöpffer & Grahl, 2014, schema dell'autrice

³ «Phase of life cycle assessment involving the compilation and quantification of inputs and outputs for a product throughout its entire life cycle»

BS EN ISO 14044:2006+A2:2020, traduzione dell'autrice

Il *flow chart* potrebbe avere vari bracci, e non essere quindi lineare, se ad esempio viene considerata come output anche la fase di smaltimento. Si ha un *closed-loop recycling* (CLR) se gli scarti sono re-immessi nella produzione, mentre si dice *open-loop recycling* (OLR) quando vengono utilizzati per altri processi produttivi.

Anche i dati riguardo al trasporto vanno elaborati e conteggiati; spesso non costituiscono una *unit process* a sé stante, ma vengono inglobati in altre; è necessario prestare particolare attenzione a non conteggiarli due volte. Non tutti i sistemi di trasporto sono classificabili come in movimento (macchine, treni, camion...), lo sono infatti anche le tubazioni.

Klöpffer e Grahl (Klöpffer & Grahl, 2014) consigliano di suddividere i prodotti in “materiali” (*goods*) ed “immateriali” (*services*). Per quanto riguarda i *goods*, i prodotti vanno descritti in relazione a quali materiali sono presenti e in che quantità, prendendo come unità ad esempio la massa. Questi dati vanno procurati affinché sia facile creare un *reference flow* in accordo con la fU; tale raccolta può fungere da base per una prima stima dell’impatto ambientale. Dei *services* va invece specificato l’ordine in cui le attività vengono svolte.

È quasi impossibile ottenere tutti i dati necessari direttamente: una LCI è quindi composta da *primary data*, dati generici ricavati dalla media del risultato di produzione e, quando i dati non sono reperibili, stime, che possono essere svolte tramite dati “vecchi” o provenienti da un altro paese, dati riguardanti materiali o formule chimiche simili, o l’uso di manuali tecnici. La norma ISO 14041 richiede che sia fatto un controllo della validità dei dati, ad esempio tramite un bilancio di massa ed energia.

Come già accennato nel paragrafo “Normativa vigente”, una fonte piuttosto valida di dati riguardanti i materiali sono le cosiddette EPDs, ovvero *Environmental Product Declarations*. Queste fanno parte delle Dichiarazioni Ambientali di III tipo, documenti che secondo la norma ISO14025:

presentano informazioni ambientali quantificate sul ciclo di vita di un prodotto per consentire confronti tra prodotti che svolgono la stessa funzione⁴.

Queste dichiarazioni ambientali sono sviluppate utilizzando parametri predeterminati da una o più organizzazioni, e sono soggette all’amministrazione di un

⁴ «Present quantified environmental information on the life cycle of a product to enable comparisons between products fulfilling the same function»

BS EN ISO 14025:2010, traduzione dell’autrice

Program Operator. Le EPDs si basano a loro volta su dati verificati raccolti tramite LCA, LCI o moduli informativi, in conformità con la norma ISO 14040.

L'affidabilità di una EPD è garantita dalla *product category rule* (PCR) che la governa. Le regole di categoria di prodotto sono infatti definite da normativa come:

*una serie di norme, requisiti e linee guida specifici per l'elaborazione di dichiarazioni ambientali di tipo III per una o più categorie di prodotti*⁵.

Tali regole devono contenere alcuni elementi, come la definizione e descrizione della categoria di prodotto e del *goal and scope* per la LCA, la selezione della categoria d'impatto, istruzioni sul contenuto e formato della dichiarazione ambientale di III tipo ed il periodo di validità.

2.3 Life Cycle Impact Assessment

L'obiettivo di questa fase è di descrivere le conseguenze ambientali degli impatti quantificati nella LCI, "traducendoli" in impatti ambientali quali ad esempio acidificazione, aumento di ozono, influenza sulla biodiversità, ecc. Si intende, inoltre, migliorare la leggibilità e la comparabilità dei risultati.

La norma ISO 14042 (EN ISO 14042:2000, s.d.) prevede delle sottofasi della LCIA, alcune delle quali obbligatorie ed altre opzionali. Nello specifico, fra gli elementi obbligatori si enumerano:

- La selezione di categorie di impatto, indicatori di categoria e caratterizzazione dei modelli. Essi devono essere accettati a livello internazionale. La scelta delle *impact categories* è lasciata all'autore della LCA, in quanto la norma non fornisce indicazioni precise a riguardo; è consigliabile comunque operare tale selezione già nella fase *goal and scope definition*, per poi facilitare la raccolta di dati a seconda delle categorie selezionate durante la fase *LCI analysis*. Anche la selezione degli indicatori di categoria e la caratterizzazione andrebbe fatta nelle fasi iniziali dell'analisi; eventualmente nella fase LCIA va completato quanto detto nelle due fasi precedenti. La guida tecnica ISO 14047 fornisce esempi di categorie e indicatori.

⁵ «Set of specific rules, requirements and guidelines for developing Type III environmental declarations for one or more product categories»

BS EN 15804:2012+A2:2019, traduzione dell'autrice

- Assegnazione dei risultati della LCI (*Classification*). È una correlazione tra gli articoli di inventario registrati nel LCI con le categorie di impatto. Vanno differenziati i risultati della LCI che possono essere assegnati ad una sola categoria d'impatto con quelle che ne riguardano più di una.
- Calcolo dei risultati del *category indicator* (*Characterisation*) È il cuore della LCIA, che, secondo normativa:

[...] comporta la conversione dei risultati di LCI in unità comuni e l'aggregazione dei risultati convertiti all'interno della stessa categoria di impatto. Questa conversione utilizza fattori di caratterizzazione; Il risultato del calcolo è un indicatore numerico di risultato⁶.

Il fattore di caratterizzazione è, sempre secondo le norma:

il fattore derivato da un modello di caratterizzazione che viene applicato per convertire un risultato dell'analisi di inventario nell'unità comune dell'indicatore di categoria⁷;

tale unità comune consente di calcolare il risultato dell'indicatore di categoria, cioè l'impatto ambientale. Il calcolo automatico dei risultati basato sui dati del LCI è affidato a specifici software, e la procedura va documentata in maniera estensiva.

Alcuni elementi opzionali della fase LCIA sono la "normalizzazione", ovvero il calcolo dell'indicatore della categoria d'impatto in relazione all'informazione di riferimento, il "raggruppamento" (*grouping*) di alcuni risultati per facilitarne la lettura e la "ponderazione" *weighting*, un processo quantitativo o qualitativo in cui la rilevanza dei vari impatti ambientali viene soppesata e confrontata con gli altri (Baumann & Tillman, 2004).

Secondo Klöpffer e Grahl (Klöpffer & Grahl, 2014), le categorie d'impatto attualmente utilizzate nello svolgimento di una LCA possono essere collegate agli input, agli output, alla tossicità o al fastidio correlato a eventuali emissioni. Le *Input-Related Impact Categories* intendono preservare e ridurre l'impiego di risorse naturali. Secondo il SETAC Europe, questo gruppo include le risorse biotiche ed abiotiche,

⁶ « [...] involves the conversion of LCI results to common units and the aggregation of the converted results within the same impact category. This conversion uses characterization factors. The outcome of the calculation is a numerical indicator result»

BS EN ISO 14044:2006+A2:2020, traduzione dell'autrice

⁷ «factor derived from a characterization model which is applied to convert an assigned life cycle inventory analysis result to the common unit of the category indicator»

BS EN ISO 14040:2006+A1:2020, traduzione dell'autrice

l'utilizzo del terreno e la domanda di energia. Le *Output-Based Impact Categories*, invece, valutano il carico ambientale rispetto alle emissioni nella tecnosfera. Queste comprendono il cambiamento climatico, l'acidificazione, la riduzione di strato dell'ozono, ecc.

2.4 Interpretazione, report e revisione critica

Quella dell'interpretazione è la fase in cui vengono tratte le conclusioni sulla base dei risultati ottenute della due precedenti. Andrebbero qui ridefinite le condizioni di vincolo scelte e la comprensibilità delle conclusioni ottenute. Questa ultima fase viene considerata una controparte della prima fase *goal and scope definition*, anch'essa con una componente scientifica meno rilevante rispetto alle altre due: va quindi esaminata la coerenza con gli obiettivi che si ci erano proposti e documentata la qualità dei dati raccolti, al fine di definirne l'attendibilità. La norma ISO 14044 individua per questa fase tre step da seguire, che sono collegati alle altre fasi (fig. 1.4):

1. Identificazione delle problematiche significanti in base ai risultati delle fasi LCI e LCIA. È importante, anche in questo caso, capire se i criteri scelti siano validi; possono infatti esservi problemi metodologici nei dati di inventario, nelle categorie d'impatto, nelle singole *unit processes* o nei raggruppamenti di queste.
2. Valutazione e check della completezza, sensibilità e consistenza dell'analisi, al fine di conferirle credibilità e comprensibilità. Questa può essere svolta durante lo studio o a posteriori, da un esperto che può essere sia interno che esterno all'ente promotrice della LCA.
3. Conclusioni, limitazioni e raccomandazioni.

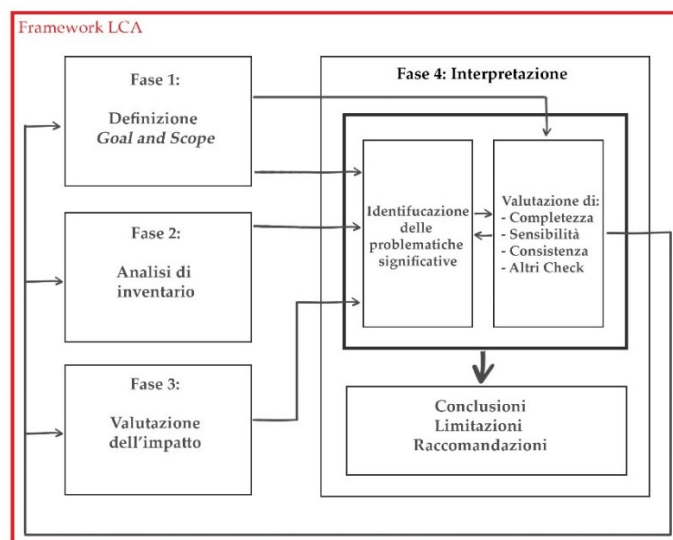


fig. 1.4 - Correlazione tra la fase di interpretazione e le altre, in accordo con ISO 14040. Fonte: Klöpffer & Grahl, 2014, schema dell'autrice

3 LCA NEL SETTORE AEC

Come già sottolineato, il settore AEC apporta un significativo contributo al peggioramento della situazione climatica attuale, essendo responsabile di quasi il 40% delle emissioni a livello globale. In tale senso, gli strumenti messi a disposizione dalla metodologia LCA possono risultare molto utili per individuare ed ottimizzare gli elementi e i processi più impattanti a livello ambientale. A differenza di altri prodotti, infatti, i manufatti edilizi rappresentano elementi estremamente complessi da studiare, poiché costituiti da una vasta gamma di componenti e materiali differenti. I vari elementi si differenziano, infatti, per processi produttivi, soggetti responsabili e tempistiche, e talvolta presentano aspetti difficili da quantificare e analizzare. Anche gli impatti ambientali ad essi correlati sono, pertanto, conseguenza di molteplici fattori, dislocati nello spazio e agenti su diverse scale temporali. Applicare la LCA al settore delle costruzioni, e quindi agli edifici, significa avere a che fare con una vastità di dati e di parametri da gestire e di ipotesi.

La normativa (EN ISO 15804, 2020) prevede cinque stadi per il ciclo di vita di un edificio:

1. Fase del prodotto;
2. Processo di costruzione;
3. Fase di utilizzo;
4. Fine del ciclo di vita;
5. Infine, tutti i benefici ricavati dal riutilizzo e reimpiego degli scarti.

Le fasi sono caratterizzate da una lettera, dalla A alla D; la fase del prodotto ed il processo di costruzione presentano entrambe la lettera "A", poiché identificano uno stadio di pre-operatività in cui si trova il manufatto. I processi all'interno di ciascuna fase sono numerati in ordine progressivo.

La norma EN 15978:2011 (EN 15978, 2011) definisce i confini di ciascuna fase:

- A1 – estrazione e lavorazione dei materiali grezzi, così come quella dei materiali di input secondari;
- A2 – trasporto fino alla manifattura;
- A3 – manifattura, che può formare direttamente un unico modulo insieme alle due fasi precedenti;
- A4 – trasporto dei materiali e prodotti dalla fabbrica al sito di costruzione, inclusi eventuali soste intermedie in depositi. In questa fase è incluso il trasporto di macchinari per la costruzione verso e dal sito in cui sorgerà

l'edificio.

- A5 – include i processi di costruzione e installazione, quali i lavori sul suolo e paesaggio, il trasporto di materiale all'interno del sito, la produzione e trasformazione di un prodotto *in situ*, l'installazione dei prodotti, l'utilizzo di acqua, riscaldamento, raffreddamento e ventilazione durante i lavori, lo smaltimento dei rifiuti generati dalla costruzione;
- B1 – comprende gli impatti e gli aspetti legati all'uso dei componenti dell'edificio in condizioni normali;
- B2 – i confini della fase di mantenimento includono la produzione e il trasporto dei materiali ausiliari utilizzati e tutti i processi atti a mantenere la funzionalità e la performance tecnica dell'edificio;
- B3 – la riparazione include la produzione, il trasporto e il montaggio della nuova componente dell'edificio, così come lo smaltimento della parte sostituita;
- B4 – analogamente alla fase B3, questa fase include tutte le operazioni legate al rimpiazzo di una componente;
- B5 – gli stessi principi delle fasi precedenti si applicano a quella della ristrutturazione;
- B6 – il cosiddetto “*operational energy use*” comprende l'energia utilizzata dai sistemi tecnici integrati nell'edificio durante il loro funzionamento. Nello specifico, vengono considerati riscaldamento, fornitura di acqua calda, aria condizionata, ventilazione, illuminazione ed utilizzo di energia ausiliaria;
- B7 – in maniera analoga alla fase B6, viene tenuto conto dell'acqua utilizzata durante la fase d'uso dell'edificio (acqua potabile, sanitaria, per irrigazione ecc.);
- C1 – i confini del processo di decostruzione includono i processi *on-site* e tutti quelli *off-site* ausiliari allo smantellamento delle componenti dell'edificio;
- C2 – comprende il trasporto allo smaltimento dei rifiuti dovuti alla decostruzione;
- C3 – insieme ai moduli C1 e C2, forma il cosiddetto “*end-of-life stage*”. In particolare, la fase C3 raccoglie tutti i processi di trasformazione degli scarti atti al riutilizzo, recupero o riciclo;
- C4 – quantifica tutti gli impatti ambientali risultanti dallo smaltimento finale dei materiali;
- D - quantifica i vantaggi o i carichi ambientali netti derivanti dal riutilizzo, dal riciclaggio e dall'energia di recupero risultante dai flussi netti di materiali,

nonché l'energia uscente dal confine del sistema.

Le varie fasi del ciclo di vita di un edificio sono schematizzate in fig. 1.5 e tabulate da Andrea Danuti nella sua tesi (Danuti, 2018), secondo lo schema proposto dalla norma EN 15978:2011 (tab. 1.1).



fig. 1.5 - Schematizzazione delle fasi del ciclo di vita di un edificio secondo normativa. Fonte: (One Click LCA, 2021)

tab. 1.1 - Fasi del ciclo di vita di un edificio secondo EN 15978:2011. La voce "O" individua una fase opzionale, mentre "M" una obbligatoria. Fonte: Danuti, 2018

Life cycle stages	Product			Construction		Use stage						End-of-life				Benefits and loads beyond the system boundary		
	A1	A2	A3	A4	A5	Related to the building fabric					Related to the building operation		C1	C2	C3		C4	
Modules	Raw material supply	Transport	Manufacturing	Transport	Construction	Use	Maintenance	Repair	Replacement	Refurbishment	Operational energy use	Operational water use	Demolition	Transport	Waste processing	Disposal	D	
Type of EPD	Scenarios																	
	Cradle to Gate	M	M	M														
	Cradle to Gate with option(s)	M	M	M	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
Cradle to Grave	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	O

In normativa vengono inoltre individuate diversi tipi di analisi, a seconda di quali fasi sono comprese: un'analisi "*cradle to gate*", "dalla culla al cancello", comprende obbligatoriamente tutte le fasi di produzione dei materiali da costruzione, a cui possono essere aggiunte anche le fasi successive; il "*cradle to gate*" è invece uno studio "dalla culla alla tomba", e riguarda l'intero ciclo di vita dell'edificio.

Le LCA sono uno strumento complesso quanto significativo e utile per la stima dell'impatto ambientale di un edificio; Anand e Amor (Anand & Amor, 2017) sottolineano come nel giro di soli cinque anni – dal 2011 al 2015 – le pubblicazioni di LCA riguardanti edifici siano triplicate (fig. 1.6). I focus principali di tali studi sono le emissioni dovute alla fase operativa, anche se recentemente si sta assistendo ad un maggiore interesse riguardo alla *embodied energy* degli edifici. Secondo gli autori, rilevanti per questi studi è anche la possibile integrazione delle LCA con i sistemi di certificazione ambientale.

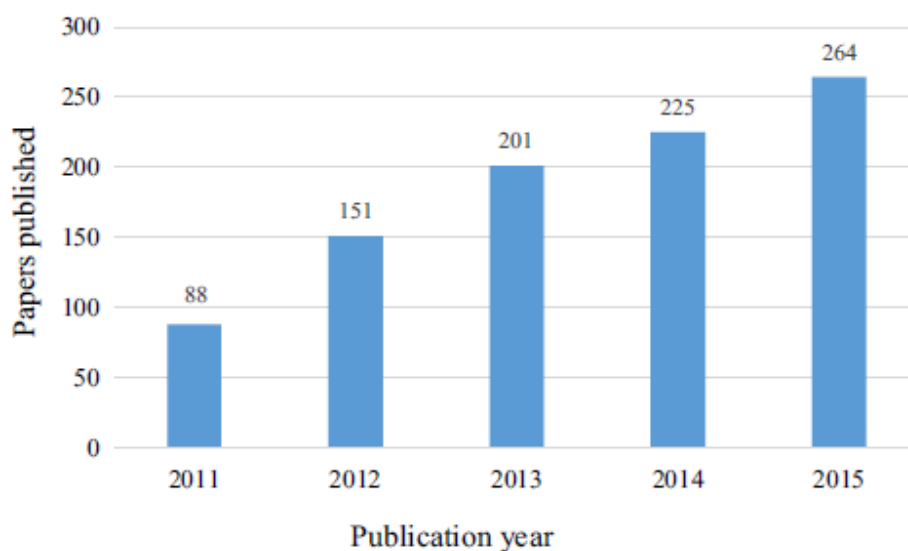


fig. 1.6 - Articoli pubblicati su Scopus nel lasso di tempo 2011-2015 riguardanti LCA su edifici. Fonte: Anand & Amor, 2017

Sempre Anand e Amor analizzano le difficoltà che maggiormente si presentano nello svolgimento di una LCA di un edificio.

Per quanto riguarda la fase di definizione dei *goal and scope*, alcuni problemi insorgono nella definizione delle *functional units*. Le unità funzionali per descrivere un edificio possono essere infatti molteplici; l'uso di diverse unità funzionali è dunque un fattore che contribuisce alla difficoltà nel confrontare i risultati LCA degli edifici. Le fU più utilizzate dopo l'area netta – espressa in metri quadri – sono il volume, il calore fornito e l'area di pavimento riscaldato. Un altro problema comune presente nella

prima fase di una LCA di un edificio è la definizione della vita utile di quest'ultimo, poiché gli edifici incorporano vari prodotti con durata variabile. Gli studiosi suggeriscono di calcolare la durata dei prodotti con dati stocastici, tenendo conto dell'incertezza dovuta alla differente permanenza delle varie componenti.

L'analisi di inventario negli edifici è nota per essere molto complessa a causa dei numerosi materiali e processi coinvolti, soprattutto per la natura dinamica della fase operativa. I dati relativi alla fase di costruzione dipendono fortemente dalle LCA svolte a loro volta sulle varie componenti dell'edificio: le informazioni sono infatti ottenute principalmente dall'industria edile, da database o dalle EPDs. Gli autori sottolineano come in questo processo si avverta la mancanza di una metodologia scientifica univoca, e come la mancanza di dati certi possa influenzare pesantemente il risultato finale dell'analisi.

Varie problematiche sono state sottolineate da Anand e Amor anche per quanto riguarda la fase LCIA, in particolare per la scelta della categoria d'impatto. Fra questi, si annoverano la mancanza di standardizzazione, la mancanza di dati a supporto della valutazione appropriata della categoria, l'assenza di rilevanza della categoria nello studio e la mancanza di considerazione della categoria di impatto nel *tool* o metodologia utilizzati. Dall'analisi è emerso che gli impatti maggiormente considerati sono il consumo energetico e le emissioni di gas serra, in particolare CO₂; anche i fattori economici vengono spesso considerati nelle analisi. Vi sono, tuttavia, impatti che non vengono quasi mai considerati ma che possono alterare l'affidabilità dell'analisi: fra questi, ad esempio, vi è il cosiddetto "*rebound effect*", ovvero "effetto di rimbalzo". Un esempio di tale effetto è l'aumento di attività economiche di un individuo grazie a misure di efficienza redditizie che però possono causare impatti ambientali in altri settori.

Anche il confronto fra le LCA di due o più edifici può risultare difficoltoso. I confini del sistema considerati, l'uso di diverse metodologie di misurazione dell'energia e dell'analisi di inventario, l'ubicazione dello studio, l'uso di energia primaria rispetto a quella fornita, l'età, la fonte e la completezza dei dati e la tecnologia dei processi di produzione sono alcuni dei parametri identificati che influenzano i risultati riguardo all'energia incorporata; inoltre, l'utilizzo di diverse metodologie di analisi delle categorie d'impatto può rendere molto difficile la comparazione.

Come già accennato, lo svolgimento delle LCA sugli edifici può essere utile al fine di ottenere certificazioni ambientali. Tali certificazioni sono strumenti di valutazione

volontari che attestano la sostenibilità energetica e ambientale di un edificio. Essi si basano solitamente su una serie di criteri, suddivisi in categorie, che tipicamente comprendono l'energia utilizzata, le caratteristiche e l'uso del territorio sul quale il manufatto sorge, il consumo di acqua, il benessere dell'essere umano, i materiali utilizzati, i trasporti e i rifiuti. Ad ogni criterio viene attribuito un determinato punteggio, anche in base al peso di ciascuna categoria sull'impatto totale; a seconda del risultato finale si ottiene un grado di certificazione più o meno buono (*BREEAM Training* | *BREEAM - Sustainability Assessment Method*, s.d.; *Cos'è la Certificazione LEED®?* » *Guida Utile - GREENiTOP®*, s.d.; *Itaca*, s.d.). Esistono certificazioni ambientali sia a livello internazionale, come ad esempio la LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*) e BREEAM (*Building Research Establishment Environmental Assessment Method*), che nazionale, come il Protocollo ITACA.

Come attestano Anand e Amor, negli ultimi anni LEED ha cercato di evolversi verso l'inclusione delle analisi LCA: in LEED v.4, infatti, una *life cycle analysis* dell'intero ciclo di vita dell'edificio può aiutare a guadagnare fino a tre crediti. I crediti nel LEED sono resi disponibili anche per LCA dei materiali da costruzione. Un criterio per ottenere il credito è una riduzione minima del 10% degli impatti rispetto allo scenario di base. Un minimo di 3 impatti da una lista di 6 deve essere considerato per ottenere i crediti. Anche il sistema di valutazione BREEAM offre crediti extra per l'esecuzione di un LCA. I crediti aggiuntivi - 6 per la valutazione dei materiali e 3 per un LCA completo - aiutano a raggiungere le categorie BREEAM "*Excellent*" e "*Outstanding*", ovvero le più alte possibili.

Nel prossimo capitolo, e in particolare al paragrafo "Integrazione tra BIM e LCA: stato dell'arte", verranno presentati le metodologie e i programmi LCA maggiormente utilizzati nello svolgimento delle analisi del ciclo di vita nel settore AEC, con focus sulla relazione di queste ultime con l'ambiente BIM.

Capitolo Secondo

OTTIMIZZAZIONE DELL'IMPATTO AMBIENTALE IN BASE AI PRINCIPI LCA

1 INTEGRAZIONE TRA BIM E LCA: STATO DELL'ARTE

Come già sottolineato, la metodologia LCA si presenta come complessa e poliedrica, quanto potenzialmente utile nella riduzione dell'elevato impatto ambientale causato dal settore AEC, specialmente se adottata nelle prime fasi di un progetto. Proprio a causa di tale complessità, l'approccio basato sul *life cycle thinking* viene spesso trascurato da progettisti e professionisti del settore.

Secondo la normativa (British Standard Institution, 2017) il BIM, ovvero *Building Information Modeling*, è la:

rappresentazione digitale condivisa delle caratteristiche fisiche e funzionali di un qualsiasi oggetto costruito [...] che costituisce basi affidabili per la presa di decisioni.

Questa metodologia permette di creare un modello informativo dinamico, interdisciplinare e condiviso, che dà la possibilità ai vari professionisti di attuare un approccio olistico nei confronti dell'edificio. La qualità delle informazioni presenti in un modello è caratterizzata dal livello di dettaglio di questo (*level of development – LOD*), che secondo l'*American Institute of Architecture (AIA)*:

[...] describe i minimi dimensionali, spaziali, quantitativi, qualitativi, e altri dati inseriti in un Elemento del Modello per sostenere gli Usi Autorizzati associati a tale LOD⁸.

Vari studi, alcuni dei quali raccolti da Soust-Verdaguer et al. (Soust-Verdaguer et al., 2017), sottolineano l'importanza di migliorare e semplificare l'applicazione della LCA nel settore edile, riconoscendo come l'integrazione di tale metodologia con quella BIM possa portare a benefici in termini di ottimizzazione dei processi. Ad esempio, Krygiel e Nies (Krygiel & Nies, 2008) hanno rilevato l'utilità del BIM per il design

⁸ « [...] describes the minimum dimensional, spatial, quantitative, qualitative, and other data included in a Model Element to support the authorised Uses associated with such LOD».

AIA Document G202™-2013, Project Building Information Modeling Protocol Form, traduzione dell'autrice.

sostenibile in tre campi: la modellazione energetica, l'uso di materiali sostenibili e l'organizzazione logistica; ciò comporterebbe una riduzione della domanda di energia, della cosiddetta *embodied energy* (energia incorporata), dei rifiuti nonché della *carbon footprint*.

L'integrazione tra BIM ed LCA, inoltre, permette di individuare e controllare eventuali sprechi, in termini di risorse ed energia, sin dalle prime fasi della costruzione di un edificio. Il supporto che il BIM fornisce per l'analisi del ciclo di vita di un edificio è rilevante da un punto di vista tecnologico: sono minimizzati i problemi di software ed è possibile svolgere delle previsioni di performance quantitative, cosa che non avviene tramite il solo utilizzo di strumenti per LCA.

Lo svolgimento di una LCA BIM-based può presentare anche delle difficoltà, fra le quali vale la pena enumerare l'interoperabilità tra i software, la necessità di una grande quantità di dati da utilizzare come input, con conseguente dispendio di tempo computazionale, e la possibile inaccuratezza dei risultati, dovuta a semplificazioni realizzate nei vari passaggi. Essendo un'integrazione relativamente recente, vi è scarsità di casi studio comparabili in letteratura e di database con una vasta gamma di materiali e prodotti; inoltre, si può notare una generale carenza di standard riguardanti gli studi LCA nel settore edilizio

Come riportano Soust-Verdaguer et al. (Soust-Verdaguer et al., 2017), il progetto ENSLIC, fondato dalla *Intelligent Energy Europe* (IEE) e svolto tra il 2007 ed il 2010, ha proposto tre livelli di performance di BIM-based LCA sugli edifici:

- Base – i calcoli sono svolti tramite un foglio Excel, con semplici input e output che trattano solo uno o pochi impatti ambientali. Il modello BIM serve quindi solo per ottenere un computo delle quantità dei materiali impiegati.
- Medio – i calcoli vengono svolti grazie all'utilizzo di alcuni *building tools* quali Ecosoft, EcoEffect, Athena, ecc. Tramite il BIM è possibile ricavare alcune informazioni sui materiali, nonché eseguire il calcolo della domanda energetica dell'edificio.
- Avanzato – sono impiegati strumenti generali e comprensivi, come Gabi e Simapro, il cui utilizzo richiede un'elevata esperienza. Le due metodologie, BIM ed LCA, sono combinate tramite una procedura automatizzata.

Wastiels e Decuypere (Wastiels & Decuypere, 2019) hanno identificato sei step necessari per lo svolgimento di un'analisi LCA integrata al BIM, ovvero modellazione

della geometria dell'edificio, calcolo del computo metrico, individuazione dei profili LCA, attribuzione dei profili alle rispettive quantità del computo, calcolo dell'impatto ambientale e visualizzazione ed analisi dei risultati. I suddetti profili sono, secondo gli autori, un set di dati LCA per la tipologia di materiale o combinazione di materiali considerati. Queste informazioni possono essere dati specifici, EPDs o combinazioni delle due categorie. In particolare, nel momento in cui vengono stabiliti i profili LCA, vengono identificati e quantificati gli impatti ambientali dei prodotti e materiali che compongono l'edificio.

Sempre Wastiels e Decuyper (Wastiels & Decuyper, 2019) hanno distinto due strategie principali per approcciarsi all'integrazione LCA-BIM. In un caso vengono estratte dal modello BIM informazioni riguardanti la geometria e possibilmente i materiali sotto forma di computo, e poi i calcoli vengono svolti in software specializzati nell'analisi del ciclo di vita; nel secondo, invece, i dati LCA sono aggiunti al modello tramite l'uso di specifici parametri, ed in seguito l'analisi è svolta grazie ad un plugin. Tenendo queste due strategie come poli opposti di una vasta gamma di approcci, gli autori hanno individuato cinque strategie intermedie che sono fra le più comuni riscontrate nello stato dell'arte.

1. *Bill of quantities (BoQ) export*: il computo metrico viene estratto dal modello BIM sotto forma di foglio di calcolo. Viene quindi importato direttamente nel software LCA dedicato: il resto del workflow sarà svolto dal software stesso, in cui l'operatore che eseguirà l'analisi collegherà manualmente i componenti dell'edificio ai profili LCA disponibili. A seconda del software utilizzato è possibile o meno svolgere un'analisi iterativa. È ad oggi il metodo più utilizzato per lo svolgimento di una LCA BIM-based su edifici.
2. *IFC import of surfaces*: il modello geometrico BIM è importato nel software LCA tramite il formato dati IFC. Attraverso il modello sono trasmessi come minimo i parametri geometrici, e spesso sono incluse anche i numeri identificativi dell'elemento o il nome del materiale. L'addetto allo svolgimento della LCA collega poi manualmente i dati alle componenti dell'edificio. Grazie a questo processo può essere supportato un design iterativo. Un esempio di questa strategia può essere il *Belgian TOTEM-tool*.
3. *BIM viewer for linking LCA profiles*: questa strategia è simile alla precedente, ma i profili LCA sono attribuiti in uno step intermedio grazie ad un software *BIM viewer*, ovvero uno strumento che permette al modello BIM di essere

ispezionato e talvolta modificato in alcuni suoi parametri. Il vantaggio di tale approccio risiede nel fatto che l'attribuzione dei profili LCA può avvenire in un ambiente sia 3D che LCA, mantenendo quindi l'analisi nello specifico. Un esempio può essere il software eveBIM-viewer, dove vengono importati i profili FDES – ovvero le EPD del programma francese Inies – che vengono attribuiti ai componenti dell'edificio e successivamente esportati nel software Elodie.

4. *LCA plugin for BIM-software*: in questo caso viene massimizzato il processo di design che avviene nel software BIM; infatti, grazie all'utilizzo di un plugin LCA specifico, i profili LCA possono essere attribuiti direttamente nell'ambiente BIM, saltando quindi il passaggio nel software specifico. Tutti gli step successivi, inclusi i calcoli, sono svolti nel plugin. Rispetto alle altre strategie, questa presenta la possibilità di visualizzare i risultati della LCA direttamente sul modello geometrico, permettendo quindi di individuare rapidamente i punti più problematici o gli impatti più importanti. Strumenti quali Tally, One Click LCA, Usai/Eco-Sai e CAALA lavorano con plugin per i software BIM.
5. *LCA enriched BIM objects*: le informazioni LCA sono già contenute negli oggetti presenti nel modello BIM, e non devono quindi essere associate manualmente. Step successivi possono includere il calcolo ed analisi tramite un plugin LCA direttamente nel software BIM, oppure il passaggio ad uno specifico software LCA. Gli oggetti BIM non contengono necessariamente tali informazioni intrinsecamente, ma possono contenere un riferimento ad un profilo LCA i cui dati sono raccolti in un tool LCA o in un database. Questa strategia ha un elevato potenziale, poiché permette di centralizzare tutti i dati negli oggetti BIM, ottimizzando quindi il processo di design e fornendo informazioni sull'impatto ambientale in tempo reale. Ad oggi questa strategia è solo teorica e non è stata applicata a nessun caso reale, a causa della scarsa disponibilità di oggetti BIM contenenti dati LCA.

Le cinque strategie di approccio sono riassunte in fig. 2.1.

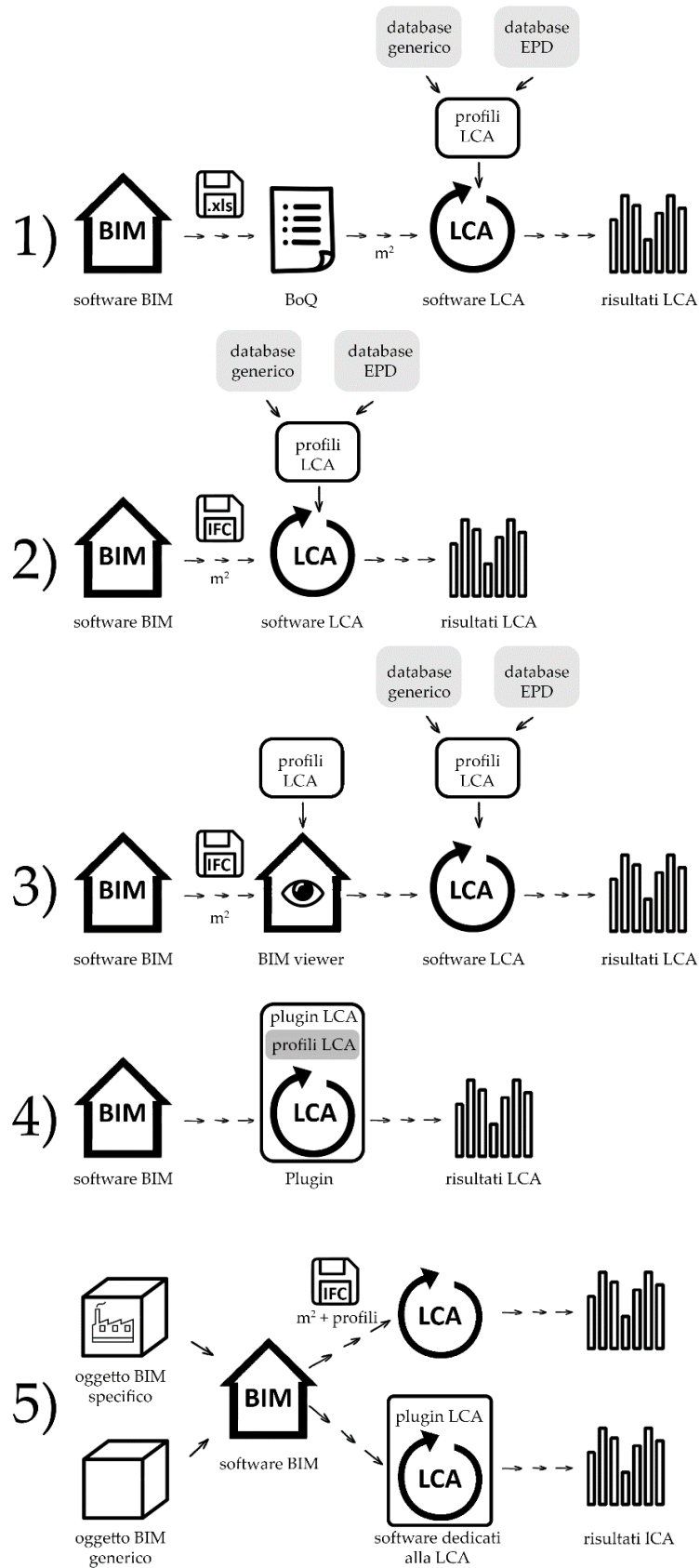


fig. 2.1 - tipologie di integrazione BIM-LCA adattate da Wastiels & Decuyper. Fonte: schema dell'autrice

Obrecht et al. (Obrecht et al., 2020) revisionano 60 studi di LCA BIM-based, utilizzando la classificazione di Wastiels e Decuyper. Come già ipotizzato, dall'analisi emerge che il metodo più utilizzato sia quello proposto nella strategia 1, ovvero il passaggio di informazioni grazie al computo metrico ricavato dal modello (fig. 2.2). Dei 60 studi individuati, infatti, più della metà utilizza questo approccio, e nella maggior parte dei casi tale processo viene svolto manualmente. Degli studi che utilizzano il primo metodo, molti hanno tentato di facilitare lo scambio di dati tra BIM ed LCA, anche se solo due sono riusciti ad automatizzare totalmente questo passaggio grazie ad un framework della piattaforma Microsoft .NET. Gli altri studi sono riusciti a raggiungere un'automatizzazione parziale grazie all'aggiunta dei parametri al modello BIM oppure tramite strumenti quale Dynamo.

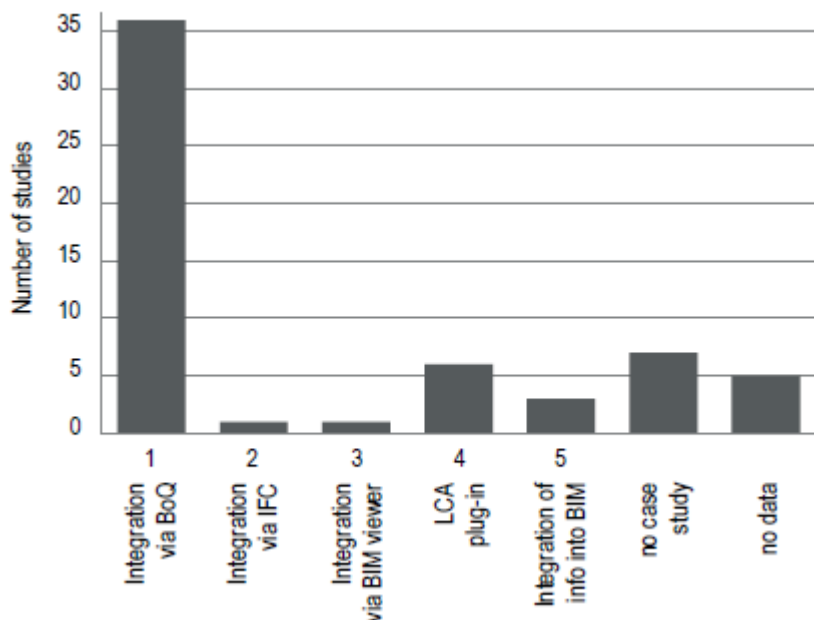


fig. 2.2 - Classificazione dei workflow nei 60 studi identificati. Fonte: Obrecht et al., 2020

Come si vede dal grafico in fig. 2.2, il secondo approccio maggiormente utilizzato per l'integrazione è il quarto, ovvero l'utilizzo di un plugin LCA. Molti degli studi che seguono questa strategia si servono del plugin di Revit chiamato Tally®, che permette lo svolgimento di un'analisi del ciclo di vita dell'edificio facendo fede al database GaBi. Tally può essere combinato anche al plugin Green Building Designer, anch'esso di Revit, per analizzare l'impatto ambientale della fase operativa del caso studio. Un altro strumento molto utilizzato per il calcolo dell'energia *operational* è Energy Plus, un programma per la simulazione energetica dinamica dell'intero edificio.

In tab. 2.1 e tab. 2.2 sono riassunte le principali caratteristiche dei casi studio presenti nell'analisi di letteratura di Soust-Verdaguer et al. (Soust-Verdaguer et al., 2017). Da questa rassegna emerge la propensione dei professionisti nell'utilizzo di Revit come software BIM, da cui viene estratto un computo metrico automatico importato poi in Excel, dove le informazioni vengono arricchite ed organizzate manualmente prima di procedere allo sviluppo della LCA. Nonostante in molti casi studio non sia specificato, gli autori del paper suggeriscono di utilizzare nel modello un LOD 300, al fine da ottimizzare le informazioni ricavabili. Viene inoltre sottolineato come i modelli dovrebbero includere maggiori informazioni riguardo alle proprietà e caratteristiche costruttive dell'edificio: in molti studi, infatti, le informazioni presenti nei database BIM non sono state sufficienti e sono state utilizzate anche fonti esterne, come ad esempio database generici (come quello presente nel software Ecoinvent) o regionali (come Athena Impact Calculator per il Nord America).

Come si può vedere in tabella, nella maggior parte dei casi analizzati sono state considerate principalmente le fasi di costruzione e di utilizzo dell'edificio, ed in nessun caso si è tenuto conto della fase di riciclo dei materiali. Di questi, gli impatti ambientali considerati sono stati l'energia incorporata e le emissioni di CO₂ dei materiali.

tab. 2.1- Riassunto degli approcci utilizzati dai casi studio analizzati da Soust-Verdaguer et al., parte 1. Fonte: Soust-Verdaguer et al., 2017, tabella dell'autrice

Reference	Nazione	Modello BIM		Metodo LCA			Calcolo dell'energia consumata	Procedura di scambio dati											
		Tipologia edilizia	Software BIM	LOD	Unità funzionale	Database			LCA tool	Fasi LCA									
Ajayi et al., 2015	US	Scuola primaria a due piani	Autodesk Revit Architecture	200	Intero edificio	ATHENA Impact Estimator	ATHENA Impact Estimator	Produzione A1-A3	X	Costruzione A4-A5	X	Utilizzo B1-B7	X	Fine di vita C1-C4	X	Riciclo D	-	Green Building Studio (GBS)	Da BIM tramite foglio Excel
								Edificio residenziale	Dprofiler	-	ATHENA Eco Calculator	ATHENA Eco Calculator	ATHENA Eco Calculator	X	X	X	X	X	X
Georges et al., 2014	Norvegia	Casa monofamiliare a due piani e edificio per uffici	Autodesk Revit Architecture	-	1 m ² di pavimento riscaldato	Ecoinvent versione 2.2	SimaPro versione 7.3	X	B1, B4, B6	-	-	-	-	-	-	-	SIMIEN	Da BIM tramite foglio Excel	
								Casa monofamiliare	Autodesk Revit Architecture	-	Ecoinvent versione 2.3	SimaPro versione 7.4	X	B4, B6	-	-	-	-	-
Iddon & Firth, 2013	UK	Casa monofamiliare	-	-	Intero edificio	ICE database	-	X	B6	-	-	-	-	-	-	-	Standard Assessment Procedure for energy rating of dwellings 2009 versione 9.9	Da BIM tramite foglio Excel	

tab. 2.2 - Riassunto degli approcci utilizzati dai casi studio analizzati da Soust-Verdaguer et al., parte 2. Fonte: Soust-Verdaguer et al., 2017, tabella dell'autrice

Reference	Nazione	Modello BIM		Metodo LCA			Calcolo dell'energia consumata	Procedura di scambio di dati											
		Tipologia edilizia	Software BIM	LOD	Unità funzionale	Database			LCA tool	Fasi LCA									
Jalalzi & Jraide, 2014	Canada	Edificio per uffici a tre piani	Autodesk Revit Architecture	-	Intero edificio	ATHENA Impact Estimator	ATHENA Impact Estimator	Produzione A1-A3	X	Costruzione A4-A5	-	Utilizzo B1-B7	B6	Fine di vita C1-C4	-	Riciclo D	-	Autodesk Ecotect, Integrated Environmental Solutions	Da BIM tramite formato di esportazione ODBC
								Prodotto	X	Costruzione A4-A5	-	Utilizzo B1-B7	-	Fine di vita C1-C4	-	Riciclo D	-	Autodesk Ecotect	Da BIM a database esterno
Jraide & Jalalzi, 2013	Canada	Edificio a sei piani con appartamenti	Autodesk Revit Architecture	-	Intero edificio	ATHENA Impact Estimator	ATHENA Impact Estimator	Prodotto	X	Costruzione A4-A5	-	Utilizzo B1-B7	X	Fine di vita C1-C4	-	Riciclo D	-	Autodesk Ecotect	Da BIM a database esterno
Lee et al., 2015	Corea del Sud	Edificio a 18 piani con appartamenti	Autodesk Revit Architecture	300	Intero edificio	Korea Life Cycle Inventory	-	Prodotto	X	Costruzione A4-A5	-	Utilizzo B1-B7	X	Fine di vita C1-C4	X	Riciclo D	-	-	Database collegato a BIM
Peng, 2014	Cina	Run Run Shaw Architectural Building	Autodesk Revit Architecture	-	Intero edificio	ICE database	-	Prodotto	X	Costruzione A4-A5	-	Utilizzo B1-B7	X	Fine di vita C1-C4	X	Riciclo D	-	Autodesk Ecotect	Da BIM tramite foglio Excel
Shafiq et al., 2015	Malesia	Edificio per uffici a due piani	Autodesk Revit Architecture	-	Intero edificio	ICE database	-	Prodotto	X	Costruzione A4-A5	-	Utilizzo B1-B7	-	Fine di vita C1-C4	-	Riciclo D	-	-	Da BIM tramite foglio Excel
Skin et al., 2015	Corea del Sud	Edificio per uffici a undici piani	ArchiCAD 15	-	Intero edificio	Korea Life Cycle Inventory	-	Prodotto	X	Costruzione A4-A5	-	Utilizzo B1-B7	B1-B6	Fine di vita C1-C4	-	Riciclo D	-	EcoDesigner	Da BIM tramite foglio Excel

2 EMBODIED VS OPERATIONAL CARBON

I risultati dello studio LCA su un prodotto o servizio vengono espressi secondo varie categorie di impatto ambientali, legate ad esempio al consumo di materie e risorse, o all'emissione di sostanze nell'ambiente naturale.

Come già visto nei capitoli precedenti, le analisi svolte sugli edifici si focalizzano principalmente sul riscaldamento globale da essi prodotto: ecco quindi che si parla di *carbon footprint*, o impronta di carbonio.

La *carbon footprint*, partendo dall'approccio LCA, misura la quantità di emissioni di gas serra (GHG) emessa dall'edificio studiato lungo l'intero ciclo di vita, espressa in chili o tonnellate di CO₂eq. La CO₂ equivalente viene calcolata moltiplicando le emissioni di ciascun gas serra per il suo potenziale di riscaldamento o *Global Warming Potential* (GWP). Il GWP è una misura relativa di quanto calore intrappola nell'atmosfera una determinata massa di gas ad effetto serra, confrontato con quello intrappolato dalla stessa massa di CO₂, il cui GWP è per definizione pari a 1. Per la comparazione si utilizza uno specifico intervallo di tempo, normalmente pari a 100 anni (*Understanding Global Warming Potentials* | US EPA, s.d.). La *carbon footprint* identifica quindi la quantificazione degli impatti generati da tutti i gas serra, non solo dall'anidride carbonica.

La *carbon footprint* prodotta da un edificio può essere suddivisa in due categorie: *embodied carbon* e *operational carbon*. La prima di queste quantifica le emissioni di anidride carbonica che avvengono a causa della manifattura dei materiali e la costruzione delle componenti e, più in generale, dell'edificio stesso; l'*operational carbon*, invece, misura la CO₂ prodotta durante la vita utile del manufatto, e nel caso del settore AEC va ricondotta al riscaldamento e raffreddamento degli ambienti, all'utilizzo di energia elettrica e al condizionamento dell'aria.

Si analizzano di seguito tre LCA BIM-based dalla letteratura, per comprendere il rapporto che intercorre tra *embodied* e *operational carbon*, ed il "peso" che ciascuna di esse ha sulle emissioni totali di un edificio.

Il primo caso studio è il Mingguang People's Hospital Building situato nella città di Chuzhou, provincia di Anhui, Cina, analizzato da Lu e Wang (Lu & Wang, 2019). Di questo vengono calcolate le *Building's life carbon emissions* (BLCCE) durante tre fasi del ciclo di vita: costruzione (produzione e trasporto di materiale, costruzione in situ), fase operativa (consumo di energia per riscaldamento, illuminazione, ventilazione ecc., così come ristrutturazione), demolizione. Il database da cui sono stati

ricavati i coefficienti utilizzati per il calcolo è stato scelto tenendo conto della situazione locale della provincia cinese di Anhui ed in accordo con la norma CECS 374, 2014.

Il modello BIM è stato realizzato con Revit2017 e presenta un LOD di 300. Il programma scelto come *BIM quantities software* è Glondon GTJ2018, dove è stato importato il modello. Il modello delle quantità BIM è stato quindi controllato e sistemato, integrando i componenti che sono stati persi a causa di problemi di compatibilità. Le emissioni di carbonio totali della fase di costruzione sono risultate 3166,87 tCO₂-eq.

Per simulare ed analizzare le emissioni prodotte durante la fase operativa dell'edificio è stato usato il software Green Building Studio di Revit. Grazie a questo, si è dedotta una quantità di 732 tCO₂-eq annuali, per un totale di 36600 tCO₂-eq durante l'intero ciclo di vita, assunto pari a 50 anni.

La CO₂ equivalente emessa durante la fase di demolizione è stata assunta pari al 10% di quella relativa alla costruzione, quindi 31668 tCO₂-eq.

È possibile notare come la fase operativa dell'edificio studiato sia particolarmente rilevante e preponderante rispetto alle altre fasi: questo perché, essendo un ospedale, serve una fetta di popolazione molto ampia, e alcune aree sono attive 24 ore su 24, con conseguenti consumi elevati. I pazienti, inoltre, necessitano di requisiti particolari di temperatura e ventilazione.

Il secondo paper analizzato riguarda la LCA del Run Run Shaw Architectural building (RRSAB), un edificio adibito ad uffici situato a Southeast University, nell'area di Nanjing, in Cina (Peng, 2016). Anche in questo caso lo studio della *Life Cycle CO₂* (LCCO₂) viene suddiviso nelle tre fasi di costruzione, operatività e demolizione. Le emissioni di anidride carbonica per i tre stadi risultano essere 10829,62t, 73196t e 1658,52t, rispettivamente il 12,6%, 85,4% e 2% delle 85667,14t totali.

Nello studio è stata anche condotta un'analisi di sensibilità tenendo conto di quattro diversi modelli, e sono emerse le seguenti misure, in ordine di efficacia, per ridurre le emissioni di CO₂ del RRSAB:

1. Ridurre il volume di aria purificata il più possibile nei limiti del mantenimento del comfort;
2. Estendere il range di temperatura interna;
3. Migliorare l'isolamento termico implementando le performance di muri, finestre e copertura;

4. Sfruttare la ventilazione naturale durante le stagioni di transizione, specialmente nelle ore notturne.

Il terzo studio proposto presenta la LCA *cradle-to-grave* di due nuovi edifici con uffici, uno in Europa, nel sud della Finlandia, e uno negli Stati Uniti, nella regione del Midwest.

Per l'edificio europeo, il flusso di materiali ed energia è stato conteggiato in base a piante e specifiche fornite dai progettisti stessi, così come i dati riguardanti le emissioni sono stati collezionati per la maggior parte tramite i manifatturieri e i provider di energia. Nell'analisi sono stati presi in considerazione un totale di 42 materiali da costruzione, e per il calcolo dei consumi di energia nella fase d'uso (elettricità e riscaldamento per una vita nominale di 50 anni) è stato usato il programma di simulazione energetica WinEtana.

Dai risultati si può notare come la fase più impattante a livello ambientale sia quella d'uso, in particolare per quanto riguarda il consumo di energia e le emissioni di CO₂, che rappresentano rispettivamente 87 e 83% dell'intero ciclo di vita. Segue la fase di costruzione, in cui i macchinari producono la maggior parte delle emissioni. I materiali che causano le maggiori emissioni sono il calcestruzzo, responsabile di una percentuale di emissioni tra il 12 e il 40% in ogni categoria d'impatto, e l'acciaio, che copre invece dal 14 al 34%.

Per l'edificio statunitense, l'identificazione e quantificazione del flusso di materiali ed energia si sono basati sul tipico design e lavoro di costruzione degli uffici americani. Lo studio considera 54 elementi costruttivi, costituiti da 23 diversi materiali. L'analisi svolta per la fase d'uso includono riscaldamento, raffreddamento, illuminazione ed elettricità. L'uso di energia e le emissioni sono stimate in base ai dati riguardanti un edificio per uffici tipico, secondo quanto riportato dalla *Energy Information Administration* (EIA).

Anche in questo caso la fase d'uso ha una dominanza sulle altre, tranne per la categoria d'impatto del rilascio di polveri fini; ricopre però almeno il 46% in tutte le categorie. I materiali e la manutenzione ricoprono il 22% o più in ogni categoria. Per quanto riguarda i materiali, il più grande contributo al consumo di energia lo dà la produzione di acciaio, seguito da calcestruzzo, vetro, isolante e rame; tutti questi materiali hanno un impatto significativo in ogni categoria.

