



Dipartimento di Architettura e Design

Corso di laurea magistrale in  
Architettura per il progetto sostenibile

**TESI DI LAUREA MAGISTRALE**

Anno accademico 2017 - 2018

**IMPATTO DI SISTEMI DI  
AUTOMAZIONE E GESTIONE ENERGETICA  
SULLA DOMANDA DI ENERGIA E SUL COMFORT  
INTERNO NEGLI EDIFICI RESIDENZIALI**

Relatore:

Prof. Alfonso Capozzoli

Correlatore:

Arch. Sabrina Romano

Candidato:

Claudia Olivotto



Questa tesi rappresenta, senza dubbio, la conclusione di un percorso che mi ha permesso di crescere sia come professionista che come persona.

Per quanto riguarda il primo aspetto si deve ringraziare innanzitutto il professore Alfonso Capozzoli per avere supervisionato il lavoro svolto e l'architetto Sabrina Romano dell'ENEA per aver fornito i dati reali riguardanti l'edificio simulato. Un ringraziamento va anche agli assistenti che mi hanno seguita nella modellazione, in particolare Silvio e Marco.

Tuttavia, come ho accennato, tale elaborato è collocato al termine di un percorso non solo professionale ma anche di accrescimento personale e vorrei dedicarlo ai miei genitori, Antonella e Paolo, senza i quali non avrei potuto raggiungere i risultati e le soddisfazioni che fino ad ora ho vissuto. Un grazie particolare va anche a mio fratello Matteo per esserci sempre stato qualora avessi bisogno, in particolare modo per tutto ciò che concernesse tecnologia e informatica.

Tengo particolarmente a ringraziare anche tutte le persone che ho conosciuto e che sono diventate importanti: Chiara - la mia ex coinquilina – che è stata testimone in prima linea di tutte le follie di un apprendista architetto, Chiara per essere stata un'ottima amica nonostante il grande difetto di essere diventata ingegnere, Laura per tutte le avventure vissute assieme, Maria per il costante sostegno mostratomi e Martina per essermi sempre stata accanto in questo lungo percorso universitario. Vorrei ringraziare anche Sofia per questi otto anni di amicizia, consigli e tante risate. In ultimo, ma non ultimo per importanza, ringrazio quella persona con la quale, in quest'ultimo anno, ho condiviso momenti molto belli e altri più difficoltosi che tuttavia ci hanno permesso di legarci l'uno con l'altro più di quanto avrei immaginato il primo giorno di atelier.



## **INDICE:**

<b>Abstract</b> .....	7
<b>Abstract (english version)</b> .....	9
<b>Introduzione</b> .....	13
<b>Capitolo 1</b> .....	25
1.1 IoT e Smart Monitoring negli edifici residenziali .....	26
1.2 Normativa EN 15232 .....	37
1.3 Impianto domotico .....	42
<b>Capitolo 2: Obiettivo tesi</b> .....	49
<b>Capitolo 3: Caso studio</b> .....	53
3.1 Edificio I .....	54
3.1.1 Informazioni generali .....	54
3.1.2 Descrizione dello stato di fatto .....	55
3.1.2.1 Pianta .....	55
3.1.2.2 Involucro opaco .....	55
3.1.2.3 Involucro trasparente .....	56
3.1.2.4 Impianto .....	56
3.1.2.5 Profili d'uso locali .....	57
3.1.2.6 Elettrodomestici e luci interne .....	58
3.2 Edificio II .....	60
3.2.1 Informazioni generali .....	60
3.2.2 Descrizione dello stato di fatto .....	60
3.2.2.1 Pianta .....	60
3.2.2.2 Involucro opaco .....	61
3.2.2.3 Involucro trasparente .....	61

3.2.2.4 Impianto.....	61
3.2.2.5 Profili d'uso locali .....	62
3.2.2.6 Elettrodomestici e luci interne .....	63
<b>Capitolo 4: Modellazione .....</b>	<b>65</b>
4.1 Simulazione dinamica tramite il software Ida Ice .....	66
4.2 Modellazione del caso studio .....	68
4.3 Risultati modellazione .....	70
<b>Capitolo 5: Logiche di controllo .....</b>	<b>73</b>
5.1 Algoritmi di controllo .....	74
5.2 Algebra booleana .....	85
5.3 Logiche di controllo .....	87
5.3.1 Logiche di controllo - apertura finestre .....	88
5.3.2 Logiche di controllo - regolazione sistemi oscuranti .....	93
5.3.3 Logiche di controllo - riscaldamento .....	97
5.3.4 Logiche di controllo - raffrescamento .....	99
5.3.5 Logiche di controllo - illuminamento .....	101
5.3.6 Definizione della classe di automazione secondo la EN 15232.....	104
<b>Capitolo 6: Risultati e conclusioni .....</b>	<b>107</b>
6.1 Risultati finali .....	108
6.1.1.1 Risultati giornalieri - stagione invernale .....	109
6.1.1.2 Risultati giornalieri - stagione estiva .....	111
6.1.2.1 Risultati settimanali - stagione invernale .....	113
6.1.2.2 Risultati settimanali - stagione estiva .....	115
6.1.3.1 Risultati annuali - fabbisogno termico .....	118
6.1.3.2 Risultati annuali - fabbisogno elettrico .....	119

6.2 Conclusioni .....	121
<b>Bibliografia</b> .....	124



## **Abstract**

La presente tesi si inserisce nel contesto generale di ricerca e sviluppo di metodologie atte a controllare e ridurre i consumi del fabbisogno energetico dell'edificio attraverso processi di gestione automazione. La tesi si inquadra nell'ambito di una collaborazione in atto con ENEA. Tale obiettivo è stato perseguito analizzando gli effetti derivanti dall'implementazione di un impianto domotico in edifici residenziali. Le tecnologie che costituiscono il sistema interagiscono in maniera sinergica tra loro intervenendo sui principali fattori alla base della salute, comfort e sicurezza dell'occupante.

Nel lavoro di tesi è stata effettuata un'analisi critica sulle tecnologie IoT in edifici residenziali, sulla struttura e sul funzionamento di un impianto domotico.

Il lavoro è proseguito ipotizzando l'inserimento dell'impianto domotico in un edificio reale, sito nel comune di Roma, che per le sue caratteristiche fisiche e geometriche potesse essere considerato rappresentativo di una certa tipologia di edilizia residenziale. Si è quindi proceduto con la modellazione energetica in regime dinamico dello stato di fatto ottenendo in questo modo un modello calibrato di baseline. È stato pertanto necessario concentrarsi sullo sviluppo delle logiche di controllo, in linea con la normativa vigente EN 15232, che permette di valutare l'impatto di strategie e tecnologie che consentono di regolare e ottimizzare il funzionamento degli impianti in funzione delle condizioni al contorno. Le strategie di automazione e controllo sono state selezionate sulla base del report Report/Rds/2015/020 sviluppato dal Politecnico di Torino e riguardano l'ottimizzazione della qualità dell'aria interna, del comfort termico e del comfort visivo e la riduzione del fabbisogno energetico sia nella stagione di riscaldamento che in quella di raffrescamento.

A tal fine sono state modellate logiche di automazione sull'apertura delle finestre, sulla chiusura dei sistemi oscuranti, sull'accensione/spegnimento dell'impianto di riscaldamento e raffrescamento ed, infine, sull'accensione/dimmerazione dell'impianto di illuminazione. Ognuna di queste logiche prevede il rilevamento di alcune grandezze fisiche di input e, qualora esse superassero i valori limiti di soglia, alcune azioni di output per riportare entro i limiti prestabiliti i diversi valori misurati.

L'impatto delle strategie di regolazione ed automazione è stato valutato in termini

di variazione del fabbisogno energetico ed, in un secondo momento, in termini di comfort interno, sia termico che visivo. Si è trovato che l'implementazione di strategie di controllo e automazione su un edificio residenziale può comportare un risparmio sia per quanto riguarda il consumo di energia elettrica sia di energia termica, andando inoltre a migliorare il comfort termico e luminoso sulla base della reale presenza dell'occupante all'interno degli ambienti, in modo tale da prevenire sprechi.

Risulta evidente come quanto detto si rifletta sia in un risparmio economico dell'utente finale sia in un risparmio delle risorse ambientali impiegate per la produzione di energia.

La presente tesi risulta pertanto un contributo al lavoro di ricerca in merito all'applicazione dell'impianto domotico come strumento efficace di riduzione del fabbisogno termico ed elettrico mediante lo sviluppo di logiche di controllo sempre più dettagliate.

## **Impact of automation and energy management system on the energy demand and internal comfort in residential buildings**

### **Abstract (english version)**

The present thesis can be placed in a context of research and development of strategies whose aim is to control and reduce buildings energy requirements through management and automation processes.

The thesis is part of the current collaboration with ENEA. This objective can be achieved with the analysis of the effects resulting from the employment of an automation system inside residential buildings. The system components can interact each other by changing some factors that are at the basis of flat occupants health, comfort and safety. In this thesis it has been done a critical analysis of the IoT technologies in residential buildings, the structure and the functioning of automation systems.

The work proceeded with assumption of the integration of an automation system in a real building, located in Rome, with such physical and shape characteristics that it can be referred to as a reference of a certain typology of residential building. A further phase has been based on the dynamic modelling of the existing building in order to obtain a calibrated baseline model.

Hence, it has been necessary the focus on the control logic, following the current legislation EN 15232 since it allows to evaluate the impact of the strategies and the technologies that are linked with the regulation of the plant in relation with the boundary conditions.

The automation and control strategy have been chosen in accordance with the Report/Rds/2015/020 by Politecnico di Torino and can be related to the indoor air quality maintenance, thermic and visual comfort and the reduction of the energy demand both in the heating and cooling season.

In order to release this idea it has been essential to model the automation logics of windows opening, shutters closing, heating and cooling system condition and, finally, illumination system management.

Each of these logics receive some physics measurements as an input, and, in case of exceeding of limit values, react with some output actions to normalize every abnormal value received.

The impact of the regulation and automation strategy has been evaluate in terms of the variation of the energy demand and, subsequently, in terms of internal comfort, both thermal and visual comfort.

It was demonstrated that the adoption of an automation system in a real building can lead to a reduction of the electric and energy consumption, while also improving the thermic and light comfort linked to the real occupants presence inside the rooms, to cut down every type of waste.

It is clear that what was stated has consequences either on the user economy and on the environmental resources involved in the energy production process.

The present thesis results a contribution to the research work in relation to the application of an automation system as an efficient solution in order to reduce the electric and energy demand using some more and more detailed control logics.





# ***INTRODUZIONE***

La tematica dei cambiamenti climatici è stata posta all'attenzione mondiale a partire dal 1979, anno in cui la conferenza mondiale relativa a tale argomento ha, per la prima volta, denunciato i cambiamenti a cui si stava assistendo imputandone, in buona parte, la responsabilità all'uomo. Che fossero normali alcune fluttuazioni climatiche decadali o secolari era dimostrato dalla comunità scientifica, tuttavia in quegli ultimi anni si stavano constatando dei comportamenti anomali non imputabili a tali fluttuazioni naturali. La causa principale era stata individuata nella massiccia immissione di gas serra nell'atmosfera. Questo era dovuto alle attività antropiche come gli insediamenti industriali e la combustione di idrocarburi (gas di scarico, riscaldamento domestico) [1].

Nel 1988, col fine di approfondire quanto enunciato il decennio precedente, è stato istituito un comitato ONU sul clima: l'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Questo aveva, e ha tuttora, il compito di valutare e raggruppare l'informazione scientifica relativa alla tematica dei cambiamenti climatici e agli impatti ad essi dovuti nel campo socio-economico, ecologico e medico [2].

La definizione che è stata data di cambiamento climatico, da parte della Convenzione Quadro delle Nazioni Unite, è: *“il cambiamento del clima che sia attribuibile direttamente o indirettamente ad attività umane, che alterino la composizione dell'atmosfera planetaria e che si sommino alla naturale variabilità climatica osservata su intervalli di tempo analoghi”* [3]. A livello globale, quindi, si registrano l'aumento della temperatura media, dell'evaporazione dell'acqua e delle conseguenti precipitazioni. Questo porta ad uno scioglimento dei ghiacci, fattore che genera a sua volta un innalzamento del livello del mare. È stato inoltre registrato un aumento degli eventi climatici estremi, come cicloni o alluvioni. Si ha poi un impatto anche a livello regionale, che dipende ovviamente dall'ubicazione della zona considerata. Il bacino del Mediterraneo, ad esempio, viene considerato un'area critica a rischio. Tuttavia i cambiamenti climatici hanno provocato anche effetti sulla salute, come riconosciuto dallo stesso IPCC. L'emissione di gas serra, ed il relativo assottigliamento dello strato di ozono atmosferico, ha comportato un incremento dei tumori della pelle. La presenza di sostanze inquinanti nell'aria è la causa principale dell'aumento di malattie dell'apparato cardio-polmonare. Gli eventi climatici eccezionali,

come inondazioni e tempeste, hanno favorito la diffusione di malattie come dengue, malaria e febbre

emorragica mentre l'inquinamento dell'acqua potabile porta all'insorgenza di casi di salmonella e colera [4].

Per tutti questi motivi i cambiamenti climatici hanno richiesto un intervento immediato delle autorità competenti, sia a livello mondiale che nazionale. Un primo passo per poter agire efficacemente è stato quello di individuare le principali cause dell'inquinamento del pianeta. Tra queste, il settore edilizio copriva una percentuale notevole. Partendo dalle problematiche indicate, l'architettura ha cominciato a dare importanza e centralità all'ambiente e alle sue risorse. Sulla base di questo pilastro si è sviluppata una differente concezione di "fare architettura": sono nati i concetti di architettura ecologica, architettura bioclimatica, bioedilizia, bioarchitettura e architettura sostenibile. Ognuna di esse affronta, con sfumature differenti, la tematica comune rappresentata dall'importanza, dalla fragilità e dalla necessità di proteggere e salvaguardare l'ambiente e le risorse disponibili all'uomo.

Si è proceduto quindi alla ricerca e allo sviluppo di materiali per l'edilizia che impattassero poco sull'ambiente, andando a riscoprire tecniche della tradizione locale, come l'uso del legno, della paglia o della terra cruda. Si è successivamente risposto alla necessità di riconoscere e distinguere quei materiali e processi costruttivi che avessero un apporto positivo alla questione, andando a creare differenti etichette (marcatura CE, Ecolabel, EPD, Swan ecological label, the Blue Angel, NF environment..) e certificazioni, come l'LCA. Questa, acronimo di Life Cycle Assessment, ha lo scopo di valutare gli impatti sull'ambiente di prodotti o processi produttivi considerandoli nell'intero ciclo di vita. Si analizzano, di conseguenza, sia gli input, come le materie prime necessarie e l'energia richiesta nel processo, che gli output, rappresentati dalle emissioni, dagli scarti e dai rifiuti prodotti. Tale certificazione prevede quattro fasi (definizione degli obiettivi, analisi di inventario, analisi degli impatti e interpretazione/miglioramento), tutte normate dalle ISO 14040 [1].

Si è contemporaneamente proceduto alla promulgazione di normative e limiti da rispettare in modo tale che il campo architettonico apportasse il suo contributo al controllo delle emissioni inquinanti e dell'impatto ambientale. Questo si è tradotto

nel riuscire a diminuire in consumo e il fabbisogno energetico degli edifici. In tale maniera si abbassa la richiesta di energia dal momento che, attualmente, la maggior parte di essa viene prodotta sfruttando risorse del pianeta non rinnovabili.

La sensibilità verso il consumo energetico si è sviluppata negli anni '70 a seguito della guerra del Kippur del 1973 quando i paesi produttori di petrolio degli stati del Medio Oriente hanno iniziato un embargo verso gli Stati Uniti e alcuni paesi occidentali come risposta all'aiuto che questi ultimi avevano fornito ad Israele negli scontri che proseguivano dal 1967. Il mondo occidentale, tra cui l'Europa, ha vissuto la sua prima ed importante crisi energetica, che ha portato all'attenzione di tutti la dipendenza che si aveva verso il petrolio. Da questo è conseguito l'interesse verso ricerche per l'individuazione di fonti alternative di energia [5].

Il 30 aprile del 1976 viene approvata la legge 373, la prima di una lunga serie di normative. Essa è divisa in tre parti: la prima concerne gli impianti di produzione di calore ed i sistemi di termoregolazione, la seconda tratta l'isolamento termico degli edifici e la terza esplicita le sanzioni previste nel caso in cui non venissero rispettate le condizioni poste.

La legge 373/76 è stata successivamente integrata con tre documenti: il D.P.R. 1052/77, con il quale si definiscono i criteri di applicazione della legge ed i termini di presentazione della relazione tecnica, il D.M. 10/3/77, che stabilisce la divisione del territorio in zone climatiche ed il valore dei coefficienti di dispersione del calore degli edifici, ed il D.M. 30/7/1986, con il quale venivano aggiornati i coefficienti di dispersione termica sulla base del rapporto di forma  $S/V$  (superficie disperdente/volume riscaldato) dell'edificio e della fascia climatica nella quale è ubicato. Pertanto si vincola l'intervento di isolamento termico ad alcuni fattori, geometrici ed ambientali, in modo da rendere la scelta progettuale sempre più mirata ed efficace. La legge precedente viene in seguito sostituita dalla Legge 10 del 9 gennaio 1991. Questa definisce il passaggio dal limite della potenza termica installabile al limite del consumo energetico annuo. Assumono pertanto importanza fattori come l'inerzia termica dell'edificio (parametro che misura la capacità che può avere un determinato materiale ad opporsi al passaggio del flusso di calore e ad accumulare parte di esso), gli apporti solari gratuiti, l'elevata efficienza dei sistemi impiantistici,

l'uso di energia derivante da fonti rinnovabili e, infine, il recupero termico.

Prima dell'importante Direttiva del 2002 è necessario citarne altre tre:

- Direttiva 92/42/CE, che definisce i requisiti per il rendimento delle nuove caldaie per l'acqua calda sanitaria, alimentate con combustibili sia liquidi che gassosi;
- Direttiva 93/76/CEE, che pone un limite alle emissioni di anidride carbonica incentivando il raggiungimento dell'efficienza energetica dell'edificio;
- Direttiva 96/57/CE, la quale prescrive i requisiti di rendimento energetico di frigoriferi e congelatori;

La Direttiva 2002/91/CE assume un ruolo fondamentale nel quadro normativo in quanto enuncia gli obiettivi comunitari relativi alla tematica della prestazione energetica. Viene infatti previsto che gli Stati Membri definiscano un metodo per calcolare le prestazioni energetiche degli edifici, rispettino dei requisiti minimi di efficienza energetica per gli edifici di nuova costruzione, o per quelli interessati da una riqualificazione importante, sviluppino un sistema adeguato per certificare il loro rendimento energetico ed, infine, prevedano un calendario per lo svolgimento di regolari ispezioni agli impianti.

Vengono quindi meglio specificate le definizioni di rendimento, attestato di rendimento e requisiti di rendimento. Nel primo caso si parla di rendimento dell'edificio intendendo la quantità di energia necessaria, o che si prevede tale, per poter soddisfare i fabbisogni dell'edificio connessi al riscaldamento, raffrescamento, ventilazione, produzione di acqua calda sanitaria e illuminazione. L'attestato di rendimento energetico è quel documento ufficiale nel quale viene riportato il valore del calcolo del rendimento ottenuto dalla metodologia indicata nell'allegato della normativa. I requisiti di rendimento energetico vengono richiesti per edifici di nuova costruzione o edifici interessati da ristrutturazioni importanti [6].

Con la Direttiva europea 2010/31/UE, del 19 maggio 2010, che revisiona la precedente e viene recepita in Italia dal D.L. 63/2013, si pongono i limiti sul consumo energetico annuo, oltre che per il riscaldamento invernale, come già previsto, anche per la climatizzazione estiva, la ventilazione, l'illuminazione e la produzione di acqua calda sanitaria. Tali limiti sono stati stabiliti a seguito dell'introduzione

del concetto di costo globale, vale a dire quel costo dato dalla somma del costo di costruzione e del costo di esercizio calcolati per l'intero ciclo di vita dell'edificio. L'EPBD recast, nome con il quale è conosciuta la Direttiva 2010/31/UE, porta alla concezione degli nZEB, ovvero di edifici a energia quasi zero. Questi sono definiti come quegli edifici che, assicurando una elevata prestazione energetica, riescono ad avere un fabbisogno energetico molto basso, o quasi nullo, al quale si riesce a sopperire, in misura significativa, con energia derivante da fonti rinnovabili. È stato quindi posto l'obiettivo comunitario per il 2020, conosciuto con la sigla 20-20-20, in quanto si chiede agli Stati Membri di ridurre del 20% le emissioni di anidride carbonica congiuntamente al raggiungimento del 20% di produzione di energia da fonti rinnovabili [7].

Tuttavia alla definizioni di questi intenti si è arrivati, oltre che tramite lo sviluppo del quadro normativo, anche partendo dagli spunti e dagli obblighi definiti durante conferenze mondiali aventi come argomento principale il clima e l'ambiente.

La preservazione delle riserve naturali del pianeta e la qualità dell'ambiente risultano pertanto l'obiettivo primario a cui ambire, ovvero quel "fil-rouge" che lega tutte le più importanti decisioni mondiali degli ultimi cinquant'anni riguardanti tali tematiche.

Nel 1972 si è tenuta, a Stoccolma, la prima conferenza delle nazioni unite sull'ambiente umano. Questo evento è stato il primo incontro internazionale durante il quale si è posta la protezione dell'ambiente naturale come condizione indispensabile e imprescindibile per lo sviluppo della popolazione sia attuale che futura. Il documento redatto per questa occasione, la "Dichiarazione di Stoccolma", è considerato pertanto una pietra miliare per il concetto di sviluppo sostenibile, che viene successivamente approfondito, nel 1987, con il rapporto Brundtland. Questo espone la cosiddetta regola dell'equilibrio delle tre E, ovvero un equilibrio tra economia, equità sociale ed ecologia, alla quale l'UNESCO aggiungerà, nel 2001, la diversità culturale, facendola diventare il quarto pilastro per uno sviluppo sostenibile. Viene inoltre enunciata la definizione di sostenibilità di un ecosistema come la capacità di mantenere la biodiversità nel futuro, utilizzando le risorse naturali ad un ritmo tale da permettere la loro naturale rigenerazione. Si parla quindi di sviluppo

sostenibile quando si intende una serie di ambiti e di attività umane che permettono un progresso della situazione attuale senza tuttavia compromettere la stessa possibilità alle generazioni future.

Sempre nell'ultimo ventennio dello scorso secolo risultano importanti altri interventi, come la messa al bando dei gas dannosi per l'ozono stratosferico, nel protocollo di Montreal del 1987, o la stesura dell'Agenda 21 durante il summit di Rio nel 1992. Si tratta di un documento di intenti, costituito da 40 capitoli e suddiviso in quattro sezioni (dimensioni economiche e sociali, conservazione e gestione delle risorse per lo sviluppo, rafforzamento del ruolo delle forze sociali e strumenti di attuazione), che racchiude le azioni da mettere in pratica per realizzare lo sviluppo sostenibile. A livello europeo, le città e le regioni si impegnano ad attuare l'Agenda 21 a livello locale tramite la Carta di Aalborg del 1994, prodotta durante la prima conferenza europea sulle città sostenibili.

Nel 1997 è stato invece firmato il protocollo di Kyoto per stabilire i tagli alle emissioni di gas inquinanti responsabili dell'effetto serra e del riscaldamento del pianeta. Per i paesi industrializzati è stato quindi introdotto l'obbligo di ridurre le emissioni inquinanti (biossido di carbonio e gas serra come metano, ossido di azoto, idrofluorocarburi, perfluoro carburi e esafluoruro di zolfo) nel periodo 2008-2012 in misura non inferiore al 5.2% rispetto alle emissioni registrate nel 1990. La Comunità europea ha firmato il protocollo nel 1998. Esso è stato poi ratificato dai paesi firmatari nel 2002 per entrare in vigore nel 2005. Il secondo periodo di adempimento di tale protocollo è previsto nell'intervallo 2013-2020 e vede l'attuazione dell'emendamento di Doha. Questo impone ai 38 paesi aderenti una riduzione del livello di emissioni pari ad almeno il 18% rispetto al dato registrato nel 1990. L'Unione Europea, con i suoi 28 Stati Membri, ha decretato di innalzare tale soglia, come già accennato, al 20%.

L'ultima importante conferenza sul clima si è tenuta a Parigi dal 30 novembre all'11 dicembre del 2015. Il proposito è quello di limitare l'innalzamento della temperatura globale sotto il valore di 2°C nel periodo 2015-2100. L'accordo è entrato in vigore l'anno successivo, il 5 ottobre, dopo il raggiungimento della soglia dell'adesione dei 55 paesi responsabili complessivamente di almeno il 55% dell'emissioni

nocive [8].

Tutti questi incontri e trattati hanno portato alla definizione dei principali obiettivi a cui devono mirare le costruzioni per essere definite sostenibili. Questi sono [1]:

- Gestione dell'acqua;
- Tutela della salute degli occupanti;
- Preservazione dell'ambiente;
- Garanzia di luce naturale negli ambienti interni;
- Accessibilità degli spazi;
- Protezione da rischi (incendi, sismi..);
- Riduzione del rumore;
- Raggiungimento di determinate prestazioni termiche ed energetiche;
- Gestione dei rifiuti;

Questi concetti, applicati all'architettura, si traducono principalmente nel tentativo di realizzare edifici sempre più prestazionali a livello energetico anche attraverso l'uso di materiali e tecnologie costruttive poco inquinanti ed impattanti sull'ambiente.

I macro-interventi possibili per adempiere l'obiettivo di risparmio energetico sono il miglioramento delle prestazioni del sistema involucro-impianto e l'introduzione dell'impianto domotico per il controllo e la gestione dei consumi energetici.

Entrambe le soluzioni sono realizzabili sia su edifici esistenti che sulle nuove costruzioni.

