Università Politecnica Delle Marche

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura

Corso di Laurea Magistrale

in Ingegneria Edile

SISTEMI DI SUPPORTO ALLE DECISIONI PER IL REAL ESTATE MANAGEMENT LA VALUTAZIONE DELL'AMBITO ENERGETICO

Decision support systems for real estate management the evaluation of the energy sector

Relatore:
Prof. Alberto Giretti

Candidato:
Chiara Bizio

Anno accademico 2020/2021

Indice

Introduzione 5
1. Problema del real estate management 6
1.1 Facility management 6
1.2 Real Estate Management 9
1.3 Gestione immobiliare 10
1.3.1 Investimento immobiliare 10
1.3.2 Gumpab: investimenti, problemi e gestione 20
2. Efficienza energetica di edifici e politiche d'incentivazione 23
2.1 Attestato di prestazione energetica 24
2.2 Politiche d'incentivazione 30
3. Stima della prestazione energetica 38
3.1 Contratti a prestazione 41
4. Il modello energetico di ordine ridotto 47
4.1. La struttura concettuale 48
4.1.1 L'attuazione di Modelica 50
4.1.2 Il processo di taratura 52
4.2 Estensione del modello: pannelli fotovoltaici 56
4.2.1 Dalla cella al generatore fotovoltaico 57
4.2.2 Le componenti di un impianto 58
4.2.3 Modello modulo fotovoltaico 59
4.3 Concetti di base: fisica delle pareti 60
4.3.1 Trasmittanza termica degli elementi opachi 60
5. Sistemi di supporto alla decisione 70
5.1 Reti Bayesiane 71
5.2 Introduzione alle reti bayesiane 72
6. Sviluppo di un sistema di supporto alle decisioni per la stima dell'efficienza della prestazione energetica 76
6.1 Database e raccolta dati 76
6.2 Avvio delle simulazioni e calibrazione del modello 79
6.3 Il modello Bayesiano 80
7. Conclusioni 93
APPENDICE 94
Bibliografia 104

Introduzione

Da sempre i manager delle aziende sono chiamati a compiere delle scelte per determinare le modalità ed i contenuti delle attività che la società, o le aree, che dirigono dovranno svolgere con lo scopo di perseguire efficacemente i propri obiettivi. L'elevato interesse che essi nutrono verso il processo decisionale è dovuto al fatto che ogni scelta intrapresa determina i risultati della gestione.

Ogni decisione è presa al termine di un processo che, a grandi linee, consiste nella valutazione delle possibili alternative e si conclude con la scelta della soluzione che apporti il beneficio maggiore all'impresa.

La presente tesi documenta lo sviluppo di un sistema di supporto alle decisioni per gli investimenti immobiliari in ambito di edilizia residenziale che permette la stima della prestazione energetica raggiungibile dall'immobile sulla base di un insieme di informazioni tecniche ricavate dall'analisi di quest'ultimo.

I modelli di supporto sono nati come strumenti per gestire la realtà in maniera più semplice, nascondendone la complessità. Essi sono in grado di produrre informazioni utili per effettuare valutazioni, compiere decisioni o intraprendere azioni, a partire da un set di dati iniziali attraverso il processo di inferenza.

Nel modellare sistemi reali non è sempre possibile disporre di dati certi, perciò bisogna ricorrere a modelli che siano in grado di tener conto delle incertezze associati alle informazioni raccolte.

I risultati prodotti da questi strumenti consentono di rilevare, classificare, riassumere e rappresentare il contenuto del database generato da una serie di indagini effettuate su 20 edifici reali che hanno fornito parametri tecnici, i quali hanno permesso di fare una stima della valutazione energetica, e fungono come base di partenza per considerazioni più elaborate.

Lo scopo è dimostrare le potenzialità delle reti Bayesiane come modello grafico probabilistico per generare informazioni rilevanti da utilizzare come supporto nelle decisioni di business, e stimarne i consumi post-intervento

1. Problema del real estate management

1.1 Facility management

ll Facility Management è la disciplina aziendale che coordina lo spazio fisico di lavoro con le risorse umane e l'attività propria dell'azienda; fa riferimento quindi al controllo di tutte le attività che non riguardano il core business di una società, ovvero produttività d'ufficio, utility, sicurezza, telecomunicazioni, servizio mensa e manutenzioni.

Oggi per Facility Management si intende principalmente tutto ciò che fa riferimento alla gestione di edifici unitamente ai loro impianti e servizi connessi, quali, ad esempio, gli impianti elettrici e termoidraulici, gli impianti di illuminazione, di ricondizionamento, ma anche i servizi di pulizia, ristorazione aziendale, portineria e giardinaggio.

Il Facility Management è visto quindi come un processo di progettazione, implementazione e controllo attraverso il quale le facility sono individuate, specificate, reperite ed erogate allo scopo di fornire e mantenere quei livelli di servizio in grado di soddisfare le esigenze aziendali, creando un ambiente di lavoro di qualità con una spesa il più possibile contenuta.

Il facility management, dunque, integra i principi della gestione economica e finanziaria d'azienda, dell'architettura e delle scienze comportamentali e ingegneristiche. Si tratta di un approccio integrato che presuppone lo sviluppo e l'implementazione di politiche, standard e processi che supportano le attività primarie, rendendo l'organizzazione in grado di adattarsi ai cambiamenti e di migliorare l'efficacia.

I tre aspetti principali che caratterizzano la disciplina del Facility Management sono quello strategico, quello analitico e quello gestionale-operativo.

- L'aspetto strategico concerne ogni decisione relativa alla politica di gestione e reperimento dei servizi, di distribuzione delle risorse da impiegare per supportare gli obiettivi corporate (predisposizione e gestione del budget, ripartizione dei costi, ecc.), di scelta del fornitore, ecc.

- L'aspetto analitico è relativo alla comprensione delle necessità dei Clienti Interni relative ai servizi, al controllo dei risultati della gestione e dell'efficienza nell'erogazione del servizio, all'individuazione di nuove tecniche e tecnologie che supportino il business aziendale. Si tratta quindi di un aspetto fondamentale per far sì che il Facility Management contribuisca fattivamente al conseguimento degli obiettivi dell'azienda.
- L'aspetto gestionale-operativo concerne la gestione e il coordinamento di tutti i servizi complessivamente intesi e include la definizione di sistemi e procedure e l'implementazione e reingegnerizzazione dei processi di erogazione.

Possiamo definire il facility management tramite la fondamentale normativa europea: EN 15221.

Tale legge è una norma ISO ed è composta da sette parti sotto riportate.

- Parte 1: termini e definizioni.

  La norma si pone come obiettivo prioritario il superamento di divergenze negli approcci e nei linguaggi tra i vari paesi europei definendo un modello comune di facility management, la descrizione delle relative funzioni, la precisazione del campo di applicazione e la specificazione della terminologia di settore.

  Il modello di facility management proposto, dunque, è costruito intorno ad una specifica "organizzazione", ai suoi "processi primari" e alle interrelazioni gestite a livello "strategico", "tattico" e "operativo" tra domanda e offerta di servizi integrati. Lo scopo che il facility management si pone è, quindi, il bilanciamento tra le richieste in termini di servizi integrati da parte della domanda e la risposta in termini di fornitura degli stessi da parte dell'offerta, in un corretto rapporto tra "requisiti" e "prestazioni" e tra "qualità" e "costi".
- Parte 2: linee guida per preparare accordi di facility management.

  La norma fornisce i criteri base per regolamentare i rapporti tra il committente e il fornitore di servizi di facility management. Vengono quindi indicati i "tipi di accordi" di facility management e le relative "caratteristiche" e forniti suggerimenti e indicazioni in merito alla stesura

dei contratti. Il campo di applicazione della norma abbraccia una gamma assai articolata di servizi, in ambito pubblico e privato e per tutti i tipi di ambiente lavorativo.

- Parte 3: guida sulla qualità nel facility management.

  La norma fornisce una linea guida su come misurare, raggiungere e migliorare la qualità nel facility management. Vengono definiti i "Key Performance Indicator – KPI" e gli "service Level Agreement – SLA", elementi questi determinanti per la determinazione degli appalti su base prestazionale.
- Parte 4: tassonomia, classificazione e strutture nel facility management.

  La norma si pone lo scopo di realizzare un sistema di classificazione dei servizi di facility management. La struttura di classificazione si fonda sui concetti di base già introdotti nella "Parte 1", che vedono il campo di applicazione del facility management suddiviso in due macro-gruppi: spazio-infrastrutture, persone-organizzazione.
- Parte 5: guida ai processi nel facility management.

  La norma riepiloga e chiarisce concetti già espressi nelle altre norme, attraverso schemi esemplificativi del processo di facility management a livello strategico, tattico e operativo, applicabili da parte di committenti e fornitori di servizi.
- Parte 6: misurazione di aree e spazi nella gestione delle strutture.

  La norma, come già prima scritto, nasce allo scopo di uniformare a livello europeo i criteri e metodi per il calcolo delle superfici degli edifici, al fine di stabilire una base comune di riferimento per la pianificazione, la progettazione, la gestione delle aree e degli spazi, in particolare degli aspetti di costo e benchmarking.
- Parte 7: linee guida per l'analisi comparativa delle prestazioni.

  La norma identifica un quadro di riferimento per i processi di benchmarking in particolare a livello di prestazioni di servizi di facility management, di relativi costi, di modalità di "misurazioni" sia quantitative che qualitative e di valutazione della customer satisfaction.

1.2 Real Estate Management

Il Real estate Facility Management comprende tutte quelle attività organizzative volte alla massimizzazione dell'efficienza di gestione dei servizi relativi agli immobili. È vista come l'evoluzione continua del settore immobiliare di antica concezione. Il concetto nasce e si sviluppa in America, ed indica nel campo immobiliare, le società immobiliari che non solo fanno intermediazione nella compra-vendita, ma a volte sono direttamente proprietari degli Immobili o semplicemente li gestiscono.

Questo concetto lavorativo si è affermato in paesi dove il business immobiliare sia a livello residenziale, sia commerciale ha iniziato ad essere gestito da operatori professionali, ossia dai fondi immobiliari che raccoglievano denaro sul mercato e gestivano un patrimonio immobiliare. Questa tendenza negli ultimi anni si diffusa anche in Italia e ogni istituto bancario di certe dimensioni offre ai propri clienti la possibilità di investire con delle quote nei fondi.

Diciamo che Real Estate è il termine giusto per definire gli operatori "alti" del settore immobiliare. Alti per attività, competenze e volumi generati. Ad esempio, rientrano in questa categoria i grandi costruttori e gli sviluppatori, le società di Gestione del Risparmio (SGR), i Fondi, i General Contractor, le società di project management.

Mentre, potremmo definire immobiliare, il segmento inferiore, quello rappresentato dai piccoli costruttori, i progettisti e soprattutto le innumerevoli agenzie con i suoi infiniti agenti.

Oggi dunque, anche in Italia, molte banche per scelte legate ai propri bilanci o semplicemente per non utilizzare troppe risorse in un settore che necessita costantemente di cospicui capitali, scelgono di indirizzare le proprie proprietà in alcuni Fondi, che sono aperti agli investitori. In sostanza, essendo essi stessi proprietari e gestori, li affittano a sé stessi.

Nel nostro paese quindi il settore immobiliare e dell'amministrazione di immobili è stato caratterizzato da un processo di industrializzazione e riorganizzazione delle dinamiche di mercato che ha visto recentemente la nascita di grandi

operatori in grado di promuovere progetti di investimento di portata assai più elevata che in passato. Ciò ha determinato una marcata specializzazione dei ruoli dei diversi soggetti che operano nella filiera e una sempre più elevata complessità gestionale. In questo contesto diventano evidenti le potenzialità di incremento della competitività del settore connesse all'adozione di una cultura della comunicazione da parte degli attori del mercato immobiliare e del building management nella gestione del sistema di relazioni di cui sono parte.
Ogni professionista del settore, così come ogni giovane interessato a specializzarsi per operare nel campo, si scontra con problematiche che necessitano di precise e approfondite conoscenze sia in campo economico, che giuridico e tecnico.

1.3 Gestione immobiliare

1.3.1 Investimento immobiliare

Il ciclo di investimento immobiliare si configura come una procedura modulare ed integrata di più passaggi, tra loro autonomi, ma profondamente integrati. La struttura ciclica, ricorrente nel mercato immobiliare, trova la sua peculiarità nella massimizzazione del rendimento con un contenuto grado di rischio. Questo porta ad analizzare i passaggi che si compiono per giungere al rendimento e che sono tra loro correlati. La *figura 1* descrive questa procedura poiché evidenza la relazione tra i diversi steps che si devono compiere.
L'investimento immobiliare trova il suo inizio nella fase di valutazione: la determinazione dell'opportunità di investimento porta a considerare la fattibilità del progetto, le sue caratteristiche e i suoi punti di forza e debolezza.
La valutazione tende ad essere un momento preliminare all'acquisizione, ma un momento che dà avvio alla procedura analitica, in termini economico-finanziari di quelli che saranno gli sforzi per giungere fino al rendimento finale.
Pertanto, la procedura di acquisizione attuata attraverso la ''due diligence immobiliare'', ovvero la verifica dei dati del bilancio di una società, porta a considerare quelli che sono gli aspetti finanziari, affinché vengano considerati gli ammortamenti e il payback period, cioè il rientro di quello che sarà il

finanziamento in opera per arrivare all'investimento finale. Non solo, la due diligence andrà anche a comprendere gli obiettivi urbanistici ed ambientali a cui il progetto tenderà: tale analisi andrà perciò a chiarire quelli che sono i rendimenti sotto il profilo economico e ambientale e i costi in termici di ''costo opportunità'' dell'operazione, sull'appetibilità del progetto.

I rischi che possono essere incontrati nel progetto devono essere rilevati in tale sede, rischi che possono essere connessi al mercato immobiliare, piuttosto che collegati all'immobile stesso. In particolare, la due diligence immobiliare connette lo stato di fatto dell'immobile con quello documentale; con tale procedura nasce il principio di conformità, fondamentale per lo studio di due diligence, poiché accerta il grado di conformità dell'immobile rispetto alle normative vigenti.

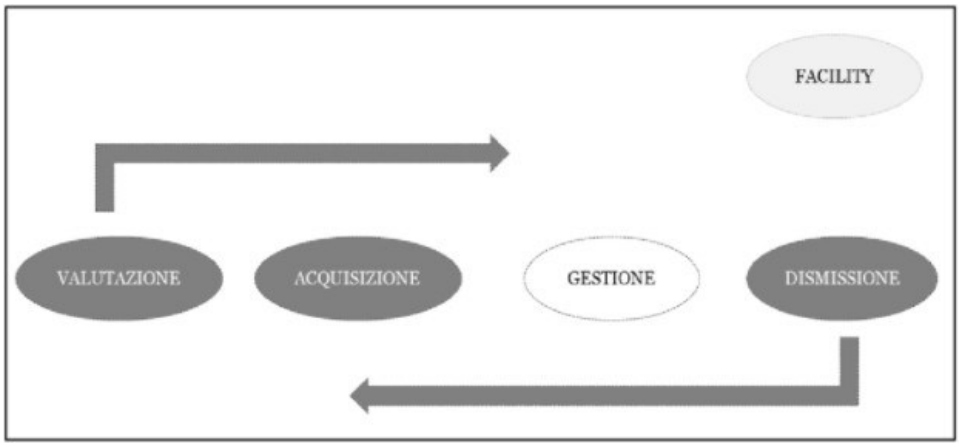


Figura 1 – Steps dell'investimento immobiliare

Successivamente alla fase di due diligence, nella fase di valutazione prende campo la valutazione economico-finanziaria del progetto, perché in sede di acquisizione dovrà essere apportato un valore all'immobile dettato dalle varie procedure in essere, quali capitalizzazione diretta e metodo comparativo.

La valutazione dà avvio al procedimento di investimento immobiliare che in maniera maggiormente analitica prende avvio con l'individuazione di opportunità e solo successivamente tocca la valutazione di queste ultime. La valutazione comprende perciò una due diligence immobiliare per la parte tecnica, una valutazione economico-finanziaria, che solitamente coincide con il piano economico-finanziario e con le assumption che esso porta con sé: il tutto

riassunto nell'information memorandum o business plan, fondamentali per l'avvio di un progetto di qualsiasi dimensione.

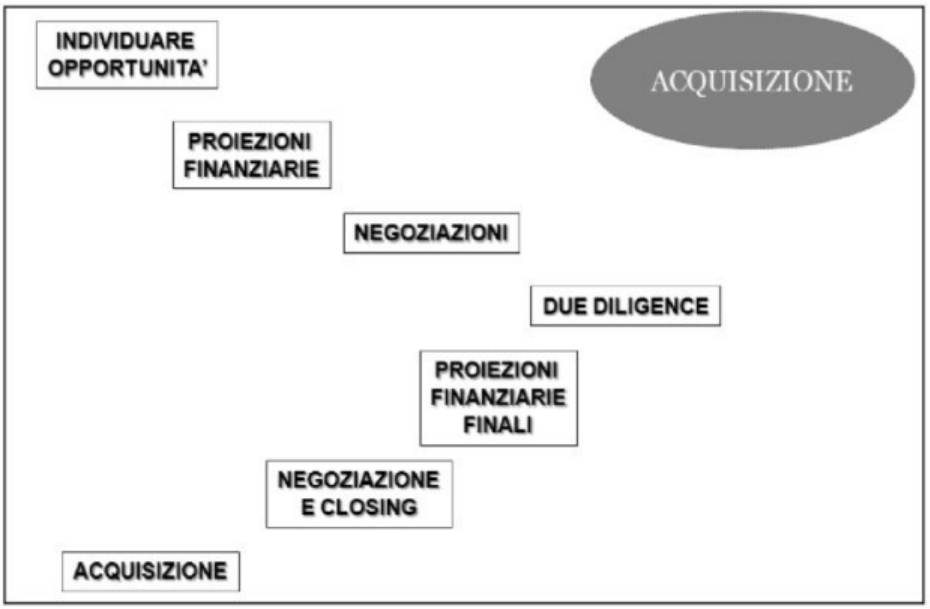


Figura 2 – Il processo di acquisizione immobiliare

Andando oltre la fase iniziale di valutazione, troviamo quella destinata all'acquisizione, attività principale dell'asset manager, cioè colui che gestisce un bene con il fine di massimizzare il rendimento del suo valore e minimizzare il rischio per conto dell'investitori istituzionali o privati.

Le fasi principali dell'asset manager, cioè quelle di acquistare, gestire ed incrementare di valore ed infine dismettere per ottenere il massimo rendimento, devono essere svolte insieme al property manager che dà il supporto tecnico.

Tale supporto sarà anche programmato al fine di definire quelle che sono le azioni ed i miglioramenti che sull'immobile dovranno essere attuate. Se ad esempio un fondo di investimento investe in determinati immobili sul territorio italiano, l'asset manager sarà colui che gestisce il portafoglio di immobili, cercando attraverso una strategia prestabilita in accordo con l'investitore le migliori azioni per aumentare il grado di rendimento finanziario dell'immobile.

L'attività viene svolta attraverso un equilibrio tra proprietari/conduttori, budgeting, analisi delle spese operative e controllo delle stesse, tasse immobiliari, analisi dei mutui e dei leasing a favore degli investitori; per questo deve essere attuata e svolta una grande attenzione al mercato e alle sue variazioni.

Basandosi su vari fattori l'asset manager determina il modo di incrementare il profitto delle varie proprietà. Chiaramente le sue funzioni sono anche dipendenti dal valore, dalla grandezza delle stesse proprietà dell'investitore, esso cioè si pone come "amministratore delegato" delle proprietà immobiliari di proprietà dell'investitore. Ogni proprietà è però in realtà una unità di business a sé stante (in termini industriali) ed il conglomerato porta a costituire il portfolio in mano all'asset manager.

Inoltre, monitorando le performance della concorrenza e migliorando le proprie, l'asset manager porta a creare valore per gli immobili sotto la propria gestione, poiché il portfolio da lui detenuto può anche essere di proprietà di un fondo immobiliare quotato e gli immobili, in quel caso, si possono configurare come veri e propri assets finanziari. Solitamente, i titoli immobiliari operano uno strumento di beneficio nei confronti di un portafoglio più ampio, se essi sono connessi a titoli azionari, obbligazionari e liquidità: infatti, essi, in mano ad un investitore mediamente diminuiscono il rischio globale dell'intero portafoglio. L'asset manager, quindi, deve essere imprenditore del patrimonio che gli è stato dato, coordinando le attività con largo raggio d'azione mentre il property manager avrà competenze maggiormente tecniche ed ingegneristiche sull'immobile, ma minori dal punto di vista economico-finanziario. Per evitare confusione che potrebbe nascere tra asset e property manager è bene chiarire le differenze che esistono tra le due figure.

Il property è colui che monitora la costruzione o la ristrutturazione dell'immobile per giunger agli obiettivi di valore concordati con l'asset manager. Il property è l'anello di collegamento tra i conduttori e l'asset per conto dell'investitore. Il property è responsabile per la parte delle fatture per gli approvvigionamenti e gli acquisti per la costruzione, del materiale per la ristrutturazione, per la riscossione degli affitti, per l'amministrazione dei lease, per la manutenzione e tenuta dei lavori programmati sull'immobile o sull'arca in oggetto. Il property manager è anche responsabile dell'acquisto di beni e servizi per il determinato immobile; un

ulteriore dovere è quello di preparare la prima bozza di budget per la manutenzione dell'immobile per l'anno successivo.

Invece, gli asset manager possiedono un approccio maggiormente globale, riconoscendo che le opportunità del portafoglio di investimento rappresentano un investimento significativo e, per questo, rientra nella loro responsabilità creare un piano che miri a questo scopo. Il loro ruolo è stabilire attraverso una strategia a lungo periodo, il periodo della durata dell'investimento, gli obiettivi a breve e medio termine, selezionando e assumendo property manager, consulenti e brokers che lavoreranno al miglioramento delle performance del portfolio e degli immobili presenti al suo interno. L'asset dovrà monitorare le performance finanziarie del portfolio e possedere una "mentalità di controllo interno" verificando i leasing accesi con i finanziatori. A tal fine, dovranno essere verificati anche le spese ed i costi e che essi siano giustificati alla rilevanza e all'entità delle azioni sviluppati sui singoli immobili. Gli asset manager devono peraltro, attuare una strategia del proprio portfolio con quelle che sono i trend e gli andamenti del mercato immobiliare nazionale ed internazionale prevedendo le operazioni da delegare al property manager in sede operativa.

La fase di acquisizione termina con il closing dell'operazione che viene a determinarsi come un processo di negoziazione durata nel tempo. Infatti, il prezzo di vendita o le condizioni messe in campo dal venditore non sono quelle richieste dall'acquirente. La negoziazione porta a sviluppare un campo comune dove poter mettere in atto e concludere l'affare.

Per arrivare a ciò l'asset manager segue solitamente tre fasi. La prima trova applicazione nella definizione del piano di business che si vuole attuare per l'acquisizione dell'asset da inserire nel portafoglio. Questa fase ha lo scopo di capire le potenzialità del bene stesso per poi porre in essere una strategia per la massimizzazione del suo valore.

Una volta che il piano è stato stabilito esso deve identificare i seguenti obiettivi:

- La ricerca e gli obiettivi di massimo rendimento in termini finanziari
    - Gestione dei costi e della manutenzione
    - Politica commerciale

- Obiettivo di vendita e dismissione strategica

Il primo punto è sviluppato attraverso quella che è la rendita in termini economico-finanziari dell'immobile.

L'ultima fase di analisi è la continua misurazione degli obiettivi stabiliti: essa dovrà essere messa in atto almeno trimestralmente, per poter vedere e confrontare i dati in sede teorica, al fine di determinare se effettivamente essi corrispondono a quelli reali, altrimenti si dovrà ricalibrare gli obiettivi, per raggiungere finalità di net operating income stabiliti nel business plan.

I risultati sono i dati ipotizzati e sviluppati in sede di previsione, gli actual quelli realmente raggiunti, pertanto, la variazione indica la reale performance dell'immobile, in termini di attività finanziarie. Infatti, la prima parte viene a determinare e a descrivere il reddito che deriva dalla gestione strategica dell'immobile.

La differenza tra i flussi di cassa in entrata e quelli in uscita confrontata con i tassi finanziari ci determina il lusso interno di rendimento (TIR o IRR), necessario per valutare l'investimento in base al periodo e al rischio che esso necessita per la sua attuazione. L'IRR risulta un indice che permette di creare un'analisi di investimento non stand-alone, non off-grid, ma in correlazione con quello che è il rischio necessario da correre.

In tema di gestione, quale elemento del ciclo di investimento immobiliare, c'è da chiarire il ruolo che esso assume nell'intero ciclo. Infatti, facendo parte del ciclo di investimento immobiliare, ma essendo in mano al property manager, la gestione percorre una via parallela, sebbene profondamente collegata al ciclo di investimento, rispetto all'acquisizione e alla dismissione in mano all'asset manager. Questo perché il property. con specifiche competenze tecniche, porta avanti la gestione, che tra l'altro si sviluppa con il property management plan e che supporta l'asse nelle sue scelte strategiche di medio e lungo periodo. A differenza del facility, fuori dal ciclo di investimento immobiliare, la fase di gestione si configura all'interno del ciclo di investimento immobiliare, anche se non risulta una peculiare attività dell'asset manager, per questo si presenta con differente caratteristica rispetto agli altri elementi del ciclo, sebbene rimanga un punto fondamentale dello stesso.

Il piano di gestione, messo in atto dal manager assume un ruolo basilare nell'ottica e nella politica di massimizzazione del rendimento di valore del bene immobile. Il facility management rappresenta la soluzione gestionale che provvede al controllo di tutte le attività ei servizi non attinenti al core business di un cliente. In ultima analisi, la fase che conclude e termina il ciclo di investimento Immobiliare, la dismissione, per poi successivamente conseguente la vendita, iniziare un successivo ciclo di investimento.