In fig. 2.3 è possibile vedere, sotto forma grafica, il peso che ciascuna fase ha sul ciclo di vita dei quattro edifici sopra descritti. Appare chiaro come la *embodied carbon*,

propria della fase operativa del ciclo di vita di un edificio, predomina sugli impatti delle altre fasi.

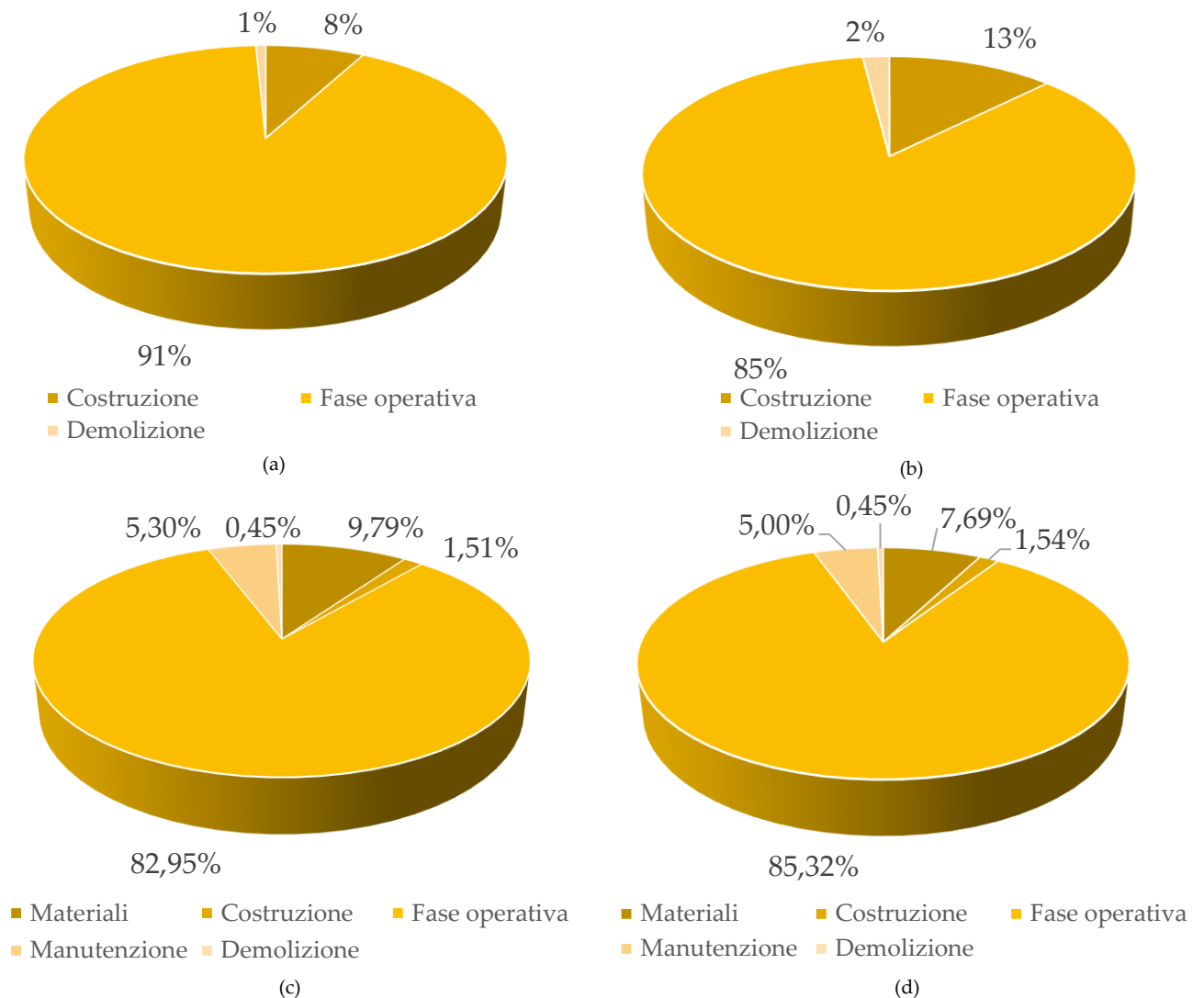


fig. 2.3 - Emissioni di CO2 dei quattro casi studio: (a) Mingguang People's Hospital Building; (b) Run Run Shaw Architectural Building; (c) edificio in Finlandia; (d) edificio nel Midwest. Fonte: grafici dell'autrice

È opportuno, quindi, che i progettisti si concentrino su soluzioni per ridurre i consumi, e quindi le emissioni, collegati ad aspetti già menzionati quali il riscaldamento e raffrescamento, il condizionamento dell'aria eccetera. Tuttavia, gli studiosi raccomandano di non tralasciare l'aspetto legato all'*embodied carbon* e l'inquinamento dovuto ad alcuni materiali.

2.1 Materiali maggiormente impattanti

Come già visto in precedenza, il settore edile è responsabile di circa il 40% delle emissioni annuali e globali di CO₂. È stato dimostrato che la fase di utilizzo è la maggiore responsabile di tali emissioni, ed i dati riportati dal Global ABC Status Report 2018 della *International Energy Agency* (IEA) lo confermano (fig. 2.4a). Tuttavia, l'impatto dei materiali da costruzione non è da sottovalutare; infatti, le informazioni tratte sempre dal Global ABC Status Report del 2018 mostrano che il 23% della CO₂ globali derivano da calcestruzzo, acciaio ed alluminio, la maggior parte dei quali vengono impiegati nel settore edile (fig. 2.4b).

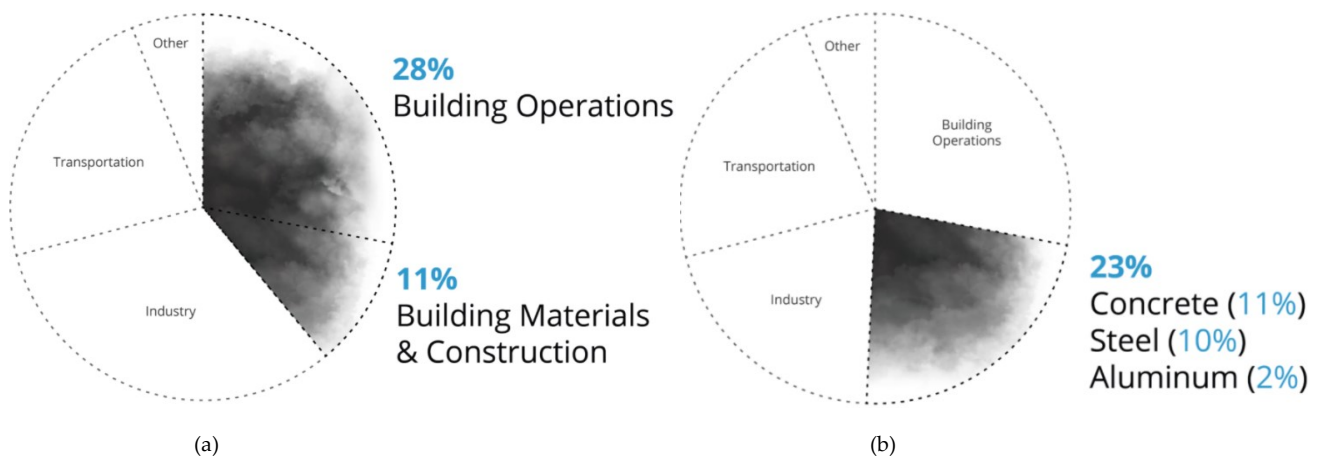


fig. 2.4 - Emissioni di CO₂ annuali. Fonte: Architecture 2030; dati da Global ABC Status Report, IEA

Anche secondo la *Decarbonizing construction: Guidance for investors and developers to reduce embodied carbon* (World Business Council for Sustainable Development, 2021), le quattro categorie di materiali da costruzione più importanti per la *embodied carbon* degli edifici sono calcestruzzo, acciaio, alluminio e plastica. Il combustibile utilizzato nei processi di movimento del terreno, trasporto di materiale ed altre operazioni di costruzione è anch'esso significativo. Nel report viene presa in considerazione la EC di circa un migliaio di edifici europei presenti nel Carbon Heroes Benchmark Program, con l'accortezza di revisionare i dati rimuovendo i valori estremi, per migliorare la qualità dei risultati. Come si vede in fig. 2.5, acciaio e calcestruzzo sono le uniche due categorie a rappresentare il più grande contributo in tutte le tipologie edilizie. Si segnalano, inoltre, gli isolanti, altri metalli quale l'alluminio, gesso, cemento e malta.

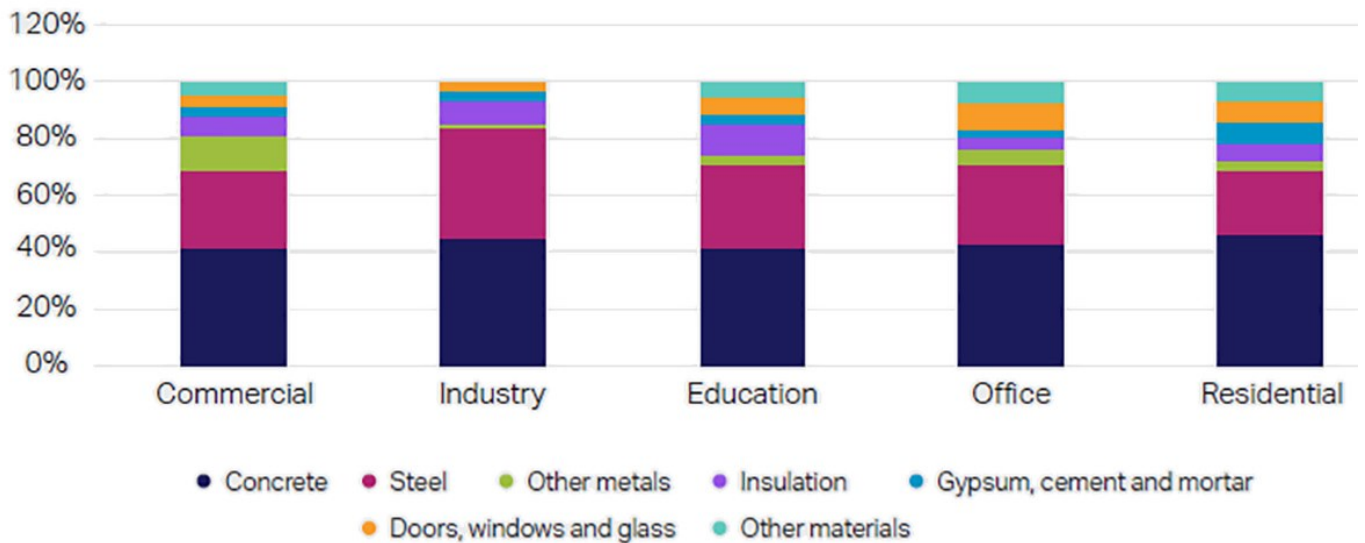


fig. 2.5 - *Embodied carbon* dei materiali per le varie tipologie edilizie. Fonte: WBCSD

Architecture 2030 è un'organizzazione no-profit, apartitica ed indipendente fondata nel 2002 per rispondere all'emergenza climatica attualmente in corso. Con il supporto di *Embodied carbon* Network (ECN), questa organizzazione ha sviluppato Carbon Smart Materials Palette, un "documento vivente" sui materiali da costruzione che viene costantemente aggiornato (*Carbon Smart Materials Palette*, s.d.). Tale sito identifica, per alcuni materiali, gli attributi chiave che contribuiscono al loro impatto ambientale.

Per quanto riguarda il calcestruzzo, ad esempio, il cemento Portland ne è l'ingrediente principale nonché maggior responsabile delle emissioni. La CO₂ viene emessa soprattutto in due punti della produzione:

1. Circa il 40% è generato dall'utilizzo di combustibile fossile nel processo manifatturiero;

Circa il 60% deriva dai naturali processi chimici che avvengono in fase produttiva.

La fig. 2.6 mostra la schematizzazione del ciclo di vita del materiale.

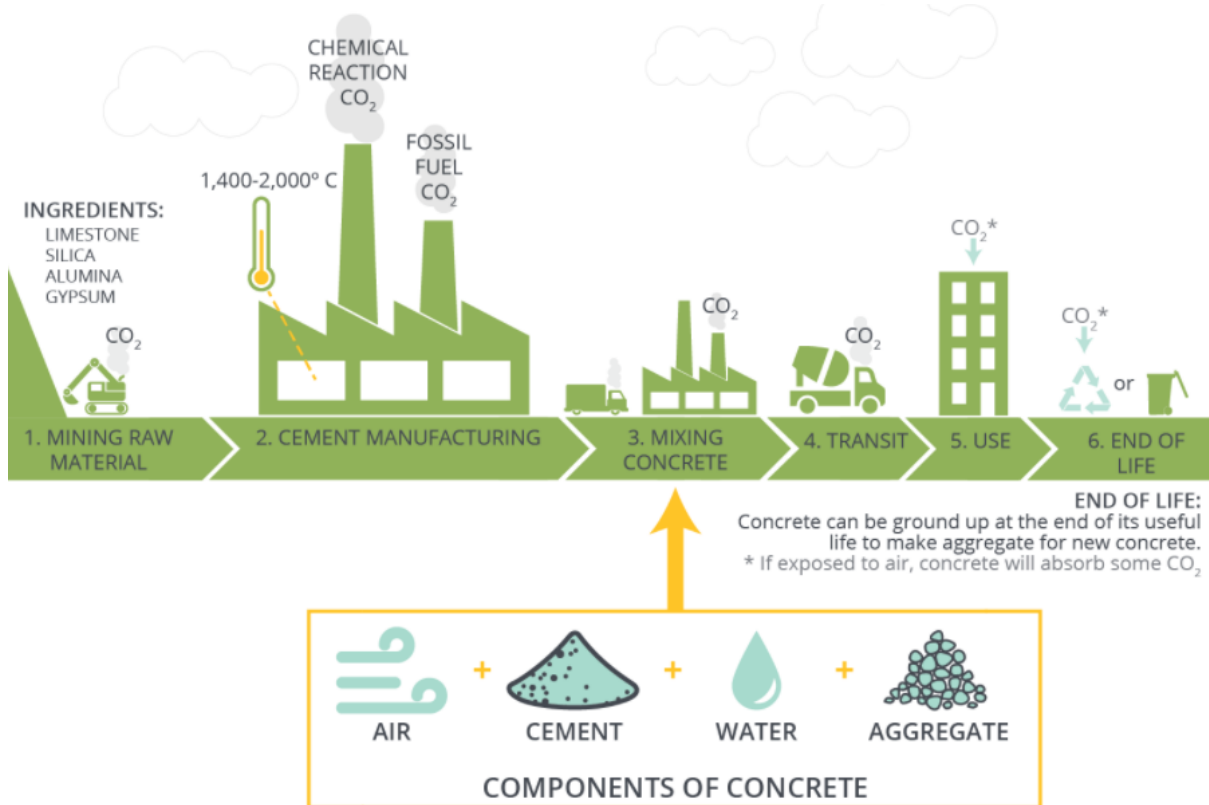


fig. 2.6 - Emissioni del calcestruzzo durante il suo ciclo di vita. Fonte: Architecture 2030 (2019)

Secondo Carbon Smart Materials Palette, alcune soluzioni per ridurre l'impatto legato al calcestruzzo possono essere la diminuzione della quantità di cemento usato per unità di volume di prodotto finito, l'utilizzo di materiali cementizi integrativi derivati da fonti *non-fossil fuel based* (SCMs)⁹, l'uso di aggregati più grandi quando possibile. Anche alcune modifiche nel sistema di produzione possono portare a benefici in termini ambientali: le fornaci usate per la produzione di cemento, in ordine di consumo di energia dal meno al più dispendioso, sono quella a secco con preriscaldatore e precalcinatore, la fornace a secco con solo preriscaldatore, il lungo essiccatoio ed il forno umido. I primi due, ad esempio, utilizzano circa l'85% in meno di energia del forno umido. Alcuni metodi di miscela del calcestruzzo riescono a raggiungere buone prestazioni con una richiesta di cemento minore: il metodo "*scattering-filling aggregate process*" utilizza la vibrazione per distribuire gli aggregati durante la colatura di cemento, riducendo il volume impiegato di quest'ultimo del 10-

⁹ Come ad esempio la *Glass Pozzolan*, consistente in vetro riciclato macinato, ed il *Rice Husk Concrete*, derivato dai sottoprodotti agricoli degli scarti della macinazione del riso. Tali "bucce" sono costituite da circa l'85-90% di silice amorfa più circa il 5% di allumina, rendendo la cenere altamente pozzolanica (CONCRETE – Carbon Smart Materials Palette, s.d.).

30%.

La produzione di acciaio, riassunta in fig. 2.7, avviene invece in due diversi tipi di fabbrica:

- Fornaci basiche ad ossigeno (BOF), che estraggono il ferro dai minerali ferrosi tramite combustione di carbone o gas naturale, mescolandolo poi con scarti di ferro e acciaio per costruire nuovo acciaio. Vengono utilizzate principalmente nelle grandi catene.
- Forni elettrici ad arco (EAFs), che fondono residui di ferro e acciaio per creare nuovo acciaio. Per il fatto che utilizzano quasi solo materiale riciclato e sono alimentati elettricamente invece che a carbone, questi producono circa il 50% in meno di emissioni rispetto ai BOFs.

Come si vede in figura, nonostante i forni elettrici ad arco siano molto meno impattanti, vengono usati per poco meno della produzione di un terzo dell'acciaio globale.

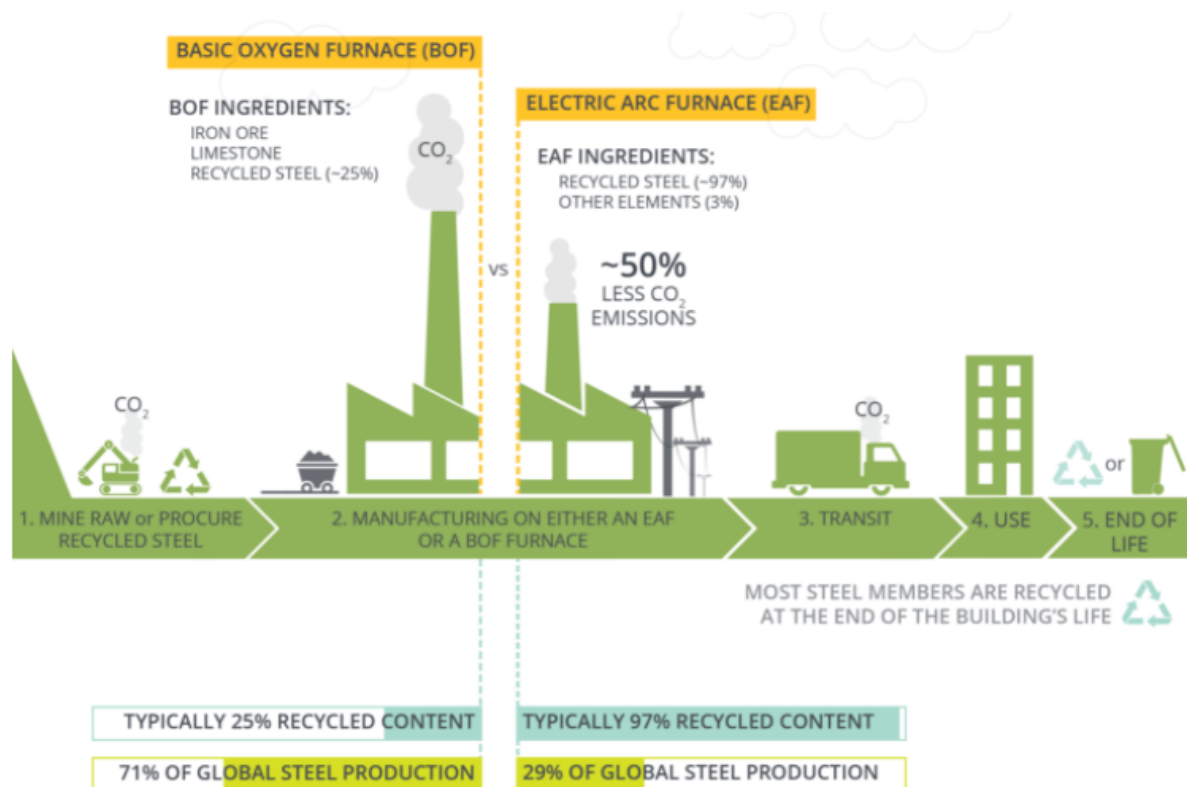


fig. 2.7 - Emissioni dell'acciaio durante il suo ciclo di vita. Fonte: Architecture 2030 (2019)

Ajayi et al. (Ajayi et al., 2015) nel loro articolo si propongono di determinare l'impatto che i materiali hanno sulle emissioni di gas serra dell'intero ciclo di vita di

un edificio; inoltre, comparano gli impatti ambientali degli edifici basati su combustibili fossili con quelli alimentati da energie rinnovabili, con l'obiettivo di determinare se i cosiddetti "*environmental friendly buildings*" siano effettivamente salutari per l'essere umano.

Il paper tratta come caso studio una scuola primaria a due piani con vita nominale pari a 30 anni. Si è scelto di ipotizzare cinque diverse opzioni:

- A. Edificio in blocchi di mattoni;
- B. Struttura in legno;
- C. Edificio in Insulated Concrete Form, ovvero un sistema costruttivo per realizzare pareti in cemento armato mediante casseri isolanti (anche denominati "pannelli ICF"), solitamente in polistirolo, che rimangono inglobati nel getto e hanno funzione di isolamento termico permanente;
- D. Struttura in acciaio;
- E. Edificio in mattoni. Variante dell'opzione A alimentata da fonti di energia rinnovabile, elaborata sfruttando *Energy End-use Chart* di *Green Building Studio* (GBS). È stato ipotizzato un sistema fotovoltaico la cui *embodied energy* è stata assunta pari a $60\text{gCO}_2/\text{Kwh}$, facendo una media dei valori ricavati dalla letteratura.

L'analisi d'inventario è stata svolta utilizzando le quantità di materiali ricavati da Revit, poi immesse in ATHENA Impact estimator. L'inventario dell'energia utilizzata durante la fase operativa per ciascun design proposto è stato svolto grazie al plug-in di Revit Green Building Studio. Le due principali categorie d'impatto considerate nello studio sono *Global Warming Potential* (GWP) ed *Human Health particulate* (impatti HH).

Dai risultati, presentati nel grafico in fig. 2.8, si può notare come l'impatto in termini di CO_2 equivalente dell'intero ciclo di vita delle prime quattro tipologie sia, in ordine decrescente: calcestruzzo isolato (opzione C), struttura in acciaio (opzione D), mattoni tradizionali (opzione A) ed infine struttura in legno (opzione B), che ha il più basso GWP.

È da notare che l'opzione E, rispetto alla A, presenta una diminuzione di $3.788.973\text{ kgCO}_2$, e in generale produce molte meno emissioni di tutte le altre varianti. Ciò dimostra che le decisioni riguardanti le fonti di energia che alimentano la fase operativa abbiano più peso della scelta dei materiali.

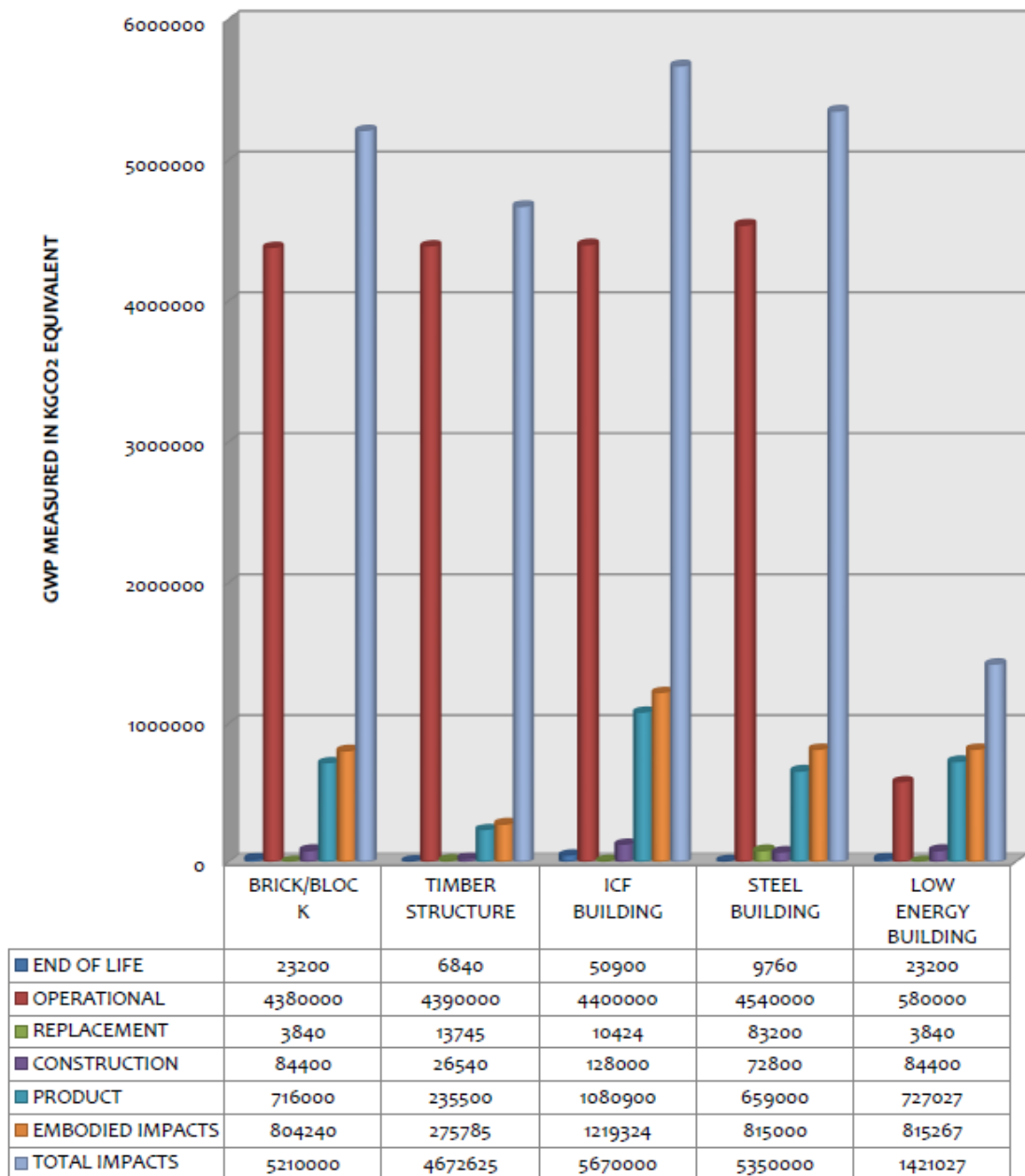


fig. 2.8 - Valutazione comparativa del GWP delle cinque tipologie di edificio. Fonte: Ajayi et al., 2015

Lo studio, come detto, analizza anche l'impatto a livello di salute umana tramite l'*Human Health criteria*, dimostrando come questo sia linearmente collegato al GWP: può quindi concludersi che più un edificio è "verde" in termini di GWP e più è salutare, sia per chi ne usufruisce che per gli operai che lo costruiscono.

Dal grafico presentato e dai risultati ottenuti è possibile trarre ulteriori conclusioni:

- Vi è una diretta correlazione tra l'*embodied impact* e quello totale; inoltre, vi è un rapporto lineare anche tra l'*embodied GWP* e l'*embodied health impact*.

- La struttura in acciaio ha il maggiore impatto della fase operativa, e ciò comporta un GWP totale particolarmente alto.
- Quando viene valutata la LCA di un edificio nella sua interezza, lo spessore e l'efficienza del sistema di isolamento è un fattore che impatta molto l'intero ciclo di vita: si può vedere, infatti, come la struttura di legno abbia un impatto della fase operativa maggiore di quella in mattoni, e ciò è dovuto al sistema di muratura a cavità massiccia.
- Nonostante l'*embodied impact* cresca con l'utilizzo di tecnologie rinnovabili, questa discrepanza è irrilevante comparata alla grande diminuzione dell'impatto della fase operativa.

In conclusione, la soluzione con cemento isolato ha un impatto peggiore sull'ambiente e sulla salute delle persone rispetto alla costruzione in acciaio, che a sua volta ha un impatto peggiore della costruzione in mattoni/ blocchi. La struttura in legno è la più ecologica di tutte le tipologie ipotizzate nello studio. Tuttavia, vi è la necessità di un isolamento efficiente in tale sistema costruttivo, in modo che gli impatti ambientali e sulla salute evitati a causa della *embodied energy* non vadano compensati da impatti operativi più elevati.

È possibile concludere che la scelta dei materiali giochi un ruolo fondamentale per la progettazione sostenibile di un edificio: essi sono determinanti per l'impatto che la *embodied carbon* avrà sull'intero ciclo di vita del manufatto, fermo restando che questa contribuisca significativamente meno della *operational carbon*.

2.2 Distribuzione dell'impatto ambientale fra gli elementi di un edificio

Definite le fasi in cui si concentrano la maggior parte delle emissioni di CO₂ e i materiali rilevanti per la *embodied carbon* di un edificio, la ricerca si propone di capire quali elementi costruttivi abbiano maggior peso sulla *carbon footprint* totale, e perché. In particolare, dopo un'attenta esamina della letteratura presente, si è scelto di considerare ed analizzare i tre seguenti aspetti: struttura, tamponamenti e isolamento.

Solitamente il design della struttura di un edificio si basa su tre fattori: la resistenza ai carichi laterali del sistema, il materiale e l'altezza del sistema strutturale; nel processo vengono raramente tenute in considerazione le emissioni che tale sistema produce. Dimoudi e Tompa (Dimoudi & Tompa, 2008) nel loro studio su alcuni edifici per uffici costituiti con materiali diversi mostrano come la maggior parte della *embodied energy*, tra il 59,57 e 66,73%, appartenga alla struttura in calcestruzzo armato. Anche Ji et al. (Ji et al., 2014) dimostrano che la *embodied energy* di una struttura in calcestruzzo

può arrivare a comprendere fino al 40% di quella totale.

Si presenta ora lo studio di Moussavi Nadoushani e Akbarnezhad (Moussavi Nadoushani & Akbarnezhad, 2015), in cui vengono analizzati cinque alternative strutturali pensate per tre diverse altezze, per un totale di quindici casistiche. Oltre all'altezza viene quindi variato il materiale (calcestruzzo o acciaio) e il sistema resistente ai carichi laterali (controventato o no). Gli autori, basandosi sui dati raccolti da alcuni studi, come ad esempio quello di Dadoo et al. (Dadoo et al., 2012), affermano che l'*operational carbon* delle strutture sono pressoché insignificanti; tali analisi si sono quindi concentrate prettamente sulla *embodied carbon*. Lo studio qui proposto, che tiene conto di come le caratteristiche strutturali influiscano sulla *carbon footprint* totale, considera l'intero ciclo di vita dell'edificio ipotizzato. Le varianti previste, riportate in fig. 2.9, sono state pensate per una zona a moderato rischio sismico, modellate con ETABS 9.7.0 e analizzate tramite un'analisi pseudo-dinamica. Per la fase di estrazione e manifattura dei materiali, è stato ricavato un computo dei materiali utilizzati dal design software, e queste quantità sono state moltiplicate per i fattori di *embodied energy* ed *embodied carbon* riportati nel database ICE per ogni materiale.

Per il calcolo delle emissioni dovute al trasporto è stato innanzitutto associato un metodo di trasporto ad ogni materiale; è stata poi calcolata la distanza da compiere tra l'origine e la destinazione del materiale, il numero di viaggi da fare a seconda della quantità di materiale richiesta ed infine sommato tutti gli addendi.

Lo studio evidenzia come, nonostante la maggior parte delle emissioni durante la fase operativa siano dovute al riscaldamento/raffreddamento e ventilazione, spesso viene trascurato il ruolo importante che potrebbero ricoprire le strutture: la massa termica, o inerzia termica, dei materiali indica la capacità che essi hanno di immagazzinare calore, e materiali con una più alta inerzia termica possono accumulare e mantenere nel tempo più calore rispetto ad altri con una minore.

Nel presente studio le possibili configurazioni sono state modellate in Revit e poi esportate in Ecotect per svolgere l'analisi energetica; i risultati sono poi stati convertiti nelle emissioni di carbonio equivalenti.

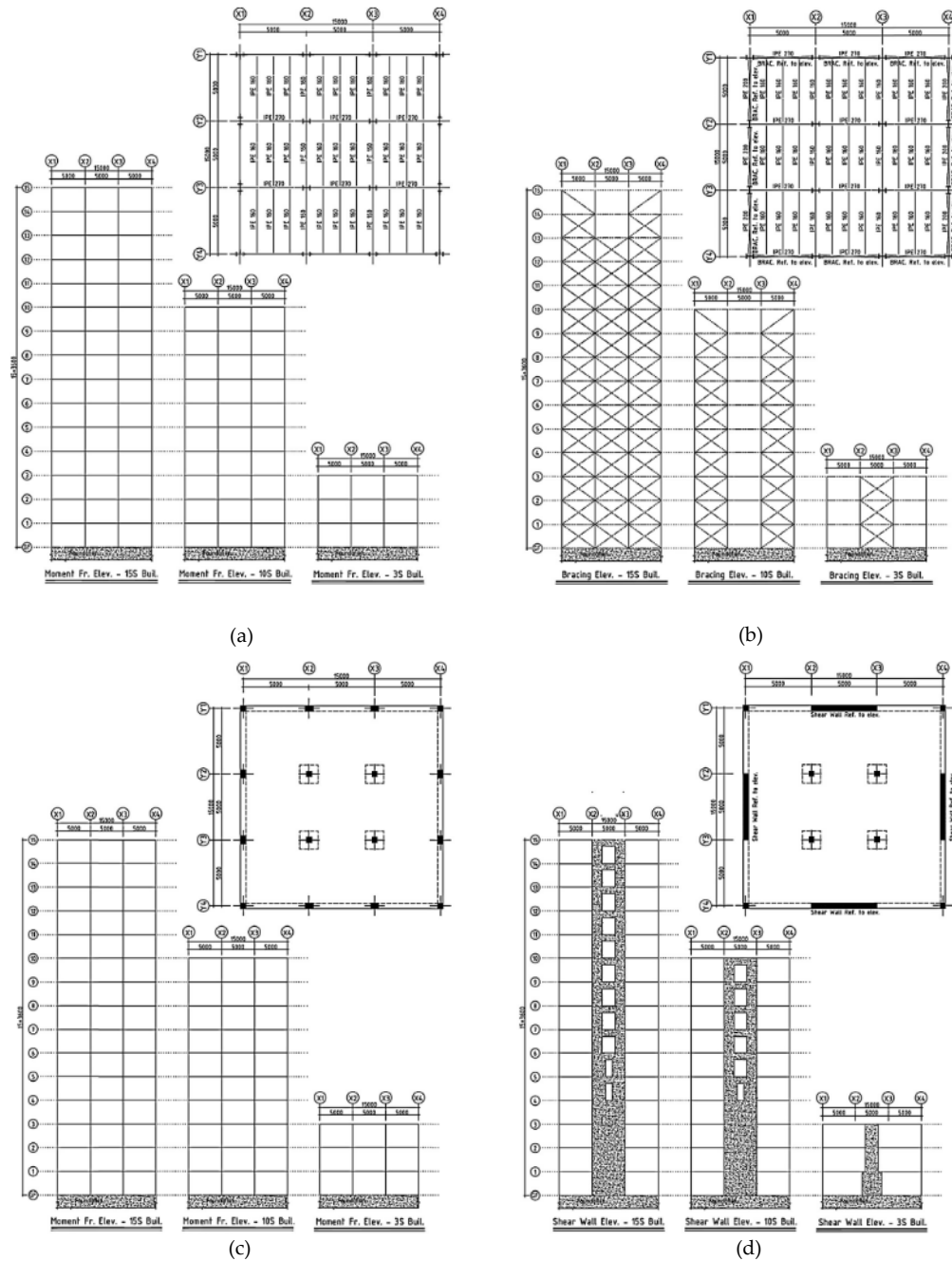


fig. 2.9 - Schemi strutturali ipotizzati (pianche ed alzati): (a) telaio momento resistente in acciaio; (b) telaio controventato; (c) telaio momento resistente in calcestruzzo armato; (d) sistema con pareti a taglio. Fonte: Moussavi Nadoushani & Akbarnezhad, 2015

Le caratteristiche della struttura possono avere un'influenza anche sulla sua demolizione e smaltimento. In questo studio, per analizzare la fase *end-of-life* delle varie configurazioni, è stata utilizzata la stessa metodologia implementata per la fase di costruzione.

I risultati ottenuti sono presentati in tab. 2.3 e in fig. 2.10.

tab. 2.3 – Emissioni di carbonio totali e durante ciascuna fase. Fonte: Moussavi Nadoushani & Akbarnezhad, 2015

Number of stories	Type of structure ^a	Material extraction and manufacturing		Transportation		Construction		Operation		End-of-life (Demolition+Transportation)		Embodied carbon		Life cycle	
		CE (kg CO ₂ -e/m ²)	CE ^b relative to best case ^c	CE (kg CO ₂ -e/m ²)	CE relative to best case	CE (kg CO ₂ -e/m ²)	CE relative to best case	CE (kg CO ₂ -e/m ²)	CE relative to best case	CE (kg CO ₂ -e/m ²)	CE relative to best case	CE (kg CO ₂ -e/m ²)	CE relative to best case	CE (kg CO ₂ -e/m ²)	CE relative to best case
3	S 3S MRF	152.4	15.6%	5.8	1.4%	9.7	0.0%	1820.4	24.2%	3.8	1.0%	167.9	13.1%	1992.1	22.6%
	S 3S BF	132.4	0.5%	5.7	0.0%	10.3	5.9%	1813.3	23.8%	3.8	0.0%	148.4	0.0%	1965.5	21.0%
	S 3S BF-MRF	137.3	4.2%	5.7	0.2%	10.0	2.9%	1816.9	24.0%	3.8	0.3%	153.1	3.1%	1973.8	21.5%
	C 3S MRF	141.4	7.3%	9.4	65.0%	12.6	28.8%	1670.7	14.0%	5.9	56.2%	163.3	10.0%	1839.9	13.3%
	C 3S SW	131.8	0.0%	9.4	65.0%	12.0	23.5%	1465.2	0.0%	5.9	56.4%	153.2	3.2%	1624.3	0.0%
10	S 10S MRF	173.0	11.5%	5.9	0.2%	9.5	0.0%	1685.6	41.4%	4.4	0.3%	188.5	4.4%	1878.5	36.2%
	S 10S 2D BF	169.5	9.3%	5.9	0.2%	10.6	10.9%	1673.0	40.4%	4.4	0.3%	186.0	3.1%	1863.4	35.1%
	S 10S BF-MRF	166.3	7.2%	5.9	0.0%	10.1	5.4%	1675.9	40.6%	4.4	0.0%	182.3	1.0%	1862.6	35.1%
	C 10S MRF	173.1	11.6%	11.6	97.7%	14.8	55.4%	1324.8	11.1%	6.8	54.3%	199.6	10.6%	1531.2	11.0%
	C 10S SW	155.2	0.0%	11.2	90.4%	14.1	47.8%	1191.9	0.0%	6.7	52.5%	180.5	0.0%	1379.1	0.0%
15	S 15S MRF	189.7	4.7%	5.7	0.0%	8.4	0.0%	1595.0	32.2%	5.0	0.5%	203.8	2.9%	2498.6	27.3%
	S 15S BF	181.3	0.0%	6.5	14.4%	10.2	21.7%	1574.5	30.5%	5.0	0.0%	198.0	0.0%	2463.4	25.5%
	S 15S BF-MRF	188.0	3.7%	6.6	14.9%	9.5	13.0%	1586.8	31.5%	5.0	0.4%	204.1	3.0%	2487.1	26.7%
	C 15S MRF	204.4	12.8%	13.2	130.4%	16.1	91.7%	1278.2	5.9%	7.9	57.3%	233.7	18.0%	2076.5	5.8%
	C 15S SW	194.4	7.2%	13.8	142.0%	14.6	74.7%	1206.4	0.0%	7.9	58.1%	222.9	12.5%	1962.7	0.0%

^a Abbreviation format – first letter indicates the material (C: Concrete and S: Steel); middle term indicates the number of stories (3S, 10S and 15S); third term indicates the lateral load resisting system (MRF: Moment Resisting Frame, BF: Braced Frame, and SW: Shear Wall).

^b CE: CO₂ emissions.

^c The best case refers to structural system with the minimum estimated carbon emissions in the particular life cycle phase considered. Only buildings with similar heights are compared.

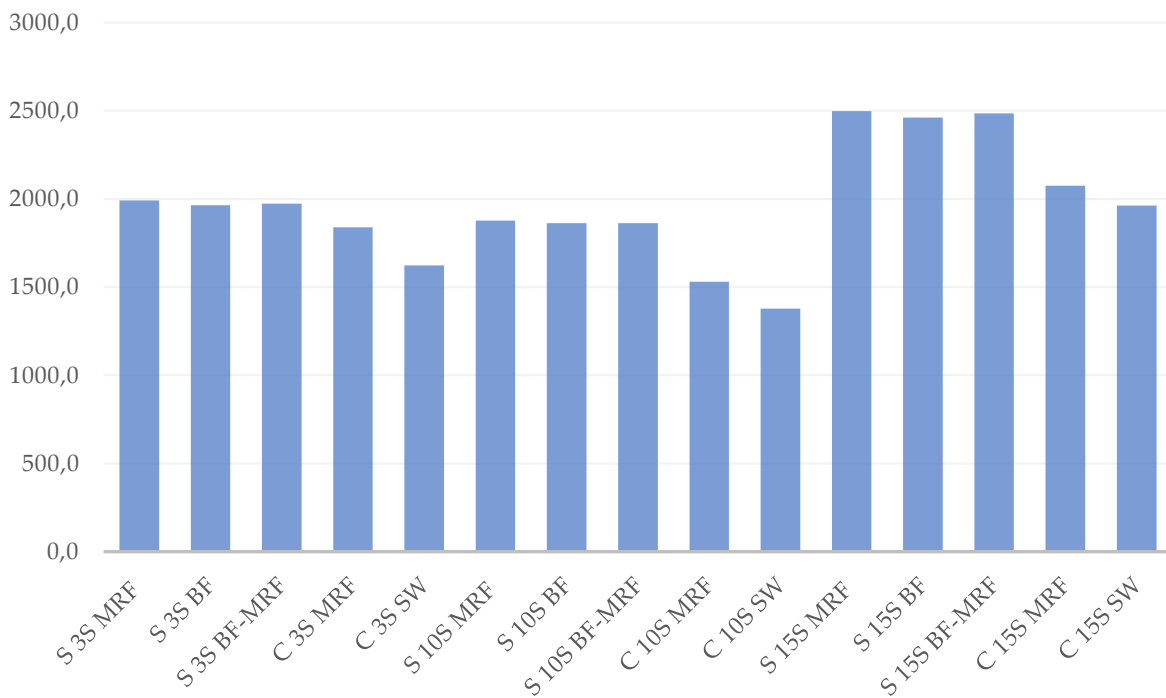


fig. 2.10 – Emissioni di carbonio dell'intero ciclo di vita per metri quadri delle varie opzioni proposte. Fonte: Moussavi Nadoushani & Akbarnezhad, 2015, grafico dell'autrice

I risultati indicano variazioni considerevoli dovute all'altezza dell'edificio nella *embodied carbon* della struttura nell'intero ciclo di vita: questo avviene soprattutto perché, a differenza degli edifici di piccola e media altezza, quelli più alti hanno bisogno di ulteriori accorgimenti per contrastare i carichi laterali. Anche la tipologia di struttura resistente sembra influire, infatti i sistemi con controvento presentano una maggiore *embodied carbon* di quelli senza.

La tipologia di materiale sembra invece influire meno di altre caratteristiche: seppure sia necessaria una maggiore quantità di calcestruzzo per ottenere pari prestazioni dell'acciaio, quest'ultimo presenta un *embodied carbon* di base maggiore.

Lo studio riesce a dimostrare anche come, con le accurate scelte, si possa ridurre la *embodied carbon* dei diversi sistemi strutturali fino a circa il 15%. Riduzioni sull'emissioni dovute al trasporto possono essere fatte scegliendo l'acciaio piuttosto che il calcestruzzo.

Per quanto riguarda la fase operativa, invece, il calcestruzzo sembra avere una performance migliore dell'acciaio, con riduzioni negli edifici di 3, 10 e 15 piani rispettivamente del 24,2, 41,4 e 32,2%.

È possibile vedere dai risultati come la struttura in acciaio comporti una *embodied carbon* minore, mentre andando a vedere le emissioni dell'intero ciclo sia più efficiente il calcestruzzo, poiché permette un notevole risparmio energetico durante la fase operativa. Nelle strutture in calcestruzzo quella globalmente più efficace è la soluzione che comprende pareti di taglio, poiché tende ad aggiungere alla struttura una significativa quantità di massa termica.

Un altro studio interessante ai fini della presente tesi è quello di Eleftheriadis et al. (Eleftheriadis et al., 2018). Secondo gli autori, infatti, una buona integrazione fra le proprietà dei materiali ed il design strutturale può portare a una significativa riduzione del consumo di energia, dei costi e dell'impatto ambientale di un edificio. L'obiettivo della ricerca è quindi duplice: da un lato si intende sviluppare un *building life cycle carbon assessment* integrando una ottimizzazione strutturale multi-obiettivo attraverso il BIM; dall'altro, si vuole investigare le potenziali implicazioni che le soluzioni strutturalmente ottimizzate possono avere sulla *embodied carbon* di un edificio realmente esistente. Il caso studio scelto è un blocco residenziale a dieci piani situato nei pressi di Londra.

Sono stati esclusi dall'analisi il piano terra, il tetto, i balconi e le finestre esterne, per concentrarsi solo sulla struttura, comprensiva di muri interni ed esterni, solai e pilastri in calcestruzzo armato. Non sono state considerate, inoltre, le emissioni dovute alle fondazioni, ai lavori sul terreno e sul paesaggio. Neanche le emissioni dovute ai servizi dell'edificio (ventilazione, illuminazione, riscaldamento) sono state considerate, a causa della mancanza di dati certi. Le fasi del ciclo di vita dell'edificio comprese nei confini del sistema sono dalla A1 a A3, ovvero l'estrazione, il trasporto e la manifattura dei materiali grezzi. Non sono state considerate, inoltre, le emissioni

dovute alle fondazioni, ai lavori sul terreno e sul paesaggio. Le sezioni degli elementi dell'edificio sono state assunte semplificate, poiché l'analisi è stata ipotizzata in una fase iniziale della progettazione.

Le informazioni raccolte per la fase di inventario sono state ricavate dalle EPD degli specifici materiali e la functional unit scelta è 1 m² di area netta di solaio. La fig. 2.11 mostra il diagramma di flusso dell'approccio tramite BIM alla life cycle carbon e ottimizzazione dello studio.

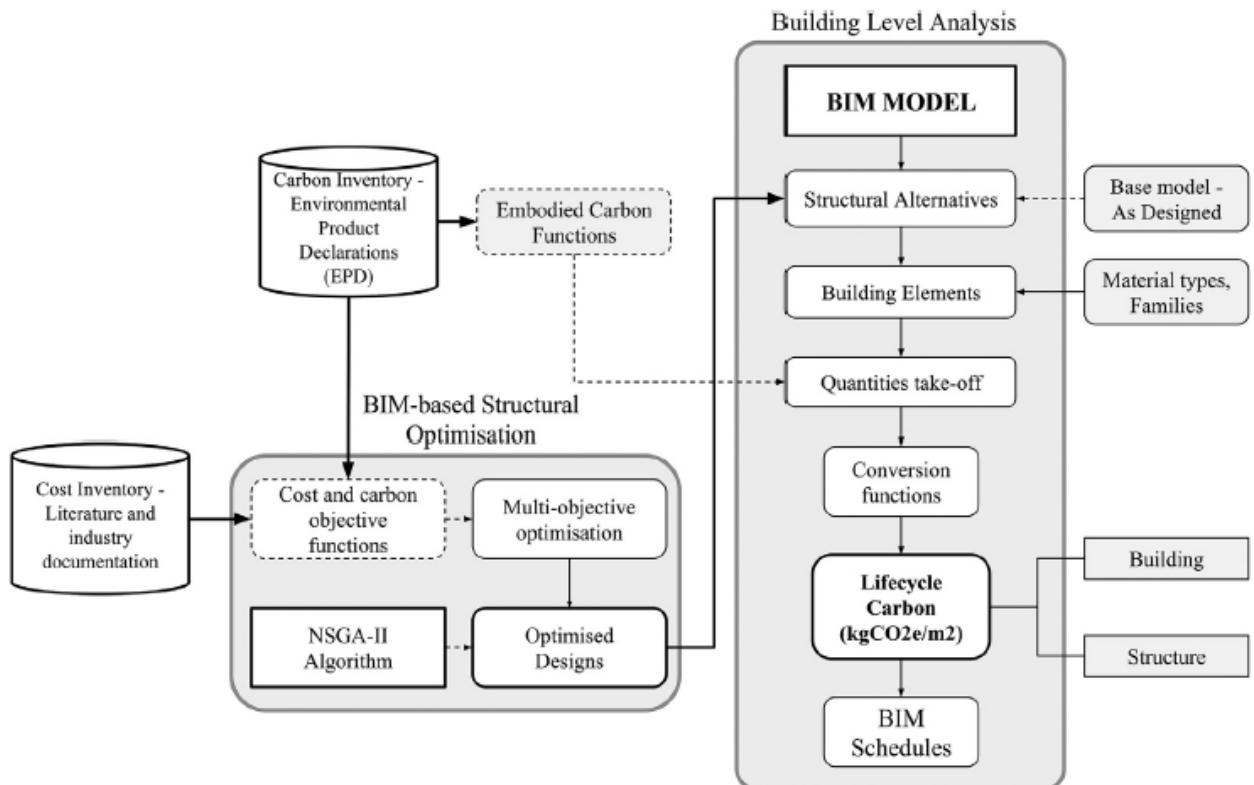


fig. 2.11 - Approccio *BIM-embedded* alle emissioni del ciclo di vita e all'ottimizzazione. Fonte: Eleftheriadis et al., 2018

È stata implementata la metodologia ottimizzata BIM-based di Eleftheriadis et al. per generare alternative di design strutturale ottimali e realistiche. L'algoritmo generico euristico, multilivello e multi-obiettivo NSGA-II è stato utilizzato per trovare la funzione obbiettivo, in termini di costi ed *embodied carbon*, che segue il principio di Pareto (che verrà approfondito al paragrafo "I principi dell'ottimizzazione e la frontiera di Pareto"). L'algoritmo, sviluppato nel linguaggio di programmazione C# utilizzando il software di Autodesk Robot API, interagisce con il modello BIM per ottenere i dati della struttura necessari per l'analisi tramite il modello a elementi finiti (FEM).

Dalla frontiera di Pareto, rappresentata in fig. 2.12, sono state ricavate nove possibili configurazioni ottimizzate (D₀-D₈), e queste sono state confrontate con il design attuale (AD). Il principio di Pareto è stato applicato tenendo conto contemporaneamente di emissioni e costi di costruzione. Le caratteristiche delle strutture ottimizzate sono esplicitate in tab. 2.4.

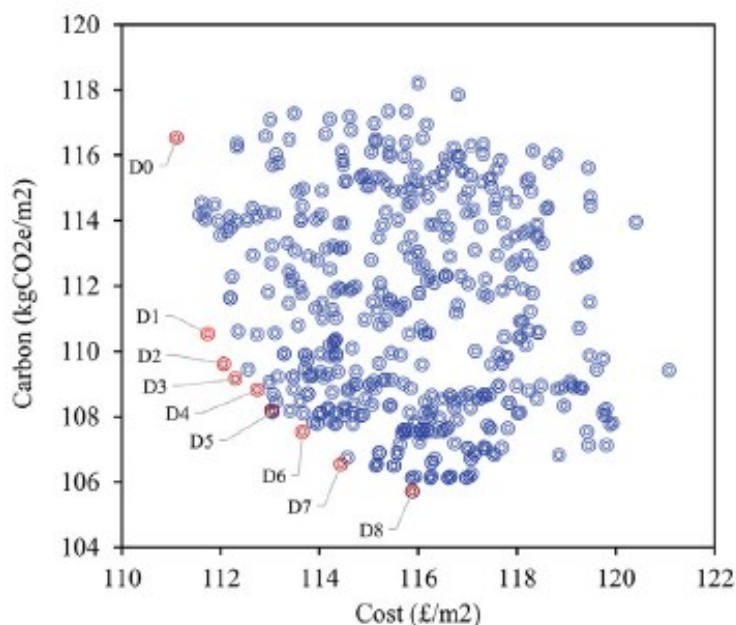


fig. 2.12 - Soluzioni ricavate dall'ottimizzazione e frontiera di Pareto. Fonte: Eleftheriadis et al., 2018

tab. 2.4 - Parametri delle nove configurazioni ricavate dal modello di ottimizzazione. Fonte: Eleftheriadis et al., 2018

Design Solutions	D ₀	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅	D ₆	D ₇	D ₈
Layout									
Bays X (m)	{7.5, 7, 7.5}	{5, 6, 5, 6}	{5, 6, 5, 6}	{7.5, 7.5, 7}	{6, 5, 5, 6}	{6, 5, 5, 6}	{5, 5, 5, 7}	{5, 5, 6, 6}	{5, 5, 5, 7}
Bays Y (m)	{7.5, 7, 7.5}	{7, 7, 8}	{7, 7.5, 7.5}	{5, 5, 5, 7}	{7, 7.5, 7.5}	{6, 5, 5, 6}	{6, 5, 5, 6}	{6, 5, 5, 6}	{6, 5, 5, 6}
Slab thickness (mm)	275	250	250	250	250	250	250	250	250
Columns (mm)	1200x350 (12 columns)	1200x350 (14 columns)	1200x400 (14 columns)	1200x400 (14 columns)	1400x350 (14 columns)	1200x350 (16 columns)	1300x350 (16 columns)	1400x350 (16 columns)	1400x400 (16 columns)
Columns (m ²)	5.04	5.88	6.72	6.72	6.86	6.72	7.28	7.84	8.96
Total weight (t) per floor system	318	299	304	304	304	304	307	310	317
Slab Reinforcement rate (kg/m ²)	93	110	107	105	104	102	100	97	95
Slab Reinforcement Bars	8	10	10	10	9	10	9	9	9
Slab Reinforcement Spacing	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Columns Reinforcement	16 bars (ø16mm)	16 bars (ø16mm)	14 bars (ø16mm)	18 bars (ø16mm)	14 bars (ø16mm)	16 bars (ø16mm)	14 bars (ø16mm)	14 bars (ø16mm)	16 bars (ø16mm)

Il computo della *embodied carbon* è svolto direttamente nell'ambiente BIM, utilizzando le descrizioni geometriche e materiche degli elementi costruttivi. La quantità di materiale è stata combinata con i fattori di carbonio incorporato dei materiali per calcolare le *embodied carbon emissions* totali.