Per quanto riguarda la prima proposta, ovvero l'incremento delle prestazioni dell'edificio, le azioni previste riguardano interventi sull'involucro opaco, sull'involucro trasparente e sull'impianto.

Diverse sono le soluzioni attualmente disponibili: inserimento/addizione di materiale isolante alle murature (cappotto, insufflaggio, applicazione di pacchetti tecnologico specifici), sostituzione dei serramenti con quelli di nuova generazione, caratterizzati da doppi o tripli vetri e un ridotto valore della trasmittanza del telaio e la sostituzione della caldaia con quelle più prestazionali (caldaie a condensazione) e/o l'inserimento di pompe di calore.

Per quanto riguarda, invece, l'impianto domotico le soluzioni possibili, con i

relativi benefici, sono in continua evoluzione in quanto si tratta di un campo relativamente nuovo per il quale l'innovazione e la sperimentazione sono due componenti fondamentali. È tuttavia innegabile che i sistemi di automazione e controllo giocano un ruolo centrale nel comportamento energetico del sistema edificio-impianto, come riconosciuto dalla Commissione Europea. Questa infatti, a partire dallo scorso anno, sta lavorando per introdurre una certificazione, che attesti il livello di "smartness" degli edifici, come documento integrativo della certificazione energetica già esistente. Lo Smart Readiness Indicator (SRI) [1] dovrebbe essere quel parametro che valuta la capacità del sistema edificio-impianto nel saper interagire facilmente con l'occupante per garantire la sua sicurezza, benessere, comfort termico e visivo. In altre parole, l'indicatore SRI andrà ad indicare la disponibilità dell'impianto di automazione, ed il suo relativo livello definito nella Norma EN 15232 [9], in relazione alla sua facilità d'uso da parte dell'utente, in modo da garantire i livelli prestazionali richiesti agli impianti installati nell'edificio, e alla sua semplicità negli interventi di manutenzione.

Sono inoltre stati introdotti i concetti di Building Automation System (BAS) e di Building Energy Management System (BEMS). Il primo definisce un sistema che ha il compito di controllare e monitorare i servizi degli edifici sostenibili, tra cui il riscaldamento, il raffrescamento, la ventilazione, l'aria condizionata, l'illuminazione, le schermature e la sicurezza. Tale sistema sta ricevendo sempre più attenzione da parte dei professionisti del settore proprio per il suo potenziale di ridurre i consumi energetici migliorando, allo stesso tempo, il comfort dell'occupante [10]. Il secondo, invece, ha come obiettivo quello di monitorare il consumo reale istantaneo di energia e di agire sul funzionamento di alcune apparecchiature presenti nell'abitazione in modo da evitare il superamento della potenza massima fornita dalla rete di distribuzione elettrica. La riduzione di potenza che si applica tiene tuttavia conto di una lista di priorità dei carichi elettrici definita dall'occupante stesso per garantire, in ogni istante, il suo comfort [11].

L'efficacia dell'integrazione dell'impianto domotico nell'edificio risulta in modo più evidente nei calcoli del fabbisogno energetico eseguiti utilizzando una simulazione dinamica (UNI EN ISO 52016) [12], con intervallo orario, piuttosto che con

una simulazione in regime quasi stazionario, come quello prescritto nelle norme UNI TS 11300 [13].

La nuova norma UNI EN ISO 52016 è disponibile da marzo 2018 con il pacchetto di norme dell'ultima EPBD, a seguito della revisione che il Comitato di Normazione Europeo (CEN) esegue su mandato della Commissione Europea. Tuttavia la nuova norma UNI EN ISO 52016 non ha ancora modificato il quadro normativo in vigore in quanto questo avverrà solamente a seguito della pubblicazione degli allegati nazionali della serie 52000, previsti per il 2019. Questa norma pone nuove procedure per il calcolo dei fabbisogni energetici sia per il riscaldamento che per il raffrescamento, delle temperature interne e dei carichi termici sia sensibili che latenti [14].

La sostanziale differenza tra il calcolo in regime stazionario e quello in regime dinamico riguarda l'accuratezza e la precisione sia dei dati di input che di quelli di output. Nel primo caso, infatti, l'intervallo di tempo che si considera per la simulazione coincide con la stagione di riscaldamento. Inoltre i dati da immettere nel software di calcolo relativi alle condizioni climatiche esterne ed interne, agli apporti interni ed ai consumi risultano essere dei valori medi estrapolati dai valori reali. Questo porta ad avere, di conseguenza, una procedura di calcolo semplificata. Una piccola differenza si ha nel caso della simulazione in regime semi-stazionario, in quanto è possibile avere i valori mensili per ottenere quelli stagionali o annuali dalla somma delle mensilità corrispondenti.

Al contrario, invece, con la simulazione in regime dinamico si ottiene una valutazione più dettagliata, e quindi più precisa, perché si immettono i dati reali di ogni parametro che influisce sulle prestazioni dell'edificio, tanto esterne quanto interne. Allo stesso modo anche i dati di output che vengono calcolati dal software risultano molto più particolareggiati, aspetto questo che rende i modelli eseguiti in regime dinamico molto più affidabili rispetto a quelli eseguiti in regime stazionario.

Per tale motivo lo sviluppo della simulazione dinamica, e dei relativi software di calcolo, non può essere scisso dallo sviluppo delle potenzialità dell'impianto domotico dal momento che anch'esso ha necessità di lavorare con dati di tipo dinamico. Il progressivo sviluppo tecnologico degli impianti domotici ha permesso di assicu-

rarne l'efficacia e l'affidabilità. Questo è confermato anche dal fatto che si ha un crescente numero di nuovi edifici che annoverano tra gli aspetti più interessanti per la riduzione del consumo energetico proprio l'automazione. Nelle riviste del settore, come Casabella, Domus o The Plan, non è difficile trovare articoli che trattino tali tematiche. Tra gli ultimi esempi in essi riportati si possono citare la W.I.N.D. house, in Olanda (2015), il Monroc Hotel, in Val di Sole sulle Dolomiti del Trentino Alto Adige (2016) e il Mountain Design Hotel EdenSelva, in Val Gardena (2017) [15]. Quest'ultimo rappresenta un progetto molto interessante sia per le soluzioni architettoniche adottate sia perché alla base di ognuna di esse si aveva la volontà di declinare il concetto di sostenibilità nelle tematiche del ridotto impatto ambientale, alta efficienza energetica e uso di materiali naturali, come il legno.

Il progetto è stato firmato dagli architetti Paolo de Martin e Sarah Gasparotto e ha ottenuto la certificazione CasaClima in classe A.

Si tratta di un edificio che vede la coesistenza del calcestruzzo e del legno, volendo prevedere anche l'uso di materiali tipici del posto. L'esterno è caratterizzato pertanto da una facciata composta da listelli in microlamellare d'abete di kerto, disposti in modo tale enfatizzare il prospetto fungendo, nel contempo, da brise-soleil per filtrare l'affluenza della luce nelle camere. L'interno è stato invece pensato sottolineando le diverse aree funzionali della struttura.

Tuttavia uno degli aspetti principali del progetto riguarda l'installazione della domotica per la gestione di tutti i dispositivi automatizzabili. Essa controlla, ad esempio, l'impianto di riscaldamento, rappresentato da un generatore di calore a condensazione ad alta efficienza.



Figura 1: immagini raffiguranti due viste renderizzate del progetto dell'edificio [16]

Il funzionamento della domotica risulta tuttavia imprescindibile dalla presenza dei dispositivi IoT (Internet of Things), ovvero tutti quegli apparecchi che, connettendosi alla rete, rendono possibile la comunicazione di numerose informazioni e la concretizzazione di azioni prestabilite.

Come la domotica, anche le tecnologie IoT sono protagoniste di un importante sviluppo e diffusione nelle diverse categorie costituenti le città “smart”, come l’industria, la sicurezza, la mobilità, l’alimentazione e gli edifici, coinvolgendo persino il settore dell’arredamento.

Si può, in questo caso, citare il celebre Lift-Bit, presentato alla Triennale di Milano dallo studio Carlo Ratti Associati [17].



Figura 2: immagine del Lift-Bit [17]

Si tratta del primo progetto di divano trasformabile tramite il controllo digitale. L’insieme degli sgabelli modulari, a forma esagonale, è in grado di trasformarsi in poltrona, divano, chaise longue e letto tramite la connessione di tutti i componenti con un’app.

Quanto detto riassume i principali avvenimenti e decisioni degli ultimi decenni in quanto rappresentano il contesto culturale e normativo nel quale si inserisce l’oggetto della presente tesi. L’obiettivo è, infatti, approfondire le tecnologie citate, come la domotica e l’Internet of Things, applicandole a tre casi studio reali. Questo ha comportato lo sviluppo empirico di logiche di controllo e automazione tramite l’uso del software Ida Ice.

# ***CAPITOLO 1***

### ***1.1 IoT e Smart Monitoring negli edifici residenziali***

Il concetto di Smart Sustainable City rappresenta il risultato di un progressivo cambiamento della progettazione urbana. In particolare esso è la risultante dello sviluppo di tre tematiche principali: il concetto di sostenibilità, la diffusione dell'urbanizzazione e la crescita dell'ICT (Information and Communication Technologies). La città sostenibile è stata definita, in modo analogo al concetto di sviluppo sostenibile riportato nel capitolo introduttivo, come quell'agglomerato urbano che riesce a conciliare i bisogni e le necessità degli abitanti del presente senza compromettere la stessa possibilità alle generazioni future [18].

Le metropoli moderne hanno previsto l'integrazione dell'innovazione tecnologica nella progettazione sia della città che dell'edificio, come testimonia il primo piano strategico entrato in vigore nel 2009 in occasione di un summit a Rio de Janeiro. Il concetto di smart city è stato successivamente approfondito nell'ottobre del 2014 quando, a New York, si è tenuto l'Intelligent community forum. In quest'occasione sono stati enunciati i punti chiave da mettere in atto affinché si possa parlare di trasformazione delle città in nuclei urbani intelligenti.

Questi riguardano:

- Parcheggi pubblici intelligenti, ovvero parcheggi posti nelle zone più periferiche della città collegati con la zona centrale tramite il trasporto pubblico;
- Recupero del biogas dai rifiuti cittadini con l'intenzione di utilizzarlo come fonte di energia;
- Edifici intelligenti (Smart Building), ovvero la costruzione di edifici con alte prestazioni energetiche e basso impatto ambientale nei quali l'innovazione tecnologia gioca un ruolo fondamentale per il controllo, la gestione e la riduzione dei consumi energetici;
- Aree verdi presenti all'interno del tessuto cittadino per migliorare la qualità dell'aria;
- Uso e sviluppo delle energie rinnovabili per sopperire al fabbisogno energetico cittadino;
- Comunicazione digitale dei dispositivi, come tablet o smartphone, affinché il cittadino sia sempre informato, in tempo reale, della accessibilità di infrastrutture

e servizi, come ad esempio la disponibilità di parcheggi liberi, di percorsi alternativi in caso di traffico intenso ecc;

- Servizi di car sharing;
- Parcheggio online, ovvero la possibilità di prenotare in anticipo, tramite Internet, il posto auto in modo tale da prevenire ed evitare il tempo necessario per la ricerca di un parcheggio, diminuendo, di conseguenza, l'inquinamento dovuto alle emissioni nocive delle automobili;
- Impegno condiviso tra tutti i cittadini per la realizzazione ed il funzionamento di tale progetto.

Le principali smart cities, a livello europeo, risultano Barcellona e Londra. In Italia, invece, si distinguono le città di Genova e Torino, entrambe candidate al bando UE Smart Cities. Quest'ultima, in particolare, ha aderito nel 2009 al Patto dei Sindaci e, l'anno successivo, ha approvato il Piano d'azione per l'Energia Sostenibile. Fino ad ora Torino ha avviato 78 progetti principalmente nei campi di energia, ambiente, mobilità e sostegno ai cittadini, per un investimento complessivo di 248.689.107 € [19].

A livello nazionale è stata creata una piattaforma, l'Italian Smart Cities, che ha l'intento di favorire la comunicazione e il confronto tra diverse città, interessate all'attuazione di soluzioni smart, partendo dalla condivisione di esperienze, dati e progetti. Questa è stata realizzata dall'ANCI (Associazione Nazionale Comuni Italiani) partendo dal lavoro di ricerca e analisi svolto dall'Osservatorio Smart City.

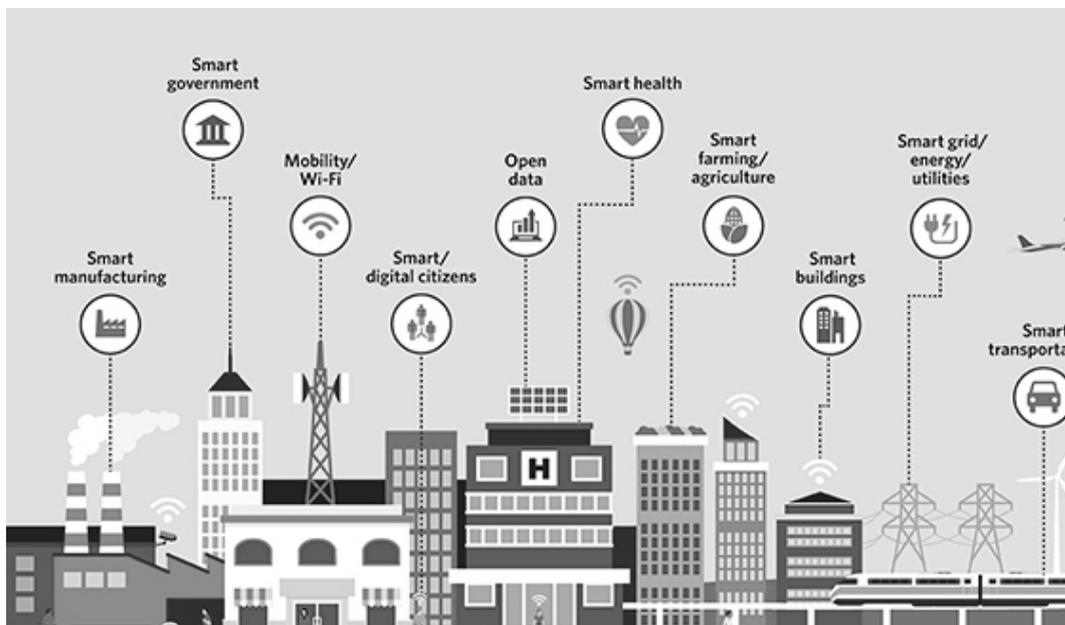


Figura 3: immagine riassuntiva dei componenti che costituiscono una Smart City [20]

Come è rappresentato nella precedente raffigurazione, un componente delle smart cities è la presenza di Smart Building, definiti anche Smart Home. Questa è definita come quell'edificio che offre la possibilità di gestire in modo automatico, o da remoto, tutti gli impianti ed i dispositivi dell'abitazione relativi al risparmio energetico, al comfort dell'occupante, e alla sicurezza, sia contro eventuali tentativi di intrusione che eventuali perdite d'acqua/gas ecc. Affinché questo risulti possibile è necessario che tutti i dispositivi presenti all'interno dell'abitazione siano collegati a Internet, per permettere sia la raccolta ed il monitoraggio di informazioni, sulla base delle quali il sistema andrà ad agire per garantire sicurezza e comfort nell'abitazione, sia il dialogo e l'interazione dei dispositivi tra loro, quello che in termini tecnici viene definito M2M (Machine to Machine) e tra loro stessi e la rete [21]. Questo prende il nome di IoT, ovvero "Internet of things". Tale termine, che definisce appunto tutti i dispositivi che nello svolgere la loro funzione prevedono un collegamento alla rete, è stato usato per la prima volta da Kevin Ashton, un ricercatore presso il Massachusetts Institute of Technology, nel 1999, sebbene fosse stato influenzato dal libro "When things start to think" di Neil Gershenfeld.

Gli studi del professor Ashton sull'IoT erano, all'epoca, connessi con quelli della tecnologia RFID (Radio – Frequency IDentification) nell'ambito commerciale, in modo tale da rendere rintracciabile ogni prodotto all'interno del negozio (magazzino, scaffale..) [22].

Risulta tuttavia importante sottolineare che M2M e IoT non sono sinonimi ma rappresentano due concetti separati e distinti, tanto che si potrebbe definire l'M2M come il precursore dell'IoT, in quanto risalente ai primi anni '70. Le principali differenze tra i due riguardano la pervasività ("cose"/macchine), il contesto (connesso/isolato), la tecnologia di rete (Internet/altre), le competenze coinvolte (tecnologie informatiche/tecnologie dei dispositivi), la scalabilità (semplice/connessa), l'approccio (standard/proprietario), il tempo di reazione (quasi real-time/batch) e la garanzia di consegna del dato (garantita/best effort) [23].

La struttura dell'Internet of Things delinea tre elementi costitutivi: le "cose", come espresso nella dicitura, ciò che è indispensabile alle "cose" per connettersi ad Internet e trasferire i dati nel cloud e la visualizzazione/interpretazione delle

informazioni contenute in questi dati in modo tale da prevedere un'azione appropriata.

I dispositivi definiti IoT sono differenziati tra loro in base alla complessità del lavoro che riescono a svolgere.

Si hanno quindi:

- Dispositivi che possono rilevare e comunicare i dati;
- Dispositivi che possono rilevare più tipologie di dati per trasferirli in un secondo momento;
- Dispositivi che sono in grado di effettuare un primo livello di elaborazione dei dati (selezione) in modo tale da trasferire solamente quelli che corrispondono a determinati requisiti;
- Dispositivi che, oltre a raccogliere i dati ed effettuare una prima selezione, sono in grado di effettuare alcune semplici azioni sulla base di indicazioni impostate;
- Dispositivi che comprendono tutte le funzioni finora descritte, ovvero rilevazione e selezione dei dati, trasmissione di solo parte di essi, effettuazione di azioni sulla base di quanto programmato a cui si aggiunge la capacità di effettuare azione in funzione di una capacità elaborativa locale.

Nell'ambito architettonico trovano spesso applicazione dei sensori aventi come scopo quello di rilevare e misurare delle proprietà fisiche, sulla base delle quali si applica o meno una determinata azione per mantenere o ripristinare le condizioni di salubrità e comfort dell'ambiente indoor. Essi sono divisi in [18]:

- Sensori di localizzazione (GPS);
- Sensori ottici (fotodiodi, sensori IR e UV);
- Sensori luminosi (fotocellule);
- Sensori di immagine (infrarossi);
- Sensori di suono (microfoni);
- Sensori di temperatura (termometri);
- Sensori di calore (bolometri);
- Sensori di movimento;

Essi rientrano nella classificazione di sensori IoT nel momento in cui sono collegati a Internet in modo tale da inviare costantemente i dati rilevati ad una rete centrale. L'innovazione tecnologica costituita dall'IoT può risultare fondamentale per lo sviluppo architettonico degli edifici, tanto per le nuove costruzioni quanto per gli edifici esistenti, trovando persino applicazione nel campo del restauro [24] [25].

I sensori IoT utilizzati nei casi studio presi in analisi sono:

- Smart Meter: dispositivi che consentono la telelettura e la telegestione dei contatori relativi all'erogazione di energia elettrica, gas e acqua;
- Smart plug: dispositivi per il controllo ed il monitoraggio dei carichi;
- Smart switch: dispositivi per il controllo dei condizionatori;
- Smart valve: valvole aventi la capacità di controllo di alcune regolazioni (pressione, temperatura) sulla base di quanto è stato programmato.

Risulta evidente come la Smart Home porti alla una raccolta di numerose informazioni derivanti dagli output dei diversi smart devices installati. Questa operazione viene riassunta nell'equazione [26]:

$$TDS = TDR + PL$$

dove le sigle TDS, TDR e PL sono l'acronimo, rispettivamente, di total data sent, total data received e packet loss. E' inevitabile, infatti, che una percentuale dei dati inviati dai sensori sia inutilizzabile in quanto invalidata da errori di lettura.

Affinché il monitoraggio dei parametri fisici, connessi al benessere e al comfort dell'occupante, risulti efficace è necessario che lo stesso sia costante. Questo comporta numerose rilevazioni nell'arco di un breve periodo di tempo, con la conseguente creazione di una grande mole di dati. Questi prendono il nome di Big Data, o Grandi dati, e sono contraddistinti dalle caratteristiche delle V: il Volume, la Varietà e la Velocità alla quale si aggiungono la Veracità, la Validità, il Valore e la Volatilità [18]. Vengono sostanzialmente definiti Big Data tutti quei dati che sono troppo grandi e pesanti per essere analizzati usando processi convenzionali.

Dal momento che nella Smart Home si ha il bisogno di analizzare questi dati il più rapidamente possibile, in modo tale da avere un quadro completo delle condizioni

dell'abitazione in tempo pressoché reale, sono stati sviluppati dei sistemi di controllo e analisi dei Big Data. Per tale motivo tecnologie IoT e sistemi di analisi dei Big Data rappresentano delle innovazioni interdipendenti che sono state e sono ancora sviluppate congiuntamente [27].

Per l'estrazione di conoscenze utili dalle informazioni fornite dai Big Data si possono utilizzare diversi strumenti (classificazione, clustering, regressione e altri algoritmi), tecniche (data mining, analisi statistiche..) e tecnologie (Hadoop, Spark, HBase..) [28].

Negli ultimi anni sono stati condotti diversi studi relativi allo sviluppo e all'uso degli IoT. Dai recenti dati pubblicati dall'Osservatorio Internet of Things del Politecnico di Milano [29] si ha la conferma di come il mercato della Smart Home, in Italia, sia in crescita: nel 2017 si ha avuto un incremento del 35% rispetto all'anno precedente, per un valore di 250 milioni di euro circa.

Dagli studi effettuati è risultato che le tre principali tipologie di soluzioni di IoT ricercate da parte dell'utente finale sono state, in ordine decrescente, le applicazioni relative alla sicurezza (impianti anti-intrusione, videocamere di sorveglianza, sensori..), alla gestione del riscaldamento ed alla gestione degli elettrodomestici.

La presenza nell'edificio di tutte queste tipologie risulta essere la soluzione migliore in quanto, oltre che alla sicurezza e al comfort, si può avere un notevole risparmio energetico, quantificabile tra il 10% ed il 50%. Come sostiene l'architetto ed ingegnere torinese Carlo Ratti: *“Oggi molta energia va persa per il riscaldamento o il condizionamento di edifici vuoti. Sincronizzando l'uso dell'energia con l'occupazione umana dello spazio possiamo creare un'architettura più sostenibile e responsabile, abbattendo teoricamente il consumo energetico del 40%”* [30].

L'importanza degli Iot e del sistema di automazione come metodi per ottenere un notevole risparmio energetico viene sottolineata anche dalle possibili tariffazioni dinamiche dell'energia elettrica.

Per rafforzare la sua elettrica da energie rinnovabili risulta necessario avere una maggiore flessibilità della domanda. Questo è possibile utilizzando programmi di Demand Response (DR), ovvero uno strumento che permette di modificare la domanda di energia elettrica spostandola nei momenti in cui si ha maggiore disponi-

bilità di energia rinnovabile. Il risultato di questa azione risulta essere un bilanciamento più equilibrato della domanda, sia a livello globale che locale, che porta ad una riduzione complessiva dei costi di sistema.

Posto questo concetto come obiettivo finale, sono stati introdotti diversi sistemi di tariffazione dinamica, raggruppabili in quattro macrocategorie [31]:

- Time Of Use (TOU);
- Critical Peak Pricing (CPP);
- Peak Time Rebate (PTR);
- Real Time Pricing (RTP).

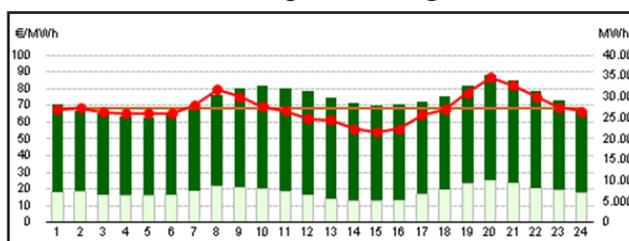
Nella prima categoria, quella TOU, rientra il sistema di tariffazione vigente in Italia. Questa prevede una suddivisione delle 24 ore della giornata in diverse fasce orarie aventi ognuna diversi valori tariffari: si ha la fascia ad alto costo (F1), la fascia a medio costo (F2) e la fascia a basso costo (F3). La suddivisione delle 24 ore nelle diverse fasce viene riportata nella seguente tabella:

	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
<b>lunedì - venerdì</b>	F3						F2	F1						F2			F3							
<b>sabato</b>	F3						F2						F3											
<b>domenica - festivi</b>	F3																							

Figura 4: fasce orarie definite dalla deliberazione AEEG 181/06 [32]

Nella fascia in cui si concentra il picco di richiesta di energia elettrica i prezzi della stessa sono più elevati mentre, al contrario, nei periodi fuori picco il costo è inferiore. È da considerare che nelle bollette per le utenze domestiche le fasce orarie F2 e F3 sono accorpate in un'unica tariffa F2-F3. L'utente ha quindi la possibilità di pianificare i propri consumi elettrici domestici, spostandoli nei periodi in cui l'energia elettrica costa meno. Tuttavia questo metodo non risulta realmente dinamico in quanto i prezzi dell'energia per ogni fascia sono definiti a priori, non considerando quindi la reale potenza data dalle fonti rinnovabili che non possono essere programmabili. Questo risulta evidente dai dati pubblicati giornalmente sul sito [www.mercatoelettrico.org](http://www.mercatoelettrico.org).

Figura 5: dati relativi al giorno 13 ottobre 2018 [33]



Come si può notare, il reale prezzo orario dell'energia, rappresentato dalla linea rossa, risulta talvolta maggiore e talvolta minore al prezzo prefissato, rappresentato dalla linea arancione.