La dismissione assume un ruolo molto importante, essa va a definire il valore del rendimento finale del nostro investimento del determinato bene immobile, il quale ha avuto durata pari al periodo che va dall'acquisizione al fine ultimo, la dismissione. La vendita, nel corso degli ultimi anni, ha visto assumere vesti molteplici, non la semplice alienazione dell'immobile ad un'altra persona fisica. Il valore terminale, cioè il terminal value, utilizzato in sede di business plan, è il rendimento netto finale: esso può essere attuato nei diversi modi che compongono gli strumenti di finanza innovativa, che soprattutto nel comparto immobiliare, negli ultimi anni, hanno preso campo.

- **Valutazione dell'immobile**

A fronte del cambiamento dello scenario immobiliare italiano che modifica la visione di valutazione dell'immobile, modificandola da impostazione architetturale a impostazione finanziaria, abbiamo assistito ad una riconfigurazione di tutti i parametri per la valorizzazione dell'asset immobiliare. Una valutazione che prescinde da un processo di pianificazione strategica e finanziaria e che porta l'immobile a essere valutato attraverso valori ed espressioni tipiche della finanza che fino a poco tempo fa trovavano campo ed azione solo nel settore mobiliare italiano.

La valutazione, perciò, diviene strumento operativo alla valorizzazione dell'immobile e l'apporto anche di nuove ha permesso di accrescere il settore immobiliare italiano ed allinearlo a quello internazionale, dove già la direzione volgeva verso tali possibilità. Tutto ciò ha portato non solo alla creazione di nuovi strumenti, ma anche di nuove figure come l'advisor immobiliare, il developer cd il promoter, le cui attività, fino a qualche anno fa, venivano svolte direttamente dal costruttore.

Ma quali sono gli steps da poter percorrere per dare avvio ad una valorizzazione del patrimonio posseduto da società private o pubbliche? In prima analisi sicuramente la valorizzazione deve passare attraverso un mix tra analisi e determinazione delle risorse possedute. Senza uno screening degli immobili, definendo la loro classificazione per ubicazione, natura e destinazione d'uso non sarebbe possibile iniziano a svolgere tale processo. Perciò il frazionamento del portafoglio immobiliare posseduto, sebbene non utilizzato da una società è il primo punto di forza nell'intraprendere tale cammino. Il frazionamento del portafoglio. o meglio la sua segmentazione, svolge un ruolo di primaria importanza poiché detta i termini su cui confrontare i vari immobili, sulla base di una tassonomia solitamente classificata per:

- Locazione immobile
- Tipologia
- Destinazione d'uso

Potremmo aggiungere anche costi di gestione e stato dell'immobile, ma per semplificare l'esposizione è bene iniziare da tre indicatori che permettono, per qualsiasi immobile. di poter essere classificato e comparato con altri assets, sia in sede di mera valutazione, sia in sede di compravendita.

La locazione dell'immobile diviene uno dei dati più rilevanti in sede di valutazione: l'ubicazione dell'immobile al centro della città di Roma non ha lo stesso valore di un immobile situato alla sua periferia, così come la locazione deve indicare qualcosa di più sull'immobile stesso. Deve saper indicare se in quella determinata zona esistono piani di sviluppo e di riqualificazione della città: allora saremmo di fronte ad una rivalutazione non solo dell'immobile stesso ma anche della zona in cui tale bene si colloca. Perciò definire ed individuare lo sviluppo futuro e le potenzialità che su di esso è possibile prevedere.

La variabile tipologia riflette soprattutto il valore dell'assets in relazione alla sua superficie, alla sua struttura e alla sua architettura. Se il valore della locazione affrontava ed esprimeva eventuali redditi finanziari, derivanti dallo sviluppo dell'immobile, la tipologia evidenzia una maggiore peculiarità architetturale ed ingegneristica. Perciò tale variabile può definire ed esprimere anche gli interventi

che l'immobile necessità e la pianificazione per una migliore gestione dci suoi servizi.

Infine, la destinazione d'uso tra le variabili è quella di maggiore discriminazione, poiché caratterizza un immobile per la sua finalità e di conseguenza discrimina maggiormente il valore dello stesso in sede di valutazione. Sebbene inserito per ultimo, tale fattore è forse il primo da prendere in considerazione nel momento in cui si vuole valorizzare un asset o un'intera arca territoriale. La destinazione d'uso è molto importante anche in sede di sviluppo di un'area. poiché partendo dal terreno, il valore potenziale di quella determinata arca ha il suo incipit nella destinazione d'uso per la quale si vuole destinare, a carattere commerciale. residenziale o industriale. Il valore degli affitti e quindi dei flussi di redditività saranno totalmente diversi c differenti, sebbene il valore che sta alla base di tali flussi, sarà quello dell'highest and best use, cioè in relazione alle potenzialità che l'asset costruito o da costruire possiede intrinsecamente.

Dettare e definire un valore di un immobile non è cosa facile, soprattutto se l'immobile ancora deve essere costruito e sviluppato: un processo di valutazione è una stima del suo valore. Ma il processo di valutazione ci aiuta a determinare una certezza in tale difficoltà. Il processo di valutazione può prendere avvio attraverso uno step fondamentale come quello dell''identificazione legale e fisica dell'asse; tale step espone una prima analisi. Preliminare, sulla quale poi basare la successiva information memorandum.

Questo primo passo accerta l'identificazione a grandi linee del valore dell'immobile, definendo attraverso visure e stralci catastali, l'arca, la posizione e l'eventuale piano che, nell'arca riferita, le autorità vogliono attuare. In seconda analisi, identificare i diritti legali connessi all'immobile, per poter stabilire gli eventuali contratti di locazione già stabiliti per l'immobile e gli altri eventuali redditi derivanti dalla proprietà dello stesso. In terza fase, gli advisors specificano la proposta della valutazione: attraverso una stima del valore dell'immobile devono stabilire gli eventuali prestiti e mutui da richiedere agli istituti di credito per poter mettere in atto la decisione di investimento. Devono altresì stabilire eventuali pendenze che gravano sull'immobile, tasse di proprietà (che variano da

paese a paese), stabilendo così tutti i costi c tutte le tasse che su tale bene immobile esistono.
Successivamente a questa “perizia fiscale” essi specificano l'effettiva data di stima del valore dell'immobile: così facendo cessi bloccano il valore da eventuali cambiamenti che le condizioni del mercato potrebbero apportare sull'immobile.
Infine, i valutatori devono raccogliere e analizzare dati di mercato e applicarla ad appropriate tecniche di stima del valore, cioè stabilire l'investimento rapportando al rischio ad esso conseguente.
Nel processo di valutazione e stima devono essere considerati e raccolti i dati del mercato per poter capire, per una data regione, quali sono i parametri esatti di confronto. Non possono essere stabiliti e quindi inseriti nel business plan, stime di affitto o redditi finanziari a priori per l'immobile, non identificando e definendo il parametro in merito alle zone in cui esso è collocato.
Quindi, tutti gli investimenti devono essere valutati e stimati ad hoc, in relazione alla tipologia, ubicazione e destinazione d'uso che per l'immobile si vuole stabilire.
L'ammontare di dati raccolti è importante per la costruzione dell'information memorandum e del relativo business plan. Essi sono dati riferiti all'affitto, ai costi, alla percentuale di vacancy rate, cioè di affitti non occupati per esigenze strategiche, alla richiesta di affitti per quella determinata tipologia di immobile, in quella precisa arca territoriale e qualsiasi altro dato, ritenuto considerevole e di importante rilevanza, ai fini di una più corretta valutazione.
Esso però deve essere valutato, interpretato e implementato alla nostra tipologia di asset. Di seguito si pongono le basi e le linee guida per mettere in atto la valorizzazione di un patrimonio immobiliare, cioè i passaggi necessari per creare un presupposto di valutazione e valorizzazione, un information memorandum per poi arrivare alle metodologie tecniche per la stima del valore dell’asset.

I passaggi per la valorizzazione sono i seguenti:

- L'immobile
- La strategia
- Mercato

- Analisi tecnica e situazione urbanistica
- Ipotesi di progetto
- Assumptions economico-finanziarie
- Piano economico-finanziario

1.3.2 Gumpab: investimenti, problemi e gestione

In questo paragrafo entriamo nello specifico di quanto detto precedentemente e analizziamo il tipo di gestione immobiliare svolto dall'azienda con la quale abbiamo collaborato.

Gumpab è una startup che monitora costantemente la situazione degli immobili gestiti per cogliere le opportunità di creazione di valore che il mercato offre.

È un'azienda che si occupa della gestione degli immobili, partendo dall'acquisto di questi ultimi, passando al successivo ricondizionamento fino ad arrivare alla vendita sul mercato. In merito alla parte finanziaria la sua politica si basa su un finanziamento collettivo, il crowdfunding (una pratica di microfinanziamento dal basso che mobilita persone e risorse).

L'azienda realizza analisi demografiche e di mercato, che gli consentono di essere costantemente aggiornati sui trend di compravendita, area per area e destinazione d'uso per destinazione d'uso.
Quindi deve vantare una conoscenza eccellente del mercato immobiliare e deve monitorarlo in modo costante. Le condizioni del mercato hanno ovviamente una grandissima importanza affinché il proprietario del patrimonio immobiliare possa massimizzare i propri profitti.
L'azienda, quindi, effettua analisi strategiche di portafoglio, attraverso le quali verifica il posizionamento competitivo degli immobili che gestisce e sceglie le azioni che gli consentono di generare il miglior vantaggio competitivo rispetto alla concorrenza. Nel caso di più immobili, cioè in presenza di un portafoglio immobiliare, queste analisi mirano a classificare ogni immobile nell'ambito di segmenti strategici che rendano perseguibile nell'insieme la strategia di portafoglio, sincronizzando i flussi finanziari.

La metodologia di intervento nella fase precedente alla scelta, alla valutazione e all'acquisto dell'immobile però deve essere perfezionata sulla base dell'ottimizzazione del tempo e dell'implementazione della conoscenza aziendale. Il problema della gestione del tempo viene risolto attraverso la creazione di un sistema di supporto alle decisioni che permette di capire e stimare, quando e quanto si può guadagnare su una transazione immobiliare.

Si vuole favorire un metodo comparativo basato sul CBR, il quale utilizza il confronto con altri immobili, in un mercato libero e che abbiano caratteristiche simili all'immobile in analisi. Questo permette una valutazione piuttosto facile e di veloce attuazione, poiché i dati di strutture analoghe sono già stati effettuati e registrati.

È vero però che allo stesso tempo, la valutazione di un determinato immobile corre su un percorso, di volta in volta, piuttosto unico ed originale, poiché la sua struttura e la collocazione portano l'immobile a divenire "unico" nel suo genere.

In merito alla crescita della conoscenza aziendale, quindi viene introdotta la costruzione di un database. Questo archivio supporterà quindi l'azienda, anche grazie ad una modellazione statistica, permettendole di trovare la soluzione più prossima e confrontarla a quella necessaria. L'obiettivo è quello di creare uno scenario di analisi che sia in grado di darci informazioni e proiezioni significative dal punto di vista della stima energetica in modo tale da capire se l'investimento ne vale la pena. Quindi si raccolgono le informazioni fornite dal cliente (input) e si integrano con dati originali ricavati dalle indagini in merito agli immobili e al contesto di riferimento.

Dopodiché si passa al tracciamento degli scenari e della strategia: vengono, infatti, definiti i possibili scenari sulla domanda potenziale e sui fabbisogni del territorio e la conseguente strategia di valorizzazione, efficientamento e rigenerazione del patrimonio immobiliare.

Infine, si passa alla valutazione della sostenibilità economica: viene, infatti, verificata la sostenibilità delle azioni di ottimizzazione ipotizzate e viene proposto un piano strategico che permette di misurare il valore generato, facendo riferimento agli aspetti fiscali e finanziari del progetto. In particolare, la sostenibilità degli interventi viene valutata attraverso l'efficientamento a 360°,

che riguarda tanto i termini strutturali e tecnologici, quanto quelli di utilizzo degli spazi, della destinazione d'uso e della messa a reddito degli immobili, e la logica di portafoglio, ossia la generazione del valore necessario all'equilibrio economico-finanziario.

2. Efficienza energetica di edifici e politiche d'incentivazione

Quando si parla di efficientamento energetico si fa riferimento agli interventi, realizzati su edifici pubblici e privati, complessi aziendali e commerciali per migliorarne l'efficienza energetica, ossia per ottimizzare il rapporto tra immissione di energia e rendimento in termini di produzione o di consumi. L'obiettivo è, pertanto, la migliore allocazione dell'energia.

Gli interventi effettuati per migliorare l'efficienza energetica di un edificio risultano doppiamente vantaggiosi. Da un lato, queste attività permettono di sfruttare le fonti energetiche in modo ottimale, senza una riduzione delle prestazioni ma con un minore consumo di energia. Dall'altro lato, le spese sostenute per interventi finalizzati alla riqualificazione energetica beneficiano di vantaggiose detrazioni fiscali.

Gli interventi di efficientamento energetico mirano ad ottimizzare il rapporto tra fabbisogno energetico e livello di emissioni. Tra gli interventi che possono contribuire in modo significativo al miglioramento dell'efficienza energetica rientrano:

- le opere di coibentazione delle pareti, delle coperture o degli infissi;
- l'installazione di pannelli solari o di impianti che permettono di produrre o consumare fonti rinnovabili;
- la sostituzione delle classiche lampadine con fonti di illuminazione a basso consumo come i LED.

Allo stesso modo, contribuiscono ad aumentare l'efficienza energetica di un immobile:

- la sostituzione degli impianti di climatizzazione;
- la sostituzione delle caldaie di vecchia generazione con altri impianti che presentano un maggiore livello di efficienza, come i sistemi a pompa di calore, le caldaie a condensazione di classe pari o superiore alla A, le caldaie a biomassa, i micro-cogeneratori e i dispositivi multimediali per il controllo da remoto degli impianti di riscaldamento e climatizzazione.

Investire nell'efficientamento energetico significa fare un investimento destinato a dare i suoi frutti tanto nel breve, quanto nel lungo periodo. Questi interventi migliorano le prestazioni degli edifici: un immobile nella classe energetica A è un immobile che presenta un elevato valore di rivendita e che garantisce un ottimo comfort abitativo (in termini di stabilità delle temperature, di qualità dell'aria e di assenza di spifferi) con consumi energetici estremamente bassi in ogni stagione dell'anno. Da non trascurare sono anche i positivi impatti sull'ambiente. Tanto più un edificio è in grado di sfruttare in modo ottimale l'energia, tanto inferiore sarà il suo impatto in termini di inquinamento ambientale ed atmosferico. Un sistema orientato al progressivo abbandono dei combustibili fossili a favore delle energie rinnovabili riesce a coniugare salvaguardia ambientale e risparmio energetico ed economico.
Quelli di risparmio e di efficientamento energetico sono due concetti da mantenere distinti anche se spesso camminano di pari passo. Si parla di risparmio energetico con riferimento a quegli interventi volti a ridurre i livelli di consumo, attraverso il taglio degli sprechi e l'ottimizzazione dell'uso delle fonti di approvvigionamento e impiego dell'energia. Esempi tipici sono l'adozione di comportamenti virtuosi come l'uso in certe fasce orarie degli elettrodomestici e il minor periodo di accensione degli impianti. Va da sé che questi interventi che rimuovono i fattori che condizionano il consumo energetico e che mirano ad un minor impiego di energia possono non coincidere con un miglioramento dell'efficienza energetica. Al contrario invece, migliorando l'efficientamento energetico si va ad ottenere anche un notevole risparmio.

2.1 Attestato di prestazione energetica

La certificazione energetica, meglio nota come "Attestato di Prestazione Energetica" (APE), è un documento che attesta la classe energetica di un immobile, la sua prestazione e il suo consumo energetico per anno. Il certificato, oltre a determinarli su una scala che va dalla classe A4 alla classe G, consente di identificare le eventuali migliorie volte a ottimizzare la prestazione energetica dell'edificio o dell'abitazione, tramite un progetto di efficientamento energetico.

Il piano di efficientamento energetico è lo strumento che include gli interventi da effettuare per ottimizzare consumi e tagliare gli sprechi in bolletta.
Il costo dell'APE è variabile e dipende da diversi fattori, come dimensioni dell'immobile, tipo e numero di impianti installati. Il prezzo dell'Attestato non è fisso ed è, dunque, determinato dalle caratteristiche dell'unità immobiliare, in termini di metratura e di tipologia dell'edificio: certamente il costo dell'APE per un negozio o una villa sarà maggiore rispetto a quello di un normale appartamento.
La certificazione energetica è uno strumento introdotto dal Ministero dello Sviluppo Economico anche per monitorare lo stato di efficientamento energetico del Paese. Il decreto introduce infatti il vincolo per le regioni e le province di stabilire procedure di controllo, al fine di analizzare non meno del 2% annuo degli attestati di prestazione energetica del proprio territorio. L'Italia, infatti, come tutti gli Stati membri dell'Unione Europea, ha l'obiettivo di ridurre le emissioni dell'80-85% rispetto ai livelli di emissioni del 1990, sostenendo appunto la ristrutturazione e l'efficientamento energetico di edifici pubblici e privati.
In quest'ottica, tutti i nuovi edifici (inclusi quelli esistenti che devono subire una ristrutturazione importante) dovranno rispondere a criteri di efficientamento energetico ancora più severi: saranno gli edifici a energia quasi zero, ovvero immobili ad altissima prestazione energetica, con fabbisogno energetico molto basso o prossimo allo zero. Questo è possibile grazie a ristrutturazioni mirate e all'adozione sempre più diffusa di fonti rinnovabili.
L'Attestato di Prestazione Energetica è obbligatorio in caso di:

- Costruzione di nuovi immobili, ristrutturazioni importanti ed edifici a energia quasi zero
- Ristrutturazioni superiori al 25% e riqualificazione energetica
- Compravendita o locazione di immobili già esistenti

L'Attestato di Prestazione Energetica non è invece obbligatorio per gli edifici di culto, per i fabbricati industriali, agricoli e artigianali che non prevedono impianti termici o di climatizzazione, fabbricati isolati con superficie inferiore ai 50 mq.

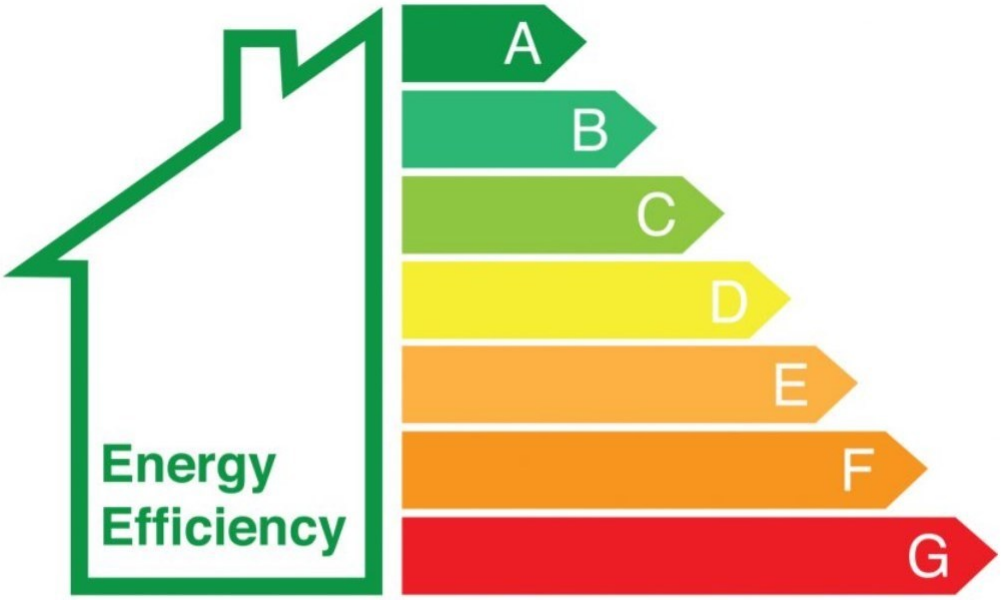


Figura 3 - Scala di classificazione della prestazione energetica degli immobili.

Ai fini della classificazione, la prestazione energetica dell'immobile è espressa attraverso l'indice di prestazione energetica globale non rinnovabile EPgl,nren , del decreto sui requisiti minimi di cui all'articolo 4, comma 1 del decreto legislativo 192/2005 (di seguito solo "decreto requisiti minimi"). Tale indice tiene conto del fabbisogno di energia primaria non rinnovabile per la climatizzazione invernale ed estiva (EPH,nren ed EPC,nren), per la produzione di acqua calda sanitaria (EPW,nren), per la ventilazione (EPV,nren) e, nel caso del settore non residenziale, per l'illuminazione artificiale (EPL,nren) e il trasporto di persone o cose (EPT,nren). Pertanto, esso si determina come somma dei singoli servizi energetici forniti nell'edificio che viene esaminato. L'indice è espresso in kWh/m2 anno in relazione alla superficie utile di riferimento come definita nel decreto legislativo. La determinazione dell'indice di prestazione energetica per l'illuminazione degli ambienti e dell'indice di prestazione energetica per il trasporto di persone o cose è obbligatoria per gli immobili appartenenti alle categorie E.1, limitatamente a collegi, conventi, case di pena e

caserme, E.2, E.3, E.4, E.5, E.6, e E.7, come definite all'articolo 3 del decreto del Presidente della Repubblica 26 agosto 1993, n.412, di seguito D.P.R. 412/93.
L'APE pone nella massima evidenza i servizi energetici presi in considerazione per la valutazione, riportando questa informazione negli appositi spazi e nelle note. Per le finalità si ritiene di fondamentale importanza che l'APE, oltre a fornire l'indice di prestazione energetica globale (EPgl), riporti anche informazioni sui contributi dei singoli servizi energetici che concorrono a determinarlo (EPH, EPW , EPV , EPC, EPL, EPT), in conformità con le definizioni e disposizioni del decreto legislativo. Tali indici sono, a loro volta, la sintesi di diversi parametri e caratteristiche dell'edificio e degli impianti.
In particolare:

- EPH, indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale, deriva dall'indice della capacità dell'involucro edilizio nel contenere il fabbisogno di energia per il riscaldamento (EPH,nd: indice di prestazione termica utile per la climatizzazione invernale dell'edificio) e dal rendimento dell'impianto di riscaldamento (H: rendimento medio stagionale dell'impianto di riscaldamento);
- EPC, indice di prestazione energetica per la climatizzazione estiva, deriva dall'indice della capacità dell'involucro edilizio nel contenere il fabbisogno di energia per il raffrescamento (EPC,nd: indice di prestazione termica utile per la climatizzazione estiva dell'edificio) e dal rendimento dell'impianto di raffrescamento (C: rendimento medio stagionale dell'impianto di raffrescamento).

È evidente che in entrambe le situazioni, climatizzazione invernale ed estiva, lo stesso indice di prestazione EP si può raggiungere con diverse combinazioni del fabbisogno EPnd e dell'efficienza dell'impianto. Per il cittadino, proprietario o conduttore dell'immobile, è importante disporre di queste informazioni al fine di conoscere come la qualità dell'involucro edilizio e degli impianti contribuiscono al raggiungimento del livello di prestazione globale al fine di poter mettere "a fuoco" le più significative carenze energetiche dell'immobile e orientare le priorità di intervento. Poiché nella grande maggioranza degli edifici esistenti, a

causa dei maggiori costi e difficoltà di intervento rispetto agli impianti tecnici, le criticità si presentano in riferimento all'involucro edilizio, l'APE di cui alle presenti linee guida dedica particolare attenzione alla prestazione energetica di tale elemento.

I servizi energetici presi in considerazione per il calcolo della prestazione energetica dell'immobile sono la climatizzazione invernale, la climatizzazione estiva, la produzione di acqua calda sanitaria, la ventilazione meccanica e, per le tipologie di edificio sopracitate, l'illuminazione e il trasporto di persone o cose.

Il calcolo della prestazione energetica si basa sui servizi effettivamente presenti nell'edificio in oggetto, fatti salvi gli impianti di climatizzazione invernale e, nel solo settore residenziale, di produzione di acqua calda sanitaria che si considerano sempre presenti.

Ai fini della determinazione della prestazione energetica si distingue tra "procedura" e "metodo" di calcolo.

Le procedure di determinazione della prestazione energetica contemplano le attività di reperimento e di scelta dei dati di ingresso, di applicazione del corretto metodo di calcolo, di espressione degli indici di prestazione energetica in termini di energia primaria, e di individuazione degli interventi di miglioramento dell'efficienza energetica. I metodi di calcolo sono gli algoritmi, stabiliti dalle norme tecniche di riferimento, utilizzati per calcolare gli indicatori numerici di prestazione energetica richiesti, a partire dagli opportuni dati di ingresso. La disponibilità di procedure e metodi di calcolo standardizzati per la determinazione della prestazione energetica degli immobili sul territorio nazionale favorisce:

- la massima omogeneità applicativa;
- una più efficace e corretta informazione dei cittadini, anche ai fini del raffronto dei risultati;
- una maggiore efficacia dell'azione di monitoraggio e controllo;
- una più ampia e libera circolazione dell'offerta professionale, minimizzando i costi per gli utenti.

Il decreto requisiti minimi, individua parametri, indici di prestazione energetica e rendimenti necessari a descrivere e verificare la qualità energetica dell'immobile. Tali indicatori sono calcolati nel rispetto delle disposizioni e dei metodi del suddetto decreto, e degli ulteriori metodi di calcolo previsti dal presente decreto. Ai fini della redazione dell'APE e dell'assegnazione della classe energetica, l'indice di prestazione energetica EPgl,nren, esprime, come già ricordato, la quantità annua di energia primaria non rinnovabile necessaria per soddisfare i vari bisogni connessi a un uso standard dell'edificio, divisa per la superficie utile dell'edificio ed espresso in kWh/m2 anno. Tale indice tiene conto del fabbisogno di energia per la climatizzazione invernale ed estiva, per la ventilazione, per la produzione di acqua calda sanitaria, per l'illuminazione e per il trasporto di persone o cose nonché dell'energia ausiliaria dei sistemi impiantistici, inclusi i sistemi di cogenerazione, teleriscaldamento e valorizzazione delle fonti rinnovabili. Oltre all'indice globale EPgl,nren, sono valutati gli indici di prestazione energetica parziali, relativi alle prestazioni energetiche dei singoli servizi presenti nell'edificio come definiti nel decreto requisiti minimi.