È stata svolta un'analisi comparativa della situazione reale e di quelle ottimizzate, da cui è possibile trarre alcune conclusioni.

Nel design reale si può notare un rinforzo delle solette molto più alto delle soluzioni ottimizzate, circa il 50% in più, nonostante quello presente nelle ultime due sia più effettivo. Inoltre, i modelli ottimizzati aumentano l'area delle colonne per migliorare l'efficienza strutturale globale.

In fig. 2.13 sono presentati i risultati della soluzione reale: è possibile notare come le emissioni dei muri esterni siano di molto superiori a quelle di tutte le altre partizioni, ma che la *embodied carbon* comprensiva di tutte le murature sia nettamente minore di quella dei solai interni.

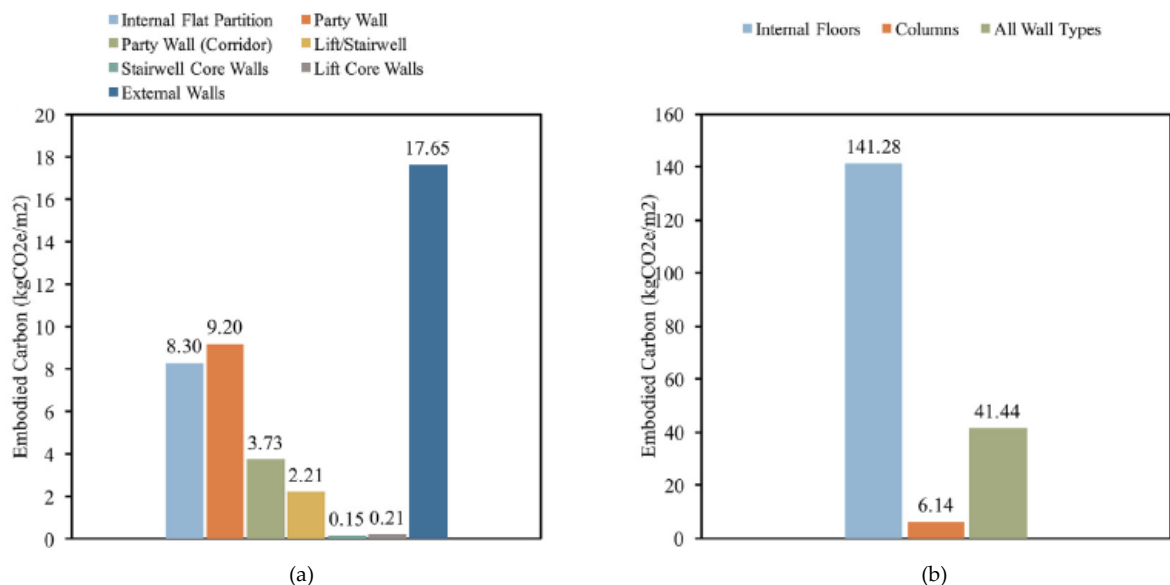


fig. 2.13 - *Embodied carbon* di (a) muri interni ed esterni; (b) pilastri, solai e murature. Fonte: Eleftheriadis et al., 2018

Nelle nove configurazioni ottimizzate sono state analizzate le *embodied carbon* dei materiali che compongono solai e pilastri (fig. 2.14). In entrambi i casi e in tutte le soluzioni emerge ancora una volta il calcestruzzo come materiale più impattante: questo, insieme all'acciaio dell'armatura, ricoprono quasi il 100% delle emissioni dei pilastri.

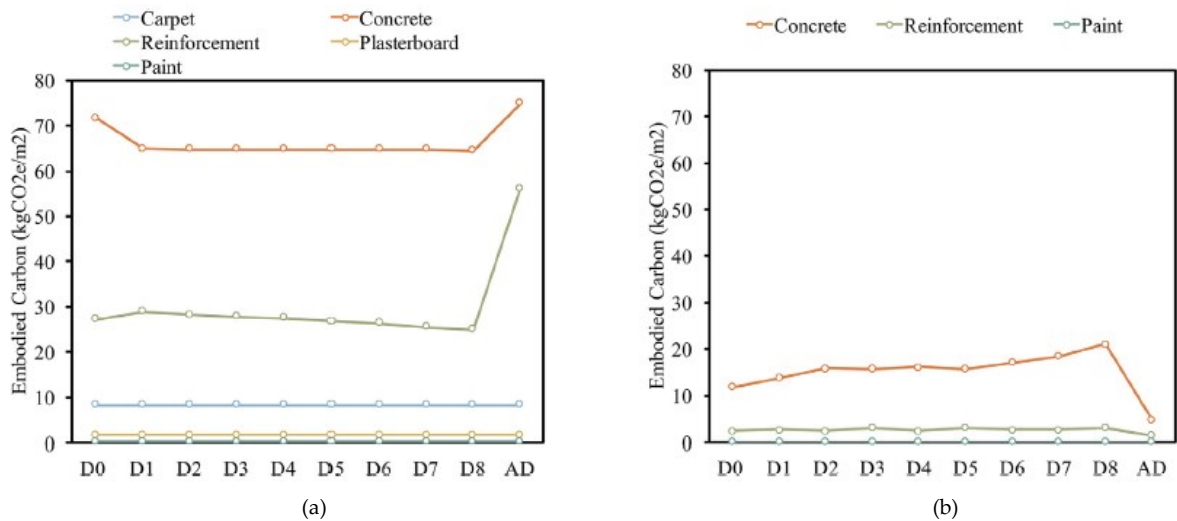


fig. 2.14 - *Embodied carbon* di ciascun materiale per (a) solai interni e (b) pilastri. Fonte: Eleftheriadis et al., 2018

Confrontando i casi ottimizzati con il design attuale emerge un chiaro *trade-off* tra le emissioni dovute ai solai e quelle dei pilastri. Infatti, tutte le soluzioni ottimizzate presentano colonne più tozze e solai più fini del caso reale. Viene distribuita anche la proporzione che questi due fattori – solai e pilastri – hanno sulla carbon emission totale: il contributo dei solai è ridotto da 78% ad una media di 67%, mentre quello dei pilastri è aumentato da 3 a 12%.

Nei casi ottimizzati analizzati è emerso che la *embodied carbon* della struttura può essere ridotta del 16-19% rispetto alla configurazione reale, e in particolare le soluzioni D₁ e D₅ sono le più efficienti. Nello studio viene evidenziato come lo spessore dei solai possa influenzare le emissioni di carbonio delle murature presenti, ma che la variazione è minima. In conclusione, la ricerca sottolinea come la struttura sia maggiormente responsabile della *embodied carbon* dell'intero edificio, e che questa può quindi essere ridotta grazie ad un'ottimizzazione strutturale.

Per approfondire il contributo che i tamponamenti ed il sistema murario di un edificio ha sulla *carbon footprint* totale si considera ora l'articolo di Kyriakidis et al. (Kyriakidis et al., 2018). Lo studio, infatti, si concentra su tre murature tipiche del sud Europa, ovvero tamponamenti in mattoni cotti, pannelli in cartongesso e pareti portanti in muratura di adobe. In particolare, dopo un'analisi dello stato dell'arte, il paper si concentra sulle proprietà termiche ed energia incorporata dei suddetti, confrontandoli. Dall'analisi di letteratura è emerso che solitamente la performance termica di un sistema murario viene quantificata attraverso la trasmittanza termica U; inoltre, si dà importanza anche alla massa termica, poiché è considerata un buon indicatore della risposta termodinamica. I parametri utilizzati per descrivere la massa termica sono lo sfasamento termico (*time lag*) e il fattore di decremento. Lo sfasamento

«indica l'attitudine di un elemento edilizio a rallentare il flusso termico, spostando nel tempo gli effetti delle escursioni termiche esterne» (Dandri, 2019); in altre parole, misura la differenza di tempo fra la registrazione della massima temperatura all'esterno e all'interno della superficie. Il fattore di decremento, o attenuazione, invece, «indica l'attitudine di un elemento edilizio a ridurre gli effetti delle escursioni termiche esterne così come percepiti all'interno degli ambienti» (Dandri, 2019). Asan (Asan, 2006) conclude che lo spessore del muro influenza drammaticamente la massa termica.

Per quanto riguarda la *embodied energy*, gli studi analizzati da Kyriakidis et al. dimostrano come i muri in mattone siano fra le componenti edilizi a maggior consumo di energia, e che le tecniche di posa tradizionali richiedono più energia dei sistemi con pannelli prefabbricati. Alcuni sistemi di efficientamento sono stati proposti negli studi revisionati, il più quotato dei quali è l'aggiunta di livelli isolati termicamente: Ozel e Pihtili (Ozel & Pihtili, 2007) hanno determinato lo spessore di isolante termico da installare nelle varie tipologie di muratura per ottenere la massima ottimizzazione.

Nello studio di Kyriakidis et al. simulazioni di flusso di calore sono state svolte con modelli ad elementi finiti delle tre tipologie costruttive sopracitate per ricavare il valore di U, di sfasamento termico e di fattore di decremento, mentre la *embodied carbon* è stata ricavata dall'analisi di letteratura. Cioè è stato svolto sia prima che dopo aver applicato l'opportuno sistema di isolamento.

Nell'analisi sono state considerate le seguenti nove opzioni (rappresentate in fig. 2.15), varianti delle sopracitate tipologie:

1. MS1: mattoni perforati in filari e legati tramite uno strato di malta. All'esterno della superficie dei mattoni sono fissati pannelli di polistirene estruso, ed entrambe le facce del muro sono ricoperte da intonaco cementizio.
2. MS1a: variante di MS1 in cui viene installato, nella faccia interna del muro, uno strato di lana di roccia, fissata tramite un telaio metallico. L'isolamento e la griglia sono coperti da una lastra di gesso.
3. MS1b: variante di MS1 con uno strato interno di sughero sorretto da un telaio in legno e nascosto da una lastra in legno.
4. MS2: pannelli di cartongesso (una lastra di cemento esterna ed una di gesso interna, sorrette da un telaio metallico a C) al cui interno è presente uno strato di lana di roccia.

5. MS2a: variante di MS2 al cui interno è stato posto un ulteriore telaio metallico reggente un altro strato di lana di roccia. La finitura interna è realizzata con una lastra di gesso.
6. MS2b: variante di MS2a in cui al posto della lana di roccia più interna è stato lasciato un vuoto, successivamente riempito con sabbia.
7. MS3: muratura sportante in terra. In particolare, la fondazione è costituita da un doppio strato di pietra naturale e malta di calce, mentre sopra vi sono blocchi in adobe. La finitura interna è in intonaco di calce.
8. MS3a: variante di MS3 in cui l'intonaco in calce è stato sostituito con un altro termicamente isolante (sempre in calce).
9. MS3b: variante di MS3a in cui, fra i blocchi e la finitura termicamente isolata, è stato posto uno strato di lana di roccia.

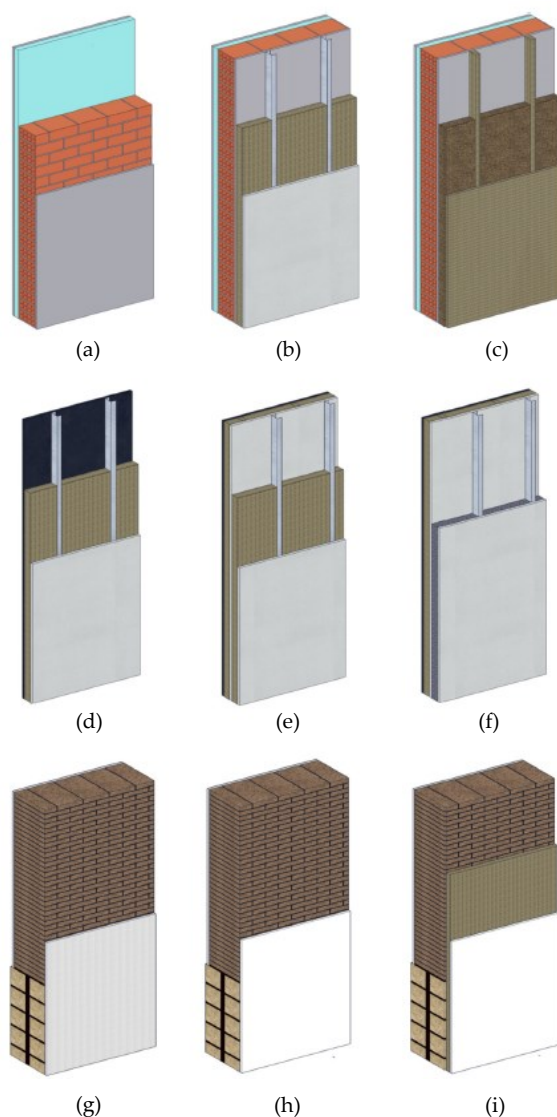


fig. 2.15 - Rappresentazione 3D delle tipologie murarie ipotizzate: (a) MS1; (b) MS1a; (c) MS1b; (d) MS2; (e)MS2a; (f) MS2b; (g) MS3; (h) MS3a; (i) MS3b. Fonte: Kyriakidis et al., 2018

Le proprietà termiche di tali materiali, riportate in tab. 2.5, sono state ricavate da varie normative, mentre i dati sulla *embodied energy* derivano dalla letteratura.

tab. 2.5 - Proprietà dei materiali incorporati nei sistemi murari presentati. Fonte: Kyriakidis et al., 2018, tabella dell'autrice

Materiali	Conduttività λ (W/mK)	Densità ρ (kg/m ³)	Calore specifico C_p (J/kg·K)	Energia incorporata E (MJ/kg)
Mattone cotto in argilla	0,400	1000	1000	3,000
Pietra	1,400	1900	1000	0,300
Mattone in adobe	0,700	1300	1000	0,033
Malta cementizia	0,820	1800	1000	1,550
Malta di calce	0,610	1600	1000	1,800
Malta in terra	0,700	1350	1000	0,033
Lastra in gesso	0,250	900	1000	3,480
Lastra in cemento	0,360	1150	879	6,750
Lastra in legno	0,140	600	1700	15,000
Telaio in acciaio	50,000	7800	450	45,680
Telaio in legno	0,170	700	1600	7,800
Polistirene	0,030	30	1450	88,000
Lana di roccia	0,035	100	1030	16,800
Sughero	0,040	110	1800	4,000
Sabbia	2,000	2200	1000	0,220
Intonaco isolante in calce	0,084	338	1000	7,660

La trasmittanza termica, lo sfasamento ed il fattore di decremento sono stati calcolati tramite i modelli FEM 3D sviluppati con il software di simulazione Comsol Multiphysics 5.2. È stato simulato il passaggio di calore da una faccia all'altra e computate le distribuzioni di temperatura corrispondenti. I valori sono poi stati calcolati analiticamente. I risultati sono riportati in

tab. 2.6 e fig. 2.16.

tab. 2.6 - Performance termica ed impatto ambientale dei sistemi murari studiati. Fonte: Kyriakidis et al., 2018, tabella dell'autrice

Sistema	Trasmittanza termica U (W/m ² K)	Sfasamento termico (h)	Fattore di decremento f	Energia incorporata E (MJ/m ²)
MS1	max: 0,44	7,08	0,007	866
	min: 0,37			
	design: 0,43			
MS1a	0,27	10,95	0,0009	1170
MS1b	0,24	12,04	0,0006	1155
MS2	max: 0,66	2,26	0,0740	501

	min: 0,61		
	design: 0,65		
MS2a	0,30	6,88	0,0140
MS2b	0,61	6,33	0,0200
	max: 2,01		
MS3	min: 1,30	12,94	0,022
	design: 1,38		
MS3a	1,01	13,05	0,0110
MS3b	0,40	14,50	0,0020

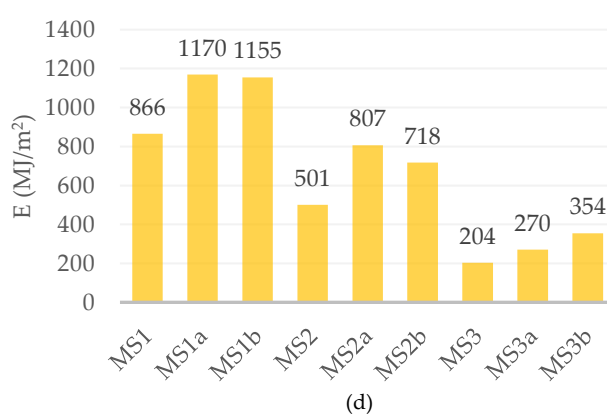
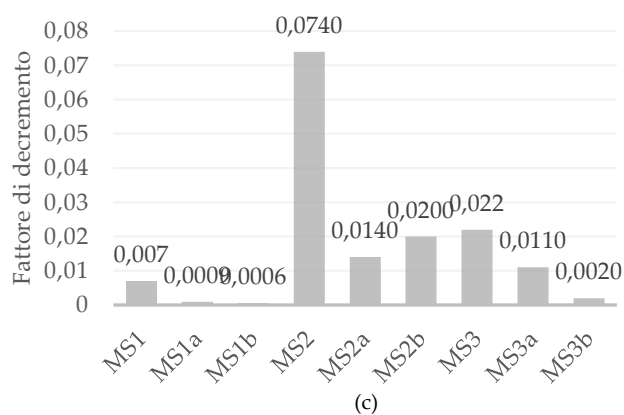
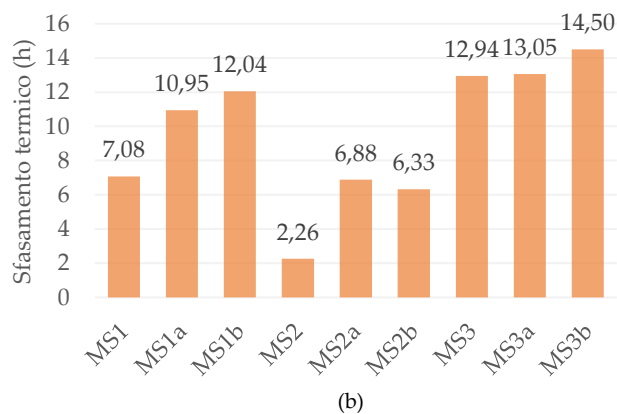
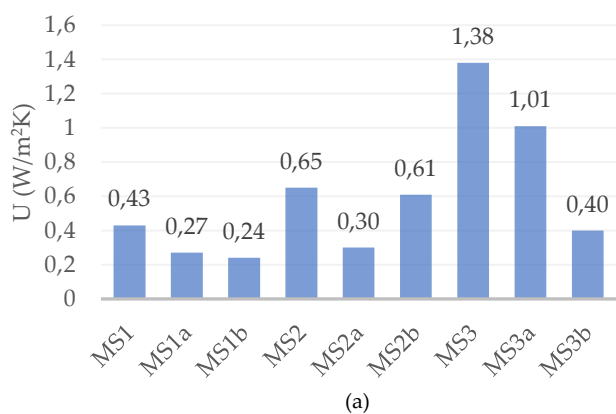


fig. 2.16 – Riassunto dei risultati della ricerca: (a) trasmittanza termica U; (b) Sfasamento termico; (c) fattore di decremento f; (d) energia incorporata E. Fonte: Kyriakidis et al., 2018, grafici dell'autrice

Per MS1 e MS2 si può notare come i valori di U nel design presentato si avvicinino molto a quello massimo possibile in condizioni operative ottimali, mentre per la situazione MS3 l'influenza della variabilità è maggiore - ciò è dovuto probabilmente alla grande dipendenza della conduttività termica di tale materiale dal livello di umidità presente. Similmente, nel caso MS2 il telaio di metallo favorisce i ponti termici; delle situazioni "base" la MS1 sembra essere quindi la migliore, poiché presenta un minore U. Per quanto riguarda il *time lag*, risulta che MS2 abbia il minore mentre MS3 il maggiore. L'importanza della massa termica per il comfort interno è sottolineata dai fattori di decremento: MS1 e MS3 possono infatti mantenere quasi costante la temperatura della superficie interna.

Il muro in adobe contiene il minor valore di *embodied energy*, grazie al suo semplice processo di manifattura; l'energia incorporata delle soluzioni MS1 e MS2 è dovuta principalmente ai materiali isolanti.

Comparando i valori di U delle soluzioni migliorate con quelle base è possibile notare come tutte le nuove soluzioni migliorino le performance termiche. Nel caso di MS1, sia l'installazione dell'isolante in lana di roccia che in sughero diminuiscono il valore di U di almeno il 35%, nonostante il primo abbia un valore ancora più piccolo del secondo.

La soluzione MS2a con doppio strato di lana di roccia riduce il valore di U rispetto a MS2 di ben il 50%, mentre la soluzione MS2b con sabbia presenta una riduzione minima, ovvero 6,5%. Entrambe le soluzioni però mitigano la concentrazione di calore nel telaio metallico, minimizzando il ponte termico e creando una distribuzione di temperatura più uniforme nella faccia interna del muro.

La maggior riduzione del valore di U avviene nel caso del muro in adobe: si passa da un valore di U di 1,38 W/m²K in MS3 a uno di 1,01 W/m²K in MS3a e di 0,40 W/m²K in MS3b. Grandi miglioramenti sono avvenuti anche in termini di sfasamento termico e fattore di decremento, specialmente per le soluzioni MS1 e MS2, e in particolare per quanto riguarda il *time lag* sono rilevanti le soluzioni MS2a e MS2b; il fattore di decremento, in entrambe le soluzioni, scende di almeno il 70%.

La *embodied energy* delle soluzioni migliorate cresce rispetto a quelle base: per le due soluzioni di MS1 la crescita è di circa il 35%, anche se MS1b ha una crescita di energia incorporata minore di MS1a, nonostante migliori la performance in tutti i campi analizzati. La *embodied energy* delle due soluzioni di MS2 cresce rispettivamente

del 60 e 45%.

In conclusione, le soluzioni con mattoni e pannelli in cartongesso hanno valori minori di U rispetto al sistema costruttivo tradizionale in adobe; quest'ultimo però può apportare un sufficiente comfort termico grazie alla sua massa termica, cosa che i pannelli in cartongesso non fanno. La performance termica generale dei sistemi murari è abbondantemente influenzata dalla presenza di ponti termici e dai loro spessori. La *embodied energy* calcolata conferma che la soluzione costruttiva tradizionale in materiali naturali è la più eco-friendly.

Lo studio di Kyriakidis et al. Dimostra quindi come le soluzioni con isolante aggiuntivo migliorino significativamente le performance termiche, a discapito però della *embodied energy*.

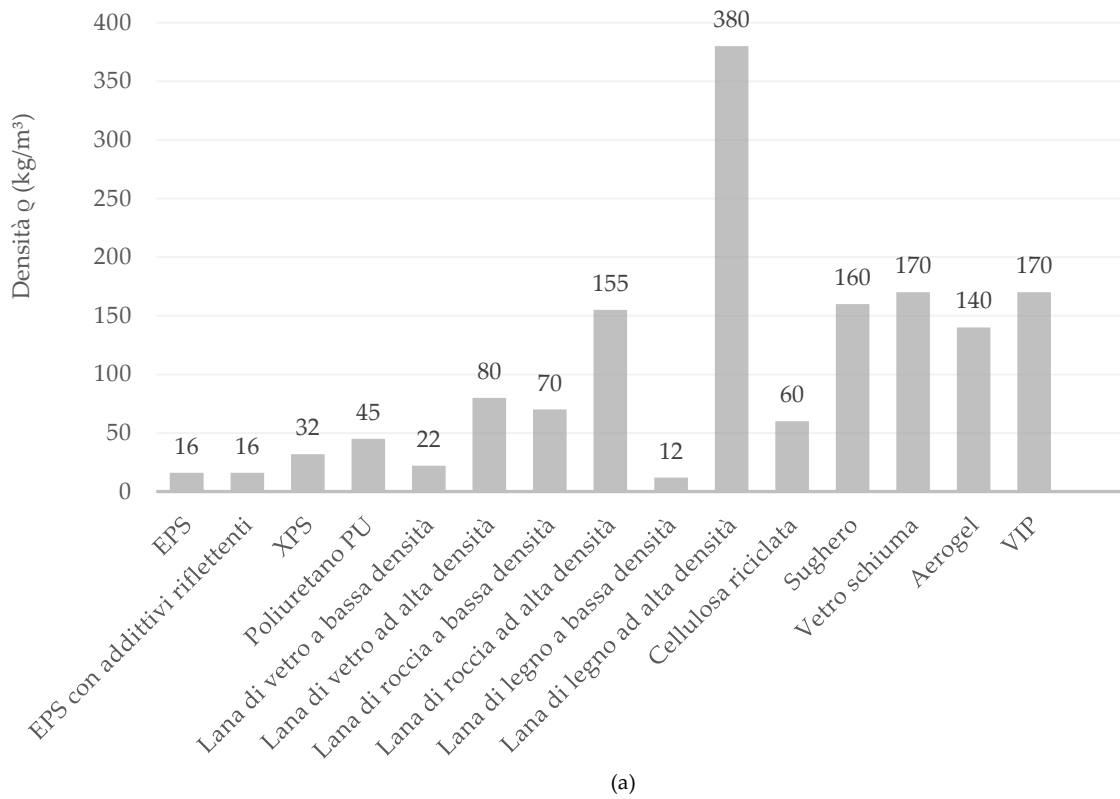
Nella ricerca di Kunič (Kunič, 2017) è stata sviluppata una comparazione quantitativa di quindici diversi materiali isolanti usati solitamente per l'isolamento termico in ambito costruttivo. Essi sono:

1. Polistirene espanso sintetico (EPS);
2. EPS grigio riflettente, con additivi che riflettono i raggi infrarossi;
3. Polistirene espanso estruso monostrato (XPS);
4. Poliuretano (PU);
5. Lana di vetro a bassa densità
6. Lana di vetro ad alta densità
7. Lana di roccia in due diverse densità;
8. Lana di legno in due diverse densità;
9. Cellulosa riciclata;
10. Sughero;
11. Vetro multicellulare o vetro schiuma;
12. Aerogel, ovvero un tipo di silice sinteticamente amorfo e particolarmente leggero;
13. Pannelli sottovuoto VIP (vacuum Insulated Panel).

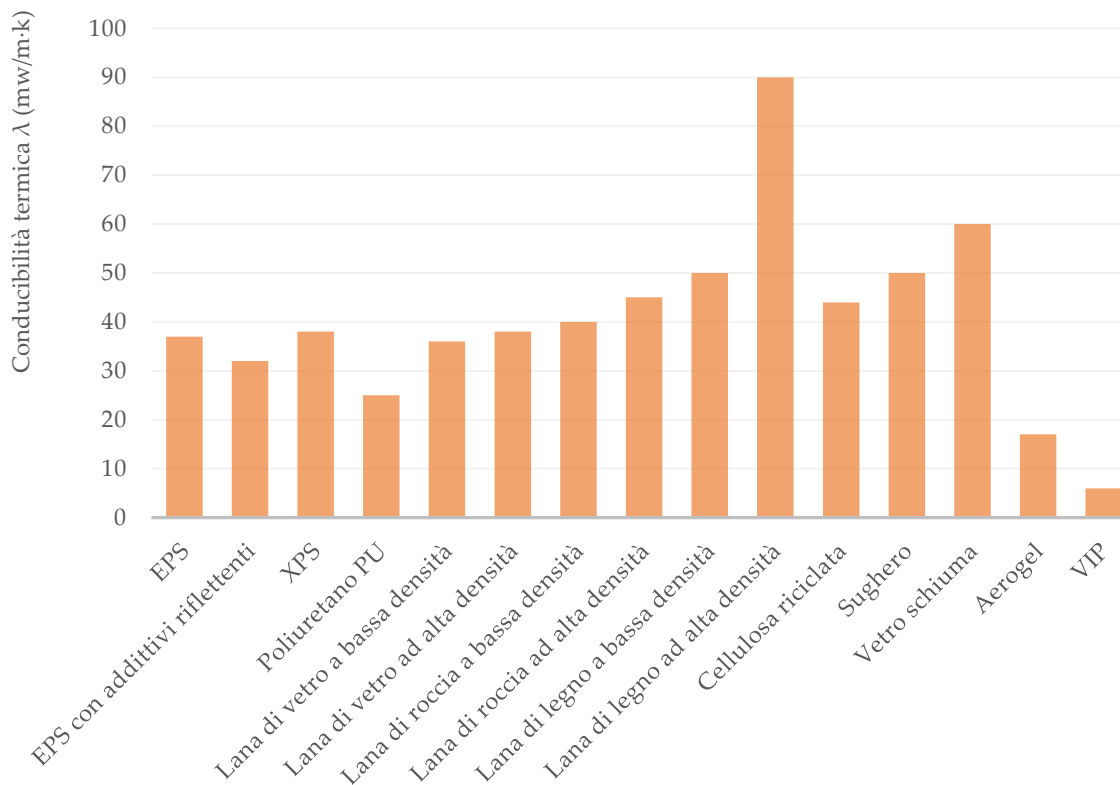
I materiali considerati differiscono per densità - con un range da 16 a 380 kg/m³ - e conduttività termica, compresa tra 6 e 90 mW/(m·K). Densità, conducibilità termica e spessore degli isolanti considerati sono riportati in tab. 2.7 e fig. 2.17.

tab. 2.7 - Densità, conducibilità termica e spessore che il materiale deve avere per ottenere una trasmittanza termica di $U = 0,20$ $W/(m^2K)$. Fonte: Kunič, 2017, tabella dell'autrice

	Densità ρ [kg/m^3]			Conducibilità termica λ [$mW/m \cdot K$]			Spessore richiesto (cm) per ottenere una trasmittanza di $U = 0,20$ $W/(m^2K)$
	Da	A	Più utilizzato nelle pareti esterne degli edifici	Da	A	Più utilizzato nelle pareti esterne degli edifici	
<i>EPS</i>	10	30	16	34	45	37	17,5
<i>EPS con additivi riflettenti</i>	12	28	16	30	35	32	15,2
<i>XPS</i>	28	45	32	31	44	38	18,0
<i>Poliuretano PU</i>	28	100	45	22	30	25	11,8
<i>Lana di vetro a bassa densità</i>	15	40	22	34	40	36	17,0
<i>Lana di vetro ad alta densità</i>	40	150	80	30	45	38	18,0
<i>Lana di roccia a bassa densità</i>	20	120	70	33	42	40	18,9
<i>Lana di roccia ad alta densità</i>	120	200	155	35	48	45	21,3
<i>Lana di legno a bassa densità</i>	50	270	12	38	60	50	23,7
<i>Lana di legno ad alta densità</i>	350	600	380	75	110	90	42,6
<i>Cellulosa riciclata</i>	30	80	60	40	50	44	20,8
<i>Sughero</i>	100	220	160	45	70	50	23,7
<i>Vetro schiuma</i>	90	200	170	38	80	60	28,4
<i>Aerogel</i>	60	160	140	13	24	17	8,0
<i>VIP</i>	150	300	170	3	11	6	2,8



(a)



(b)

fig. 2.17 - (a) densità e (b) conducibilità termica degli isolanti termici presentati. Fonte: Kunič, 2017, grafico dell'autrice

È stata quindi svolta una LCA con il *goal and scope* di comparare gli impatti ambientali dei materiali isolanti selezionati, escludendo il più possibile ogni influenza regionale o specifica. Lo studio si concentra sulla *embodied carbon* dei materiali, escludendo fase d'uso e smaltimento, a causa della mancanza di dati certi.

I dati collezionati sono stati modellati nel software ambientale Simapro, le emissioni e i consumi sono stati tradotti in effetti ambientali e la *carbon footprint* è stata calcolata tramite la metodologia IPCC 2013 GWP 100a V1.02. La *carbon footprint* di ogni materiale è stata calcolata tenendo conto dello spessore dell'isolante termico necessario a garantire una trasmittanza termica di $U = 0,20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

La perdita di calore in un edificio avviene in muri esterni, soffitti, solai, ponti termici, altri trasferimenti termici per conduzione, ventilazione e radiazione; in questa analisi sono stati considerati solo le perdite termiche per conduzione tramite l'involucro esterno dell'edificio durante i periodi riscaldati, ovvero in inverno. Il sistema costruttivo a sostegno di tale involucro è stato supposto il più fine possibile e con la massima conduttività, quindi calcestruzzo armato con spessore di 15 cm. Il calcolo è stato svolto supponendo che l'edificio considerato si trovi a Ljubljana, Slovenia.

Nello studio è stata calcolata anche la cosiddetta *environmental neutrality*, ovvero il periodo di tempo che la *carbon footprint* della perdita di calore tramite involucro esterno impiega per eguagliare la *carbon footprint* dell'isolante termico presente.

In tab. 2.8 e fig. 2.18 sono rappresentate le *carbon footprint* per unità di area necessarie a raggiungere la stessa trasmittanza termica ($U = 0,20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$).

tab. 2.8 - Proprietà fisiche e *carbon footprint* degli isolanti presentati. Fonte: Kunič, 2017, tabella dell'autrice

	<i>Carbon footprint per massa</i> (kg CO ₂ -eq/kg)	<i>Peso di isolante per superficie (1m²) richiesto per U = 0,20 W/(m²K)</i>	<i>Carbon footprint di isolante per superficie (1m²) richiesto per U = 0,20 W/(m²K)</i>
EPS	4,205	2,803	11,8
EPS con additivi riflettenti	4,400	2,424	10,7
XPS	5,840	5,757	33,6
Poliuretano PU	4,307	5,326	22,9
Lana di vetro a bassa densità	1,494	3,750	5,6
Lana di vetro ad alta densità	1,380	14,393	19,9
Lana di roccia a bassa densità	1,082	13,256	14,3
Lana di roccia ad alta densità	0,920	33,023	30,4
Lana di legno a bassa densità	0,062	28,407	1,8
Lana di legno ad alta densità	0,062	161,919	10,0
Cellulosa riciclata	0,367	12,499	4,6
Sughero	1,156	37,876	43,8

Vetro schiuma	1,565	48,292	75,6
Aerogel	4,200	11,268	47,3
VIP	8,551	4,829	41,3

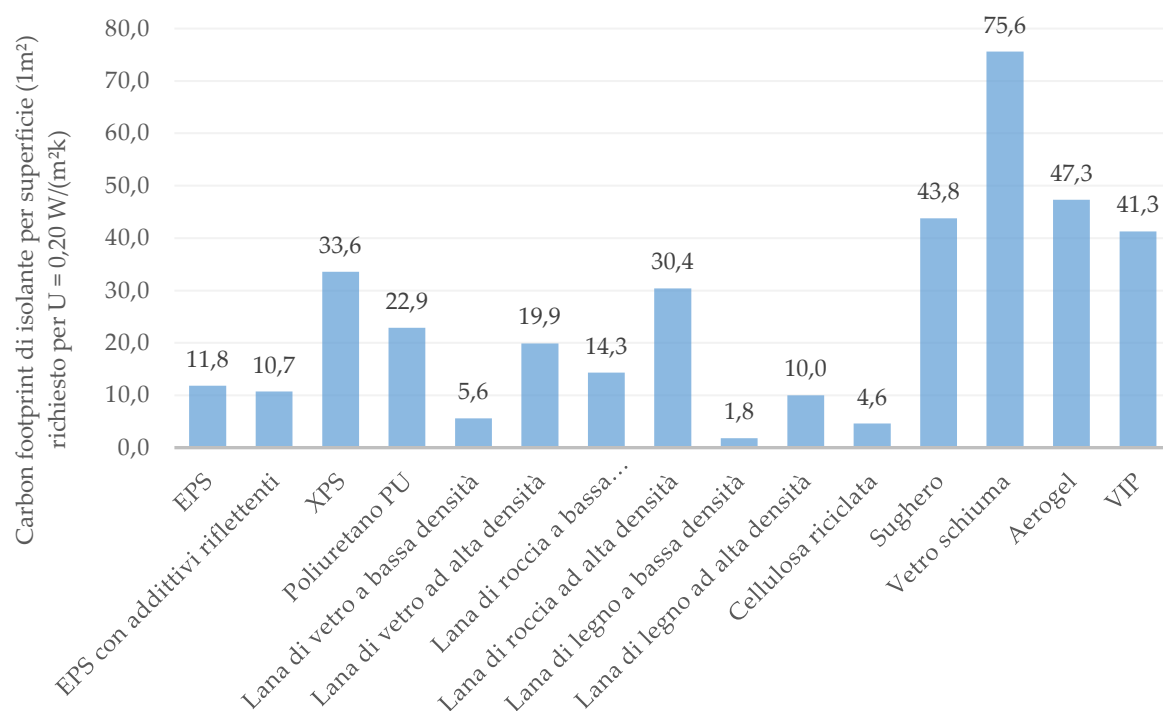


fig. 2.18 - Carbon footprint di ogni materiale isolante per superficie (1m²) richiesto per ottenere una trasmittanza termica pari a U = 0,20 W/(m²K). Fonte: Kunič, 2017, grafico dell'autrice

Come si può notare dalla comparazione, lana di legno e cellulosa riciclata sono i materiali con minore impatto ambientale, e per entrambe una parte significativa della *carbon footprint* è data dagli additivi atti a prevenire l'usura e la combustione. I materiali sintetici hanno un impatto ambientale elevato comparato a quello dei materiali naturali; essi sono però estremamente robusti, compatti, stabili, più facili da installare, più resistenti agli agenti esterni e con una conduttività termica molto bassa nonostante la scarsa densità. I materiali con un impatto ambientale maggiore sono il polistirene estruso, la schiuma poliuretana, il vetro schiuma e la lana minerale ad alta densità.

In tab. 2.9 è possibile notare in quanto tempo, misurato in "stagioni in cui è necessario il riscaldamento" viene raggiunta la *environmental neutrality*. Risulta chiaro come alcuni materiali, ad esempio l'EPS e la lana di legno ad alta densità, raggiungano tale neutralità già dopo il primo ciclo; tutti i materiali analizzati, comunque, la raggiungono nei primi undici cicli.

tab. 2.9 - Carbon footprint degli isolanti termici analizzati e la differenza tra la prestazione di un sistema di isolamento medio e uno performante (con $U = 0,20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) per unità di area (m^2). Fonte: Kunič, 2017, tabella dell'autrice

	Carbon footprint di isolante per superficie (1m^2) richiesto per $U = 0,20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$	Carbon footprint della differenza di perdita di calore tra un involucro esistente medio e uno ben isolato (con $U = 0,20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) per unità di area (m^2)							
	kg CO ₂ -eq/kg	kg CO ₂ -eq/kg							
Stagioni		1°	2°	3°	4°	6°	9°	11°	
EPS	11,8	4,7	-2,4	-9,5	-16,6	-30,8	-52,1	-66,3	
EPS con additivi riflettenti	10,7	3,6	-3,5	-10,6	-17,7	-31,9	-53,2	-67,4	
XPS	33,6	26,5	19,4	12,3	5,2	-9,0	-30,2	-44,4	
Poliuretano PU	22,9	15,8	8,7	1,7	-5,4	-19,6	-40,9	-55,1	
Lana di vetro a bassa densità	5,6	-1,5	-8,6	-15,7	-22,8	-37,0	-58,3	-72,5	
Lana di vetro ad alta densità	19,9	12,8	5,7	-1,4	-8,5	-22,7	-44,0	-58,2	
Lana di roccia a bassa densità	14,3	7,2	0,1	-6,9	-14,0	-28,2	-49,5	-63,7	
Lana di roccia ad alta densità	30,4	23,3	16,2	9,1	2,0	-12,2	-33,5	-47,7	
Lana di legno a bassa densità	1,8	-5,3	-12,4	-19,5	-26,6	-40,8	-62,1	-76,3	
Lana di legno ad alta densità	10,0	2,9	-4,2	-11,3	-18,4	-32,6	-53,9	-68,0	
Cellulosa riciclata	4,6	-2,5	-9,6	-16,7	-23,8	-38,0	-59,3	-73,5	
Sughero	43,8	36,7	29,6	22,5	15,4	1,2	-20,1	-34,3	
Vetro schiuma	75,6	68,5	61,4	54,3	47,2	33,0	11,7	-2,5	
Aerogel	47,3	40,2	33,1	26,0	18,9	4,7	-16,5	-30,7	
VIP	41,3	34,2	27,1	20,0	12,9	-1,3	-22,6	-36,8	

L'analisi finora condotta sulle componenti edilizie struttura, tamponamenti e isolamento porta alla conclusione che l'elemento fra i tre maggiormente rilevante per le emissioni di carbonio del ciclo di vita dell'edificio sia il sistema isolante. Infatti, pur non contribuendo significativamente all'*embodied carbon* quanto, ad esempio, la struttura, la buona qualità e prestanza dell'elemento isolante può determinare una significativa riduzione della *operational carbon*.

2.3 Influenza di involucro e impianto nelle emissioni della fase operativa

Avendo dimostrato come la *operational carbon* occupi una porzione significativa della *carbon footprint* di un edificio, e come questa dipenda dal sistema di isolamento presente, si può dedurre che il rapporto tra involucro esterno ed impianto sia significativo al fine di ridurre le emissioni totali. La domanda che sorge è quindi quanto questo binomio possa fare la differenza. Innanzitutto, è importante chiarire che non esistono dati assoluti; infatti, il clima in cui l'edificio si trova influisce molto sia sulle scelte costruttive che impiantistiche.

Secondo Manzano-Agugliaro et al. (Manzano-Agugliaro et al., 2015) il termine "architettura bioclimatica", o sostenibile, si riferisce ad un metodo costruttivo che tiene conto delle condizioni climatiche locali e che sfrutta diverse tecnologie passive, come ad esempio l'energia solare o le correnti d'aria, per migliorare l'efficienza energetica di un edificio.

Olgyay (Olgyay, 1963) fu il primo a sviluppare un cosiddetto "diagramma bioclimatico" - la *Bioclimatic Chart* - un grafico con umidità relativa sull'asse delle ascisse e temperatura su quella delle ordinate, in cui viene individuata una zona di comfort. In seguito, Givoni (Givoni, 1992) perfezionò la rappresentazione introducendo la sua *Building Bioclimatic Chart* (BBCC), dove curve psicometriche rappresentano l'umidità relativa, mentre lungo l'asse x sono riportate le temperature a bulbo secco e lungo la y l'umidità specifica. Entrambi gli autori, per definire la "comfort zone" dei propri grafici, si sono ispirati alle indicazioni proposte da ASHRAE (ASHRAE, 2001) nel *Fundamentals Handbook*.

In maniera analoga, Manzano-Agugliaro et al. utilizzano il diagramma di Givoni e su di esso individuano quattordici differenti zone climatiche (fig. 2.19).

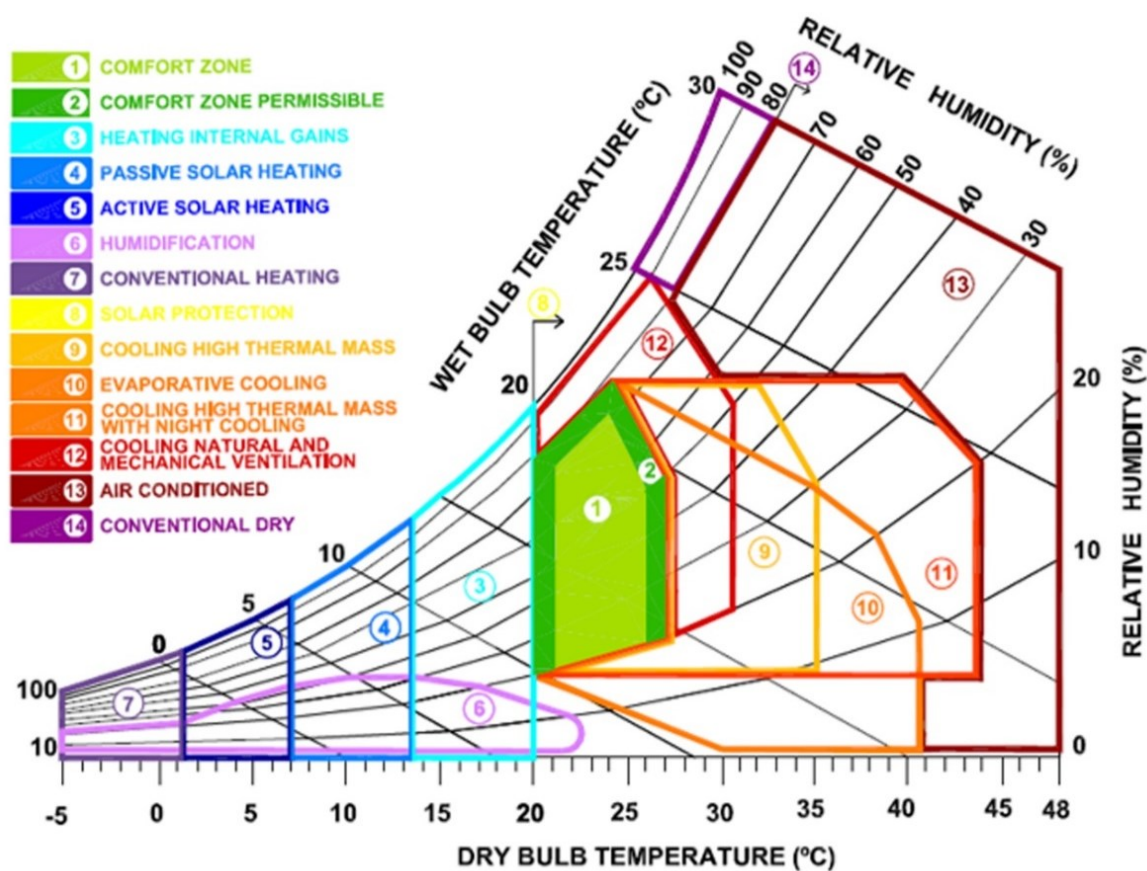


fig. 2.19 - Grafico psicrometrico derivato da quello di Givoni. Fonte: Manzano-Agugliaro et al., 2015

Si vedono ora le principali caratteristiche di ciascuna zona e gli accorgimenti che possono essere adottati per migliorare il comfort degli edifici che si trovano in ciascuna di queste.

1. Zona di comfort: è la zona che esibisce le condizioni ideali per raggiungere il comfort umano, statisticamente per il 70% della popolazione senza alcun intervento; la temperatura è compresa tra i 21 e 26 °C con un'umidità tra il 20 ed il 70%.
2. Zona di comfort permessibile: zona in cui l'essere umano si trova comunque in uno stato di comfort con il minimo sforzo di adattamento, statisticamente dimostrato per l'80% della popolazione. La temperatura è in questo caso tra 20 e 27°C con umidità relativa tra il 20 e l'80%.
3. Guadagno di calore interno: con temperature poco sotto a quelle confortevoli, il guadagno di calore interno è dato dalla compresenza di persone, dalla luce artificiale e da qualsiasi macchinario che generi calore.
4. Riscaldamento solare passivo: l'obiettivo è che il design dell'edificio possa favorire l'accumulazione di radiazioni solari e ridistribuirle all'interno dello stesso. L'accumulo di energia in murature, pavimentazioni e soffitti può essere favorito dall'inglobamento di materiali a cambiamento di fase (PCM – *phase change materials*).
5. Riscaldamento solare attivo: simile al riscaldamento passivo, ma fa da intermediario un fluido, che viene prima riscaldato e poi a sua volta rilascia calore all'interno dell'edificio. In più, l'energia può essere raccolta tramite celle solari a bassa temperatura o pannelli fotovoltaici.
6. Umidificazione: si ottiene introducendo nell'edificio aria che prima è stata a contatto con una superficie d'acqua; quest'aria può essere introdotta in maniera passiva tramite differenze di pressione, o in maniera attiva, cioè grazie a dei macchinari. Solitamente si cerca di posizionare vicino all'edificio vegetazione, fontane o comunque superfici d'acqua.
7. Riscaldamento convenzionale: per temperature particolarmente fredde (come si vede nel grafico, tra -5 e 1°C) è necessario utilizzare sistemi di riscaldamento alimentati ad energia elettrica, gas, petrolio o carbone.

8. Protezione solare: sopra temperature di 20°C l'architettura bioclimatica suggerisce opportuni accorgimenti, da applicare in tutte le aperture e sulla facciata dell'edificio, per proteggere quest'ultimo dalle radiazioni solari.
9. Raffreddamento grazie ad un'alta massa termica: questa strategia tiene conto della massa termica dell'involucro dell'edificio, che è in grado di immagazzinare energia dalle radiazioni solari e successivamente rilasciarla gradualmente all'interno.
10. Raffreddamento per evaporazione: strategia ideale per climi secchi ed aridi, poiché migliora il comfort riducendo la temperatura tramite l'evaporazione dell'acqua e contemporaneamente aumenta l'umidità dell'aria. È possibile ottenere questo risultato grazie a vegetazione esterna, patii e fonti d'acqua.
11. Raffreddamento grazie ad un'alta inerzia termica con rinnovamento notturno: effettivo quando il clima presenta sbalzi termici significativi fra giorno e notte. La muratura esterna dell'edificio dovrebbe essere costituita da materiale capace di avere la più grande differenza di fase possibile (circa 12 ore) e il rinnovamento notturno dovrebbe essere condotto tramite aperture, patii e tettoie.
12. Raffreddamento tramite ventilazione naturale e meccanica: può essere ottenuta naturalmente tramite la ventilazione incrociata da nord a sud, oppure meccanicamente con ventole.
13. Aria condizionata: per ridurre sia la temperatura che l'umidità.
14. Deumidificazione convenzionale: per temperature sopra i 25°C e umidità superiore all'80%; è necessario incorporare strategie che assorbano acqua dall'ambiente.

Si segnala come grazie al programma Climate Consultant, sviluppato dalla *Society of Building Science Educators* della UCLA, sia possibile visualizzare il proprio caso studio su una *Psychometric Chart* che, similmente allo studio analizzato, presenta sedici diverse *Design Strategy Zones* (*Climate Consultant | Society of Building Science Educators*, s.d.).

Lo studio di Manzano-Agugliaro et al. pone l'accento su come si possa utilizzare un approccio virtuoso a livello tecnologico e costruttivo in relazione al clima presente: in climi caldi-umidi si porrà maggiormente l'accento sulla componente massiva del materiale e sistema costruttivo, mentre in climi freddi i sistemi saranno più leggeri e ben isolati. Come già sottolineato, però, in un'ottica di ottimizzazione e

riduzione di consumi ed emissioni, la componente costruttiva viaggia di pari passo con quella impiantistica: dove l'una risulta manchevole bisognerà migliorare la performance dell'altra e viceversa per ottenere un buon livello di comfort interno.

Il sistema impiantistico di un edificio verrà d'ora in poi definito anche con la sigla inglese HVAC – *Heating, Ventilation and Air Conditioning* – ovvero riscaldamento, ventilazione e condizionamento dell'aria. Bayraktar (Bayraktar, 2015) nel suo studio suddivide i sistemi HVAC in centralizzati e decentralizzati. I sistemi centralizzati servono vari spazi da un luogo centrale, che è solitamente collocato al di fuori di tali zone e vicino all'edificio. Un *central system* è formato da componenti primari e secondari. I primi convertono l'energia ricavata da combustibili o elettricità in energia riscaldante o raffreddante sotto forma di acqua calda o fredda, vapore o liquido refrigerante. I secondi, invece, si occupano di trasportare il calore o raffreddamento agli spazi abitati. I sistemi centralizzati più comuni sono quello *All-Air*, quello *All Water hydronic* e *Air-Water*, a seconda che il raffreddamento/riscaldamento avvenga per mezzo di aria, acqua o entrambe. Gli impianti decentralizzati di condizionamento d'aria sono assemblaggi realizzati autonomamente in fabbrica costituiti da una fonte di calore e/ o refrigerio - a seconda del clima e delle esigenze di occupazione - un ventilatore, un filtro e dispositivi di controllo. I più comuni sistemi di climatizzazione decentralizzata includono unità a finestra, condizionatori d'aria a pacchetto, unità *rooftop* e pompe di calore.