La seconda categoria, CPP, prevede una tariffa costante nell'arco dell'intera annualità ad eccezione di alcuni giorni "evento", nei quali si hanno consumi più alti di energia elettrica con un conseguente stress della rete di distribuzione. Durante queste giornate, che possono essere variabili oppure fisse, il costo dell'energia aumenta rispetto allo standard. L'utente viene contattato con sufficiente anticipo in corrispondenza di un giorno "evento", sebbene questi ripetuti avvisi possono risultare un impedimento per il cliente.

La categoria PTR risulta speculare alla precedente, ovvero l'utente riceve un compenso qualora riesca a ridurre i consumi elettrici durante un evento critico. Questa soluzione risulta maggiormente accettata dal cliente rispetto a quella della categoria CPP.

L'ultima categoria, quella delle tariffe RTP, risulta essere quella più complessa in quanto è legata al prezzo orario di mercato dell'energia. Per applicare questa tipologia di tariffazione è necessario che l'impianto dell'utente sia dotato di specifiche tecnologie di automazione per poter essere a conoscenza dell'andamento dei prezzi orari. Per tale motivo questa categoria trova impiego in clienti commerciali e industriali, sebbene nei paesi nordici e in Spagna si sia tentato di offrirlo anche a clienti residenziali. Diversi professionisti hanno proposto dei sistemi di gestione dell'energia domestica in modo tale da pianificare l'uso dell'energia della smart home in relazione ai segnali di prezzo [11].

Lo strumento per attuare quanto detto ha il nome di Smart Meter e si tratta, appunto, di un dispositivo che fornisce informazioni dettagliate sui consumi e su eventuali dispersioni. Permette, di conseguenza, una doppia comunicazione, tra il gestore della rete di distribuzione dell'energia, che ha la possibilità di contattare a distanza il cliente e il cliente stesso, che può avere un controllo sul consumo effettivo della propria abitazione e può inviare al gestore le letture dei dati. Gli smart meters risultano pertanto essere una componente fondamentale nel Building Energy Management System.

In tutti i casi, per incrementare ulteriormente i vantaggi, sarebbe opportuno proporre delle offerte aventi una combinazione di più categorie.

Le più recenti ricerche si sono concentrate sui metodi di gestione del flusso energetico nell'abitazione, proponendo soluzioni tecnologiche che permettessero o la gestione predittiva dei consumi energetici o un loro controllo in tempo reale tramite l'uso di determinati algoritmi di calcolo.

Nel primo caso l'affidabilità del modello è ottenuta tramite la correzione degli scenari predittivi con informazioni misurate. Si ottiene, in tal modo, una schedule ottimale per ciascun elettrodomestico che va a minimizzare i consumi e, di conseguenza, i costi legati all'energia elettrica [18].

Nel secondo caso si vuole diminuire la potenza di picco tenendo in considerazione di un range di valori che garantiscono il comfort dell'occupante. Sono pertanto stati creati degli algoritmi di distribuzione dell'energia che minimizzassero l'uso di energia per il riscaldamento ed il raffrescamento senza tuttavia dimenticare le preferenze espresse dall'utente [11].

Nonostante si vadano sviluppando delle tecnologie di controllo automatico dei sistemi impiantistici e dei componenti presenti nell'abitazione, rimane centrale il ruolo svolto dall'occupante. Diversi studi hanno infatti sottolineato come una delle principali cause di non corrispondenza tra i valori ideali simulati e successivamente quelli reali risiede proprio in uno scorretto comportamento dell'occupante. Questo deve comunque avere consapevolezza delle azioni da introdurre per mantenere il benessere ed il comfort indoor nonostante sia presente un impianto di automazione. È stato altresì dimostrato come il mantenimento di una sensazione di controllo sulle condizioni interne all'appartamento da parte dell'occupante renda quest'ultimo più soddisfatto dell'efficacia dell'impianto domotico [34] [35].

Ad ogni modo l'automazione degli edifici è un punto fondamentale per poter raggiungere i requisiti degli edifici nZEB ("nearly zero energy building"), sanciti dal D.L. 04.06.2013, dal momento che, prevenendo un consumo eccessivo di energia, viene ridotto di conseguenza l'impatto che l'edificio ha sull'ambiente.

Anche la certificazione LEED, nata per riconoscere e distinguere quegli edifici che risultano costruiti con materiali e accorgimenti ecosostenibili, sta proponendo un

adeguamento dei criteri che tengano in conto questi importanti cambiamenti.

Il procedimento di certificazione è basato sull'attribuzione di crediti in relazione a sette criteri: sostenibilità del sito, gestione efficiente dell'acqua, energia e atmosfera, materiali e risorse, qualità degli ambienti interni, innovazione nella progettazione, priorità regionale. Per ognuna di queste categorie è possibile assegnare un punteggio compreso tra i valori di -1 e +5, ponendo come valore zero lo standard di paragone riferito alla pratica costruttiva corrente. La somma dei crediti porta ad un livello di certificazione crescente partendo dal livello base per arrivare a quello argento, oro e infine platino. Tuttavia l'attribuzione del punteggio viene dato su valori statici dell'edificio quando, al contrario, le Smart home prevedono l'uso di dati dinamici, ovvero di misurazioni in tempo reale relative ai consumi elettrici, alle temperature indoor, all'umidità, all'illuminazione ecc.

Si vuole quindi sviluppare un nuovo sistema che risulti adeguato all'introduzione delle tecnologie IoT negli edifici. In particolare esso consiste di due parti: la prima è composta dalla compilazione di una tabella digitale che rappresenti, in tempo reale, quali dati possono concorrere all'ottenimento della certificazione mentre la seconda è rappresentata da una collezione di dati ottenuti tramite l'uso di tecnologie IoT [36]. L'obiettivo finale è quello di avere un sistema di certificazione che mantenga l'uso di dati statici per alcune categorie ma che introduca l'uso di dati dinamici, ovvero IoT data, per altre. Viene riportata di seguito la tabella riassuntiva delle categorie e dei relativi dati considerati per la certificazione LEED Homes.

N°	CATEGORIA	SOTTO CATEGORIA	TIPO DI DATO	SENSORI	DISPONIBILITA'
1	Localione e trasporto		Statico	N/A	N/A
2	Sostenibilità del sito	Attuazione di attività di prevenzione dell'inquinamento	Dinamico	Sensori	Si
		Piante non invasive	Dinamico	Sensori	Si
		Riduzione dell'isola di calore	Dinamico	Sensori meteorologici per l'esterno	Si
		Gestione dell'acqua piovana	Dinamico	Sensori meteorologici per l'esterno	Si
		Controllo parassiti non tossici	Dinamico	Sensori meteorologici per l'esterno	Si

3	Gestione efficiente dell'acqua	Misura dell'acqua	Dinamico	Sensori Smart Water	Si
		Uso totale dell'acqua	Dinamico	Sensori Smart Water	Si
		Uso indoor dell'acqua	Dinamico	Sensori Smart Water	Si
		Uso outdoor dell'acqua	Dinamico	Sensori Smart Water	Si
4	Energia e atmosfera	Prestazione minima di energia	Dinamico	Sensore Smart Meter	Si
		Misurazione dell'energia	Dinamico	Sensore Smart Meter	Si
		Educazione dell'occupante	Dinamico	Sensore Smart Meter e interfaccia utente	Si
		Uso annuale di energia	Dinamico	Sensore Smart Meter	Si
		Distribuzione efficiente acqua calda sanitaria	Dinamico	Sensore Smart Meter	Si
5	Materiali e risorse	Durabilità	Statico	N/A	N/A
		Preferenza prodotti eco-friendly	Statico	N/A	N/A
		Gestione dei rifiuti da costruzione	Statico	N/A	N/A
6	Qualità degli ambienti interni	Ventilazione	Dinamico	Sensore aria	Si
		Filtrazione dell'aria	Dinamico	Sensore aria	Si
		Presenza di radon	Dinamico	Sensore aria	Si
		Presenza di fumo di sigaretta	Dinamico	Sensore aria	Si
		Compartimentazione	Statico	N/A	N/A
		Controllo contaminanti	Dinamico	Sensore gas	Si
		Bilanciamento dei sistemi di distribuzione dell'impianto di riscaldamento e raffrescamento	Dinamico	Sensori di temperatura e umidità	Si
		Prodotti con basse emissioni	Statico	N/A	N/A
7	Innovazione		Statico	N/A	N/A
8	Priorità regionale		Statico	N/A	N/A

Figura 6: tabella riassuntiva dei parametri della certificazione LEED Homes [36]

## ***1.2. Normativa EN 15232***

Per valutare i risparmi energetici in relazione all'uso di sistemi di automazione e controllo degli edifici si fa riferimento alla norma UNI EN 15232 "Prestazione energetica degli edifici – Incidenza dell'automazione, della regolazione e della gestione tecnica degli edifici" [9]. Questa è entrata in vigore il 23 febbraio 2012 ed è stata successivamente abrogata e sostituita dalla versione pubblicata nel novembre del 2016, per essere recepita in Italia il 10 ottobre 2017. Essa si concentra sull'inserimento negli edifici, tanto residenziali quanto adibiti a funzioni pubbliche/terziarie, di sistemi di controllo e automazione come metodo per ridurre i consumi energetici, definendo delle procedure per la valutazione di queste tecnologie. Nel dettaglio la norma è costituita da:

- Una lista riassuntiva delle funzioni di controllo, automazione e gestione degli edifici che concorrono al miglioramento della prestazione energetica dell'edificio;
- Una metodologia per la definizione dei requisiti minimi delle suddette funzioni;
- Un metodo semplificato (factor based method) per permettere una prima stima dell'impatto delle funzioni precedentemente descritte sugli edifici e sui profili d'uso;
- Un metodo dettagliato (detailed method) per la valutazione approfondita dell'impatto che le funzioni di controllo, automazione e gestione hanno sull'edificio preso in analisi.

La EN 15232 richiama tutta una serie di normative, specifiche per ogni singola tipologia di impianto, come la serie EN 15000 e la EN 12000. Gli impianti presi in considerazione riguardano:

- Riscaldamento (BACS/HEBS);
- Raffrescamento (BACS/HEBS);
- Ventilazione e condizionamento (BACS/HEBS);
- Produzione di acqua calda sanitaria (BACS/HEBS);
- Illuminazione (BACS/HEBS);

- Controllo schermature solari (BACS/HEBS);
- Centralizzazione e controllo integrato delle diverse applicazioni (TBMS);
- Diagnostica (TBMS);
- Rilevamento consumi e miglioramento dei parametri di automazione (TBMS).

Le sigle BACS, HEBS e TBMS indicano rispettivamente Building Automation and Control System (sistemi di automazione e controllo degli edifici), Home and Building Electronic System (sistemi elettronici per la casa e gli edifici) e Technical Building Management System (sistema per la gestione tecnica dell'edificio).

La tematica del Building Automation and Control System è ripresa e approfondita dall'insieme di norme UNI EN ISO 16484.

La norma EN 15232 introduce una classificazione in quattro categorie di efficienza energetica delle funzioni di controllo degli impianti degli edifici. Queste sono:

- Classe D “non energy efficient”, ovvero energeticamente non efficiente, comprende tutti gli impianti tradizionali privi di automazione. Gli edifici di nuova costruzione non possono più ricadere in questa classe;
- Classe C “standard”, corrisponde agli impianti automatizzati con sistemi di controllo tradizionali o con sistemi BUS (BACS/HEBS). Questa classe è considerata quella di riferimento in quanto corrisponde ai requisiti minimi richiesti dalla direttiva EPBD recast;
- Classe B “advanced”, comprende gli impianti controllati con un sistema BUS (BACS/HEBS) che tuttavia hanno anche una gestione controllata e centralizzata delle funzioni dei singoli impianti (TBM);
- Classe A “high energy performance”, ha livelli di precisione e completezza del controllo automatico superiori a quelli della classe precedente.

La norma EN 15232 identifica, per ogni classe di efficienza energetica, quali funzioni le caratterizzano. Per ognuna di esse si hanno diversi livelli prestazionali, elencati in ordine crescente, ai quali vengono assegnati dei valori, anch'essi crescenti, partendo da un minimo pari a zero. Si ricavano pertanto i requisiti minimi da rispettare affinché l'edificio in analisi rientri in una classe piuttosto che in

un'altra. Ad esempio, un sistema di automazione è considerato essere di classe B solo se tutte le funzioni che esso gestisce e controlla sono almeno anch'esse di classe B.

Il Decreto Ministeriale “Requisiti Minimi” del 26 giugno del 2015 ha prescritto, nel caso di nuova costruzione o ristrutturazione importante di un edificio ad uso non residenziale, il livello minimo di automazione corrispondente a quello della classe B. Nel caso, invece, di edifici di nuova costruzione ad uso residenziale la norma EN 15232 impone un livello di automazione minimo pari alla classe C.

Si hanno due ulteriori norme che trattano del Building Automation: il D.L. 04.06.2013, che definisce i requisiti minimi per gli edifici nZEB, includendo i sistemi di automazione come metodi per la riduzione del consumo energetico, ed il D.Lgs. 102/2014 [37].

FUNZIONI (dalla EN 15232)	OBBLIGHI NORMATIVI		
	D.M. 26.06.2015	D.Lgs. 102/2014	D.L. 04.06.2013 (obbligo nZEB)
Riscaldamento	✓	✓	✓
Raffrescamento	✓	✗	✓
ACS	✓	✓	✓
Ventilazione	✓	✗	✗
Illuminazione	✓	✗	✗
Schermature solari	✓	✗	✗
Gestione integrata delle diverse funzioni	✓	✗	✗

Figura 7: tabella riassuntiva delle principali normative riguardanti la Building Automation con i relativi ambiti di applicazione [37]

Nella norma EN 15232 ha introdotto due differenti metodi di calcolo dell'efficienza energetica per quanto riguarda il sistema di automazione: il calcolo dettagliato ed il calcolo basato su fattori di efficienza, denominati “BACS Factors”. Il primo metodo consiste in una procedura di calcolo analitica da utilizzare nel caso in cui tutte le funzioni di controllo, comando e gestione dell'impianto siano state stabilite e progettate. Per tale motivo risulta essere anche un utile strumento di verifica.

Il secondo metodo è rappresentato da una procedura di calcolo statistica, partendo da una tabella di base, per consentire una stima con un buon grado di approssimazione relativa all'impatto che le funzioni di BACS e TBM possono avere sul

consumo di energia dell'edificio ai quali essi vengono applicati. È pertanto utile in fase di progettazione e predisposizione del sistema di controllo e gestione.

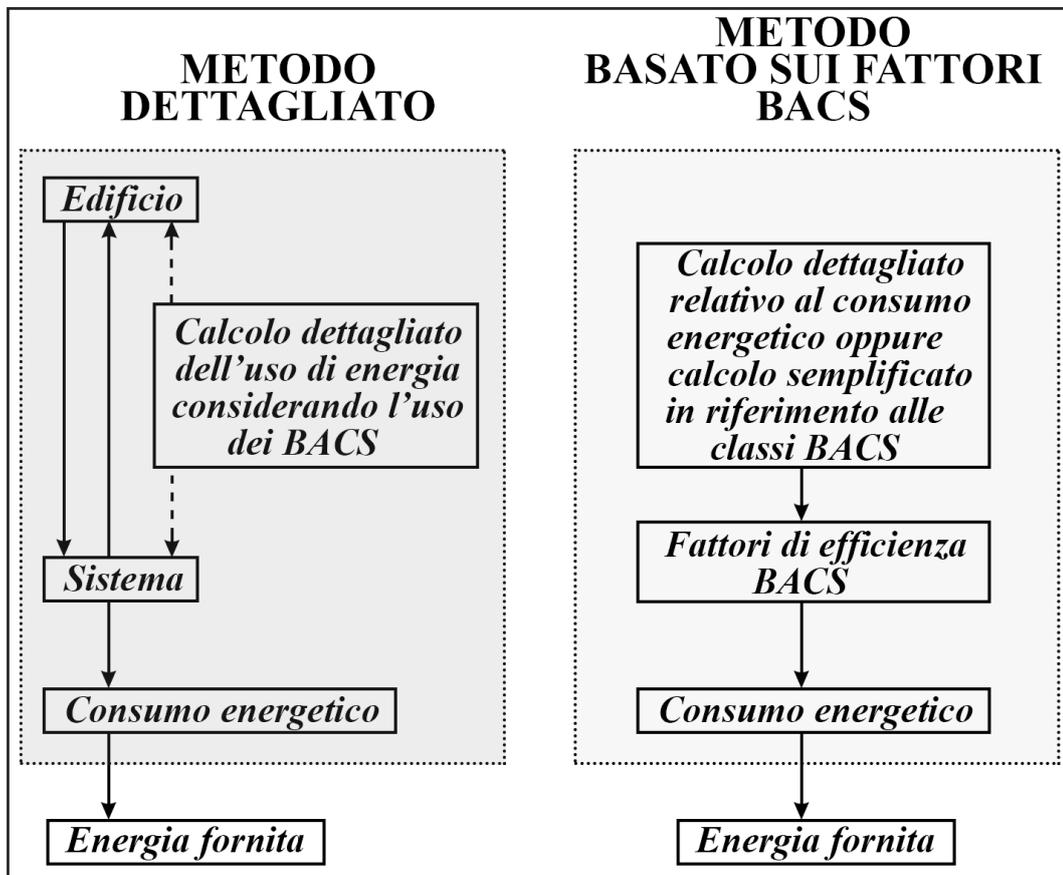


Figura 8: tabella di confronto tra il metodo dettagliato e il metodo basato sui fattori BACS presente nella norma EN 15232 [9]

Vengono di seguito riportate le tabelle della norma UNI EN 15232, relative alla sola destinazione d'uso residenziale, in merito ai fattori di efficienza BAC in relazione alle quattro classi.

EDIFICI RESIDENZIALI	CLASSE DI EFFICIENZA ENERGETICA			
	D	C	B	A
	energeticamente non efficiente	standard	avanzato	energeticamente performante
Case unifamiliari e blocchi di appartamenti	1,09	1	0,88	0,81

Figura 9: tabella dei fattori di efficienza BAC relativi al riscaldamento  $f_{BAC,H}$  [9]

EDIFICI RESIDENZIALI	CLASSE DI EFFICIENZA ENERGETICA			
	D	C	B	A
	energeticamente non efficiente	standard	avanzato	energeticamente performante
Case unifamiliari e blocchi di appartamenti	1,11	1	0,9	0,8

Figura 10: tabella dei fattori di efficienza BAC per l'energia elettrica impiegata per l'illuminazione e per gli ausiliari elettrici, definiti nella tabella 4 della norma UNI EN 15232 [9]

EDIFICI RESIDENZIALI	CLASSE DI EFFICIENZA ENERGETICA			
	D	C	B	A
	energeticamente non efficiente	standard	avanzato	energeticamente performante
Case unifamiliari e blocchi di appartamenti	1,08	1	0,93	0,92

Figura 11: tabella dei fattori di efficienza BAC per i sistemi di acqua calda sanitaria [9]

### 1.3 Impianto domotico

La domotica viene definita come l'applicazione di alcune tecnologie che si fondano sull'ingegneria informatica, l'elettronica e le telecomunicazioni, per realizzare dei dispositivi integrati programmati per automatizzare e facilitare diverse operazioni connesse alla qualità dell'edificio e di chi lo vive. Lo scopo finale risulta appunto essere quello di incrementare sia le prestazioni dell'edificio che il benessere e il comfort degli inquilini limitando, allo stesso tempo, i consumi delle principali risorse. L'impianto domotico è quindi quel sistema che coinvolge e gestisce più impianti presenti nell'abitazione, consentendo di conseguenza una gestione coordinata e pianificata di tutti i dispositivi in esso presenti, a prescindere che questi svolgano funzioni di controllo, di sicurezza, di comfort, di risparmio energetico o di comunicazione.

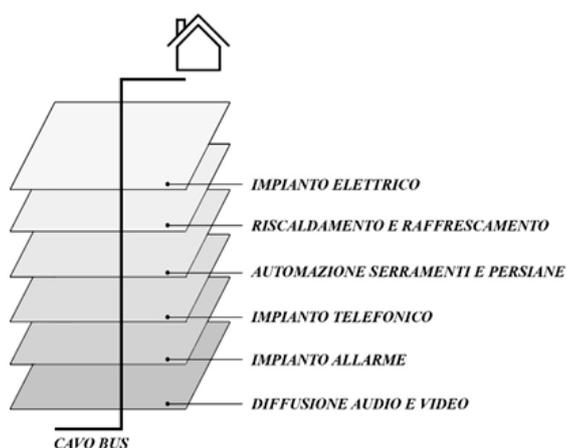


Figura 12: immagine rappresentativa dell'interazione dell'impianto domotico con i diversi impianti presenti nell'abitazione [38]

Da un punto di vista tecnico l'impianto domotico è formato da una serie di sensori, definiti dalla Norma CEI 72-9 come “i dispositivi che, utilizzando uno qualsiasi dei fenomeni fisici noti (meccanici, elettrici, acustici, luminosi, termici, idraulici..) consente di convertire una variazione di una situazione statica del processo fisico prescelto in opportuni segnali elettrici da trasferire in centrale”, da un mezzo trasmissivo (cavo BUS), ovvero da un componente che permette di trasmettere l'informazione rilevata dal sensore ad un altro componente e da un attuttore, che si occupa di convertire il segnale analogico/digitale rilevato in un segnale digitale/analogico da far eseguire al dispositivo. Questo processo è regolato da una unità di controllo (CPU) che analizza gli input e gli output in relazione al programma di

gestione e di risparmio energetico scelto (software applicativo).

Analizzando l'impianto nei dettagli, si distinguono due linee: la linea BUS, che collega tutti i dispositivi permettendo il transito delle informazioni, e la linea di potenza (230 V), che differisce da quella dell'impianto elettrico tradizionale in quanto non necessita di passare attraverso i punti di comando ma di raggiungere solamente i carichi. Questo è possibile perché, quando viene premuto un interruttore dalla persona, nell'impianto viene generato un messaggio (ovvero una stringa di bit) che transita nel cavo bus fino al raggiungimento della destinazione voluta. A questo punto il messaggio viene tradotto in un'azione (apertura delle finestre, accensione luce..). Nell'impianto domotico assumono quindi una notevole importanza due tipologie di dispositivi. I primi sono i sensori (input) che, dopo aver rilevato il superamento di una determinata soglia impostata di un dato fisico (temperatura, illuminamento, concentrazione di anidride carbonica e inquinanti..), inviano il messaggio al BUS mentre i secondi sono gli attuatori (output), i quali ricevono il messaggio dal BUS, lo interpretano secondo quanto scelto e impostato dal progettista, e agiscono sulla linea di potenza.

Esso si basa sulle strategie di controllo computerizzate (direct digital control).

Per la realizzazione del sistema domotico è indispensabile una progettazione attenta del cablaggio, ovvero la disposizione del cavo BUS, che, grazie alla flessibilità che quest'ultimo permette, può essere lineare, ad albero o a stella. In quest'ultimo caso si avrà un centro stella, nel quale convergono tutti i cablaggi in entrata dalle reti di distribuzione pubbliche (di energia elettrica, telefono, fibra ottica, cavo televisivo..) e dipartono le linee e le reti all'interno dell'appartamento.

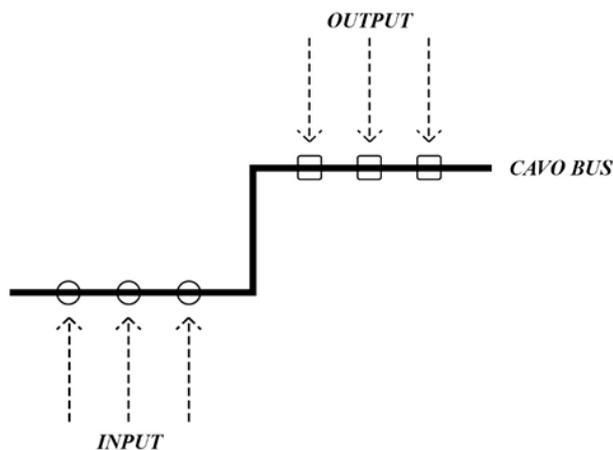


Figura 13: immagine raffigurante la connessione tra input-output con il cavo BUS [38]

I sistemi domotici più tecnologici posseggono un dispositivo di gestione e controllo dei carichi elettrici (Power Demand Controller). Questo è collegato sia al misuratore dell'azienda fornitrice di energia sia al bus, ovvero al cavo che collega le varie apparecchiature periferiche ed intermedie permettendo il passaggio delle informazioni, con lo scopo di rendere regolare il consumo di energia elettrica. Può pertanto intervenire sugli elettrodomestici, spegnendoli, qualora venissero superati i livelli ammessi di potenza elettrica o attivandone alcuni nel periodo notturno [39].

Il concetto di impianto domotico è relativamente nuovo nello scenario edilizio. Ha infatti radice negli anni '90 con l'istituzione del comitato CENELEC 105 (Comitato Europeo di Normazione Elettrica), avente lo scopo di unificare gli standard dei diversi stati europei. Per tale motivo si ha avuto la convergenza tra gli standard appartenenti a tre associazioni europee: Batibus, EIBA (European Installation Bus Association) ed EHS (European Home System). Queste hanno lavorato con l'intento di sviluppare una tecnologia che standardizzasse i criteri di progettazione, l'installazione e l'utilizzo, concordando con il CENELEC regole e norme comuni per creare un "protocollo" di comunicazione adottato da tutti i paesi membri dell'Unione Europea, permettendo di conseguenza la libera circolazione dei prodotti. In un secondo momento dalle tre associazioni e dal CENELEC è stato definito un nuovo standard, che ha preso il nome di KNX (Konnex). Questo è risultato essere l'integrazione delle tecnologie e dei protocolli delle tre associazioni prima citate. In particolare, l'azienda EIBA si è concentrata sull'automazione e la semplificazione degli impianti elettrici e dei dispositivi connessi all'impianto domotico, l'azienda EHS ha sviluppato nel dettaglio le applicazioni concernenti gli elettrodomestici funzionanti tramite rete elettrica ad onde convogliate ed infine l'azienda BATIBUS ha incrementato i servizi offerti in materia di sicurezza e telecontrollo degli appartamenti partendo dalla connessione di dispositivi di illuminazione e riscaldamento. Il KNX risulta essere uno standard aperto per garantire l'interoperabilità tra dispositivi di diversi costruttori, garantendo di conseguenza una maggiore disponibilità di opportunità per ogni tipologia di esigenza.