La procedura di calcolo di progetto o di calcolo standardizzato prevede la valutazione della prestazione energetica a partire dai dati di ingresso relativi:

- al clima e all'uso standard dell'edificio;
- alle caratteristiche dell'edificio e degli impianti, così come rilevabili dal progetto energetico, previa verifica di rispondenza del costruito al progetto.

La procedura di calcolo da rilievo sull'edificio prevede la valutazione della prestazione energetica a partire dai dati di ingresso rilevati direttamente sull'edificio esistente, sulla base dei quali si esegue la valutazione della prestazione energetica secondo l'opportuno metodo di calcolo. In questo caso le modalità di reperimento dei dati di ingresso relativi all'edificio possono essere:

- basate su procedure di rilievo, supportate anche da indagini strumentali, sull'edificio e/o sui dispositivi impiantistici effettuate secondo le

normative tecniche di riferimento vigenti, nazionali o internazionali, o, in mancanza di tali norme, dalla letteratura tecnico-scientifica;

- ricavate per analogia costruttiva con altri edifici e sistemi impiantistici coevi, integrate da banche dati o abachi nazionali, regionali o locali. Nell'ambito di tale procedura sono utilizzabili metodi di calcolo semplificati, nel rispetto dei limiti indicati nel decreto.

Ai fini della redazione dell'APE, sono rispettati i seguenti criteri per l'applicazione delle procedure di calcolo:

- in caso di edifici di nuova costruzione o di edifici esistenti sottoposti a ristrutturazioni importanti, si applica la procedura di calcolo di progetto o di calcolo standardizzato;
- per gli edifici esistenti non sottoposti a ristrutturazione importante, ferma restando la possibilità di avvalersi della procedura di calcolo di progetto o di calcolo standardizzato.

2.2 Politiche d'incentivazione

Per l'esecuzione degli interventi citati nel paragrafo 1 e per promuovere l'efficienza energetica, il Ministero dello Sviluppo Economico prevede il riconoscimento di alcuni incentivi, che possono andare sotto forma di detrazioni fiscali o altro.

In particolare, per quanto riguarda le detrazioni fiscali, la legge riconosce uno sconto che può arrivare fino al 75% sulle imposte dovute per gli interventi di riqualificazione energetica degli edifici.

Altro strumento con cui si incentiva l'efficienza energetica è il riconoscimento del Conto Termico, rivolto a pubbliche amministrazioni, imprese e privati, che permette di promuovere l'efficienza energetica privilegiando la produzione di fonti rinnovabili.

Infine, con il sistema dei Certificati Bianchi si individuano bonus per le società di produzione e distribuzione di energia elettrica e gas naturale che abbiano conseguito alcuni obiettivi di risparmio energetico.

Per gli interventi di riqualificazione energetica realizzati nelle singole unità immobiliari sono previste aliquote di detrazione differenziate in base all'intervento realizzato, al fine di legare maggiormente il beneficio economico al risparmio energetico conseguibile.

Per gli interventi di riqualificazione energetica realizzati nelle parti comuni degli edifici condominiali è invece confermato l'incremento dell'aliquota di detrazione al 70%, per interventi che interessino almeno il 25% dell'involucro edilizio e al 75% per interventi volti al miglioramento della prestazione energetica invernale ed estiva e che conseguano la "qualità media" dell'involucro, con tetto massimo di 40.000 euro per ciascuna unità immobiliare.

Per tutti gli interventi è prevista la possibilità di optare per la cessione del credito ai fornitori che hanno effettuato gli interventi ovvero ad altri soggetti privati. La cessione del credito ad istituti di credito e ad intermediari finanziari è limitata ai soggetti incapienti.

Tra le altre novità introdotte, negli interventi ammissibili è ora ricompresa l'installazione di micro-cogeneratori e inoltre è prevista l'istituzione, nell'ambito del Fondo nazionale per l'efficienza energetica, di una sezione dedicata alla promozione dell'eco prestito tramite il rilascio di garanzie su finanziamenti concessi da istituti di credito a cittadini per la riqualificazione energetica degli immobili.

Con la pubblicazione in Gazzetta ufficiale sono diventati pienamente operativi i decreti riguardanti il Superbonus e il Sismabonus al 110%, introdotti dal decreto Rilancio.

L'obiettivo è favorire gli interventi di efficientamento energetico, nonché l'installazione di impianti fotovoltaici o delle infrastrutture per la ricarica di veicoli elettrici negli edifici.

Il Superbonus è uno strumento attivato per rilanciare rapidamente il comparto dell'edilizia e rispondere alle importanti sfide climatiche ed ambientali previste per il settore civile dal Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima.

Il Superbonus che incentiva gli interventi di riqualificazione energetica e sismica di edifici residenziali prevede un'aliquota di detrazione del 110% per le spese sostenute entro il 30 giugno 2022, da dividere in 5 anni, nel limite massimo

di predefiniti valori di detrazione variabili in funzione della grandezza dell'edificio e della tipologia di intervento (vedi *Figura 6*).
Sono ammessi alla misura:

- gli edifici ad uso residenziale monofamiliari e condomini, nonché gli spogliatoi di società sportive;
- i soggetti quali persone fisiche, condomini, istituti autonomi case popolari o enti similari, cooperative di abitazione a proprietà indivisa, organizzazioni non lucrative di utilità sociale, associazioni e società sportive dilettantistiche;
- gli interventi ritenuti prioritari (trainanti) e secondari (trainati), quest'ultimi solo se realizzati congiuntamente con i primi. Gli interventi energetici trainanti sono quelli di isolamento termico di superfici opache oltre il 25% della superficie disperdente, con materiali sostenibili, e di sostituzione degli impianti di climatizzazione; quelli trainati sono invece relativi all'installazione di sistemi building automation, infissi, schermature solari, scaldacqua a pompa di calore, eliminazione delle barriere architettoniche, impianti fotovoltaici con sistemi di accumulo, infrastrutture per la ricarica di veicoli elettrici.

Sono, invece, esclusi dalla misura le unità immobiliari appartenenti alle categorie catastali A/1, A/8 e A/9 non aperte al pubblico.

Il Fondo Nazionale per l'efficienza energetica favorisce gli interventi necessari per il raggiungimento degli obiettivi nazionali di efficienza energetica, promuovendo il coinvolgimento di istituti finanziari, nazionali e comunitari, e investitori privati sulla base di un'adeguata condivisione dei rischi.
Il Fondo sostiene gli interventi di efficienza energetica realizzati dalle imprese, ivi comprese le ESCO, e dalla Pubblica Amministrazione, su immobili, impianti e processi produttivi.
Nello specifico gli interventi sostenuti devono riguardare:

- la riduzione dei consumi di energia nei processi industriali,

- la realizzazione e l'ampliamento di reti per il teleriscaldamento,
- l'efficientamento di servizi ed infrastrutture pubbliche, inclusa l'illuminazione pubblica
- la riqualificazione energetica degli edifici.

Gli interventi di efficientamento energetico permettono di portare in detrazione dalle imposte (Irpef o Ires) una parte consistente delle spese sostenute. La detrazione va ripartita in 10 rate annuali di pari importo e le spese ammesse in detrazione comprendono sia i costi per i lavori relativi all'intervento, sia i costi per le prestazioni professionali necessarie per realizzare l'intervento stesso e acquisire la certificazione energetica richiesta.
Fruiscono della detrazione del 65% l'installazione di pannelli solari per la produzione dell'acqua calda, la sostituzione di boiler tradizionali con sistemi a pompa di calore, la sostituzione di impianti di climatizzazione invernale con caldaie a condensazione di classe superiore alla A e i relativi impianti di regolazione, l'acquisto e installazione di micro cogeneratori e l'acquisto e l'installazione di dispositivi multimediali per il controllo da remoto degli impianti di riscaldamento e climatizzazione (vedi *Figura 4*).
Beneficiano, invece, della detrazione del 50% l'acquisto e l'installazione di caldaie a biomassa e di caldaie a condensazione di classe A e l'acquisto e la posa di finestre, infissi e schermature solari (vedi *Figura 5*).
Le detrazioni fiscali per efficientamento energetico sono un apprezzabile aiuto fiscale che agevola gli interventi di riqualificazione e le ristrutturazioni a fine energetico. Gli incentivi per l'efficienza energetica sfruttano tre strumenti:

- Detrazioni fiscali.

  Le detrazioni per interventi di ristrutturazione e di efficientamento energetico degli edifici possono arrivare fino al 75%. Per questo tipo di detrazioni fiscali si parla comunemente di "ecobonus". La legge di Bilancio del 27 dicembre 2017, n. 205, ha prorogato le detrazioni fiscali per gli interventi di riqualifica energetica degli immobili.

  Chi può beneficiare dell'ecobonus? Chi ha sostenuto spese entro il 31

dicembre 2018 nel caso di interventi su singole unità immobiliari e chi ha sostenuto spese entro il 31 dicembre 2012 nel caso di interventi sulle parti comuni degli edifici.

- Conto termico 2.0.

  Il Conto Termico 2.0 si rivolge a pubbliche amministrazioni, imprese e privati. Nasce per promuovere l'incremento della produzione di energia da fonti rinnovabili e, di conseguenza, l'incremento dell'efficienza energetica. Un esempio per risparmiare sul consumo energetico comunale è l'efficientamento energetico illuminazione pubblica, il cosiddetto relamping, che consente di ottimizzare il dispendio energetico di circa il 20-30%. Per beneficiare del Conto Termico 2.0, imprese e privati possono accedere a fondi per 900 milioni di euro per anno.

- Certificati bianchi.

  I certificati bianchi sono noti più propriamente come Titoli di Efficienza Energetica (TEE) e sono titoli che certificano il risparmio energetico. Dal momento che sono titoli negoziabili per cui è previsto un contributo economico, rappresentano un forte incentivo a ridurre i consumi energetici da parte dei distributori di energia elettrica e di gas naturale. Il risparmio è espresso in TEP, Tonnellate Equivalenti di Petrolio risparmiate. I certificati bianchi riguardano quattro tipi di interventi:

  - Risparmio di energia elettrica;
  - Risparmio di gas naturale;
  - Risparmio di altri combustibili per autotrazione;
  - Risparmio di altri combustibili non per autotrazione;

Definizione intervento	Definizione intervento	Riferimento normativo	Requisiti minimi	Detrazione massima ammissibile	Spesa massima ammissibile	Aliquota detrazione	Ripartizione annuale detrazioni
Riqualificazione Globale (Comma 344)	Riqualificazione Energetica Globale	Comma 344 art. 1 Legge 296/2006	Allegato A del D.M. 11/03/2008 come modificato dal D.M. 26/01/2010	100.000,00 €	-	65%	10
Interventi sull'involucro edilizio (Comma 345)	Coibentazione strutture opache verticali, e orizzonatali (coperture e pavimenti)	Comma 345 art. 1 Legge 296/2006	Allegato E Decreto Requisiti Tecnici	60.000,00 €	-	65%	10
	Sostituzione di Infissi e Porte di Ingresso anche in combinazione con Sistemi di Oscuramento	Comma 345 art. 1 Legge 296/2006		60.000,00 €	-	50%	10
	Installazione di Schermature Solari Mobili o di Sistemi di Oscuramento	Comma 2 lettera B articolo 14 Decreto Legge 63/2013		60.000,00 €	-	50%	10
	interventi sulle parti comuni che riguardano più del 25% della sup. disperdente	Comma 2 quater B articolo 14 Decreto Legge 63/2013		-	40.000,00 €	70%	10
	interventi sulle parti comuni che riguardano più del 25% della sup. disperdente che conseguono almeno le qualità medie delle tabelle 3 e 4 del Decreto Requisiti Minimi (26/06/2015 Linee guida per la certificazione energetica"	Comma 2 quater B articolo 14 Decreto Legge 63/2013		-	40.000,00 €	75%	10
	interventi dei due punti precedenti realizzati in zone sisimiche 1, 2 e 3 finalizzati alla riduzione del rischio sismico (passaggio a 1 classe inferiore)	Comma 2 quater B articolo 14 Decreto Legge 63/2013		-	136.000,00 €	80%	10
	interventi dei due punti precedenti realizzati in zone sisimiche 1, 2 e 3 finalizzati alla riduzione del rischio sismico (passaggio a 2 classi inferiori)	Comma 2 quater B articolo 14 Decreto Legge 63/2013		-	136.000,00 €	85%	10
Bonus facciate (C. 220 art. 1 Legge 160/2019)	interventi sulle strutture opache verticali delle facciate esterni influenti dal punto di vista energetico o che interessino l'intonaco per oltre il 10% della superficie disperdente lorda complessiva degli edifici esistenti ubicati nelle zona A o B ai sensi del D.M. n. 1444 02/04/1968	Comma 220 articolo 1 Legge 160/2019	Allegato E Decreto Requisiti Tecnici	-	-	90%	10
Collettori solari (Comma 346)	Installazione di collettori solari termici	Comma 346 art. 1 Legge 296/2006	Articolo 3 + Allegato H Decreto Requisiti Tecnici	30.000,00 €	-	65%	10

Figura 4 - Decreto efficienza energetica 2020

Definizione intervento	Definizione intervento	Riferimento normativo	Requisiti minimi	Detrazione massima ammissibile	Spesa massima ammissibile	Aliquota detrazione	Ripartizione annuale detrazioni
Impianti di climatizzazione invernale e produzione di acqua calda sanitaria (Comma 347)	Sostituzione integrale o parziale di impianti di climatizzazione invernale con impianti dotati di Caldaie a condensazione con efficienza energetica stagionale per il riscaldamento d'ambiente maggiore o uguale al 90% (Classe A o superiore)	Comma 347 art. 1 Legge 296/2006	Articolo 4 e 10 Decreto Requisiti Tecnici	30.000,00 €	-	50%	10
	intervento del punto superiore e contestuale installazione di sistemi di termoregolazione in classe V, VI e VIII della comunicazione della commissione 2014C 207/2	Comma 347 art. 1 Legge 296/2006	Articolo 4 e 10 Decreto Requisiti Tecnici	30.000,00 €	-	65%	10
	Sostituzione integrale o parziale di impianti di climatizzazione invernale con impianti dotati di generatori di aria calda a condensazione	Comma 347 art. 1 Legge 296/2006	Articolo 4 e 10 Decreto Requisiti Tecnici	30.000,00 €	-	65%	10
	Sostituzione integrale o parziale di impianti di climatizzazione invernale con impianti dotati di pompe di calore ad alta efficienza	Sostituzione di impianti termici con nuovi dotati di Pompe di Calore o di Scaldacqua in Pompa di Calore	Articolo 6 e 10 + Allegato F Decreto Requisiti Tecnici	30.000,00 €	-	65%	10
	Sostituzione integrale o parziale di impianti di climatizzazione invernale con impianti dotati di apparecchi ibridi	Comma 347 art. 1 Legge 296/2006	Articolo 6 e 10 Decreto Requisiti Tecnici	30.000,00 €	-	65%	10
	Sostituzione funzionale, integrale o parziale, con impianti dotati di micro-cogeneratori di potenza elettrica inferiore a 50 kWe	Comma 1 articolo 1 Decreto Legge 63/2013	Articolo 7 Decreto Requisiti Tecnici	100.000,00 €	-	65%	10
	Sostituzione di scaldacqua tradizionali con scaldacqua in pompa di calore dedicati alla produzione di acqua calda sanitaria	Comma 4 articolo 4 Decreto Legge 201/2011	Articolo 8 Decreto Requisiti Tecnici	30.000,00 €	-	65%	10
	Installazione di impianti di climatizzazione invernale dotati di generatori di calore alimantati da biomasse combustibili	Comma 2bis articolo 1 Decreto Legge 63/2013	Articolo 9 e 10 + Allegato G Decreto Requisiti Tecnici	30.000,00 €	-	50%	10
Building Automation (C.88, art. 1, Legge 208/2015)	Installazione di Sistemi di Building Automation	Comma 88 articolo 1 Legge 208/2015	Articolo 11 Decreto Requisiti Tecnici	15.000,00 €	-	65%	10

Figura 5 - Decreto efficienza energetica 2020

Definizione intervento	Definizione intervento	Riferimento normativo	Requisiti minimi	Detrazione massima ammissibile	Spesa massima ammissibile	Aliquota detrazione	Ripartizione annuale detrazioni
SuperBonus (articolo 119, Legge 77/2020)	interventi di isolamento delle superfici opache verticali ed orizzonatli che interessano l'involucro dell'edificio con incidenza superiore al 25% della superficie disperdente lorda dell'edificio. (condominio da 2 a 8 unità)	Comma 1 lettera A articolo 119 Legge 77/2020	Articolo 12 + Allegato E Decreto Requisiti Tecnici	-	40.000,00 €	110%	5
	interventi di isolamento delle sup..... (condominio da più di 9 unità)	Comma 1 lettera A articolo 119 Legge 77/2020	Articolo 12 + Allegato E Decreto Requisiti Tecnici	-	30.000,00 €	110%	5
	interventi di isolamento delle sup.....(unifamiliare)	Comma 1 lettera A articolo 119 Legge 77/2020	Articolo 12 + Allegato E Decreto Requisiti Tecnici	-	50.000,00 €	110%	5
	Installazione di collettori solari termici (condominio da 2 a 8 unità)	Comma 1 lettera B articolo 119 Legge 77/2020	Articolo 3 + Allegato H Decreto Requisiti Tecnici	-	20.000,00 €	110%	5
	Installazione di collettori solari termici (condominio da più di 9 unità)	Comma 1 lettera B articolo 119 Legge 77/2020	Articolo 3 + Allegato H Decreto Requisiti Tecnici	-	15.000,00 €	110%	5
	Installazione di collettori solari termici (unifamiliare)	Comma 1 lettera C articolo 119 Legge 77/2020	Articolo 3 + Allegato H Decreto Requisiti Tecnici	-	30.000,00 €	110%	5
	Sostituzione di scaldacqua tradizionali con scaldacqua in pompa di calore dedicati alla produzione di acqua calda sanitaria (condominio da 2 a 8 unità)	Comma 1 lettere B e C articolo 119 Legge 77/2020	Articolo 8 Decreto Requisiti Tecnici	-	20.000,00 €	110%	5
	Sostituzione di scaldacqua tradizionali con scaldacqua in pompa di calore dedicati alla produzione di acqua calda sanitaria (condominio da più di 9 unità)	Comma 1 lettere B e C articolo 119 Legge 77/2020	Articolo 8 Decreto Requisiti Tecnici	-	15.000,00 €	110%	5
	Sostituzione di impianti di climatizzazione invernall con caldaie a biomassa con valori di classe 5 stelle della certificazione Ambientale (unifamiliare)	Comma 1 lettera C articolo 119 Legge 77/2020	Articolo 9 e 10 + Allegato G Decreto Requisiti Tecnici	-	30.000,00 €	110%	5
	Allaccio a sistemi di teleriscaldamento efficiente (condominio da 2 a 8 unità)	Comma 1 lett. B art. 119 Legge 77/2020	Comma 1 lett. B art. 119 Legge 77/2020	-	20.000,00 €	110%	5
	Allaccio a sistemi di teleriscaldamento efficiente (condominio da più di 9 unità)	Comma 1 lett. B art. 119 Legge 77/2020	Comma 1 lett. B art. 119 Legge 77/2020	-	15.000,00 €	110%	5
	Allaccio a sistemi di teleriscaldamento efficiente (unifamiliare)	Comma 1 lett. B art. 119 Legge 77/2020	Comma 1 lett. B art. 119 Legge 77/2020	-	30.000,00 €	110%	5

Figura 6 - Decreto efficienza energetica 2020

3. Stima della prestazione energetica

Nel documento costitutivo dell'Annex 53 si afferma:
"Uno degli ostacoli più importanti che si frappone all'ottenimento dell'obiettivo dell'efficienza energetica dell'edificio è la carenza di conoscenze dei fattori che determinano l'uso dell'energia. Questo rappresenta spesso un significativo sfasamento tra il progetto e l'utilizzo reale dell'energia negli edifici. I motivi di questo sfasamento sono di difficile comprensione e spesso hanno più a che fare con il comportamento umano che con il progetto dell'edificio".
Sono stati individuati sei gruppi di fattori che influenzano l'edificio dal punto di vista energetico:

- il clima;
- le caratteristiche dell'edificio;
- le caratteristiche dei sistemi impiantistici (impianti interni e sistemi energetici);
- il livello di qualità dell'ambiente interno richiesto;
- il comportamento dell'occupante;
- le modalità di conduzione e manutenzione dei sistemi impiantistici.

I fattori contenuti nelle caratteristiche dell'edificio e nelle caratteristiche dei sistemi impiantistici (impianti interni e sistemi energetici) sono ben noti:

- la trasmittanza termica dell'involucro edilizio, opaco e trasparente e il suo grado di protezione solare;
- il tasso di ricambio d'aria e le modalità di ventilazione;
- l'efficienza energetica dei sistemi impiantistici per riscaldamento, raffrescamento e acqua calda sanitaria;
- l'efficienza luminosa degli apparecchi illuminanti;
- l'impiego di elettrodomestici.

Su di essi si sono finora concentrate tutte le politiche intese a ridurre i consumi energetici, essendo elementi oggetto di processi di diagnosi, certificazione e riqualificazione energetica.

Peraltro, la loro influenza è facilmente valutabile utilizzando un approccio deterministico che fa uso dei modelli fisico matematici che descrivono il comportamento energetico di un sistema edificio-impianti in condizioni standard.

Assai meno nota e certamente da investigare nei suoi effetti è invece l'influenza sui consumi energetici dei fattori contenuti negli ultimi tre gruppi, riguardanti il livello di comfort atteso, il comportamento degli occupanti e le modalità di esercizio e manutenzione degli impianti determinate dai gestori (*facility manager*), fattori che, a loro volta, sono legati al contesto socioeconomico in cui si opera e allo stile di vita delle persone. Fra questi si evidenziano, per il settore residenziale:

- i valori di temperatura dell'aria e i livelli di illuminamento impostati nelle varie ore del giorno e della notte, in presenza e in assenza degli occupanti;
- l'uso di schermature solari e di tende interne;
- il numero e la durata di apertura delle finestre;
- l'impiego di acqua calda;
- il profilo di utilizzo degli elettrodomestici, delle apparecchiature di cottura e dei sistemi audiovisivi;
- le modalità e la frequenza di manutenzione degli impianti.

Riguardo il comportamento degli occupanti, ad ogni azione di controllo di comportamento possono corrispondere più reazioni che influiscono sull'ambiente.

Inoltre, bisogna considerare la soggettività delle risposte umane agli stessi input; tale concetto è relazionato al concetto di comfort e agli aspetti soggettivi legati ad esso, per cui risulta difficile prevedere la risposta umana al medesimo input, in quanto diversa da un soggetto all'altro, nonostante vi siano le stesse condizioni a contorno.

A causa di ciò la modellazione realistica del comportamento non può che essere basata su un modello probabilistico anziché solo deterministico. Inoltre, bisogna analizzare l'aumento degli standard di comfort richiesto da parte degli occupanti; ad esempio, nel caso della temperatura interna standard nel periodo invernale in ambienti residenziali, si è assistito ad una crescita di 2 °C negli anni, passando da 18 °C in passato ai 20 °C attuali e si riscontrano differenze sulla temperatura di set-point fra diversi utenti in relazione a molteplici fattori.

Lo studio delle relazioni fra consumi energetici e comportamenti umani/stili di vita è indubbiamente un tema complesso. La complessità è di tipo sia metodologico che strumentale, dovendosi da un lato sviluppare e rendere operativi tutti gli strumenti necessari per la raccolta, l'elaborazione e l'analisi delle informazioni, dall'altro mettere a punto un approccio fondato su basi teoriche.

Per meglio comprendere i benefici degli interventi di riqualificazione energetica degli edifici esistenti occorre dunque definire il comportamento degli occupanti ed imparare a descriverlo quantitativamente attraverso modelli matematici, individuare nuove procedure di stima dei consumi energetici inserendo in esse il più probabile comportamento degli occupanti, mettere a punto tecniche e strumentazioni per il monitoraggio energetico, utilizzare i risultati dei monitoraggi per creare *benchmark* dei consumi energetici, ed infine elaborare metodi predittivi del consumo energetico per valutare correttamente i benefici ottenibili con interventi di varia natura.

I programmi di simulazione energetica degli edifici sono diventati sempre più precisi; tuttavia, in letteratura si dimostra che manca una considerazione del comportamento degli utenti. Le differenze di comportamento fra utenti e la variazione del comportamento nel tempo ha una notevole importanza nelle differenze fra prestazioni stimate e reali degli edifici e nel calcolo di energia primaria per riscaldamento, raffrescamento, acqua calda sanitaria, ventilazione etc.. Risulta grande la difficoltà di simulare il comportamento dell'utente in quanto vi è una forte eterogeneità dovuta a diversi fattori relazionati agli utenti e alle condizioni a contorno.

3.1 Contratti a prestazione

Gli edifici soggetti a contratti di prestazione energetica (Energy Performance Contracts, EPC) sono di solito edifici pubblici piuttosto complessi, a volte relativamente vecchi e di solito poco documentati dal punto di vista tecnico. La raccolta di informazioni tecniche complete e affidabili è un processo dispendioso in termini di tempo e costoso che deve essere effettuato entro il termine di presentazione. In queste condizioni, l'approccio standard alla previsione del rendimento energetico che utilizza una simulazione dettagliata è praticamente irrealizzabile. Questa tesi propone un approccio di modellazione dell'ordine ridotto che è adattato alla fase di tendering dell'EPC.