Secondo il 2019 Global Status Report for Buildings and Construction (United Nations Environment Programme, 2019), nonostante il riscaldamento continui ad essere il principale responsabile della domanda energetica di un edificio, si sta assistendo a un aumento dell'energia impiegata per il condizionamento, anche a causa del cambiamento climatico (fig. 2.20). Infatti, la domanda di *space cooling* è cresciuta più del 33% nel periodo 2010-2018 e del 5% nell'anno 2017-2018, mentre quella del riscaldamento è scesa dell'1% dal 2010, pur rimanendo circa un terzo del consumo energetico totale negli edifici a livello globale.

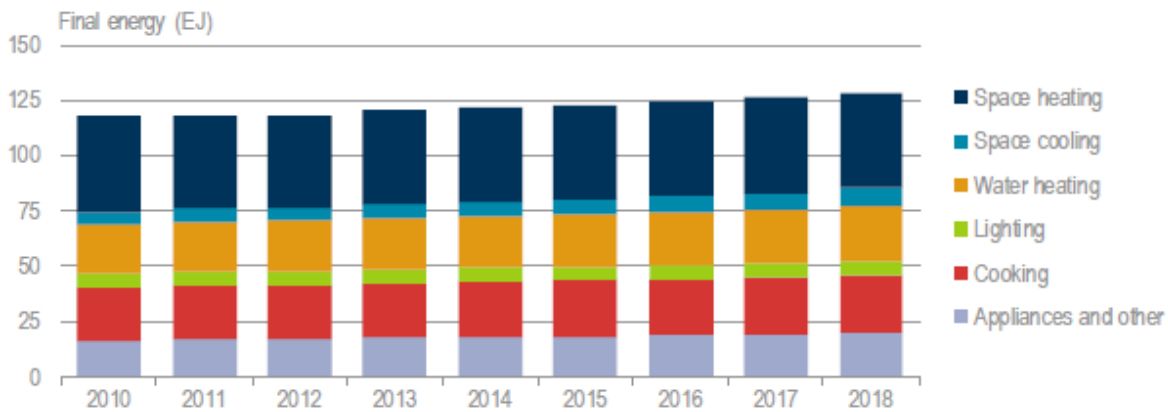


fig. 2.20 - Consumo energetico finale globale per il settore edile nel periodo 2010-2018. Fonte: UNEP, adattato da IEA (2019a), *World Energy Statistics and Balances* (database), www.iea.org/statistics

Negli ultimi anni si è cercato, a livello nazionale ed internazionale, di contenere la domanda energetica e di favorire l'utilizzo di energia prodotta da fonti di energia rinnovabile (FER). Uno dei meccanismi, introdotto fin dal 2002, è quello dei Certificati Verdi (CV). Esso costituisce una forma di incentivazione della produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili e si basa sull'obbligo, posto dalla normativa a carico dei produttori e degli importatori di energia elettrica prodotta da fonti non rinnovabili, di immettere annualmente nel sistema elettrico nazionale una quota di elettricità prodotta da impianti alimentati da fonti rinnovabili. Sempre nel 2002 la Direttiva europea del Parlamento 2002/91/CEE, conosciuta anche come direttiva EPBD (*European Performance of Building Directive*), impose la certificazione energetica degli edifici, e fu recepita in Italia tramite vari decreti, tra cui il Decreto del Presidente della Repubblica 2 aprile 2009 n. 59.

Il sistema dei Certificati Verdi è stato leggermente modificato dal D.lgs. n. 28 del 3 marzo 2011, attuazione della Direttiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio; è stata infatti prevista una graduale transizione ad un sistema *feed-in tariff*¹⁰ (*GME - I mercati - Certificati verdi - cosa sono*, s.d.).

La Direttiva 2009/28/CE è importante poiché propone diversi strumenti, anche indiretti, operativi a livello nazionale per la promozione delle fonti rinnovabili per usi termici ed elettrici (*AICARR*, s.d.). Fra questi si riportano:

¹⁰ *Feed-in tariff*: «Meccanismo di incentivazione, noto anche come “tariffa onnicomprensiva”, attraverso il quale è riconosciuta agli impianti alimentati a fonti rinnovabili (certificati come tali) una tariffa per tutta l'energia prodotta e immessa in rete per un certo periodo di tempo (es. 15 anni). A differenza del *feed-in premium*, l'energia viene venduta alla rete a un'unica tariffa agevolata, che include la componente incentivante e la componente di valorizzazione dell'energia immessa in rete.» (*Feed in Tariff (FIT) - ENEA - Dipartimento Unità per l'efficienza energetica*, s.d.)

- Detrazioni fiscali del 55% delle spese sostenute per l'installazione di pompe di calore, impianti solari termici, impianti a biomassa e agevolazioni fiscali per gli utenti allacciati alle reti di teleriscaldamento da fonte geotermica o biomasse;
- Obbligo per i nuovi edifici, non ancora pienamente operativo, di copertura di una quota (50%) dei fabbisogni di energia per la produzione di acqua calda sanitaria mediante fonti rinnovabili, nonché di uso d'impianti a fonti rinnovabili per la produzione elettrica;
- Meccanismo dei titoli di efficienza energetica, cui possono accedere tecnologie quali gli impianti solari termici, le caldaie a biomassa e le pompe di calore, anche geotermiche;
- Incentivazione dell'energia elettrica prodotta da impianti a fonti rinnovabili con il sistema dei certificati verdi, basato su una quota d'obbligo di nuova produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili;
- Modalità di vendita semplificata dell'energia prodotta e immessa in rete a prezzi di mercato prestabiliti.

La Direttiva, più in generale, assegna all'Italia due obiettivi nazionali vincolanti in termini di quota dei consumi finali lordi di energia coperta da FER, ovvero il raggiungimento, entro il 2020, di una quota dei consumi finali lordi (CFL) complessivi di energia coperta da fonti rinnovabili almeno pari al 17% e pari al 10% per i CFL del settore dei trasporti. I dati riportati dalla società per azioni Gestore dei servizi energetici - GSE S.p.a. sono incoraggianti (*Fonti rinnovabili in Italia e in Europa Verso gli obiettivi al 2020 e al 2030, s.d.*): nel 2017, infatti, l'Italia è stato l'unico tra i principali Paesi UE ad aver raggiunto e superato l'obiettivo fissato dalla Direttiva 2009/28/CE per il 2020, con una percentuale di FER sui consumi finali lordi pari al 18,3% (fig. 2.21). Il 17% era stato di poco superato già nel 2016, e in tab. 2.10 si può vedere la distribuzione delle varie fonti rinnovabili rispetto alla totalità di FER.

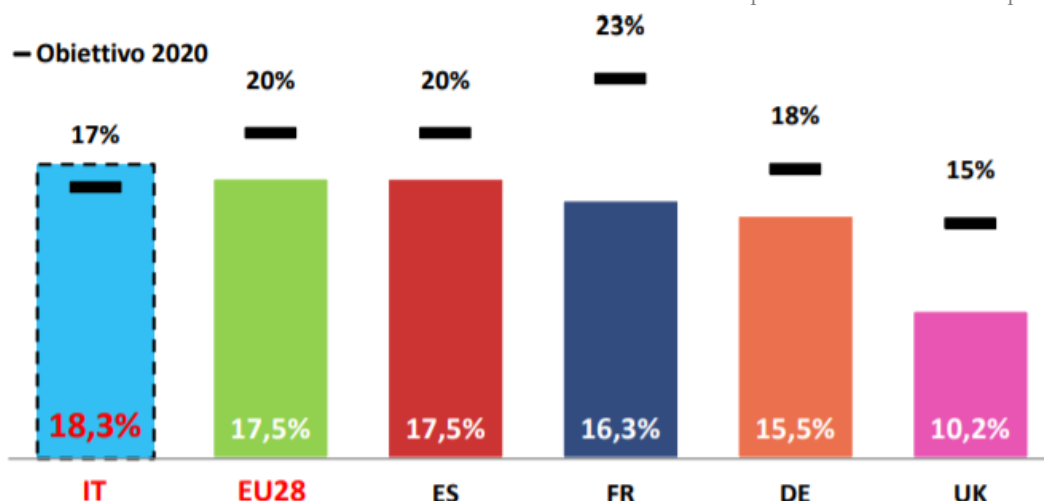
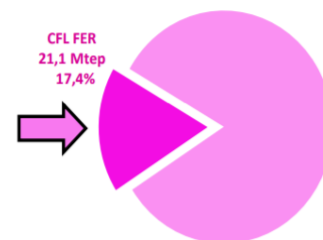


fig. 2.21 - Obiettivi raggiunti da vari paesi europei nel 2017. Fonte: Gestione Servizi Energetici (GSE), 2019

tab. 2.10 - Percentuale di ciascuna fonte di energia sulla totalità di FER a livello nazionale del 2016. Fonte: Gestione Servizi

Fonte rinnovabile	Consumi (Mtep)	% sul totale FER nazionale	Settore Rinnovabili	Consumi FER per settore (Mtep)	% sul totale FER nazionale
Idraulica normalizzata	4,0	18,8%	FER Elettriche	9,5	45,1%
Solare fotovoltaico	1,9	9,0%			
Eolica normalizzata	1,4	6,7%			
Biogas	0,7	3,4%			
Bioliquidi sostenibili	0,4	1,9%			
Biomasse solide	0,4	1,7%			
Geotermica	0,5	2,6%			
Rifiuti rinnovabili	0,2	1,0%			
Biomasse solide	6,9	32,9%	Fer Termiche	10,5	50,0%
Pompe di Calore	2,6	12,4%			
Rifiuti rinnovabili	0,4	1,7%			
Biogas	0,3	1,2%			
Solare Termico	0,2	0,9%			
Geotermica	0,1	0,7%			
Bioliquidi sostenibili	0,0	0,2%			
Biocarburanti sostenibili	1,0	4,9%	Fer Trasporti	1,0	4,9%
CFL FER	21,1	100%		21,1	100%



L'impegno da parte dell'Italia nei confronti dell'energia sostenibile è continuato anche dopo il 2011: nel 2019 è stato infatti pubblicato il D.L. 111/2019, denominato "Decreto Clima", e in seguito il Ministero dello Sviluppo Economico ha pubblicato il testo Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima (PNIEC), che recepisce le novità contenute nel Decreto Legge sul Clima nonché quelle sugli investimenti per il Green New Deal previste nella Legge di Bilancio 2020, e fissa gli obiettivi nazionali al 2030 sull'efficienza energetica, sulle fonti rinnovabili e sulla riduzione delle emissioni di CO₂ (Pubblicato il testo definitivo del Piano Energia e Clima (PNIEC), s.d.). Fra questi propositi vi sono l'accelerazione del percorso di decarbonizzazione e l'evoluzione del sistema energetico, in particolare nel settore elettrico, da un assetto centralizzato a uno distribuito basato prevalentemente sulle fonti rinnovabili.

Alla luce di quanto detto, e rammentando l'importanza del rapporto involucro-impianto, viene spontaneo domandarsi se un edificio energeticamente autosufficiente sia effettivamente vantaggioso da un punto di vista di costi, emissioni e consumi. De Rubeis et al. hanno provato a indagare questa questione in due studi.

Il primo paper di de Rubeis et al. (de Rubeis et al., 2018) presenta il caso studio, ovvero un'abitazione energeticamente autosufficiente situata nella periferia del L'Aquila, Italia.

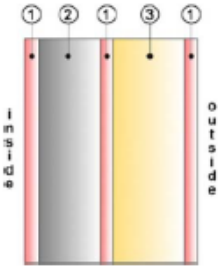
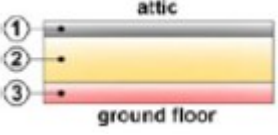
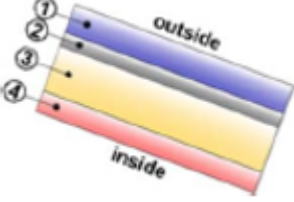
La valutazione è stata svolta nell'ambiente di modellazione DesignBuilder tramite una simulazione dinamica in EnergyPlus. Dopo aver acquisito informazioni sulle componenti dell'edificio sono state svolte indagini termografiche per verificare la reale performance dell'involucro. Inoltre, è stata misurata l'energia fornita dal generatore di calore, così come le temperature interne ed esterne, per poter calibrare il modello virtuale EnergyPlus- DesignBuilder; la calibrazione segue le *M&V Guidelines* di ASHRAE.

L'edificio è una casa singola a due piani abitata da due persone nella periferia di L'Aquila, con struttura in calcestruzzo armato, isolamento in polistirene espanso (EPS) e involucro costituito da blocchi di legno cemento con una buona performance termica; gli elementi trasparenti sono in PVC e presentano doppio vetro. Come già detto, può essere considerato ZEB (*Zero Emissions Building*), poiché produce abbastanza energia rinnovabile in situ per poter ricoprire il suo stesso fabbisogno. È infatti presente un impianto idronico, composto da un generatore di calore a biomassa (potenza termica nominale 16,5 kW, efficienza 83,5%), la cui alimentazione deriva dalla vicina foresta di querce, un impianto solare termico con collettori piani, impianto fotovoltaico autonomo, sistema di accumulo per *Domestic Hot Water* (DHW).

Le proprietà degli elementi strutturali sono state modellate in accordo con la tab. 2.11. L'analisi, svolta tenendo conto della stagione in cui il riscaldamento è attivo (15 ottobre – 15 aprile), ha reso un consumo di energia primaria di 2964,4 kWh/y, 29,9 kWh/(m² y) considerando i consumi ausiliari. La domanda energetica di una Passive House¹¹ è di 15 kWh/(m² y) (Passivhaus Institut, s.d.); vi è quindi un margine di miglioramento. Sono state considerate cinque possibili varianti impiantistiche, riassunte in tab. 2.12.

¹¹ Viene definito *passivhaus*, in italiano casa passiva, un edificio capace di soddisfare il proprio fabbisogno energetico senza l'utilizzo di fonti esterne di energia.

tab. 2.11 - Proprietà equivalenti impiegate nel modello per i blocchi di legno cemento. Fonte: de Rubeis et al., 2018, tabella dell'autrice

Elemento strutturale	Descrizione degli strati	Resistenza termica R [m ² K/W]	Spessore totale [m]	U totale [W/(m ² K)]	U _{max} totale minimo richiesto in Italia [W/(m ² K)]
Muro 	1) Legno cemento	0,308			
	2) Calcestruzzo	0,096	0,50	0,120	0,30
	3) EPS e grafite	6,774			
Pavimento 	1) Massetto	0,027			
	2) Polistirene	6,000	0,23	0,285	0,30
	3) Legno cemento	0,308			
Tetto spiovente 	1) Resina poliuretanic e schiuma di polisocianurato	4,000			
	2) Massetto	0,027	0,31	0,130	0,25
	3) Polistirene	6,000			
	4) Legno cemento	0,308			

tab. 2.12 - Analisi multi-scenario per l'ottimizzazione energetica. Fonte: de Rubeis et al., 2018, tabella dell'autrice

Scenario	Caldaia a biomassa	Caldaia a condensazione	Pompa di calore aria acqua	Unità trattamento aria (UTA)
OS-1	✓			✓
OS-2		✓		
OS-3		✓		✓
OS-4			✓	
OS-5			✓	✓

I risultati dell'analisi in termini di consumi energetici e di emissioni di CO₂ sono presentati in tab. 2.13

tab. 2.13 - Consumo energetico ed emissioni di CO₂ per i vari scenari. Fonte: de Rubeis et al., 2018, tabella dell'autrice

Scenario	Consumo energetico [kWh/y]	Consumo energetico specifico [kWh/(m ² y)]	Variazione del consumo [%]	Emissioni di CO ₂ [kgCO ₂ /y]	Variazione di emissioni di CO ₂ [%]
Caso reale	2964,4	29,9	0,0	1079,1	0,0
OS-1	1392,1	14,1	-53,0	506,7	-53,0
OS-2	2084,4	21,1	-29,7	421,1	-61,0
OS-3	974,7	9,8	-67,1	196,9	-81,5
OS-4	4401,4	44,5	48,5	2125,9	97,0
OS-5	1767,5	17,8	-40,4	853,7	-20,9

Dai risultati si evince come il caso migliore è lo scenario 3, in cui è presente un sistema abbinato di caldaia a condensazione e UTA. Nonostante quasi tutti i casi ipotizzati riducano il consumo energetico di una percentuale compresa fra il 29,7 e il 67,1%, così come le emissioni vengono ridotte tra il 20,9 e l'81,5%, solo l'OS-1 e OS-3 rimangono sotto i consumi annuali previsti per una *Passivhaus*. L'unico scenario svantaggioso risulta essere quello con la sola pompa di calore aria acqua (OS-4).

Il secondo studio di de Rubeis et al. (de Rubeis et al., 2020), oltre a riprendere i cinque diversi scenari ipotizzati per il sistema HVAC dell'edificio, colloca questo in maniera fittizia in quattro diverse città italiane e due europee, così come tiene in conto i cambiamenti climatici previsti entro il 2050 e 2080, per vedere come la performance energetica del ZEB cambia. Il flusso di lavoro seguito per questo studio è schematizzato in fig. 2.22.

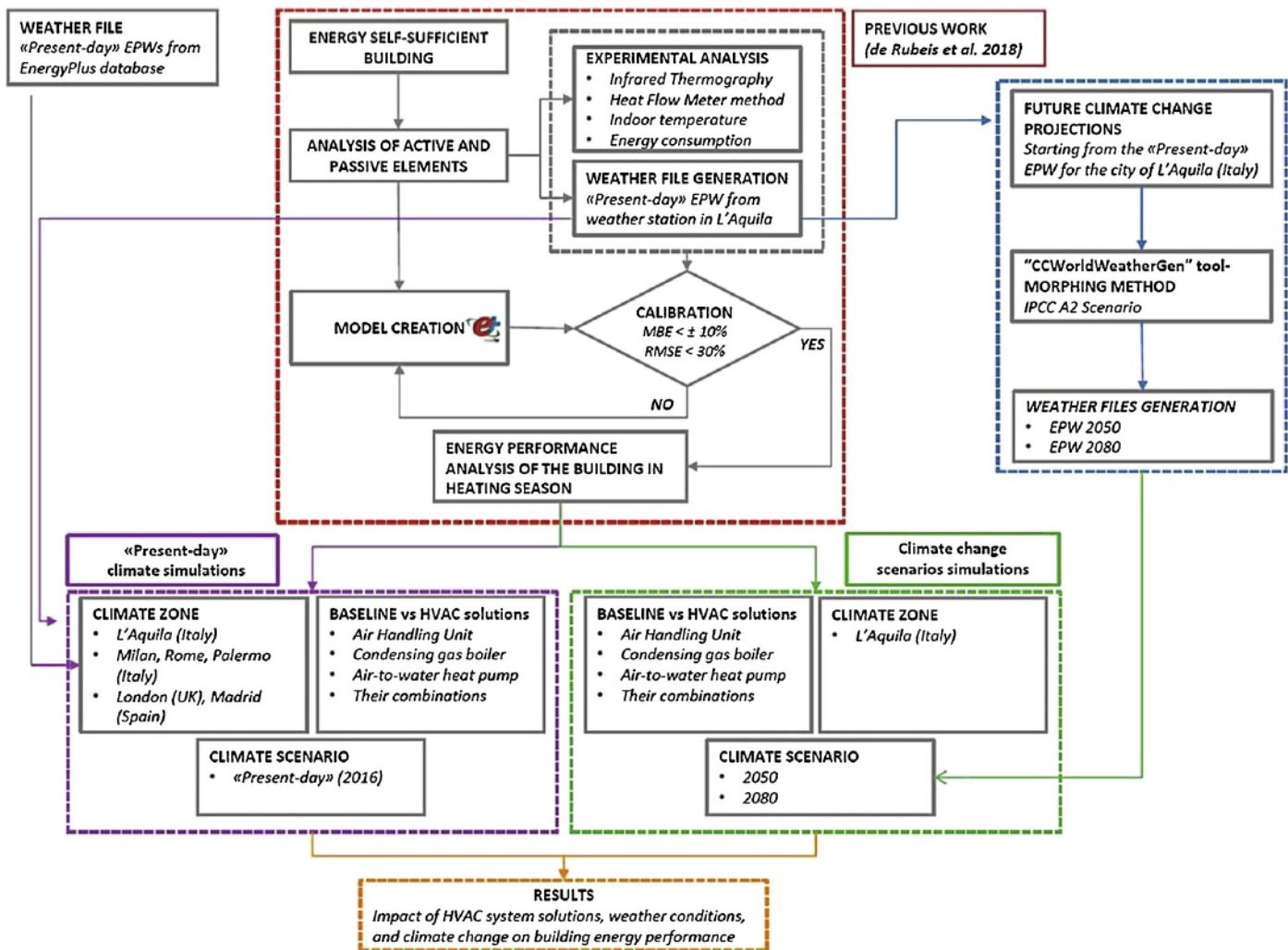


fig. 2.22 - Flusso di lavoro per la metodologia impiegata nello studio. Fonte: de Rubeis et al., 2020

Le città considerate in questo studio sono L'Aquila, Palermo, Roma, Milano, Londra e Madrid: le prime quattro sono state classificate a livello climatico, rispettivamente, come E, B, D, E, secondo il D.P.R. n. 412, 1993; Madrid presenta un clima temperato con estati secche, definito Csa e Csb nella classificazione di Köppen-Geiger, mentre Londra ha un clima uniforme e temperato con estati tiepide (Cfb).

Per calcolare come varierà il clima nelle prossime decadi è stato prodotto un file di input per EnergyPlus tramite il *Climate Change World Weather file Generator* "CCWorldWeatherGen"; i dati utilizzati fanno riferimento allo scenario A2 previsto da IPCC. Il metodo utilizzato per il calcolo è il "morphing" method: è stato preso come riferimento il "clima base" medio registrato di ogni mese per il caso reale de L'Aquila, e a questo sono state imposte delle variazioni per gli anni a venire.

I risultati previsti per il 2050 e 2080 per il caso reale situato a L'Aquila, così come le varianti impiantistiche collocate nelle sei città proposte e temporalmente ipotizzate

nell'anno dello studio (2016), sono riportate in tab. 2.14. Nella tabella sono evidenziati in verde i valori inferiori alla domanda di 15 kWhm⁻²yr⁻¹ ipotizzata da *Passive House*.

tab. 2.14 - Consumo di riscaldamento annuale per metro quadrato dello spazio abitato [kWhm⁻²yr⁻¹] e variazione percentuale. In verde sono indicati i valori inferiori a 15 kWhm⁻²yr⁻¹. Fonte: de Rubeis et al., 2020, tabella dell'autrice

Impianto reale	$\Delta\%^b$	OS-1	$\Delta\%^c$	OS-2	$\Delta\%^c$	OS-3	$\Delta\%^c$	OS-4	$\Delta\%^c$	OS-5	$\Delta\%^c$	
L'Aquila	29,9	0,0	14,0	-3,0	21,0	-29,7	9,8	-67,1	44,4	48,5	17,8	-40,4
2050 ^a	27,3	-8,5	9,7	-28,5	19,2	-8,6	6,6	-28,6	34,2	-22,8	12,1	-31,8
2080 ^a	24,6	-17,5	7,8	-42,4	17,3	-17,7	5,3	-42,5	28,6	-35,4	9,8	-44,8
Milano	32,5	8,8	19,8	-39,0	22,8	-29,8	14,0	-57,0	54,2	66,7	24,0	-26,3
Roma	29,2	-2,5	10,7	-63,2	20,5	-29,8	7,5	-74,2	32,4	11,1	12,7	-56,3
Palermo	18,2	-39,0	4,2	-77,1	12,6	-30,7	3,0	-83,7	14,4	-21,2	4,5	-75,1
Londra	34,9	16,5	18,7	-46,3	24,6	-29,6	13,1	-62,4	50,5	45,0	21,5	-38,4
Madrid	33,9	-10,6	18,3	-67,4	23,8	-29,7	12,8	-77,1	50,8	31,0	22,1	-50,7

^a Le variazioni percentuali riportate fanno riferimento alla differenza z rispetto "all'anno presente" (2016) e alla città dell'Aquila.

^b Le variazioni percentuali riportate fanno riferimento al caso reale.

^c Le variazioni percentuali riportate fanno riferimento alla differenza rispetto ai diversi impianti ipotizzati.

Dai risultati è possibile vedere come le città con clima freddo hanno consumi mitigati dalle buone proprietà termofisiche dell'involucro. Lo scenario OS-1, ovvero quello che presenta un'unità a trattamento d'aria con recuperatore di calore, invece, mostra particolari benefici energetici nelle città con clima più caldo.

Lo scenario OS-2, che sostituisce il generatore di calore a biomassa con una più efficiente caldaia a condensazione (efficienza 98%), determina un risparmio energetico di circa il 30% in tutte le città.

La soluzione OS-3, che combina caldaia a condensazione e unità a trattamento d'aria, è la soluzione più performante in qualsiasi contesto, con risultati ottimi anche per le previsioni future.

Lo scenario OS-4, che presenta solo una pompa di calore aria-acqua, determina effetti negativi fuorché per la città di Palermo, mentre questa soluzione può diventare accettabile se accompagnata a un'unità a trattamento d'aria (OS-5), grazie alla ridotta domanda di calore.

Per quanto riguarda i consumi di energia delle cinque opzioni a L'Aquila per gli anni 2050 e 2080, è possibile vedere come la maggiore riduzione si abbia per lo scenario OS-5, rendendolo quindi molto competitivo negli anni a venire.

Grazie a questi ultimi due studi analizzati è possibile ribadire ancora una volta quanto, in un edificio, la collaborazione tra involucro e impianto siano importanti al

fine del risparmio energetico e della riduzione di emissioni; non vanno però sottovalutati gli aspetti legati al clima presente nella località di costruzione.

3 OTTIMIZZAZIONE

Alla luce delle conclusioni tratte finora emerge la grande importanza, per il settore edile, dell'impronta ecologica che l'edificio ha "in esercizio". Il riconoscimento dei fattori impattanti non può però rimanere solo analitico: è necessario, infatti, monitorare l'impronta ecologica in maniera funzionale-esigenziale. In altre parole, vi è necessità di attribuire una "responsabilità", un peso ai vari contributi; solo così è possibile creare un sistema di valutazione della *carbon footprint*, e ricondurre ciascun impatto all'organismo edilizio in cui trova la propria origine. Se, ad esempio, viene presa in considerazione la tematica degli apporti solari, essa può risultare sia vantaggiosa che svantaggiosa nel bilancio energetico di un edificio a seconda del singolo caso, ma intanto viene messa in luce la rilevanza di tale fattore.

È bene precisare che la presente tesi non si concentra sulla valutazione LCA da un punto di vista tecnologico, bensì di sviluppo di modelli. L'obiettivo finale, infatti, non è tanto l'ottenimento di un certo dato a livello di simulazione, quanto più l'individuazione di una metodologia, di una piattaforma di comparazione tra modelli di progetto e la digitalizzazione dei suddetti.

Emergono quindi due tematiche fondamentali:

- La rappresentazione dei contributi dovrebbe essere proattiva, responsiva e riflettere le conseguenze delle scelte prese. In questo modo si dà la possibilità al design team, in qualsiasi fase di progetto, di prendere decisioni consapevoli e mirate, e di soppesare gli impatti delle componenti progettuali in tempo reale.
- La prioritizzazione delle scelte progettuali: vi è la necessità di fissare, man a mano che il progetto viene sviluppato, delle invarianti a valle delle quali è possibile operare delle decisioni e delle modifiche, ma non a monte. Un esempio banale di questo tema potrebbe essere la dimensione e forma del lotto di costruzione dell'edificio, che non può essere modificato e in base al quale vanno operate alcune scelte progettuali, distributive e logistiche.

Sulla base di queste considerazioni emerge il concetto di ottimizzazione, che verrà ripreso ed approfondito in seguito. In particolare, è possibile attribuire ad ogni

fase progettuale una diversa modalità di ottimizzazione, per cui la logica e il software utilizzati possono eventualmente rimanere invariati, ma cambiano funzioni obiettivo, vincoli ed interdipendenza tra fattori. Non vi è infatti un unico modello di ottimizzazione, ma vari modelli livello per livello; le problematiche sono però interdipendenti, e dato che non è possibile ottimizzare tutti gli aspetti in tutte le fasi ritorna in gioco il tema della prioritizzazione. Alla fase preliminare corrisponderà quindi un'ottimizzazione di carattere funzionale-spaziale, in cui viene ottimizzata la distribuzione degli spazi in base alla funzione di ogni ambiente e dell'edificio stesso, che è improntata oltre che sugli aspetti logistici anche su aspetti di ottimizzazione dei flussi energetici, sia come captazione dall'esterno che come inerzialità dell'organismo. In una fase successiva, ovvero quella definitiva, verrà ottimizzato l'involucro: si può infatti optare per un sistema più efficiente ma adattivo, oppure uno più opaco e con una diversa tipologia di impianto. La terza fase di ottimizzazione, infatti, prevede proprio l'individuazione della migliore tipologia impiantistica nel contesto presente.

Mentre le ultime due ottimizzazioni, che concernono il già nominato rapporto involucro-impianto, sono dominate da un criterio economico ed installativo, la prima segue questioni legate al carattere distributivo, che può essere variato di un certo range a seconda della tipologia edilizia in questione. L'ottimizzazione del ciclo di vita è più spinta su aspetti conformativi per le funzioni nelle quali si ha un minimo di variabilità nella qualità dell'aria, come ad esempio l'ambito residenziale e direzionale, in cui ci si può appoggiare meno alla componente impiantistica e più su ventilazione e illuminazione naturale, mentre si è più vincolati in altri ambiti, come il settore ospedaliero, poiché le condizioni sono più stringenti.

3.1 I principi dell'ottimizzazione e la frontiera di Pareto

Il termine "ottimizzazione" viene definito dal vocabolario Treccani (*ottimizzazióne in Vocabolario - Treccani, s.d.*) come:

il raggiungimento di una posizione di ottimo, ossia del massimo risultato possibile con i termini dati o in relazione a un determinato fine.

Il processo di ottimizzazione viene utilizzato in svariati ambiti, come ad esempio in informatica, statistica ed economia: a livello matematico tale concetto viene ricondotto ad una funzione obiettivo ad una o più variabili, che viene minimizzata o massimizzata nel rispetto di eventuali vincoli. Pur non esistendo in letteratura una classificazione ufficiale dei problemi di ottimizzazione, Bayraktar nella sua tesi di dottorato (Bayraktar, 2015) divide tali problemi in base a cinque categorie:

1. Natura delle variabili – le variabili di design possono essere continue o discrete, le prime delle quali possono avere un qualsiasi valore numerico compreso in un dato intervallo, mentre le seconde presentano solo valori distinti e separati, tipicamente presi da una lista.
2. Forma della funzione obiettivo – Le funzioni obiettivo sono una rappresentazione matematica dei criteri secondo i quali si vuole ottimizzare. A seconda che queste e i vincoli siano o meno funzioni lineari, i problemi possono essere lineari o no.
3. Tipologia di dati – i problemi di ottimizzazione possono essere classificati come deterministici o stocastici. Nel caso dei primi, le variabili sono deterministiche e gli output del modello di simulazione possono essere completamente determinati in base alle condizioni iniziali; i problemi stocastici includono variabili randomiche e sono espressi in maniera probabilistica.
4. Numero di obiettivi – a seconda del numero di funzioni obiettivo si parla di problemi ad obiettivo singolo o multi-obiettivo.
5. Tipologia di vincoli – le ottimizzazioni vincolate sono quelle che presentano appunto vincoli sui possibili valori delle variabili di design.

Un problema di ottimizzazione generale vincolato ad obiettivo singolo può essere quindi scritto come (Agnetis, s.d.):

$$\begin{aligned} \min_x f(x) \text{ o } \max_x f(x); \quad \forall x \in R^n \mid h_j(x) = 0 \cap g_k(x) \geq 0; \\ \text{con } j = 1, \dots, m; \\ \text{con } k = 1, \dots, p. \end{aligned}$$

Dove $f(x)$ rappresenta la funzione obiettivo e $h_j(x)$ e $g_k(x)$ sono rispettivamente le funzioni uguaglianza e disuguaglianza di vincolo. Il vettore $x = (x_1, \dots, x_n)$ rappresenta le n variabili che sono considerate per la ricerca dell'ottimo. Lo spazio di ricerca può essere a sua volta vincolato:

$$x_{iL} \leq x_i \leq x_{iU}$$

Con x_{iL} e x_{iU} rispettivamente valore minimo e massimo delle variabili.

Nelle ottimizzazioni multi-obiettivo, le funzioni obiettivo da minimizzare (o massimizzare) sono $f_1(x)$, $f_2(x)$, ... , $f_k(x)$. In questo caso non esiste alcun vettore soluzione x in grado di ottimizzare tutte le k funzioni obiettivo, per cui è necessario introdurre il concetto di ottimo paretiano. Si dice, infatti, che il vettore x domina un

altro vettore decisione $y = (y_1, y_2, \dots, y_q)$ se e solo se valgono le seguenti condizioni:

$$f_i(x) \geq f_i(y), \text{ per ogni obiettivo } i \in 1, \dots, M;$$

$$f_i(x) > f_i(y), \text{ per qualche obiettivo } i \in 1, \dots, M.$$

In altre parole, x domina y se e solo se è migliore o uguale a y secondo tutti i criteri e per almeno un criterio è strettamente migliore di y . Tutti i vettori non dominati da nessun altro si definiscono Pareto-ottimi, e costituiscono la frontiera di Pareto; per queste soluzioni nessun obiettivo può essere migliorato senza peggiorarne contemporaneamente un altro (Pini, 2011). Una volta definita la frontiera di Pareto, vi sono varie tecniche per individuare la miglior soluzione possibile fra quelle presenti. Il modo più utilizzato nelle applicazioni ingegneristiche è quello proposto in fig. 2.23: verrà scelto il punto appartenente alla frontiera che si trova alla minor distanza dal cosiddetto "punto ottimale utopico", ovvero l'intersezione tra le tangenti della frontiera stessa.

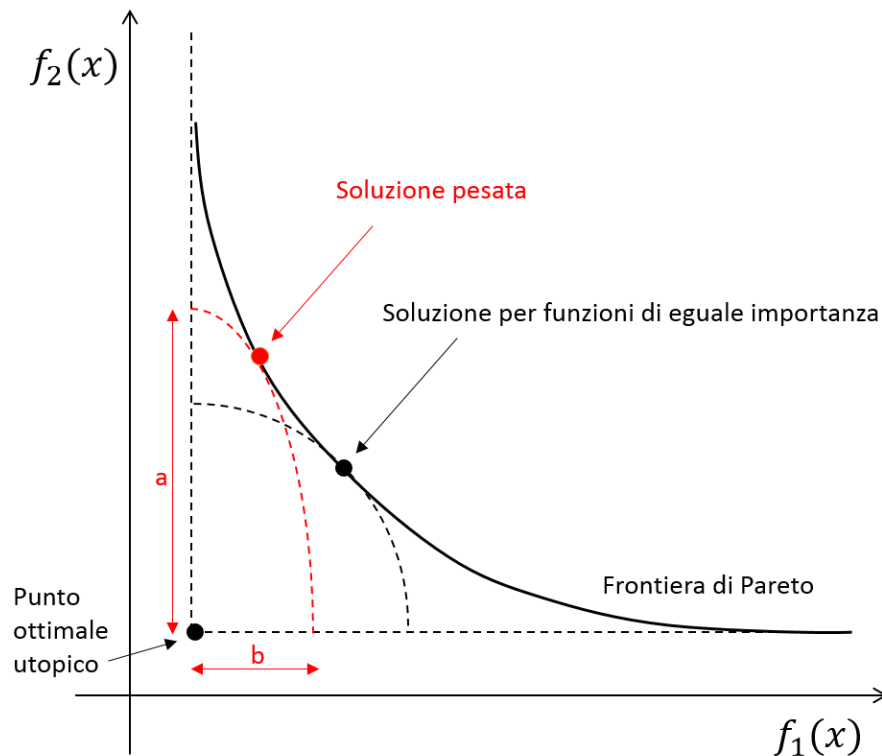


fig. 2.23 - Individuazione della miglior soluzione di Pareto per due funzioni. Fonte: Nguyen et al., 2014.

È possibile anche individuare delle soluzioni pesate tramite il rapporto:

$$\frac{a}{b} = \frac{p_1}{p_2}$$

Dove a e b rappresentano la lunghezza dei semiassi dell'ellisse, mentre p_1 e p_2 sono i pesi rispettivamente delle funzioni $f_1(x)$ e $f_2(x)$.

L'aggiunta di un obiettivo può aumentare di molto la complessità del problema. Vi sono vari approcci per risolvere i problemi di ottimizzazione multi-obiettivo; Bandyopadhyay e Saha (Bandyopadhyay & Saha, 2013) li suddividono in tre categorie: approcci di aggregazione, approcci paretiani e non paretiani basati su una popolazione. Nel primo caso ricadono i metodi che combinano i vari obiettivi in una singola funzione obiettivo scalare, in base ad un "peso di selezione" deciso da chi svolge l'analisi. Gli approcci paretiani e non che si basano su una popolazione come campione di indagine fanno parte dei metodi metaeuristici evolutivi¹².

I problemi di ottimizzazione vengono risolti tramite gli algoritmi di ottimizzazione, che Deb (Deb, 2012) descrive come una procedura iterativa che compara varie soluzioni fino a che non ne viene trovata una soddisfacente, considerata cioè l'ottimo. Vi sono vari sistemi di classificazione per gli algoritmi di ottimizzazione; qui ci si limiterà a presentare quello proposto da Venter (Venter, 2010). L'autore divide gli algoritmi in "locali", dove l'iterazione viene applicata ad un singolo *design point*, che viene aggiornato dopo aver operato cambi locali, e "globali", che si pongono l'obiettivo di trovare la soluzione globalmente migliore in presenza di vari ottimi locali.

Nell'ambito del settore AEC, come già sottolineato, per ottimizzare i consumi, le emissioni, i costi ed in generale la performance energetica di un edificio è necessario tenere conto di molti fattori allo stesso tempo, ed in alcuni casi, come ad esempio negli ospedali, i vincoli di qualità del comfort interno sono particolarmente stringenti. Secondo lo studio di Attia et al. (Attia et al., 2013) su 165 pubblicazioni relative a ottimizzazione della performance di edifici, i campi maggiormente analizzati sono quelli collegati agli aspetti energetici ed economici. In particolare, le funzioni obiettivo delle ottimizzazioni si concentrano solitamente sui consumi di energia, i costi iniziali, operativi e dell'intero ciclo di vita dell'edificio, le emissioni di CO₂, gli impatti ambientali ed il comfort degli utenti (Bayraktar, 2015). Evins et al. (Evins, 2013) nella loro *review* su 74 casi studio affermano che il 40% delle analisi si concentrano

¹² Le metaeuristiche sono una famiglia di tecniche di ottimizzazione approssimata e stocastica per risolvere problemi combinatori (Pini, 2011). In particolare, gli algoritmi evolutivi sono un insieme di metodi per la risoluzione di problemi che fa parte della più ampia categoria dei "modelli a metafora naturale". Essi trovano la loro ispirazione in biologia e, in particolare, si basano sull'imitazione dei meccanismi della cosiddetta "evoluzione naturale". (Tettamanzi, 2005)

sull'involucro dell'edificio, mentre la forma, i sistemi e le energie rinnovabili impiegate ricoprono il 20% ciascuna. Nguyen et al. (Nguyen et al., 2014) sottolineano invece come nella maggior parte degli studi da loro analizzati, ovvero il 60% circa, sia stata svolta un'ottimizzazione ad obiettivo singolo.

I metodi tradizionali di design, essendo lineari e sequenziali, risultano inadeguati a trattare l'interdipendenza di tutte le variabili in gioco per l'ottimizzazione della performance di un edificio; per questo motivo vari autori (Attia et al., 2013; Bayraktar, 2015; Nguyen et al., 2014) identificano la metodologia di ottimizzazione basata su simulazione, in inglese *simulation-based optimization*, come la più adatta. Il processo di ottimizzazione in questo caso è il risultato della combinazione di un programma di simulazione, ad esempio energetica, e un programma che implementa in maniera iterativa uno o più algoritmi di ottimizzazione, fino al raggiungimento di un criterio di stop. Tale metodologia è illustrata in fig. 2.24.

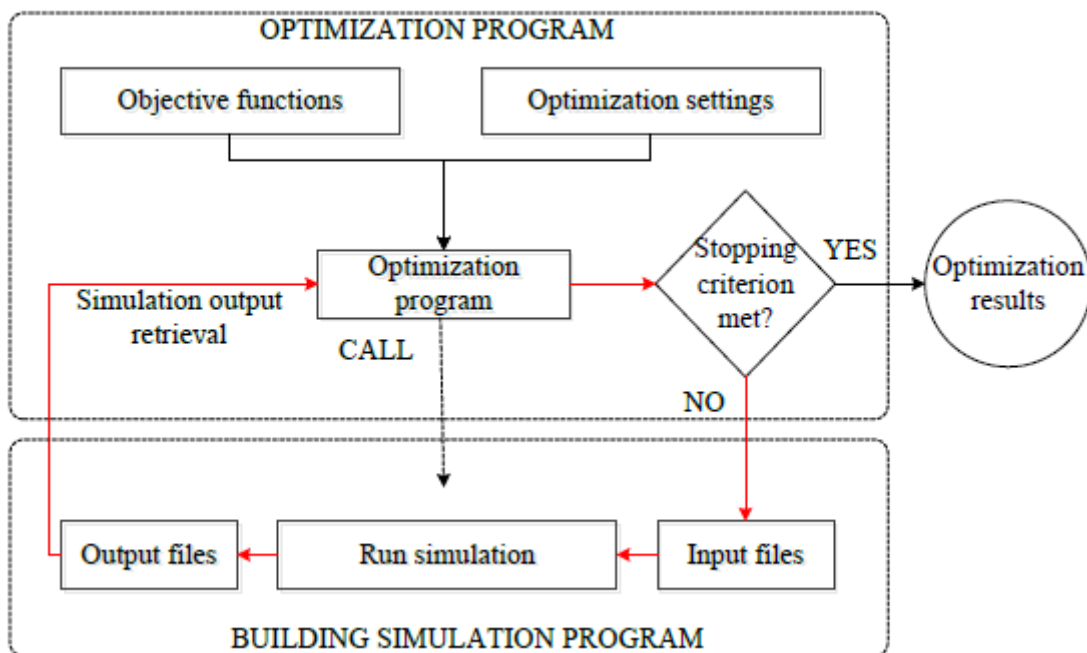


fig. 2.24 - Ciclo di iterazioni di una ottimizzazione *simulation-based* negli studi delle performance degli edifici. Fonte: Nguyen et al., 2014.

Bayraktar (Bayraktar, 2015) nella sua ricerca suddivide il framework dell'ottimizzazione basata su simulazione in tre moduli principali:

1. L' "ottimizzatore" (*optimizer*) ovvero il programma che ha il compito di implementare l'algoritmo di ottimizzazione, innescare la simulazione per il

calcolo della performance, assegnare nuovi valori alle variabili, calcolare la funzione obiettivo, imporre i limiti e controllare il criterio di stop.

2. Il "simulatore" (*simulator*), che valuta le performance energetiche ed i limiti funzionali tramite simulazioni dinamiche.
3. Un database che definisca ed organizzi le variabili possibili. Essendo l'ottimizzazione della performance degli edifici un problema con molte variabili, è necessaria una sostanziale quantità di input numerici.

Si vedono di seguito gli algoritmi più adatti per l'ottimizzazione in ambito AEC.

Essendo la funzione obiettivo stimata attraverso la simulazione e siccome qualsiasi programma che svolge tale simulazione compie delle approssimazioni della realtà, la funzione risulta spesso non lineare e discontinua per alcuni parametri. Come già detto, esistono moltissimi algoritmi possibili per risolvere un problema di ottimizzazione; spesso la condizione di ottimo può essere trovata utilizzandone vari, oppure la combinazione di essi. In letteratura è possibile trovare varie ricerche che comparano differenti algoritmi utilizzati nelle ottimizzazioni *simulation-based* di edifici. Wetter e Wright (Wetter & Wright, 2004), ad esempio, svolgono un'analisi sia su un modello di simulazione che uno complesso servendosi di quattro diverse classi di algoritmi, in particolare cinque algoritmi di ricerca diretta, tre algoritmi stocastici basati su popolazione, un algoritmo di sciame di particelle ibrido ed uno basato su gradienti. I risultati migliori sono stati ottenuti tramite gli algoritmi stocastici *population-based*; quelli utilizzati in questo studio fanno parte della famiglia degli algoritmi evolutivi e sono per la precisione un algoritmo genetico (GA) e due *particle swarm optimization* (PSO). Anche Nguyen (Nguyen et al., 2014) sottolinea come gli algoritmi stocastici basati su un popolazione siano i più utilizzati nel campo dell'ottimizzazione della performance degli edifici.

L'ottimizzazione tramite "sciame di particelle", introdotta da Kennedy ed Eberhart (Kennedy & Eberhart, 1995), è un metodo metaeuristico ispirato al movimento e comportamento sociale dei banchi di pesci e stormi di uccelli. Tale procedimento identifica gli individui in particelle che si muovono nello spazio, con semplici formule matematiche che ne descrivono posizione, velocità e "spazio di fitness", ovvero la migliore soluzione esplorata fino a quel momento.

Gli algoritmi genetici fanno anch'essi parte della famiglia degli algoritmi metaeuristici basati su di una popolazione e sono un'astrazione dell'evoluzione biologica espressa da Darwin nella sua teoria sulla selezione naturale (Yang, 2021), e

sono molto indicati per la ricerca della soluzione Pareto-ottima. Fra questi vale la pena nominare l'algoritmo NSGA-II (*non-dominated sorting genetic algorithm II*), che viene definito da vari autori come «uno dei migliori algoritmi evolutivi noti in letteratura» (Pini, 2011). L'algoritmo opera una classificazione dell'intera popolazione, suddividendola in classi, o *rank*, secondo un ordine ascendente di non-dominanza. Le migliori soluzioni non dominate hanno *rank* pari ad 1; tali elementi vengono in seguito momentaneamente trascurati e vengono individuati fra quelli rimanenti quelli di *rank* 2, e così via. Alla fine del processo ogni individuo apparterrà quindi ad una classe. La popolazione viene ordinata secondo la relazione della non-dominanza in parecchie frontiere: alle soluzioni nelle frontiere migliori vengono dati dei valori detti "di fitness". La funzione di fitness di ciascun individuo-soluzione "funzione di fitness" indica il suo grado di adattamento e costituisce il criterio in base al quale determinare la probabilità di permanenza dell'individuo nell'iterazione successiva. NSGA-II usa la misura di *crowding distance* per stimare la densità delle soluzioni che appartengono alla stessa frontiera; ad un'alta *crowding distance* corrisponde un alto valore di fitness. Infatti, tra due soluzioni con differenti *rank* di non-dominanza, la soluzione con il *rank* più basso è quella preferita, e tra due soluzioni che appartengono alla stessa frontiera, quella preferita è la soluzione collocata nella regione meno affollata. In fig. 2.25 si può vedere la schematizzazione del funzionamento dell'algoritmo NSGA-II.

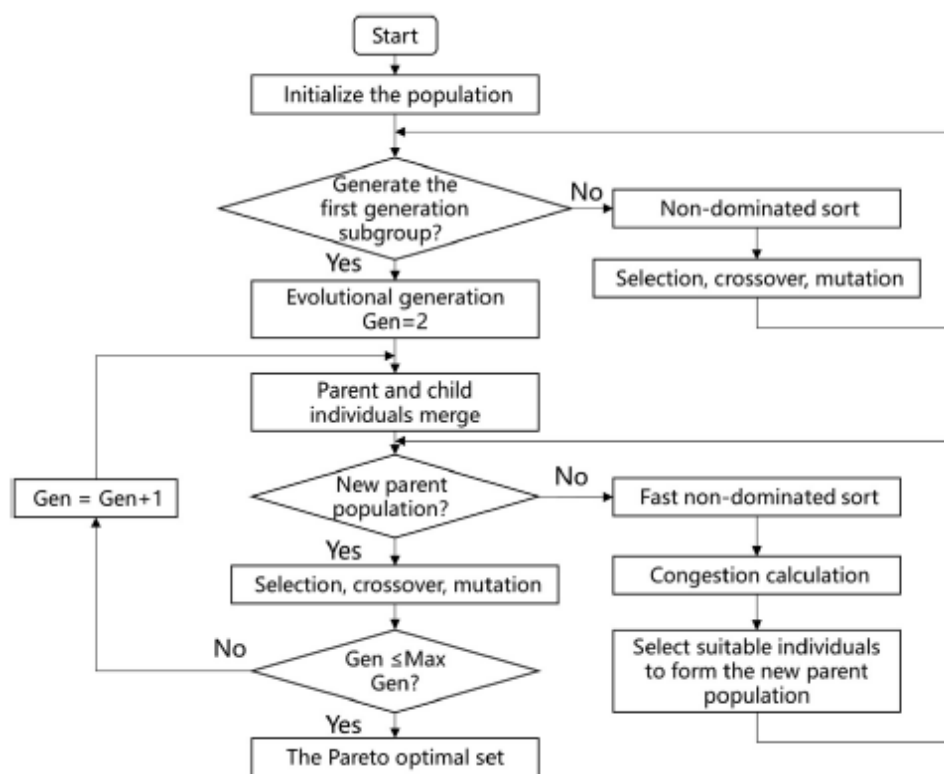


fig. 2.25 - Flowchart di NSGA-II. Fonte: Chen et al., 2021

Come già detto, gli algoritmi vengono implementati dal cosiddetto *optimizer*. Esistono svariati programmi capaci di risolvere problemi di ottimizzazione una volta che questi sono ben formulati; molti di questi *tools* presentano già al loro interno vere e proprie librerie di algoritmi di ottimizzazione fra cui cercare quello più adatto allo specifico caso. Varie ricerche (Attia et al., 2013; Bayraktar, 2015; Nguyen et al., 2014) riconoscono GenOpt, Matlab Optimization Toolbox e modeFrontier come i programmi maggiormente utilizzati nelle ottimizzazioni *simulation-based*.

GenOpt è un programma di ottimizzazione generica che può essere accoppiato con qualsiasi programma di simulazione i cui input e output sono file di testo o con qualsiasi sistema operativo scritto in Java, senza che tali file debbano essere modificati, e che può svolgere una serie di simulazioni in parallelo (*GenOpt - generic optimization program*, s.d.). Esso può gestire ottimizzazioni a singolo obiettivo con variabili continue e discrete ed un numero di variabili tipicamente compreso tra 5 e 20. Presenta inoltre una libreria di algoritmi relativamente vasta e la possibilità di implementare algoritmi personalizzati dall'utente. In fig. 2.26 è presentato il workflow dello studio di (Bayraktar, 2015), che utilizza GenOpt come *optimizer*.

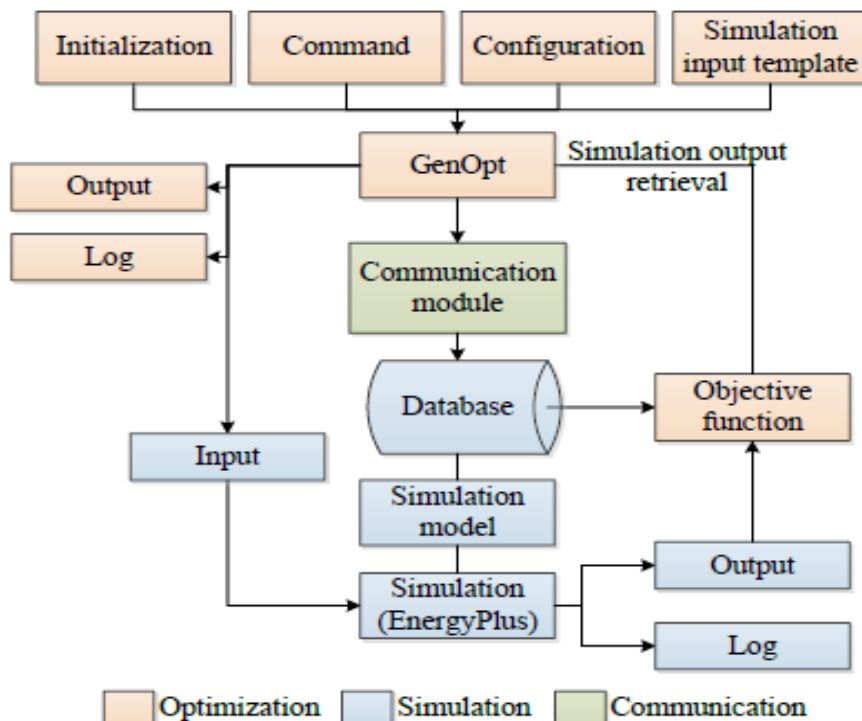


fig. 2.26 - Esempio di ottimizzazione *simulation-based* svolta utilizzando GenOpt come ottimizzatore. Fonte: Bayraktar, 2015

Optimization Toolbox è un'estensione della piattaforma di programmazione Matlab che include risolutori per la programmazione lineare (LP), la programmazione lineare mista intera (MILP), la programmazione quadratica (QP), la programmazione a cono di secondo ordine (SOCP), la programmazione non lineare (NLP), i minimi quadrati lineari vincolati, i minimi quadrati non lineari e le equazioni non lineari (*Optimization Toolbox - MATLAB*, s.d.). Spesso viene utilizzata anche l'estensione Global Optimization Toolbox, tramite cui è possibile identificare il fronte di Pareto (fig. 2.27). Questa include al suo interno una vasta gamma di algoritmi, tra cui i già citati algoritmi genetici e sciami di particelle (*Global Optimization Toolbox - MATLAB*, s.d.).