Per poter dichiarare la conformità allo standard KNX i diversi dispositivi devono essere testati seguendo norme descritte nelle specifiche dello standard da parte di un

ente preposto, che in Italia è IMQ. Inoltre, lo standard KNX è stato riconosciuto e approvato come standard europeo EN 50090, nel dicembre del 2003, e successivamente come standard mondiale ISO/IEC 14543-3, nel novembre 2006.

Lo standard KNX prevede tre modalità di configurazione dei dispositivi. In ordine crescente per funzionalità e complessità del progetto si ha l'A-MODE, l'E-MODE e l'S-MODE.

L'A-MODE è una configurazione automatica avente un numero minimo di funzioni disponibili che risulta adatto per applicazioni con pochi dispositivi (Plug&Play).

L'E-MODE è una configurazione semplificata, che non richiede l'uso del PC, avente un numero limitato di funzioni disponibili che sono sufficienti per le applicazioni domotiche di base in ambito residenziale. L'S-MODE, invece, richiede una configurazione tramite l'uso del PC e di specifici software (come ad esempio il software ETS), in quanto le funzioni disponibili sono numerose. Si utilizza questa modalità di configurazione per le applicazioni facenti parte del Building Automation.

Da un punto di vista realizzativo, un sistema che risponda alle richieste dello standard KXN ha una struttura composta da aree e linee. Le prime sono collegate tra loro tramite una dorsale principale e possono essere un massimo di quindici. In ogni area si ha una linea principale dalla quale si distaccano diverse linee secondarie, anch'esse per un massimo di quindici, alle quali sono collegati i dispositivi (sensori o attuatori). Il numero massimo di questi ultimi è 256. Le linee principale di ogni area sono connesse alla dorsale principale tramite un accoppiatore di area (AA) mentre le linee secondarie sono collegate alla linea principale tramite accoppiatori di linea (AL) [38].

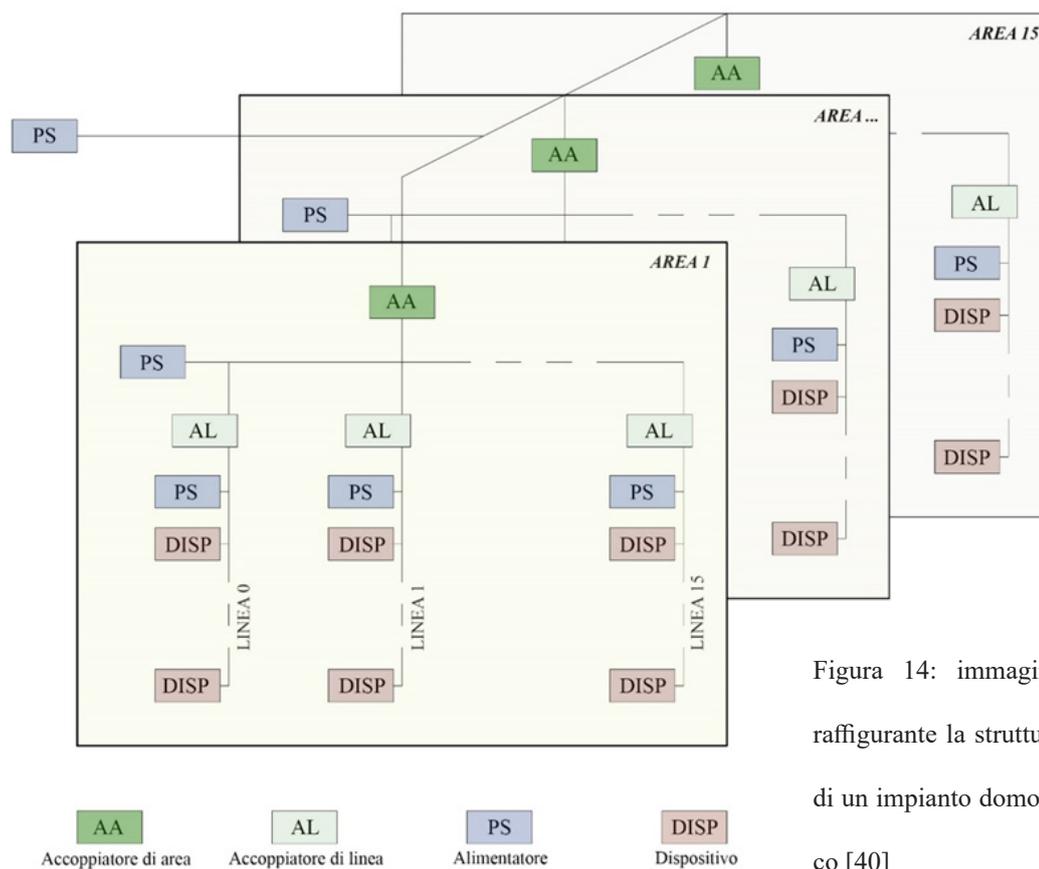


Figura 14: immagine raffigurante la struttura di un impianto domotico [40]

L'importanza della domotica in una visione di progettazione sostenibile è sottolineata anche dal protocollo ITACA nel decalogo dei dieci principi. In particolare risultano importanti per questa tematica i punti 7 “progettare soluzioni differenziate per rispondere alle diverse richieste di qualità dell’abitare”, 8 “garantire gli aspetti di safety e security” e 9 “applicare la domotica per lo sviluppo di una nuova qualità dell’abitare”.

Per quanto riguarda l’aspetto normativo, il sistema si distingue in leggi nazionali, che normano le modalità di installazione, la qualificazione dei soggetti che installano l’impianto e le certificazioni del sistema e in norme CEI (Comitato Elettrotecnico Italiano) di riferimento nei diversi settori applicativi dei sistemi e dei prodotti.

Le principali norme CEI sono:

- CEI 306-2: “Guida per il cablaggio per telecomunicazioni e distribuzione multimediale negli edifici residenziali”;
- CEI 64-50: “Edilizia residenziale – Guida per l’integrazione nell’edificio degli impianti elettrici utilizzatori e per la predisposizione per impianti ausiliari, telefonici e di trasmissione dati”;

- CEI EN 50174-1: “Tecnologie dell’informazione. Installazione del cablaggio. Parte 1: specifiche ed assicurazione della qualità”;
- CEI EN 50174-2: “Tecnologie dell’informazione. Installazione del cablaggio. Parte 2: pianificazione e criteri di installazione all’interno di edifici”;
- CEI 64: sistemi di distribuzione per l’energia elettrica;
- CEI EN 50090: sistemi a bus per l’automazione della casa;
- CEI 100: sistemi video e impianti di antenna;
- CEI 79: sistemi attivi di sicurezza

Il CENELEC, invece, è l’organismo preposto all’unificazione di standard e normative a livello europeo. Questo può emettere norme classificate EN, ma anche documenti di armonizzazione (HD), norme europee sperimentali (ENV), specifiche europee (ES), rapporti e guide.

Progettando l’impianto domotico è possibile prevedere diversi scenari, ovvero una precisa combinazione di azioni prestabilite dall’occupante in una determinata situazione della routine quotidiana. Gli scenari più comuni sono quelli risveglio, notte e uscita.

Con lo scenario “risveglio” viene previsto, all’orario scelto, l’apertura dei sistemi oscuranti, l’accensione dell’illuminazione artificiale, nel caso in cui la luce naturale sia insufficiente a garantire il comfort visivo, e il raggiungimento delle condizioni di comfort termico. Al contrario, con lo scenario “notte”, si ha la chiusura dei sistemi oscuranti, lo spegnimento graduale dell’illuminazione, il raggiungimento delle condizioni di climatizzazione richiesti, lo spegnimento della diffusione sono e l’inserimento dell’impianto d’allarme [41].



***CAPITOLO 2***  
***OBIETTIVO TESI***



L'applicazione dell'impianto domotico, costituito da diverse apparecchiature IoT collegate tra loro, ad edifici esistenti e di nuova costruzione porta, senza dubbio, ad un risparmio del fabbisogno energetico dello stesso che si traduce successivamente in una riduzione dei costi di esercizio del fabbricato. Tuttavia risulta fondamentale andare a quantificare la quota rappresentata da tale risparmio in modo tale da poter effettuare delle previsioni precise e puntuali, che sono la base fondamentale per una progettazione accurata.

La presente tesi ha pertanto l'obiettivo di stimare il comportamento energetico di un edificio residenziale a seguito di un intervento di installazione di un impianto domotico. Per eseguire ciò, si è proceduto analizzando due casi studio che abbiano delle caratteristiche affini per essere considerati edifici tipologici generali. A seguito della modellazione dello stato di fatto, si sono andate ad aggiungere diverse logiche di controllo in quanto rappresentano lo strumento per gestire e controllare l'impianto domotico dell'appartamento. Si è deciso quindi di controllare i principali fattori incidenti sulla salute dell'abitante e sul suo comfort sia termico che visivo.

Per concretizzare quanto affermato, si è scelto il software di simulazione Ida Ice nella versione 4.8 dal momento che permette tanto un calcolo di tipo dinamico del fabbisogno quanto l'aggiunta delle logiche di controllo sopra citate.

Si è infine proceduto al confronto dei risultati tra la condizione antecedente e quella posteriore all'applicazione degli interventi nei due casi studio scelti in modo tale da poter quantificare e validare maggiormente il risultato ottenuto.



## ***CAPITOLO 3 - CASI STUDIO***

### 3.1 Edificio I

#### 3.1.1 Informazioni generali

Il caso studio scelto per procedere alla modellazione energetica rientra nel gruppo di edifici monitorati dall'agenzia ENEA. Nello specifico, esso si trova a Roma, nel quartiere Alessandrino. È stato costruito nel periodo compreso tra il 1962 ed il 1971.



DATI GENERALI	
COMUNE	Roma
ALTITUDINE [mslm]	20
ZONA CLIMATICA	D
GRADI GIORNO [DPR412-93]	1415
PERIODO DI RISCALDAMENTO	1° novembre - 15 aprile
PERIODO DI RAFFRESCAMENTO	15 aprile - 1° novembre

Figura 15: collocazione geografica del caso studio

Partendo dalla planimetria fornita in PDF, si è ricavato il file CAD da importare, in un secondo momento, sul software. L'appartamento è inserito in un edificio plurifamiliare. Ha un'area netta di 97.43 m<sup>2</sup> ed un volume riscaldato di 292.3 m<sup>3</sup>. Sulla base dei dati forniti, si è constatato che all'interno si hanno quattro occupanti: due genitori e due figli in età scolare. L'appartamento è composto dai seguenti locali:

LOCALE	METRATURA [m <sup>2</sup> ]
Soggiorno	20,64
Cucina	6,56
Bagno	5,95
Camera 1 (matrimoniale)	27,21
Camera 2	20,49
Ingresso	10,15
Corridoio	4,54
Ripostiglio	1,89
<b>Totale</b>	<b>97,43</b>

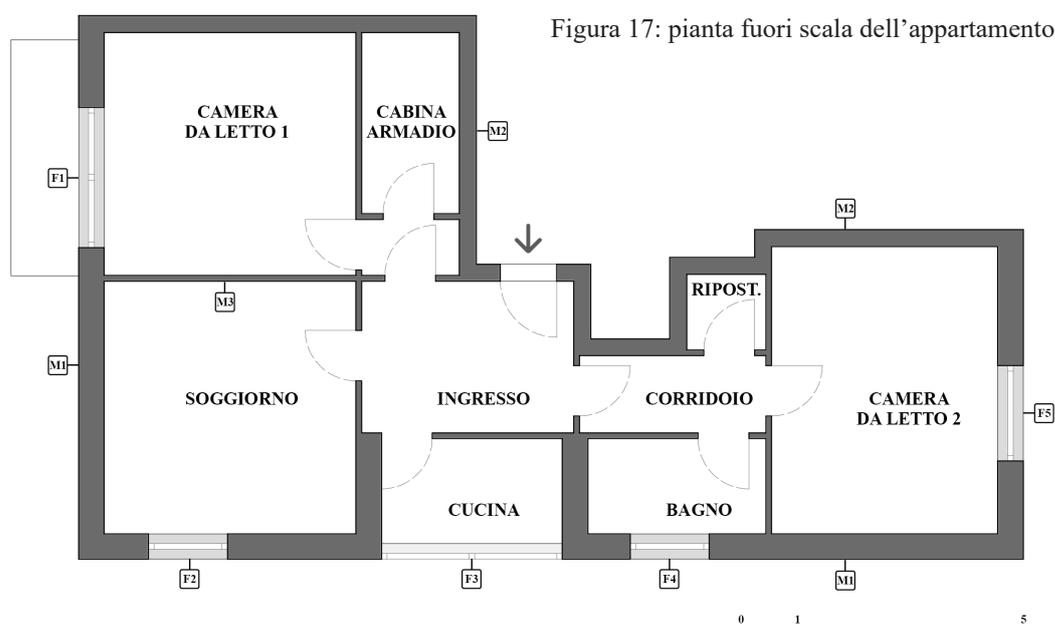
Figura 16: tabella riassuntiva delle aree nette dei diversi locali

I locali della zona giorno (soggiorno, cucina e bagno) sono esposti principalmente a sud, mentre i locali della zona notte (camere) a nord. L'ingresso, il corridoio e il ripostiglio non hanno aperture verso l'esterno.

Nel periodo 2006 - 2008 sono stati sostituiti tutti gli infissi presenti con alcuni più prestazionali.

### 3.1.2 Descrizione dello stato di fatto

#### 3.1.2.1 Pianta



#### 3.1.2.2 Involucro opaco

Non avendo informazioni precise riguardanti le diverse stratigrafie dell'involucro opaco, queste sono state ipotizzate tenendo in considerazione dei dati presenti nella UNI/TR 11552:2014. Questa illustra delle stratigrafie tipo in relazione sia della collocazione geografica che dell'epoca di costruzione del manufatto. Sulla base di ciò ne è risultato che l'involucro opaco del caso studio fosse costituito dai seguenti strati [42]:

STRATO	SPESSORE [cm]	DENSITA' [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/mK]	TRASMITTANZA [W/m <sup>2</sup> K]	
1. Intonaco interno	2	1400	0,7	1,3	
2. Mattoni forati	8	800	-		
3. Intercapedine d'aria	6	1,225	-		
4. Mattoni pieni	12	1800	0,72		
5. Intonaco esterno	2	1800	0,9		

Figura 18: stratigrafia muratura esterna M1

STRATO	SPESSORE [cm]	DENSITA' [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/mK]	TRASMITTANZA [W/m <sup>2</sup> K]	
1. Intonaco interno	2	1400	0,7	1,77	
2. Blocchi in laterizio	16	1000	-		
3. Intonaco esterno	2	1800	0,9		

Figura 19: stratigrafia muratura esterna M2

STRATO	SPESSORE [cm]	DENSITA' [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/mK]	TRASMITTANZA [W/m <sup>2</sup> K]	
1. Intonaco interno	1	1400	0,7	2,7	
2. Mattoni forati	8	800	-		
3. Intonaco esterno	1	1800	0,9		

Figura 20: stratigrafia muratura esterna M3

### 3.1.2.3 Involucro trasparente

Dal momento che gli infissi sono stati tutti sostituiti negli anni 2006-2008, nella modellazione è stato inserito un serramento avente un doppio vetro. Le finestre, distinte l'una dall'altra tramite il codice riportato in pianta, presentano le seguenti caratteristiche:

FINESTRA	LARGHEZZA [m]	ALTEZZA [m]	TRASMITTANZA VETRO [W/m <sup>2</sup> K]	g (SHGC)	EMISSIVITA'
F1	2,5	1,5	2,86	0,71	0,78
F2	1,4	1,5			
F3	3,2	1,5			
F4	1,4	1,5			
F5	1,7	1,5			

Figura 21: tabella riassuntiva proprietà involucro trasparente

### 3.1.2.4 Impianto

L'edificio ha un impianto di riscaldamento di tipo autonomo, avente una caldaia a gas naturale di tipo tradizionale. I terminali in ambiente sono rappresentati dai radiatori ad acqua, gestiti tramite un termostato regolabile. La temperatura di mandata al terminale è pari a 70°C mentre quella di ritorno è pari a 45°C.

Per la stagione di raffrescamento si ha un condizionatore, in classe A+, posizionato nella camera matrimoniale.

L'acqua calda sanitaria è anch'essa fornita dalla caldaia a gas.

Non è presente né un impianto fotovoltaico né un impianto solare termico.

In mancanza dei dati reali, la potenza dei singoli terminali è stata assegnata in maniera proporzionale all'incidenza dell'area del locale considerato rispetto alla metratura totale dell'appartamento. In altre parole, si è suddivisa la potenza totale dell'intero appartamento, espresso in W, nei terminali dei diversi locali in proporzione a quanto l'area di pavimento di questi ultimi incidesse rispetto all'area totale.

I valori ottenuti sono riassunti nella seguente tabella 22:

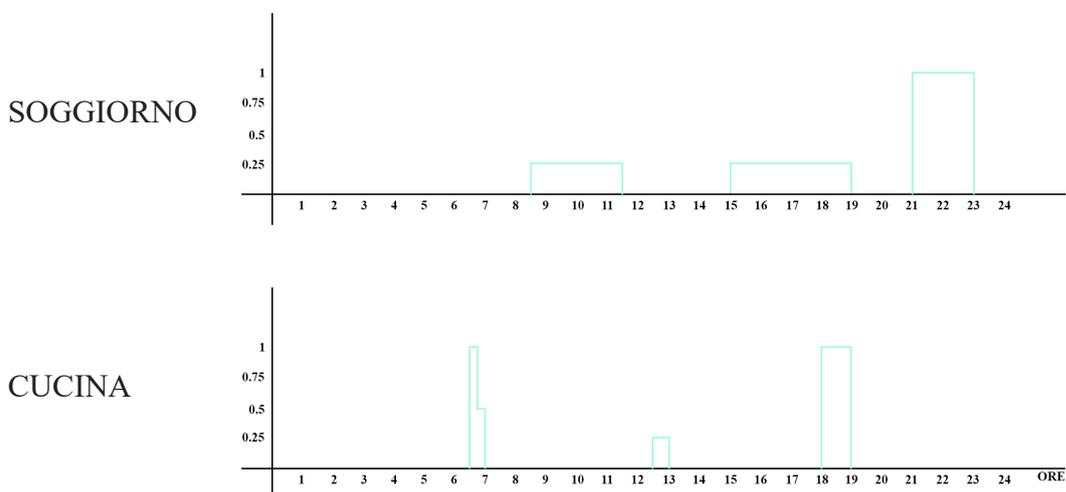
LOCALE	AREA [m <sup>2</sup> ]	POTENZA [W]	N° ELEMENTI TERMINALE
SOGGIORNO	20,64	758,63	8
CUCINA	6,56	241,11	3
BAGNO	5,95	218,69	3
CAMERA 1	27,21	1000,11	11
CAMERA 2	20,49	753,12	8
INGRESSO	10,15	373,07	4
CORRIDOIO	4,54	166,87	2

Figura 22: tabella dimensionamento terminali

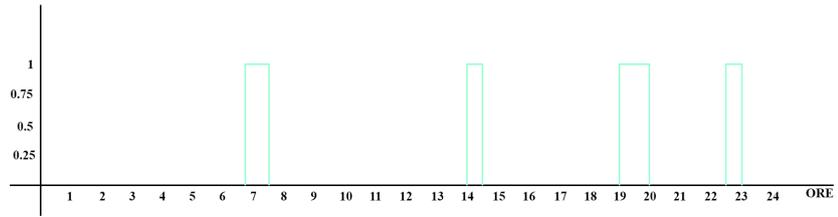
### 3.1.2.5 Profili d'uso locali

Vengono di seguito riportati i profili d'uso dei giorni feriali (lunedì-sabato) di tutti i locali dell'appartamento in quanto maggiormente significativi della routine dell'occupante. Sul software sono stati modellati anche i profili di occupazione dei giorni festivi (domenica) modificando il tempo di permanenza all'interno dell'appartamento e l'orario di alcune azioni quotidiane come, ad esempio, quella del risveglio. Non è stato tuttavia modellato il profilo di occupazione del ripostiglio dal momento che il tempo di permanenza al suo interno è talmente ridotto da non rendere possibile l'individuazione di una schedule d'uso.

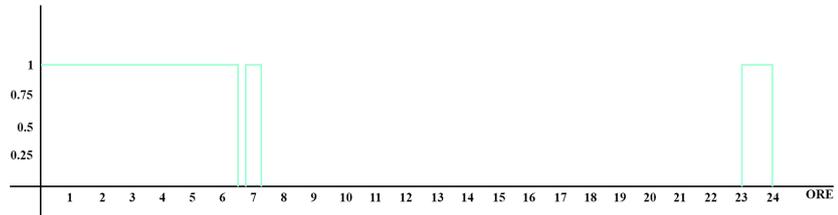
Nel grafico vengono riportate sull'asse delle ascisse le diverse ore della giornata e sull'asse delle ordinate il fattore di presenza. Questo indica quanti occupanti sono presenti, nell'ora indicata, in un determinato locale. Essendo quattro il numero totale dei componenti della famiglia, il fattore di presenza pari a 1 indica la presenza di tutti gli utenti.



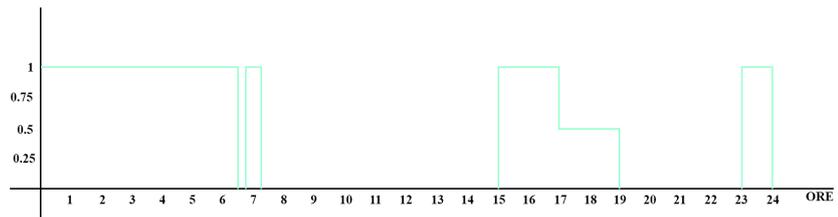
BAGNO



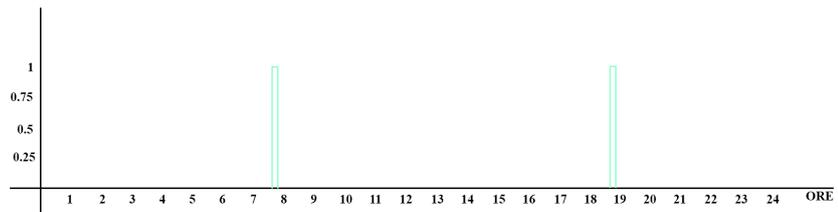
CAMERA 1



CAMERA 2



INGRESSO  
CORRIDOIO



### 3.1.2.6 Elettrodomestici e luci interne

Sulla base delle informazioni presenti sulla documentazione fornita da ENEA, si è modellato il file dello stato di fatto inserendo i seguenti elettrodomestici e apparecchi per l'illuminazione artificiale:

	ELETTRODOMESTICO	POTENZA [W]	ACCENSIONE [min/giorno]
<b>SOGGIORNO</b>	Aspirapolvere	1800	5
	Tv 33"	200	60
	Lettore DVD	50	4
	PC fisso	300	30
<b>CUCINA</b>	Frigorifero	250	sempre acceso
	Macchina caffè elettrica	1500	5
	Forno a microonde	2050	15
<b>BAGNO</b>	Lavatrice	1800	5 cicli/settimana
	Asciugacapelli	2200	5
<b>CAMERA 2</b>	PC portatile	200	120
	Stampante	100	5

Figura 23: tabella riassuntiva elettrodomestici

	TIPOLOGIA LAMPADA	POTENZA [W]	[lumen/W]
<b>SOGGIORNO</b>	Lampada LED	20	90
<b>CUCINA</b>	Lampada LED	20	90
<b>BAGNO</b>	Lampada fluorescente	15	60
	Lampada alogena (specchiera)	18	11
<b>CAMERA 1</b>	Lampada fluorescente	15	60
	Lampada fluorescente (abat-jour)	8	14
	Lampada fluorescente (abat-jour)	8	14
	Lampada incandescenza (cabina armadio)	25	11
<b>CAMERA 2</b>	Lampada fluorescente	15	60
	Lampada fluorescente (abat-jour)	8	14
	Lampada fluorescente (abat-jour)	8	14
<b>INGRESSO</b>	Lampada fluorescente	15	60

Figura 24: tabella riassuntiva illuminazione artificiale

## 3.2 EDIFICIO II

### 3.2.1 Informazioni generali

L'edificio si trova nel quartiere Prenestino - Centocelle del comune di Roma. L'epoca di costruzione è stimata tra il 1919 ed il 1945. Si ha avuto un intervento di sostituzione dei serramenti nel periodo 2010-2015.

L'appartamento, inserito anch'esso in un edificio plurifamiliare, ha un'area netta di 53,85 m<sup>2</sup> ed un volume riscaldato di 161,6 m<sup>3</sup>. Al suo interno si ha una famiglia composta da quattro persone: due genitori, di cui uno disoccupato, e due figli adolescenti. I locali presenti, riassunti nella figura 25, sono divisi nella zona giorno, esposta prevalentemente a sud, e nella zona notte, esposta prevalentemente a nord.