La metodologia proposta estende un modello di costruzione del terzo ordine, introducendo esplicite, anche se ancora astratte, rappresentazioni del sistema di riscaldamento/raffreddamento, dell'influenza atmosferica e dei guadagni degli utenti finali. L'insieme dei parametri estesi riflette in larga misura le informazioni che sono facilmente disponibili nella pratica del rilevamento in loco o che possono essere facilmente calcolate da tali informazioni. Come conseguenza della fisica semplificata, viene proposta una procedura di taratura pratica, basata sulla conoscenza, che fornisce un modo efficace di ridurre l'incertezza. La procedura di taratura analizza l'incertezza presente nelle conoscenze disponibili e utilizza i vincoli imposti dalla fisica implementata sulla dinamica dei parametri per valutare la loro stima del valore

I contratti di prestazione energetica (Energy Performance Contracts, EPC) sono obblighi contrattuali tra un beneficiario e un fornitore di servizi energetici (di norma una società di servizi energetici - ESCO) in cui sono stabiliti bilanci in relazione a un livello di prestazione energetica riconosciuto contrattualmente.

Le caratteristiche principali degli EPC possono essere riassunte in alcuni punti:

- Il fornitore di servizi EPC fornisce tutti i servizi necessari per progettare e realizzare un progetto di risparmio energetico completo presso la struttura del cliente;
- gli investimenti per l'efficienza energetica sono rimborsati direttamente dai risparmi energetici e dalle relative conoscenze finanziarie;

- il fornitore di EPC si assume i rischi di realizzazione contrattualmente concordati del progetto;
- il fornitore di EPC L'obiettivo è quello di raggiungere il livello di risparmio concordato contrattualmente e di compensare le carenze di risparmio.

Secondo il U.S. Department of Energy, l'adozione del format EPC offre diversi vantaggi, quali miglioramenti garantiti, risparmi sui costi e migliori prestazioni. Tuttavia, una serie di ostacoli impedisce ancora la piena applicazione della CPE. Il progetto Transparense EPC, un'indagine a livello di UE, riferisce che le ESCO e i beneficiari soffrono delle complessità introdotte dal quadro EPC. Le politiche energetiche dei singoli governi europei sono per lo più considerate inefficaci data la complessità del concetto di EPC, la mancanza di fiducia nel settore del l'EPC, la scarsa domanda di clienti e gli incentivi frazionati tra locatore e inquilino. La crisi finanziaria ha avuto ulteriori conseguenze negative sul l'attuazione della CPE, in quanto è diventato più difficile ottenere prestiti a causa dei requisiti sempre più rigorosi delle società finanziarie.

In questo scenario, ottenere finanziamenti per finanziare un progetto EPC è, non a caso, un grosso ostacolo per i fornitori di EPC e/o i clienti EPC in tutta l'Unione europea. Infatti, una questione di gestione finanziaria fondamentale caratterizza il concetto di EPC. L'equilibrio complessivo degli EPC dipende fortemente dal conseguimento delle prestazioni energetiche previste in condizioni operative reali, in quanto gli investimenti per l'efficienza energetica sono rimborsati direttamente dal risparmio energetico. Pertanto, è fondamentale raggiungere i livelli di efficienza energetica stabiliti nella fase di progettazione. Di conseguenza, negli EPC più che in qualsiasi altra forma contrattuale, la solidità dell'assetto finanziario è basata in modo critico sull'affidabilità delle previsioni di efficienza energetica.

Dal punto di vista tecnico, questo approccio apre una sfida senza precedenti per l'audit energetico e la simulazione delle prestazioni. Attualmente, i servizi tecnici della ESCO attuano audit energetici degli edifici secondo procedure ben consolidate. L'American Society of Heating, Refrigerating & Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) raccomanda audit di livello II e di livello III per modifiche

ad alta intensità di capitale, ed è comune nel caso della CPE. Sia il livello II che il livello III sono altamente informativi. Gli audit di Livello II comprendono un'analisi approfondita dei costi energetici, del consumo energetico e delle caratteristiche di costruzione, nonché un'indagine approfondita sul l'uso dell'energia nel l'edificio, mentre gli audit di Livello III comprendono anche il monitoraggio, la raccolta di dati e l'analisi ingegneristica. Di conseguenza, la loro attuazione nella fase del bando di gara CPE richiede una conoscenza tecnica dettagliata del l'edificio oggetto dell'appalto, che di norma non è disponibile.

Nella maggior parte dei casi, l'incertezza caratterizza le informazioni tecniche disponibili nella fase di bando di gara dell'EPC. Gli edifici soggetti a EPC sono di solito edifici pubblici piuttosto complessi (ospedali, scuole, ecc.) e talvolta relativamente vecchi. Molto spesso ci sono notevoli lacune nelle informazioni tecniche a causa dei numerosi servizi, riparazioni, eventi di modifica e l'invecchiamento naturale dell'edificio nel tempo. La raccolta di informazioni tecniche complete e affidabili in tali condizioni è pertanto un processo lungo e costoso. Inoltre, il tempo normalmente disponibile dal bando di gara fino al termine di presentazione è relativamente breve, pertanto le indagini in loco sono necessariamente limitate. In sintesi, la maggior parte delle informazioni tecniche necessarie alla ESCO per un'accurata progettazione della gara è influenzata dall'incertezza, se non del tutto mancante. In molti casi pratici, gli unici dati sul consumo di energia disponibili per stabilire la base di riferimento per l'edificio sono la bolletta energetica e, in molti casi, non è correlata solo all'edificio sotto contratto ma anche ad altri edifici. In questo scenario l'approccio standard alla simulazione delle prestazioni energetiche, basato sulla disponibilità di una grande quantità di informazioni, è praticamente irrealizzabile.

È necessaria una procedura di modellazione appositamente studiata per gestire l'incertezza che influisce sul quadro EPC. Sono stati sviluppati diversi approcci di modellazione per adattarsi a contesti con obiettivi e disponibilità di dati variabili. Tre categorie generali di modelli di previsione dell'energia degli edifici sono state riportate in letteratura, che comprendono approcci di modellazione white-box (basati sulla fisica), black-box (basati sui dati) e grey-box (basati sulla fisica e basati sui dati). I model black-box utilizzano dati monitorati per introdurre

i parametri del modello. Poiché è necessario un insieme relativamente ampio di dati per ottenere l'affidabilità necessaria nella previsione, l'approccio di back-box non è adatto al contesto EPC scarsamente informativo. Modelli white-box prevengono il comportamento energetico degli edifici attraverso l'attuazione di una serie di leggi fisiche ben definite. Le procedure di taratura manuali o computerizzate sono utilizzate per confrontare le previsioni con i dati misurati. Il set di dati monitorati può essere limitato quanto i dati mensili sul consumo di energia. Tuttavia, in molti casi pratici, il modello di costruzione è composto da centinaia o migliaia di parametri, rendendo la simulazione computazionalmente intensiva e la calibrazione molto complessa. Sono stati sviluppati approcci flessibili ed efficienti per la modellazione di white box a basso ordine, principalmente per la simulazione efficiente su scala urbana e distrettuale, e per la predizione in un'unica fase nei sistemi di controllo predittivo dell'energia.

- **Grey box**

La modellazione è un approccio misto law-data driven, che implementa la fisica degli edifici di basso ordine e utilizza metodi statistici per l'identificazione dei modelli. Nonostante la loro struttura a ordini ridotti, i modelli grey-box forniscono previsioni relativamente accurate delle prestazioni energetiche, una volta con dati monitorati. Tuttavia, nonostante il fatto che i modelli a scatola grigia non siano applicabili nel contesto dell'EPC a causa dei set di dati monitorati richiesti, i modelli a ordine ridotto rimangono abbastanza espressivi per catturare i comportamenti energetici di base degli edifici reali e per prevedere il consumo energetico. In sintesi, modelli a ordine ridotto e basati sulla legge, rappresentano una buona base per l'implementazione di un framework di modellazione per l'EPC. Hanno un alto grado di generalità, la stessa struttura del modello può essere applicata a un gran numero di tipologie di edifici. Essi richiedono una serie limitata di informazioni e possono, in linea di principio, fornire previsioni abbastanza precise del consumo di energia. Tuttavia, due questioni essenziali sono ancora aperte. In primo luogo, la struttura dei modelli di ordine ridotto sviluppati finora non rappresenta esplicitamente le informazioni disponibili nelle fasi di rilevamento tipiche. Alcuni adattamenti alla struttura del modello devono essere attuati per esplicitare la dinamica dei guadagni termici, ad es. il controllo

dei sistemi di riscaldamento/raffreddamento e una serie di orari che coinvolgono gli utenti e le operazioni. In secondo luogo, e più importante, la fase di taratura dovrebbe essere organizzata in modo che l'incertezza possa essere esplicitamente gestita e il raggiungimento di prove sufficienti e attendibili a sostegno del decisore.

L'analisi dell'incertezza è stata ampiamente studiata nel campo della modellizzazione, di solito in combinazione con l'analisi di sensibilità.

L'analisi delle incertezze riguarda la mancanza di conoscenza del l'ambiente e del sistema. L'incertezza deriva da errori e approssimazioni nella misurazione dei dati, nei valori dei parametri e nella struttura del modello.

L'incertezza sulla struttura del modello può essere ridotta attraverso l'identificazione del modello e attraverso la taratura di quest'ultimo. La taratura di dettagliati modelli di rendimento energetico degli edifici, che coinvolgono migliaia di parametri di input, è un problema altamente sotto-determinato, che produce molteplici soluzioni non uniche propongono una metodologia per la calibrazione di modelli dettagliati di simulazione degli edifici rispetto ai dati di fatturazione. La loro analisi evidenzia un grave problema di sovra-adattamento nella calibrazione di modelli dettagliati basati solo sui dati del consumo energetico mensile, poiché, come affermano. Una calibrazione globale soddisfacente dei dati di fatturazione non garantisce un'identificazione accurata dei singoli parametri nel modello di simulazione. Di conseguenza, propongono una metodologia per ridurre i parametri di modellazione ad un set gestibile, basato sulla conoscenza tecnica del dominio, e di utilizzare la calibrazione numerica per regolare l'insieme ridotto. Bacher e Madsen propongono una metodologia iterativa per l'identificazione di strutture modello di ordine ridotto in grado di catturare la dinamica termica degli edifici, adattando un set di dati monitorati utilizzando metodi numerico-statistici applicati a modelli di ordine diverso. La riduzione dell'incertezza dei parametri attraverso un approccio algoritmico cieco può portare a valori lontani dall'insieme reale. Nei problemi sotto determinati gli effetti positivi e negativi di alcuni parametri possono annullarsi a vicenda, determinando una deviazione significativa dall'insieme reale, nonostante la convezione finale dell'algoritmo di taratura. L'ancoraggio dei

valori dei parametri alla conoscenza del dominio è generalmente riconosciuto come una buona strategia per superare il problema della cancellazione.

In questa tesi, viene adottato un modello di ordine ridotto per rappresentare il comportamento termico dell'edificio, compreso il sistema di raffrescamento/riscaldamento e l'influenza atmosferica. (vedi *Figura 7*)

Sebbene il modello sia ancora astratto, l'insieme dei parametri è stato esteso per riflettere le informazioni che possono essere facilmente raccolte durante la fase di appalto del l'EPC attraverso la raccolta di dati e l'indagine in loco. Il modello a ordine ridotto, tenendo conto delle principali dipendenze fisiche tra le variabili, aiuta a ridurre i gradi di libertà per la fase di taratura.

In questa tesi viene anche analizzata una procedura di taratura pratica basata sulla conoscenza, che fornisce un modo efficace di ridurre l'incertezza. La procedura affronta l'incertezza che incide sulle conoscenze disponibili, sfruttando i vincoli fisici per valutare la stima dei parametri non noti.

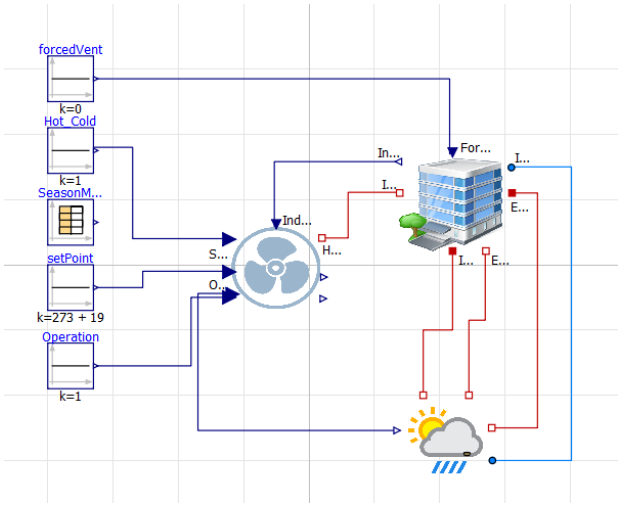


Figura 7 - The Modelica implementation of the whole grey-box model.

4. Il modello energetico di ordine ridotto

In questo capitolo viene discussa la struttura del modello a ordine ridotto. Inizialmente viene introdotto il linguaggio Modelica, successivamente si passa alla struttura concettuale del modello, discutendone i dettagli di implementazione ed infine viene introdotta la logica del processo di taratura.

Software per la modellazione equation based

Il software fece il suo ingresso nel mondo della modellazione nel 1978, quando Hilding Elmqvist, nella tesi di dottorato, sviluppò un nuovo approccio alla modellazione dei sistemi fisici attraverso la progettazione e l'implementazione del linguaggio di modellazione Modelica. L'idea di base era permettere allo sviluppatore di vedere il modello da un punto di vista fisico e non matematico, confrontandosi con un linguaggio di programmazione che utilizza equazioni generali, oggetti e connessioni. Inoltre, il punto di forza di Modelica si ricercava nel suo utilizzo multidisciplinare; questo, infatti, può essere utilizzato nella risoluzione di una moltitudine di problemi espressi in termini di equazioni differenziali algebriche (DAEs), descrivendo il comportamento di variabili continue. Oltre alla manipolazione delle variabili continue, Modelica, include caratteristiche per descrivere il campo delle variabili discrete, permettendo di descrivere all'interno dello stesso modello due forme di comportamento (costante e discreta).

Le principali proprietà sul quale si basa Modelica sono:

- Equazioni in alternativa alle istruzioni di assegnazione in modo da avere una modellazione casuale, la quale consente un miglior riuso delle classi in quanto le equazioni non specificano una determinata direzione del flusso di dati. Per tali ragioni una classe Modelica può essere adeguata a più di un contesto;
- Capacità di modellazione multi-dominio, ovvero le componenti del modello corrispondono a oggetti fisici provenienti da campi diversi, i quali possono essere qualificati e connessi;

- Essere un linguaggio object-oriented, quindi diviene utile per la progettazione e gestione di edifici energeticamente efficienti, poiché è importante valutare adeguatamente le prestazioni del sistema dinamico in un ampio intervallo di scale temporali e condizioni operative

4.1. La struttura concettuale

La struttura concettuale del modello di ordine ridotto è un'estensione del modello di terzo ordine proposto da Bacher e Madsen. Un modello di terzo ordine è stato scelto con l'unica aggiunta del flusso di calore rispetto al terreno, implementato come la serie di una temperatura costante T_{ground} più la resistenza R_g.
I parametri presenti all'interno di questo modello sono:

- R_{ie} è la resistenza media dell'involucro opaco esterno;
- R_{ea} è la resistenza di accoppiamento aria-involucro esterno;
- R_{ia} è l'infiltrazione d'aria e la resistenza di ventilazione forzata;
- R_m è la resistenza media dei tramezzi interni;
- C_m è la capacità termica media dei tramezzi interni;
- C_e è la capacità termica dell'involucro opaco;
- C_i è la capacità termica dell'aria interna;
- Lea è la resistenza alle infiltrazioni d'aria.

Gli stessi parametri sono elencati nella *Figura 8*, all'interno della quale è possibile individuare la differenza tra parametri di progetto e parametri calcolati in seguito alla fase conoscitiva dell'edificio in oggetto.

Il sistema è modellato come un guadagno di calore variabile Φ_h accoppiato con l'ambiente da resistenza termica R_{ih} e capacità C_{ih} . I guadagni interni Φ_u , la radianza solare attraverso le finestre Φ_{ws} e sulle superfici opache Φ_{os} sono modellati come guadagni variabili addizionali. Sono stati aggiunti due dati riguardanti il funzionamento del sistema e l'occupazione, nonché il set di dati meteorologici, per fornire la linea temporale dei guadagni esterni e interni. Infine,

sono stati introdotti due segnali di controllo a retroazione per implementare il controllo termostatico del sistema di riscaldamento/raffreddamento sulla temperatura in-door T_{in} e sul sistema di riscaldamento medio temporizzato T_f. Inoltre, a seconda della configurazione specifica del controllo, il controllo termostatico della temperatura interna può essere modificato con un controllo climatico basato sulla temperatura esterna T_{out}.

Name	Description	Source	Reliability
Building			
V_{ol}	Building volume	Project data or survey	High
A_{pq}	Opaque envelope area divided as per orientation (e,w,n,s)	Project data or survey	High
A_{win}	Window area divided as per orientation (e,w,n,s)	Project data or survey	High
G_v	Solar shading coefficient	Project data, survey	Medium
R_{ea}	Outdoor air - envelope coupling resistance	Regulation	High
R_{ie}	Averaged resistance of the opaque envelope	Project data, survey	High
C_e	Heat capacity of the opaque envelope	Project data, survey	High
R_m	Thermal resistance between the walls and furniture and the interior air	Regulation	High
C_m	Heat capacity of the interior walls and furniture	Project data, survey	High
R_g	Resistance between the interior and the ground	Project data, survey	Medium
T_g	Surrounding ground temperature	Literature, survey	Medium
V_{air}	Internal air volume	Project data, survey	High
L_{ea}	Air infiltration resistance	Regulation[29]	Low
V_{rt}	Mass flow rate through forced ventilation	Project data	High
System			
R_{ih}	Thermal resistance between the HVAC system and the interior	Technical data-sheets	Low
C_{ih}	Heat capacity for the HVAC system	Technical data-sheets	Medium
E_{ff}	Efficiency of the HVAC system	Technical data-sheet	Medium
P_{ow}	Installed heating/cooling power	Technical data-sheet	High
H_{ys}	Hysteresis range of the thermostat	Technical data-sheet	High
Operation			
O_{cc}	Average monthly occupancy level	Monitored or interviews	Low
O_{per}	System operation schedule	Monitored or interviews	Medium
S_{etp}	Indoor temperature set-points	Monitored or interviews	Medium
Environment			
W_{ea}	Weather data file	Web	High
G_p	Heat gain per person	Regulation	High
G_{eq}	Heat gain due to fixed equipment and systems	Survey	Medium

Figura 8 -The reduced – order mdel parameter set .

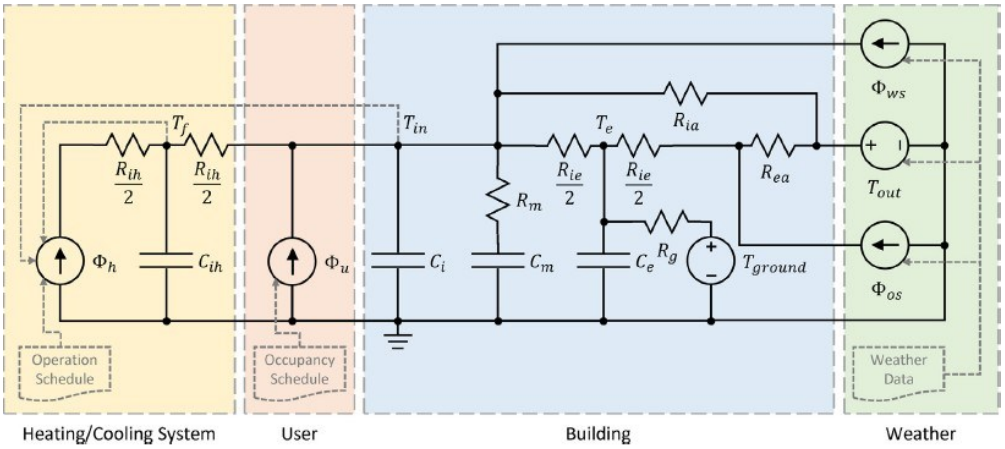


Fig. 1. The conceptual schema of the grey-box model.

Figura 9 – The conceptual schema of the grey-box model

4.1.1 L'attuazione di Modelica

La struttura concettuale del modello di ordine ridotto è stata implementata nel linguaggio Modelica utilizzando il linguaggio Buildings library. Come nello schema concettuale, il modello Modelica è organizzato in quattro componenti principali: l'edificio, il sistema di riscaldamento/raffreddamento, l'occupazione e il tempo (vedi *Figura 7*); vedremo in seguito poi nel *Paragrafo 4.2* come il modello verrà implementato tramite l'inserimento dei pannelli fotovoltaici.

- La componente edificio

La componente edificio implementa il blocco Modello edificio dello schema concettuale. I suoi parametri sono riportati nella *Figura 8*. Le resistenze e le capacità di inviluppo e parete interna (R_{ie}, Ce, R_m, C_m) sono implementate come componenti termici a trasferimento di calore dalla Heat Transfer Modelica Standard Library. Come nel modello concettuale, uno schema resistenza-capacità-resistenza (R_{ie}, C_e, R_{ie}) è usato per rappresentare l'involucro opaco dell'edificio. Una serie di capacità di resistenza (R_m, C_m) viene utilizzata per rappresentare le partizioni e le lastre interne dell'edificio. Il volume del l'edificio Vol e il volume dell'aria Vair all'interno che regola i flussi di calore forniti dalle infiltrazioni d'aria e dalla ventilazione forzata, è stata attuata utilizzando la fisica del trasferimento di massa attraverso la portata d'aria Lea e la velocità di ventilazione dell'aria forzata Vrt. Il componente di ventilazione forzata è una sorgente di portata massica standard Modelica, che fornisce la portata massica target alla temperatura esterna. Sono previste tre porte di calore per l'immissione di guadagni termici da fonti esterne: occupanti, radianza solare alle pareti interne attraverso finestre (Φ_{ws} in *Figura 9*) moltiplicato per Awin, Gv , e radianza solare per l'involucro esterno opaco (Φos in *Figura 9*) moltiplicato per Apq , Gv .

- Il componente del sistema di riscaldamento/raffreddamento

Il componente dei sistemi di riscaldamento/raffrescamento è stato implementato come un guadagno di calore termostaticamente regolato con circuiti di controllo interno sulla temperatura del fluido che possono funzionare sia in modalità di riscaldamento/raffreddamento che forniscono guadagni positivi/negativi. La sorgente termica (Φh in *Figura 9*) è modellata dalla potenza di

riscaldamento/raffreddamento installata Pow e dal l'efficienza Eff, come nel modello concettuale. Si accoppia con l'ambiente interno attraverso la resistenza Rih e la capacità Cih che approssima resistenze di accoppiamento diffusore di calore e la capacità del fluido di riscaldamento/ raffreddamento. Due circuiti di retroazione proporzionale/integrativo (PI) sono stati utilizzati per rispecchiare il normale controllo del riscaldatore/refrigeratore. I veri sistemi di riscaldamento/raffreddamento operano tra due soglie di temperatura del fluido: di solito il riscaldatore viene spento quando la temperatura del fluido raggiunge la soglia per evitare il surriscaldamento e il refrigeratore viene spento quando il fluido raggiunge la temperatura più bassa. L'intervallo di isteresi (parametro Hys) è riferito al set-point Setp . L'attuazione di questo comportamento non lineare, che limita il trasferimento di potenza dal riscaldatore al l'ambiente, fornisce una dinamica più realistica della temperatura del fluido e, di conseguenza, della temperatura del l'aria interna.

Infine, il programma di funzionamento del sistema O regola l'interruttore on/off del sistema.

- Il meteo

La componente meteo calcola i guadagni solari attraverso le finestre, per l'involucro opaco e la temperatura esterna da file di dati meteo standard. Il file di dati meteorologici W ea viene inviato tramite il componente Reader_tmy3 della libreria Buildings. Pressione e temperatura esterna sono rese disponibili attraverso le relative porte di calore e fluido Modelica. Sia l'irradiazione diretta su una superficie inclinata che la radiazione infrarossa diffusa emisferica sono calcolate utilizzando un modello anisotropico del cielo. Due componenti sono stati costruiti sulla base della classe Mixedair della Biblioteca Edifici per i guadagni finestre e opaco inviluppo calcoli. L'eventuale riduzione della trasmittanza totale di energia solare causata dalla ombreggiatura esterna viene quindi presa in considerazione con il parametro Gvalue Gv calcolato secondo la norma UNI EN.

4.1.2 Il processo di taratura

Il processo di taratura è infatti la fase più critica della procedura di modellazione nel contesto EPC. Un processo di taratura sostenibile rende la modellazione accessibile e conforme ai limiti di tempo e costi dell'EPC.

Tuttavia, un insieme di dati monitorati non è spesso disponibile per la maggior parte delle situazioni in cui gli EPC sono effettivamente proposti e la riduzione al minimo delle discrepanze, spesso significative, si verifica probabilmente tra le previsioni dei modelli non calibrati e l'effettivo consumo di energia per l'edilizia misurato, solleva la questione della definizione di una procedura di taratura modello per il contesto operativo dell'EPC. Ridurre i parametri del modello al limitato insieme tipicamente disponibile nelle condizioni operative dell'EPC, e fornire una procedura di calibrazione basata sulla conoscenza, è la strategia proposta in questa ricerca per rendere la modellazione sostenibile nel contesto dell'EPC.

Il modello di ordine ridotto, descritto precedentemente nel *paragrafo 4.1.2*, è descritto da 25 parametri (vedi F*igura 8*), disposti in quattro classi. Tra questi, 14 parametri possono essere stimati in modo abbastanza affidabile, 8 sono solitamente influenzati da un certo grado di incertezza e 3 non sono così facilmente disponibili o informati. Il processo di taratura è adattato alla struttura del modello a ordine ridotto e mira a ridurre l'incertezza che influisce sui parametri. L'uso di modelli a ordine ridotto, che mantengono la stessa struttura per un gran numero di tipologie costruttive e la relativa semplicità della fisica implementata, consente la definizione di una procedura di taratura generale. La base di taratura è stabilita utilizzando i dati mensili sul consumo energetico di un anno.