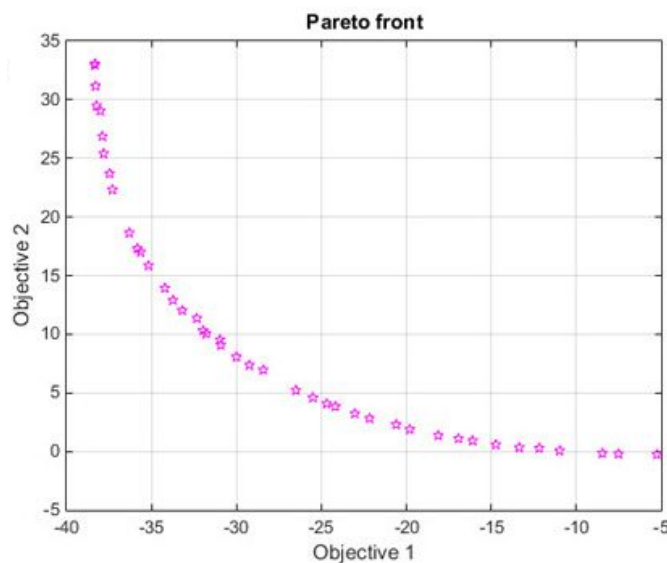


fig. 2.27 - Fronte di Pareto di due obiettivi individuato tramite Global Optimization Toolbox di Matlab. Fonte: Global Optimization Toolbox - MATLAB, s.d.

ModeFRONTIER è una piattaforma per l'ottimizzazione multi-obiettivo e multi-disciplinare, basata sulla determinazione della frontiera di Pareto realizzata da Esteco spa. Il sistema permette l'integrazione degli strumenti di ingegneria (software commerciali e/o software proprietari) con regole o dati sperimentali o di laboratorio; il flusso di lavoro così realizzato permette l'ottimizzazione multi-obiettivo di problemi a variabili continue, discrete o miste nel rispetto di limiti/vincoli che possono evolvere nel corso del processo. Anch'esso presenta una ricca libreria di algoritmi di ottimizzazione deterministici, stocastici ed euristici. Fra questi sono presenti il *Multi-Objective Genetic Algorithm* (MOGA-II) e i già nominati NSGA-II e PSO (*EnginSoft - modeFRONTIER*, s.d.).

Con il grande avanzamento della modellazione 3D degli ultimi anni sono stati creati numerosi plug-in di ottimizzazione per *algorithmic design* (AD) tools per

programmi di modellazione sia CAD che BIM. Fra gli strumenti AD si annoverano Grasshopper, un editor di algoritmi grafici integrato col programma CAD Rhinoceros (*Grasshopper - algorithmic modeling for Rhino*, s.d.), e Dynamo, la piattaforma *open source* di *visual programming* di Revit (*About | The Dynamo Primer*, s.d.). Pereira e Leitão (Pereira & Leitão, 2020) presentano nel loro studio i plug-in per l'ottimizzazione che girano sulle due piattaforme sopracitate, sottolineandone le differenze. Tali plug-in sono rispettivamente Galapagos, Wallacei, Opossum, Octopus, Goat e Silvereye per Grasshopper e Optimo per Dynamo. Galapagos è un plug-in piuttosto user-friendly che svolge ottimizzazioni a singolo obiettivo tramite due risolutori generici: un algoritmo genetico ed uno *simulated annealing* (in italiano, "ricottura simulata")¹³. Anche Goat e Silvereye sono pensati per ottimizzazioni a singolo obiettivo: il primo utilizza un metodo deterministico e si basa su una selezione di algoritmi, tra cui metaeuristici e di ricerca diretta, mentre il secondo lavora tramite algoritmi PSO. Opossum supporta sia ottimizzazioni a singolo che multi-obiettivo, mentre Wallacei solo quelle multi-obiettivo; entrambi utilizzano l'algoritmo evolutivo NSGA-II. Octopus funziona in maniera simile a Galapagos, ma essendo progettato per l'ottimizzazione multi-obiettivo include il concetto di frontiera di Pareto.

Optimo, ad oggi l'unico plug-in per ottimizzazione per Dynamo, utilizza NSGA-II per svolgere SOO ed MOO (*single objective optimization* e *multi-objective optimization*); esso tuttavia non presenta un'interfaccia *user-friendly*, visto che è necessario ritornare all'ambiente Dynamo per visualizzare i risultati ed eventualmente fare delle modifiche. In fig. 2.28 sono comparati i plug-in sopra nominati.

¹³ *Simulated annealing*: strategia utilizzata per risolvere problemi di ottimizzazione, che mira a trovare un minimo globale quando si è in presenza di più minimi locali. Deriva dal processo di lavorazione dei metalli, dove viene utilizzato per descrivere il processo di eliminazione dei difetti tramite riscaldamento e successivo lento raffreddamento. (*What Is Simulated Annealing? - MATLAB & Simulink - MathWorks Italia*, s.d.)

AD Tool	Optimization Tool	Object ives	Number of Algorithms	Optimization Algorithms			
				Metaheuristics		Direct-Search	Model-Based
				Evolutionary	Others		
Grasshopper	Galapagos	SOO	2	x	-	-	-
	Wallacei	MOO	1	x	-	-	-
	Opossum	SOO	2	x	-	-	x
		MOO	5	x	x	-	x
	Octopus	MOO	5	x	-	-	x
	Goat	SOO	5	x	-	x	x
	Silvereye	SOO	1	-	x	-	-
Dynamo	Optimo	SOO/MOO	1	x	-	-	-

fig. 2.28 - Plug-in di ottimizzazione e i corrispondenti algoritmi implementati. Fonte: Pereira & Leitão, 2020

Come già spiegato, nelle ottimizzazioni *simulation-based* il programma che svolge l'ottimizzazione viene accoppiato con un *simulator*; secondo lo studio condotto da Nguyen et al. (Nguyen et al., 2014) i programmi di simulazione dinamica più utilizzati sono EnergyPlus e TRNSYS (fig. 2.29).

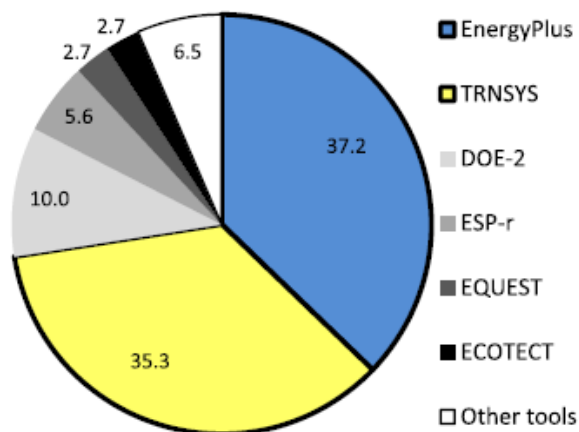


fig. 2.29 - Software di simulazione maggiormente utilizzati secondo lo studio di Nguyen et al. Fonte: Nguyen et al., 2014

EnergyPlus è un programma *open-source whole-building energy modeling* (BEM) sviluppato già a partire dal 1997 dal DOE (*Department of Energy* degli USA) (*EnergyPlus | Department of Energy, s.d.*). Il software è capace di implementare una serie di proprietà fisiche dell'edificio quali qualità dell'aria, umidità e trasmissione del calore; può inoltre calcolare l'illuminazione, l'ombreggiamento e il comfort visuale e simulare una vasta gamma di tipologie di impianti HVAC. EnergyPlus supporta direttamente un grande numero di strumenti e servizi sia nel settore pubblico che privato, molte

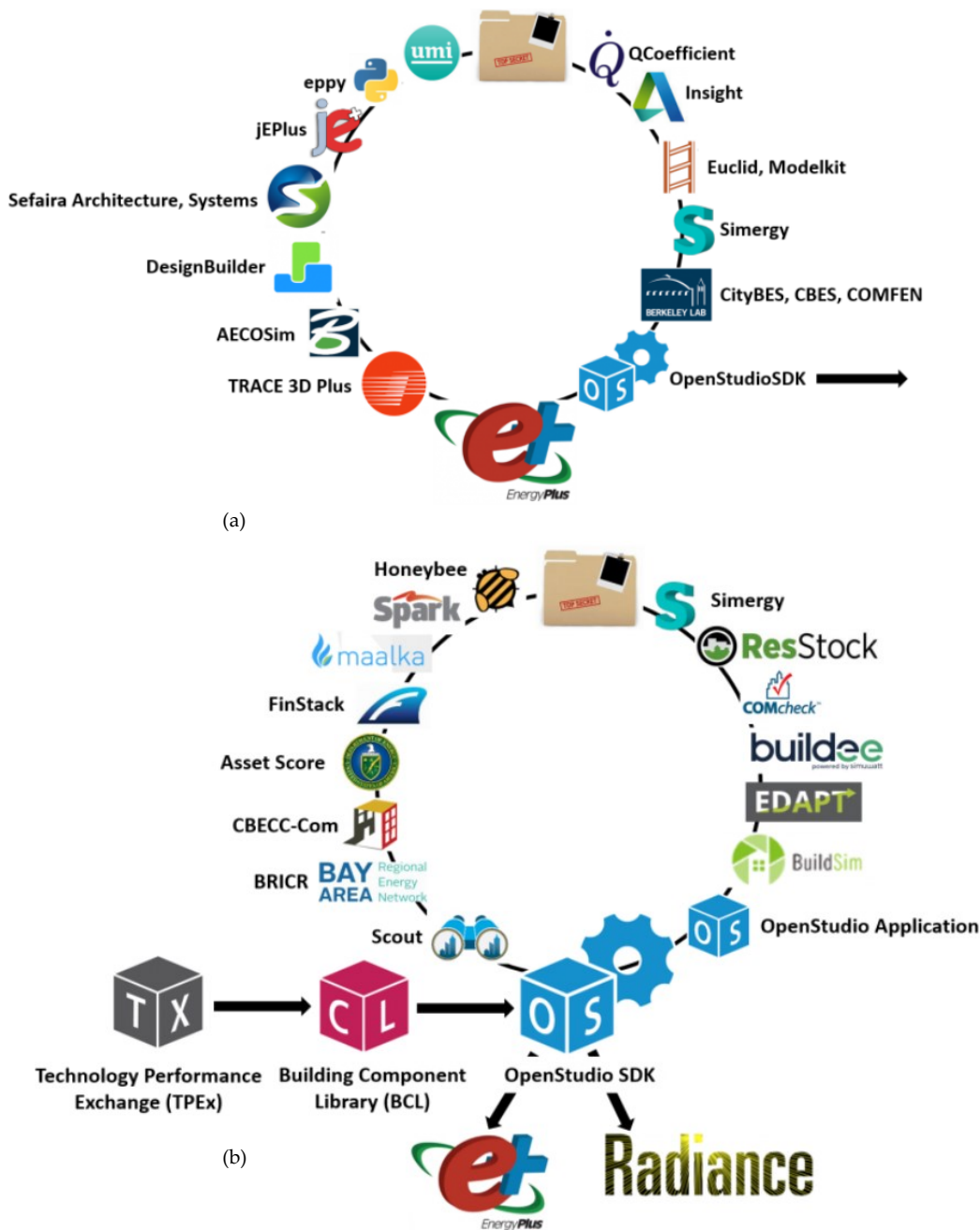


fig. 2.30 - Strumenti appartenenti al settore pubblico e privato supportati (a) direttamente da EnergyPlus; (b) tramite la piattaforma OpenStudio. Fonte: *EnergyPlus | Department of Energy, s.d.*

delle quali grazie alla piattaforma intermedia OpenStudio (fig. 2.30).

Fra i *tools* che interagiscono con EnergyPlus ed OpenStudio si segnalano in particolare Ladybug e Honeybee (fig. 2.31). Ladybug svolge analisi dettagliate sul clima presente, restituendo informazioni sull'ambiente circostante utili per il design. Questi importa file standard Energyplus Weather (.EPW) in Grasshopper e Dynamo; la sua interazione con gli ambienti di programmazione visiva consente un feedback istantaneo e la possibilità di attuare modifiche. Ladybug supporta anche la valutazione delle opzioni di progettazione iniziale attraverso studi di radiazione solare, analisi della vista, modellazione delle ore di luce solare e altro ancora (*Ladybug Tools* | *Ladybug*, s.d.). Honeybee supporta l'illuminazione diurna dettagliata e la modellazione termodinamica che tende ad essere più rilevante durante le fasi intermedie e successive della progettazione. In particolare, crea, esegue e visualizza i risultati delle simulazioni di luce diurna utilizzando Radiance, modelli di energia utilizzando Energyplus/ Openstudio, e il flusso di calore attraverso i dettagli di costruzione utilizzando Berkeley Lab Therm/ Window. Ciò viene ottenuto collegando questi motori di simulazione a interfacce CAD e di scripting visivo come Grasshopper/Rhino e plugin Dynamo/Revit. Per questo motivo, Honeybee è uno dei

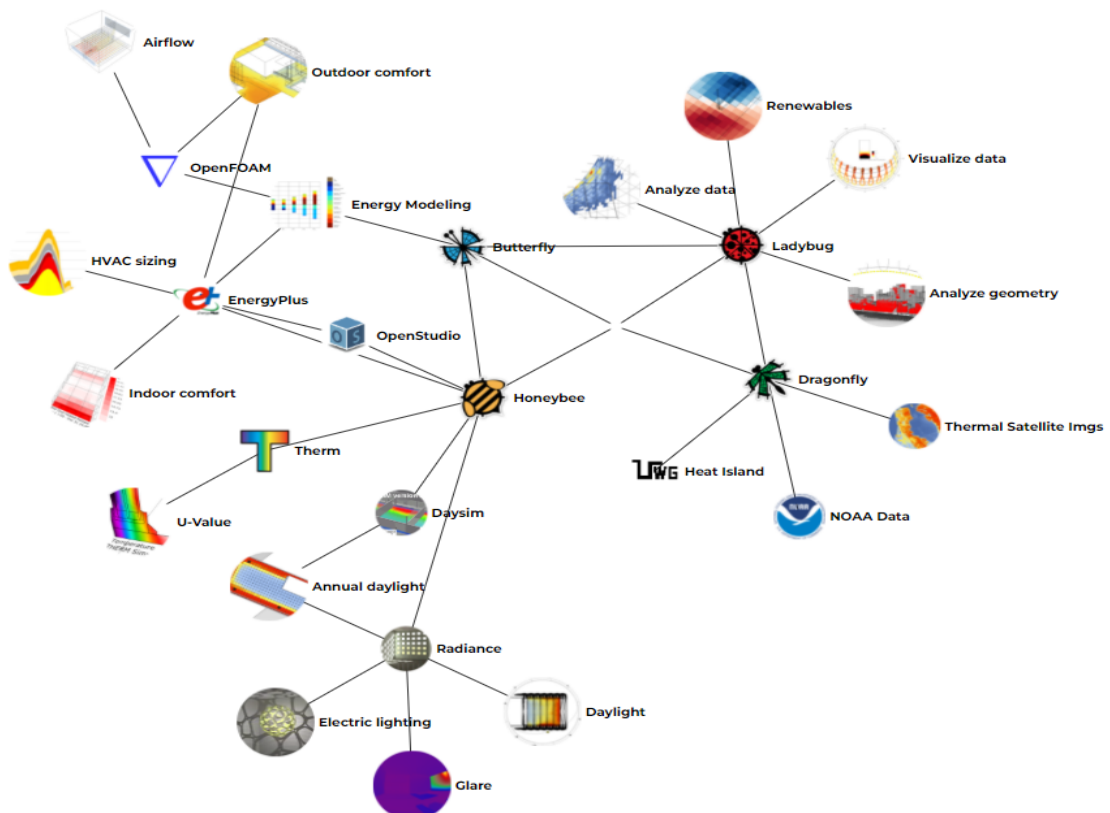


fig. 2.31 - Rappresentazione grafica della relazione tra Ladybug, Honeybee e EnergyPlus/OpenStudio. Fonte: *Ladybug Tools* | *Home Page*, s.d.

plugin più completi attualmente disponibili per la progettazione ambientale (*Ladybug Tools* | *Honeybee*, s.d.).

TRNSYS è un ambiente software flessibile a livello grafico che viene utilizzato per simulare il comportamento dei sistemi transitori. Viene comunemente utilizzato per lo studio della performance termica ed elettrica dei sistemi energetici, ma studio del flusso di altri sistemi dinamici (*TRNSYS: Transient System Simulation Tool*, s.d.). Esso è composto da due parti: la prima è un "motore" (chiamato kernel) che legge ed elabora il file di input, risolve iterativamente il sistema, determina la convergenza e traccia le variabili di sistema. Tramite il kernel è possibile anche determinare proprietà termofisiche, invertire matrici, eseguire regressioni lineari e interpolare file di dati esterni. La seconda parte di TRNSYS è una vasta libreria di componenti, ognuno dei quali modella le prestazioni di una parte del sistema. La libreria standard comprende circa 150 modelli che vanno dalle pompe agli edifici multizone, dalle turbine eoliche agli elettrolitori, dai processori di dati meteorologici alle routine economiche e alle attrezzature HVAC di base e alle tecnologie emergenti all'avanguardia. I modelli sono costruiti in modo tale che gli utenti possano modificare i componenti esistenti o scrivere i propri, ampliando le capacità dell'ambiente.

Approfonditi i metodi, gli algoritmi ed i software che si possono utilizzare per svolgere l'ottimizzazione della performance di un edificio, si vedranno di seguito come ciò può essere declinato nelle tre fasi di design già nominate nell'introduzione del paragrafo "Ottimizzazione", ovvero quella preliminare, a cui corrisponde un'ottimizzazione di tipo funzionale-spaziale, la fase definitiva, durante la quale l'attenzione è posta sull'involucro e quella esecutiva, che prevede un focus sugli impianti.

3.2 Fase preliminare - ottimizzazione funzionale-spaziale

Come già espresso nel paragrafo "Ottimizzazione", una prima ottimizzazione dei consumi energetici e delle emissioni avviene già all'inizio della progettazione di un edificio, ovvero durante la fase preliminare. Nonostante vi siano dei vincoli imposti dalla dimensione del lotto di costruzione, dalla conformazione del territorio e da eventuali norme, durante questo step vengono definiti alcuni elementi, quali ad esempio orientamento, forma e layout interno dell'edificio, che possono avere un significativo impatto sulla performance energetica.

L'orientamento di un edificio, ad esempio è uno dei fattori principali per ridurre la domanda energetica e mantenere le condizioni all'interno della gamma di comfort;

influirà, infatti sulla radiazione solare, sul vento e sulla luce naturale a cui esso sarà esposto. In particolare, per quanto riguarda la radiazione solare, il progettista sceglierà di massimizzarla o minimizzarla anche a seconda della fascia climatica in cui ci si trova. Ad esempio, nei climi temperati, dove il riscaldamento invernale genera invariabilmente un fabbisogno energetico significativo, l'esposizione delle finestre del soggiorno di un edificio residenziale al sole di mezzogiorno riduce la domanda di riscaldamento meccanico. Quando queste finestre si affacciano ad est o ad ovest, il vantaggio è ridotto. Secondo Morrissey et al. (Morrissey et al., 2011) ci sono due modi per garantire l'orientamento ottimale: il primo è quello di analizzare una serie di parametri e garantire la progettazione e l'orientamento migliori dell'edificio fin dalla costruzione, e il secondo è quello di sviluppare design "adattabili" che performano bene per un range di orientamenti.

La forma dell'edificio è una delle determinanti basilari del rendimento energetico dell'edificio e il comfort dei residenti. Con "forma" qui si intende la configurazione di un edificio, che è determinata dalla sua altezza, larghezza e profondità. La forma definisce anche l'impronta a terra dell'edificio, il suo volume, l'altezza *floor-to-floor* e soprattutto le dimensioni e l'orientamento dell'involucro esposto all'ambiente esterno (Bayraktar, 2015). Un concetto molto importante, poiché fattore determinante per lo scambio di calore tra interno ed esterno, è quello del rapporto superficie-volume S/V ; maggiore è il rapporto S/V e maggiore è il guadagno o la perdita di calore per un dato volume di spazio. Un elemento da tenere a mente durante la progettazione degli edifici, dunque, è il *trade-off* che si genera tra una forma compatta che minimizza il trasferimento di calore conduttivo attraverso l'involucro e una forma con un'ampia superficie esposta verso l'esterno, che facilita l'illuminazione diurna, il guadagno solare, e la ventilazione naturale.

Nel settore dell'architettura ospedaliera il rapporto tra superficie e volume va molto analizzato poiché, come già accennato, sono presenti vincoli di comfort interno e salubrità dell'aria molto più stringenti che in altre tipologie edilizie. Inoltre, rispetto ad un passato in cui la degenza si collocava al centro dell'intero sistema ospedaliero, oggi gli ospedali presentano tutta una serie di servizi sociosanitari e di formazione che portano con sé specifiche esigenze progettuali. Capolongo et al. (Capolongo et al., 2019) nel loro saggio suddividono gli ospedali in quelli a sviluppo verticale e quelli orizzontali, individuando ulteriori sub-categorie (fig. 2.32):

- verticali in semplice torre su piastra, torre a forma complessa su piastra, torre radiale su piastra, volumi articolati su piastra e monoliti verticali;

- orizzontali in volumi indipendenti collegati, spine e padiglioni, a corte articolati, a corte compatto e blocco orizzontale.

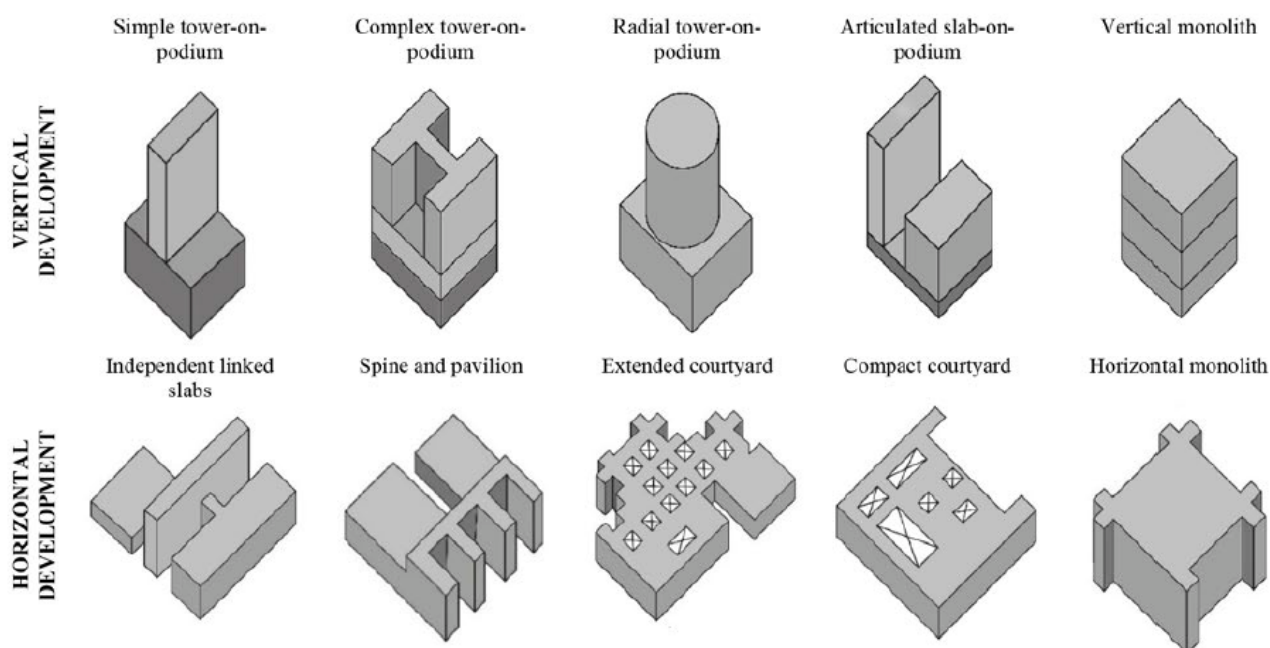


fig. 2.32 - Tipologie ospedaliere a sviluppo verticale ed orizzontale. Fonte: Capolongo et al., 2019

Il paper di Capolongo et al. si concentra sul confronto esigenziale-prestazionale relativo alle tipologie verticali e orizzontali attraverso l'analisi di diversi casi studio internazionali in relazione ad alcuni criteri individuati dagli autori, ovvero gli aspetti urbani, il layout funzionale, aspetti legati a costruzione e mantenimento nonché sociali e del benessere psicosensoriale. Tra le due tipologie presentate, le architetture a sviluppo verticale risultano le più critiche sia in termini di manutenzione che di trasformazione delle aree funzionali nel tempo, mentre nelle strutture orizzontali è più facile l'aggiunta, ad esempio, di blocchi ausiliari e la modifica delle configurazioni nel tempo. Da un punto di vista psicosensoriale degli utenti, le strutture verticali possono far sentire le persone isolate rispetto al contenuto urbano, soprattutto nei locali più alti; le architetture orizzontali, tuttavia, presentano problemi relativi al *wayfinding* e alla mancanza di privacy negli spazi affacciati all'interno di corti comuni. Un altro aspetto fondamentale per il comfort, ovvero l'illuminazione naturale, è maggiormente garantito da corpi di fabbrica di profondità contenute oppure dalla presenza di cavedi, corti e aperture su spazi pubblici a più altezze. La ventilazione naturale è un elemento poco sfruttato nell'ambiente ospedaliero, dove le esigenze sanitarie portano ad una propensione per quella meccanica: nei paesi sviluppati si tende infatti ad architetture sempre più ermetiche, per garantire una corretta gestione della struttura in termini di costi, consumi energetici, fattori microclimatici, qualità dell'aria, ecc., sebbene la

possibilità di apertura delle finestre non viene mai esclusa del tutto al fine di rendere lo spazio più umanizzato.

Pur non essendoci attualmente nello stato dell'arte numerose ricerche e software che si concentrano specificatamente sull'ottimizzazione dello *space planning*, viene ritenuto interessante in questo ambito il programma Space Syntax. Questo, infatti, utilizza un approccio alla modellazione *science-based* e *human-based* per la progettazione ed il design di edifici e luoghi urbani (*The Space Syntax approach* | *Space Syntax*, s.d.). La modellazione integrata *Space Syntax Integrated Modelling* consente l'analisi di spazi complessi in modo semplice ed economico, funzionando sia in ambienti GIS che BIM. L'approccio dinamico e *evidence-based* non si basa su dati o ipotesi sulla destinazione d'origine, ma integra i fattori di layout spaziale, uso del territorio e le caratteristiche di "attrazione" del trasporto. La *Space Syntax Integrated Modelling* è quindi più veloce, meno pesante e meno incline a ipotesi errate rispetto ad altri metodi di modellazione quali il *Movement Assignment modelling* o la microsimulazione (o *Dynamic Entity modelling*). L'approccio consente l'analisi simultanea di molteplici scale di movimento, da locale a regionale, nazionale e internazionale.

Il software trasforma un pattern di percorso in un *network graph* ("grafico a rete"), disaggregando tale rete alle intersezioni. Il "peso" della distanza tra due segmenti di linea viene misurato usando il percorso più corto tra la coppia, che viene poi ponderato secondo tre relazioni chiave: il "costo" metrico (minima lunghezza), topologico (minor numero di svolte) e geometrico (minimo variazione di angolo). Il "Valore di Accessibilità Spaziale" assegnato ad ogni segmento riflette la complessità dei percorsi da quel segmento a tutti gli altri all'interno del sistema. In primo luogo, un segmento accessibile è più facilmente raggiungibile di uno separato perché può essere raggiunto tramite percorsi più semplici da altri segmenti - quindi dovrebbe ricevere un alto grado di movimento "to", cioè "verso". In secondo luogo, un segmento più accessibile dovrebbe essere più probabilmente selezionato come parte di un percorso tra altre coppie di segmenti: cioè, attrarrà più movimento "through", "attraverso". È la combinazione del loro ruolo nel movimento "to" e "through" che rende i Valori di Accessibilità Spaziale significativi nella stima dei potenziali movimenti. In fig. 2.33 è riportato un esempio di analisi dei percorsi spaziali svolta nel 2005 sul British Museum.

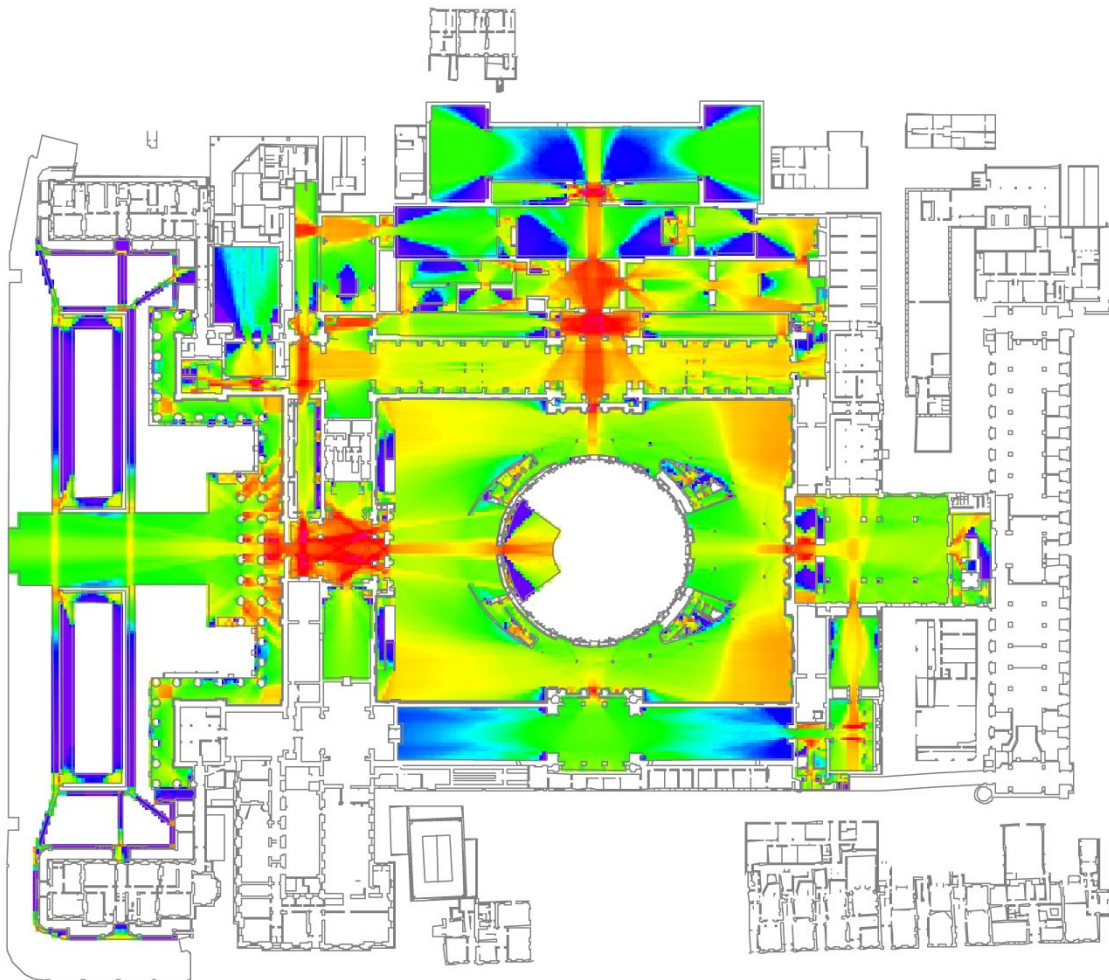


fig. 2.33 - Esempio di analisi dell'accessibilità spaziale del British Museum svolta tramite Space Syntax. Fonte: (British Museum | Space Syntax, s.d.)

3.3 Fase definitiva - ottimizzazione dell'involucro

Una volta determinato il layout dell'edificio tenendo conto sia degli aspetti funzionali che dei costi e consumi che questo possa comportare, si passa alla fase definitiva della progettazione, che in questo studio viene fatta coincidere con l'ottimizzazione dell'involucro esterno. Esso è infatti parte integrante di un edificio e ha la funzione di schermatura termica, regolando l'apporto ricevuto dall'edificio di radiazioni solari, luce diurna, vento, ventilazione naturale ed umidità. L'involucro esterno si compone di elementi opachi, elementi trasparenti e sistema di ombreggiamento, come indicato anche da Bayraktar (Bayraktar, 2015).

Gli elementi opachi di un edificio sono i muri, il tetto, i solai ecc. Le proprietà termo-fisiche degli strati che compongono questi elementi determinano il comportamento del flusso energetico e la capacità di accumulo di energia dell'edificio.

Il calore trasferito tramite gli elementi opachi è una combinazione di processi convettivi, conduttivi e radiativi. Le radiazioni solari, ad esempio, possono essere assorbite, riflesse o trasmesse dall'involucro a seconda delle caratteristiche della sua superficie, influenzando quindi sulla temperatura interna ed esterna, il flusso di calore scambiato ed il comfort interno. La quantità di calore totale trasferita dagli elementi opachi viene stimata attraverso il coefficiente di trasmittanza termica U (W/m^2K) totale di tutti gli strati che li compongono. Un'altra proprietà rilevante degli elementi opachi è l'inerzia termica, che permette ai materiali che compongono l'involucro di assorbire, conservare e rilasciare l'energia termica in eccesso, mitigando le variazioni di temperatura interna dell'edificio.

Elementi trasparenti come finestre e lucernari consentono l'ingresso diretto di guadagni solari nell'edificio. La maggior parte della radiazione solare viene trasmessa direttamente agli interni, mentre la piccola frazione rimanente viene assorbita e/o riflessa. Inoltre, un elemento può anche essere apribile, consentendo così scambi d'aria tra l'edificio e l'intorno. La loro disposizione e dimensione può molto influire sull'apporto solare ricavato dall'edificio. Il punto di incontro tra infissi e componente opaca dell'involucro può dar luogo a ponti termici ed infiltrazione d'aria, influenzando ulteriormente lo scambio di calore tra interno ed esterno.

Il sistema di ombreggiamento è quella parte di involucro che controlla la quantità di luce solare che colpisce ed entra nell'edificio. Di conseguenza, esso blocca la radiazione solare incidente sulle superfici esposte dell'edificio, riduce guadagno di calore ed i guadagni termici e influenza i livelli di luce diurna. La schermatura delle superfici può essere raggiunta tramite i profili auto-ombreggianti degli edifici stessi - come in quelli con configurazione ad H o L - o attraverso elementi di ombreggiatura integrati. Il Decreto del Presidente della Repubblica del 2 aprile 2009, n. 59 (*Gazzetta Ufficiale*, s.d.-b) afferma che:

è resa obbligatoria la presenza di sistemi schermanti esterni. Qualora se ne dimostri la non convenienza in termini tecnico-economici, detti sistemi possono essere omessi in presenza di superfici vetrate con fattore solare (UNI EN 410) minore o uguale a 0,5.

L'ottimizzazione di una schermatura solare fissa è stata svolta da Manzan e Padovan (Manzan & Padovan, 2013) nel loro articolo. Il problema è stato affrontato contemporaneamente sotto vari punti di vista:

- Analisi energetica (estiva ed invernale): il codice ESP-r è stato utilizzato per il calcolo dei fabbisogni per condizionamento e riscaldamento. ESP-r è un software di simulazione dinamica di edificio sviluppato dall'Università di

Strathclyde, Glasgow, capace di risolvere le equazioni di bilancio per un edificio con una schematizzazione ai volumi di controllo;

- Analisi illuminotecnica: è stato utilizzato il software DAYSIM per il calcolo dei livelli di illuminamento interno ed i carichi dovuti all'illuminamento artificiale;
- L'ottimizzazione è stata effettuata utilizzando il software multidisciplinare e multi-obiettivo modeFRONTIER.

In fig. 2.34 sono presentate le caratteristiche dell'ufficio utilizzato come caso studio dell'analisi. La superficie esterna ha una trasmittanza ipotizzata pari a $0,32 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ e sono state considerate due possibili tipologie di vetri, una standard e una a controllo solare. La superficie vetrata della finestra è stata sia ipotizzata posizionata a filo con la parete, sia rientrata di 20 cm.

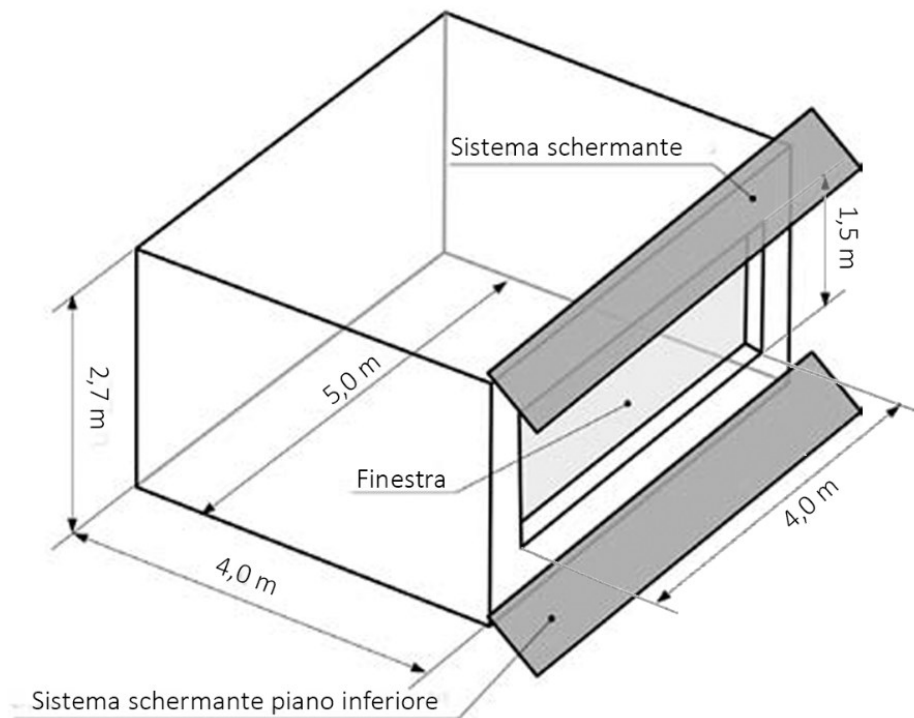


fig. 2.34 - Dimensioni e geometria ipotizzate per l'analisi svolta. Fonte: Manzan & Padovan, 2013

Il mix di geometrie e tipologie di vetri individua dieci casi analizzati, riportati in tab. 2.15 e identificati nel seguente modo:

- Il primo numero indica la tipologia vetro (1 per il vetro standard e 2 per quello a controllo solare);
- Il secondo numero individua la presenza o meno della rientranza (1 se assente e 2 se presente);

- Il terzo numero indica la dimensione massima del sistema di ombreggiamento, dove 0 ne rappresenta l'assenza, 1 la lunghezza fissata ad un metro e 2 la massima lunghezza possibile.

tab. 2.15 - Ipotesi di configurazione con relativo codice identificativo. Fonte: Manzan & Padovan, 2013, tabella dell'autrice

Descrizione	Codice caso
Vetro standard senza rientranza	1.1.1
Vetro standard con rientranza	1.2.1
Vetro standard senza rientranza e lunghezza massima	1.1.2
Vetro standard con rientranza e lunghezza massima	1.2.2
Vetro standard senza schermatura	1.1.0
Vetro a controllo solare senza rientranza	2.1.1
Vetro a controllo solare con rientranza	2.2.1
Vetro a controllo solare senza rientranza e lunghezza massima	2.1.2
Vetro a controllo solare con rientranza e lunghezza massima	2.2.2
Vetro a controllo solare senza schermatura	2.1.0

In fig. 2.35 vengono inoltre riportate le variabili che influenzano l'ostruzione solare tramite pannello: tale pannello, infatti, protegge la finestra dalla radiazione diretta riducendo i carichi di condizionamento, ma anche i carichi solari recepiti nel periodo invernale e l'illuminazione naturale disponibile, con conseguente aumento di consumo di energia per l'illuminamento artificiale.

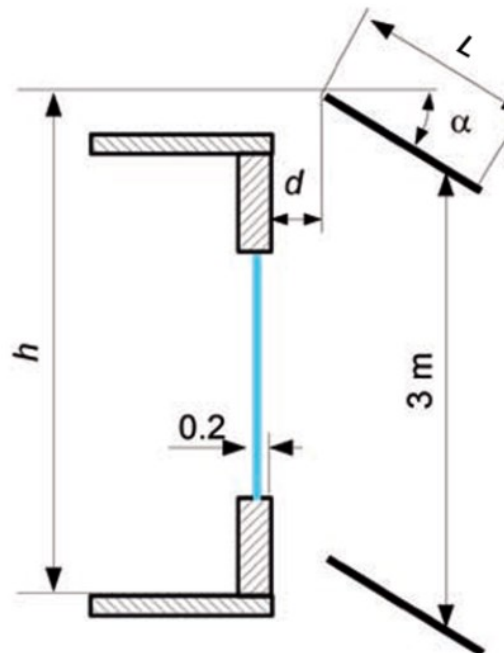


fig. 2.35 - Geometria del pannello e parametri per l'ottimizzazione. Fonte: Manzan & Padovan, 2013

Per minimizzare il consumo energetico, è stata condotta un'ottimizzazione per identificare le geometrie del sistema schermante. La funzione obiettivo da minimizzare è quella del consumo annuale di energia primaria, ovvero:

$$Q_p = \frac{Q_h}{\eta_h} + \frac{Q_c}{\eta_c} + \frac{Q_{el}}{\eta_{el}}$$

Con:

Q_h , Q_c e Q_{el} rispettivamente energia fornita per riscaldamento, raffrescamento e quella assorbita per illuminamento;

$\eta_h = 0,8$, $\eta_c = 0,8$, $\eta_{el} = 0,4$ efficienze dei vari sistemi.

La fig. 2.36 riporta il diagramma di flusso utilizzato in modeFRONTIER. Va segnalato che il calcolo illuminotecnico svolto con DAYSIM avviene nel nodo runRadSill. I dati sono trasferiti al codice ESP-r che, utilizzando il modulo "bps", si occupa della determinazione dei fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento. I file generati dal calcolo termico sono utilizzati quindi dal nodo "PrimaryEnergy" per calcolare la funzione obiettivo da minimizzare precedentemente esplicitata.

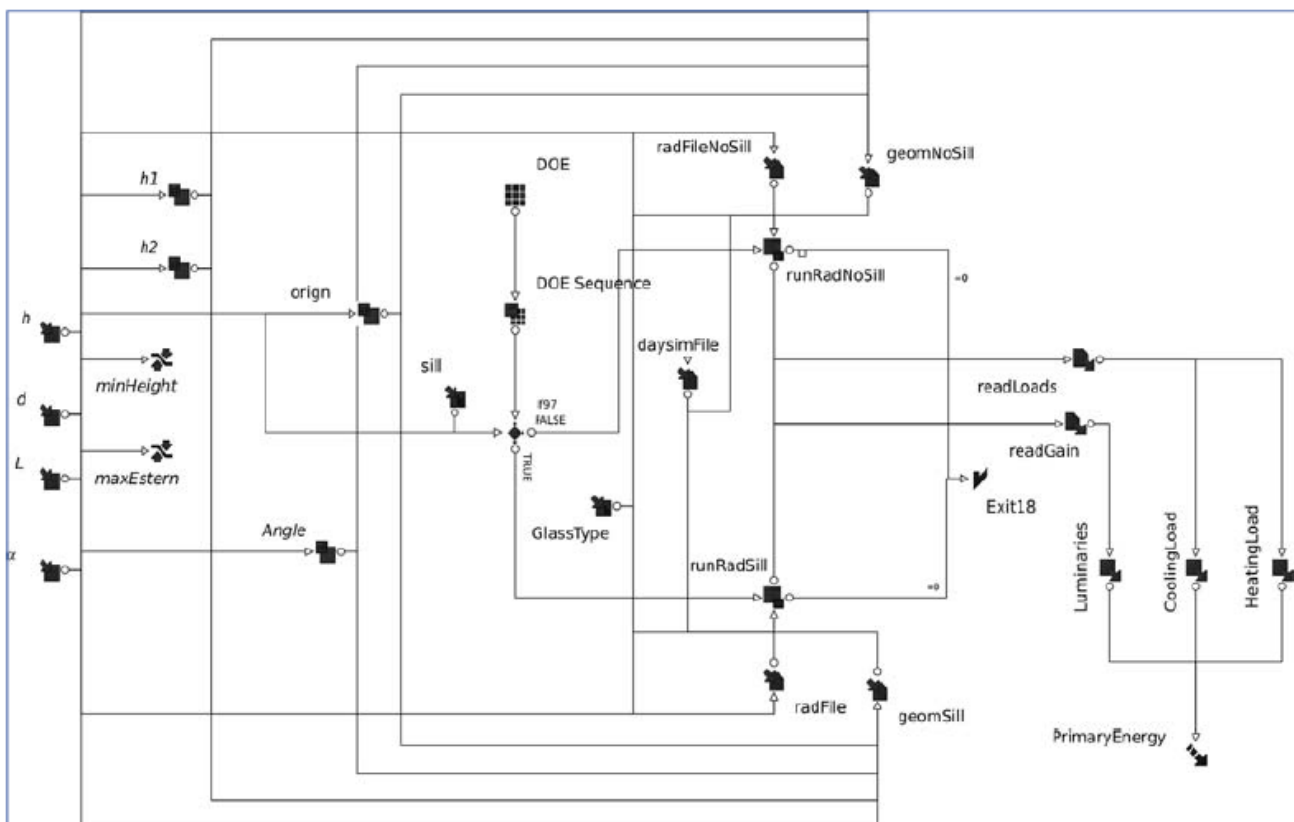


fig. 2.36 - Workflow in modeFRONTIER per l'ottimizzazione della schermatura solare. Fonte: Manzan & Padovan, 2013

Ogni ottimizzazione è stata effettuata con 100 generazioni di 16 individui ciascuna. È stato implementato l'algoritmo genetico NSGA-II, nonostante il problema fosse a singolo obiettivo, poiché si è ritenuto più adatto a trattare un problema con discontinuità.

Le tab. 2.16 e tab. 2.17 presentano rispettivamente le configurazioni ottime ricavate dall'analisi e i risultati dell'ottimizzazione.

tab. 2.16 - Geometrie ottimizzate per Trieste. *Fonte:* Manzan & Padovan, 2013, tabella dell'autrice

<i>Caso</i>	<i>h</i> [m]	α [deg]	<i>d</i> [m]	<i>L</i> [m]
1.1.2	2,87	5,83	5,73E-02	1,92
2.1.2	3,21	6,80	8,14E-02	1,76
1.1.1	2,80	44,90	9,36E-02	1,00
2.1.1	2,80	38,20	9,43E-02	1,00
1.2.2	3,19	10,10	0,00E+00	1,97
2.2.2	3,17	9,10	1,24E-03	1,92
1.2.1	2,80	32,70	1,83E-01	1,00
2.2.1	2,94	30,40	2,04E-01	1,00

tab. 2.17 - Risultati dell'ottimizzazione. *Fonte:* Manzan & Padovan, 2013, tabella dell'autrice

<i>Caso</i>	Q_{el} [kWh/m ²]	Q_h [kWh/m ²]	Q_c [kWh/m ²]	Q_p [kWh/m ²]	%
1.1.2	2,60	19,16	20,87	56,54	17,74
2.1.2	2,72	22,47	16,78	55,87	18,71
1.1.1	2,69	18,28	24,28	59,49	13,44
2.1.1	3,05	23,14	16,55	57,24	16,71
2.1.0	1,85	19,28	32,01	68,73	-
1.2.2	2,60	19,32	19,94	5,57	11,24
2.2.2	3,02	24,12	14,21	55,45	11,43
1.2.1	2,71	19,50	21,22	57,69	7,86
2.2.1	3,03	23,45	15,74	56,57	9,65
2.2.0	2,06	21,06	24,91	62,61	-

Per quanto riguarda la geometria del pannello, dalla tab. 2.16 l'ottimizzazione porta ad un valore di lunghezza L di poco inferiore alla lunghezza limite di 2 m nel caso 1.2.2, mentre viene sempre raggiunto il valore massimo di 1 m per quello più stretto, inoltre in questa configurazione si ottengono angoli di inclinazione attorno ai 30° . Dalla tab. 2.17 si può notare che, con il vetro a filo esterno, il consumo minore si ottiene per il caso 2.1.2, cioè una finestra con vetro a controllo solare e una larga superficie oscurante. Per questa configurazione la riduzione di energia rispetto al caso 2.1.0 è circa il 19%, tuttavia buoni risultati sono presenti per il pannello più stretto, con una riduzione che arriva al 18%. La fig. 2.37 riporta a livello grafico il confronto fra le varie casistiche: è possibile dedurre che carichi di riscaldamento e condizionamento sono sempre obiettivi contrastanti, mentre il consumo dovuto all'illuminamento segue principalmente il carico di riscaldamento.

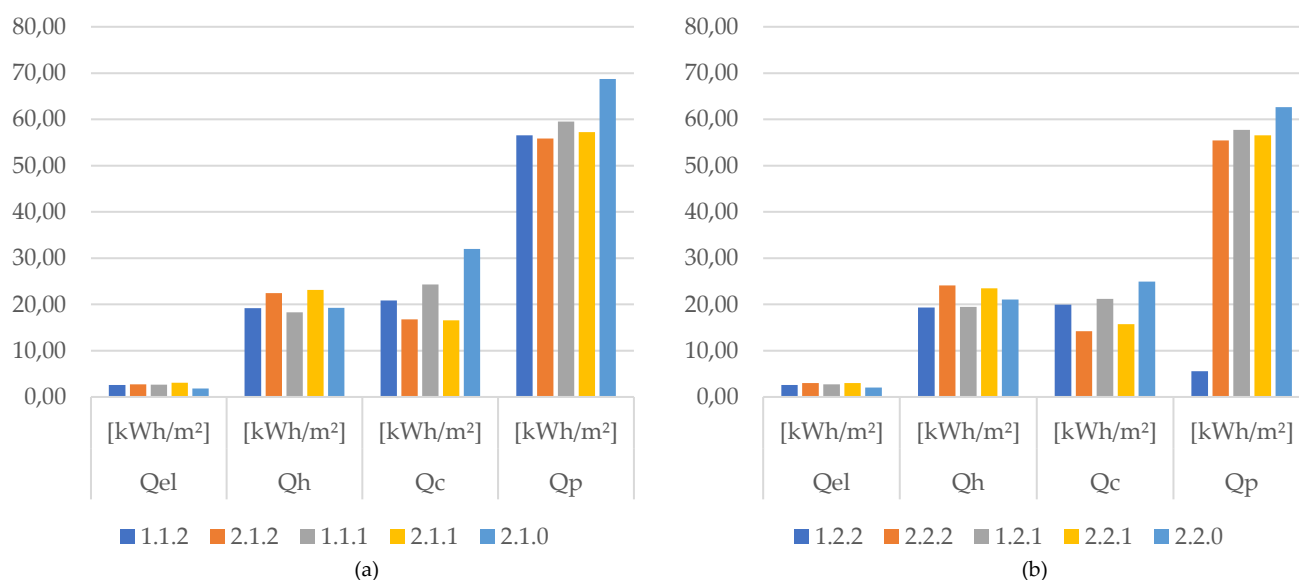


fig. 2.37 - Confronto grafico dei risultati per vetro (a) senza rientranza, (b) con rientranza. Fonte: Manzan & Padovan, 2013; grafico dell'autrice

Il secondo esempio proposto riguardante l'ottimizzazione dell'involucro è lo studio di Cellura et al. (Cellura et al., 2019), sviluppato nell'ambito delle attività di ricerca dell'*Annex 72 dell'International Energy Agency*, che elabora un approccio metodologico da applicare nella progettazione o nella ristrutturazione degli edifici al fine di correlare aspetti energetici e ambientali di ciclo di vita e variabili di natura economica in un'ottimizzazione multi-obiettivo. La metodologia si fonda su differenti approcci: per valutare i consumi energetici in fase d'uso è stata svolta una simulazione termofisica, l'analisi LCA valuta invece gli impatti incorporati degli interventi di risparmio energetico, e vi è anche una valutazione di tipo economico. L'ottimizzazione multi-obiettivo, infine, permette di individuare l'insieme di materiali e i relativi

spessori da impiegare per la realizzazione o per il retrofit ottimale dell'edificio. Le tecniche sono quindi combinate secondo uno schema logico diviso in tre fasi:

1. Definizione del caso base, in cui viene elaborato l'input geometrico e svolta la descrizione termofisica del caso studio. l'edificio scelto è piuttosto semplice, composto da un solo ambiente e modellato in SketchUp. Le pareti esterne sono in calcestruzzo e mattoni, con camera d'aria e strato isolante, il tetto in solo calcestruzzo ed il pavimento esterno in calcestruzzo e isolante. Le prestazioni termofisiche orarie sono state valutate tramite EnergyPlus.
2. Definizione delle variabili e funzioni obiettivo. Sono stati considerati variabili gli spessori di tre isolanti e due materiali da costruzione: i primi sono stati valutati sia applicati alle pareti esterne che al tetto, mentre i secondi sono stati considerati come eventuali ulteriori strati da aggiungere alle pareti (tab. 2.18).

tab. 2.18 - Valori possibili delle variabili del modello. Fonte: Cellura et al., 2019, tabella dell'autrice

<i>Materiale</i>	<i>Spessori possibili [m]</i>	<i>Valori</i>
<i>Pannelli isolanti in EPS</i>	0; 0,025; 0,05; 0,075; 0,1; 0,125; 0,15	7
<i>Pannelli isolanti in lana di roccia</i>	0; 0,51; 0,076; 0,092; 0,133; 0,152	6
<i>Pannelli isolanti in lana di vetro</i>	0; 0,025; 0,05; 0,075; 0,1; 0,125; 0,15	7
<i>Mattoni forati</i>	0; 0,25; 0,3; 0,38; 0,44; 0,5	6
<i>Calcestruzzo</i>	Tra 0 e 0,5 a passi di 0,001	500

Le funzioni obiettivo scelte sono la somma dei fabbisogni annuali di riscaldamento e raffreddamento durante la vita utile dell'edificio, gli indicatori *Global Warming Potential* (GWP) ed *embodied energy* (EE) e il costo di ristrutturazione minimizzato.