LOCALE	METRATURA [m <sup>2</sup> ]
Soggiorno	12,84
Cucina	6,27
Bagno	5,03
Camera 1 (matrimoniale)	15,34
Camera 2	9,84
Ingresso	4,53
Totale	53,85

Figura 25: tabella riassuntiva delle aree nette dei diversi locali

### 3.2.2 Descrizione dello stato di fatto

#### 3.2.2.1 Pianta

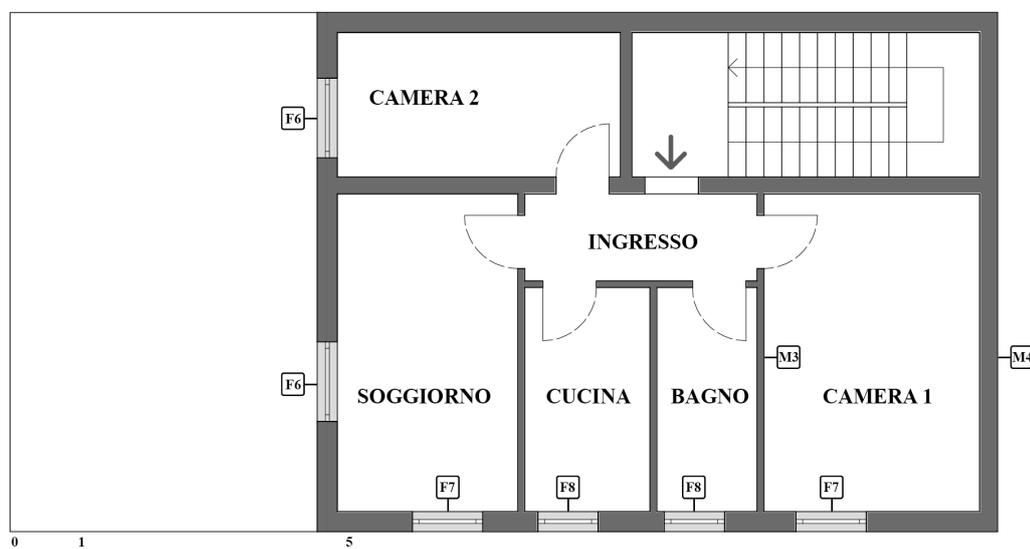


Figura 26: pianta fuori scala dell'appartamento

### 3.2.2.2 Involucro opaco

Come per il precedente edificio le informazioni relative alla stratigrafia dell'involucro opaco sono state tratte dalla normativa UNI/TR 11552:2014 [36] data la mancanza di dati reali. Si sono pertanto ipotizzate le seguenti tipologie di muratura:

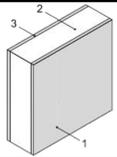
STRATO	SPESSORE [cm]	DENSITA' [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/mK]	TRASMITTANZA [W/m <sup>2</sup> K]	
1. Intonaco interno	1	1400	0,7	2,7	
2. Mattoni forati	8	800	-		
3. Intonaco esterno	1	1800	0,9		

Figura 27: stratigrafia muratura interna M3

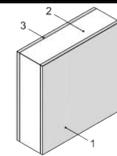
STRATO	SPESSORE [cm]	DENSITA' [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/mK]	TRASMITTANZA [W/m <sup>2</sup> K]	
1. Intonaco interno	2	1400	0,7	1,11	
2. Mattoni pieni	36	1800	-		
3. Intonaco esterno	2	1800	0,9		

Figura 28: stratigrafia muratura esterna M4

### 3.2.2.3 Involucro trasparente

Dal momento che gli infissi sono stati tutti sostituiti negli anni 2010-2015, nella modellazione sono stati inseriti dei serramenti aventi un doppio vetro. Le finestre, distinte l'una dall'altra tramite il codice riportato in pianta, presentano le seguenti caratteristiche:

FINESTRA	LARGHEZZA [m]	ALTEZZA [m]	TRASMITTANZA VETRO [W/m <sup>2</sup> K]	g (SHGC)	EMISSIVITA'
F6	1,2	1,5	2,86	0,71	0,78
F7	1,05	1,5			
F8	3,2	1,5			

Figura 29: tabella riassuntiva proprietà involucro trasparente

### 3.2.2.4 Impianto

L'edificio ha un impianto di riscaldamento di tipo autonomo, avente una caldaia a gas naturale di tipo tradizionale. I terminali in ambiente sono rappresentati dai radiatori ad acqua, gestiti tramite un termostato regolabile. La temperatura di mandata al terminale è pari a 70°C mentre quella di ritorno è pari a 45°C. Per la stagione di raffrescamento si hanno due condizionatore, in classe A+, posizionati nella camera matrimoniale e nel soggiorno.

Non è presente né un impianto fotovoltaico né un impianto solare termico.

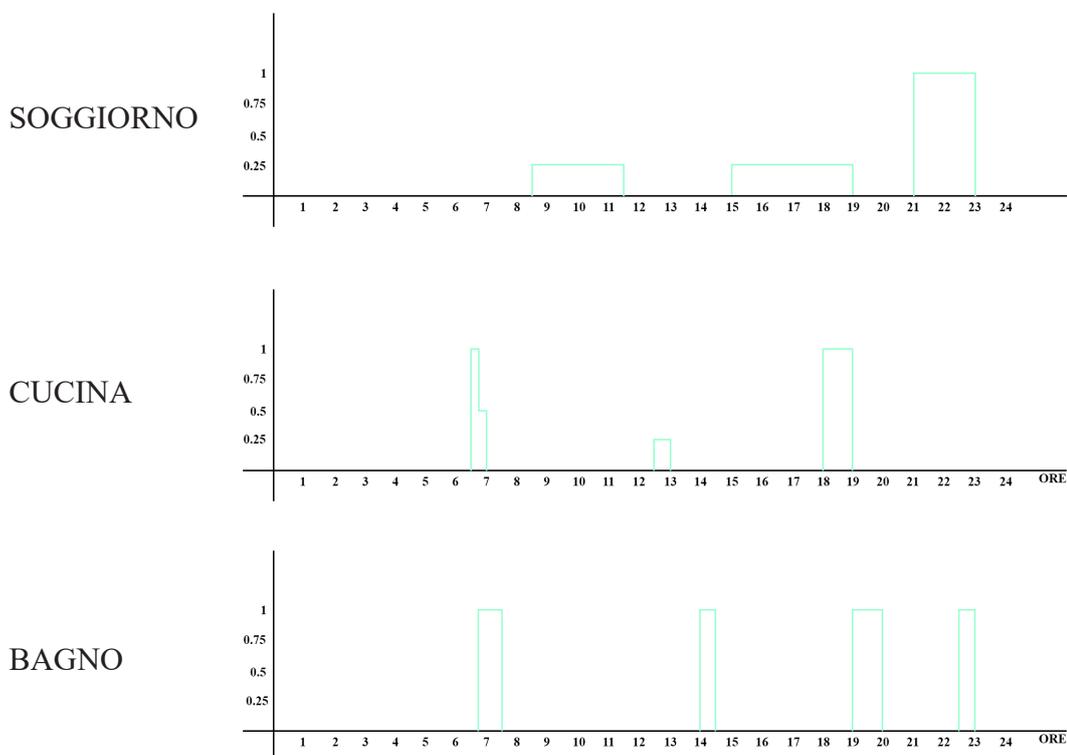
In mancanza dei dati reali, la potenza dei singoli terminali è stata calcolata in maniera analoga al precedente appartamento.

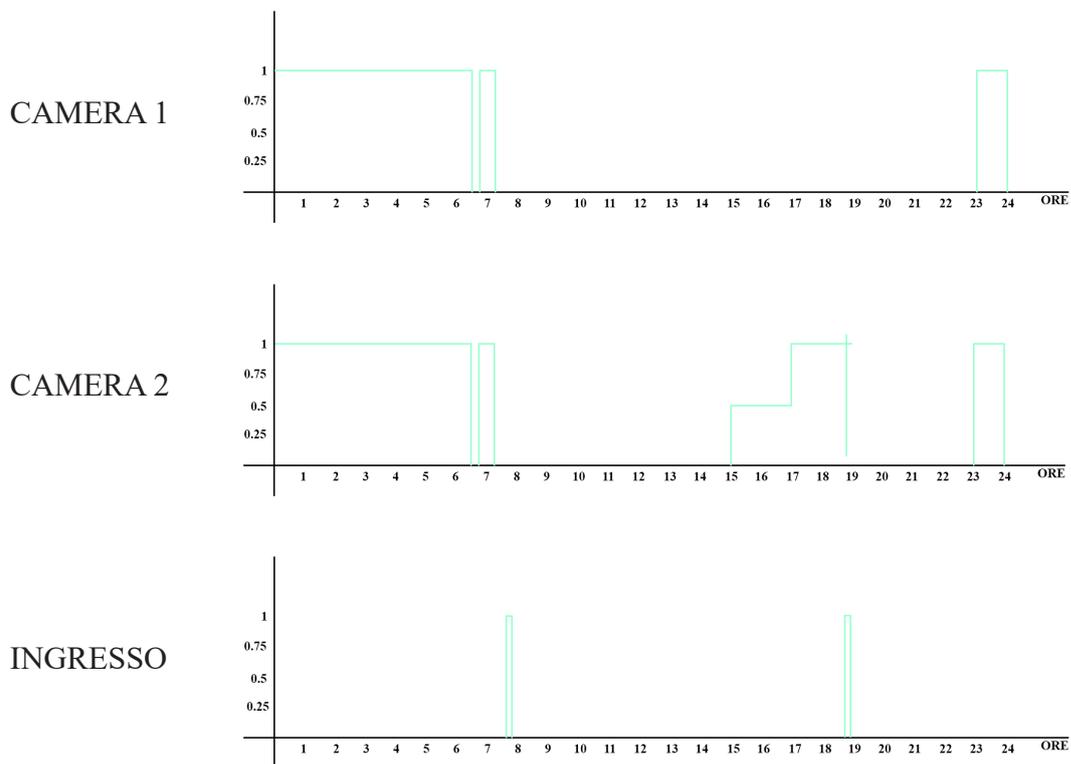
LOCALE	AREA [m <sup>2</sup> ]	POTENZA [W]	N° ELEMENTI TERMINALE
SOGGIORNO	12,84	473,30	5
CUCINA	6,27	231,12	3
BAGNO	5,03	185,41	2
CAMERA 1	15,34	565,46	6
CAMERA 2	9,84	362,72	4
INGRESSO	4,537	167,24	2

Figura 30: tabella dimensionamento terminali di riscaldamento

### 3.2.2.5 Profili d'uso locali

Vengono di seguito riportati i profili d'uso di tutti i locali dell'appartamento. Nel grafico vengono riportate sull'asse delle ascisse le diverse ore della giornata e sull'asse delle ordinate il fattore di presenza. Questo indica quanti occupanti sono presenti, nell'ora indicata, in un determinato locale. Essendo quattro il numero totale dei componenti della famiglia, il fattore di presenza pari a 1 indica la presenza di tutti gli utenti.





### 3.2.2.6 Elettrodomestici e luci interne

Sulla base della documentazione fornitaci, si hanno:

	ELETTRODOMESTICO	POTENZA [W]	ACCENSIONE [min/giorno]
<b>SOGGIORNO</b>	Aspirapolvere	1800	10
	Ferro da stiro	2000	20
	Stereo	100	60
	Tv 26"	200	320
	Lettore DVD	50	4
	PC fisso	300	60
<b>CUCINA</b>	Frigorifero	250	sempre acceso
	Lavastoviglie	2000	7 cicli/settimana
	Bistecchiera	2000	3
	Robot cucina	500	5
	Forno elettrico	2000	15
	Bollitore	25	5
	Tv 23"	100	10
	Macchina caffè elettrica	1500	2
	Forno a microonde	2050	5
<b>BAGNO</b>	Lavatrice	1800	5 cicli/settimana
	Asciugacapelli	2200	5
<b>CAMERA 1</b>	Tv 23"	180	5
<b>CAMERA 2</b>	PC portatile	200	120
	Stampante	100	5

Figura 31: tabella riassuntiva elettrodomestici

	TIPOLOGIA LAMPADA	POTENZA [W]	[lumen/W]
<b>SOGGIORNO</b>	Lampada fluorescente	20	90
	Lampada fluorescente	20	90
<b>CUCINA</b>	Lampada LED	20	90
<b>BAGNO</b>	Lampada fluorescente	15	60
	Lampada alogena (specchiera)	18	11
<b>CAMERA 1</b>	Lampada fluorescente	15	60
	Lampada alogena (abat-jour)	8	14
	Lampada alogena (abat-jour)	8	14
<b>CAMERA 2</b>	Lampada fluorescente	15	60
	Lampada fluorescente (abat-jour)	8	14
	Lampada fluorescente (abat-jour)	8	14
<b>INGRESSO</b>	Lampada fluorescente	15	60

Figura 32: tabella riassuntiva illuminazione artificiale

***CAPITOLO 4***  
***MODELLAZIONE***

#### ***4.1. Simulazione dinamica tramite il software Ida Ice***

La simulazione dinamica offre la possibilità di controllare un elevato numero di variabili relative e influenti sul sistema edificio-impianto preso in analisi. Maggiore è il grado di dettaglio e di precisione di tali dati maggiore risulta, ovviamente, la qualità predittiva del modello creato.

I software di simulazione dinamica lavorano considerando un intervallo temporale limitato, definibile dal progettista. Nei casi studio analizzati si è valutato un intervallo con passo orario in quanto è risultato il miglior compromesso tra un elevato grado di dettaglio ottenibile dal software ed il tempo non eccessivo per l'esecuzione del calcolo.

La simulazione in regime dinamico permette di ottenere modelli energetici molto precisi e corrispondenti alla situazione reale. Questo consente sia di proporre interventi progettuali pertinenti sia di dimensionare in maniera più corretta l'impianto che dovrà servire l'edificio.

Da un punto di vista normativo, la simulazione dinamica viene introdotta, nel quadro nazionale, dal DPR 59/2009, che riassume nell'articolo 4 comma 27 come *“nel calcolo rigoroso della prestazione energetica dell'edificio occorre prendere in considerazione [...] l'influenza dei fenomeni dinamici attraverso l'uso di opportuni modelli di simulazione”*. Tuttavia la norma che definisce i metodi applicativi della simulazione in regime dinamico è la UNI EN ISO 52016, pubblicata il primo marzo 2018. Questa abolisce le principali norme precedentemente in vigore, tra cui:

- UNI EN 15265:2008 – Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento ed il raffrescamento degli ambienti mediante metodi dinamici – Criteri generali e procedimenti di validazione;
- UNI EN 15255:2008 – Calcolo del carico sensibile di raffrescamento di un ambiente – Criteri generali e procedimenti di validazione;
- UNI EN ISO 13790:2008 – Prestazione energetica degli edifici – Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento e raffrescamento;
- UNI EN ISO 13791:2012 – Prestazione termica degli edifici – Calcolo della temperatura interna estiva di un locale in assenza di impianti di climatiz-

zazione – Criteri generali e procedure di validazione;

- UNI EN ISO 13792:2012 – Prestazione termica degli edifici – Calcolo della temperatura interna estiva di un locale in assenza di impianti di climatizzazione – Metodi semplificati;

La norma UNI EN ISO 52016 diventerà ad ogni modo effettiva in seguito alla pubblicazione dei relativi allegati, previsti per il 2019 [43].

La precisione dei risultati di output di un modello eseguito tramite una simulazione dinamica è direttamente proporzionale alla quantità, precisione e correttezza dei dati di input.

Tramite questo metodo simulativo è quindi possibile determinare il carico sensibile di riscaldamento e raffrescamento, la temperatura interna invernale ed estiva e calcolare il fabbisogno energetico, definito per ogni ambiente, sia per il riscaldamento che per il raffrescamento.

Analizzando nel dettaglio i risultati ottenibili per ogni ambiente si ha:

- Temperatura dell'aria e temperatura percepita;
- Temperatura dell'aria al pavimento e al soffitto;
- Temperatura e flussi di calore sulle singole superfici;
- Bilancio termico;
- Benessere termoigrometrico secondo gli indici di Fanger (PPD, PMV);
- Qualità dell'aria interna tramite ricambi d'aria/ora, livello di CO<sub>2</sub> e umidità;
- Flussi d'aria e ventilazione meccanica controllata (VCM);
- Dispersione dei flussi di calore attraverso l'aria, l'involucro e le murature;
- Illuminazione solare;
- Controllo degli ombreggiamenti

Nella presente tesi il calcolo del fabbisogno energetico in regime dinamico è stato eseguito con il software Ida Ice, acronimo di Ida Indoor Climate and Energy (versione 4.8).

Esso, a differenza di altri software come ad esempio Design Builder, è formato da due componenti: sia il motore di calcolo che l'interfaccia grafica [44].

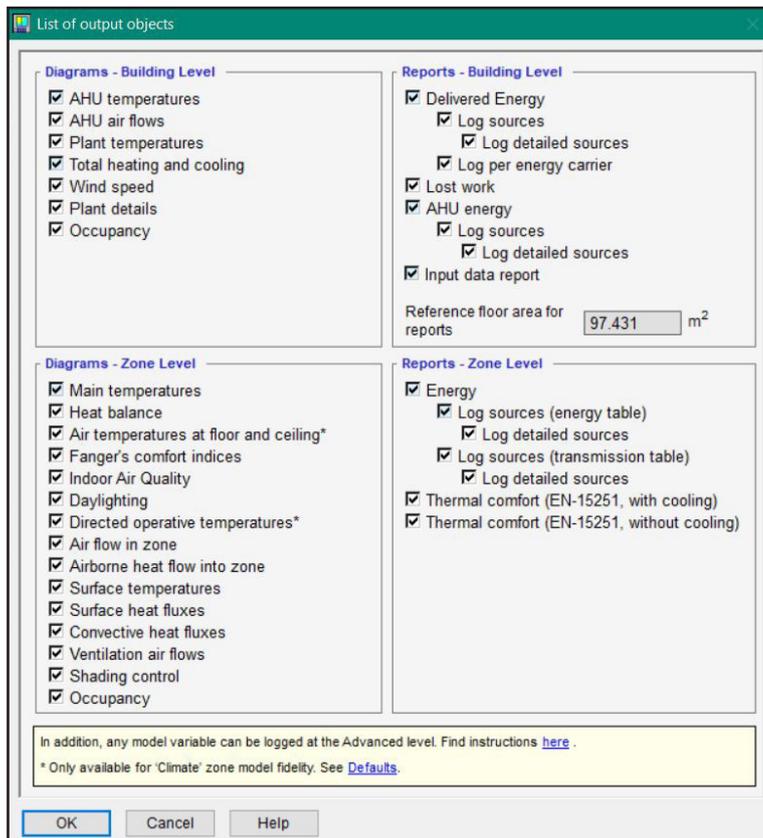
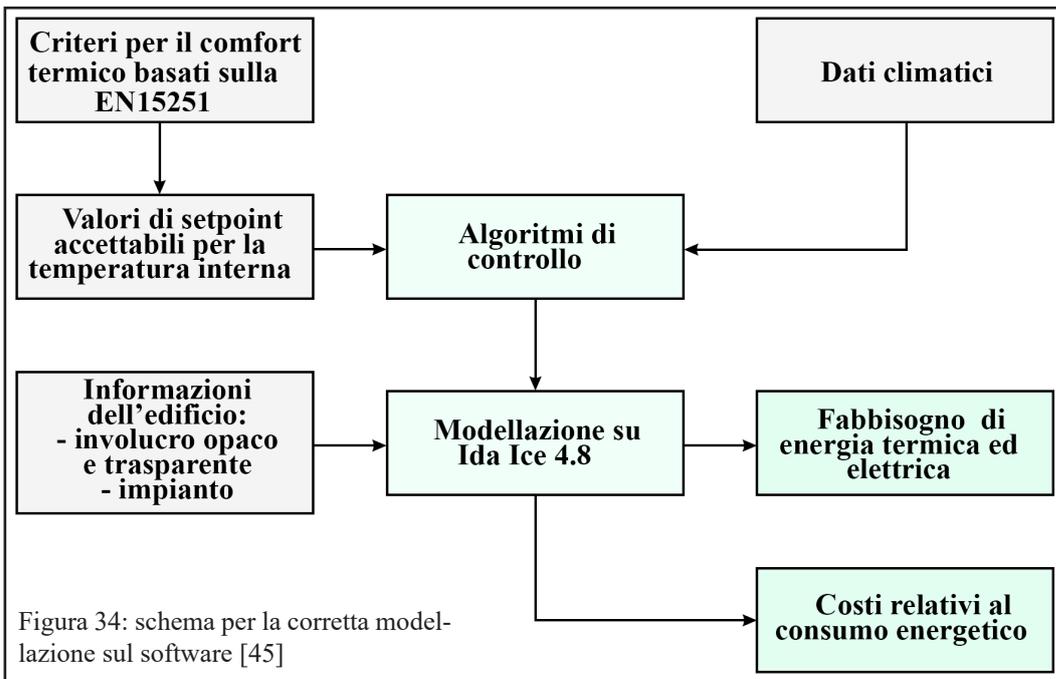


Figura 33: schermata del software Ida Ice per la scelta degli output da calcolare.

#### 4.2. Modellazione del caso studio

La modellazione del caso studio è cominciata dalla definizione delle proprietà geometriche dell'edificio. A seguito dell'importazione della pianta, in formato CAD, sul software Ida Ice, si è proceduto nell'assegnazione delle componenti opache e trasparenti. Successivamente sono stati individuati i locali, ai quali sono stati abbinati i rispettivi profili d'uso. Sono stati inoltre inseriti gli elettrodomestici e le luci presenti sulla base delle indicazioni presenti sulla documentazione fornitaci dall'Agenzia ENEA. In ultimo è stato modellato il sistema impiantistico, inserendo sia la funzione preposta al riscaldamento che quella per il raffrescamento. In ogni locale sono poi stati inseriti i radiatori ad acqua come terminali di emissione mentre il condizionatore è stato inserito unicamente nella camera da letto matrimoniale.

Una volta terminata la modellazione dello stato di fatto si è ancora provveduto all'inserimento di alcuni parametri in modo tale da renderlo il più possibile affine alla situazione reale. In particolare sono state inserite delle logiche di controllo molto semplici che andassero a simulare sia delle abitudini quotidiane degli occupanti, come la chiusura dei sistemi oscuranti nel periodo notturno, sia quelle impostazioni gestite dal termostato per la stagione di riscaldamento [35].



Project: C3\_1\_CON LOGICHE access\_PROVA 0

Location: Roma (L. da Vinci Airport / Fiumicino)\_162420 (ASHI)

Climate: ITA\_ROMA-FIUMICINO\_162420(W2)

Wind Profile: City center (ASHRAE 1993)

Holidays: <value not set>

Name	Group	Floor height, m	Room height, m	Floor area, m2	Heat setpt, °C	Cool setpt, °C	AHU	System	Supply air L/s (pg)	Return air L/s (m2)	Occup. no./m2	Lights, W/m2	Lights, kW/m2	Equipme nt, W/m2	Equipme nt, kWh/m2	Ext win area, m2	Occup. schedule	Light schedule	Equipm. schedule
SOGGIORNO		0.0	3.0	20.64	20.0	26.0	No cen...	n.a.	n.a.	n.a.	0.1938	4.187	113.9	12.38	2.1	OCCU...	LAMPA...	<mixed>	
CUCINA		0.0	3.0	6.56	20.0	26.0	No cen...	n.a.	n.a.	n.a.	0.6096	3.049	6.677	579.3	369.3	4.8	OCCU...	LAMPA...	<mixed>
BAGNO		0.0	3.0	5.95	20.0	26.0	No cen...	n.a.	n.a.	n.a.	0.1681	5.548	3.497	672.3	213.2	2.1	OCCU...	<mixed>	<mixed>
CAMERA2		0.0	3.0	20.49	20.0	26.0	No cen...	n.a.	n.a.	n.a.	0.0976	2.147	1.841	14.64	7.155	2.55	OCCU...	<mixed>	<mixed>
RIPOSTIGLIO		0.0	3.0	1.89	20.0	26.0	No cen...	n.a.	n.a.	n.a.	0.5291	13.23	1.699	0.0	0.0	0.0	OCCU...	LAMPA...	<mixed>
CORRIDOIO		0.0	3.0	4.541	20.0	26.0	No cen...	n.a.	n.a.	n.a.	0.2292	1.762	0.1698	0.0	0.0	0.0	OCCU...	LAMPA...	<mixed>
INGRESSO		0.0	3.0	10.15	20.0	26.0	No cen...	n.a.	n.a.	n.a.	0.09852	6.404	0.5944	0.0	0.0	0.0	OCCU...	LAMPA...	<mixed>
CAMERA 1		0.0	3.0	27.21	20.0	26.0	No cen...	n.a.	n.a.	n.a.	0.0735	2.536	0.8406	0.0	0.0	3.75	OCCU...	<mixed>	<mixed>
<b>Totale</b>											<b>0.1642</b>	<b>3.592</b>	<b>107.3</b>	<b>42.01</b>	<b>2.48</b>				

Figura 35: schermata iniziale del software Ida Ice

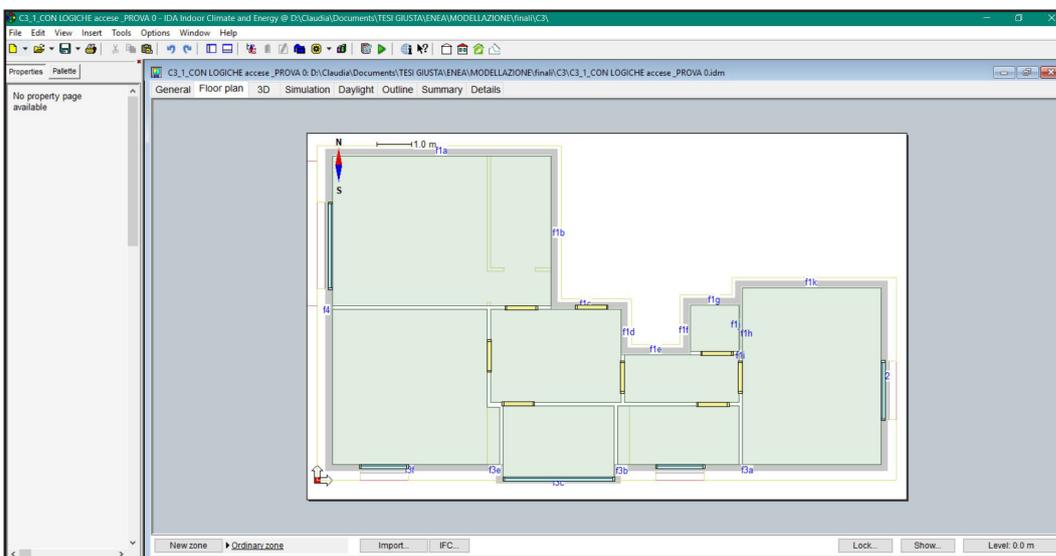


Figura 36: schermata per la modellazione geometrica del software Ida Ice

### **4.3. Risultati modellazione**

A seguito dell'estrapolazione dei primi dati dei modelli dei suoi casi studio simulati sul software si è andato a paragonare i risultati di fabbisogno annuale termico ed elettrico ottenuti con i dati reali a noi forniti dall'ENEA. Si è successivamente proceduto con la calibrazione del modello [39] in modo tale da renderlo quanto più possibile simile allo stato di fatto. Questa procedura rappresenta un passaggio fondamentale per poter ricavare, in un secondo momento, una previsione quanto più puntuale e precisa del comportamento che l'edificio in analisi avrebbe qualora si andasse ad inserire l'impianto domotico con le logiche sviluppate nella presente tesi.