I dati sul consumo energetico del secondo anno sono necessari per verificare l'accuratezza della previsione. Le stime parziali dei valori dei parametri sono formulate sulla base delle conoscenze disponibili, sia delle conoscenze tecniche generali sia delle informazioni specifiche raccolte attraverso dati monitorati, indagini o interviste. Successivamente i parametri vengono regolati in modo

iterativo finché il consumo mensile simulato non si adatta alla linea di base. Il processo di taratura è organizzato in quattro fasi, secondo le quattro classi di parametri indicate in *figura 8*. Poiché la fisica applicata nel modello a ordine ridotto è relativamente semplice, è possibile elaborare una serie di linee guida pratiche di taratura che forniscono informazioni sulla coerenza dei risultati di taratura, riducendo in modo sostanziale il rischio di sovra-adattamento. Il processo di taratura è quindi organizzato in quattro fasi.

1. Analisi dei dati - La prima fase riguarda l'acquisizione e l'analisi dei dati. Le informazioni tecniche disponibili sono raccolte attraverso indagini e interviste, i parametri sono identificati, calcolati e classificati assegnando a ciascuno un fattore di certezza basato sulla qualità delle informazioni disponibili. Sono fissati i parametri che possono essere determinati sulla base di informazioni affidabili. I parametri rimanenti sono classificati in base al loro grado di incertezza. Inoltre, la linea di base è definita in questa fase. Vale la pena sottolineare che in alcuni casi, soprattutto nei grandi blocchi, l'energia fornita all'edificio e, di conseguenza, la linea di base stessa può essere influenzata da un'elevata incertezza.

2. Taratura e calibrazione del sistema - La seconda fase si articola in due fasi ed è finalizzata al raggiungimento delle corrette condizioni di funzionamento del sistema di riscaldamento/raffreddamento. Per questa fase possono essere definite due linee guida di taratura. L'obiettivo del primo passo è quello di raggiungere un sistema efficace di accoppiamento con l'ambiente interno. Il modello semplice di sistema di riscaldamento/raffreddamento è essenzialmente descritto da quattro convertitori: potenza installata Pow, efficienza Eff, resistenza termica Rih e capacità Cih . Potenza ed efficienza installate sono parametri piuttosto affidabili. Possono essere ricavati dall'analisi di schede tecniche nella prima fase. La capacità termica del mezzo può anche essere calcolata in modo abbastanza affidabile dai manuali tecnici disponibili. Al contrario, il valore della resistenza all'accoppiamento può essere piuttosto incerto perché è significativamente infetto dall'invecchiamento del sistema. Pertanto, la resistenza termica Rih deve essere regolata in modo che la potenza trasferita sia sufficiente a controllare la temperatura dell'ambiente. Questa condizione può essere valutata efficacemente

tracciando la temperatura del mezzo di riscaldamento/raffreddamento rispetto alla temperatura dell'aria interna. La resistenza di accoppiamento R ih deve essere ridotta fino a quando la temperatura del l'aria interna raggiunge una tendenza costante.

La seconda fase della fase di taratura del sistema riguarda il controllo del funzionamento del sistema. Oltre all'ovvio on/off schedule giornaliero, l'alimentazione fornita dal sistema all'ambiente interno è regolata da un loop termostatico. Il sistema viene acceso/spento quando la temperatura dell'aria interna supera la soglia di set-point, con una certa isteresi. Nel modello a scatola ridotta, una singola temperatura dell'aria interna approssima la temperatura media dell'aria interna dell'intera struttura. Dal momento che, soprattutto in grandi edifici con gradienti di temperatura elevati tra le diverse stanze, un perfetto mix di aria non può essere assunto. Infatti, la temperatura che regola il ciclo termostatico è quella che si verifica intorno ai termostati reali, che può essere molto diversa dalla temperatura media dell'aria all'interno della porta simulata. Di conseguenza, un errore di controllo operativo può verificarsi tra i casi reali e quelli simulati.

Per minimizzare il suo effetto, il vincolo del ciclo di controllo termostatico del modello a ordine ridotto deve essere allentato allargando l'isteresi del termostato fino a che la potenza fornita simulata rifletta quella misurata.

Si può delineare un'euristica generale per guidare la mitigazione del disallineamento dei controlli. Un cambiamento nella temperatura del termostato influisce sul consumo energetico quando la temperatura dell'aria all'interno tende naturalmente ad aggirare il punto di regolazione. Questo di solito si verifica durante le mezze stagioni, come la tarda primavera o l'inizio dell'autunno. Estati calde o fredde vittorie sono di solito non influenzati da questa condizione. Di conseguenza, come regola generale, il disallineamento del consumo energetico che si verifica solo in aprile, maggio, settembre o ottobre può essere un sintomo di questa condizione.

È bene ricordare inoltre che l'affidabilità della simulazione energetica non dipende solo dalla qualità e dal dettaglio del modello, ma anche dall'incertezza dei numerosi parametri di input, come le proprietà termiche dei materiali e dei

componenti, le ipotesi sulla gestione delle aperture e dell'impianto, sull'occupazione degli ambienti, le condizioni ambientali al contorno. Tutte queste informazioni, nel caso degli edifici esistenti, spesso mancano o sono caratterizzate da una grande incertezza. In questo contesto la calibrazione del modello di simulazione è stata fatta attraverso coefficienti che portano all'aumento/diminuzione del consumo di energia come

- Rea: è la resistenza di accoppiamento aria-involucro esterno
- Rie: è la resistenza media dell'involucro opaco
- L rate: è la resistenza alle infiltrazioni d'aria

Il procedimento di calibrazione è il punto focale della procedura proposta, in quanto permette di creare una baseline attendibile per la stima delle eventuali opzioni di miglioramento energetico. L'utilizzo di modelli di ordine ridotto facilita enormemente il processo di calibrazione, rendendolo gestibile anche nelle more dei processi operativi di Facility Management. In particolare, il ridotto numero di parametri permettono di limitare i problemi di overfitting che affliggono i modelli dettagliati. Inoltre, i modelli di ordine ridotto permettono l'implementazione di una strategia di calibrazione attraverso la gerarchizzazione dell'insieme dei parametri basato sul livello di certezza ottenuto dai rilievi condotti in sito.

3. Parametri edilizi - La terza fase riguarda gli adeguamenti dei restanti parametri edilizi che presentano un elevato grado di incertezza. Ad esempio, uno dei parametri che spesso è stimato con una certa difficoltà è la portata d'aria esterna dovuta alle infiltrazioni d'aria e alla ventilazione naturale. Il flusso d'aria esterna dovuto alla differenza di pressione tra l'interno e l'esterno può essere regolato mediante il parametro di infiltrazione d'aria. Una sopravvalutazione di questo parametro avrà un effetto sul consumo di energia, in quanto aumenta il consumo di energia in inverno e nelle stagioni estive, senza alcun effetto o addirittura una riduzione del consumo di energia in primavera e in estate, a seconda della temperatura esterna. Gli effetti della variazione del valore del parametro possono essere facilmente osservati e il valore corretto di

conseguenza. Questo processo può essere eseguito per tutti i parametri fisici che descrivono i componenti passivi dell'edificio.

4. Programmi operativi - La quarta, e forse la più critica, fase comporta l'adeguamento dei programmi dei guadagni interinali. Diverso dalla fase precedente, questo è essenzialmente un funzionamento basato sulla conoscenza pura. Se durante la prima fase è stata acquisita una perfetta conoscenza dell'occupazione, questa fase può essere saltata, altrimenti si dovrebbe stimare un'occupazione media mensile e l'utilizzo delle attrezzature sulla base di osservazioni e interviste. Infatti, la regolazione mensile operata durante la taratura del programma può, in questo momento, in ogni caso produrre una previsione perfettamente calibrata del consumo energetico. Si dovrebbe quindi fare molta attenzione ad evitare di oltrepassare i valori ragionevoli delle quantità previste.

4.2 Estensione del modello: pannelli fotovoltaici

Il modello descritto precedentemente permetteva di stimare le prestazioni energetiche, in merito alla situazione invernale ed estiva, in seguito all'utilizzo della pompa di calore. In questo paragrafo tale modello viene esteso per creare la possibilità di avere più scenari di stima energetica attraverso l'uso di pannelli fotovoltaici.

Il fotovoltaico è la tecnologia che permette di produrre energia elettrica mediante la conversione diretta della luce del sole senza l'uso di combustibili. Tale tecnologia però non può sostituire al 100% la produzione di energia elettrica necessaria, poiché la fonte non può essere continua 24 ore su 24 ma può dare un grande contributo limitando aumenti di produzione di energia legata all'uso di combustibili fossili, e riducendo notevolmente l'emissione di sostanze nocive nell'atmosfera. Il fenomeno fisico che permette tale trasformazione è stato osservato da Alexandre Edmond Becquerel nel 1839 ed è una delle prove delle onde elettromagnetiche. La teoria fisica che spiega questo effetto fu pubblicata in maniera più generale da Albert Einstein nel 1905, e per questo ricevette il premio Nobel per la fisica nel 1921.

4.2.1 Dalla cella al generatore fotovoltaico

La cella è il componente elementare nel quale avviene il processo fotovoltaico, costituita da due fette sottili di materiale semiconduttore di spessore variabile tra pochi micron e qualche centinaio. Questa struttura può utilizzare solo una parte della radiazione luminosa incidente: l'efficienza di conversione è intesa come la percentuale di energia luminosa che la cella può trasformare in energia elettrica, ed in genere, questo valore è compreso tra il 5% e il 25,6%, a seconda della tecnologia e della marca di cui si parla. Le cause principali di inefficienza sono:

- Non tutti i fotoni hanno energia sufficiente per creare la coppia elettrone-lacuna;
- L'eccesso di energia si trasforma in calore all'interno della cella;
- Alcuni fotoni sono riflessi e non "entrano" nella cella;
- Parte della corrente è shuntata dalla cella stessa;
- Non tutte le coppie generate sono divise dal campo.

La cella non illuminata ha comportamento analogo a quello di un diodo semiconduttore: applicando dall'esterno una tensione V, la giunzione da cui è composta la cella permette il passaggio di corrente in un solo senso. Quando invece la cella è illuminata la giunzione diventa una sorgente di coppie ed ha un comportamento analogo a quello di un diodo con in parallelo un generatore di corrente.

Il modulo fotovoltaico è il componente elementare del sistema, la sua fabbricazione è articolata in più fasi. Il primo passo è la connessione elettrica che consiste nel collegare in serie e/o in parallelo le singole celle, per ridurre le perdite. La fase successiva prevede l'incapsulamento delle celle tra una lastra di vetro ed una di plastica tramite laminazione a caldo del materiale polimerico. Caratteristiche fondamentali del rivestimento sono la trasparenza, la stabilità ai raggi UV e alla temperatura ed infine che mantenga bassa la temperatura delle celle. Il pannello fotovoltaico è l'unione di più moduli collegati tra loro sia meccanicamente che elettricamente. Le stringhe fotovoltaiche sono costituite da pannelli collegati a formare un'unica struttura. Il numero dei moduli dipende

dalla loro tensione e da quella della stringa. Il generatore o campo fotovoltaico è un insieme di stringhe collegate fra loro in serie e/o in parallelo. La potenza dipende dal tipo di collegamento tra le stringhe, ma solitamente la configurazione è tale che nel dimensionamento la potenza è la somma delle singole potenze di ciascun modulo misurata nelle condizioni standard (STC).

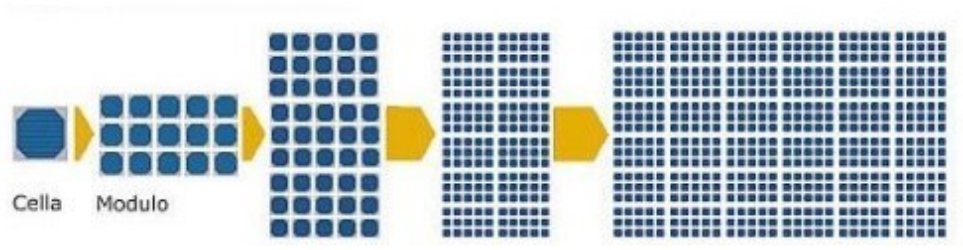


Figura 10 – Costruzione piramidale dalla cella al campo fotovoltaico

4.2.2 Le componenti di un impianto

Il campo fotovoltaico è costituito essenzialmente dall'insieme dei moduli fotovoltaici che formano il generatore, da un sistema di controllo e di condizionamento della potenza, da un eventuale accumulatore di energia, da quadri elettrici contenenti le apparecchiature di manovra-protezione e dai cavi di collegamento. Il generatore fotovoltaico è l'insieme dei pannelli o delle stringhe che collegate fra loro formano il campo che genera energia. Nei moduli non sempre le celle sono tutte uguali a causa di disomogeneità elettriche, che possono essere causate da ragioni imputabili al processo di produzione, a differenti condizioni operative e anche dall'invecchiamento o anche da anomalie tecniche, quindi due blocchi possono non avere la stessa tensione o corrente, rispettivamente se collegati in parallelo o in serie, venendosi così a creare una flusso di circolazione di blocco in cui il modulo che eroga tensione o corrente minore limita quello che eroga tensione o corrente maggiore.

I convertitori statici sono sistemi di condizionamento della potenza che fungono da interfaccia tra carico e/o rete, ed i pannelli. Questi dispositivi hanno come obiettivo quello di "correggere" le caratteristiche della corrente prodotta dai moduli fotovoltaici. Di fatto gli inverter è il cuore dell'impianto: trasforma la corrente continua in alternata e la immette in rete e, contemporaneamente, controlla e monitora l'intero impianto. Esso garantisce che i moduli funzionino

sempre al massimo delle loro prestazioni e controlla costantemente la rete pubblica, inoltre è indispensabile ai fini del rispetto dei vari criteri di sicurezza. Una considerazione da fare per quanto riguarda gli impianti isolati è che l'inverter non è sempre necessario: ci sono casi in cui l'impianto può farne ameno, ma è necessario che carico e batterie siano predisposti per essere alimentati in corrente continua a bassa tensione.

Come già descritto precedentemente, per evitare problemi relativi al malfunzionamento di celle, moduli o stringhe, che possono bloccare la produzione di energia fino ad arrivare anche al loro danneggiamento, vengono inseriti dei diodi, che possono essere:

- By-Pass: Isolano elettricamente un modulo nel caso al suo interno vi siano celle che per oscuramento si trovino a funzionare come diodi polarizzati inversamente in serie con altre celle. In questo caso si può arrivare alla situazione di "hot spot", in cui la cella dissipa l'energia di tutta la serie con rischi di sovratemperatura e danneggiamento della cella stessa.
- Di Blocco: è posto in parallelo ad ogni stringa ed evita la circolazione di corrente quando esiste una differenza tensione dovuta ad ombreggiamenti parziali. Nei sistemi di accumulo evita la dissipazione notturna dovuta al fatto che i moduli al buio funzionano come carico.

I misuratori di energia sono apparati che vengono installati sulle linee elettriche e misurano l'energia che li attraversa, e sono utilizzati, ad esempio, per conteggiare l'energia prodotta dall'impianto e quella immessa in rete.

I quadri elettrici sono quadri di protezione e controllo, da situare in base alle normative mentre i cavi sono quelli di connessione con adeguata resistenza ai raggi UV, alle temperature e alle condizioni atmosferiche. Con l'accumulo elettrico si immagazzina l'energia prodotta dal generatore di giorno per renderla disponibile di notte o in condizioni metereologiche sfavorevoli.

4.2.3 Modello modulo fotovoltaico

Il modello è uno schema estremamente semplificato dove i parametri utili per la simulazione sono:

- Surface PV: Photovoltaic Installed Surface [m^2];

- Efficiency PV: Photovoltaic Efficiency;
- Pv Market Ratio: Photovoltaic Price Buy/Selling Ratio.

4.3 Concetti di base: fisica delle pareti

I parametri inseriti all'interno del modello di ordine ridotto sono basati sulla teoria della fisica delle pareti. Uno studio approfondito di queste misure ha permesso di quantificare e ricavare tramite calcoli specifici i parametri necessari alla simulazione del modello oggetto di questa tesi.

4.3.1 Trasmittanza termica degli elementi opachi

Gli elementi che costituiscono l'involucro edilizio sono interessati da un flusso di calore che concorre a determinare le perdite per trasmissione del bilancio energetico invernale dell'edificio. Questa voce può assumere notevole influenza soprattutto nel caso di edifici con estese superfici disperdenti rapportate al volume (lordo) riscaldato.

Il parametro principale per determinare le dispersioni termiche e la trasmittanza termica (indicata con U), che rappresenta il flusso di calore che attraversa una superficie unitaria sottoposta a differenza di temperatura pari ad 1°C. La norma di riferimento per il calcolo della trasmittanza termica e la UNI EN ISO 6946:2008.

La trasmissione del calore attraverso un corpo sottoposto ad una differenza di temperatura e un fenomeno assai complesso nella sua generalità.

Esso si basa su tre meccanismi di scambio fondamentali: la conduzione, la convezione e l'irraggiamento. Se si ipotizza che il flusso di calore sia stazionario, che l'elemento abbia una forma geometrica semplice piana, che sia realizzata da una sequenza di strati omogenei ed isotropi e che le superfici esterne alla parete siano isoterme, la trasmittanza termica risulta essere un parametro di utilizzo comune.

La trasmittanza termica di una generica parete rappresenta la capacità della stessa di permettere il passaggio del flusso termico per unità di area in funzione della forzante termica applicata.

Viceversa, per stimare quantitativamente il flusso di calore che attraversa l'elemento considerato, in condizioni stazionarie, e sufficiente moltiplicare il valore della trasmittanza di quest'ultimo per la sua estensione e per la differenza di temperatura tra ambiente esterno ed interno.

$$Q = A \times U \times \Delta\theta$$

in cui Dq = q *i* – q *e* è la differenza tra la temperatura interna e la temperatura esterna.

Per come e definito, Q e positivo quando il calore e ceduto all'ambiente esterno e negativo in caso di guadagno di calore.

- **Il calcolo della trasmittanza termica**

Il valore di trasmittanza termica corrisponde al reciproco della sommatoria dei vari contributi di resistenza termica che intervengono nel calcolo.

Per un elemento di costruzione a più strati, la resistenza di tutti gli strati deve, infatti, essere sommata.

$$U = \frac{1}{R} = \frac{1}{R_{si} + \frac{s_i}{\lambda_i} + \frac{s_n}{\lambda_n} + R_n + R_a + R_{se}}$$

dove:

- *Rsi* è la resistenza liminare della superficie interna della struttura, [m^2K/W];
- *s/λ* è la resistenza termica di uno o piu strati di materiale omogeneo, [m^2K/W];
- *Rn = 1/C* è la resistenza termica di strati di materiale non omogeneo, [m^2K/W];
- *Ra* è la resistenza termica di eventuali intercapedini, [m^2K/W];
- *Rse* è la resistenza liminare della superficie esterna della struttura, [m^2K/W].

- **La conduttività termica (materiali ed elementi omogenei)**

La resistenza di uno strato omogeneo corrisponde al rapporto tra lo spessore, in metri, e la conduttività termica di progetto, in W/mK, del materiale di cui e costituito, calcolata in conformità alla UNI EN ISO 10456:2008 oppure ricavata da valori tabulati.

La conduttività termica (indicata con λ) e una misura dell'attitudine di una sostanza a trasmettere il calore. Tale grandezza e il rapporto, in condizioni stazionarie, fra il flusso di calore e il gradiente di temperatura che provoca il passaggio del calore. La conduttività dipende solo dalla natura del materiale e non dalla sua forma. I valori di riferimento di conduttività termica, per i comuni materiali da costruzione, sono contenuti nelle seguenti norme:

- UNI 10351:1994;
- UNI EN ISO 10456:2008.

La norma UNI 10351 fornisce, per le principali tipologie di materiale "omogeneo" da costruzione, i dati relativi a:

- massa volumica (materiale secco);
- permeabilità al vapore (campo asciutto e campo umido);
- conduttività di riferimento λ_m;
- maggiorazione percentuale *m* da applicare per passare alla conduttività utile di calcolo l, per condizioni d'uso standard.

Materiale	ρ [kg/m³]	$\delta_a \cdot 10^{12}$ [kg/(msPa)]	$\delta_u \cdot 10^{12}$ [kg/(msPa)]	λ_m [W/(mK)]	*m* %	λ [W/(mK)]
- polistirene (contenuto di umidità in pareti interne[3]) da 1 a 2%; per applicazioni contro il terreno[4]) sino al 20%; per i prodotti estrusi i valori di umidità indicati devono essere circa dimezzati. La conduttività aumenta da 0,1 a 0,5% per ogni % di umidità):						
- espanso sinterizzato, in lastre ricavate da blocchi (conforme a UNI 7891, le masse volumiche sono quelle nominali indicate nella norma; conduttività di riferimento ricalcolate a 293 K e per 10 cm di spessore)	15	3,6 a9	3,6 a9	0,041	10	0,045
	20	} 2,5 a 6	2,5 a 6	0,037	10	0,041
	25			0,036	10	0,040
	30	1,8 a 4,5	1,8 a 4,5	0,036	10	0,040

Figura 11 – Esempio di dati contenuti nella norma UNI 10351

L'utilizzo della maggiorazione percentuale e un metodo approssimato ragionevole, che tiene conto del fatto che il materiale, rispetto alle condizioni di prova in laboratorio, e soggetto ad alcune variabilità:

- variabilità del prodotto;
- variabilità della conduttività al variare della temperatura;
- variabilità della conduttività al variare del contenuto di umidita;
- variabilità nel tempo (invecchiamento).

La norma UNI 10351:1994 (ancora valida nonostante la UNI EN ISO 10456:2008) fornisce valori "standard", da prendere come riferimento nei calcoli se il produttore cui ci si affida non svolge un adeguato controllo statistico sulla produzione.

La norma propone, quindi, un valore di ***m*** coefficiente correttivo [1+*m* /100] che tiene conto dell'utilizzo "edilizio" standard del materiale considerato.

Sarebbe, comunque, compito del progettista decidere quale valore di *m* adottare.

La norma ISO 10456 definisce una serie di regole per la determinazione dei valori dichiarati (declared values) e dei valori di progetto (design values), valutando l'influenza della temperatura e del contenuto di umidita sulle caratteristiche termiche dei materiali, nonché per la conversione di valori ottenuti in determinate condizioni (ad esempio, di prova) in valori validi per altri set di condizioni (ad esempio, in opera).

L'intenzione della normativa e quella di esprimere tali variabilità in termini di una serie di coefficienti.

Per effettuare valutazioni di progetto adeguate e coerenti la norma UNI EN ISO 10456 definisce una regolamentazione delle caratteristiche termiche dei materiali e componenti.

Il produttore sarà obbligato a fornire i valori di riferimento per la prestazione di un determinato prodotto. Successivamente sarà compito del progettista modificarli a seconda della previsione delle condizioni al contorno con cui il materiale entrerà in contatto una volta posto in opera.

L'applicazione normativa prevede che il valore misurato di conducibilità di un determinato materiale in condizioni standard possa modificarsi in opera a seconda delle condizioni di temperatura e umidita presenti nell'ambiente di

applicazione, nonché del fatto che il materiale tenderà naturalmente a peggiorare le proprie prestazioni a causa dell'invecchiamento.

È possibile stimare l'effetto di queste variabilità tramite un metodo fattoriale espresso dalla seguente relazione:

$$\lambda_d = \lambda_D \cdot F_T \cdot F_m \cdot F_a$$

dove:

- λ_d è il valore di conducibilità termica da utilizzare, [mK/W];
- λ_D è la conducibilità termica misurata in condizioni standard e dichiarata dal produttore, [mK/W];
- F_T è il fattore di conversione che tiene conto della temperatura;
- F_m è il fattore di conversione che tiene conto della presenza di umidita;
- F_a è il fattore di conversione che tiene conto dell'invecchiamento del materiale.

Ognuno dei fattori proposti e espresso tramite una funzione esponenziale che valuta il contributo del singolo fattore in relazione alla differenza tra le condizioni standard e le condizioni specifiche di progetto.

Si sottolinea come i valori dichiarati siano quelli che corrispondono a misurazioni effettuate sotto precise condizioni di riferimento di temperatura e umidita, provenienti da uno specifico controllo statistico e corrispondenti ad una ragionevole vita di servizio attesa in normali condizioni d'uso. Un prodotto può avere, dunque, più di un valore di progetto, a fronte di differenti applicazioni o diverse condizioni al contorno.

Il certificatore energetico, il termotecnico e il progettista fanno riferimento, nella maggior parte dei casi pratici, alla norma UNI 10351. Quest'ultima, seppur datata, non risulta particolarmente obsoleta ed è di facile interpretazione. Un'applicazione estesa della norma UNI EN ISO 14506 si ritiene, comunque, auspicabile. In assenza di specifiche informazioni, anche la norma UNI EN ISO

14506 fornisce una serie di dati tabellati di progetto per i materiali di comune utilizzo in edilizia, anche se specifica come, laddove disponibili, i dati del produttore siano da considerarsi preferibili.
La conduttività citata in molti "depliants" può non essere completamente esaustiva. Frequentemente, infatti, si tende a fornire i valori migliori misurati in laboratorio. Si deve, dunque, prestare estrema attenzione ai valori riportati sulle schede tecniche, cercando innanzitutto di capire se tali valori si riferiscono alle condizioni di progetto o a quelle di laboratorio (e in quest' ultimo caso, capire quali esse siano).

- **La conduttanza termica (materiali ed elementi non omogenei)**

Per un elemento non omogeneo, ovvero caratterizzato da proprietà termiche non uniformi (e il caso degli strati che presentano al loro interno delle cavita d'aria, quali ad esempio i solai in laterocemento, o giunti) si deve fare riferimento alla conduttanza, C, dello strato, espressa in $W/(m^2K)$. Tale grandezza rappresenta il flusso di calore scambiato unicamente per via conduttiva all'interno del solido in esame.
I valori di conduttanza sono riportati nelle apposite norme di riferimento [UNI 10355:1994] o ricavabili dai certificati di prova forniti direttamente dai produttori, solitamente mediante prove di laboratorio (o in opera) o simulazioni numeriche ad elementi finiti. Si deve prestare, inoltre, attenzione a non confondere la conduttanza termica con la trasmittanza termica. Sebbene abbiano entrambe la stessa unità di misura, la trasmittanza termica comprende anche i contributi di scambio termico convettivo e radiativo. Spesso, ad esempio, il risultato della misura in opera della trasmittanza termica e espresso in termini di conduttanza.
Si sottolinea come la determinazione delle dispersioni termiche in una chiusura costituita da mattoni pieni in laterizio non possa essere ricondotta alla semplice determinazione della conduttività e dello spessore della muratura, in quanto deve essere considerata la presenza dei giunti di malta che ne interrompe la continuità. In questo caso, dunque, e corretto parlare di conduttanza termica, considerando il tipo di foratura (eventuale), lo spessore, il tipo di giunto (in termini di materiale,

spessore e disposizione), la massa volumica e la massa superficiale dell'elemento.