3. Ottimizzazione ed elaborazione del fronte di Pareto tramite algoritmo NSGA-II. Rispetto alle 259308000 configurazioni possibili sono state confrontate 2016 configurazioni di edifici, e sono state individuate 10 soluzioni ottimali di retrofit.

La metodologia è riassunta a livello grafico in fig. 2.38.

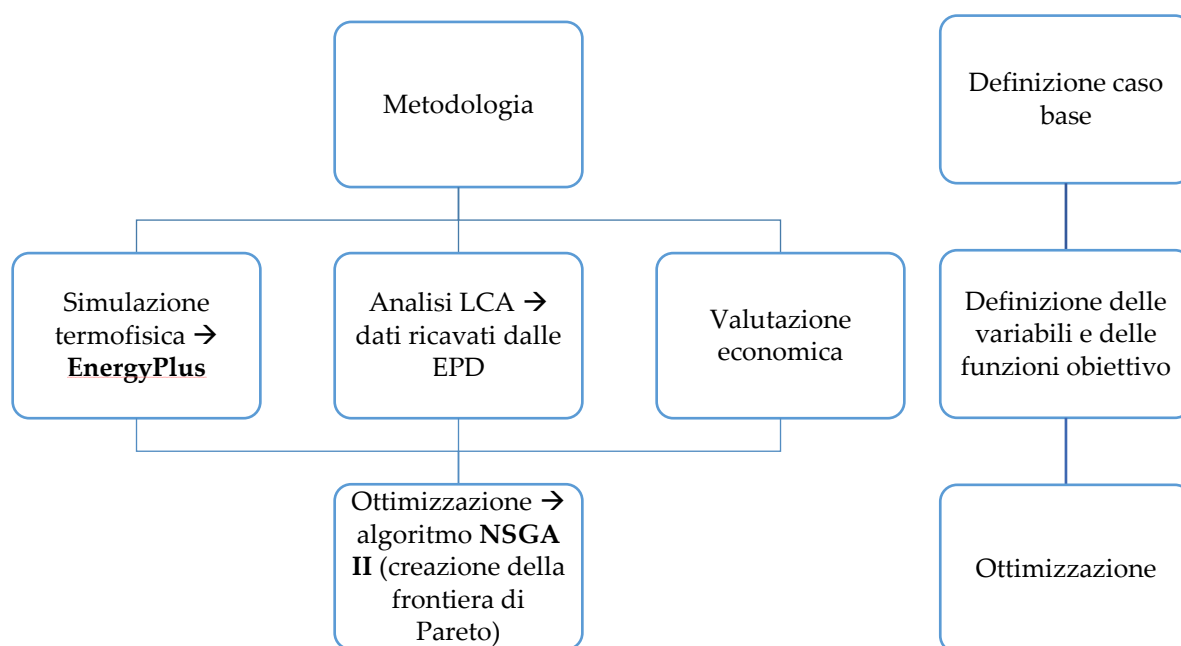


fig. 2.38 - Schema delle fasi e della metodologia adottata. Fonte: Cellura et al., 2019, grafico dell'autrice

Le soluzioni trovate prevedono un sottile strato di calcestruzzo (tra 0 e 0,012 m) e non includono la presenza di materiale isolante. Per quanto riguarda il tetto, 7 delle soluzioni ottimali non includono la presenza di uno strato di isolante, mentre nelle rimanenti 3 si considera l'installazione di uno strato di pannelli di lana di vetro (0,025 m). Questo si ipotizza coerente poiché le pareti possedevano già un buon grado di isolamento e sia tetto che pareti erano composte da un'elevata quantità di materiali massivi. In tab. 2.19 sono riportati i valori delle quattro funzioni obiettivo; il fronte di Pareto è individuato in questo caso tramite una mappa di colore: in bianco vi sono le soluzioni ritenute positive, in azzurro quelle intermedie ed in arancione le negative.

tab. 2.19 - Valori assunti dalle quattro funzioni obiettivo in bianco quelli ritenuti positivi dagli autori, in azzurro quelli intermedi e in arancione i negativi). Fonte: Cellura et al., 2019, tabella dell'autrice

<i>Consumi energetici in fase d'uso [MJ]</i>	<i>GWP [kg CO₂-eq]</i>	<i>Embodied Energy [MJ]</i>	<i>Costo d'investimento [€]</i>
1159874	329	6116	253
1161540	206	4744	235
1163874	166	7	229
1495356	982	11015	148
1501479	696	7815	105
1502290	655	7357	99
1509450	329	3700	50
1513290	166	1871	26
1515188	84	957	13
1518304	0	0	0

È possibile osservare come sia forte il contrasto tra gli obiettivi di bassi consumi energetici per la climatizzazione e bassi costi di investimento: la soluzione del fronte di Pareto con il minimo consumo energetico comporta il maggiore costo di investimento ed impatti energetico-ambientali. Nelle soluzioni estreme del fronte si può vedere come il minimo costo ed impatto ambientale si avrebbe scegliendo di non eseguire alcun intervento.

Un altro studio rilevante è quello di Chen et al. (Chen et al., 2021), che si propone di trovare i parametri ottimali di design dell'involucro di un edificio tramite un metodo di ottimizzazione multi-obiettivo che considera come funzioni obiettivo sia i consumi energetici che il comfort termico interno. Viene utilizzato DesignBuilder per simulare il modello BIM importato per ottenere un dataset effettivo dei consumi dell'edificio. Per svolgere l'ottimizzazione è stata utilizzata la combinazione dei due algoritmi LSSVM e NSGA-II. Il *Least-squares support-vector machines*, ovvero la versione migliorata ai minimi quadrati dei *support-vector machines* (SVM), utilizza un sistema lineare ai minimi quadrati come funzione obiettivo per trasformare i vincoli di disuguaglianza del problema di ottimizzazione in vincoli di uguaglianza. Come gli SVM, è un metodo *machine learning* (ML), ovvero «un sottoinsieme dell'intelligenza artificiale (AI) che si occupa di creare sistemi che apprendono—o migliorano le performance—in base ai dati che utilizzano» (*Cos'è il machine learning?* | Oracle Italia, s.d.). L'implementazione del metodo proposto è stata svolta in MATLAB. La metodologia adottata segue tre step, riassunti in fig. 2.39.

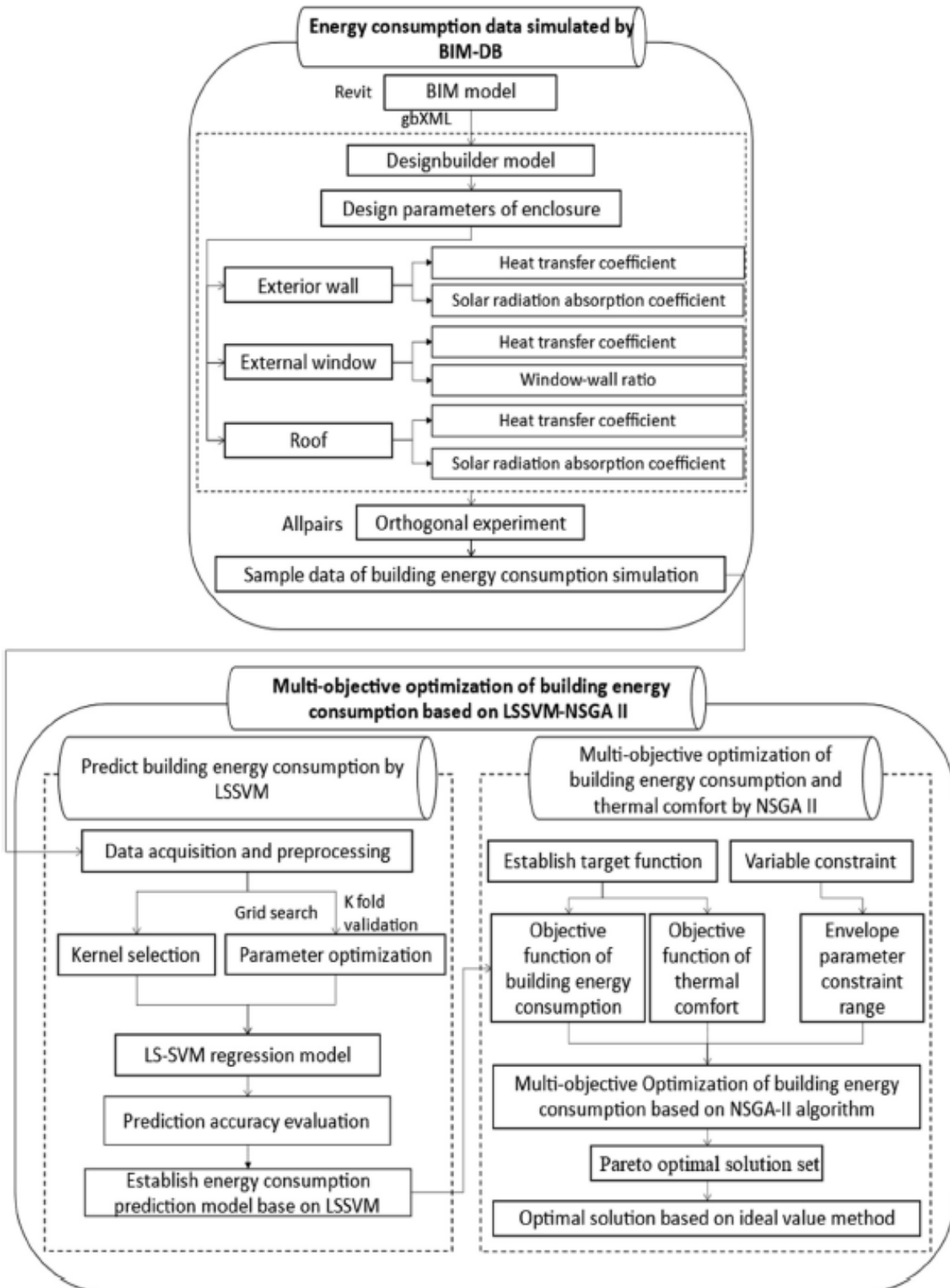


fig. 2.39 - Ottimizzazione multi-obiettivo svolta tramite gli algoritmi LSSVM e NSGA-II. Fonte: Chen et al., 2021

Il caso studio analizzato è un nuovo edificio a cinque piani facente parte della Huazhong University of Science and Technology. La struttura è costituita da un telaio in calcestruzzo armato, non sono presenti filtri solari e tutti i piani hanno lo stesso layout. L'edificio è alimentato ad elettricità e la temperatura interna, mantenuta sempre tra i 10 e i 25 °C, è controllata da un sistema di aria condizionata. La parte di modellazione è stata svolta in Revit, poi il modello è stato importato in DesignBuilder (DB) per ottenere la simulazione del consumo di energia dell'edificio. Sono stati quindi settati dei parametri base, come la posizione dell'edificio e la data in cui è stata svolta la simulazione, per poter ricavare alcuni parametri esterni (temperatura, umidità, ecc.). Considerando l'impatto che il design della facciata ha sui consumi energetici di un edificio, sono stati definiti sei parametri come variabili input in DB per il calcolo dei consumi; i valori di tali parametri per il design originale sono riassunti in tab. 2.20. Il consumo del design originale calcolato è di 6795,52 kWh.

tab. 2.20 - Valori originali dei principali parametri di design dell'edificio base. Fonte: Chen et al., 2021, tabella dell'autrice
Parametri della struttura dell'involucro

	Valore iniziale
<i>U [W/(m²K)] muro esterno</i>	0,45
<i>Assorbimento solare del muro esterno</i>	0,50
<i>U [W/(m²K)] tetto</i>	0,33
<i>Assorbimento solare del tetto</i>	0,40
<i>U [W/(m²K)] finestre esterne</i>	3,50
<i>Rapporto muratura/finestre</i>	0,45

Per lo svolgimento del *orthogonal experiment design* vi sono sei fattori e sei livelli. È stata scelta la matrice ortogonale L54, progettata grazie ad Allpairs¹⁴; i risultati sono quindi stati importati in DB, ottenendo 54 set di risultati sui consumi energetici dell'edificio. La diversa combinazione di parametri dell'involucro dell'edificio produce risultati che vanno dai 7140,86 kWh ai 6052,68 kWh. I set ottenuti dall'*orthogonal experiment* sono stati utilizzati come *training set* per predire il consumo di energia dell'edificio tramite LSSVM. Sono stati quindi simulati cinque set di dati rispettivamente in condizioni di alti, moderati e bassi consumi: i 15 set di dati sono stati utilizzati come *test set* della predizione LSSVM, con parametri normalizzati.

Per eseguire l'ottimizzazione multi-obiettivo tramite NSGA-II sono stati determinati il numero di obiettivi - che sono due: massimizzazione del comfort

¹⁴ Allpairs è un generatore di combinazioni di test open source scritto in Python. Permette di creare un insieme di test usando il metodo 'pairwise combinations', riducendo un numero di combinazioni di variabili in un insieme minore che copre la maggior parte delle situazioni. (AllPairs, s.d.)

termico e minimizzazione dei consumi - il tipo e dimensione della popolazione, i valori di *crossover* e gli operatori di mutazione, i criteri di stop dell'algoritmo. È stato quindi individuato il fronte di Pareto, contenente 40 soluzioni ottimali. Per l'individuazione della soluzione migliore è stato utilizzato il metodo del punto ideale, come si può vedere in fig. 2.40. Trovato il punto E (0,8386; 5881,726), interpolando la miglior soluzione possibile sia per riduzione dei consumi che aumento del comfort termico, è stato poi individuato il punto P. In tab. 2.21 sono riassunti i parametri dell'involucro e il consumo energetico relativi al punto ottimo e confrontati con il caso reale.

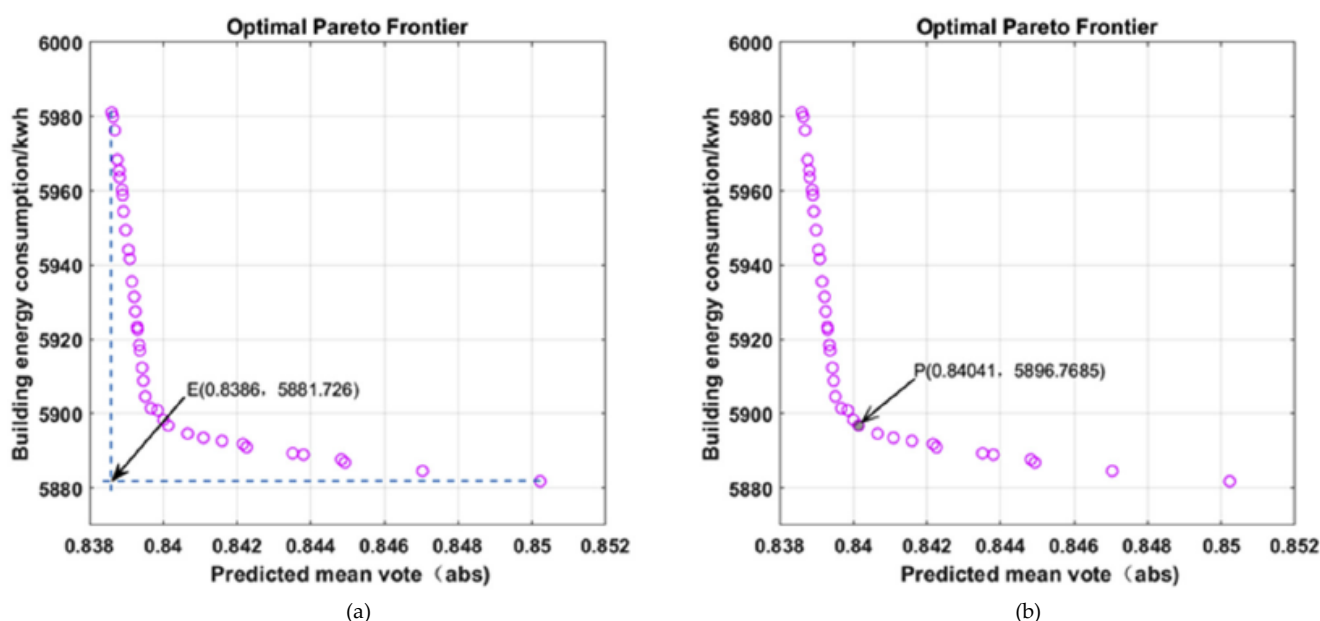


fig. 2.40 - (a) Soluzione ideale dell'ottimizzazione, (b) soluzione ottimale individuata. Fonte: Chen et al., 2021

tab. 2.21 - Confronto fra la soluzione ottima individuata sul fronte di Pareto ed il caso reale. Fonte: Chen et al., 2021, tabella dell'autrice

Parametri	Valore iniziale	Soluzione ottima
$U [W/(m^2K)]$ muro esterno	0,45	0,20
Assorbimento solare del muro esterno	0,50	0,55
$U [W/(m^2K)]$ tetto	0,33	0,20
Assorbimento solare del tetto	0,40	0,42
$U [W/(m^2K)]$ finestre esterne	3,50	1,00
Rapporto muratura/finestre	0,45	0,22
Consumo energetico dell'edificio [kWh]	6595,52	5896,77

Dai risultati ottenuti è possibile vedere come i vari parametri abbiano “pesi” diversi nella riduzione dei consumi energetici: la trasmittanza termica di muri e finestre esterni ed il rapporto pieno-vuoto, ad esempio, hanno un impatto sulla riduzione dei consumi energetici maggiore rispetto alla trasmittanza del tetto e l'assorbimento solare di murature e copertura.

Come già sottolineato in più passaggi, il contributo che ha l'involucro di un edificio è difficilmente scindibile dal rapporto che questo ha con l'impianto presente: se, infatti, l'involucro possiede delle caratteristiche che lo rendono altamente performante sarà possibile utilizzare un condizionamento e riscaldamento più "leggeri", e viceversa. Per questo motivo numerosi studi si concentrano su entrambi gli aspetti contemporaneamente per arrivare alla soluzione ottima.

3.4 Fase esecutiva - ottimizzazione dell'impianto

L'ottimizzazione del sistema impiantistico di un edificio viene svolta in una fase piuttosto avanzata della progettazione, tenendo conto di vincoli e conclusioni individuati nelle fasi precedenti e coinvolgendo varie figure professionali, tra cui specialmente gli impiantisti. In un contesto di ottimizzazione *simulation-based*, la performance dei sistemi HVAC ipotizzati viene analizzata nel programma scelto per svolgere la simulazione. Secondo Casini (Casini, 2021) gli strumenti per la *Building Performance Simulation* (BPS) – come ad esempio TRNSYS ed EnergyPlus – si concentrano sulla performance annuale di un edificio e, prevedendo la possibilità di dimensionare il sistema impiantistico, utilizzano come base dei loro calcoli il cosiddetto *worst case scenario*. Sempre secondo Casini, il workflow dei software BPS per il dimensionamento del sistema prevede due livelli di dettaglio della simulazione:

1. Simulazione concentrata maggiormente sull'involucro dell'edificio, con assunzioni semplificate riguardo al sistema HVAC;
2. Simulazione transitoria dettagliata di involucro e impianto dell'edificio, inclusi i sistemi di controllo di quest'ultimo.

Vista la complessità del secondo approccio, la maggior parte dei designer utilizza il primo. Un approccio comune è infatti quello di svolgere una stima iniziale della dimensione del sistema HVAC base secondo gli standard proposti dall'industria; in seguito, viene svolta una simulazione preliminare di livello 1 utilizzando la reale forma ed involucro dell'edificio. Questa prima fase serve ad individuare i carichi di picco da utilizzare nello studio delle variazioni transitorie durante le stagioni di riscaldamento e condizionamento.

Anche in questo caso viene sottolineata l'interdipendenza tra involucro ed impianto. Si vedono ora alcuni esempi di studi che hanno indagato l'ottimizzazione del sistema impiantistico tramite un approccio basato su simulazione.

Manzan e Padovan, nel già citato articolo (Manzan & Padovan, 2013), svolgono uno studio di *system sizing* ottimizzando un impianto solare per la produzione di acqua calda sanitaria (ACS) con accumulo termico, schematizzato in fig. 2.41. Gli elementi in figura sono i seguenti:

1. Serbatoio di accumulo;
2. Caldaia a condensazione, che serve a mantenere elevata la temperatura all'interno del serbatoio quando il pannello è insufficiente;
3. Pannello solare;
4. Valvola a tre vie;
5. Pompa del sistema solare;
6. Pompa della caldaia.

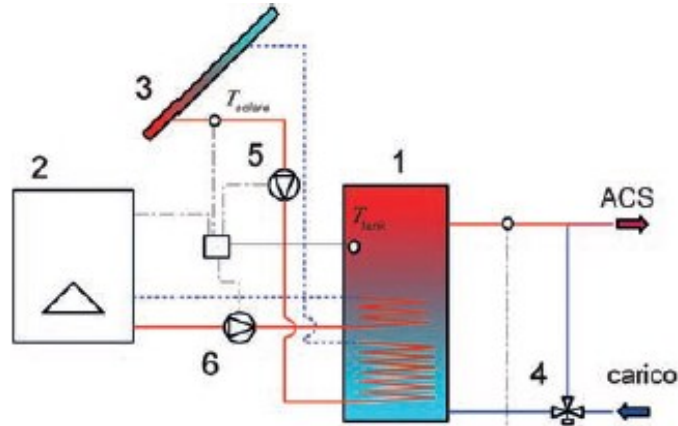


fig. 2.41 - Schema di un impianto per produzione di ACS con pannello solare.
Fonte: Manzan & Padovan, 2013

Anche in questo caso è stata volta un'ottimizzazione multi-obiettivo, i cui obiettivi da minimizzare sono:

- Il volume lordo del bollitore V_{tank} ;
- Il consumo di energia primaria per alimentare la caldaia Q_p , calcolato come

$$Q_p = \int G \cdot H \, dt$$

Con:

- G: portata di combustibile;
- H: potere calorifico inferiore.

È stato scelto un caso base con un bollitore di capacità 300 l e spessore di isolante di 5 cm; la geometria è stata modificata variando l'altezza del serbatoio da un minimo di 1,29 m ad un massimo di 1,79 m, e lo spessore dell'isolante da un minimo di 1 cm ad un massimo di 15 cm.

Il calcolo impiantistico è stato sviluppato dinamicamente con il codice ESP-r e l'ottimizzazione eseguita con modeFRONTIER sempre attraverso un algoritmo genetico.

I risultati sono rappresentati in fig. 2.43 e tab. 2.22, dove è possibile vedere le due casistiche ottimali individuate grazie alla frontiera di Pareto.

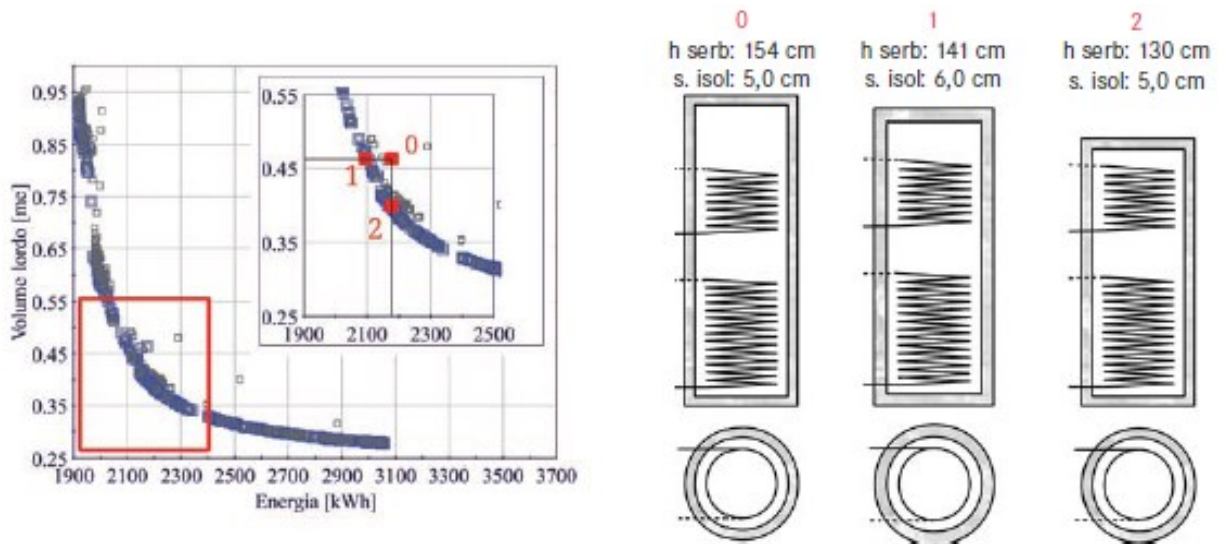


fig. 2.42 - Risultati dell'ottimizzazione. Fonte: Manzan & Padovan, 2013

tab. 2.22 - Casi limite dell'ottimizzazione. Fonte: Manzan & Padovan, 2013, tabella dell'autrice

Caso	h	s	V	Q_p
	[m]	[m]	[m ²]	[kWh]
0	1,54	0,05	0,463	2176
1	1,41	0,06	0,462	2110
2	1,31	0,05	0,396	2179

Il caso 1 rappresenta un volume di serbatoio simile al caso base ma con un fabbisogno di energia primaria minore, viceversa il caso 2 ha un consumo minore ma volume maggiore. Tutte le soluzioni sul fronte di Pareto comprese fra i punti 1 e 2 sono ottimizzate rispetto al caso 0; si può notare come nel caso 2 la variazione di volume sia significativa (14%) ma l'effetto sull'energia primaria utilizzata risulta essere molto minore, con una riduzione di solo il 3% circa.

Nel paper di Chu et al. (Chu et al., 2019) vengono studiati il beneficio economico, la sostenibilità ambientale ed il vantaggio energetico del sistema combinato trigenerativo CCHP (*combined cooling, heating, and power*) per cinque diverse categorie edilizie (uffici, supermercato, hotel, scuola e ospedale) nelle stagioni di transizione, ovvero autunno e primavera, considerando le differenti regolamentazioni riguardo alle emissioni di carbonio (*carbon tax* e *carbon trading*). I casi studio sono ipotizzati a Shangai, Cina. Il funzionamento schematico di un tipico sistema CCHP è rappresentato in fig. 2.43, comparato con quello di un sistema separato. In questo

sistema vi è una correlazione lineare tra il calore e l'elettricità prodotta dall'unità di generazione di energia (PGU- *power generation unit*).

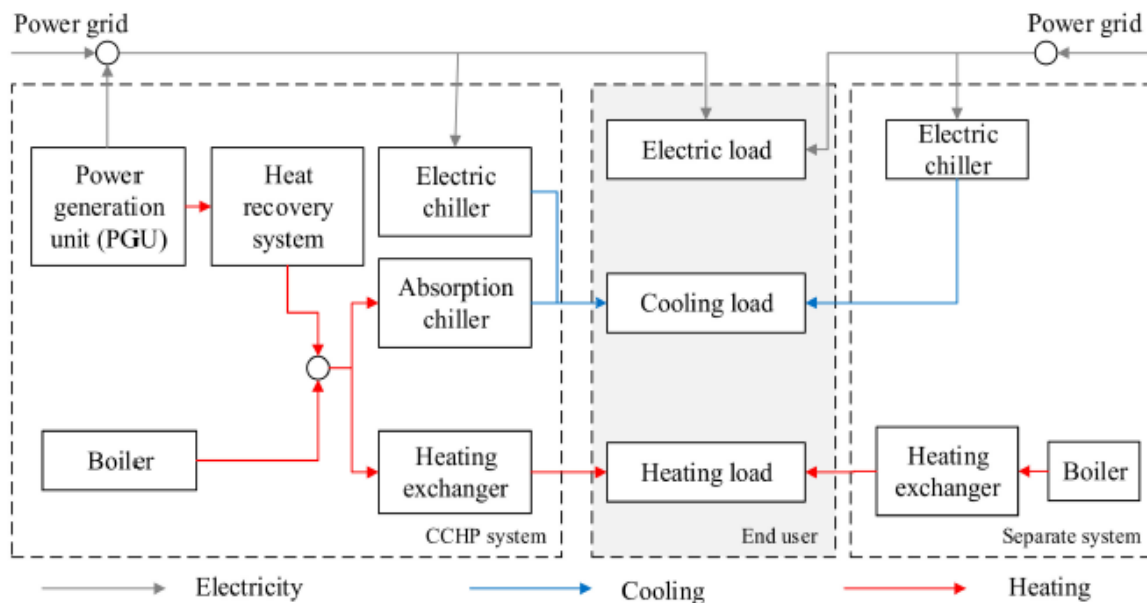


fig. 2.43 - Struttura del sistema CCHP e del sistema separato. Fonte: Chu et al., 2019

Per la risoluzione del problema è stato sviluppato un modello NPL (*non-linear programming*), che considera gli aspetti economici, ambientali ed energetici sotto differenti normative sulle emissioni di carbonio. Le normative considerate sono:

- *Carbon tax*: tassa imposta sulle emissioni totali e basata sul prezzo delle emissioni di CO₂; secondo l'UN IPCC il prezzo della tassa di carbonio adottata in alcune nazioni sviluppate è di \$20-\$100/ton.
- *Carbon trading*: meccanismo per cui viene creato un mercato di scambio del carbonio. Il governo permette ad un utente una certa quantità di emissioni di carbonio, e queste possono essere vendute o scambiate.

Nel modello, i bilanci energetici, ovvero quello di elettricità, calore e raffreddamento, sono espressi come vincoli. Le funzioni obiettivo si sono invece concentrate su diversi aspetti:

- Per l'aspetto economico è stato valutato il *cost-saving ratio* (COSR), ovvero la percentuale di riduzione del costo del sistema CCHP rispetto a quello separato.
- Per l'aspetto ambientale è stato ricavato il *carbon dioxide emission reduction ratio* (CDERR), ovvero il beneficio ambientale ricavato con l'uso del CCHP rispetto al sistema separato.
- L'aspetto energetico è stato valutato tramite il *primary energy saving ratio* (PESR), cioè il consumo di energia primaria risparmiato grazie al CCHP.

Data la necessità di lunghi tempi computazionali, per risolvere il modello NPL è stato scelto l'algoritmo euristico PSO (*Particle Swarm Optimization*), già citato nel paragrafo "I principi dell'ottimizzazione e la frontiera di Pareto". L'algoritmo è stato implementato in Matlab. Nei grafici in fig. 2.44 sono rappresentati i risultati ottenuti per le cinque tipologie edilizie.

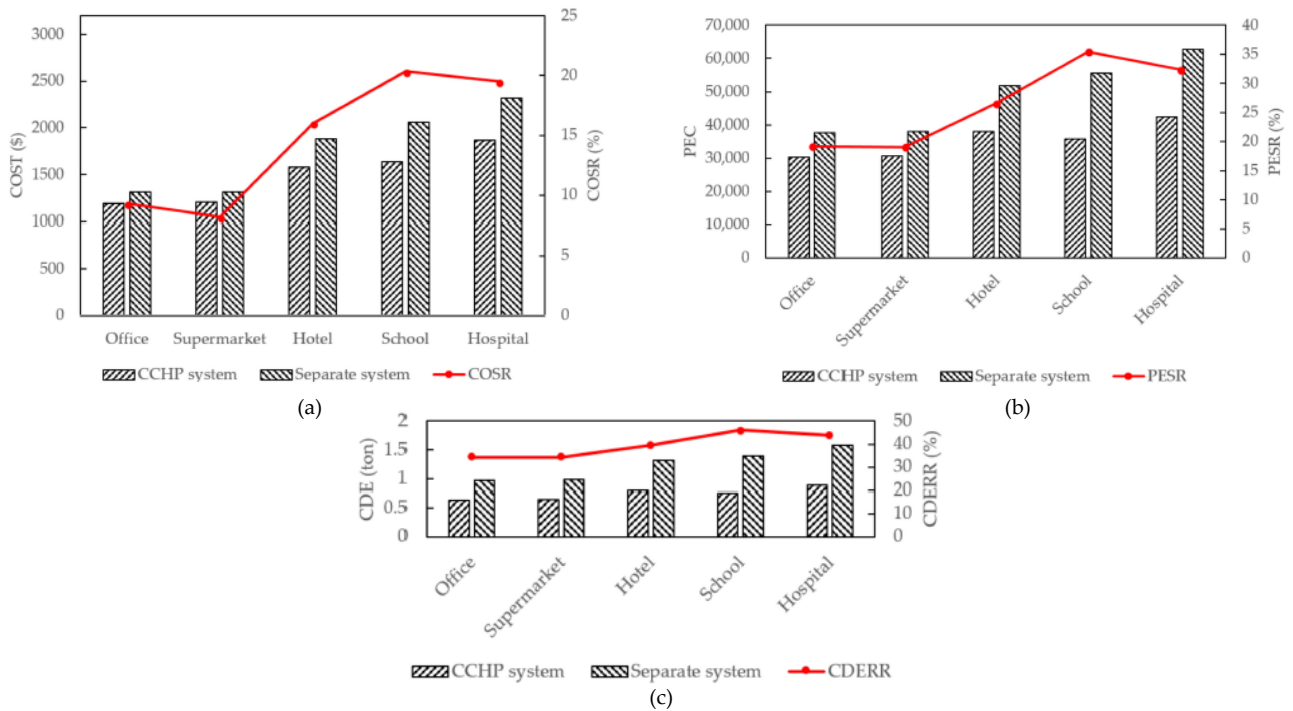


fig. 2.44 - (a) costo, (b) consumo di energia primaria e (c) emissioni di CO₂ di un sistema CCHP rispetto ad uno separato.
Fonte: Chu et al., 2019

Dai risultati è possibile vedere che quando non viene tenuto conto di nessuna normativa sulle emissioni di carbonio, lo studio indica un risparmio del CCHP rispetto al sistema separato del 9,3%, 8,2%, 16,0%, 20,3% e 19,5% rispettivamente per ufficio, supermercato, hotel, scuola e ospedale. Inoltre, l'analisi dimostra che i costi delle emissioni di ufficio, supermercato, hotel, scuola e ospedale migliorano rispetto alla situazione non normata quando vengono applicate le restrizioni normative, soprattutto la *carbon trading regulation*. L'introduzione di normative sulle emissioni di carbonio non influenza, invece, l'ottimizzazione delle emissioni di CO₂ dei cinque casi. Si può notare come scuola e ospedale abbiano una maggiore CDERR, a causa della loro grande domanda di energia. Le normative sulle emissioni non pesano nemmeno sull'ottimizzazione del consumo di energia primaria, in cui scuola e ospedale risultano comunque i meno performanti. Riassumendo, l'utilizzo del sistema CCHP rispetto a quello separato comporta mediamente un COSR di 15,3%, un CDERR di 39,6% e un PESR di 26,5%.

SPERIMENTAZIONE: OTTIMIZZAZIONE DEI REPARTI DI DEGENZA OSPEDALIERA

In questo capitolo viene presentata la metodologia per lo sviluppo della sperimentazione, in base alle conclusioni tratte finora. In particolare, nell'ambito della degenza ospedaliera, si intende analizzare come i consumi energetici varino a seconda della conformazione geometrica e tipologica di quest'ultima, per consentire una prima ottimizzazione già nella fase di design dell'edificio.

1 LA DEGENZA OSPEDALIERA

Secondo la manualistica italiana e straniera (Dall'Olio, 2000; International Health Facility Guidelines, 2018; Rossi Prodi & Stocchetti, 1990) un edificio ospedaliero può essere suddiviso in tre zone principali: degenza, servizi generali e servizi di diagnosi e cura. Secondo Dall'Olio, i percorsi talvolta assumono un'importanza tale da diventare in un certo senso un quarto elemento. Il rapporto fra queste zone è variato continuamente nel corso dei secoli.

Negli ospedali medievali e rinascimentali la degenza avveniva in grandi sale da centinaia di pazienti, che venivano stesi sul pagliericcio; servizi, cure e degenze spesso si mescolavano e venivano svolti in unità di tempo e luogo. Con la nascita degli ospedali a padiglione, dopo la Rivoluzione francese, la degenza acquista carattere proprio e autonomo. È il periodo delle grandi scoperte della medicina, che inducono a pensare all'ospedale ad un luogo di cura più che uno di assistenza e morte; si diffondono quindi le sale operatorie ed aumentano i posti letto, grazie all'aumento dei sopravvissuti. La netta separazione tra cure e degenze durò però solo poco più di un secolo: le scoperte sulla batteriologia e l'asepsi resero superflua tale separazione e si assistette ad un riavvicinamento di queste zone nella tipologia di ospedale a monoblocco, anche se non vi fu a mescolanza.

A causa della scarsa flessibilità e modificabilità della tipologia a monoblocco venne introdotta quella dell'edificio a piastra, in cui diagnosi e cura abbandonano nuovamente i piani delle degenze per concentrarsi, appunto, nella piastra. Per

apportare carattere di elasticità anche alle zone di degenza e migliorare i collegamenti si pensò alle degenze a nastro, disposte attorno alla zona di cure. La separazione e la specializzazione della degenza rispetto ad altre funzioni avvengono dalla nascita degli ospedali a padiglioni.

Secondo Dall'Olio, l'unità di degenza è composta da tre diversi nuclei: le stanze di degenza vere e proprie, i percorsi e i servizi di degenza. I fattori che determinano le caratteristiche - formali, dimensionali e organizzative - dell'unità sono:

- La scelta del tipo di stanza, con informazioni quali il numero di posti letto, posizione dei servizi igienici, ecc.;
- La posizione dei servizi di degenza rispetto alle stanze e il rapporto fra queste ultime e il posto di guardia;
- Criterio di aggregazione delle stanze di degenza, in rapporto ai percorsi e i collegamenti con altre parti dell'ospedale.

Le *International Health Facility Guidelines* individuano, inoltre, delle caratteristiche da soddisfare affinché vi siano buone relazioni funzionali interne nei reparti di degenza. Fra queste si annoverano la centralità delle aree occupate dai pazienti, la posizione delle aree pubbliche "a contorno" dell'unità e la garanzia di un accesso diretto alle aree pazienti da parte dello staff, alle aree di servizio e deposito da parte di staff e pazienti e alle aree comuni da tutte le unità che ne fanno utilizzo.

Sempre Dall'Olio passa in rassegna alcune leggi italiane riguardanti l'edilizia ospedaliera. L'art. 3 del DM 13 settembre 1988 tratta il tema delle unità operative di degenza. Il comma 3 afferma che:

i moduli organizzativi tipo di cui al presente articolo costituiscono ad un tempo la soglia minima al di sotto della quale la gestione dell'unità operativa diviene antieconomica ed è, quindi, opportuno che sia riveduta e ottimizzata [...]. Di conseguenza i moduli tipo non costituiscono riferimento per la strutturazione formale delle unità operative potendo queste ultime essere costituite dall'aggregazione di più moduli, secondo le indicazioni programmatiche delle regioni. Di norma tutti i moduli tipo di una medesima funzione specialistica debbono costituire una sola unità operativa (divisione, sezione o servizio) salvo il caso che il raggruppamento dei moduli omogenei raggiunga dimensioni tanto ampie da rendere opportuna la suddivisione in più unità.

Nell'art. 3 sono riportati anche, per ogni modulo, il numero di posti letto

previsti per i reparti di degenza: per le terapie intensive e sub-intensive sono previsti 8 posti letto, per i reparti ad elevata e media assistenza 20, mentre le specialità di base ospitano 32 pazienti.

Il DPR n.42 del 14 gennaio 1997 afferma che l'area di degenza deve essere strutturata in modo da garantire il rispetto della privacy ed il comfort dell'utente. Devono essere presenti spazi comuni tra le degenze e/o servizi sanitari nei quali prevedere *utilities* per visitatori. I requisiti minimi che il manuale riporta sono:

- 9 mq per posto letto;
- Non più di 4 posti letto per camera e almeno un servizio igienico ogni 4 posti letto;
- Almeno il 10% delle camere di degenza devono essere singole;
- È necessario, per ogni reparto: un locale per visita e medicazioni, un locale di lavoro per almeno ogni piano di degenza per il personale di assistenza diretta, un locale per medici, uno per soggiorno, uno per il deposito di materiale pulito, un deposito per le attrezzature, uno per il materiale sporco (dotato di vuotatoio e lavapadelle), una cucina di reparto;
- Servizi igienici per il personale;
- Spazio di attesa per i visitatori;
- Almeno un bagno assistito.

Il DL n. 229/1999, chiamato anche "Riforma Bindi" o "Riforma Ter", individua 70 mq a posto letto, ripartiti approssimativamente come riportato in tab. 3.1.

tab. 3.1 - Area prevista per ciascun posto letto secondo il dl n.229/1999. Fonte: Dall'Olio, 2000

<i>Degenze</i>	18 mq/pl
<i>Diagnosi e cure</i>	14 mq/pl
<i>Servizi generali</i>	10 mq/pl
<i>Servizi tecnici</i>	5 mq/pl
<i>Superficie distribuzione</i>	15 mq/pl
<i>Strutture</i>	8 mq/pl
TOTALE	70 mq/pl

Il valore aumenta, arrivando a circa 120-150 mq, per cliniche universitarie o organismi con strutture di ricerca.

Le *International Health Facility Guidelines* forniscono, inoltre, delle dimensioni minime da rispettare a seconda della tipologia di camera (tab. 3.2), ipotizzando un letto di ospedale standard di dimensioni 1050 mm x 2250 mm e un raggio libero intorno al letto di almeno 1200 mm.

tab. 3.2 - Dimensionamento minimo delle camere secondo le *International Health Facility Guidelines*. Fonte: International Health Facility Guidelines, 2018

<i>Tipo di camera</i>	<i>Larghezza [mm]</i>	<i>Lunghezza [mm]</i>
<i>Singola</i>	3450	3600
<i>Doppia</i>	3450	5600
<i>Con 4 letti</i>	6100	5600

Le soluzioni planimetriche per le unità di degenza possono essere divise, secondo Dall'Olio, in due categorie:

1. Lineari:

- A corpo doppio: molto raro per via della sua incidenza economica e l'eccessivo sviluppo dei percorsi; prevede le camere da un lato e il corridoio dall'altro. I servizi alla degenza possono essere alle due estremità del corridoio, interrompere le degenze in una zona centrale o in un corpo ortogonale al sistema delle stanze. I vantaggi possono essere l'illuminazione e l'areazione diretta del corridoio.
- A corpo triplo: tra le soluzioni più diffuse; presenta un corridoio centrale con camere su un lato e servizi di degenza sull'altro, oppure una sequenza delle due su entrambi i lati. In alcuni casi è possibile, dando più spessore al percorso centrale, inserire su uno dei due lati della degenza un gruppo di servizi, creando quindi una via di mezzo tra corpo triplo e quintuplo.
- A corpo quintuplo: è la soluzione più compatta fra quelle lineari. Il corpo di fabbrica è profondo, con le degenze sui due fronti esterni, mentre al centro vi è una spina di servizi; è presente un doppio sistema di percorsi paralleli collegati in più punti. È possibile inserire, al centro del corpo di fabbrica, delle piccole corti, per dare luce e aria agli ambienti centrali.

2. A nucleo – la degenza si sviluppa attorno ad un nocciolo centrale, in cui vi sono i servizi. I vantaggi, rispetto alle soluzioni lineari, sono la diminuzione dei percorsi interni, la concentrazione dei servizi di degenza e la forte

autonomia morfologica e funzionale di tali unità. La forma dei nuclei può variare:

- A corpi quadrangolari a L, T e H: le soluzioni quadrate o rettangolari sono organizzate come corpi quintupli compatti, mentre le altre soluzioni prevedono le degenze sui bracci e i servizi negli incroci.
- A croce.
- A nucleo triangolare: è una soluzione molto compatta, con nucleo centrale di servizi facilmente raggiungibile.
- A nucleo radiale, che può essere a cerchio o poligono.

Nelle figure da fig. 3.1 a fig. 3.6 sono riportati alcuni esempi tipologici tratti dal manuale di Rossi Prodi e Stocchetti.

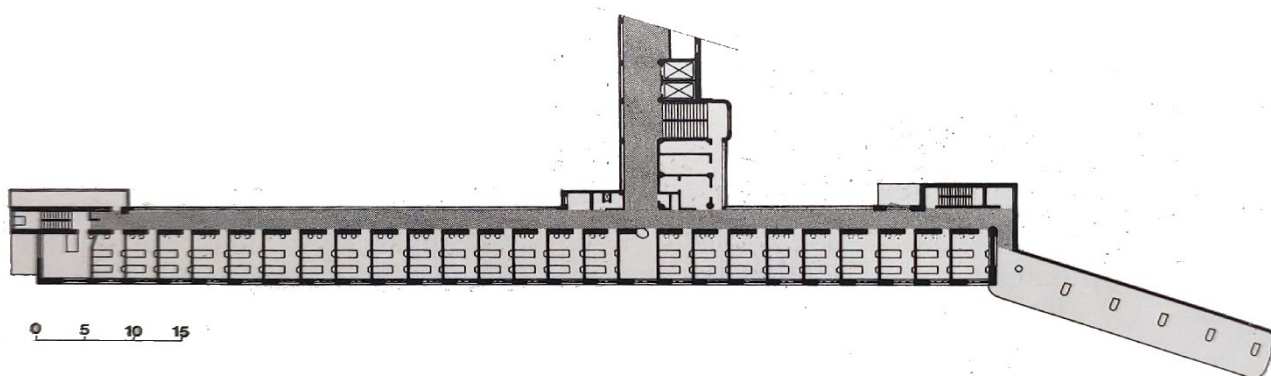


fig. 3.1 - Esempio di degenza a corpo doppio. Sanatorio di Padmio, Finlandia, 1928. Fonte: Rossi Prodi & Stocchetti, 1990

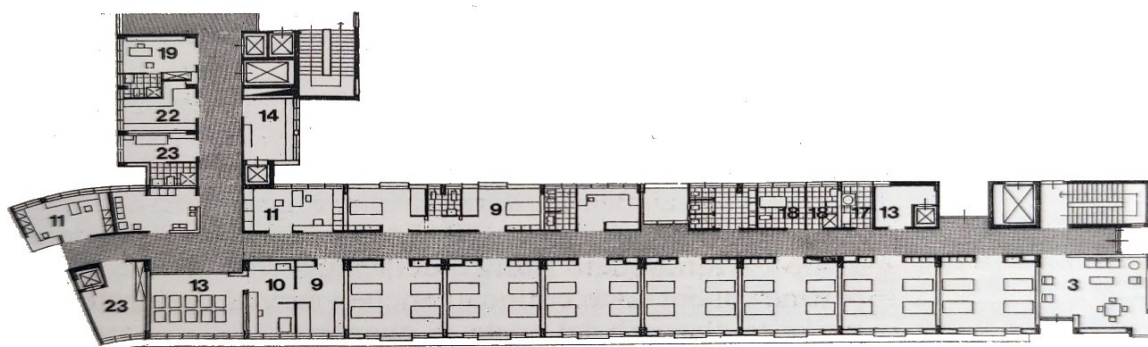


fig. 3.2 - Esempio di degenza a corpo triplo. ospedale G. Bernabeo di Ortona, Italia. Fonte: Rossi Prodi & Stocchetti, 1990

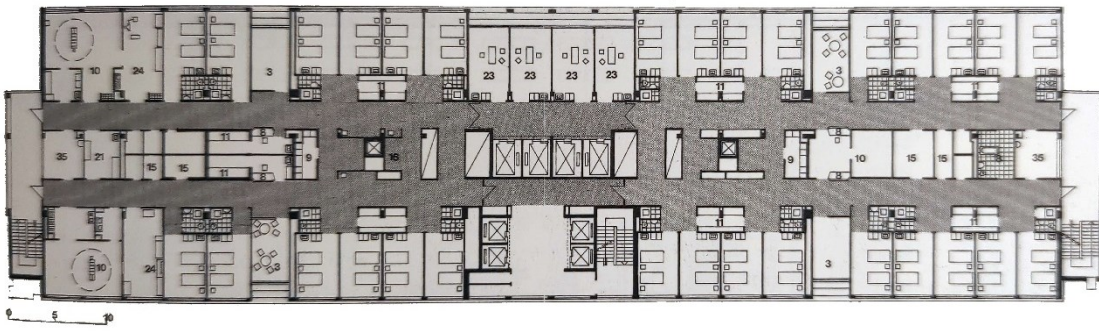


fig. 3.3 - Esempio di degenza a corpo quintuplo. Ospedale S. Vincenz-Elisabeth di Magonza, Germania, 1972. Fonte: Rossi Prodi & Stocchetti, 1990



fig. 3.4 - Esempio di degenza a corpo quintuplo con corti interne. Ospedale universitario di Zurigo, Svizzera, 1985. Fonte: Rossi Prodi & Stocchetti, 1990

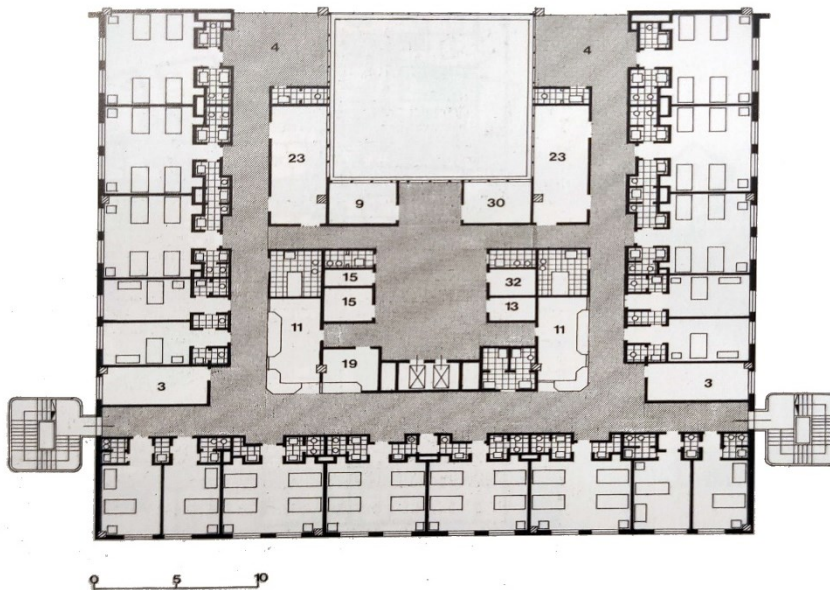


fig. 3.5 - Esempio di degenza a nucleo. Ospedale Generale Provinciale Chiese Garda Nord, Italia. Fonte: Rossi Prodi & Stocchetti, 1990

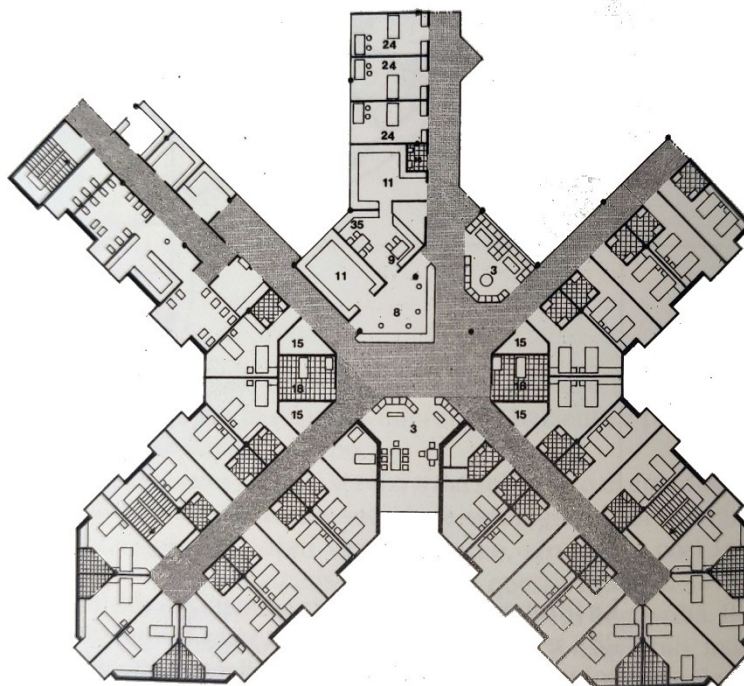


fig. 3.6 - Esempio di degenza a croce. Kreiskrankenhaus Neu-Ulm, Germania, 1981.
Fonte: Rossi Prodi & Stocchetti, 1990

2 PREMESSE ALLA MODELLAZIONE

In un ospedale generale la ripartizione delle superfici interne nelle varie zone – ovvero degenza, servizi e cure – può variare molto, dipendendo dalla grandezza del presidio, dalla tipologia adottata e dalle specialità presenti; Rossi Prodi e Stocchetti, nel loro manuale (Rossi Prodi & Stocchetti, 1990), provano ad individuare degli indici dimensionali generali orientativi, per capire come tali zone sono rapportate tra loro. Gli indici che ricavano dal loro studio, riportati in tab. 3.3, derivano dall'esame di complessi realizzati e dalla letteratura e riguardano i soli ospedali generali. Lo stesso studio sottolinea come gli ospedali con aree adibite alla didattica siano solitamente più grandi di quelli generali di circa il 20-30%, arrivando in alcuni casi a 50%.

tab. 3.3 - Percentuale di superficie netta di ciascuna zona dell'ospedale secondo il manuale "L'architettura dell'ospedale". Fonte: rossi Prodi & Stocchetti, 1990

<i>Zona (superficie netta)</i>	<i>Percentuale</i>
<i>Degenze</i>	32-40%
<i>Cure</i>	26-34%
<i>Servizi</i>	18-26%

Servizi tecnici

6-11%

Le informazioni contenute nel manuale di Rossi Prodi e Stocchetti, risalenti al 1990, sono ritenute datate; si è quindi scelto di analizzare dei progetti attuali, per capire se le proporzioni fra le zone delle strutture ospedaliere seguono lo stesso andamento oggi come allora.