Si riporta la tabella di confronto dei risultati ottenuti sia per il fabbisogno elettrico annuale, espresso in kWh, sia per il fabbisogno termico annuale, espresso in Sm<sup>3</sup>. E' tuttavia importante precisare che, per quanto riguarda quest'ultimo, si è confrontato il risultato ottenuto dal software Ida Ice con i risultati della bolletta del gas scorporati della quota relativa al consumo dato dall'uso per l'acqua calda sanitaria e per la cottura dei cibi. Questo è stato ottenuto a seguito della costruzione della firma energetica dell'edificio, ponendo sull'asse delle ascisse la temperatura media esterna, espressa in °C, e sull'asse delle ordinate il consumo di gas, espresso in Sm<sup>3</sup>, delle bollette fornite dall'ENEA. Il risultato, dato ha portato ad avere due rette rispettivamente per la stagione di riscaldamento, indicata nel grafico con colore verde scuro, e per la stagione di raffrescamento, in verde chiaro. Attorno a tali rette si raggruppano i valori dati dall'intersezione della temperatura media di ogni mese del 2017 [60] con il valore della bolletta di gas di quello stesso mese.

Dal momento che, nei mesi della stagione di raffrescamento, il consumo di gas è rappresentato unicamente dagli usi di cottura e acqua calda sanitaria, si è andato a quantificare tale valore in modo tale da scorporarlo ai consumi di gas nei mesi della stagione di riscaldamento ed ottenere il valore approssimativo del consumo per la sola funzione di riscaldamento dell'appartamento.

Questo è stato possibile analizzando la retta relativa ai mesi estivi in quanto la sua altezza sull'asse delle ordinate, ovvero il valore  $q$  nell'equazione della retta  $y = mx + q$ , delimita quell'area corrispondente alla quantità di gas utilizzata per acqua cal-

da sanitaria e cottura cibi. Essendo quest'ultima pressoché costante nella stagione di raffrescamento, si è ipotizzato che lo fosse anche per la stagione di riscaldamento, ottenendo un valore pari a circa il 30% nel primo caso studio e pari circa al 20% nel secondo caso.

Si è quindi ottenuto il valore del consumo di gas per il solo riscaldamento, andando a sottrarre la quota trovata dai consumi totali di gas riportati nelle rispettive bollette. Nella seguente tabella si riassumono i risultati dati dal confronto tra lo stato di fatto ed il modello calibrato per entrambi gli appartamenti simulati.

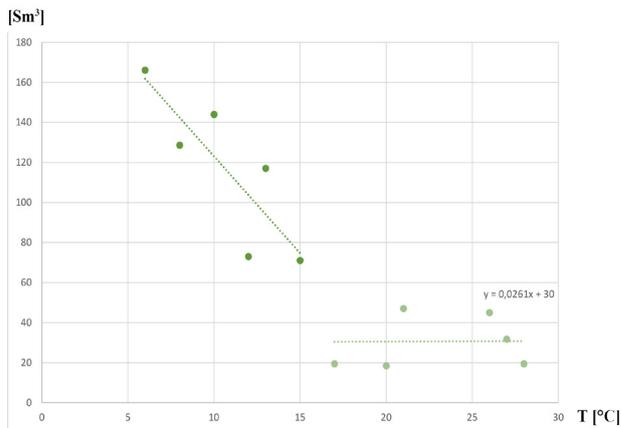


Figura 37: firma energetica dell'edificio I

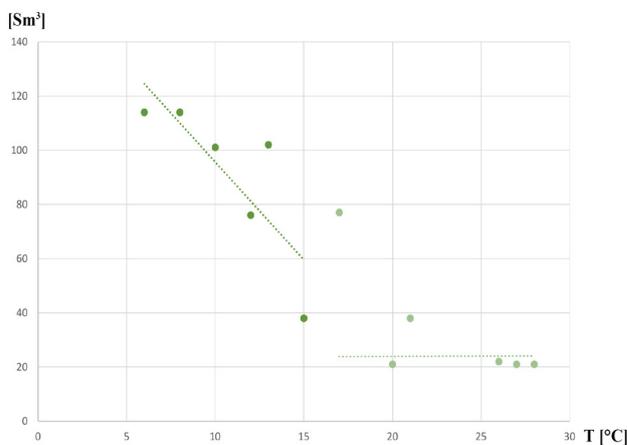


Figura 38: firma energetica dell'edificio II

**EDIFICIO I:**

FABBISOGNO TERMICO ANNUALE STATO DI FATTO REALE [Sm <sup>3</sup> ]	FABBISOGNO TERMICO ANNUALE STATO DI FATTO SIMULATO [Sm <sup>3</sup> ]	FABBISOGNO ELETTRICO ANNUALE STATO DI FATTO REALE [kWh]	FABBISOGNO ELETTRICO ANNUALE STATO DI FATTO SIMULATO [kWh]
(881 - 30%) = 616,7	609,75	1475	1343

Figura 39: tabella riassuntiva del fabbisogno annuale termico ed elettrico dello stato di fatto e del modello ottenuto tramite il software dell'edificio I

**EDIFICIO II:**

FABBISOGNO TERMICO ANNUALE STATO DI FATTO REALE [Sm <sup>3</sup> ]	FABBISOGNO TERMICO ANNUALE STATO DI FATTO SIMULATO [Sm <sup>3</sup> ]	FABBISOGNO ELETTRICO ANNUALE STATO DI FATTO REALE [kWh]	FABBISOGNO ELETTRICO ANNUALE STATO DI FATTO SIMULATO [kWh]
(745 - 20%) = 596	575	4036	3956

Figura 40: tabella riassuntiva del fabbisogno annuale termico ed elettrico dello stato di fatto e del modello ottenuto tramite il software dell'edificio II



***CAPITOLO 5***  
***LOGICHE DI CONTROLLO***

### **5.1. Algoritmi di controllo**

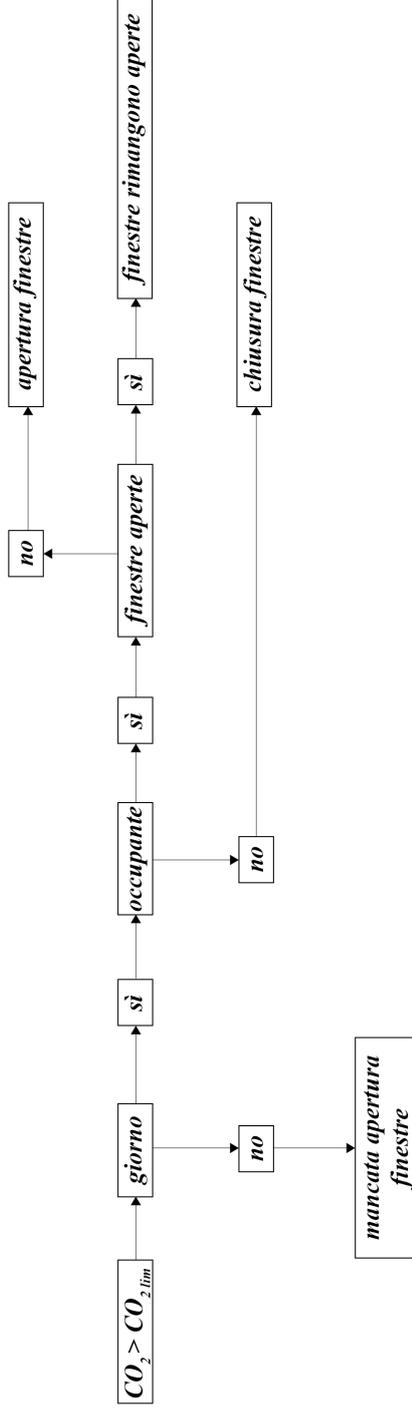
Per poter procedere allo sviluppo delle logiche di controllo da inserire nel software di simulazione scelto è risultato necessario definire prima degli alberi decisionali relativi alle funzioni di riscaldamento, raffrescamento, illuminazione, gestione dell'apertura/chiusura delle finestre e dei sistemi oscuranti. Essi hanno la funzione di evidenziare e riassumere, per via grafica, le relazioni causali tra i diversi dati di input. Questi concernono il mantenimento delle condizioni di salubrit  e comfort degli ambienti interni. Nello specifico, essi sono:

- Concentrazione di CO<sub>2</sub> nell'aria, misurata in parti per milione (ppm). La qualit  dell'aria interna, definita con l'acronimo IAQ dalla sigla inglese Interior Air Quality, viene garantita nel caso in cui la concentrazione di anidride carbonica, e di ulteriori inquinanti, non supera determinati valori, specificato nel paragrafo 5.3.1 del presente capitolo;
- Temperatura interna, espressa in gradi centigradi. Questa, sulla base della normativa UNI EN 15251[48] e UNI EN 12831 [49],   stabilita pari a 20  C nel periodo diurno, compreso tra le 6 e le 22, e di 18 C nel periodo notturno, dalle 22 alle 6;
- Illuminamento interno, espresso in lux,   quella grandezza fotometrica che consente di valutare la quantit  di flusso luminoso incidente su una determinata superficie. La normativa UNI EN 12464 [50], che sostituisce la precedente UNI 10380, suggerisce un illuminamento ottimale in relazione alle attivit  a cui il locale   preposto.

Dal momento che tutte le logiche di controllo interagiscono tra loro nel sistema edificio-impianto, si   reso indispensabile porre una priorit  tra di esse. Basandosi pertanto sulle informazioni sia del Report/Rds/2015/020 che della letteratura scientifica [51], si   posto come obiettivo primario il mantenimento di una buona qualit  dell'aria interna incidente sulla salute degli occupanti. Successivamente si   perseguito l'ottenimento del comfort termo-igrometrico ed, in ultimo, quello visivo. Si riportano di seguito gli alberi decisionali relativi alle funzioni precedentemente citate.

**1\_ALBERO  
DECISIONALE:**

APERTURA FINESTRE  
IN RELAZIONE ALLA  
CONCENTRAZIONE DI  
ANIDRIDE CARBONICA



Legenda:

-  $CO_{2,lim}$ : 1000 ppm



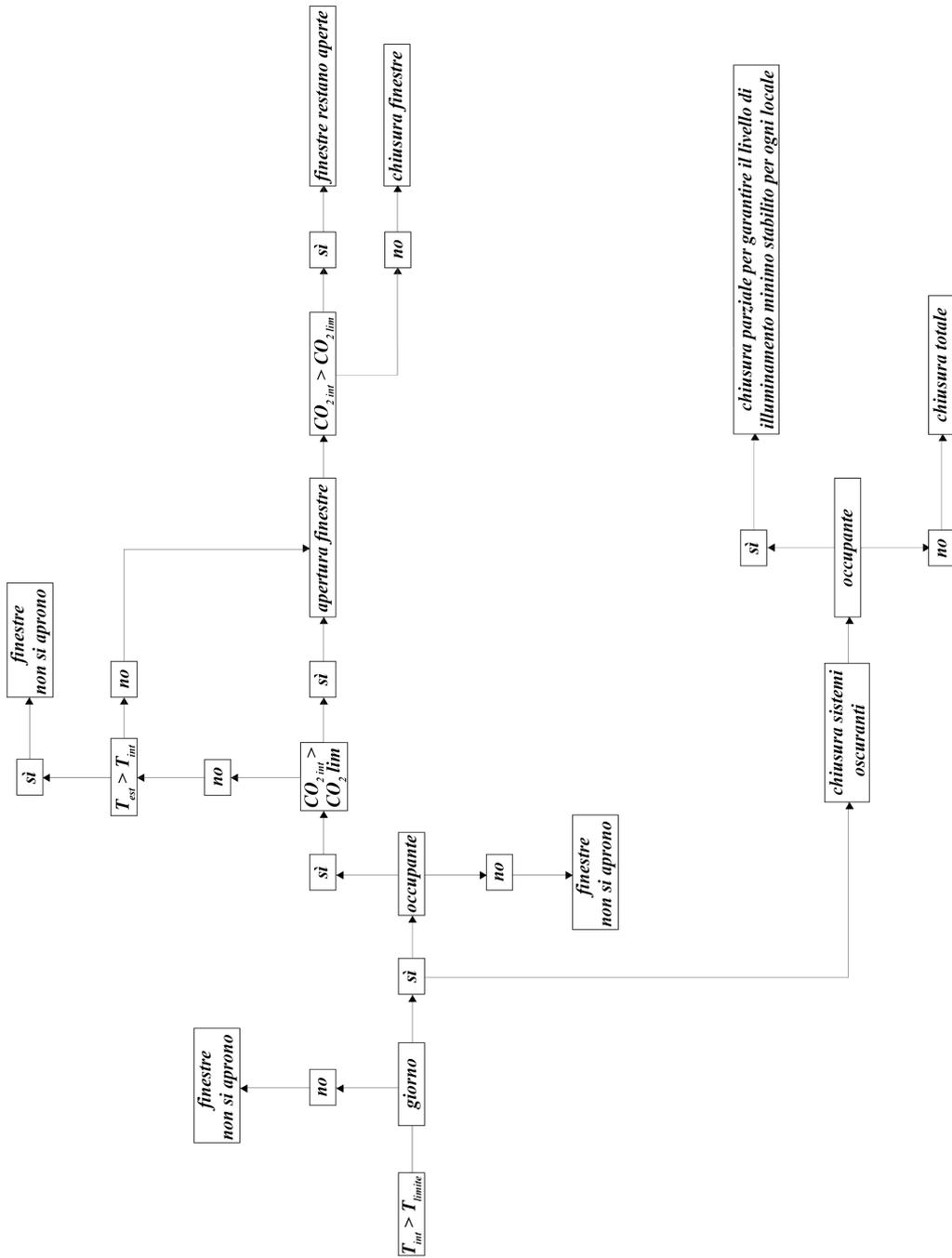
## 2.1\_ALBERO

### DECISIONALE:

APERTURA FINESTRE  
E CHIUSURA SISTEMI  
OSCURANTI NELLA  
STAGIONE DI RAFFRE-  
SCAMENTO IN RELA-  
ZIONE ALLA TEMPE-  
RATURA INTERNA

Legenda:

-  $CO_{2,lim}$ : 1000 ppm





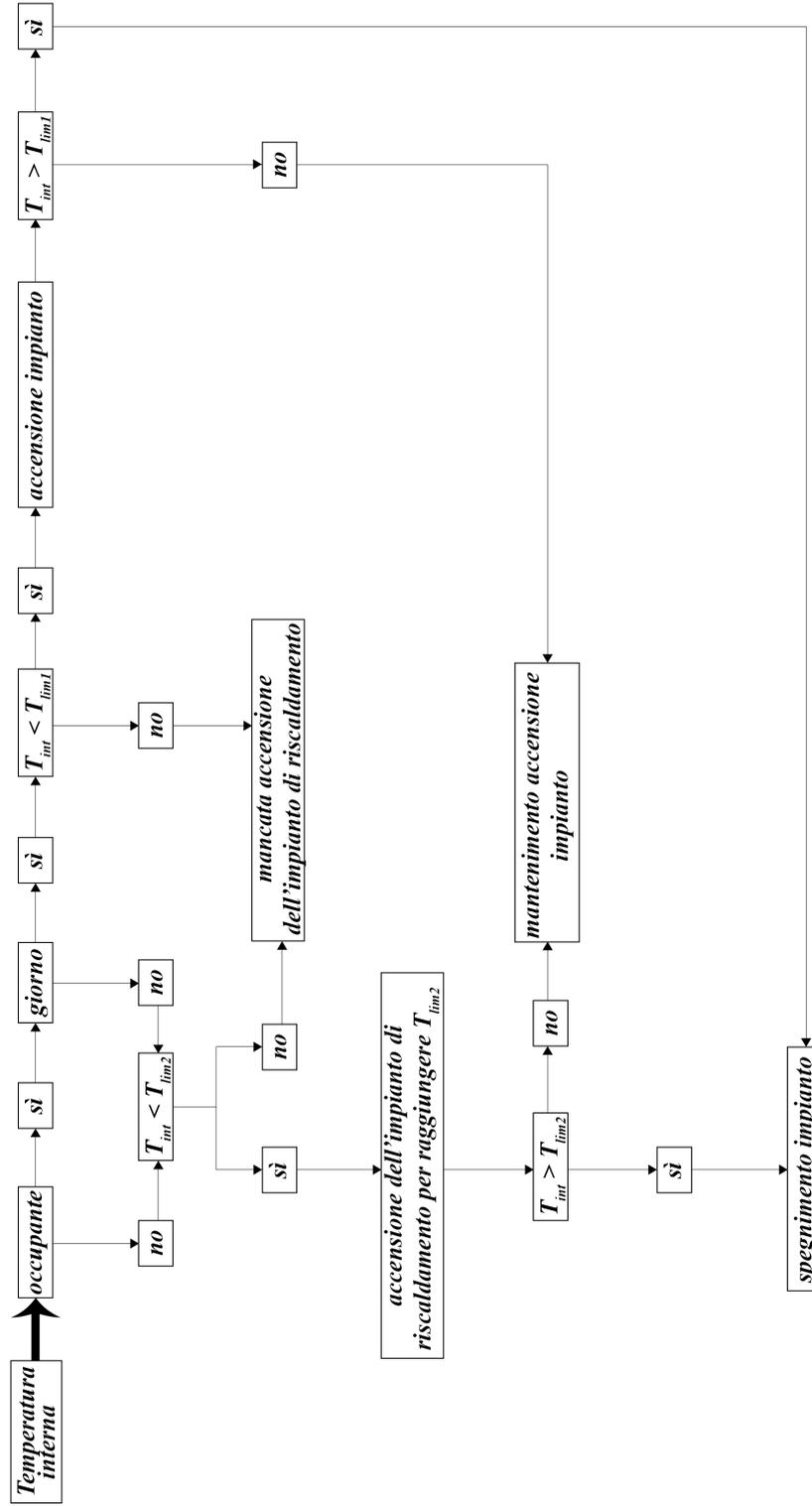




### 3.1\_ALBERO

#### DECISIONALE:

#### RISCALDAMENTO



Legenda:

-  $T_{lim1}$ : 20 °C;

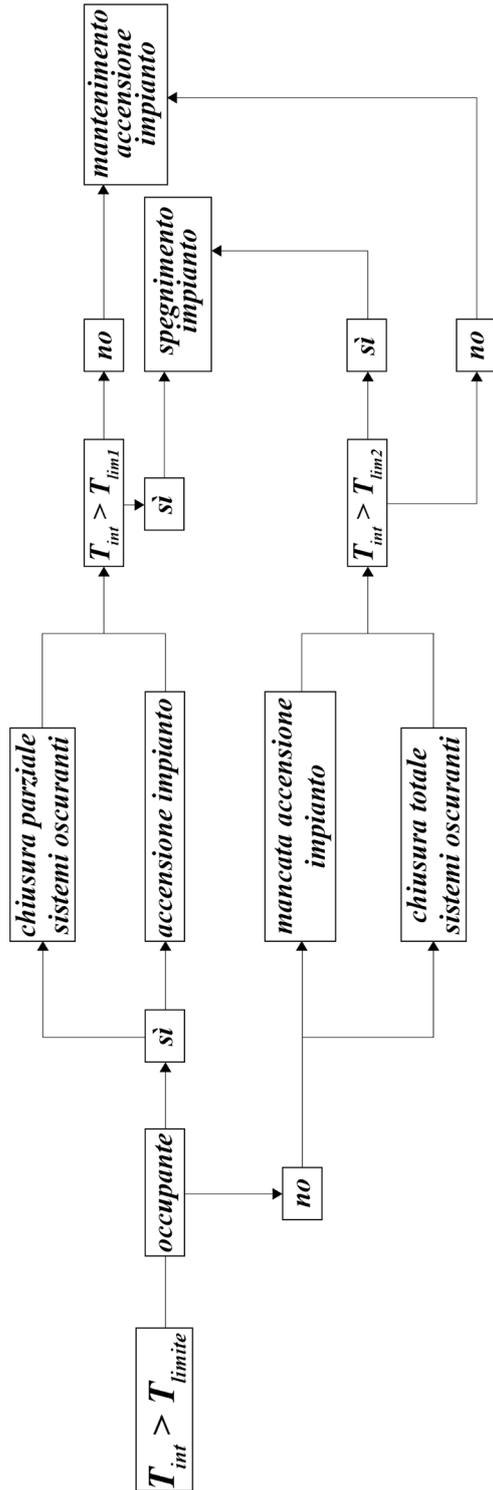
-  $T_{lim2}$ : 18 °C;



### 3.2\_ALBERO

#### DECISIONALE:

#### RAFFRESCAMENTO



Legenda:

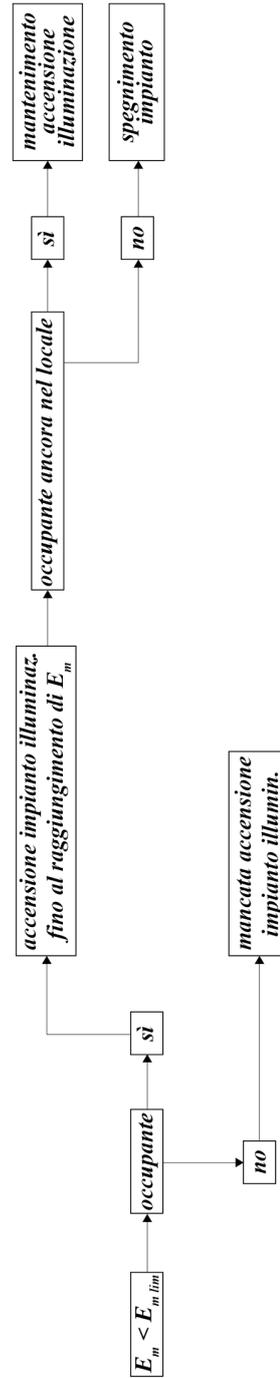
-  $T_{lim1}$ : 26 °C;

-  $T_{lim2}$ : 28 °C;

### 3.2\_ALBERO

#### DECISIONALE:

#### ILLUMINAMENTO



Legenda:

-  $E_m$ : valore illuminamento interno



## 5.2. Algebra booleana

Volendo procedere alla spiegazione dello sviluppo delle logiche di controllo inserite sul modello di base del caso studio, partendo dagli alberi decisionali riportati, è necessario introdurre il funzionamento dell'algebra booleana e delle tabelle della verità.

L'algebra booleana prende il nome dal matematico britannico George Boole (1815-1864), che per primo ha posto le basi di questa logica matematica. Essa si basa sul principio che le variabili possano avere solo due valori: 0 e 1. Questo concetto è il punto di partenza del sistema binario, su cui si basa tutta l'informatica e l'elettronica. In tali ambiti i valori di 0 e 1 possono assumere i significati, rispettivamente, di falso/circuito aperto e di vero/circuito chiuso. L'algebra booleana viene utilizzata ogni qual volta si voglia dare un comando/far eseguire un'attività. A tale scopo è necessario scrivere funzioni booleane tramite l'uso degli operatori booleani.

Questi si distinguono negli operatori fondamentali NOT ( $\bar{X}$ ), AND ( $X \cdot Y$ ) e OR ( $X + Y$ ), e negli operatori composti NAND e NOR. Solitamente essi vengono scritti nella loro rappresentazione grafica: la tabella della verità. Nelle prime due colonne si hanno le possibili qualità della proposizione di partenza mentre nella terza colonna vengono riportati i risultati dell'operazione eseguita [52].

Le tabelle della verità si applicano alle logiche di controllo in quanto, dopo aver assegnato due o più variabili relative a fenomeni fisici e alla presenza dell'inquilino, il risultato delle diverse operazioni va a far eseguire o meno un comando all'impianto domotico. In particolare, l'affermazione vera, rappresentata come già detto dal numero 1, indica che l'impianto andrà ad azionarsi, in relazione a dei valori minimi/massimi di alcune variabili fisiche, per intervenire sulla situazione reale al fine di ridurre i consumi energetici dell'appartamento e migliorare la salute, la sicurezza e/o il comfort di colui che lo vive [53].

Le operazioni proprie dell'algebra booleana sono servite allo sviluppo delle logiche di controllo dell'impianto di riscaldamento, raffrescamento, illuminazione, apertura delle finestre e regolazione dei sistemi oscuranti.

Vengono di seguito illustrati, nelle figure 31, 32 e 33, unicamente gli operatori utilizzati nella presente tesi.

$x$	$not(x)$
0	1
1	0

Figura 41: tabella della verità dell'operatore NOT

### OPERATORE NOT

Nella colonna a destra l'operazione "not" fa sì che venga riportata la variabile opposta a quella di partenza, indicata nella colonna di sinistra. Si ha di conseguenza che quel valore che non è zero non può che essere uno e viceversa.