Nel caso le condizioni riscontrate non siano contemplate nella normativa di riferimento, a rigore si deve procedere alla determinazione della resistenza termica attraverso modellazioni ad elementi finiti, prove in opera (se pertinente) o al calcolo analitico della resistenza termica totale di un componente edilizio costituito da strati omogenei ed eterogenei e riportato di seguito nel testo.

- **Le resistenze termiche superficiali**

Le resistenze termiche superficiali (liminari) tengono conto degli scambi di calore per convezione e per irraggiamento che avvengono tra la superficie e l'aria interna (Rsi) e tra la superficie e l'aria esterna (Rse). Esse dipendono essenzialmente dal grado di esposizione e dalla finitura superficiale delle superfici. Il coefficiente di scambio termico convettivo e radiativo, infatti, dipendono rispettivamente dalla velocita dell'aria, l'uno, e dall'emissività emisferica della superficie e dal coefficiente di irraggiamento del corpo nero, l'altro. Il coefficiente di irraggiamento del corpo nero, a sua volta, risulta funzione della temperatura termodinamica media della superficie e delle superfici limitrofe.

I valori di resistenza termica superficiale interna Rsi ed esterna Rse sono normati nella UNI EN ISO 6946 a seconda della direzione del flusso di calore: la Tabella 10.1 riporta i valori tipici, rappresentativi di superfici con emissività pari a 0,9 e valori del coefficiente di irraggiamento del corpo nero valutato a 20°C per la resistenza superficiale interna e 10°C per la resistenza superficiale esterna, e con velocita dell'aria pari a 4 m/s.

Resistenza superficiale m^2K/W	**Direzione del flusso termico**		
	ascendente	orizzontale	discendente
R_{si}	0,10	0,13	0,17
R_{se}	0,04	0,04	0,04

Figura 12 – Resistenze superficiali convenzionali – UNI EN ISO 6946:2008

I valori riportati in *Figura 12* valgono per superfici piane in assenza di specifiche condizioni al contorno.

I valori riportati per il caso di flusso con direzione “orizzontale” si applicano a flussi termici con inclinazione fino a ±30° rispetto al piano orizzontale.
Nel caso di solai interpiani, utilizzare 0,13 m^2K/W su entrambe le facce.
Per superfici che non sono piane o per particolari condizioni al contorno, e possibile utilizzare specifiche procedure riportate nell’appendice A della norma.
In particolare, al diminuire dell’emissività superficiale la resistenza superficiale termica aumenta in maniera significativa per la superficie interna, mentre all’aumentare della velocità del vento la resistenza termica superficiale esterna diminuisce.

- **La resistenza termica di intercapedini**

Ciascuna cavita o intercapedine contribuisce con una propria resistenza. All’interno dell’intercapedine avvengono scambi di tipo convettivo e radiativo. Le intercapedini normalmente presenti in edilizia hanno, tipicamente, una resistenza termica pari a 0,16 m^2K/W nel caso di solai di copertura (flusso termico ascendente) e 0,18 m^2K/W nel caso di pareti (flusso termico orizzontale).
La resistenza termica relativa a strati d’aria risulta essere fortemente influenzata dalla velocita dell’aria stessa. In generale, si può dire che laddove l’aria e ferma essa presenta il massimo valore di resistenza: la componente convettiva della resistenza termica dell’intercapedine diminuisce all’aumentare della velocita dell’aria.
Un’intercapedine d’aria non separata dall’ambiente esterno da uno strato isolante, ma provvista di piccole aperture verso l’ambiente esterno, deve essere considerata come intercapedine d’aria non ventilata, se queste aperture sono disposte in modo da non permettere un flusso d’aria attraverso l’intercapedine e se presentano una superficie massima delle aperture pari a 500 mm^2.
In quest’ottica, le aperture di drenaggio (feritoie di scolo) conformate come giunti verticali aperti sulla parete esterna di un muro di laterizio a blocchi cavi, rispettano i vincoli sopra riportati, e quindi non sono considerate come aperture di ventilazione. La resistenza termica totale di un componente per edilizia, contenente un’intercapedine d’aria fortemente ventilata, ovvero che presenta una superficie delle aperture superiore a 1500 mm^2, si ottiene trascurando la

resistenza termica dell'intercapedine d'aria e di tutti gli altri strati che separano detta intercapedine dall'ambiente esterno. L'aria in un'intercapedine fortemente ventilata si trova, infatti, alla stessa temperatura dell'aria esterna. Il calcolo si completa includendo una resistenza termica superficiale esterna corrispondente all'aria immobile, ovvero uguale alla resistenza termica superficiale interna del medesimo componente, poiché il rivestimento costituisce un riparo dal vento.

Per le intercapedini debolmente ventilate, ovvero che presentano una superficie delle aperture compresa tra 500 e 1500 mm^2, l'effetto della ventilazione dipende dalla dimensione e dalla disposizione delle aperture di ventilazione. In prima approssimazione, si può affermare che la resistenza termica si collochi a meta fra la condizione di intercapedine non ventilata e intercapedine ventilata, in funzione delle dimensioni geometriche delle aperture verso l'esterno.

Spessore dell'intercapedine d'aria (mm)	Resistenza termica (m^2K/W) a seconda direzione del flusso di calore		
	ascendente	orizzontale	discendente
0	0,00	0,00	0,00
5	0,11	0,11	0,11
7	0,13	0,13	0,13
10	0,15	0,15	0,15
15	0,16	0,17	0,17
25	0,16	0,18	0,19
50	0,16	0,18	0,21
100	0,16	0,18	0,22
300	0,16	0,18	0,23

Figura 13 – Resistenza termica a seconda del flusso di calore

I valori riportati nella *Figura 13* valgono per intercapedini:

- delimitate da due lati effettivamente paralleli e perpendicolari alla direzione del flusso termico e con una emissività non minore di 0,8;
- con spessore (nella direzione del flusso termico) minore di 0,1 volte le altre due dimensioni, e comunque minore di 0,3 m;
- non scambianti aria con l'ambiente interno (la sola ventilazione e dunque quella da o verso l'esterno).

Spessori di intercapedine d'aria superiori a 15-25 mm non comportano apprezzabili incrementi della resistenza termica, in quanto i moti convettivi naturali che si instaurano oltre questo spessore vanificano l'effetto di resistenza termica per conduzione dovuto allo strato d'aria.

Inoltre, se l'intercapedine fosse delimitata da superfici aventi bassi valori di emissività emisferiche, si avrebbe una riduzione dello scambio radiativo e, quindi, un corrispondente incremento della resistenza di intercapedine (dell'ordine di 2-3 volte).

Per componenti contenenti intercapedini d'aria di spessore maggiore di 0,3 m, non è possibile calcolare una singola trasmittanza termica. In tale caso, i flussi termici dovrebbero pertanto essere determinati preferibilmente con un bilancio termico.

5. Sistemi di supporto alla decisione

Come anticipato nel *paragrafo 1.3.2*, l'azienda ha la necessità di usufruire di un sistema di supporto alle decisioni che permetta di capire e stimare, quando e quanto si può guadagnare su una transazione immobiliare.

Da sempre i manager delle aziende sono chiamati a compiere delle scelte per determinare le modalità ed i contenuti delle attività che la società, o le aree, che dirigono dovranno svolgere con lo scopo di perseguire efficacemente i propri obiettivi. L'elevato interesse che essi nutrono verso il processo decisionale è dovuto al fatto che ogni scelta intrapresa determina i risultati della gestione, risultati sulla base dei quali saranno valutati.

Ogni decisione è presa al termine di un processo che, a grandi linee, consiste nella valutazione delle possibili alternative e si conclude con la scelta della soluzione che apporti il beneficio maggiore all'impresa. Le decisioni più semplici sono prese, generalmente, facendo affidamento alla sola esperienza dei manager, mentre il progressivo aumentare della complessità del problema richiede necessariamente un maggior numero di elementi di cui disporre per selezionare l'alternativa migliore.

I modelli di supporto sono nati come strumenti per gestire la realtà in maniera più semplice, nascondendone la complessità. Essi sono in grado di produrre informazioni utili per effettuare valutazioni, compiere decisioni o intraprendere azioni, a partire da un set di dati iniziali attraverso il processo di inferenza.

Nel modellare sistemi reali non è sempre possibile disporre di dati certi, perciò bisogna ricorrere a modelli che siano in grado di tener conto delle incertezze associati alle informazioni raccolte. La famiglia dei modelli probabilistici rappresenta sistemi affetti da incertezza, la quale è quantificata attraverso l'attribuzione di una misura di probabilità ad ogni legame tra le variabili del sistema. Le reti Bayesiane appartengono proprio a questo gruppo di modelli. Korb and Nicholson (2011, pp.139) affermano che "il processo di costruzione di una rete Bayesiana possa portare ad una migliore comprensione del fenomeno oggetto d'analisi così come possa fornire uno strumento utile di supporto alle decisioni".

Per un'azienda che volesse approcciarsi all'analisi dei dati, in prima battuta entrano in gioco gli elementi messi a disposizione dalla statistica descrittiva, come ad esempio: indici di posizione, indici di variabilità, relazioni statistiche, distribuzioni, rappresentazioni grafiche, ecc. I risultati prodotti da questi strumenti consentono di rilevare, classificare, riassumere e rappresentare il contenuto del database, che vedremo nel *paragrafo 5.4*, e fungono come base di partenza per considerazioni più elaborate.
Lo scopo è dimostrare le potenzialità delle reti Bayesiane come modello grafico probabilistico per generare informazioni rilevanti da utilizzare come supporto nelle decisioni di business, e stimarne i consumi post-intervento.

5.1 Reti Bayesiane

Dal punto di vista formale, una Rete Bayesiana è un grafo, ossia un insieme di nodi e frecce. I nodi indicano le variabili di un problema, mentre le frecce indicano i rapporti di causalità tra di esse.
In letteratura è noto come questi modelli risultino particolarmente adatti nell'affrontare contemporaneamente problemi derivanti da incertezza e complessità. La probabilità, infatti, fornisce una misura dell'incertezza associata ai dati osservati mentre la teoria dei grafi consente di creare una struttura dati coerente con il contesto analizzato e fornisce un'interfaccia intuitiva.
Le reti Bayesiane sono largamente utilizzate in ambiti anche molto diversi tra loro. Questa è la dimostrazione che sono uno strumento inferenziale e decisionale estremamente flessibile. Esse permettono di:

- integrare informazioni provenienti da fonti diverse (conoscenze teoriche, opinioni di esperti, dati sperimentali, ecc.);
- raggiungere una maggior efficienza computazionale, poiché richiedono di inserire le probabilità condizionate delle sole variabili legate tra loro da un arco;
- eseguire operazioni che vanno al di là della capacità della mente umana, come l'aggiornamento dei parametri della rete a seguito della sopravvenuta conoscenza di nuove informazioni;

- stabilire e controllare le assunzioni alla base della rete e del sistema per limitare la validazione delle conclusioni;
- compiere analisi di sensibilità utili per quantificare l'influenza di una variabile sull'intera rete.

5.2 Introduzione alle reti bayesiane

Le reti Bayesiane sono una classe di modelli grafici probabilistici utilizzati per descrivere ed analizzare situazioni in condizioni di incertezza. La struttura di una rete Bayesiana è definita a partire da due componenti principali: i nodi, che rappresentano le variabili casuali, gli archi diretti che evidenziano le dipendenze probabilistiche tra le variabili (Korb and Nicholson, 2011). Nello specifico, una rete Bayesiana, spesso indicata con BN dall'inglese Bayesian network, è definita nel seguente modo:

Si considerino n variabili casuali X1; X2; …. ;Xn, un grafo aciclico diretto con n nodi numerati e si supponga che il nodo i del grafo sia associato alla variabile Xi. Il grafo è una rete Bayesiana, che rappresenta le variabili X1; X2; …;Xn, se:

$$P(X_1, X_2, ..., X_n) = \prod_{i=1}^{n} P\big(X_i | Pa(X_i)\big),$$

dove Pa(Xi) denota l'insieme dei genitori del nodo Xi, ovvero tutte le variabili tali che nel grafo esita un arco diretto da ciascuna di queste al nodo i.

Una rete Bayesiana è generalmente indicata con BN = (G; P) dove G rappresenta la struttura e P la distribuzione di probabilità. Per comprendere a pieno il significato di questa definizione è necessario approfondire alcuni elementi.

Una rete bayesiana viene identificata a partire dalla definizione della sua struttura in termini di grafo.

Un grafo, indicato con G(N,A), è un set di nodi N, o vertici, connessi da un insieme di archi A che possono essere o meno direzionati.

La struttura viene spesso indicata con G = (N;A) ed è definita da un insieme di nodi, N, rappresentante le variabili casuali da analizzare, ed un insieme di archi, A, indicanti le relazioni di dipendenza tra i nodi del grafo. Poiché l'insieme N

rappresenta esattamente l'insieme X delle variabili del sistema, nel contesto delle BN spesso la nozione assume la forma G = (X;A).

Figura 14 – Relazione diretta

Bisogna interpretare con cautela le relazioni di dipendenza, sia dirette che indirette. Intuitivamente la presenza di un arco tra due nodi indica una relazione diretta tra le variabili corrispondenti mentre l'assenza di un collegamento significa che le variabili, all'interno di questo specifico modello, sono considerate indipendenti. Si noti che è stato utilizzato il termine "relazioni di dipendenza" invece che "relazioni causali"; questa precisazione è indispensabile poiché la causalità1 è difficile da giustificare nella maggior parte dei casi (Scutari and Denis, 2015).

Nel modello, le variabili casuali sono identificate dall'etichetta del nodo corrispondente e possono essere categoriali, discrete o continue. Le prime sono descritte all'interno di insieme contenente un numero finito di elementi mentre le variabili continue possono assumere uno degli infiniti valori compresi all'interno del proprio dominio. In ogni istante, un generico nodo della rete, Xi, può assumere in modo mutualmente esclusivo uno degli stati appartenenti al dominio in cui è definito. Nel seguito della tesi verranno considerate solo variabili categoriali o discrete, caratterizzate cioè da un numero finito di valori.

La struttura di una rete Bayesiana utilizza la metafora della famiglia per descrivere le relazioni gerarchiche tra gli elementi del grafo: un nodo è detto genitore (parent) di un figlio (child) se esiste un arco diretto che colleghi il primo al secondo. Un'estensione di questa terminologia identifica, prendendo un generico nodo Xi, l'insieme dei discendenti (descendants) come tutti i nodi che possono essere raggiunti attraverso un percorso diretto partendo da Xi, e gli antenati (ancestor), come l'insieme formato dai nodi da cui si può raggiungere Xi attraverso un percorso diretto (Faltin et al., 2007). Un nodo senza genitori è

definito radice (root) mentre un nodo senza figli prende il nome di foglia (leaf); ogni altro nodo è classificato come intermedio (intermediate).
L'unico vincolo strutturale impone che all'interno della rete non ci siano cicli diretti, ovvero che non sia possibile partire da un nodo e ritornarvi semplicemente seguendo la direzione degli archi (Korb and Nicholson, 2011). Per questo motivo le BNs appartengano alla categoria dei grafi aciclici diretti o directed acyclic graph (DAG)2.

Il vincolo dell'aciclicità è necessario, poiché:

- la probabilità congiunta non sarebbe fattorizzabile come prodotto di probabilità condizionate in presenza di cicli;
- qualunque sia il numero e la natura delle dipendenze tra le variabili, esiste almeno una struttura aciclica adatta a rappresentare l'oggetto (Pourret et al., 2008);
- si garantisce che nessun nodo possa essere il suo stesso ascendente o discendente.

A differenza dei grafi non diretti, i DAG riescono a rappresentare, in modo molto flessibile, un'ampia varietà di indipendenze probabilistiche (Krieg, 2001).
Le reti Bayesiane sono annoverate tra i modelli probabilistici in virtù del fatto che le relazioni intercorrenti tra le variabili sono quantificate specificando, per ogni nodo, una distribuzione di probabilità condizionata (Korb and Nicholson, 2011). Queste distribuzioni sono rappresentate attraverso tabelle che prendono il nome di tabella di probabilità condizionata o conditional probability table (CPT) definite come segue (Krieg, 2001).
Per ogni variabile Xi, con n nodi genitori (Y1, Y2, ..., Yn), la CPT è indicata con P (Xi|Y1, Y2, ..., Yn) e contiene la probabilità associata ad ogni possibile combinazione tra gli stati di Xi e di tutti i suoi genitori.
La definizione della tabella di probabilità avviene in modi diversi a seconda del tipo di nodo:

- Intermedio o foglia: per ogni combinazione degli stati dei genitori di un generico nodo Xi, la tabella indica la probabilità condizionata che Xi assuma uno dei valori contenuti nel proprio dominio.

- Radice: non avendo genitori, la tabella rappresenta la probabilità a priori associata ad ogni stato assunto dalla variabile. Questa è una probabilità marginale e non condizionata, poiché l'insieme dei genitori di un nodo radice è vuoto.

Utilizzando la regola del prodotto (chain rule) è possibile determinare la distribuzione di probabilità congiunta (joint probability distribution) dei nodi dell'intera BN. Essa è calcolata come prodotto delle probabilità condizionate e marginali di tutti i nodi (Krieg, 2001).

Per una rete Bayesiana definita sull'insieme delle variabili X = (X1; X2; …Xn) la distribuzione di probabilità congiunta della rete è definita come:

$$P(X) = P(X_1, X_2, ..., X_n) = \prod_{i=1}^{n} P(X_i | Pa(X_i))$$

dove Pa(Xi) indica l'insieme dei genitori del nodo Xi.

La distribuzione di probabilità congiunta può essere dunque fattorizzata e scomposta nelle singole distribuzioni di probabilità locale, ognuna delle quali coinvolge un nodo della rete e l'insieme dei suoi genitori.

Dal punto di vista dell'efficienza computazionale, all'aumentare del numero dei genitori di un nodo, cresce anche la dimensione della tabella di probabilità condizionata e di conseguenza la potenza di calcolo richiesta per l'analisi. Ad esempio: in una rete booleana, dove ciascun nodo può assumere al massimo due valori, ad una variabile con n genitori è associata una TPC con 2n+1 probabilità.

6. Sviluppo di un sistema di supporto alle decisioni per la stima dell'efficienza della prestazione energetica

La suddetta tesi documenta lo sviluppo di un sistema di supporto alle decisioni per gli investimenti immobiliari in ambito di edilizia residenziale che permette la stima della prestazione energetica raggiungibile dall'immobile sulla base di una serie di informazioni tecniche.
Il modello bayesiano, descritto nel *paragrafo 6.3*, è stato sviluppato sulla base di un modello ridotto della prestazione energetica degli edifici, il cui set di parametri riflette in larga misura le informazioni che sono prontamente disponibili nel rilevamento pratico o che possono essere facilmente calcolate.
Il sistema di supporto, quindi, non permetterà altro che di stimare in un tempo ridotto i consumi post-intervento quali:

- inserimento del cappotto esterno (coating);
- inserimento pannelli fotovoltaici (PV).

6.1 Database e raccolta dati

I parametri necessari per l'avvio della serie di simulazioni del modello ridotto sono racchiusi nel database di informazioni.
La redazione del database implica differenti tipologie di dati da gestire e raccogliere:

- Informazioni riferite agli immobili: layout/planimetrie di edifici da cui desumerne le superfici ed i volumi;
- Informazioni dalle bollette termiche: dati sui consumi. Sono il punto di partenza ed il punto di arrivo di tutta l'analisi, dato che l'utilizzatore finale dovrà trovare riscontro dei benefici del risparmio energetico proprio nelle bollette. Le bollette necessarie all'analisi sono quelle riferite almeno ad un intero anno solare.

- Informazioni sulla tipologia degli impianti: contengono dati sulla potenza (power) necessari per la stima delle prestazioni energetiche.

La creazione del database di 20 edifici reali è stata fatta sulla base dell'acquisizione di dati grezzi (raw data) non privi di errori, per lo più stimati a causa della carenza di informazioni dettagliate. (vedi *Appendice)*

I risultati della fase di raccolta dei dati sono archiviati all'interno di un database composto da 19 variabili (colonne) e 140 osservazioni (righe) ciascuna delle quali individua le risposte date da un singolo scenario stimato.
La costruzione del data-set del modello termico ha richiesto 250 simulazioni relative a 40 edifici situati in Italia. Per ogni edificio è stata effettuata una calibrazione utilizzando come parametro di riferimento i consumi annuali dell'anno 2020

Le variabili esaminate sono le seguenti:

- Type: la tipologia edilizia analizzata; (nel database si differenziano in: abitazione monofamiliare, medio condominio e a schiera);
- Location: il luogo in cui è situato l'immobile oggetto dell'analisi;
- Weather_file: indica il luogo a cui fa riferimento il file dei dati meteorologici Wea;
- Volume: il volume totale dell'immobile oggetto di analisi;
- Superficie finestrata: la superficie totale delle finestre presenti nell'immobile;
- Superficie opaca: la superficie totale delle pareti opache presenti nell'immobile;
- Resistenza di accoppiamento aria-involucro esterno (R_{ea}) : la resistenza liminare dell'aria calcolata sulla base della teoria della fisica delle pareti vista al *paragrafo 4.3.1*;
- Resistenza media dell'involucro opaco (Rie) calcolata sulla base della teoria della fisica delle pareti vista al *paragrafo 4.3.1*;

- Resistenza media dei tramezzi interni (R_m) calcolata sulla base della teoria della fisica delle pareti vista al *paragrafo 4.3.1*;
- Capacità termica media dei tramezzi interni (C_m) calcolata sulla base della teoria della fisica delle pareti vista al *paragrafo 4.3.1*;
- Capacità termica dell'involucro opaco (C_e) calcolata sulla base della teoria della fisica delle pareti vista al *paragrafo 4.3.1*;
- Power: la potenza della caldaia e della pompa di calore presente all'interno dell'edificio;
- Set point: il valore di riferimento sotto al quale si ha l'accensione della caldaia;
- KWh: il consumo annuale in relazione ad ogni scenario analizzato;
- E_type: la distinzione tra gas ed elettrico
- Coating: la presenza/assenza di cappotto esterno;
- PV: la presenza/assenza di pannelli fotovoltaici;
- Cooling: la presenza/assenza di raffrescamento;
- Tipologia_tetto: il tipo di tetto caratterizzante l'edificio (nel database si differenziano a falde e piani);
- Tipologia_muraria: descrive brevemente il tipo di pacchetto costruttivo caratterizzante l'edificio in oggetto.

Tra le variabili elencate non tutte sono state acquisite direttamente, in quanto sono state calcolate facendo riferimento alle nozioni relative alla fisica delle pareti.

Tra queste variabili troviamo:

- Resistenza di accoppiamento aria-involucro esterno (R_{ea})
- Resistenza media dell'involucro opaco (Rie)
- Resistenza media dei tramezzi interni (R_m)
- Capacità termica media dei tramezzi interni (C_m)
- Capacità termica dell'involucro opaco (C_e)

La mancata compatibilità tra le unità di misura del SI con le unità di misura necessarie al modello ridotto per avviare la simulazione ha portato ad effettuare ulteriori calcoli in modo da trasformare (m^2K/W) in (K/W).

6.2 Avvio delle simulazioni e calibrazione del modello

Una volta aver reso i dati contenuti nel database compatibili con il modello energetico ridotto, descritto nel dettaglio nel paragrafo__, si passa all'inserimento dei parametri stessi.
I parametri necessari, tra quelli raccolti nel database, per l'avvio delle simulazioni sono i seguenti:

- Weather_file;
- Volume;
- Superficie finestrata (Nord, Sud, Est, Ovest);
- Superficie opaca (Nord, Sud, Est, Ovest, Roof);
- Resistenza di accoppiamento aria-involucro esterno (R_{ea});
- Resistenza media dell'involucro opaco (Rie);
- Resistenza media dei tramezzi interni (R_m);
- Capacità termica media dei tramezzi interni (C_m);
- Capacità termica dell'involucro opaco (C_e);
- Resistenza alle infiltrazioni d'aria (Lrate);
- Power;
- Set point.

A seconda dello scenario invernale/estivo, quindi del tipo di simulazione che verrà avviata si modificheranno i seguenti parametri:

- E_type: distinguendo tra gas ed elettrico
- Coating: distinguendo la presenza/assenza di cappotto esterno;
- PV: distinguendo la presenza/assenza di pannelli fotovoltaici;
- Cooling: distinguendo la presenza/assenza di raffrescamento.

Per ogni edificio sono state avviate 7 simulazioni totali tra questi scenari elencati di seguito sviluppate sia per il caso invernale che per il caso estivo:

- Gas;
- Gas + cappotto;
- Pompa di calore + cappotto;
- Pompa di calore + cappotto + fotovoltaico.

Al primo tentativo però, le simulazioni non hanno portato ad un risultato verosimile alla realtà sulla base del consumo energetico contenuto nelle bollette acquisite per ogni edificio. Questo accade in quanto numerosi parametri di input sono caratterizzati da grandi incertezze e per questo motivo il passaggio successivo è la calibrazione del modello.

In questo contesto la calibrazione del modello di simulazione è stata fatta attraverso coefficienti che portano all'aumento/diminuzione del consumo di energia come:

- Rea: è la resistenza di accoppiamento aria-involucro esterno
- Rie: è la resistenza media dell'involucro opaco
- L rate: è la resistenza alle infiltrazioni d'aria

Una volta ottenuti i risultati ricercati, si completa il database con l'inserimento del valore relativo al consumo in KWh.