I casi studio scelti sono due ospedali progettati da Studio Altieri Spa e non ancora realizzati. Studio Altieri è una società italiana di architettura e ingegneria, fondata nel 1898 e specializzata nell'architettura sanitaria. Ha realizzato, infatti, più di 150 ospedali sia in Italia che all'estero (*Studio Altieri, s.d.*). Lo studio ha gentilmente fornito tutto il materiale necessario al fine di questa analisi.

Il primo progetto scelto è quello del nuovo ospedale di Cesena, che conta 445 posti letto totali, mentre il secondo è il nuovo ospedale Ruggi d'Aragona a Salerno, che può ospitare fino a 758 pazienti. Entrambe le strutture presentano uno sviluppo maggiormente orizzontale, con uno schema che può essere definito a "piastra con blocchi laterali". In entrambi è infatti presente una piastra, nella quale sono localizzati principalmente i servizi di diagnosi e cura, e altri corpi lineari ospitanti le degenze, che si innestano nel corpo di fabbrica principale, in maniera perpendicolare nel caso di Cesena e con angolo variabile nell'ospedale di Salerno. Su ambi i progetti sono presenti corti interne per dare luce alle zone centrali, specialmente nelle degenze. Le strutture presentano rispettivamente cinque e nove piani, di cui uno interrato.

Per entrambi i casi studio sono state ricavate la percentuale di area netta dedicata alle degenze, i blocchi operatori, ai trattamenti ecc. I risultati sono espressi in tab. 3.4, tab. 3.5, fig. 3.7 e fig. 3.8.

tab. 3.4 - Area netta per ciascuna zona dell'ospedale di Cesena. Fonte: Studio Altieri Spa

Zona	Area netta [m ²]
Degenze*	13321,15
Blocchi operatori**	2170,00
Ambulatori/trattamenti***	4425,50
Area emergenza (Pronto Soccorso + blocco parto)	2525,00
Didattica	1718,50
Altro (lactarium, uffici, direzione, gestione pulizie, servizio mortuario, servizi religiosi...)	7655,00
AREA NETTA TOTALE	31815,15

*Comprensivi di camere di degenza singole, doppie e quaduple con rispettivo bagno, area staff (medico di guardia, capo sala, bagni), medicheria, area di supporto (controlli, depositi, locali pulizie, relax personale), filtri del personale per le terapie intensive, aree visitatori.

** Comprensivi delle rispettive aree staff, di supporto ecc.

*** Comprensivo di: neuroradiologia, radiologia, blocco angiografico, endoscopia, ambulatori chirurgici e ambulatori vari.

tab. 3.5 - Area netta per ciascuna zona dell'ospedale di Salerno. Fonte: Studio Altieri Spa

Zona	Area netta [m ²]
Degenze*	22452,90
Blocchi operatori**	2345,00
Ambulatori/trattamenti***	12836,50
Blocco materno/infantile	1823,00
Area emergenza (Pronto Soccorso + blocco parto)	3211
Didattica	8460,00
Altro (lactarium, uffici, direzione, gestione pulizie, servizio mortuario, servizi religiosi...)	22162,00
AREA NETTA TOTALE	73290,40

*Comprensivi di camere di degenza singole, doppie e quaduple con rispettivo bagno, area staff (medico di guardia, capo sala, bagni), medicheria, area di supporto (controlli, depositi, locali pulizie, relax personale), filtri del personale per le terapie intensive, aree visitatori.

** Comprensivi delle rispettive aree staff, di supporto ecc.

*** Comprensivo di: neuroradiologia, radiologia, blocco angiografico, endoscopia, ambulatori chirurgici e ambulatori vari.

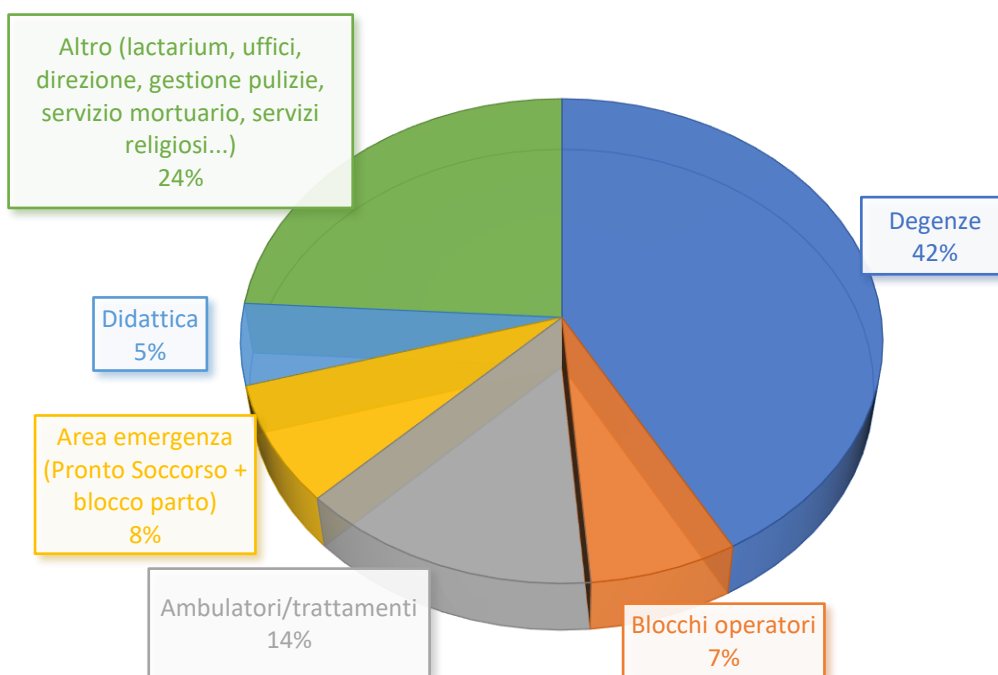


fig. 3.7 - Percentuale occupata da ciascuna zona dell'ospedale di Cesena. Fonte: Studio Altieri Spa

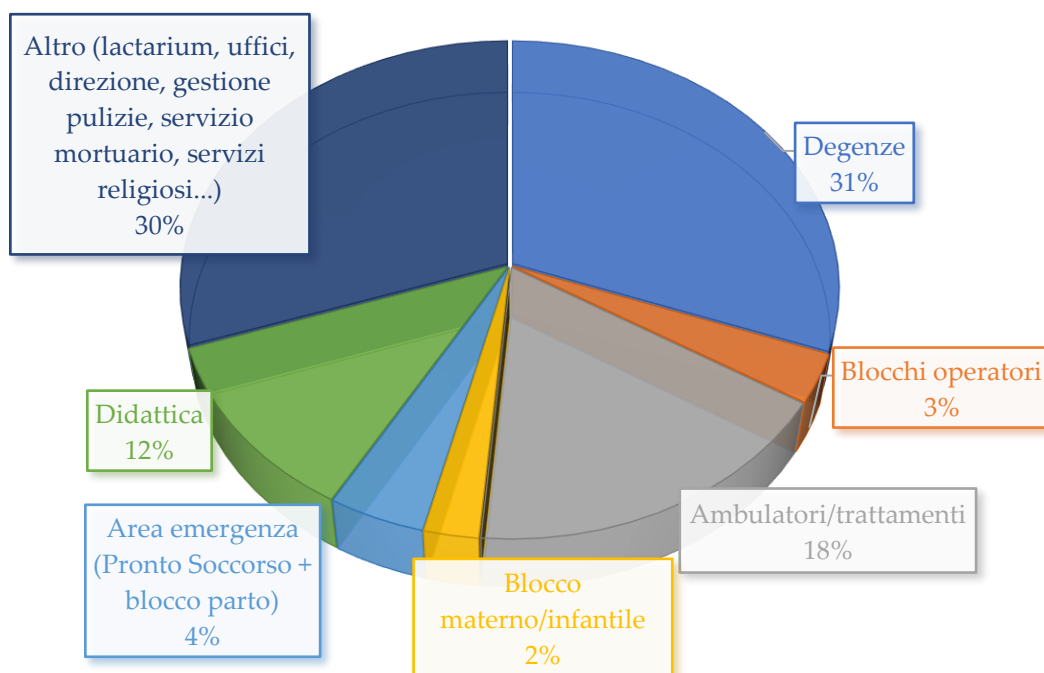


fig. 3.8 - Percentuale occupata da ciascuna zona dell'ospedale di Salerno. Fonte: Studio Altieri Spa

È possibile notare come, nonostante l'ospedale di Salerno sia più del doppio di quello di Cesena in termini di area, i rapporti delle varie zone siano piuttosto simili; i risultati sono inoltre coerenti con quelli riportati nel manuale di Rossi Prodi e Stocchetti.

La scelta di concentrare il presente studio sui reparti di degenza è data innanzitutto dalla significativa occupazione, appena dimostrata, che questa ha nell'intera struttura ospedaliera.

In secondo luogo, come già è stato fatto notare nel corso di questa tesi, le strutture sanitarie presentano parametri di comfort molto stringenti: il benessere termoigrometrico, visivo e psicologico dei pazienti deve infatti essere mantenuto sempre elevato. Negli ambienti operatori e di cura questa richiesta si somma a rigide necessità sanitarie, che comportano l'utilizzo di riscaldamento, climatizzazione e illuminazione completamente artificiale. Secondo Dall'Olio (Dall'Olio, 2000), invece,

In Italia la normativa prescrive che in tutti gli ambienti di degenza, di soggiorno e di servizio debba essere assicurata una ventilazione e una illuminazione naturale, oltre a ciò essa prescrive, per le degenze, una esposizione a sud, sud-est.

A valle di quanto concluso finora, si può ipotizzare un efficientamento maggiore, per quanto riguarda i consumi energetici e le emissioni, ottimizzando il sistema HVAC, avendo quest'ultimo un impatto significativo sulla fase di utilizzo dell'edificio. Anche secondo il manuale di Rossi Prodi e Stocchetti un maggiore risparmio energetico si avrebbe intervenendo sulle aree dell'ospedale che hanno necessità di essere climatizzate e illuminate artificialmente. Viene citato, infatti, uno studio su ospedali di tipo "a nucleo", dove viene dimostrato che tutti gli accorgimenti possibili sugli ambienti confinanti con l'esterno possono consentire risparmi dell'ordine di appena l'1%, mentre analoghi interventi su zone interne climatizzate artificialmente portano risparmi di circa il 35% dei consumi.

Lo scopo della presente tesi è però quello di indagare il margine di miglioramento che si può ottenere in una prima fase di design: si è scelto per cui di concentrarsi sulle zone di degenza, che sono sì quelle meno riscaldate/raffrescate e illuminate artificialmente, ma sono anche quelle maggiormente esposte all'ambiente esterno. Il fine ultimo è quindi quello di capire quanto l'apertura o chiusura di questi ambienti, così come il rapporto della superficie esterna sul volume totale, possano avere un impatto sui consumi annui medi.

3 MODELLAZIONE DEI PROTOTIPI

Per l'analisi si è scelto di modellare quattro diversi prototipi di diverse tipologie di unità di degenza, e di collocarli in due città dal clima differente – Bergamo e Palermo – per studiare come anche quest'ultimo influisca sui consumi. I modelli di analisi energetica sono quindi otto in totale. I prototipi sono:

- Prototipo A - degenza a corpo quintuplo con corti interne;
- Prototipo B – degenza a corpo quintuplo senza alcuna apertura interna;
- Prototipo C – degenza lineare a corpo triplo;
- Prototipo D – degenza a corpo triplo con interasse dei pilastri ridotta rispetto al prototipo C e dimensione delle camere minima (ovvero 18 m²)

I modelli sono stati realizzati con il software BIM Revit di Autodesk. Per la modellazione del prototipo A è stato preso spunto da un'unità di degenza del progetto del nuovo ospedale di Cesena di Studio Altieri; da questa reference sono stati ricavati l'interasse dei pilastri, la dimensione di ciascun ambiente e delle corti interne, il numero e la tipologia di servizi presenti. In linea con quanto afferma l'art. 3 del DM 13 settembre 1988 (Gazzetta Ufficiale, s.d.-a), il modulo è stato dotato di 32 posti letto, suddivisi in 14 camere doppie e 4 camere singole. Per evitare un'eccessiva dispersione

termica e per rendere il modello quanto più realistico, il prototipo è stato realizzato con quattro piani identici fra di loro.

In maniera analoga, il prototipo B è stato modellato con le stesse caratteristiche dimensionali e formali del prototipo A; vi è però l'eliminazione della corte interna e il conseguente spostamento delle scale verso il centro dell'edificio. Questo passaggio genera una struttura leggermente più compatta e molto più introversiva.

Il prototipo C vede un cambio tipologico, ovvero il passaggio da un modello a corpo quintuplo a uno corpo triplo. Gli ambienti sono rimasti inalterati, così come la loro dimensione – per quanto possibile – ma lo spazio è stato riorganizzato, con le camere di degenza concentrate quasi del tutto sulla facciata sud, e i servizi ed ambienti tecnici raggruppati verso nord-est.

Il prototipo D è una versione del prototipo C in cui la dimensione degli ambienti viene ridotta al minimo possibile. In particolare, le camere di degenza passano da una dimensione di circa 23 m² a 18m², ovvero la minima imposta dal DL n. 229/1999. Anche gli altri spazi dell'unità vengono ridotti, ottenendo così un corpo più stretto rispetto al modello C.

In APPENDICE 1 – Piante dei prototipi analizzati è possibile vedere le planimetrie dei vari prototipi, con segnati i locali e le loro dimensioni.

Tutti i modelli sono stati creati con muri, pilastri, solai e controsoffitti generici.

4 ANALISI ENERGETICA

I modelli sono stati innanzitutto preparati al fine di svolgere l'analisi energetica tramite il plug-in Autodesk Insight 360. Come prima cosa è stata definita la località di ogni progetto. Come già detto, ogni prototipo è stato collocato in due diverse città italiane, per vedere come il clima possa influire su consumi ed emissioni.

La prima città scelta è Bergamo, che secondo la classificazione dei climi di Köppen è di tipo Cfb, ovvero gode del clima tipicamente temperato delle medie latitudini, piovoso o generalmente umido in tutte le stagioni e con estati molto calde. La seconda città è Palermo, che invece è nella fascia Csa, con temperature miti, precipitazioni concentrate soprattutto nel semestre invernale, inverni generalmente brevi e freschi ed estati lunghe e torride. In tab. 3.6 e tab. 3.7 è possibile vedere le tabelle climatiche delle due località (*Dati climatici sulle città del mondo - Climate-Data.org, s.d.*); si può notare come le temperature medie di Palermo siano significativamente maggiori di quelle di Bergamo, specialmente nei mesi invernali, e che in tutto l'anno vi sia una

media di mezz'ora/un'ora di sole in più ogni giorno, dato che si suppone avrà un'influenza sui consumi energetici.

tab. 3.6 - Tabella climatica della città di Bergamo. Fonte: Climate-Data.org

	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
Medie Temperatura (°C)	0.9	2.4	6.8	11.1	15.5	19.8	21.8	21.4	17	12.4	6.8	1.9
Temperatura minima (°C)	-3.3	-2.4	1.1	5.3	9.7	14	16.1	16.2	12.3	8.4	3.2	-1.9
Temperatura massima (°C)	6.1	7.6	12.1	15.9	20.1	24.5	26.4	25.9	21.2	16.3	10.8	6.8
Precipitazioni (mm)	61	66	84	126	145	151	143	143	139	142	143	77
Umidità(%)	75%	74%	73%	73%	72%	70%	69%	71%	75%	81%	81%	78%
Giorni di pioggia (g.)	5	6	7	12	14	13	13	13	10	9	9	6
Ore di sole (ore)	6.1	6.5	7.5	8.4	10.2	11.4	11.5	10.3	8.3	5.8	5.4	5.7

tab. 3.7- Tabella climatica della città di Palermo. Fonte: Climate-Data.org

	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
Medie Temperatura (°C)	9.9	9.7	11.8	14.3	18	22.3	25.2	25.5	22.1	19	15	11.5
Temperatura minima (°C)	7.4	7.1	8.6	10.8	14.3	18.5	21.2	21.9	19.2	16.2	12.5	9.2
Temperatura massima (°C)	12.5	12.5	15.1	17.8	21.4	25.9	28.8	29.2	25.3	22	17.6	13.9
Precipitazioni (mm)	71	73	65	65	40	16	7	22	62	86	69	71
Umidità(%)	79%	76%	75%	74%	71%	65%	62%	63%	71%	76%	77%	77%
Giorni di pioggia (g.)	8	8	8	8	5	3	1	3	7	8	8	9
Ore di sole (ore)	5.3	5.8	7.7	9.4	10.9	12.3	12.5	11.6	9.3	7.6	6.3	5.4

Un altro accorgimento importante al fine dell'analisi è stato la definizione delle impostazioni energetiche dei modelli. Su Revit è infatti possibile definire la tipologia di edificio, l'utilizzo che ne viene fatto e il sistema HVAC presente. Il tipo di edificio è stato quindi espresso come "Ospedale o struttura sanitaria", con un funzionamento di 24 ore su 24, 7 giorni alla settimana. Come sistema è stato lasciato quello che il programma proponeva di default per questa tipologia di edificio, ovvero impianto a portata variabile (VAV – *Variable Air Volume*). In fig. 3.9 è riportato un estratto da Revit delle impostazioni energetiche immesse, uguali per tutti gli otto modelli.

Parametro	Valore
Modello dettagliato	
Percentuale superficie vetrata	0%
Altezza davanzale	750.0000
La vetrata è ombreggiata	<input type="checkbox"/>
Lunghezza oggetto ombreggiante	0.4572
Percentuale superficie lucernari	0%
Larghezza e profondità lucernario	0.9144
Dati di costruzione	
Tipo di edificio	Ospedale o struttura sanitaria
Abaco utilizzo dell'edificio	Struttura 24 ore al giorno, 7 giorni a settimana
Sistema riscaldamento, ventilazione e aria condizionata	VAV centrale, riscaldamento acqua calda, refrigeratore 5.96 COP, caldaie 84.5 eff.
Informazioni sui ricambi d'aria	Modifica...
Dati locali/vani	
Categoria di esportazione	Vani
Proprietà termiche dei materiali	
Tipi concettuali	Modifica...
Tipi schematici	<Edificio>
Elementi dettagliati	<input type="checkbox"/>

fig. 3.9 - Impostazioni energetiche dei modelli analizzati

Per procedere all'analisi è stato assegnato ad ogni locale un vano, recante lo stesso nome del locale corrispondente, e ad ognuno di essi è stata associata una tipologia. Revit presenta delle tipologie di default, in cui vi sono dei parametri riguardanti l'occupazione, l'illuminazione e il ricambio d'aria di ciascun ambiente. In fig. 3.10 viene mostrato un esempio di impostazioni sul tipo di vano. È importante notare che tutti i locali elettrici, così come i locali IT e i cavedi, sono stati classificati come "vani tecnici", e quindi non prevedono nessuna climatizzazione.

Parametro	Valore
Analisi energetica	
Area per persona	10.000 m ²
Incremento calore percepito per persona	73.27 W
Incremento calore latente per persona	45.43 W
Densità carico luce	11.95 W/m ²
Densità carico alimentazione	5.81 W/m ²
Flusso d'aria infiltrazione per area	0.19 L/(s·m ²)
Contributo di illuminazione vano tecnico	20.0000%
Abaco occupazione	Occupazione abitazione - 24 ore
Abaco illuminazione	Illuminazione ufficio - dalle 6:00 alle 23:00
Abaco alimentazione	Illuminazione ufficio - dalle 6:00 alle 23:00
Ricambio d'aria per persona	2.36 L/s
Ricambio d'aria per area	0.30 L/(s·m ²)
Cambiamenti d'aria all'ora	0.000000
Metodo di ricambio d'aria	per persona e per area

fig. 3.10 - Impostazioni del tipo di vano "Camera da letto dormitorio"

Sono state definite le zone HVAC dei progetti. Per ogni piano di ciascun modello sono stati raggruppati sotto un'unica zona tutti i vani, fatta eccezione per i cavedi, cavedi meccanici, locali elettrici e locali IT. Tutte le zone presentano lo stesso impianto dell'edificio, il suddetto VAV. Sono state inoltre definite le stesse informazioni di riscaldamento e raffreddamento per ciascuna zona; tali informazioni sono riportate in tab. 3.8. Le temperature di regolazione e la percentuale di umidità dell'aria sono stati scelti in linea con quanto espresso in letteratura e normativa (Dall'Olio, 2000; Gazzetta Ufficiale, 1997; Rossi Prodi & Stocchetti, 1990).

tab. 3.8 - Punto di regolazione, temperatura dell'aria e regolazione del livello di umidità delle zone definite.

	<i>Punto di regolazione</i> [°C]	<i>Temperatura aria</i> [°C]	<i>Punto di regolazione</i> <i>deumidificazione/umidificazione</i>
<i>Raffreddamento</i>	26,00	18,00	70%
<i>Riscaldamento</i>	22,00	30,00	35%

Una volta definite tutte le informazioni relative alle impostazioni energetiche, è stato creato per ciascun modello il relativo modello energetico: tale funzione è incorporata in Revit e viene svolta direttamente dal programma. Il software, infatti, restituisce per ogni modello delle viste 3D dov'è possibile controllare che i sistemi-zone ed i vani analitici siano realizzati correttamente. In fig. 3.11 si può vedere come sia le superfici che i vani analitici ricoprano rispettivamente la maggior parte di superficie e volume del modello; il modello energetico si può quindi ritenere piuttosto affidabile.

Una volta creato il modello energetico, è possibile generare sempre da Revit il modello di analisi energetica. Tale funzione viene svolta dal plug-in di Autodesk Insight 360; il modello viene infatti visualizzato sulla piattaforma online di simulazione di Insight 360.

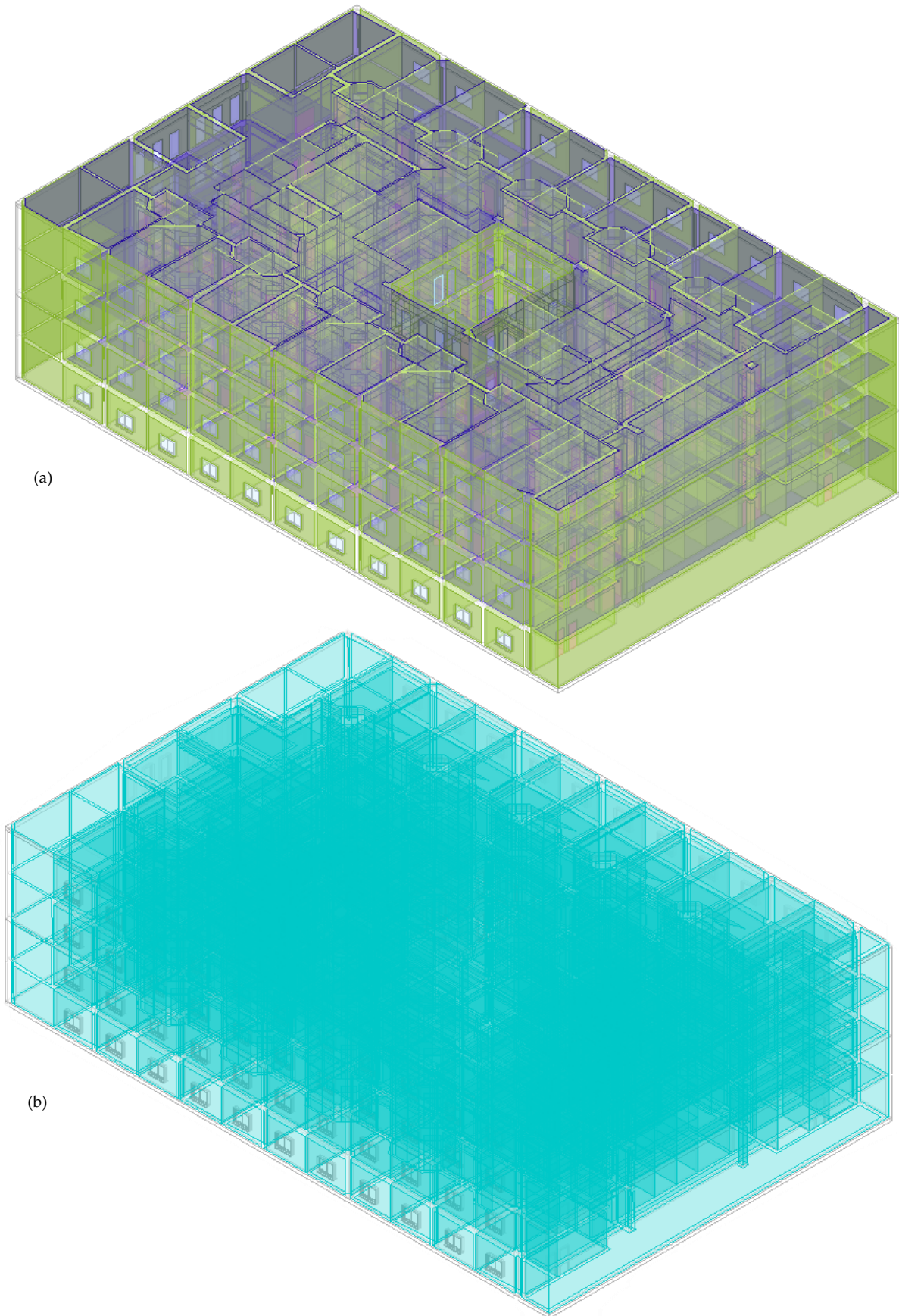


fig. 3.11 - Esempio di modello energetico del prototipo A: (a) sistemi-zone; (b) vani analitici.

La piattaforma online di Insight 360 si presenta in maniera piuttosto intuitiva e user-friendly. Essa permette di calcolare sia i consumi energetici (EUI – *Energy Use Intensity*) che i costi annuali dei modelli caricati, e di compararli con alcuni “benchmarks” comuni del settore AEC, cioè lo standard ASHRAE 90.1 e quello di Architecture 2030, promosso da AIA. La piattaforma permette di svolgere ottimizzazioni istantanee tramite la generazione di scenari possibili, creati variando diversi parametri.

Di seguito vengono presentati i parametri presenti su Insight 360 (Stine, s.d.). per ciascun parametro, oltre alle opzioni che di seguito verranno presentate, vi è anche quella denominata “BIM”, che rappresenta i valori con cui il modello viene importato da Revit a Insight. I valori di trasmittanza termica e di R di murature, tetti e pareti provengono dal Minnesota Energy Code, redatto da ASHRAE (ASHRAE, s.d.).

- **Operating schedule** – indica il numero di ore in cui l’edificio viene utilizzato dai suoi occupanti. Insight propone i valori di 24/7, 24/6, oppure 12 ore per rispettivamente 7, 6 o 5 giorni.
- **Lighting efficiency** – rappresenta il guadagno di calore interno medio e il consumo di energia di illuminazione elettrica, per unità di superficie del pavimento. Si noti che la densità di potenza di illuminazione (LPD) è il valore di potenza completa; i programmi operativi assumono varie percentuali del carico di potenza completa su base oraria.
- **Window-to-Wall ratio (WWR)** – Il rapporto tra la superficie finestrata e quella di muratura esterna è calcolato dividendo l’area vetrata per l’area della parete lorda; Insight permette il calcolo del WWR per i muri esposti verso i quattro punti cardinali. Questo widget reimposta la percentuale di vetratura dal modello, coprendo un range che va dallo 0 al 95%.
- **Plug Load Efficiency** – parametro che identifica la potenza media, per unità di superficie, utilizzata dalle apparecchiature, quali computer e piccoli elettrodomestici; sono esclusi gli impianti di illuminazione o di riscaldamento e raffreddamento.
- **Wall Construction** – definisce, oltre a quella del modello stesso, varie tipologie murarie, riportate in tab. 3.9.

tab. 3.9 - Caratteristiche delle tipologie murarie presenti su Insight 360. Fonte: Stine, s.d.

Nome tipologia di muratura	Tipologia di muratura	R [h·ft ² ·°F/Btu]	Capacità termica [Btu/ft ² ·°F]
Non isolato	Struttura in legno R0	2,97	10,71
R13 Metal	Struttura in metallo R13	5,77	10,05
R13 Wood	Struttura in legno R13, scandole di legno	11,66	1,74
R13+R10 Metal	Struttura in metallo R13 + R10	17,13	11,35
14-inch ICF	Pannelli ICF (cemento armato con casseri isolanti) di spessore 360 mm	28,91	14,11
R38 Wood	Struttura in legno R38	36,75	1,80
R2 CMU	Unità di muratura in calcestruzzo R2	4,02	18,69
12,25-inch SIP	SIP (Pannello strutturale isolato) di spessore 311 mm	37,27	4,21

- **Roof Construction** – in maniera analoga al parametro precedente, la piattaforma prevede diverse tipologie di tetto, riassunte in tab. 3.10.

tab. 3.10 - Caratteristiche delle tipologie di tetto presenti su Insight 360. Fonte: Stine, s.d.

Nome tipologia di tetto	Tipologia di tetto	R [h·ft ² ·°F/Btu]	Capacità termica [Btu/ft ² ·°F]
Non isolato	Scandole di legno su tetto (R0)	1,33	1,43
R10	Scandole di legno su tetto (R10)	11,75	2,06
R15	Tetto in legno R15	15,61	2,03
R19	Isolamento R19 con tetto in legno	16,39	1,18
R38	Tetto in legno R38	42,57	1,30
R60	Tetto in legno R60	66,23	1,37
10.25-inch SIP	SIP (Pannello strutturale isolato) di spessore 260 mm	37,71	1,44

- **Infiltration** – indica la perdita involontaria di aria all’interno o all’esterno degli spazi condizionati, spesso a causa di lacune nell’involucro dell’edificio. Le unità utilizzate sono *Air Changes per Hour* (ACH).
- **Window Glass** – descrive la tipologia di vetri utilizzati sui muri posti in ciascun punto cardinale. Le varie possibilità sono descritte in tab. 3.11.

tab. 3.11 - Caratteristiche delle tipologie di vetro presenti su Insight 360. Fonte: Stine, s.d.

Nome	Tipo di vetro	Trasmittanza termica U [W/m ² K]	Trasmittanza termica U [Btu/ h·ft ² ·°F]	Coefficiente di guadagno solare (SHGC)	Trasmissione della luce visibile (VLT)
<i>Sgl Clr</i>	Pannello singolo di vetro trasparente, 6 mm	6,17	1,09	0,81	0,88
<i>Dbl Clr</i>	Vetro doppio trasparente 6/13	2,74	0,48	0,70	0,78
<i>Dbl LoE</i>	Doppio pannello “Low Energy” (e3=0,2) 3/13	1,99	0,35	0,73	0,74
<i>Trp LoE</i>	Triplo pannello “Low Energy” (e2=e5=0,1) 3mm/6mm	1,55	0,27	0,47	0,66
<i>Quad LoE</i>	Quadruplo pannello “Low Energy” 3mm/8mm	0,66	0,12	0,45	0,66

- **Daylighting and Occupancy Controls** - rappresenta il tipico *dimming* della luce diurna e i sensori di occupazione; possono essere presenti solo uno dei due sistemi, entrambi o nessuno.
- **Building Orientation** – si ipotizza una rotazione dell’edificio da Nord, ovvero lo 0, con un incremento di 45°.
- **Window Shade** – per le finestre di ciascun punto cardinale sono previsti degli ombreggiamenti, con larghezza pari a quella della finestra stessa e altezza espressa come una frazione di quest’ultima (ad esempio 1/6, 1/4, 2/3 e così via).
- **HVAC** - Rappresenta una gamma di efficienza dei sistemi HVAC che varierà

in base alla posizione e alle dimensioni dell'edificio. I sistemi integrati sono riportati in tab. 3.12.

tab. 3.12- Tipologie di HVAC presenti su Insight 360. Fonte: Stine, s.d.

Nome del sistema	Descrizione
ASHRAE Package System	ASHRAE 90.1-2010 minimum efficiency Packaged Single Zone System, 11 EER, 70F economizer
High Eff. Heat Pump ASHRAE Heat Pump	Heat Pump, 17,4 SEER, 9,6 HSPF, Electric Heat ASHRAE 90.1-2010 minimum efficiency Heat Pump, 9,5 EER, COP 3,2 Electric Heat, 70F economizer
High Eff. Package System	Packaged Single Zone System, small unit, 20 SEER 85% AFUE
ASHRAE VAV	ASHRAE 90.1-2010 minimum efficiency Variable Air Volume, COP 6.10 Chiller, Gas Boiler, 75F economizer
High Eff. VAV	VAV, Underfloor Air Distribution, COP7.5 Chiller, 95% Eff. Gas Boiler, economizer
ASHRAE Package Terminal Heat Pump	ASHRAE 90.1-2010 minimum efficiency Package Terminal Heat Pump 11.9 EER
High Eff. Package Terminal AC	Package Terminal Air Conditioner unit, 12.7 EER, 90.4% Gas Boiler

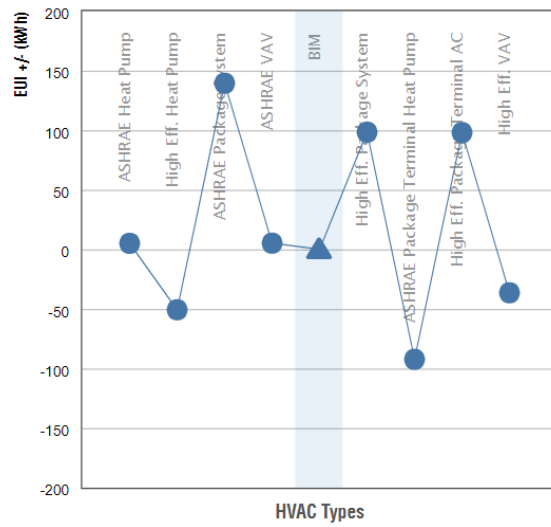
- **PV Surface Coverage, Panel Efficiency e Payback Limit** – Sono parametri che riguardano un eventuale impianto fotovoltaico. In particolare, la “*Surface Coverage*” definisce la superficie del tetto che può essere utilizzata per i pannelli, assumendo l'area per l'accesso alla manutenzione, le attrezzature sul tetto e l'infrastruttura del sistema; i valori che il modello può assumere sono 0, 60, 75 o 90%. L'efficienza dei pannelli è la percentuale di energia solare che verrà convertita in energia CA (corrente alternata). Pannelli più efficienti costano di più, ma producono più energia per la stessa superficie. Infine, il periodo di ammortamento, o “*payback limit*”, serve a capire quali superfici saranno utilizzate per il sistema. Possono essere escluse le superfici con ombreggiatura o con scarso orientamento solare.

Come già detto, sulla piattaforma online di Insight 360 è possibile creare degli scenari variando i valori dei suddetti parametri; questi scenari possono essere salvati e confrontati tra di loro. Per ciascuno degli otto modelli analizzati, che si ricorda essere i prototipi dalla A alla D, ognuno collocato sia a Bergamo che a Palermo, sono stati ipotizzati tre diversi scenari:

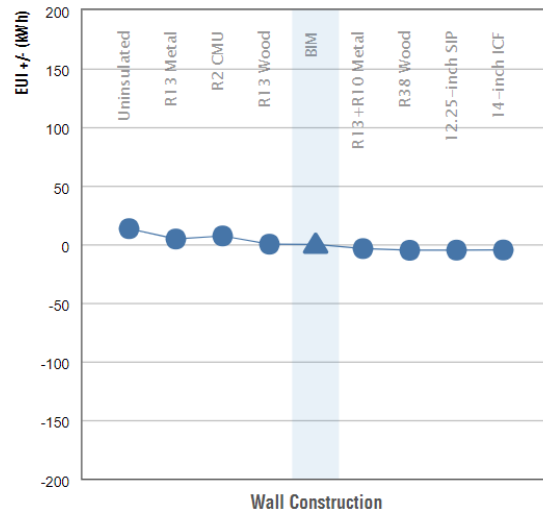
1. Come da modello – sono mantenute tutte le impostazioni presenti al momento dell'importazione del modello da Revit.

2. Migliore soluzione – sono state scelte tutte le opzioni che permettono il minimo consumo di kWh annuali per metro quadro. L'unico parametro che non è stato variato è l'"*Operating Schedule*" poiché, essendo reparti di degenza, vi è la necessità di funzionare 24 ore su 24 tutti i giorni della settimana. Va segnalato come questa soluzione sia solo ipotetica e non realizzabile: lo scenario prevede infatti la totale assenza di finestre su tutti i fronti dell'edificio e il 90% dell'area del tetto ricoperta da pannelli solari. Per tutti i modelli situati a Bergamo il sistema HVAC più efficiente risulta essere la pompa di calore ad alta efficienza, mentre per quelli a Palermo il pacchetto terminale con pompa di calore previsto da ASHRAE.
3. Peggior soluzione – analogamente a quanto fatto per lo scenario migliore, sono state scelte le opzioni che causano i maggiori consumi energetici annuali, mantenendo l'"*Operating Schedule*" su 24/7. Anche questo caso non è realizzabile nella pratica: lo scenario prevede infatti finestrato il 95% della superficie di tutti i muri esterni. Per tutti i modelli l'impianto che risulta meno performante è l'"*ASHRAE Package System*".

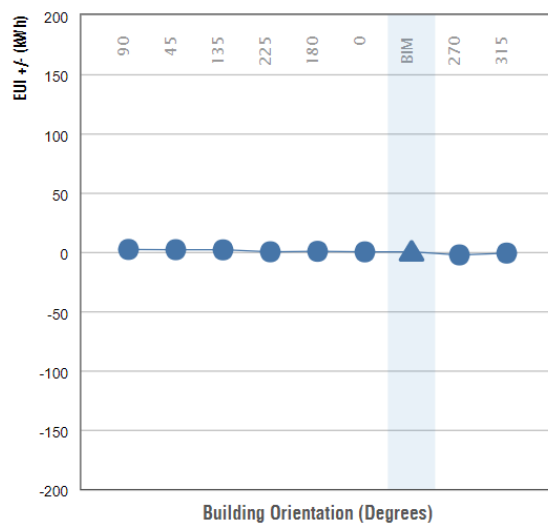
I due scenari "migliore" e "peggiore" soluzione, pure non essendo realistici, permettono di individuare i due poli opposti di un range di consumi dei modelli analizzati, dando maggiori informazioni sui margini di ottimizzazione possibili. Si è notato come, fra i vari parametri presenti su Insight, quello relativo al sistema HVAC sia il più determinante per l'aumento o riduzione dei consumi: ciò è in linea con quanto affermato finora, ovvero che il sistema impiantistico, e più in generale la fase operativa di un edificio, incidano molto sul suo impatto ambientale. In fig. 3.12 è possibile vedere come per il prototipo B situato a Palermo il sistema HVAC possa variare i consumi dell'edificio fino a circa ± 100 kWh/m²/y, mentre la variazione prodotta dal sistema costruttivo della muratura è dell'ordine dei ± 10 kWh/m²/y e quello dell'orientamento del modello di circa ± 1 kWh/m²/y.



(a)



(b)



(c)

fig. 3.12 - Esempi di alcuni parametri del prototipo B collocato a Palermo; (a) sistema HVAC, (b) tipologia di muratura, (c) orientamento dell'edificio.

I risultati ricavati dai tre scenari per ciascuno degli otto modelli proposti sono stati estrapolati, tabulati e confrontati. In particolare, sono stati comparati i consumi di ciascun prototipo collocato a Bergamo rispetto allo stesso situato a Palermo, così come la variazione di ciascun prototipo dal caso A, ritenuto il "caso base", sia per Bergamo che per Palermo. I risultati sono stati raccolti per ciascun scenario nelle tab. 3.13, tab. 3.14 e tab. 3.15, e rappresentati sotto forma di grafico in fig. 3.13, dove è stato evidenziato anche l'andamento della variazione percentuale tra Bergamo e Palermo. Nelle tabelle sono stati evidenziati in giallo il caso "base", ovvero il prototipo A, mentre in verde vi sono le soluzioni che prevedono minori consumi e in rosso le soluzioni che invece ne causano l'incremento, con particolare focus su quella in assoluto meno favorevole.

tab. 3.13 - Comparazione dei consumi dello scenario "come da modello" per tutti i modelli analizzati

<i>Come da modello esportato da Revit</i>		<i>Consumi [kWh/m²/yr]</i>		<i>Variazione percentuale</i>	<i>Variazione percentuale</i>	<i>Variazione percentuale</i>
		<i>Bergamo</i>	<i>Palermo</i>	<i>Bergamo-Palermo</i>	<i>dal prototipo A-Bergamo</i>	<i>dal prototipo A-Palermo</i>
<i>Prototipo</i>	A - corpo quintuplo con corte	557,49	366,10	-34%	0%	0%
	B - corpo quintuplo senza corte	502,52	346,99	-31%	-10%	-5%
	C - corpo triplo allungato	524,77	349,21	-33%	-6%	-5%
	D - corpo triplo ridotto	567,54	398,80	-30%	2%	9%

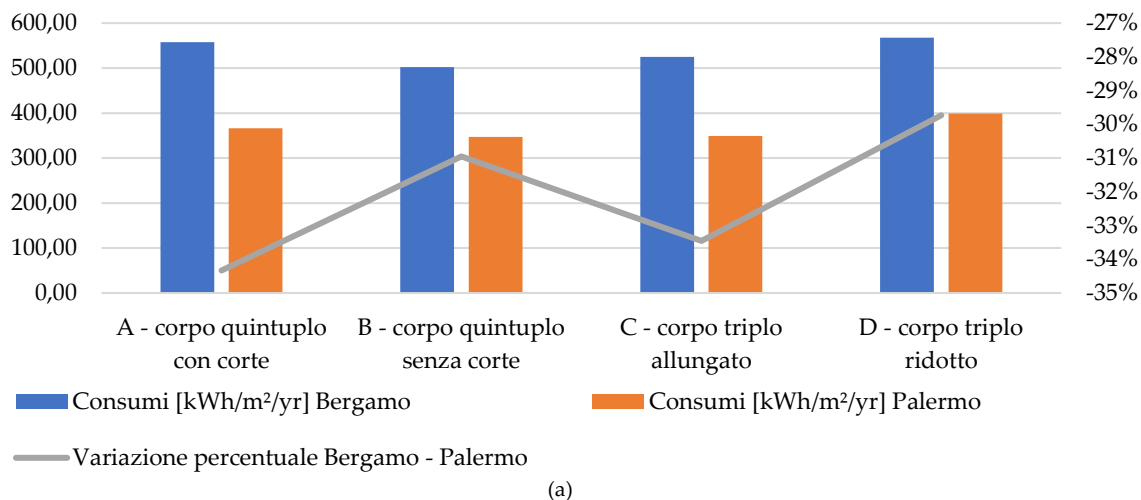
tab. 3.14 - Comparazione dei consumi dello scenario "migliore soluzione" per tutti i modelli analizzati

<i>Situazione migliore possibile</i>		<i>Consumi [kWh/m²/yr]</i>		<i>Variazione percentuale</i>	<i>Variazione percentuale</i>	<i>Variazione percentuale</i>
		<i>Bergamo</i>	<i>Palermo</i>	<i>Bergamo - Palermo</i>	<i>dal prototipo A-Bergamo</i>	<i>dal prototipo A-Palermo</i>
<i>Prototipo</i>	A - corpo quintuplo con corte	326,20	155,38	-52%	0%	0%
	B - corpo quintuplo senza corte	301,68	142,74	-53%	-8%	-8%
	C - corpo triplo allungato	335,01	158,02	-53%	3%	2%
	D - corpo triplo ridotto	369,78	183,72	-50%	13%	18%

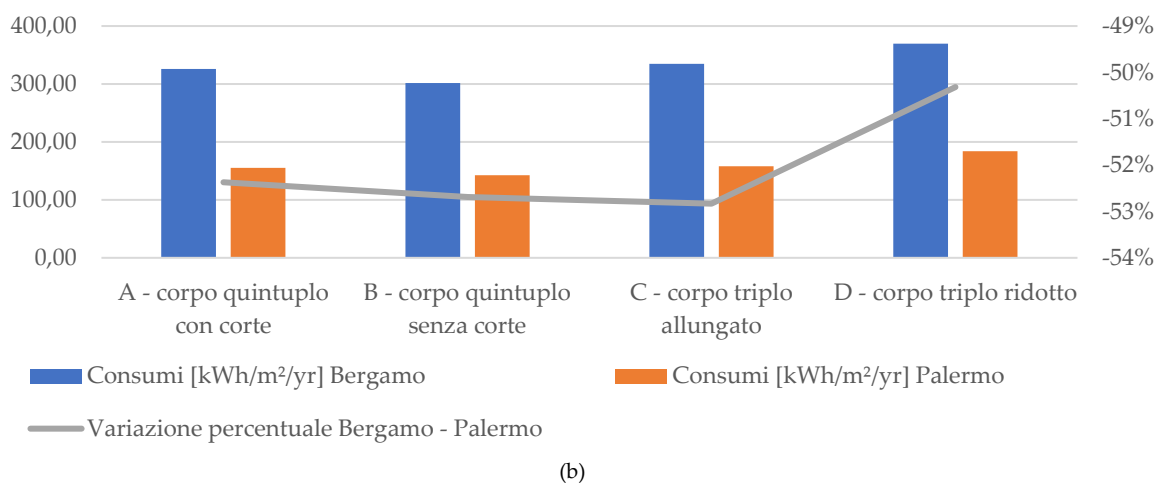
tab. 3.15 - Comparazione dei consumi dello scenario "peggiore soluzione" per tutti i modelli analizzati

<i>Situazione peggiore possibile</i>		<i>Consumi [kWh/m²/yr]</i>		<i>Variazione percentuale</i>	<i>Variazione percentuale</i>	<i>Variazione percentuale</i>
		<i>Bergamo</i>	<i>Palermo</i>	<i>Bergamo - Palermo</i>	<i>dal prototipo A-Bergamo</i>	<i>dal prototipo A-Palermo</i>
<i>Prototipo</i>	A - corpo quintuplo con corte	1704,95	1086,56	-36%	0%	0%
	B - corpo quintuplo senza corte	1458,06	948,20	-35%	-14%	-13%
	C - corpo triplo allungato	1631,01	1005,64	-38%	-4%	-7%
	D - corpo triplo ridotto	1723,23	1032,79	-40%	1%	-5%

Caso "come da modello"



Caso "migliore soluzione"



Caso "peggiore soluzione"

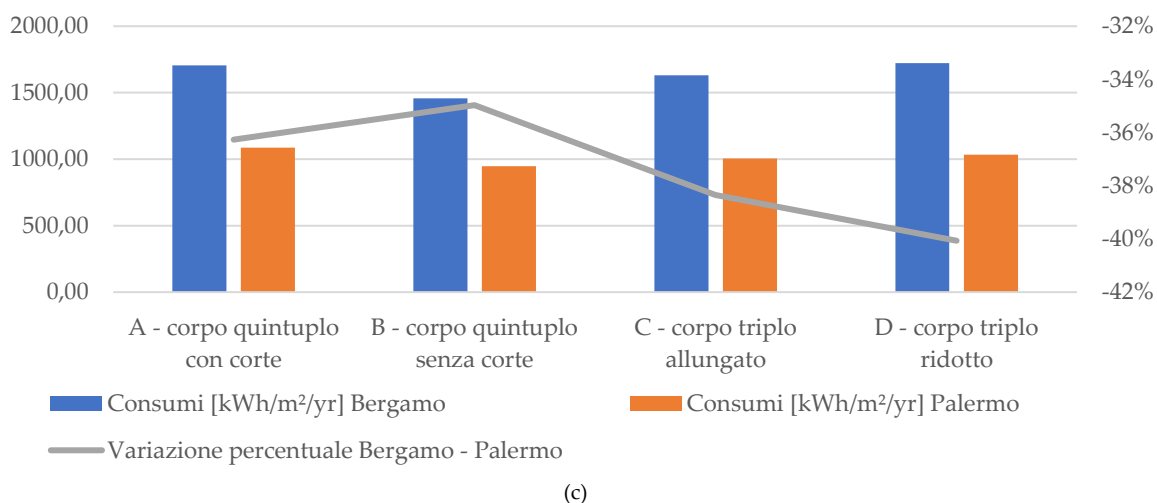
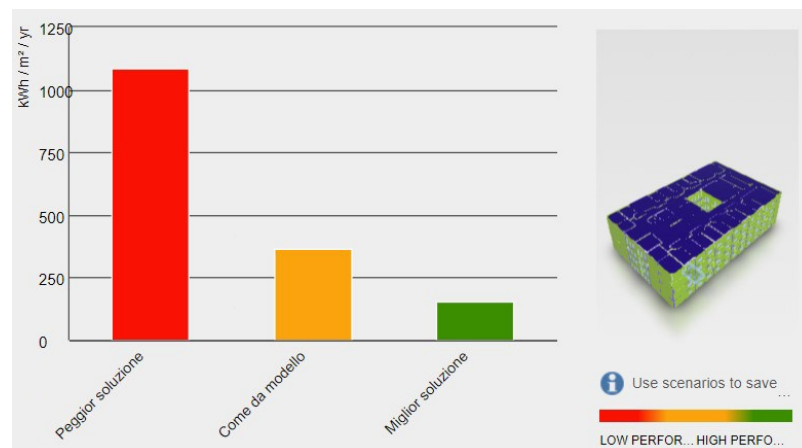


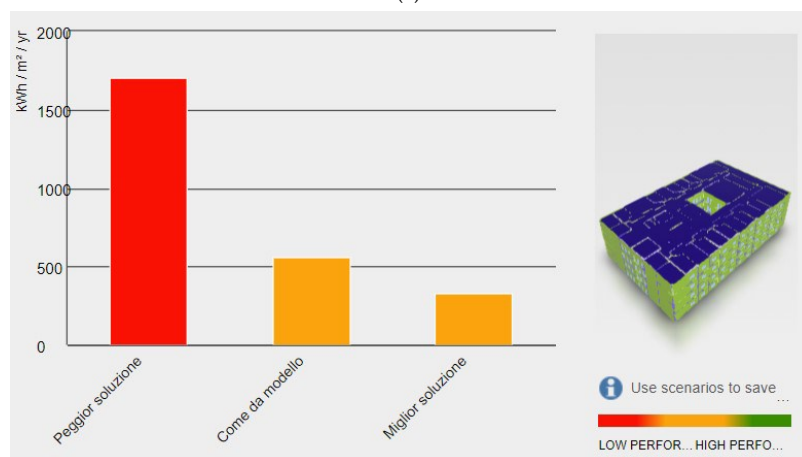
fig. 3.13 - Confronto grafico tra i consumi dei quattro prototipi per la città di Palermo; (a) scenario "come da modello", (b) scenario "migliore soluzione", (c) scenario "peggiore soluzione"

1 ANALISI DEI RISULTATI

Dai risultati ottenuti al paragrafo “Analisi energetica” si può vedere come tutti i modelli situati a Palermo comportino, rispetto a quelli di Bergamo, un risparmio dei consumi energetici in media di circa il 30-40%, arrivando a valori intorno al 50% nello scenario più svantaggioso: questo risparmio è giustificabile considerando il clima più mite, e quindi un utilizzo più contenuto dei sistemi di riscaldamento. Vale la pena notare come in tutti i prototipi situati a Palermo lo scenario migliore si distacchi nettamente dagli altri due, ponendosi al di sotto dei *benchmark* di ASHRAE 90.1 e Architecture 2030; il distacco è invece meno rilevante per i modelli di Bergamo (fig. 4.1).