$x$	$y$	$x \cdot y$
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Figura 42: tabella della verità dell'operatore AND

### OPERATORE AND

Nella colonna di destra l'operazione "and" risulta vera, quindi assume valori pari a 1, solo quando entrambe le variabili  $x$  e  $y$  risultano vere, rappresentate anch'esse dal valore 1.

$x$	$y$	$x + y$
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Figura 43: tabella della verità dell'operatore OR

### OPERATORE OR

Nella colonna di destra l'operazione "or" risulta vera, quindi assume valori pari a 1, qualora una delle due variabili tra  $x$  e  $y$  risultasse vera (quindi con valore 1).

### 5.3. Logiche di controllo

Dal momento che l'energia impiegata per il riscaldamento, raffrescamento ed illuminazione rappresenta la quota maggiore nel consumo energetico totale dell'edificio, le tecniche di Building Automation System (BAS) hanno come ruolo principale quello di perseguire un risparmio energetico che, inevitabilmente, va a tradursi in una riduzione dei costi per la gestione del manufatto.

Il BAS si basa sull'applicazione di alcune logiche, gestite in maniera automatica da un software, sui diversi impianti/componenti edilizi che, interagendo assieme tra loro stessi, garantiscono le proprietà di salubrità e comfort dell'ambiente interno.

Tali logiche sono costituite da input, funzioni e output.

Gli input rappresentano quelle variabili fisiche il cui valore, rilevato a seguito di una misurazione, pone eventualmente la necessità di un intervento sulla situazione reale per ripristinare le condizioni di progetto prestabilite. Questi, nella presente tesi, sono il valore della concentrazione di anidride carbonica, la temperatura interna, sia in regime estivo che in quello invernale, l'illuminamento interno, la temperatura esterna e la radiazione incidente sull'involucro trasparente.

Gli input sono legati ai controller, che svolgono nel software il ruolo degli operatori dell'algebra booleana, tramite diverse funzioni. Queste sono suddivise in classi di appartenenza a seconda delle loro proprietà.

Dai controller si ottengono infine degli output, che vanno ad incrementare o diminuire un determinato stato [51].

Risulta particolarmente utile l'applicazione del concetto di retroazione (feedback) alla logica di sistema in quanto consente di rendere più precisa l'azione svolta sfruttando la capacità del sistema di usare le informazioni in uscita per modificare gli input.

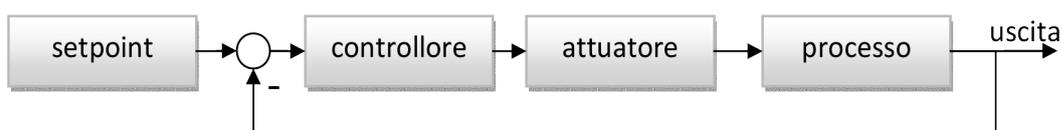


Figura 44: schema funzionale di un sistema avente la funzione di retroazione [54]

Solitamente gli input e gli output sono normalizzati in due soli valori, 0 e 1, rendendo le frasi o totalmente false o totalmente vere. Applicando la logica fuzzy, invece,

si possono ottenere frasi parzialmente vere oppure parzialmente false in quanto l'elemento considerato può assumere tutti i valori compresi nell'intervallo tra il valore 0 ed il valore 1. Tale elemento, essendo quindi definito da un valore continuo e non da uno stato binario traducibile nell'affermazione appartiene/non appartiene, conferisce alle proposizioni dei sistemi fuzzy un grado di verità continuo [54] [55].

### 5.3.1. Logiche di controllo - apertura finestre

La tutela della salute degli occupanti, come è già stato introdotto, rappresenta uno dei punti fondamentale degli edifici sostenibili. L'impianto domotico, attraverso l'applicazione delle logiche di controllo, permette di controllare la qualità dell'aria interna tramite la gestione dell'apertura delle finestre. Tale azione consente, infatti, di garantire un adeguato ricambio d'aria in modo da diminuire la concentrazione di CO<sub>2</sub> e di altri inquinanti. Si prevencono, in questo modo, l'insorgenza sia della Sick Building Syndrome (SBS), caratterizzata da sintomi aspecifici che portano l'utente a percepire discomfort all'interno dell'edificio, e la Building Related Illness (BRI), che vede la causa dell'insorgenza di alcune patologie, come la legionellosi, l'asma o l'alveolite allergica, nella permanenza in edifici insalubri [56]. La produzione di anidride carbonica all'interno degli edifici dipende principalmente dalla presenza degli occupanti. L'aumento della concentrazione di CO<sub>2</sub> comporta una riduzione della concentrazione di ossigeno. Questo influisce sulla salute e sul comfort degli occupanti [57]. A livello europeo non si ha tuttavia una norma comune a tutti gli Stati Membri che imponga un limite preciso da non superare, bensì ogni Stato ha posto un range di valori. Questo è stato definito sulla base di tre parametri: la differenza di concentrazione tra l'ambiente interno e quello esterno, la portata d'aria specifica per occupante o per unità di superficie e il numero di ricambi/ora [58].

PAESE	VALORE GUIDA	RIFERIMENTO BIBLIOGRAFICO
Germania	CO <sub>2</sub> < 1800 mg/m <sup>3</sup> : concentrazione innocua	AG IRK/AOLG, 2008: Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft, Bundesgesundheitsbl - Gesundheitsforsch - Gesundheitsschutz
	1800 mg/m <sup>3</sup> < CO <sub>2</sub> > 3600 mg/m <sup>3</sup> : concentrazione elevata	
	CO <sub>2</sub> > 3600 mg/m <sup>3</sup> : concentrazione inaccettabile	
Francia	CO <sub>2</sub> < 1800 mg/m <sup>3</sup>	Evaluation de la qualité de l'air intérieure, 2010
Belgio	CO <sub>2</sub> < 900 mg/m <sup>3</sup>	Besluit van de Vlaamse Regering van 11 juni 2004 houdende maatregelen tot bestrijding van de gezondheidsrisico's door verontreiniging van het binnenmilieu - B.S.19.X.2004
Norvegia	CO <sub>2</sub> < 1800 mg/m <sup>3</sup>	R. Becher, 1999, Recommended guidelines for indoor air quality, Proceedings of Indoor Air'99, Edimburgh, Vol. 1: 171-176. Recommended Guidelines for Indoor Air Quality. National Institute Of Public Health (1999)
Portogallo	CO <sub>2</sub> < 1800 mg/m <sup>3</sup>	Decreto -Lei n.º 79/2006 de 4 de Abril - Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE)

Figura 45: tabella riassuntiva dei limiti di CO<sub>2</sub> posti in alcuni paesi europei [59]

Il fattore di conversione tra la concentrazione di anidride carbonica misurata in  $\text{mg}/\text{m}^3$  ed in ppm è indicato sulle Linee guida per la qualità dell'aria indoor, redatto dall'Organizzazione Mondiale della Sanità nel 2010. Considerando una temperatura di  $25^\circ\text{C}$  alla pressione di 760 mmHg, si ha  $1\text{mg}/\text{m}^3 = 0,556 \text{ ppm}$ . Eseguendo quindi l'opportuna equazione si hanno che 1800  $\text{mg}/\text{m}^3$  equivalgono a 1000,8 ppm. Tale valore viene riconosciuto anche dall'Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale (ARPA) [60]. Si è pertanto scelto come limite di soglia della presente tesi una concentrazione di anidride carbonica pari a 1000 ppm, in modo tale da allinearsi alle informazioni riscontrate nella letteratura.

La logica relativa all'apertura delle finestre racchiude sia la necessità di salubrità dell'aria (albero decisionale 1) che quella di comfort termico (albero decisionale 2) [61].

Si impone l'apertura delle finestre esclusivamente nel periodo diurno, con la negazione NOT alla schedule del periodo notte (22-6), e con la sola presenza dell'occupante nella stanza presa in analisi, riproponendo, in ogni locale, il profilo d'uso corrispondente tra quelli indicati nel capitolo 2.

Dopo aver stabilito tali condizioni, si analizza separatamente il caso estivo, individuato tramite la schedule "periodo estivo", ovvero dal 15 aprile al 1 novembre, e il caso invernale, indicato ponendo la negazione NOT alla schedule del periodo estivo.

Nella stagione di raffrescamento è sufficiente che sia verificata una sola delle due condizioni (operatore OR), tra il superamento della concentrazione massima di anidride carbonica ed della temperatura limite di progetto, per fare in modo che si vada ad aprire la finestra. Entrambi i parametri sono rilevati dal sensore corrispondente. E' stato posto che ve ne fosse uno per ogni locale in modo tale da rendere più preciso e sofisticato il Building Automation System [62]. Bisogna tuttavia considerare che l'apertura del serramento dettata dal superamento della temperatura limite interna è subordinata alla verifica della temperatura esterna in quanto, qualora essa avesse un valore superiore a quella di progetto ( $26^\circ\text{C}$ ), sarebbe controproducente immettere aria dall'esterno con l'intento di raffrescare la stanza. Il valore limite per la temperatura interna è stato posto a  $21^\circ\text{C}$  in quanto, dopo numerosi tentativi, si è

rivelato il risultato più adatto per sfruttare appieno l'azione di free cooling in modo tale da non ricorrere all'uso del condizionatore.

Nella stagione di riscaldamento, invece, l'apertura delle finestre è subordinata unicamente alla concentrazione di anidride carbonica.

Le due condizioni, invernale ed estiva, sono in ultimo messe in relazione tra loro tramite una sommatoria, avente funzione di un operatore OR, in modo tale che la logica gestisca e controlli il parametro in considerazione durante tutto l'arco dell'anno.

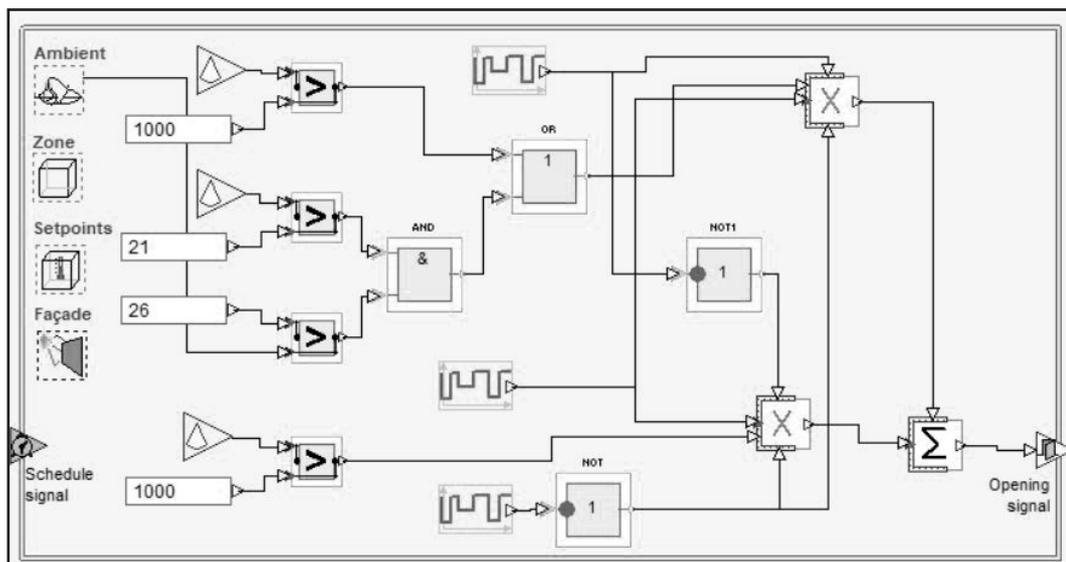


Figura 46: schermata di Ida Ice raffigurante la logica di controllo relativa all'apertura finestre

Figura 47: tabella delle variabili

NOME VARIABILE	PARAMETRO		VALORE
F1	CO <sub>2</sub>	> CO <sub>2</sub> lim	1
		< CO <sub>2</sub> lim	0
F2	T <sub>int</sub>	> 26 °C	1
		< 26 °C	0
F3	T <sub>est</sub>	< 26 °C	1
		> 26 °C	0
F4	T <sub>int</sub>	> 28 °C	1
		< 28 °C	0
F5	T <sub>int</sub>	< 20 °C	1
		> 20 °C	0
F6	T <sub>int</sub>	< 18 °C	1
		> 18 °C	0
F7	Radiazione solare	> 150 W/m <sup>2</sup>	1
		< 150 W/m <sup>2</sup>	0
F8	E <sub>int</sub>	< E <sub>int</sub> lim	1
		> E <sub>int</sub> lim	0
F9	Occupante	presenza	1
		assenza	0
F10	Occupante	sveglia	1
		dorme	0

Viene riportata la tabella riassuntiva delle variabili utilizzate nella presente tesi. Il codice che le caratterizza, quindi, sarà il medesimo in tutte le logiche di controllo.

Tabelle della verità per l'apertura delle finestre

NOME VARIABILE	PARAMETRO		VALORE
F1	CO <sub>2</sub>	> CO <sub>2</sub> lim	1
		< CO <sub>2</sub> lim	0
F2	T <sub>int</sub>	> 26 °C	1
		< 26 °C	0
F3	T <sub>est</sub>	< 26 °C	1
		> 26 °C	0
F9	Occupante	presenza	1
		assenza	0
F10	Occupante	sveglio	1
		dorme	0

Figura 48: variabili presenti

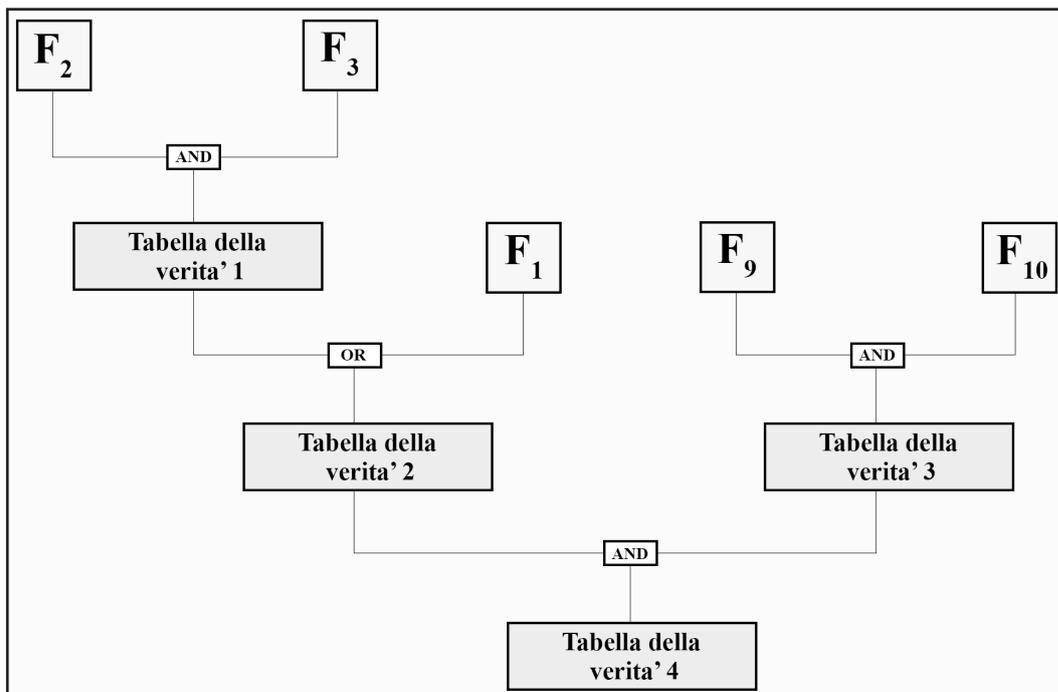


Figura 49: schema riassuntivo della logica di controllo per l'apertura delle finestre

Si pongono:

$$[(F_2) \text{ AND } (F_3)] = A$$

$$[(A) \text{ OR } (F_1)] = B$$

$$[(F_9) \text{ AND } (F_{10})] = C$$

F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>2</sub> AND F <sub>3</sub>
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

**TABELLA della VERITA' 1**

A	F <sub>1</sub>	A OR F <sub>1</sub>
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

**TABELLA della VERITA' 2**

F <sub>9</sub>	F <sub>10</sub>	F <sub>9</sub> AND F <sub>10</sub>
0		0
1	0	0
1	1	1

**TABELLA della VERITA' 3**

Il valore di F<sub>10</sub> (occupante sveglio-dorme) viene considerato unicamente quando l'occupante risulta nel locale (ovvero F<sub>9</sub>=1)

B	C	B AND C
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

**TABELLA della VERITA' 4**

In quest'ultima tabella della verità il valore pari a uno indica l'apertura delle finestre mentre quello pari a zero rappresenta la non apertura di esse.

### **5.3.2. Logiche di controllo - regolazione sistemi oscuranti**

La chiusura dei sistemi oscuranti concorre all'abbassamento della temperatura interna all'edificio tramite la limitazione dell'apporto solare. Rappresenta quindi, assieme al free-cooling, una soluzione gratuita, da un punto di vista energetico, per mantenere il comfort termico interno [63].

Sono stati eseguiti diversi tentativi per riuscire a trovare la soluzione che meglio conciliasse il soddisfacimento dello standard minimo di luce naturale negli ambienti con la riduzione della temperatura interna.

I calcoli, per il confronto di questi parametri, sono stati eseguiti nella condizione più sfavorevole, rappresentata dal giorno più caldo dell'anno [64].

I valori di comfort interni sono stati scelti sulla base della norma UNI EN ISO 15251 [48] e UNI EN 12464 [50], che va a sostituire la UNI 10380 [65].

Questa si compone di due parti: la prima (UNI 12464-1) tratta il progetto di illuminazione artificiale in ambienti di lavoro interni mentre la seconda (UNI 12464-2) si concentra sul progetto di illuminazione artificiale in ambienti di lavoro esterni [66].

Sulla base di quanto reperito nella letteratura e nella normativa si è scelto di impostare, nella presente tesi, un valore minimo di lux differente a seconda della destinazione d'uso del locale considerato. Nello specifico, sono stati previsti un minimo di 300 lux nella cucina e nel soggiorno e di 150 lux nel bagno e nelle camere da letto. La logica di controllo finale vede la divisione tra la stagione estiva e quella invernale.

Nel primo caso si ha una ulteriore distinzione data dalla presenza o dall'assenza dell'occupante. Questa discriminante determina rispettivamente la chiusura parziale o totale dei sistemi oscuranti in quanto, qualora la stanza fosse vuota, non si avrebbe la necessità di garantire il livello di illuminamento minimo. Gli altri fattori considerati riguardano il valore di temperatura interna, rilevato dal sensore del locale e la quantità di radiazione incidente sul serramento, pari a  $150 \text{ W/m}^2$  [67].

Il livello di chiusura massima dei sistemi oscuranti è stato posto differente per ogni locale in quanto per alcune stanze, essendo di giorno prevalentemente inutilizzate, si è ipotizzato sufficiente un livello di illuminamento leggermente inferiore a quello previsto come livello di illuminamento minimo precedentemente descritto.

Questo è stato pensato in particolare per i locali della camera da letto matrimoniale e per il bagno in quanto, nel primo caso, la stanza rimane inutilizzata per tutto l'arco della giornata mentre, nel secondo caso, si ipotizza che la chiusura massima del 75% dei sistemi oscuranti non rappresenti una situazione di discomfort per l'occupante dal momento che il tempo di utilizzo di tale locale risulta ridotto.

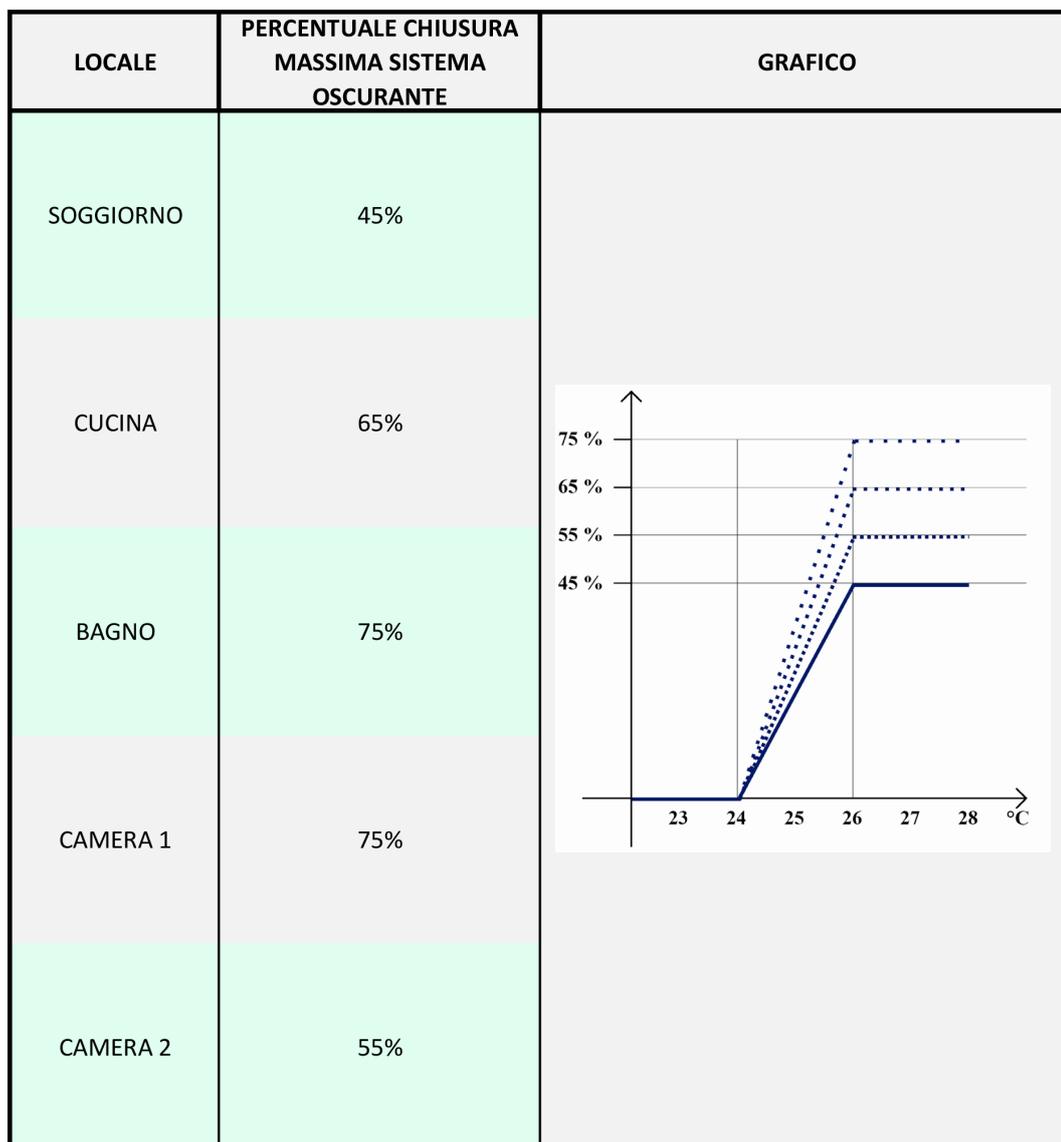


Figura 50: tabella riassuntiva dei valori di chiusura massima dei sistemi oscuranti per ogni stanza

Nel caso del periodo invernale, invece, il procedimento risulta l'opposto: qualora l'occupante non sia presente, il sistema oscurante rimane aperto in quanto l'apporto solare gratuito risulta un apporto positivo al bilancio termico dell'edificio.

In ultimo, le due condizioni sono legate, assieme alla schedule indicante il periodo notturno, tramite una sommatoria.