6.3 Il modello Bayesiano

Il risultato finale di questa tesi di ricerca è dovuto all'utilizzo del software Huigins, il quale ha portato alla creazione di una rete bayesiana sviluppata sulla base di un modello ridotto analizzato precedentemente nel *paragrafo 4.1.1.*

Il database descritto nel *paragrafo 6.1* è stato generato da una serie di indagini, effettuate su 20 edifici reali che hanno fornito parametri tecnici, i quali hanno permesso di fare una stima della valutazione energetica.

Ognuno di questi parametri, rappresentati nelle singole colonne come variabili, ha assunto valori in relazione agli edifici analizzati visti come una serie di

situazioni reali. Ad ogni singola riga definita con il termine osservazione viene associata quindi una situazione reale.
Ognuna di queste variabili ha un determinato dominio, sulla base del quale è stata costruita una vera e propria statistica.
La distribuzione di probabilità dei valori, quindi il numero delle volte che assume un determinato range piuttosto che un altro, dipende dal numero di edifici correlato a quel determinato valore rispetto al numero totale.
La rete bayesiana, quindi, è un grafo diretto aciclico caratterizzato da un insieme di variabili aleatorie rappresentate graficamente tramite dei ''cerchi'' definiti ''nodi''.
Prima di arrivare a definire la distribuzione di probabilità però tutte le variabili devono essere processate, definendone la tipologia tra nominale e numerica.
Nel modello oggetto di questa tesi sviluppato tramite il software le variabili sono espresse come variabili numeriche e nominali. Sulle variabili numeriche possiamo fare diverse considerazioni sulla loro natura in quanto possono essere trattate o come variabili continue o come variabili discrete. Per ognuna di queste ultime è necessario fare una discretizzazione ''discretize value'' in modo tale da ottenere poi un dominio non più sottoforma di singolo valore bensì di intervalli definiti come ''range''.
Cosa succede all'interno della distribuzione di probabilità? Alcune classi di prestazione mappano meglio rispetto ad altre in quanto le variabili si strutturano secondo un rapporto di causa effetto. Tali correlazioni sono raffigurate nel modello bayesiano attraverso delle ''frecce''.
La freccia rappresenta una densità di probabilità condizionata, ovvero la probabilità che il valore della variabile x sia di un certo tipo rispetto ad una variabile y.
Dal punto di vista del calcolo probabilistico, tuttavia, ogni forma di inferenza corrisponde nell'osservazione di alcuni parametri (nodi) e nella propagazione di tali osservazioni attraverso la rete agli altri parametri. Osservare un parametro significa attribuire alla corrispondente variabile aleatoria una particolare distribuzione di probabilità. Nel caso in cui si abbia perfetta certezza del valore del parametro si assegna il valore del 100% di probabilità

al range in cui tale valore ricade. L'osservazione di un valore in un nodo innesca il ricalcolo delle distribuzioni di probabilità di tutti i nodi. Più in generale, e questo è forse il caso più interessante, è possibile assegnare una distribuzione di probabilità, piuttosto che una singola evidenza, che esprime un giudizio più incerto sui valori della variabile (nodo). L'attribuzione di una tale distribuzione viene propagata al resto della rete analogamente all'assegnazione di una singola evidenza. Questa possibilità permette di rappresentare giudizi degli esperti che contengono una qualsiasi forma di incertezza. Vedremo nei paragrafi seguenti alcuni esempi che mostrano come tale possibilità sia di fondamentale importanza per i processi di Facility Management. Esistono molte possibili topologie per modellare uno dato problema mediante reti Bayesiane, e, nella pratica, non esiste una soluzione in assoluto migliore. Tuttavia, una topologia estremamente semplice conosciuta come Naive Bayes Classifier (NBC) si rivela efficace in numerose situazioni. Un NBC è una rete Bayesiana con topologia ad albero (vedi *Figura 15*), formata da un nodo radice il cui dominio è formato dall'insieme delle classi possibili, collegato ad un insieme di nodi foglie che rappresentano i parametri i cui valori caratterizzano le differenti classi.

Una delle principali caratteristiche delle reti Bayesiane è la loro flessibilità nell'integrare sorgenti di informazioni di natura diversa mantenendone e/o evidenziandone esplicitamente la loro struttura logica. Le reti Bayesiane possono essere costruite mappando le equazioni analitiche che rappresentano un qualsiasi processo o sistema sulle relazioni probabilistiche fra nodi, possono essere costruite a partire da giudizi qualitativi di esperti o, attraverso processi di apprendimento (data-mining), direttamente da insiemi di dati. I tre processi non sono esclusivi e possono essere integrati nel processo di sviluppo della rete.

La procedura di apprendimento dai dati è composta di tre passaggi:

1) discretizzazione dei domini,

2) apprendimento strutturale,

3) apprendimento delle tabelle di probabilità condizionata (EM Learning).

La discretizzazione dei domini delle variabili è un passaggio estremamente delicato, in quanto introduce un errore che tende a rendere l'inferenza di natura qualitativa. Il livello di discretizzazione dei domini deve essere quindi attentamente controllato, utilizzando, dove possibile, soglie che abbiano un preciso valore semantico o operativo nel dominio di interesse.

L'apprendimento strutturale serve a definire la topologia della rete e, di solito, è un processo che si svolge per approssimazioni successive sotto la supervisione del modellista. Infine, l'apprendimento delle tabelle di probabilità condizionata avviene in automatico attraverso l'algoritmo di expectation maximization (EM-Learning).

Il modello Bayesiano utilizzato per l'index frame termico è formato da una rete Bayesiana mista, che utilizza cioè sia nodi discreti che continui, con topologia NBC. La rete è stata ricavata utilizzando la procedura di apprendimento EM-Learning delle reti Bayesiane, formata da due passaggi:

1) discretizzazione dei domini,

2) apprendimento delle tabelle di probabilità condizionata (EM Learning).

La discretizzazione delle variabili è stata operata per quanto possibile utilizzando un buon livello di risoluzione ed una ampiezza uniforme degli intervalli. Questo permette di non specializzare il modello sul particolare data-set, lasciando quindi la possibilità di integrare altre simulazioni senza dover ricostruire i domini delle variabili aleatorie. In alcuni casi, tuttavia, una specifica normazione di alcuni parametri (e.g. consumo dell'edifico al metro quadro, ha imposto l'utilizzo delle soglie normate). La struttura della rete è stata definita a priori, utilizzando un semplice modello Naive Bayes Classifier. Infine, l'algoritmo EM Learning è stato infine utilizzato per l'apprendimento delle tabelle di probabilità condizionata.

La rete Bayesiana risultante è mostrata in *Figura 15.*

Le specifiche dei nodi ed il loro rapporto con il model view termico sono descritte nella *Figura 16.*

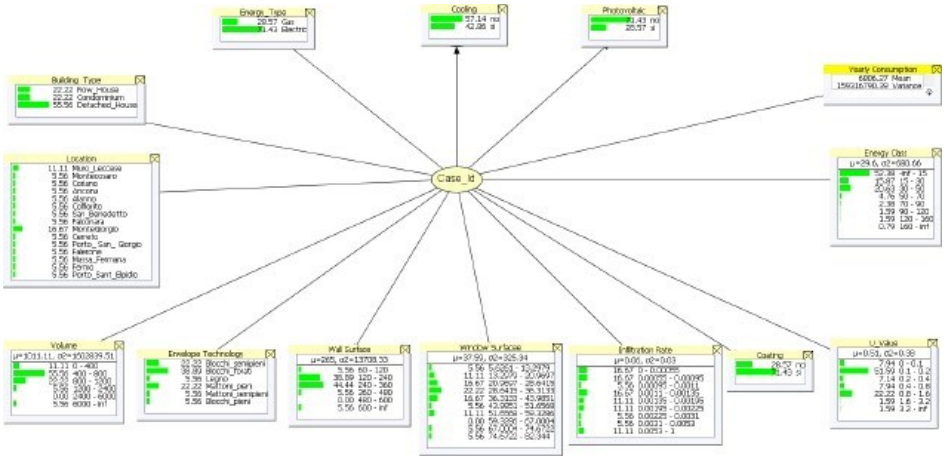


Figura 15 – Rete Bayesiana

Node	Range	Description	Mapping
Case_id	Integer Positive Value	Identificatore univoco del caso	
Location	String	Location of the building	Maps to Case Base parameter *Location*
Building_Type	Row_House, Condominium, Detached_House	Typical residential building typologies	Maps to Case Base parameter *Type*
Energy Type	Electric, Gas	Type of the heating/cooling system	Maps to Case Base parameter *Energy_Type*
Cooling	Yes, No	Cooling system switched on	Maps to a simulation set-up
Photovoltaic	Yes, No	Photovoltaic system switched on	Maps to a simulation set-up
Yearly Consumption	Real Value	Total energy consumption. Can be a negative value, meaning the building produce more energy than it consumes	Maps to Simulation Result
Energy Class	Set of ranges	Defined according to Italian legislation	Calculated from Model View as *Yearly Consumption / Floor Area*
U_Value	Set of ranges	Envelope U value, ranges are arranged according to typical U_Value tresholds	Calculated from model view *Rie*, *Cie* and *Wall Surface*
Coating	Yes, No		Calculated from model view parameter *U__Value*
Infiltration Rate	Real value	Kg of air per second per cube meter	Derived from *Ria*
Window Surface	Real Value	The building total window surface	Map to model parameters *Window_Surfaces*
Wall Surface	Real Value	The building total opaque surface	Map to model parameters *Wall_Surfaces*
Envelope technology	Blocchi Semipieni, Blocchi Forati, Blocchi Pieni, Legno, Mattoni Pieni, Mattoni Semipieni	Typical Italian masonry components	Maps to Case Base parameter *Envelope Technology*
Volume	Real Value	The Building Volume	Map to model parameter *Volume*

Figura 16 - Node specification of the Thermal Index Frame

Come accennato precedentemente, non tutti i parametri del modello ridotto utilizzato per la simulazione sono stati utilizzati per la rete, in quanto non strettamente necessari per condurre le inferenze. Si è così ottenuta una ulteriore riduzione del numero di parametri rendendo il modello maggiormente intelligibile.

L'utilizzo di un modello Bayesiano come rappresentazione della struttura degli indici del CBR realizza un'astrazione sull'insieme dei parametri che sono alla base del modello CBR. La statistica generata sulla base dei casi permette di ridurre ulteriormente il numero di parametri utilizzati nel modello ridotto, utilizzando al loro posto parametri più sintetici direttamente osservabili. Questo è il caso, ad esempio, del sistema dell'involucro dell'edificio, dove un singolo parametro che indicizza la tipologia edilizia riesce a racchiudere l'insieme delle capacità e resistenze termiche che lo caratterizzano.

Inoltre, la rappresentazione probabilistica Bayesiana permette l'utilizzo di giudizi degli esperti, in questo caso i tecnici preposti ai sopralluoghi, come stime di probabilità dei vari parametri. Questo è un aspetto molto importante per quantificare e gestire l'incertezza presente nel processo decisionale. Alcuni dei parametri che caratterizzano il comportamento termico degli edifici sono in effetti sempre caratterizzati da incertezza. La stessa trasmittanza delle pareti e l'influenza reale dei ponti termici non è mai perfettamente conosciuta, così come l'efficienza reale dei generatori termici e le resistenze termiche dei diffusori che dipendo dalle condizioni d'uso dei dispositivi.

Un terzo aspetto rilevante concerne la mancanza di valori, che può anche dipendere dall'impossibilità di eseguire osservazioni e/o misure in sito. Anche in questo caso un sistema di indici correlato permette di compensare al meglio della conoscenza storica i dati mancanti fornendo la migliore spiegazione determinata sulla base della distribuzione di probabilità dei parametri non osservati che deriva dalla conoscenza storica dell'operatore tecnico.

Infine, inserendo nel sistema degli indici anche le prestazioni stimate e/o misurate, il sistema permetterà di operare sia in modo forward, stimando le prestazioni attese a partire dagli osservati degli indici, sia in modo backward,

stimando il quadro delle caratteristiche tecniche che più probabilmente potranno realizzare le prestazioni attese.

Esempi

Un esempio tipico della stima della prestazione concerne la valutazione dello stato di fatto. Si articola definendo il tipo di abitazione ed alcuni dei parametri di più facile identificazione, quali il volume (Volume approx 440 [m3]), la tecnologia delle pareti dell'involucro (Wall_Type = mattoni, Coating = no) e le caratteristiche degli impianti (Cooling = no, PV = no). Il modello fornisce una stima di consumo di circa 50 [W/m2] (vedi *Figura 17*).

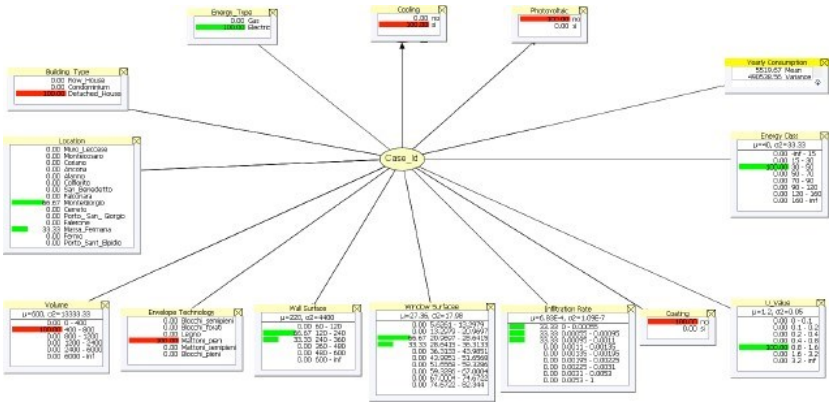


Figura 17

Come ulteriore passo inferenziale, è possibile valutare scenari alternativi in funzione di diversi possibili interventi di efficientamento energetico. Ad esempio, la *figura 18* mostra il risultato ottenibile a valle di un intervento di isolamento a cappotto dell'involucro (Coating = si).

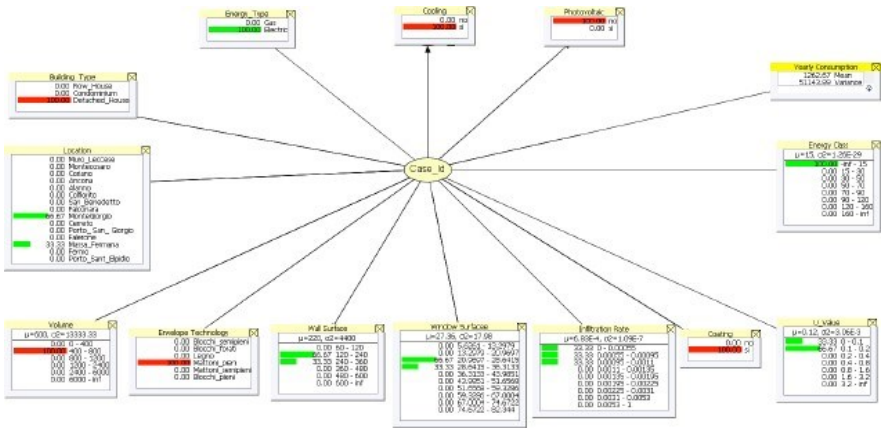


Figura 18

Infine, è interessante notare come sia possibile gestire l'incertezza nella stima di parametri più complessi da definire, quali l'infiltrazione (Infiltration rate). La *figura 19* mostra la stima delle prestazioni di un edificio isolato con un volume di circa 640 m3. In questo caso la base dei casi contiene esempi con un ampio spettro di valori di prestazione. È quindi necessario inserire stime di parametri che possano restringerne il campo.

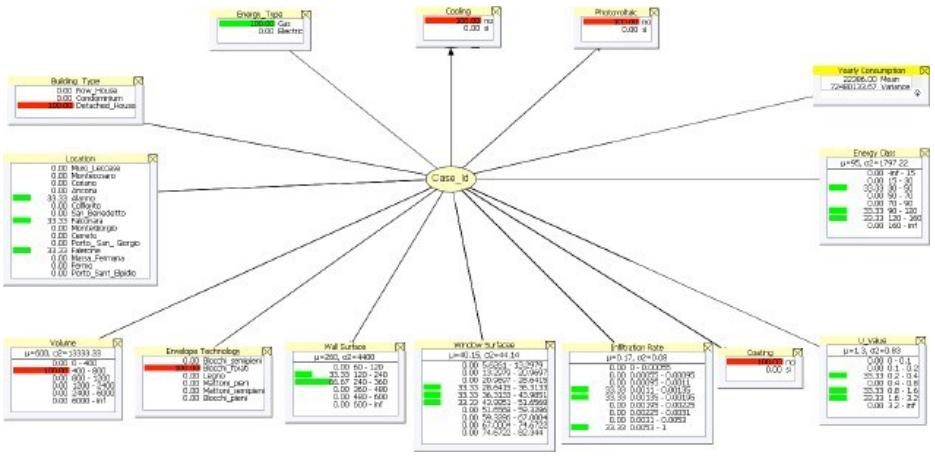


Figura 19

Stima dei parametri tecnici

L'analisi dei parametri tecnici si ottiene vincolando la distribuzione di probabilità di un parametro prestazionale (Energy Class) ed, eventualmente, altri parametri come ad esempio la tipologia edilizia di interesse (vedi *Figura 20*).

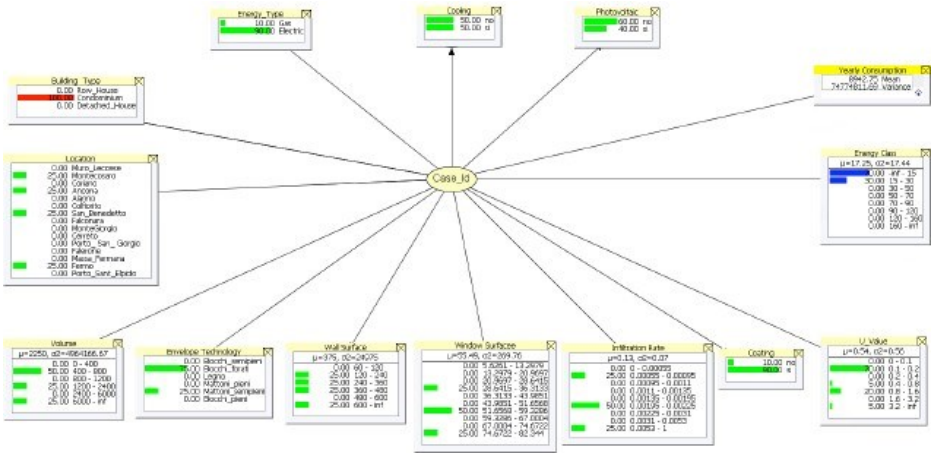


Figura 20

Il sistema assume una configurazione che indica i casi compatibili che possono pertanto supportare l'approfondimento di tale scenario. La prima considerazione emerge dal fatto che tali classi di prestazione possono essere raggiunte solamente a valle di un intervento di isolamento a cappotto dell'involucro.

Volendo considerare l'effetto di un sistema di riscaldamento/raffrescamento che includa anche pannelli fotovoltaici (vedi *Figura 20*) si nota che è possibile raggiungere prestazioni NZB (-inf -15) [W/m2] nel caso di un condominio sito nella città di Ancona (Figura 5.11) mentre si raggiungono prestazioni in classe A (15 - 30) [W/m2] in un caso sito nel comune di Montecosaro (vedi *Figura 21*).

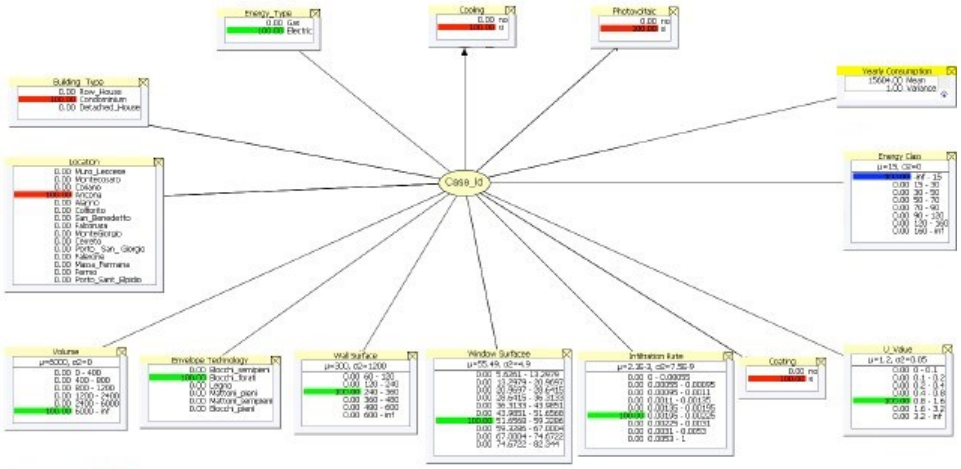


Figura 5.11

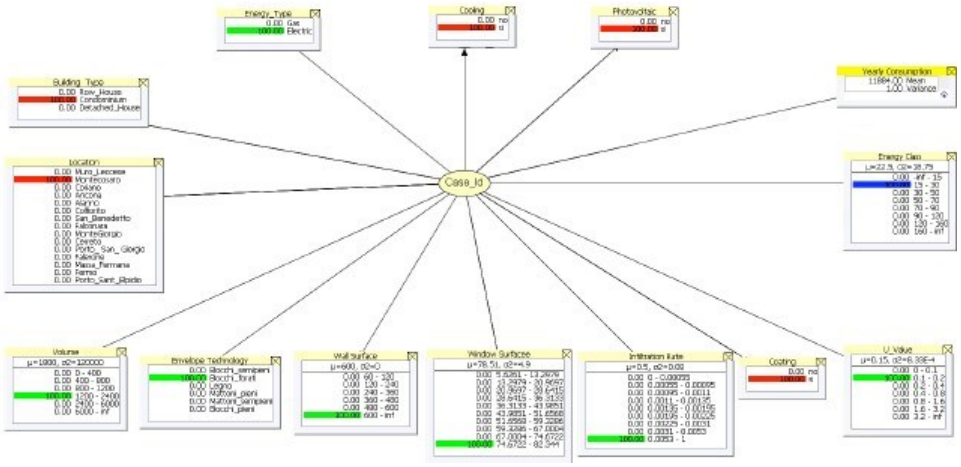


Figura 21

Case Based Reasoning

In questa sezione analizzeremo una forma di ragionamento che unisce le inferenze della rete Bayesiana con le query alla Case Base. Mostreremo come questa combinazione di inferenza permetta di estendere il dominio dell'inferenza includendo anche informazione non strutturata.

Consideriamo il caso in cui un operatore debba valutare rapidamente quali siano le potenzialità di risparmio energetico dell'abitazione oggetto di eempio, una casa di campagna di 472 m^3, che deve essere ristrutturata, costruita con tecnologia tradizionale molto probabilmente in mattoni pieni o semipieni, meno probabilmente in blocchi. Questa situazione è molto frequente, può capitare sia nei contatti commerciali con i proprietari sia durante lo screening di potenziali investimenti in specifiche regioni. In queste condizioni, sia l'informazione che i tempi tecnici sono limitati.

Il ragionamento in questo caso sarà di tipo case based. Si utilizzeranno cioè le stime effettuate nei i casi più prossimi per costruire un primo quadro del potenziale di risparmio energetico dell'edificio. La valutazione della similarità fra edifici diversi, tuttavia necessità di più informazione di quella disponibile nell'index frame, come ad esempio la collocazione nel contesto urbano o di campagna, il fattore di forma, la presenza di pertinenze, gli ombreggiamenti, ecc. Nella modellazione del singolo edificio, questi fattori sono assorbiti dal processo di calibrazione del modello ridotto e non sono quindi espressi esplicitamente nell'index frame. Il sistema di supporto Case Based permette di compensare questo limite offrendo la possibilità di un confronto visuale e/o su documenti tecnici più completi, e di giungere comunque ad una prima stima supportata al meglio delle evidenze tecniche.

Utilizzando, ad esempio, le informazioni a disposizione è possibile circoscrivere attraverso l'index frame l'insieme dei casi che hanno una qualche similarità con il caso in esame, al meglio dell'incertezza del giudizio iniziale (i.e. distribuzione di probabilità sulla tecnologia) (vedi *Figura 22*)

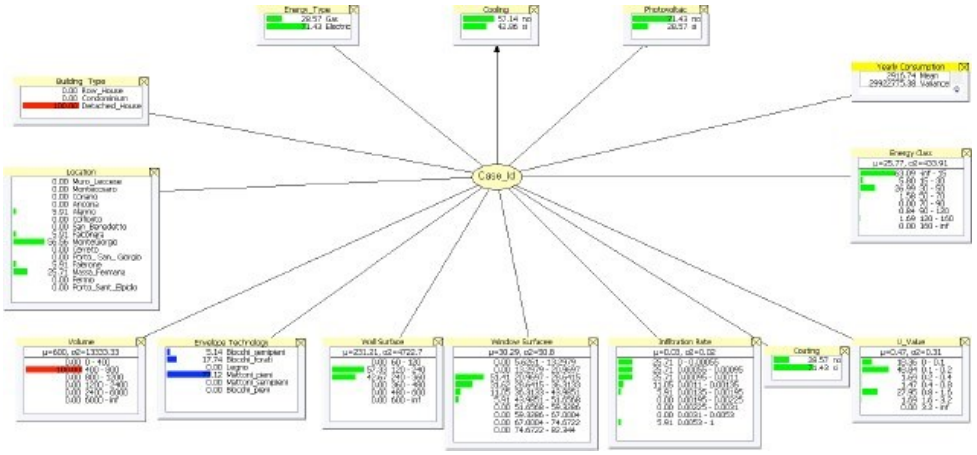


Figura 22

A questo punto è necessario procedere attraverso la ricerca esplicita nella base dei casi, per compensare il gap informativo con informazione non strutturata. In questo caso, ad esempio, è possibile procedere an un confronto visivo fra le abitazioni che sono state selezionate nella prima iterazione con l'index frame. La *Figura 23* mostra il risultato della query alla Base dei Casi selezionando i casi con maggiore probabilità.