(a)



(b)

fig. 4.1 - Esempio di confronto tra i tre scenari per il prototipo A; (a) Palermo, (b) Bergamo. Fonte: Insight 360

In fig. 4.2 sono espresse in maniera qualitativa le variazioni percentuali dei prototipi B, C e D rispetto al caso base A - ovvero la degenza a corpo quintuplo con corte interna - per i tre scenari presentati, in modo da poter confrontare le soluzioni anche a livello visivo. Sull'asse delle ascisse sono riportati i dati per la città di Bergamo, mentre su quella delle ordinate per Palermo. Le assi che intersecano il punto A individuano quindi quattro quadranti: in quello contrassegnato da "-" vi saranno le casistiche con minori consumi, cioè quelle ottimali, viceversa nei quadranti "+" sono riportate le soluzioni più sfavorevoli rispetto al caso base.

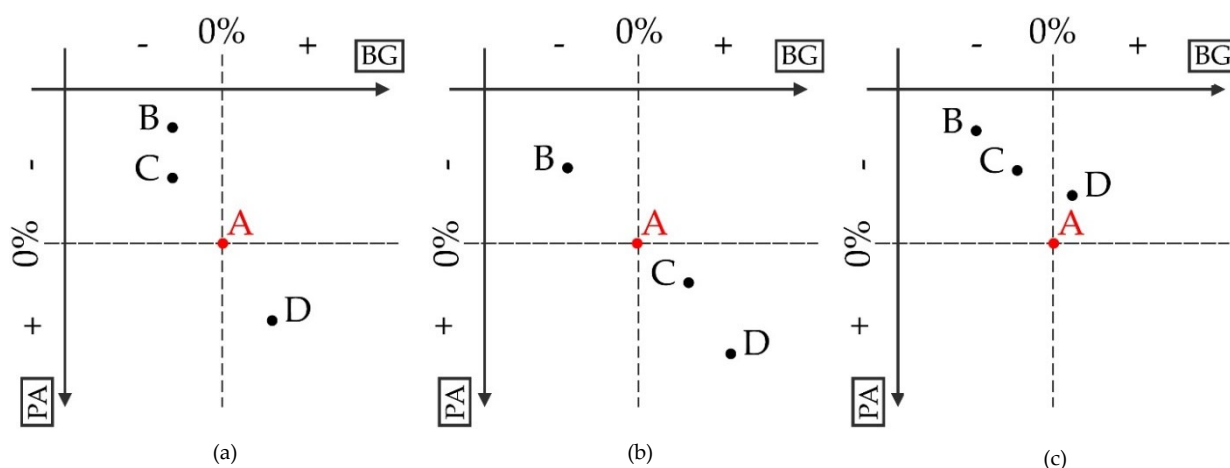


fig. 4.2 - Confronto qualitativo della variazione percentuale dei prototipi rispetto al caso A, per le città di Bergamo e Palermo; (a) scenario "come da modello", (b) scenario "migliore soluzione", (c) scenario "peggiore soluzione"

Dall'analisi emerge come, a parità di condizioni e sistemi costruttivi, la tipologia di degenza B, ovvero quella a corpo quintuplo compatto e senza corti interne, sia quella che produce i minori consumi in entrambe le città considerate e per tutti gli scenari possibili. La tipologia D con corpo quintuplo e camere dalla dimensione minima di 18 m^2 è la casistica che consuma più energia in quasi tutti gli scenari, fatta eccezione per quello denominato "peggiore situazione" per quanto riguarda la città di Bergamo. Questo risultato può essere spiegato osservando i rapporti tra superficie e volume dei vari prototipi (tab. 4.1, fig. 4.3): il prototipo B è infatti il più compatto, cioè quello con rapporto S/V minore, al contrario il modello D è quello che presenta il rapporto più elevato, nonostante la differenza sia dell'ordine del centesimo.

tab. 4.1 - Superfici esterne, volumi totali e rapporti S/V di ciascun prototipo

Prototipo	Muro esterno [m ²]	Finestre [m ²]	Tetto [m ²]	Volume tot vani analitici [m ³]	S/V [m ⁻¹]
A - corpo quintuplo con corte	2236,10	311,28	1430,53	17920,42	0,222
B - corpo quintuplo senza corte	1766,14	196,56	1492,21	16003,63	0,216
C - corpo triplo allungato	2087,00	187,93	1384,15	15465,52	0,237
D - corpo triplo ridotto	2017,99	180,73	1219,28	13529,66	0,253

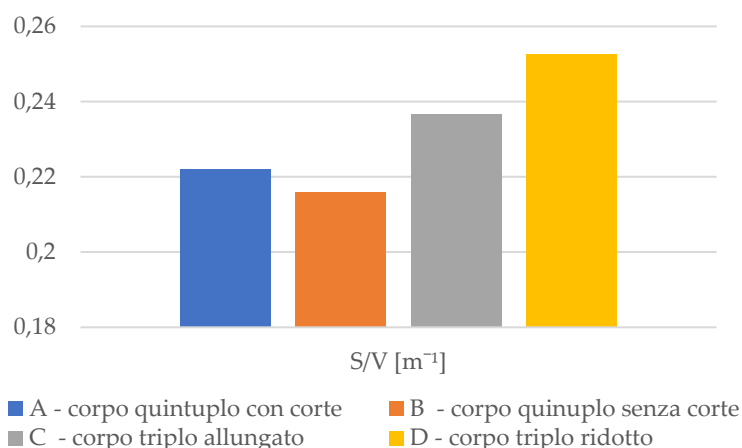


fig. 4.3 - Rapporti S/V dei prototipi analizzati

A valle della sperimentazione, è possibile svolgere un'ulteriore conclusione: individuata, grazie agli algoritmi di ottimizzazione di Insight 360, la tipologia che a livello spaziale e di impianto edilizio meglio ottimizza il comportamento energetico è possibile evidenziare il potenziale di miglioramento delle singole soluzioni. Tralasciando quindi i prototipi C e D, viene di seguito svolto un confronto tra la condizione reale, la migliore e la peggiore della soluzione in assoluto più vantaggiosa, ovvero la B, e del caso base A. Viene inoltre paragonata la soluzione del prototipo A come da modello Revit con la soluzione che presenta minori consumi in assoluto. Le soluzioni "come da modello", sia di A che di B, sono state individuate con il pedice "0", mentre le soluzioni migliore e peggiore rispettivamente con "1" e "2" (tab. 4.2).

tab. 4.2 - Margine di ottimizzazione tecnologica per le configurazioni A e B

	Consumi [kWh/m ² /yr]		Variazione percentuali dei casi migliore e peggiore con quello reale	
	Bergamo	Palermo	Bergamo	Palermo
<i>A₀ - Prototipo A caso reale</i>	557,49	366,10	0%	0%
<i>A₁ - Prototipo A caso migliore</i>	326,20	155,38	-41%	-58%
<i>A₂ - Prototipo A caso peggiore</i>	1704,95	1086,56	206%	197%
<i>B₀ - Prototipo B caso reale</i>	502,52	346,99	0%	0%
<i>B₁ - Prototipo B caso migliore</i>	301,68	142,74	-40%	-59%
<i>B₂ - Prototipo B caso peggiore</i>	1458,06	948,20	190%	173%
<i>Variazione percentuale del caso base reale (A₀) con il caso massivo più vantaggioso (B₁)</i>			-46%	-61%

La soluzione A, ovvero il corpo quintuplo con corte, espone una qualità fruitiva elevata, a discapito però dei consumi energetici rispetto alla B, che invece è più massiva e compatta. Per entrambe, il margine di miglioramento da un punto di vista tecnologico – a livello, quindi, di sistema HVAC, involucro e altri accorgimenti legati al risparmio energetico – è simile e piuttosto elevato: si passa da un 40-41% per

Bergamo a 58-59% a Palermo. Anche il margine di peggioramento è però notevole, infatti in entrambe le città si può assistere a circa un raddoppio dei consumi della soluzione peggiore rispetto a quella da modello, sia per A che per B. Questo risultato sottolinea per l'ennesima volta come l'ottimizzazione tecnologica possa significativamente influenzare l'impatto ambientale ed economico di un edificio.

Gli ambiti di confronto che questa analisi ha fatto emergere sono da un lato quello delle scelte puramente progettuali-configurative, per cui sono stati elaborati quattro possibili prototipi di impianto edilizio, dall'altro le prestazioni di involucro e impianto di condizionamento e riscaldamento, individuate da un range compreso tra i poli opposti "soluzione migliore" e "soluzione peggiore" per ogni prototipo. Esiste, infatti, un limite entro il quale ci si può muovere tramite le sole ottimizzazioni di impianto spaziale e formale, che è indipendente dagli aspetti impiantistici e tecnologici-edilizi. La prima fase è, quindi, l'ottimizzazione di impianto edilizio, la seconda l'ottimizzazione tecnologica - impiantistica da un lato, di involucro dall'altro. La soluzione B a confronto con la A, secondo quanto esportato da Revit a Insight, presenta un miglioramento di circa il 5-10%, invece la soluzione A₁ rispetto a A₀, così come B₁ con B₀, vede un decremento dei consumi di circa il 40-41% per Bergamo e 58-59% per Palermo. Ciò significa che tra la soluzione ottimizzata distributivamente e quella ottimizzata sia distributivamente che tecnologicamente vi è un decremento della potenza media necessaria di 49%, indipendentemente che si parta del criterio distributivamente massivo (B) o più qualitativo e che permette maggiore comfort (A).

Riprendendo i risultati della tab. 3.13, è possibile vedere come per il caso "come da modello" di entrambe le città l'ottimizzazione dei consumi sia in media del 6,5%; questo dato va però pesato nell'intero contesto dell'edificio ospedaliero. Considerando, quindi, un'occupazione media della degenza sull'intero complesso di circa il 35%, è possibile ottenere tramite ottimizzazioni geometriche e formali un risparmio complessivo di circa il 2,3%; questo dato indica che entro un certo limite la qualità è raggiungibile.

CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

In un'ottica di analisi del ciclo di vita dell'edificio, supportata dall'affiancamento della metodologia open-BIM, sono state individuate tre fasi del processo di design in cui è possibile operare un'ottimizzazione, al fine di ridurre non solo costi e consumi ma anche impatti ambientali. Tali stadi sono:

1. Fase preliminare, in cui viene operata un'ottimizzazione spaziale-geometrica ed organizzativa;
2. Fase definitiva, in cui vengono prese delle decisioni sulla tipologia di involucro e di schermature;
3. Fase esecutiva, dove viene ottimizzata la performance dell'impianto HVAC.

Nella presente tesi è stato esaurito l'ombrello di possibili ottimizzazioni della fase preliminare, ovvero quelle di impianto edilizio tipologico, per quanto riguarda le degenze ospedaliere. Un possibile sviluppo futuro potrebbe essere lo studio di come questo tipo di analisi possa essere utilizzato all'interno dell'intera progettazione edilizia e di come condizioni lo sviluppo del progetto definitivo ed esecutivo.

Nel corso dell'intero studio ed in particolare nella fase sperimentale sono emerse due tematiche fondamentali, spesso contrapposte: da un lato l'ottimizzazione energetica al fine di ridurre costi ed emissioni, e dall'altro il comfort dell'utente, imprescindibile e più o meno stringente a seconda della specifica zona ospedaliera. Tramite un'analisi di letteratura e la sperimentazione svolta è stato dimostrato come sia possibile pesare la prestazione energetica; lo step successivo sarà quindi capire cosa far prevalere, a fronte di commissioni o concorsi, quando vi saranno richieste di benessere psicologico, visivo e sensoriale da parte di chi fruisce l'edificio. Sarà quindi da operare una prioritizzazione dei criteri: dimostrato che la qualificazione del design e l'incremento del comfort agisce su circa il 3% dei consumi dovuti alla fase *operational*, sarà interessante capire e studiare la prioritizzazione del criterio di qualità percepita e l'analisi di sensibilità rispetto a questi fattori, che non sono più energetici, ma fruitivi ed umani.



fig. 0.2 - Planimetria del prototipo B - corpo quintuplo compatto. Fonte: disegno dell'autrice

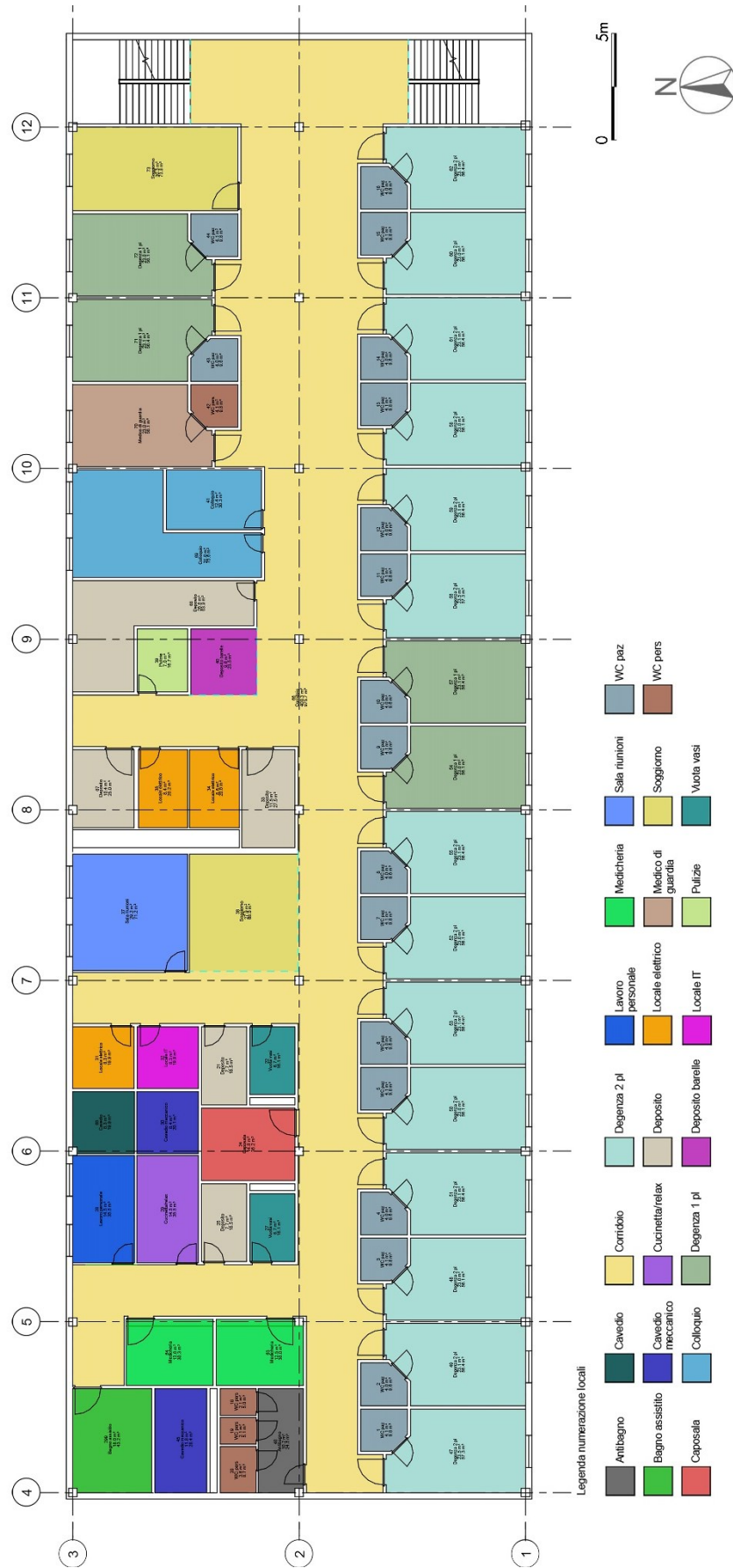


fig. 0.3- Planimetria del prototipo C - corpo triplo con camere da 23 m². Fonte: disegno dell'autrice



fig. 0.4- Planimetria del prototipo D - corpo triplo con camere "ridotte" da 18 m². Fonte: disegno dell'autrice

BIBLIOGRAFIA

About | The Dynamo Primer. (s.d.). Recuperato 26 gennaio 2022, da <https://primer.dynamobim.org/>

Agnetis, A. (s.d.). *Introduzione all'ottimizzazione vincolata.*

AICARR. (s.d.). Recuperato 13 gennaio 2022, da https://www.aicarr.org/Pages/Normative/FOCUS_RESREV01.aspx

Ajayi, S. O., Oyedele, L. O., Ceranic, B., Gallanagh, M., & Kadiri, K. O. (2015). Life cycle environmental performance of material specification: a BIM-enhanced comparative assessment. *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*, 6(1), 14–24. <https://doi.org/10.1080/2093761X.2015.1006708>

AllPairs. (s.d.). Recuperato 1 febbraio 2022, da <https://sourceforge.net/projects/allpairs/>

Anand, C. K., & Amor, B. (2017). Recent developments, future challenges and new research directions in LCA of buildings: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 408–416. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.058>

Asan, H. (2006). Numerical computation of time lags and decrement factors for different building materials. *Building and Environment*, 41(5), 615–620. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2005.02.020>

ASHRAE. (s.d.). *2020 Minnesota Energy Code with ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1-2016 | ICC Digital Codes.*

ASHRAE. (2001). *ASHRAE Fundamental Handbook.* Atlanta, 30.

Attia, S., Hamdy, M., O'Brien, W., & Carlucci, S. (2013). Computational optimisation for zero energy buildings design: Interviews results with twenty eight international experts. *Proceedings of BS 2013: 13th Conference of the International Building Performance Simulation Association*, 3698–3705.

Bandyopadhyay, S., & Saha, S. (2013). Unsupervised classification: Similarity measures, classical and metaheuristic approaches, and applications. *Unsupervised Classification: Similarity Measures, Classical and Metaheuristic Approaches, and Applications*, 9783642324512, 1–262. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-32451-2>

Baumann, H., & Tillman, A.-M. (2004). *The Hitch Hiker's Guide to LCA: An orientation in life cycle assessment methodology and application*. Studentlitteratur AB.

Bayraktar, M. (2015). a Methodology for Energy Optimization of Buildings Considering Simultaneously Building Envelope Hvac and Renewable System Parameters. In *Istanbul Technical University \ Graduate School of Science Engineering and Technology*. <https://doi.org/10.6092/polito/porto/2637214>

Berardi, U. (2015). Building Energy Consumption in US, EU, and BRIC Countries. *Procedia Engineering*, 118. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.411>

BREEAM Training | BREEAM - Sustainability Assessment Method. (s.d.). Recuperato 16 marzo 2022, da https://www.breeam.com/engage/breeam-training/#jump_to_training-enquiry

British Museum | Space Syntax. (s.d.). Recuperato 28 gennaio 2022, da <https://spacesyntax.com/project/british-museum/>

British Standard Institution. (2017). Building information models – Information delivery manual Part 1: Methodology and format. *BS EN ISO 29481-1 : 2017*.

British Standard Institution. (2020). Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework. *BS EN ISO 14040:2006+A1:2020, August 2006*.

Capolongo, S., Cocina, G. G., Gola, M., Peretti, G., & Pollo, R. (2019). Horizontality and verticality in architectures for health. *Techne*, 17, 152–160. <https://doi.org/10.13128/Techne-24028>

Carbon Smart Materials Palette. (s.d.). Recuperato 2 gennaio 2022, da <https://materialspalette.org/palette/>

Casini, M. (2021). *Construction 4.0: advanced technology, tools and materials for the digital transformation of the construction industry* (pagg. 221–260). Elsevier Ltd.

Cellura, M., Longo, S., Montana, F., & Riva Sanseverino, E. (2019). Ottimizzazione Multi-Obiettivo delle Prestazioni Energetiche e Ambientali di un Edificio Residenziale. *Il Life Cycle Thinking a supporto delle strategie di mitigazione e adattamento ai cambiamenti climatici, January 2020*, 156–162.

Chen, B., Liu, Q., Chen, H., Wang, L., Deng, T., Zhang, L., & Wu, X. (2021). Multiobjective optimization of building energy consumption based on. *Journal of Cleaner Production*, 294, 126153. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126153>

Chu, X., Yang, D., & Li, J. (2019). Sustainability assessment of combined cooling, heating, and power systems under carbon emission regulations. *Sustainability*

(Switzerland), 11(21). <https://doi.org/10.3390/su11215917>

Climate Consultant | Society of Building Science Educators. (s.d.). Recuperato 12 gennaio 2022, da <https://www.sbse.org/resources/climate-consultant>

CONCRETE – Carbon Smart Materials Palette. (s.d.). Recuperato 2 gennaio 2022, da <https://materialspalette.org/concrete/>

Cos'è la Certificazione LEED®? » Guida Utile - GREENiTOP®. (s.d.). Recuperato 16 marzo 2022, da <https://www.certificazioneleed.com/edifici/>

Cos'è il machine learning? | Oracle Italia. (s.d.). Recuperato 1 febbraio 2022, da <https://www.oracle.com/it/data-science/machine-learning/what-is-machine-learning/>

Dall'Olio, L. (2000). *L'architettura degli edifici per la sanità*. Officina.

Dandri, F. (2019). *La casa passiva: principi e comfort Glossario del bilancio termico dell'edificio*.

Danutì, A. (2018). *Soluzioni BIM-based interoperabili per la valutazione del ciclo di vita (LCA) di un edificio*. Università degli Studi di Padova.

Dati climatici sulle città del mondo - Climate-Data.org. (s.d.). Recuperato 22 marzo 2022, da <https://it.climate-data.org/>

de Rubeis, T., Falasca, S., Curci, G., Paoletti, D., & Ambrosini, D. (2020). Sensitivity of heating performance of an energy self-sufficient building to climate zone, climate change and HVAC system solutions. *Sustainable Cities and Society*, 61. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102300>

de Rubeis, T., Nardi, I., Ambrosini, D., & Paoletti, D. (2018). Is a self-sufficient building energy efficient? Lesson learned from a case study in Mediterranean climate. *Applied Energy*, 218. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.166>

Deb, K. (2012). *Optimization for engineering design: algorithms and examples*. 440.

Dimoudi, A., & Tompa, C. (2008). Energy and environmental indicators related to construction of office buildings. *Resources, Conservation and Recycling*, 53(1–2), 86–95. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.09.008>

Dodoo, A., Gustavsson, L., & Sathre, R. (2012). Effect of thermal mass on life cycle primary energy balances of a concrete- and a wood-frame building. *Applied Energy*, 92, 462–472. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.11.017>

Eleftheriadis, S., Duffour, P., & Mumovic, D. (2018). BIM-embedded life cycle carbon assessment of RC buildings using optimised structural design alternatives.

Energy and Buildings, 173. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.05.042>

EN 15978. (2011). *Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance of buildings - Calculation method*. November.

EN ISO 14025. (2006). Environmental labels and declarations - Type III environmental declarations - Principles and procedures. *European Standards*, 2006, 25.

EN ISO 14042:2000. (s.d.). *Environmental management - Life cycle assessment - life cycle impact assessment*.

EN ISO 15804. (2020). *BSI Standards Publication Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products*. February 2014.

EnergyPlus | Department of Energy. (s.d.). Recuperato 26 gennaio 2022, da <https://www.energy.gov/eere/buildings/downloads/energyplus-0>

EnginSoft - modeFRONTIER. (s.d.). Recuperato 26 gennaio 2022, da <https://www.enginsoft.com/solutions/mf.html>

European Commission Service Site. (s.d.). Recuperato 9 febbraio 2022, da <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/>

Evins, R. (2013). A review of computational optimisation methods applied to sustainable building design. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 22, pagg. 230–245). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.004>

Feed in Tariff (FIT) - ENEA - Dipartimento Unità per l'efficienza energetica. (s.d.). Recuperato 13 gennaio 2022, da <https://www.energiaenergetica.enea.it/glossario-efficienza-energetica/lettera-f/feed-in-tariff-fit.html>

Fonti rinnovabili in Italia e in Europa Verso gli obiettivi al 2020 e al 2030. (s.d.).

Gazzetta Ufficiale. (s.d.-a). *DECRETO MINISTERIALE 13 settembre 1988*.

Gazzetta Ufficiale. (s.d.-b). Recuperato 28 gennaio 2022, da <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2009/06/10/009G0068/sg>

Gazzetta Ufficiale. (1997). *DECRETO DEL PRESIDENTE DELLA REPUBBLICA 14 gennaio 1997*. 1999, 1–30.

GenOpt - generic optimization program. (s.d.). Recuperato 25 gennaio 2022, da <https://simulationresearch.lbl.gov/GO/index.html>

Givoni, B. (1992). Comfort, climate analysis and building design guidelines. *Energy and Buildings*, 18(1), 11–23. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(92\)90047-K](https://doi.org/10.1016/0378-7788(92)90047-K)

Global Optimization Toolbox - MATLAB. (s.d.). Recuperato 26 gennaio 2022, da <https://it.mathworks.com/products/global-optimization.html>

GlobalABC/IEA/UNEP. (2020). Roadmap for Buildings and Construction. *Global Status Report*, 110.

GME - I mercati - Certificati verdi - cosa sono. (s.d.). Recuperato 13 gennaio 2022, da <https://www.mercatoelettrico.org/it/mercati/cv/cosasonocv.aspx>

Grasshopper - algorithmic modeling for Rhino. (s.d.). Recuperato 26 gennaio 2022, da <https://www.grasshopper3d.com/>

Guinée, J. (2011). Life cycle assessment: past, present and future. *Institute of Environmental Sciences*, 45(1), 1–57.

International Health Facility Guidelines. (2018). *Part B – Health Facility Briefing & Design Inpatient Unit - General* (Vol. 1, Numero May).

IPCC. (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. In *IPCC* (Vol. 218, Numero 2, pagg. 259–264). [https://doi.org/10.1016/S0022-0248\(00\)00575-3](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(00)00575-3)

Itaca. (s.d.). Recuperato 16 marzo 2022, da https://www.itaca.org/valutazione_sostenibilita.asp

Ji, C., Hong, T., & Park, H. S. (2014). Comparative analysis of decision-making methods for integrating cost and CO2 emission - Focus on building structural design - Focus o. *Energy and Buildings*, 72, 186–194. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.12.045>

Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995). Particle Swarm Optimization. *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*. <https://doi.org/10.1002/9780470612163>

Klöppfer, W., & Grahl, B. (2014). Life Cycle Assessment (LCA): A Guide to Best Practice. In *Life Cycle Assessment (LCA): A Guide to Best Practice*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. <https://doi.org/10.1002/9783527655625>

Krygiel, E., & Nies, B. (2008). Green BIM: Successful Sustainable Design with Building Information Modeling. In *Indianapolis: Wiley Publishing, IN*.

Kunič, R. (2017). Carbon footprint of thermal insulation materials in building envelopes. *Energy Efficiency*, 10(6). <https://doi.org/10.1007/s12053-017-9536-1>

Kyriakidis, A., Michael, A., Illampas, R., Charmpis, D. C., & Ioannou, I. (2018). Thermal performance and embodied energy of standard and retrofitted wall systems encountered in Southern Europe. *Energy*, 161.

<https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.07.124>

Ladybug Tools | *Honeybee*. (s.d.). Recuperato 27 gennaio 2022, da <https://www.ladybug.tools/honeybee.html>

Ladybug Tools | *Ladybug*. (s.d.). Recuperato 27 gennaio 2022, da <https://www.ladybug.tools/ladybug.html>

Lu, K., & Wang, H. (2019). Estimation of Building's Life Cycle Carbon Emissions Based on Life Cycle Assessment and Building Information Modeling: A Case Study of a Hospital Building in China. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 07(06), 147–165. <https://doi.org/10.4236/gep.2019.76013>

Manzan, M., & Padovan, R. (2013). L'ottimizzazione per il risparmio energetico negli edifici. *a&c - analisi e calcolo*.

Manzano-Agugliaro, F., Montoya, F. G., Sabio-Ortega, A., & García-Cruz, A. (2015). Review of bioclimatic architecture strategies for achieving thermal comfort. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 49). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.095>

Morrissey, J., Moore, T., & Horne, R. E. (2011). Affordable passive solar design in a temperate climate: An experiment in residential building orientation. *Renewable Energy*, 36(2), 568–577. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.08.013>

Moussavi Nadoushani, Z. S., & Akbarnezhad, A. (2015). Effects of structural system on the life cycle carbon footprint of buildings. *Energy and Buildings*, 102. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.05.044>

Nguyen, A. T., Reiter, S., & Rigo, P. (2014). A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. *Applied Energy*, 113, 1043–1058. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.061>

Obrecht, T. P., Röck, M., Hoxha, E., & Passer, A. (2020). BIM and LCA integration: A systematic literature review. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 12, Numero 14). <https://doi.org/10.3390/su12145534>

Olgay, V. (1963). *Design with climate: bioclimatic approach to architectural regionalism*.

Optimization Toolbox - MATLAB. (s.d.). Recuperato 26 gennaio 2022, da <https://it.mathworks.com/products/optimization.html>

ottimizzazione in Vocabolario - Treccani. (s.d.). Recuperato 19 gennaio 2022, da <https://www.treccani.it/vocabolario/ottimizzazione/>

Ozel, M., & Pihtili, K. (2007). Optimum location and distribution of insulation layers on building walls with various orientations. *Building and Environment*, 42(8), 3051–3059. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2006.07.025>

Passivhaus Institut. (s.d.). Recuperato 14 gennaio 2022, da https://passiv.de/en/02_informations/02_passive-house-requirements/02_passive-house-requirements.htm

Peng, C. (2016). Calculation of a building's life cycle carbon emissions based on Ecotect and building information modeling. *Journal of Cleaner Production*, 112, 453–465. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.078>

Pereira, I., & Leitão, A. (2020). More is more: The no free lunch theorem in architecture. *Proceedings of the International Conference of Architectural Science Association, 2020-Novem*, 765–774.

Pini, M. S. (2011). *Metodi per l'Allocazione Ottima di Risorse*.

Pubblicato il testo definitivo del Piano Energia e Clima (PNIEC). (s.d.). Recuperato 13 gennaio 2022, da <https://www.mise.gov.it/index.php/it/198-notizie-stampa/2040668-pniec2030>

Rossi Prodi, F., & Stocchetti, A. (1990). *L'architettura dell'ospedale*.

Soust-Verdaguer, B., Llatas, C., & García-Martínez, A. (2017). Critical review of bim-based LCA method to buildings. In *Energy and Buildings* (Vol. 136, pagg. 110–120). <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.009>

Stine, D. (s.d.). *Dynamic Energy Optimization with Revit® and Insight 360*.

Studio Altieri. (s.d.). Recuperato 21 marzo 2022, da <http://www.studioaltieri.it/en/about-us>

Tettamanzi, A. (2005). ALGORITMI EVOLUTIVI:CONCETTI E APPLICAZIONI. *Mondo digitale*, 1.

The Space Syntax approach | Space Syntax. (s.d.). Recuperato 27 gennaio 2022, da <https://spacesyntax.com/the-space-syntax-approach/>

TRNSYS : Transient System Simulation Tool. (s.d.). Recuperato 26 gennaio 2022, da <http://www.trnsys.com/index.html>

Understanding Global Warming Potentials | US EPA. (s.d.). Recuperato 29 dicembre 2021, da <https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials>

UNEP, U. N. E. P. (2020). *Emissions Gap Report 2020 - Exclusive Summary*.

United Nations Environment Programme. (2019). 2019 Global Status report - Towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector. In *Global Status Report*.

United Nations Environment Programme. (2020). *2020 Global Status Report for Building and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector*.

Venter, G. (2010). Review of Optimization Techniques. *Encyclopedia of Aerospace Engineering*, 5229–5238. <https://doi.org/10.1002/9780470686652.EAE495>

Wastiels, L., & Decuyper, R. (2019). Identification and comparison of LCA-BIM integration strategies. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 323(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/323/1/012101>

Wetter, M., & Wright, J. (2004). A comparison of deterministic and probabilistic optimization algorithms for nonsmooth simulation-based optimization. *Building and Environment*, 39(8), 989–999. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2004.01.022>

What Is Simulated Annealing? - MATLAB & Simulink - MathWorks Italia. (s.d.). Recuperato 26 gennaio 2022, da <https://it.mathworks.com/help/gads/what-is-simulated-annealing.html>

World Business Council for Sustainable Development. (2021). *Decarbonizing construction: Guidance for investors and developers to reduce embodied carbon*.

World Meteorological Organisation. (2021). *State of the Global Climate 2020* (Numero 1264).

Yang, X.-S. (2021). Genetic Algorithms. *Nature-Inspired Optimization Algorithms*, 91–100. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821986-7.00013-5>

INDICE DELLE TABELLE

tab. 1.1 - Fasi del ciclo di vita di un edificio secondo EN 15978:2011. La voce "O" individua una fase opzionale, mentre "M" una obbligatoria. <i>Fonte:</i> Danuti, 2018.....	23
tab. 2.1- Riassunto degli approcci utilizzati dai casi studio analizzati da Soust-Verdaguer et al., parte 1. <i>Fonte:</i> Soust-Verdaguer et al., 2017, tabella dell'autrice.....	34
tab. 2.2 - Riassunto degli approcci utilizzati dai casi studio analizzati da Soust-Verdaguer et al., parte 2. <i>Fonte:</i> Soust-Verdaguer et al., 2017, tabella dell'autrice.....	35
tab. 2.3 – Emissioni di carbonio totali e durante ciascuna fase. <i>Fonte:</i> Moussavi Nadoushani & Akbarnezhad, 2015	49
tab. 2.4 - Parametri delle nove configurazioni ricavate dal modello di ottimizzazione. <i>Fonte:</i> Eleftheriadis et al., 2018	52
tab. 2.5 - Proprietà dei materiali incorporati nei sistemi murari presentati. <i>Fonte:</i> Kyriakidis et al., 2018, tabella dell'autrice	57
tab. 2.6 - Performance termica ed impatto ambientale dei sistemi murari studiati. <i>Fonte:</i> Kyriakidis et al., 2018, tabella dell'autrice	57
tab. 2.7 - Densità, conducibilità termica e spessore che il materiale deve avere per ottenere una trasmittanza termica di $U = 0,20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. <i>Fonte:</i> Kunič, 2017, tabella dell'autrice	61
tab. 2.8 - Proprietà fisiche e <i>carbon footprint</i> degli isolanti presentati. <i>Fonte:</i> Kunič, 2017, tabella dell'autrice	63
tab. 2.9 - <i>Carbon footprint</i> degli isolanti termici analizzati e la differenza tra la prestazione di un sistema di isolamento medio e uno performante (con $U = 0,20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) per unità di area (m^2). <i>Fonte:</i> Kunič, 2017, tabella dell'autrice.....	65
tab. 2.10 - Percentuale di ciascuna fonte di energia sulla totalità di FER a livello nazionale del 2016. <i>Fonte:</i> Gestione Servizi Energetici (GSE), 2018.....	72
tab. 2.11 - Proprietà equivalenti impiegate nel modello per i blocchi di legno cemento. <i>Fonte:</i> de Rubeis et al., 2018, tabella dell'autrice.....	74
tab. 2.12 - Analisi multi-scenario per l'ottimizzazione energetica. <i>Fonte:</i> de Rubeis et al., 2018, tabella dell'autrice	74

tab. 2.13 - Consumo energetico ed emissioni di CO ₂ per i vari scenari. <i>Fonte:</i> de Rubeis et al., 2018, tabella dell'autrice.....	75
tab. 2.14 - Consumo di riscaldamento annuale per metro quadrato dello spazio abitato [kWhm ⁻² yr ⁻¹] e variazione percentuale. In verde sono indicati i valori inferiori a 15 kWhm ⁻² yr ⁻¹ . <i>Fonte:</i> de Rubeis et al., 2020, tabella dell'autrice.....	77
tab. 2.15 - Ipotesi di configurazione con relativo codice identificativo. <i>Fonte:</i> Manzan & Padovan, 2013, tabella dell'autrice.....	99
tab. 2.16 - Geometrie ottimizzate per Trieste. <i>Fonte:</i> Manzan & Padovan, 2013, tabella dell'autrice.....	101
tab. 2.17 - Risultati dell'ottimizzazione. <i>Fonte:</i> Manzan & Padovan, 2013, tabella dell'autrice.....	101
tab. 2.18 - Valori possibili delle variabili del modello. <i>Fonte:</i> Cellura et al., 2019, tabella dell'autrice.....	103
tab. 2.19 - Valori assunti dalle quattro funzioni obiettivo in bianco quelli ritenuti positivi dagli autori, in azzurro quelli intermedi e in arancione i negativi). <i>Fonte:</i> Cellura et al., 2019, tabella dell'autrice.....	104
tab. 2.20 - Valori originali dei principali parametri di design dell'edificio base. <i>Fonte:</i> Chen et al., 2021, tabella dell'autrice.....	107
tab. 2.21 - Confronto fra la soluzione ottima individuata sul fronte di Pareto ed il caso reale. <i>Fonte:</i> Chen et al., 2021, tabella dell'autrice.....	108
tab. 2.22 - Casi limite dell'ottimizzazione. <i>Fonte:</i> Manzan & Padovan, 2013, tabella dell'autrice.....	111
tab. 3.1 - Area prevista per ciascun posto letto secondo il dl n.229/1999. <i>Fonte:</i> Dall'Olio, 2000.....	117
tab. 3.2 - Dimensionamento minimo delle camere secondo le <i>International Health Facility Guidelines</i> . <i>Fonte:</i> International Health Facility Guidelines, 2018.....	118
tab. 3.3 - Percentuale di superficie netta di ciascuna zona dell'ospedale secondo il manuale "L'architettura dell'ospedale". <i>Fonte:</i> rossi Prodi & Stocchetti, 1990	121
tab. 3.4 - Area netta per ciascuna zona dell'ospedale di Cesena. <i>Fonte:</i> Studio Altieri Spa.....	122
tab. 3.5 - Area netta per ciascuna zona dell'ospedale di Salerno. <i>Fonte:</i> Studio Altieri Spa.....	122

tab. 3.6 - Tabella climatica della città di Bergamo. <i>Fonte: Climate-Data.org</i> ...	127
tab. 3.7- Tabella climatica della città di Palermo. <i>Fonte: Climate-Data.org</i>	127
tab. 3.8 - Punto di regolazione, temperatura dell'aria e regolazione del livello di umidità delle zone definite.....	129
tab. 3.9 - Caratteristiche delle tipologie murarie presenti su Insight 360. <i>Fonte: Stine, s.d.</i>	132
tab. 3.10 - Caratteristiche delle tipologie di tetto presenti su Insight 360. <i>Fonte: Stine, s.d.</i>	132
tab. 3.11 - Caratteristiche delle tipologie di vetro presenti su Insight 360. <i>Fonte: Stine, s.d.</i>	133
tab. 3.12- Tipologie di HVAC presenti su Insight 360. <i>Fonte: Stine, s.d.</i>	134
tab. 3.13 - Comparazione dei consumi dello scenario "come da modello" per tutti i modelli analizzati	137
tab. 3.14 - Comparazione dei consumi dello scenario "migliore soluzione" per tutti i modelli analizzati.....	137
tab. 3.15 - Comparazione dei consumi dello scenario "peggiore soluzione" per tutti i modelli analizzati.....	137
tab. 4.1 - Superfici esterne, volumi totali e rapporti S/V di ciascun prototipo	140
tab. 4.2 - Margine di ottimizzazione tecnologica per le configurazioni A e B	141

INDICE ICONOGRAFICO

fig. 0.1 – Differenza di temperatura media globale rispetto alle condizioni preindustriali. Include cinque differenti set di dati. <i>Fonte: WMO, 2021</i>	3
fig. 0.2 – Sviluppo previsto delle emissioni di GHG dagli anni 2000 al 2100. Il range considera tra il 10% e il 90% dei possibili scenari. <i>Fonte: IPCC, 2014</i>	5
fig. 0.3 - Consumi ed emissioni dovuti al settore AEC nel 2019. <i>Fonte: UNEP, 2020</i>	6
fig. 1.1 - Fasi della LCA e relazione che intercorre tra di esse. <i>Fonte: BS EN ISO 14040:2006+A1:2020, schema dell'autrice</i>	9
fig. 1.2 - Rappresentazione schematica di un product system generico. <i>Fonte: BS EN ISO 14040:2006+A1:2020, schema dell'autrice</i>	14
fig. 1.3 - Schema di una unità di processo generica. <i>Fonte: Klöpffer & Grahl, 2014, schema dell'autrice</i>	16
fig. 1.4 - Correlazione tra la fase di interpretazione e le altre, in accordo con ISO 14040. <i>Fonte: Klöpffer & Grahl, 2014, schema dell'autrice</i>	20
fig. 1.5 - Schematizzazione delle fasi del ciclo di vita di un edificio secondo normativa. <i>Fonte: (One Click LCA, 2021)</i>	23
fig. 1.6 - Articoli pubblicati su Scopus nel lasso di tempo 2011-2015 riguardanti LCA su edifici. <i>Fonte: Anand & Amor, 2017</i>	24
fig. 2.1 - tipologie di integrazione BIM-LCA adattate da Wastiels & Decuyper. <i>Fonte: schema dell'autrice</i>	31
fig. 2.2 - Classificazione dei workflow nei 60 studi identificati. <i>Fonte: Obrecht et al., 2020</i>	32
fig. 2.3 - Emissioni di CO ₂ dei quattro casi studio: (a) Mingguang People's Hospital Building; (b) Run Run Shaw Architectural Building; (c) edificio in Finlandia; (d) edificio nel Midwest. <i>Fonte: grafici dell'autrice</i>	39
fig. 2.4 - Emissioni di CO ₂ annuali. <i>Fonte: Architecture 2030; dati da Global ABC Status Report, IEA</i>	40

fig. 2.5 - <i>Embodied carbon</i> dei materiali per le varie tipologie edilizie. Fonte: WBCSD	41
fig. 2.6 - Emissioni del calcestruzzo durante il suo ciclo di vita. Fonte: Architecture 2030 (2019).....	42
fig. 2.7 - Emissioni dell'acciaio durante il suo ciclo di vita. Fonte: Architecture 2030 (2019).....	43
fig. 2.8 - Valutazione comparativa del GWP delle cinque tipologie di edificio. Fonte: Ajayi et al., 2015.....	45
fig. 2.9 - Schemi strutturali ipotizzati (piante ed alzati): (a) telaio momento resistente in acciaio; (b) telaio controventato; (c) telaio momento resistente in calcestruzzo armato; (d) sistema con pareti a taglio. Fonte: Moussavi Nadoushani & Akbarnezhad, 2015	48
fig. 2.10 – Emissioni di carbonio dell'intero ciclo di vita per metri quadri delle varie opzioni proposte. Fonte: Moussavi Nadoushani & Akbarnezhad, 2015, grafico dell'autrice.....	49
fig. 2.11 - Approccio <i>BIM-embedded</i> alle emissioni del ciclo di vita e all'ottimizzazione. Fonte: Eleftheriadis et al., 2018	51
fig. 2.12 - Soluzioni ricavate dall'ottimizzazione e frontiera di Pareto. Fonte: Eleftheriadis et al., 2018.....	52
fig. 2.13 - <i>Embodied carbon</i> di (a) muri interni ed esterni; (b) pilastri, solai e murature. Fonte: Eleftheriadis et al., 2018	53
fig. 2.14 - <i>Embodied carbon</i> di ciascun materiale per (a) solai interni e (b) pilastri. Fonte: Eleftheriadis et al., 2018.....	54
fig. 2.15 - Rappresentazione 3D delle tipologie murarie ipotizzate: (a) MS1; (b) MS1a; (c) MS1b; (d) MS2; (e)MS2a; (f) MS2b; (g) MS3; (h) MS3a; (i) MS3b. Fonte: Kyriakidis et al., 2018.....	56
fig. 2.16 – Riassunto dei risultati della ricerca: (a) trasmittanza termica U; (b) Sfasamento termico; (c) fattore di decremento f; (d) energia incorporata E. Fonte: Kyriakidis et al., 2018, grafici dell'autrice	58
fig. 2.17 - (a) densità e (b) conducibilità termica degli isolanti termici presentati. Fonte: Kunič, 2017, grafico dell'autrice.....	62
fig. 2.18 - <i>Carbon footprint</i> di ogni materiale isolante per superficie (1m ²) richiesto	

per ottenere una trasmittanza termica pari a $U = 0,20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. <i>Fonte</i> : Kunič, 2017, grafico dell'autrice	64
fig. 2.19 - Grafico psicometrico dderivato da quello di Givoni. <i>Fonte</i> : Manzano-Agugliaro et al., 2015.....	66
fig. 2.20 - Consumo energetico finale globale per il settore edile nel periodo 2010-2018. <i>Fonte</i> : UNEP, adattato da IEA (2019a), <i>World Energy Statistics and Balances</i> (database), www.iea.org/statistics	70
fig. 2.21 - Obiettivi raggiunti da vari paesi europei nel 2017. <i>Fonte</i> : Gestione Servizi Energetici (GSE), 2019	72
fig. 2.22 - Flusso di lavoro per la metodologia impiegata nello studio. <i>Fonte</i> : de Rubeis et al., 2020.....	76
fig. 2.23 - Individuazione della miglior soluzione di Pareto per due funzioni. <i>Fonte</i> : Nguyen et al., 2014.	81
fig. 2.24 - Ciclo di iterazioni di una ottimizzazione <i>simulation-based</i> negli studi delle performance degli edifici. <i>Fonte</i> : Nguyen et al., 2014.	83
fig. 2.25 - Flowchart di NSGA-II. <i>Fonte</i> : Chen et al., 2021	85
fig. 2.26 - Esempio di ottimizzazione <i>simulation-based</i> svolta utilizzando GenOpt come ottimizzatore. <i>Fonte</i> : Bayraktar, 2015.....	86
fig. 2.27 - Fronte di Pareto di due obiettivi individuato tramite Global Optimization Toolbox di Matlab. <i>Fonte</i> : Global Optimization Toolbox - MATLAB, s.d.	87
fig. 2.28 - Plug-in di ottimizzazione e i corrispondenti algoritmi implementati. <i>Fonte</i> : Pereira & Leitão, 2020	89
fig. 2.29 - Software di simulazione maggiormente utilizzati secondo lo studio di Nguyen et al. <i>Fonte</i> : Nguyen et al., 2014	89
fig. 2.30 - Strumenti appartenenti al settore pubblico e privato supportati (a) direttamente da EnergyPlus; (b) tramite la piattaforma OpenStudio. <i>Fonte</i> : <i>EnergyPlus</i> <i>Department of Energy</i> , s.d.....	90
fig. 2.31 - Rappresentazione grafica della relazione tra Ladybug, Honeybee e EnergyPlus/OpenStudio. <i>Fonte</i> : <i>Ladybug Tools</i> <i>Home Page</i> , s.d.....	91
fig. 2.32 - Tipologie ospedaliere a sviluppo verticale ed orizzontale. <i>Fonte</i> :	

Capolongo et al., 2019.....	94
fig. 2.33 - Esempio di analisi dell'accessibilità spaziale del British Museum svolta tramite Space Syntax. <i>Fonte: (British Museum Space Syntax, s.d.)</i>	96
fig. 2.34 - Dimensioni e geometria ipotizzate per l'analisi svolta. <i>Fonte: Manzan & Padovan, 2013</i>	98
fig. 2.35 - Geometria del pannello e parametri per l'ottimizzazione. <i>Fonte: Manzan & Padovan, 2013</i>	99
fig. 2.36 - Workflow in modeFRONTIER per l'ottimizzazione della schermatura solare. <i>Fonte: Manzan & Padovan, 2013</i>	100
fig. 2.37 - Confronto grafico dei risultati per vetro (a) senza rientranza, (b) con rientranza. <i>Fonte: Manzan & Padovan, 2013; grafico dell'autrice</i>	102
fig. 2.38 - Schema delle fasi e della metodologia adottata. <i>Fonte: Cellura et al., 2019, grafico dell'autrice</i>	104
fig. 2.39 - Ottimizzazione multi-obiettivo svolta tramite gli algoritmi LSSVM e NSGA-II. <i>Fonte: Chen et al., 2021</i>	106
fig. 2.40 - (a) Soluzione ideale dell'ottimizzazione, (b) soluzione ottimale individuata. <i>Fonte: Chen et al., 2021</i>	108
fig. 2.41 - Schema di un impianto per produzione di ACS con pannello solare. <i>Fonte: Manzan & Padovan, 2013</i>	110
fig. 2.42 - Risultati dell'ottimizzazione. <i>Fonte: Manzan & Padovan, 2013</i>	111
fig. 2.43 - Struttura del sistema CCHP e del sistema separato. <i>Fonte: Chu et al., 2019</i>	112
fig. 2.44 - (a) costo, (b) consumo di energia primaria e (c) emissioni di CO ₂ di un sistema CCHP rispetto ad uno separato.....	113
fig. 3.1 - Esempio di degenza a corpo doppio. Sanatorio di Padmio, Finlandia, 1928. <i>Fonte: Rossi Prodi & Stocchetti, 1990</i>	119
fig. 3.2 - Esempio di degenza a corpo triplo. ospedale G. Bernabeo di Ortona, Italia. <i>Fonte: Rossi Prodi & Stocchetti, 1990</i>	119
fig. 3.3 – Esempio di degenza a corpo quintuplo. Ospedale S. Vincenz-Elisabeth di Magonza, Germania, 1972. <i>Fonte: Rossi Prodi & Stocchetti, 1990</i>	120
fig. 3.4 - Esempio di degenza a corpo quintuplo con corti interne. Ospedale	

universitario di Zurigo, Svizzera, 1985. <i>Fonte</i> : Rossi Prodi & Stocchetti, 1990	120
fig. 3.5 - Esempio di degenza a nucleo. Ospedale Generale Provinciale Chiese Garda Nord, Italia. <i>Fonte</i> : Rossi Prodi & Stocchetti, 1990	120
fig. 3.6 - Esempio di degenza a croce. Kreiskrankenhaus Neu-Ulm, Germania, 1981. <i>Fonte</i> : Rossi Prodi & Stocchetti, 1990.....	121
fig. 3.7 - Percentuale occupata da ciascuna zona dell'ospedale di Cesena. <i>Fonte</i> : Studio Altieri Spa.....	123
fig. 3.8 - Percentuale occupata da ciascuna zona dell'ospedale di Salerno. <i>Fonte</i> : Studio Altieri Spa.....	124
fig. 3.9 - Impostazioni energetiche dei modelli analizzati	128
fig. 3.10 - Impostazioni del tipo di vano "Camera da letto dormitorio"	128
fig. 3.11 - Esempio di modello energetico del prototipo A: (a) sistemi-zone; (b) vani analitici.	130
fig. 3.12 - Esempi di alcuni parametri del prototipo B collocato a Palermo; (a) sistema HVAC, (b) tipologia di muratura, (c) orientamento dell'edificio.....	136
fig. 3.13 - Confronto grafico tra i consumi dei quattro prototipi per la città di Palermo; (a) scenario "come da modello", (b) scenario "migliore soluzione", (c) scenario "peggiore soluzione".....	138
fig. 4.1 - Esempio di confronto tra i tre scenari per il prototipo A; (a) Palermo, (b) Bergamo. <i>Fonte</i> : Insight 360	139
fig. 4.2 - Confronto qualitativo della variazione percentuale dei prototipi rispetto al caso A, per le città di Bergamo e Palermo; (a) scenario "come da modello", (b) scenario "migliore soluzione", (c) scenario "peggiore soluzione"	140
fig. 4.3 - Rapporti S/V dei prototipi analizzati.....	141
fig. 0.1 - Planimetria del prototipo A - corpo quintuplo con corte interna. <i>Fonte</i> : disegno dell'autrice.....	145
fig. 0.2 - Planimetria del prototipo B - corpo quintuplo compatto. <i>Fonte</i> : disegno dell'autrice	146
fig. 0.3- Planimetria del prototipo C - corpo triplo con camere da 23 m ² . <i>Fonte</i> : disegno dell'autrice.....	147
fig. 0.4- Planimetria del prototipo D - corpo triplo con camere "ridotte" da 18 m ² .	

Fonte: disegno dell'autrice 148

RINGRAZIAMENTI

Chi mi conosce sa che non sono una persona che facilmente esterna quello che sente, ma riguardando indietro a questo lungo percorso mi rendo conto che ci sono molte persone speciali nella mia vita che non posso non ringraziare, perché questo traguardo è un po' anche loro.

Grazie ai nonni Rosa, Pietro e alla *mamie* per avermi dato l'affetto che solo i nonni riescono a dare, vi porto sempre con me.

Grazie a mamma e papà per avermi permesso di intraprendere questa avventura.

Grazie a Elsa, per essere un modello da seguire.

Grazie ad Andrea, che mi ha visto crescere (e mi ha insegnato a guidare).

Grazie agli zii e a Pietro e Roberta.

Grazie agli amici di Torre per essermi stati accanto per tutti questi anni.

Grazie ai ragazzi del Curiel e a tutti i *golosi* per riuscire sempre a farmi ridere ed essere i migliori compagni di vacanze.

Grazie alle mie *bollizze* per essere le migliori amiche di sempre.

Grazie ai miei amici di teatro e al nostro Anthony per essere una bellissima famiglia, con voi so che posso essere anche debole, e questo penso sia una delle cose più belle che mai.

Grazie ai ragazzi e alle ragazze di San Carlo per aver alleggerito la stesura di questa tesi con pause infinite e cioccolate calde del martedì.

Grazie alle ragazze dell'uni, le mie *stelline*, per questi cinque anni di scleri, notti e cappuccini col cacao.

Grazie ai *Fric* per essermi stati a fianco in giro per tutta la Spagna così come nella vita. Un grazie speciale agli amici *fitusi* per aver reso il mio Erasmus così speciale.

Grazie a Laura, per essere una fantastica seconda mamma.

Ultimo, ma non per importanza, grazie al buon Garga per avermi supportato e sopportato per tutta questa avventura, come in tutte quelle che ci sono state e ci saranno.