Case_Id	Location	Volume	Photo
15	Montegiorgio	427	
14	Massa Fermana	472	
10	Montegiorgio	513	

Figura 23

I casi selezionati appaiono compatibili: edifici isolati, stessa regione, non hanno ombreggiamenti, volumi e superfici non molto differenti. E' possibile quindi utilizzare i risultati di tale insieme di casi per una prima stima. La stima dello sato in media pesata sulle probabilità, si ottiene imponendo la selezione sulla variabile Location, e selezionando uno scenario molto tipico per la zona, {Coating = no, E_Type = Gas, PV= no} (vedi *Figura 24*)

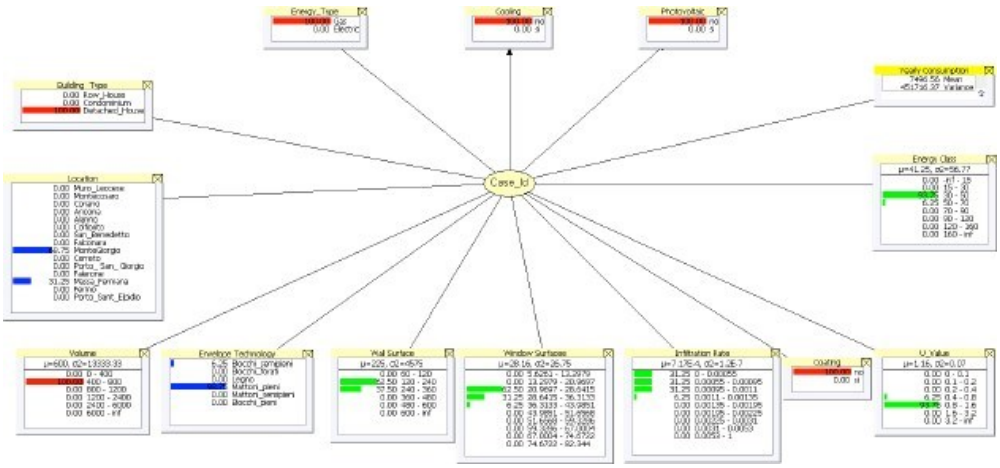


Figura 24

Analogamente è possibile stimare i consumi a valle di un intervento efficientamento selezionando la configurazione opportuna {Coating = yes, E_Type = Electric, PV= no} (vedi *Figura 25*).

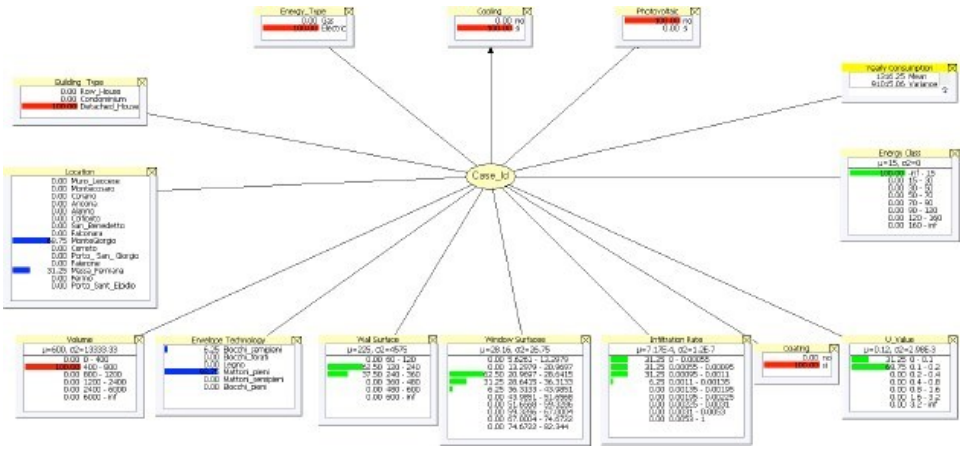


Figura 25

I valori di prestazione così ottenuti riflettono la statistica della base dei casi e sono al momento comparabili con i giudizi che sarebbero forniti da un esperto del settore con una perfetta conoscenza dello storico aziendale.

I valori ottenuti attraverso l'index frame sono valori approssimati e qualitativi. L'approssimazione è dovuta alla già discussa incertezza epistemica, mentre la natura qualitativa dell'inferenza deriva dall'approssimazione introdotta dalla discretizzazione dei domini delle variabili. L'integrazione con la base dei casi, tuttavia, mitiga il problema dell'inferenza qualitativa perché permette l'accesso ai dati puntuali di ogni simulazione analitica che è stata utilizzata nel processo di inferenza. Ad esempio, è possibile ottenere dalla tabella del model view termico i valori puntuali delle resistenze e delle capacità degli involucri, nonché i consumi calcolati.

Dopo la fase di analisi e di decisione sullo specifico intervento, il workflow aziendale prevede, nell'eventualità di una scelta positiva, lo sviluppo della progettazione dell'intervento. Anche in questo caso si possono avere delle interazioni puntuali con la base dei casi per sviluppare dei piani di design critics più circostanziati. Ma l'aspetto più interessante sta nel fatto che, a processo concluso i dati del progetto saranno essere inseriti nella base dei casi unitamente ai parametri prestazionali simulati e, nel tempo, misurati, ed entreranno nel ciclo della conoscenza aziendale. Questo rappresenta una implementazione della dinamica positiva di capitalizzazione della conoscenza che è alla base dello sviluppo competitivo delle aziende operanti nel settore del Facility Management.

7. Conclusioni

In questa tesi abbiamo discusso l'architettura di un sistema di supporto alle decisioni per l'efficientamento energetico degli edifici. È stato discusso un caso di studio limitato ad un database di edifici residenziali, sviluppato in collaborazione con GUMPUB s.r.l. Il contributo ha mostrato come la modellazione energetica di ordine ridotto degli edifici fornisce un livello di astrazione del comportamento energetico degli edifici che è al contempo in grado di mantenere un'accettabile precisione, basata su dati reali, nella predizione delle prestazioni sotto diverse condizioni di intervento, e di supportare la logica dei processi di decisione nella gestione dei progetti di efficientemente energetico. L'integrazione delle reti bayesiane come ulteriore raffinamento del sistema degli indici ha permesso di raggiungere una buona flessibilità operativa. Infine, il sistema di ragionamento Case Based ha permesso di estendere l'ambito dell'inferenza integrando, per quanto possibile, anche informazione non strutturata.

Il sistema mostrato nel presente lavoro rappresenta una proof of concept di un sistema più sviluppato che integrerà, con lo stesso paradigma anche altri ambiti di analisi, quali la valutazione della vulnerabilità simica e la valutazione della potenzialità nel lay-out degli spazi. La struttura della rete Bayesiana utilizzata (NBC) rappresenta solamente una ipotesi iniziale. Sarà necessario studiare lo sviluppo di reti che esplicitino le relazioni concernenti i principi primi che regolano lo scambio termico, e valutare se e come tali strutture permettano di raggiungere maggior grado di generalità, specialmente nella integrazione di nuovi casi.

La macchina, quindi, fornirà una stima senza effettuare misurazioni, allora un'azienda che mette a sistema il suo operare avrà creato un pregresso che gli darà la possibilità di guadagnare tempo, uno tra gli obiettivi finali di questa tesi di ricerca.

APPENDICE

Immobile n.1

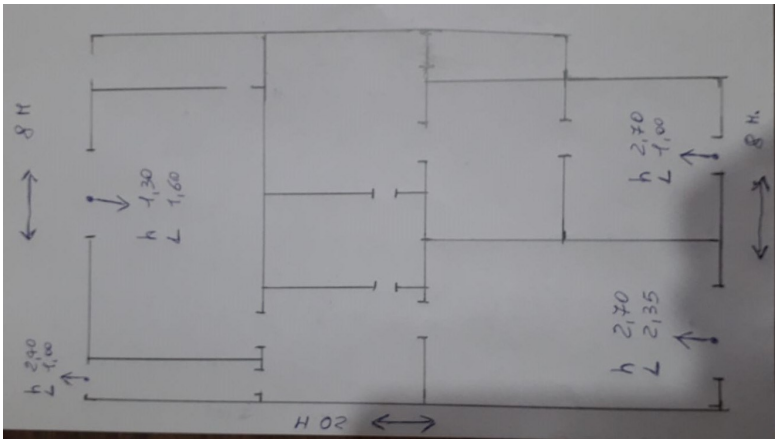
Luogo: Muro Leccese

Tipologia: A schiera

Volume: 800 mc

Prospetti

Pianta



Immobile n.2

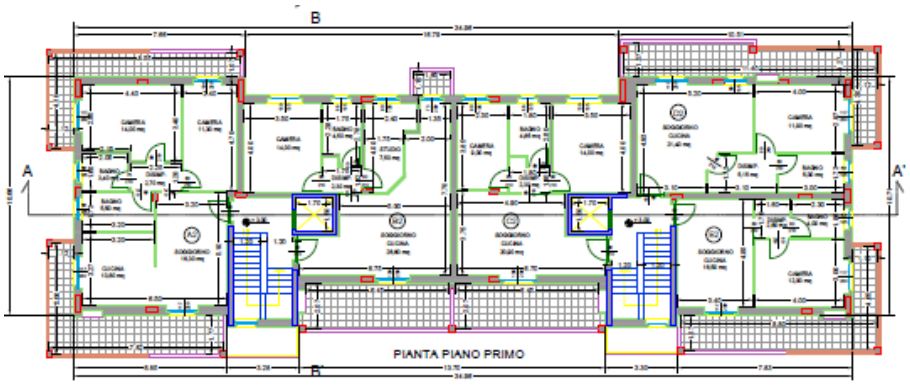
Luogo: Montecosaro

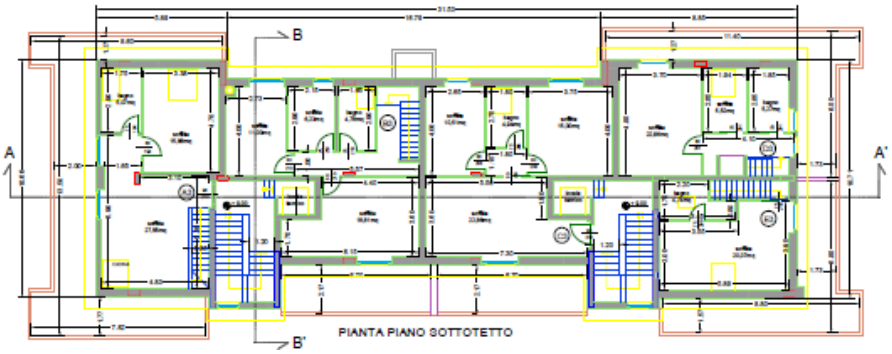
Tipologia: Condominio

Volume: 2160 mc

Prospetti

Piante





Immobile n.3

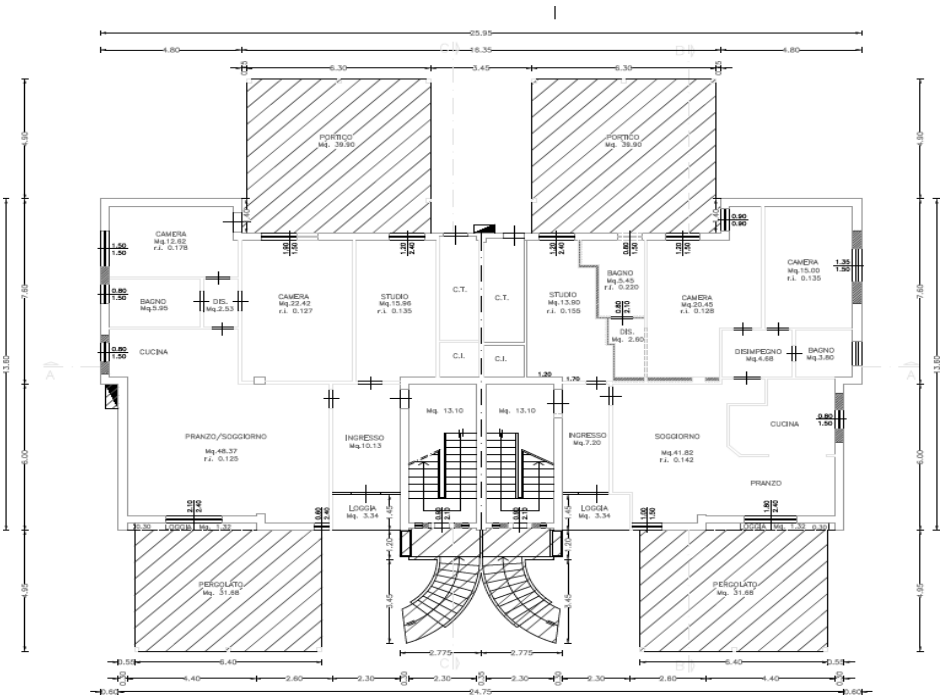
Luogo: Coriano

Tipologia: Villetta

Volume: 847.5 mc

Prospetti

Pianta



Immobile n.4

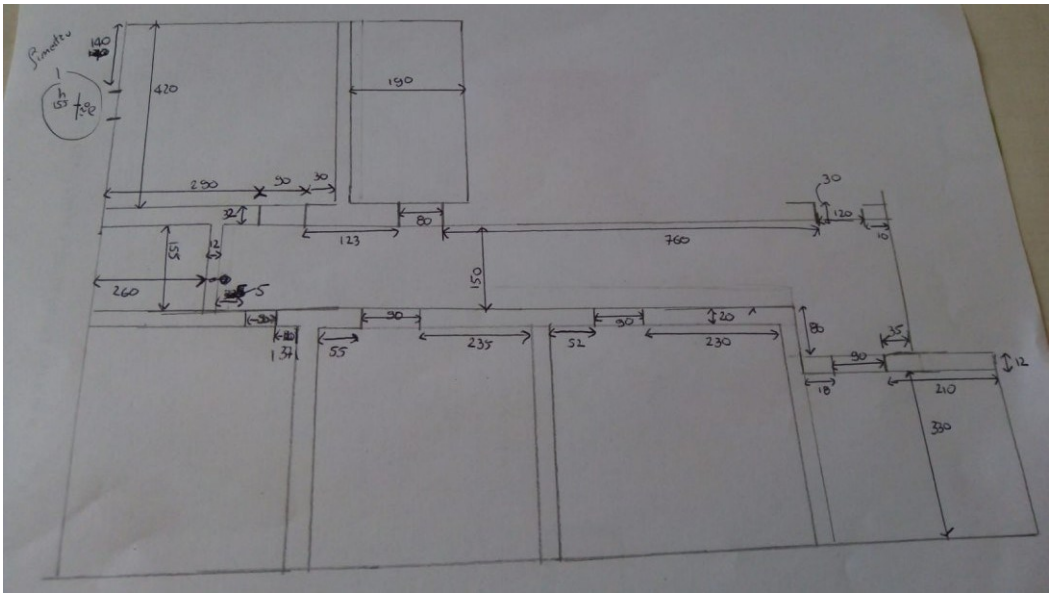
Luogo: Ancona

Tipologia: Condominio

Volume: 6160 mc

Prospetti

Pianta



Immobile n.5

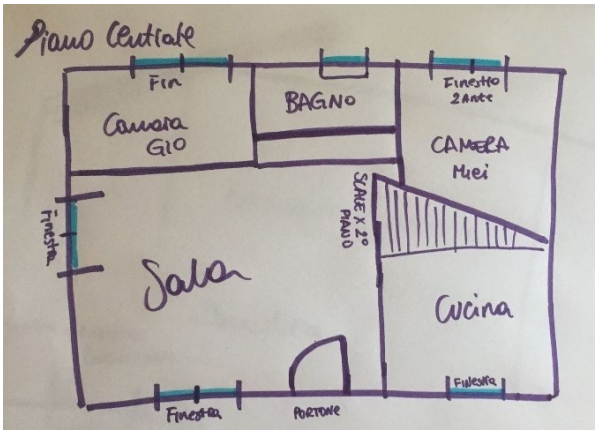
Luogo: Alanno

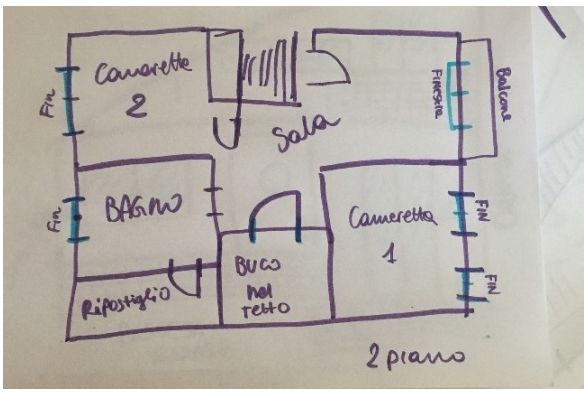
Tipologia: Villetta

Volume: 660 mc

Prospetti

Pianta





Immobile n.6

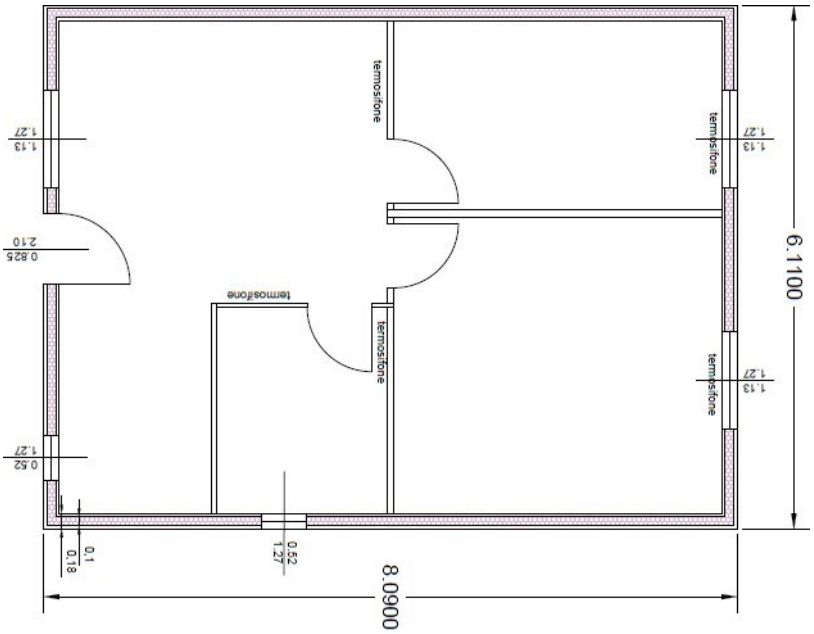
Luogo: Colfiorito

Tipologia: Casa singola

Volume: 135 mc

Prospetti

Pianta



Immobile n.7

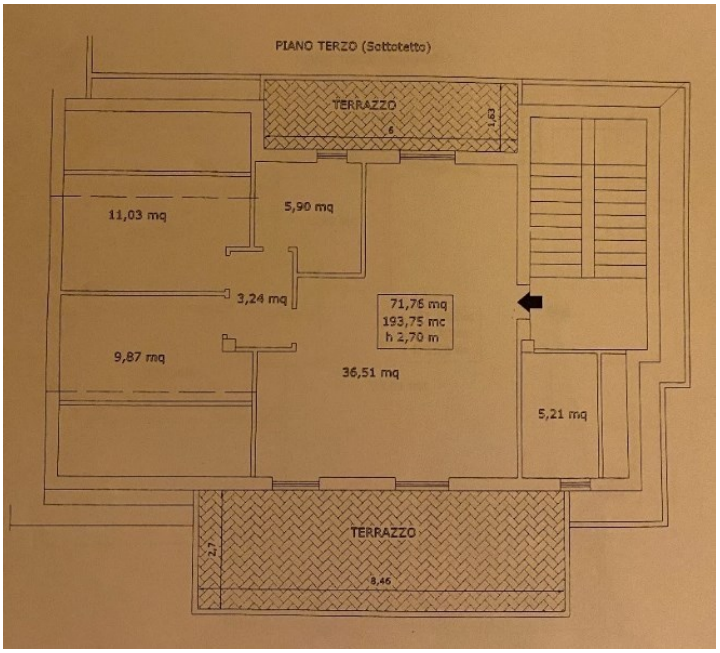
Luogo: San Benedetto del Tronto

Tipologia: Condominio

Volume: 624 mc

Prospetti

Pianta



Immobile n.8

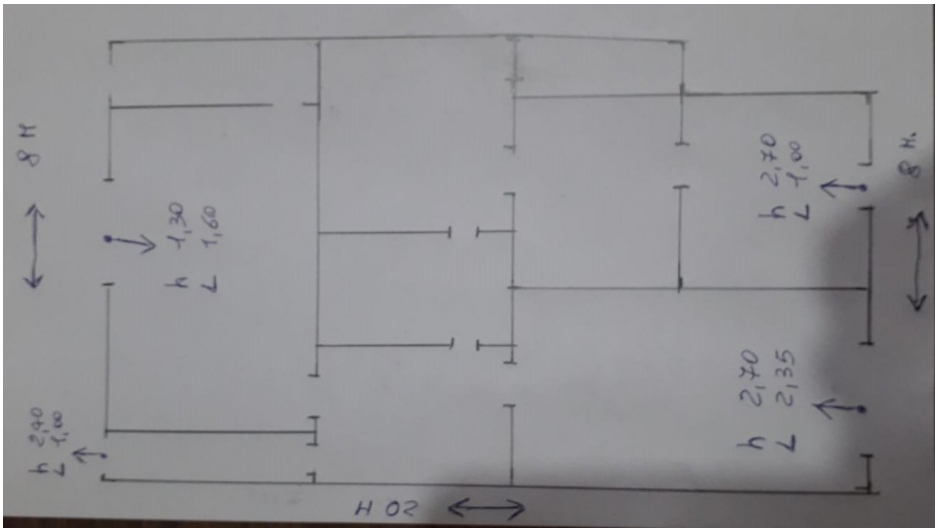
Luogo: Muro Leccese

Tipologia: A schiera

Volume: 840 mc

Prospetti

Pianta



Immobile n.9

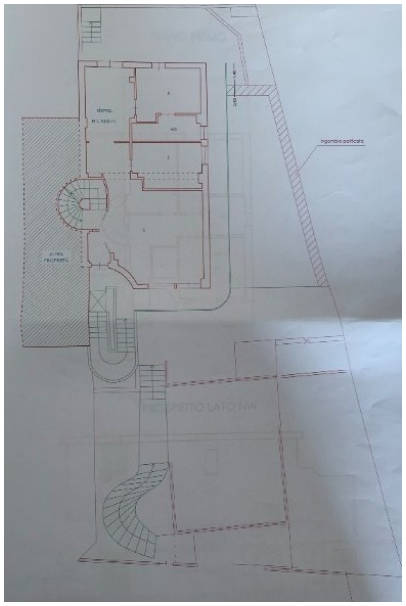
Luogo: Falconara

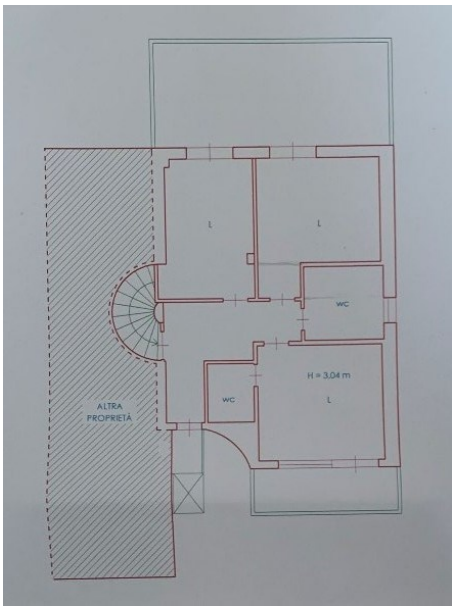
Tipologia: Villetta

Volume: 618.75 mc

Prospetti

Pianta





Immobile n.10

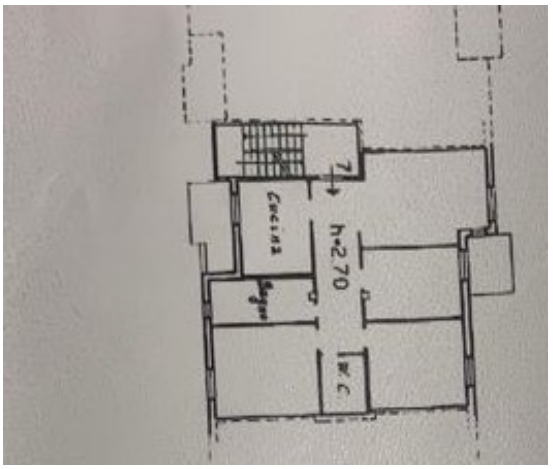
Luogo: Monte San Giusto

Tipologia: Condominio

Volume: 4894.56 mc

Prospetti

Pianta



Bibliografia

- Normativa Europea EN ISO 15221: Facility Management
- http://www.tdmconsulting.it/real-estate-cose/
- https://www.nomisma.it/valorizzazione-patrimonio-immobiliare/
- Real Estate Management: Materiali di Asset e Facility di Matteo Belardi, Stefano Luigi Mastrodonato
- Decreto legislativo 192/2005, Articolo 4, comma 1
- https://www.wekiwi.it/main/efficientamento-energetico/#:~:text=Quando%20si%20parla%20di%20efficientamento,di%20produzione%20o%20di%20consumi.
- https://www.sorgenia.it/guida-energia/efficientamento-energetico-cose
- https://www.acea.it/guide/efficientamento
- Legge di Bilancio del 27 dicembre 2017, n. 205
- Totale energy use in buildings: Analysis and Evaluation Methods; (Annex 53)
- Reduced-order modeling for energy performance contracting - Giretti A, M. Vaccarini a , M. Casals b , M. Macarulla b , A. Fuertes c , R.V. Jones
- UNI EN ISO 6946:2008.
- UNI EN ISO 10456:2008
- UNI 10351:1994
- UNI EN ISO 1450
- Learning Dynamic Bayesian Networks: Algorithms and Issues - Alex Black, Kevin Korb, Ann Nicholson Clayton School of Information Technology, Monash University
- A decision support system for scenario analysis in energy refurbishment of residential buildings - Alberto Giretti 1,*, Alessandra Corneli 1 and Berardo Naticchia
- Sistemi di supporto alle decisioni per il real estate management- Veronica Iannotta e Laura Strozzieri