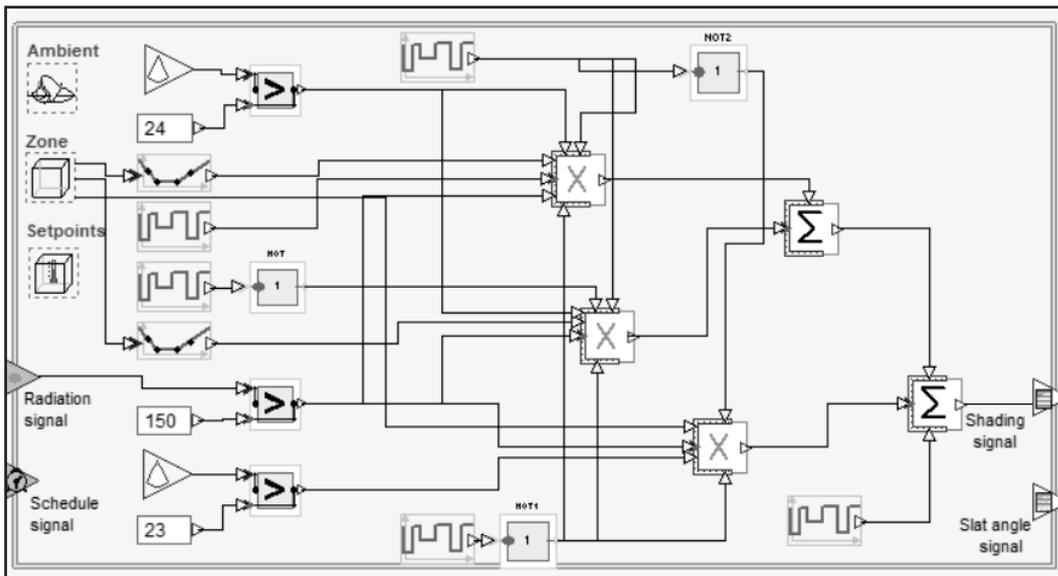


Figura 51: schermata di Ida Ice raffigurante la logica di controllo relativa alla chiusura dei sistemi oscuranti

NOME VARIABILE	PARAMETRO		VALORE
F2	$T_{int}$	> 26 °C < 26 °C	1 0
F7	Radiazione solare	> 150 W/m <sup>2</sup> < 150 W/m <sup>2</sup>	1 0
F9	Occupante	presenza assenza	1 0
F10	Occupante	sveglio dorme	1 0

Figura 52: variabili presenti

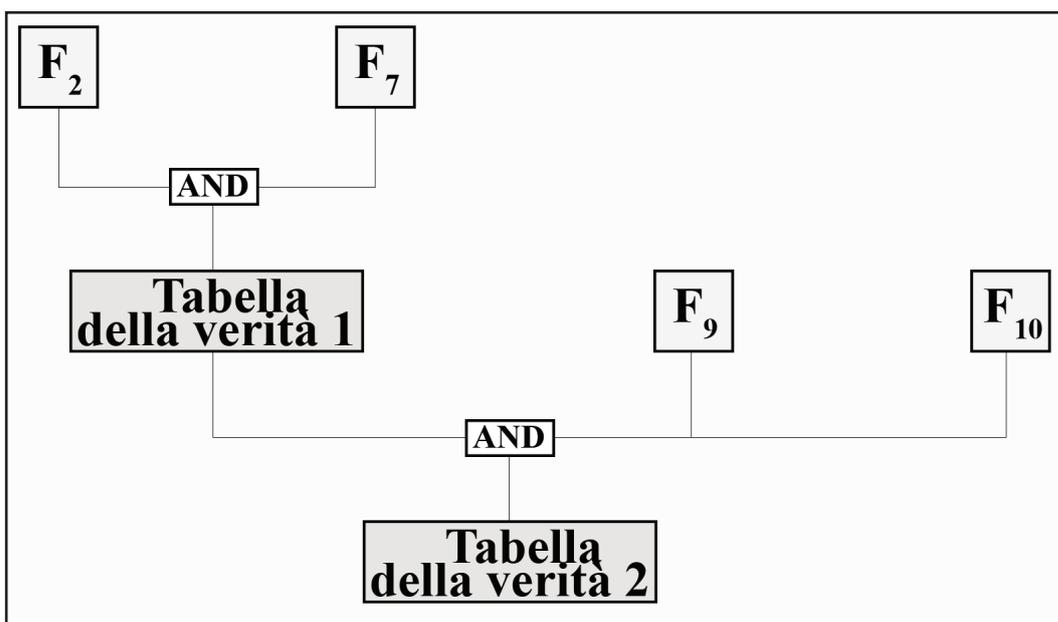


Figura 53: schema riassuntivo della logica di controllo per l'apertura delle finestre

Si pongono:

$$[(F_2) \text{ AND } (F_7)] = E$$

$$[(E) \text{ AND } (F_9)] = F$$

$$[(F) \text{ AND } (F_{10})] = G$$

F <sub>2</sub>	F <sub>7</sub>	F <sub>2</sub> AND F <sub>7</sub>
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

**TABELLA della VERITA' 1**

E	F <sub>9</sub>	E AND F <sub>9</sub>	F <sub>10</sub>	F AND F <sub>10</sub>
0	0	0		0
0	1	0	0	0
			1	0
1	0	0		0
1	1	1	0	0
			1	1

**TABELLA della VERITA' 2**

Il valore del risultato finale pari a uno comporta la chiusura parziale dei sistemi oscuranti mentre il valore pari a zero definisce due diverse azioni a seconda che esso sia dovuto al mancato raggiungimento delle condizioni illustrate nella tabella della verità 1 oppure sia dovuto dall'assenza dell'occupante, nonostante fossero verificate le condizioni appena citate. Nel primo caso, infatti, lo zero indica una totale apertura dei sistemi oscuranti mentre nel secondo caso rappresenta la condizione opposta, ovvero una totale chiusura.



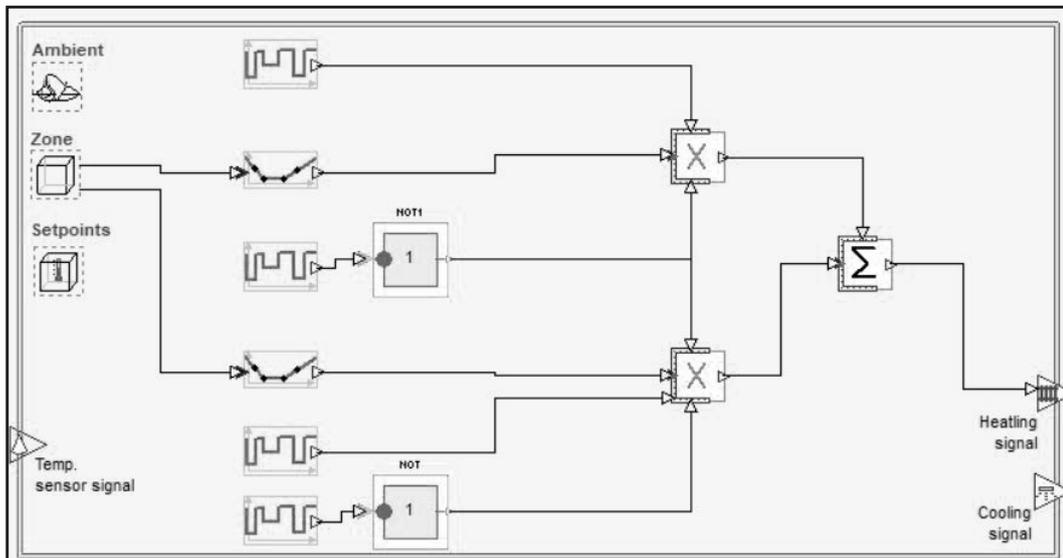


Figura 55: schermata di Ida Ice della logica di controllo relativa al riscaldamento nei locali aventi gli occupanti sia nel periodo diurno che notturno

NOME VARIABILE	PARAMETRO		VALORE
F5	$T_{int}$	< 20 °C	1
		> 20 °C	0
F6	$T_{int}$	< 18 °C	1
		> 18 °C	0
F9	Occupante	presenza	1
		assenza	0

Figura 56: variabili presenti

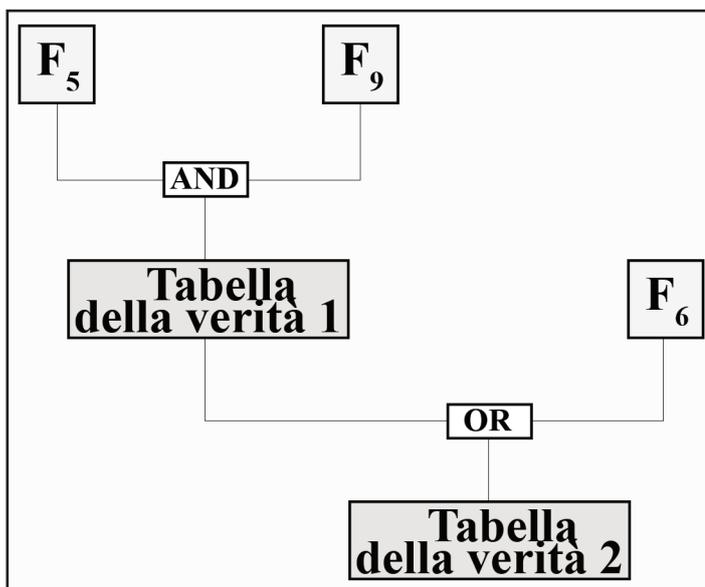


Figura 57: schema riassuntivo della logica di controllo per il riscaldamento

Si pone:

$$[(F_5) \text{ AND } (F_9)] = H$$

F <sub>5</sub>	F <sub>9</sub>	F <sub>5</sub> AND F <sub>9</sub>
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

**TABELLA della VERITA' 1**

H	F <sub>6</sub>	H OR F <sub>6</sub>
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

**TABELLA della VERITA' 2**

Il valore pari a 1 indica l'accensione dell'impianto di riscaldamento mentre il valore pari a zero indica il suo contrario.

#### 5.3.4. Logiche di controllo - raffrescamento

Nella stagione di raffrescamento si applica una logica basata su un concetto simile, sebbene opposto, a quello spiegato per il periodo invernale.

La discriminante principale è rappresentata dalla presenza, sia diurna che notturna, o dall'assenza dell'occupante. Nel primo caso si richiede all'impianto di mantenere negli ambienti una temperatura compresa tra i 25°C ed i 25.5°C mentre nel secondo caso la temperatura interna non deve superare i 28°C.

E' bene ricordare che, nello stato di fatto, il condizionatore è posizionato unicamente nella camera matrimoniale quando, per garantire una migliore efficienza dell'impianto di raffrescamento, sarebbe opportuno posizionarne almeno un altro in un locale come il soggiorno.

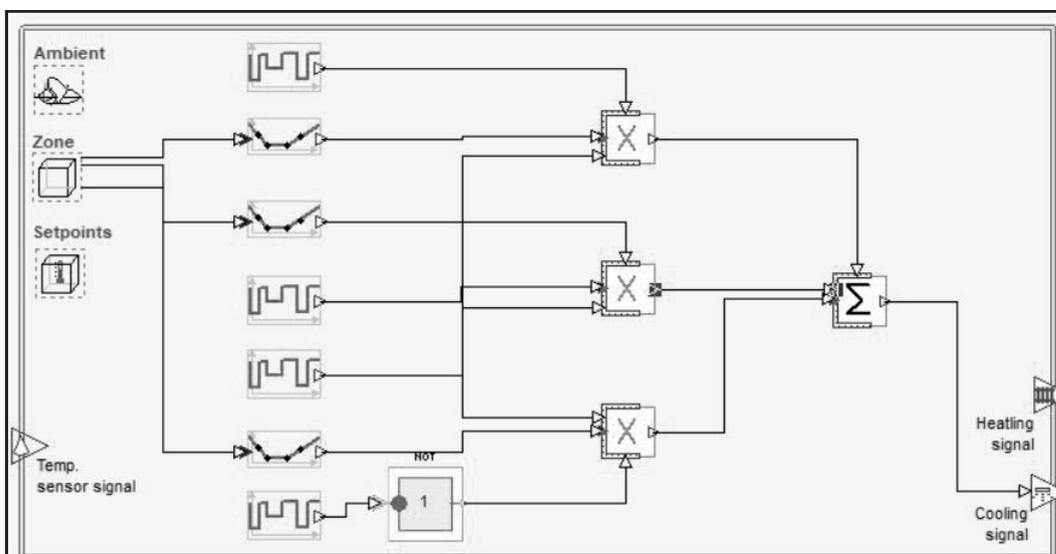


Figura 58: schermata di Ida Ice raffigurante la logica di controllo relativa al raffrescamento

NOME VARIABILE	PARAMETRO		VALORE
F2	T <sub>int</sub>	> 26 °C	1
		< 26 °C	0
F4	T <sub>int</sub>	> 28 °C	1
		< 28 °C	0
F9	Occupante	presenza	1
		assenza	0

Figura 59: variabili presenti

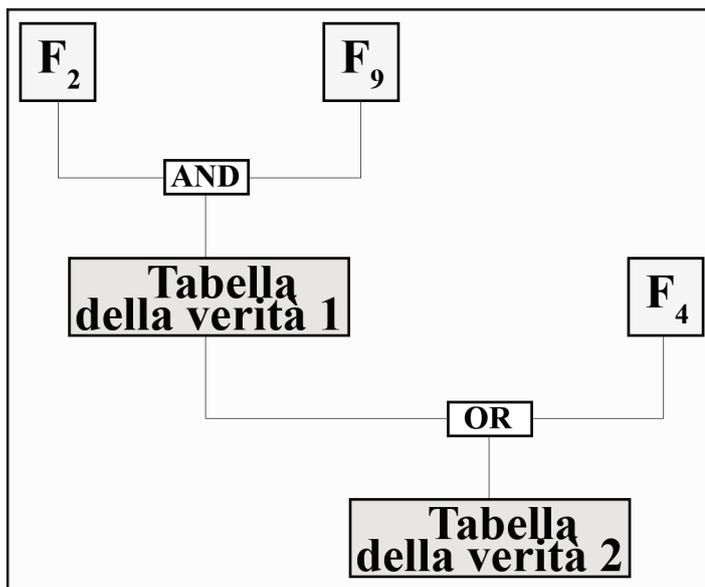


Figura 60: schema riassuntivo della logica di controllo per il raffrescamento

Si pone:

$$[(F_2) \text{ AND } (F_9)] = I$$

F <sub>2</sub>	F <sub>9</sub>	F <sub>2</sub> AND F <sub>9</sub>
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

**TABELLA della VERITA' 1**

I	F <sub>4</sub>	H OR F <sub>4</sub>
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

**TABELLA della VERITA' 2**

Il valore pari a 1 indica l'accensione dell'impianto di raffrescamento mentre il valore pari a zero indica il suo contrario.

### **5.3.5. Logiche di controllo - illuminamento**

Negli ultimi anni l'illuminazione è diventata un fattore di notevole importanza per i progettisti in quanto concorre all'ottenimento di condizioni di comfort interno. Lo sviluppo di tecnologie relative ad essa ha comportato un incremento sia delle prestazioni delle sorgenti luminose sia dei sistemi di controllo che le governano [69].

L'applicazione di sistemi di automazione all'illuminazione permette di gestirne e ridurre il consumo energetico. Questo risulta possibile in quanto è possibile controllare in modo preciso e puntuale alcuni fattori, tra cui l'integrazione della luce naturale con quella artificiale ed i profili d'uso dei singoli ambienti.

Nel primo caso il livello di illuminamento interno, essendo misurato da un sensore apposito, risulta in ogni momento il più appropriato per le esigenze dell'utente finale, sia esso dato dalla sola componente di luce naturale, artificiale o da una combinazione delle due. L'obiettivo risulta quello di sfruttare appieno la luce naturale andando ad integrare con un'illuminazione artificiale qualora la prima non sia sufficiente.

Nel secondo caso, invece, i sistemi di controllo permettono l'abbattimento degli sprechi energetici. Le soluzioni più ricorrenti a tale fine sono:

- Accensione/spengimento dell'illuminazione in relazione alle schedule d'uso legate alle destinazioni d'uso degli edifici. Tale intervento risulta particolarmente indicato per edifici pubblici e commerciali in quanto la regolarità del profilo di occupazione permette di programmare il funzionamento dell'illuminazione artificiale sono in determinati orari;
- Regolazione del flusso delle sorgenti luminose (dimming) in modo tale da mantenere costante il livello di illuminamento interno. Questo permette di andare ad integrare alla componente di luce naturale la quota mancante per raggiungere il livello minimo di illuminamento interno;
- Controllo dell'illuminazione artificiale in relazione alla presenza dell'occupante. Si procede quindi all'inserimento di sensori di presenza negli ambienti dell'appartamento che vanno ad attivare l'illuminazione unicamente nel caso in cui si sia rilevata la presenza dell'occupante nella stanza;
- Una combinazione di queste soluzioni [70] [71].

I valori di illuminamento inseriti nel modello creato su Ida Ice sono stati scelti sulla base della normativa UNI EN 15251 del 2008 “Criteri per la progettazione dell’ambiente interno e per la valutazione della prestazione energetica degli edifici, in relazione alla qualità dell’aria interna, all’ambiente termico, all’illuminazione e all’acustica” e della norma UNI EN 12464 che sostituisce la precedente UNI 10380 del 1994.

Sono quindi stati scelti dei valori di illuminamento interno, definito come la quantità di flusso luminoso per unità di superficie, pari a 300 lux per gli ambienti soggiorno - cucina e di 150 lux per le camere e il bagno. Essi sono misurati dai sensori presenti in ogni locale dell’appartamento.

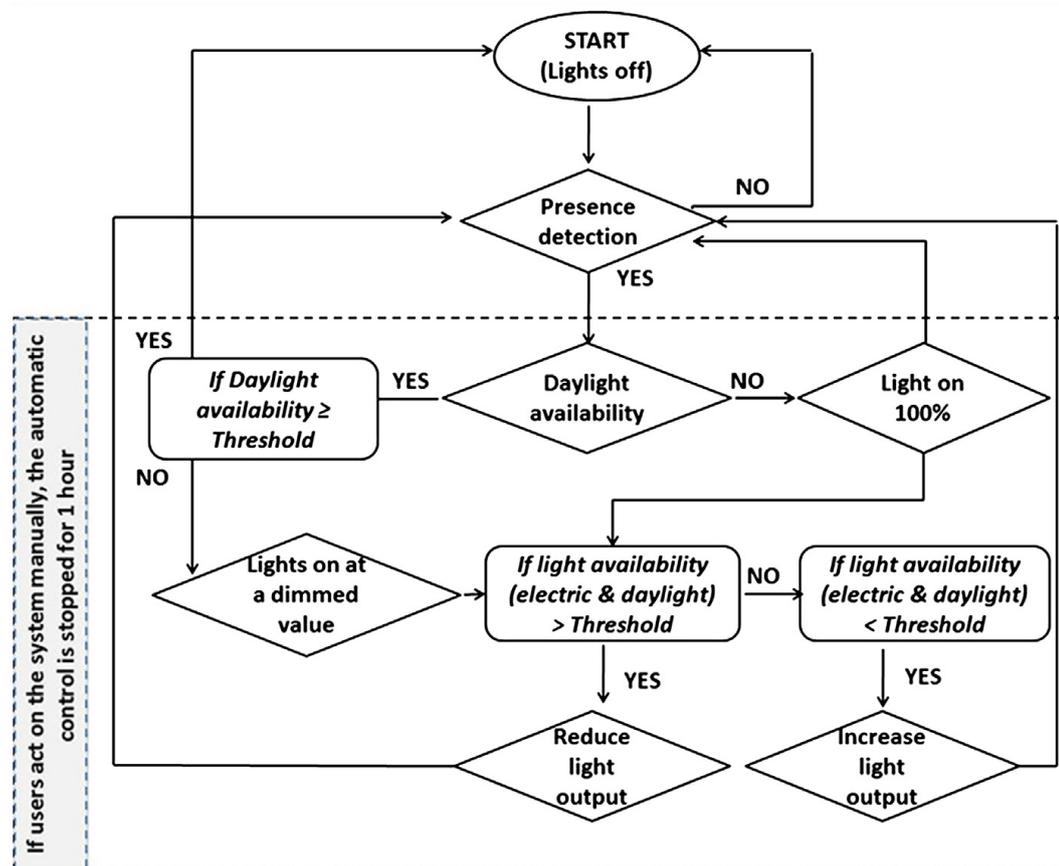


Figura 61: esempio di logica di controllo dell’illuminazione [45]

La logica di controllo applicata prevede che arrivi il segnale di accensione/dimmezazione alle sorgenti luminose qualora siano verificate le condizioni di utilizzo del locale in analisi ed il livello di illuminamento misurato dal sensore posto nella stanza registri un valore inferiore a quelli indicati prima [72]. L’aumento dell’intensità luminosa della luce artificiale avviene in modo proporzionale alla diminuzione di illuminamento della luce naturale, come rappresentato nella figura 76.

Tale logica è stata applicata unicamente nel periodo diurno alle sorgenti luminose principali, escludendo, ad esempio, eventuali abat-jour presenti.

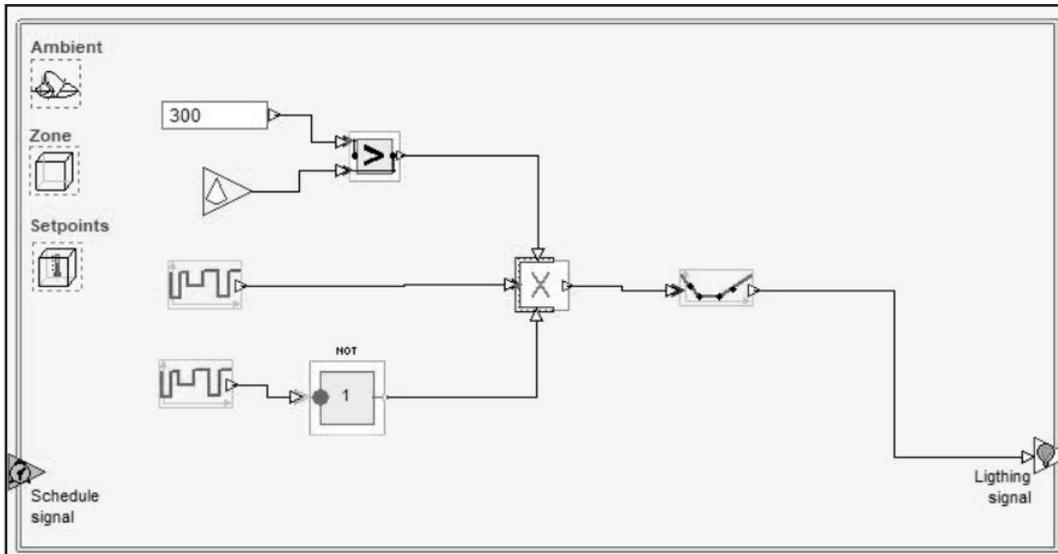


Figura 62: schermata di Ida Ice raffigurante la logica di controllo relativa all'illuminazione artificiale

NOME VARIABILE	PARAMETRO		VALORE
F8	$E_{int}$	< $E_{int\ lim}$	1
		> $E_{int\ lim}$	0
F9	Occupante	presenza	1
		assenza	0
F10	Occupante	sveglio	1
		dorme	0

Figura 63: variabili presenti

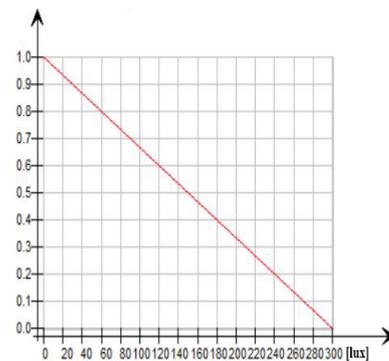


Figura 64: grafico dimmerazione luce artificiale

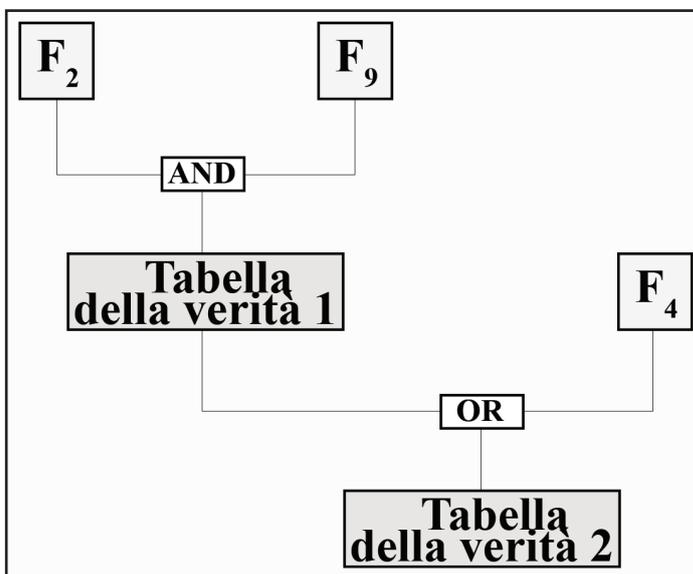


Figura 65: schema riassuntivo della logica di controllo per l'illuminazione artificiale

F <sub>8</sub>	F <sub>9</sub>	F <sub>10</sub>	[F <sub>8</sub> ] AND [F <sub>9</sub> ] AND [F <sub>10</sub> ]
0	0		0
0	1	0	0
		1	0
1	0		0
1	1	0	0
		1	1

**TABELLA  
della VERITA' 1**

L'illuminazione artificiale si accende, ovvero quando il valore finale è pari a 1, nell'unico caso in cui siano verificate tutte le variabili considerate. Per tutte le altre combinazioni l'impianto di illuminazione rimane spento.

### 5.3.6. Definizione della classe di automazione secondo la UNI EN 15232

Nel paragrafo 1.2 è stata descritta la norma UNI EN 15232 che permette l'attribuzione di una classe di automazione in modo tale da individuare quali edifici risultano più prestazionali rispetto ad altri. In essa si hanno delle tabelle che assegnano, per ogni tipologia di automazione possibile (riscaldamento, acqua calda sanitaria, raffrescamento, ventilazione, illuminazione, sistemi oscuranti, gestione dell'edificio) una suddivisione parziale delle diverse componenti nelle quattro possibili classi, dalla D alla A. Il risultato totale è ottenuto andando ad identificare quale risulta essere la classe minima tra tutte le automazioni presenti in quanto, come è già stato accennato, un impianto risulta in una determinata classe unicamente quando tutte le sue componenti possiedono la medesima categorizzazione.

Viene di seguito riportata la tabella riassuntiva raffigurante il risultato degli edifici analizzati sia per quanto riguarda la condizione attuale, quindi senza automazione, che per la situazione che si avrebbe a seguito di un intervento.

La classe di automazione precedente all'intervento risulta essere la peggiore, ovvero la classe D, mentre la classe ottenuta a seguito dell'inserimento dell'automazione è la B.

DEFINIZIONE DA NORMATIVA EN 15232				CLASSE DI AUTOMAZIONE	CASO BASE	CASO INSERIMENTO AUTOMAZIONE
1	Controllo riscaldamento					
1.1	Controllo di emissione					
	0	Nessun controllo automatico della temperatura della stanza		D	X	
	1	Controllo centrale automatico: si ha unicamente un controllo centrale automatico ad agire sia sulla distribuzione che sulla generazione		D		
	2	Controllo singolo di ogni stanza: attraverso valvole termostatiche		C		
	3	Controllo singolo di ogni stanza con comunicazione tra i sensori ed i BACS		B		
	4	Controllo singolo di ogni stanza con comunicazione tra i sensori ed i BACS e rilevamento dell'occupante		A		X

3		Controllo raffrescamento				
3.1	Controllo di emissione					
		0	Nessun controllo automatico della temperatura della stanza	D	X	
		1	Controllo centrale automatico	D		
		2	Controllo singolo di ogni stanza	C		
		3	Controllo singolo di ogni stanza con comunicazione tra i sensori ed i BACS	B		
		4	Controllo isingolo di ogni stanza con comunicazione tra i sensori ed i BACS e rilevamento dell'occupante	A		X
4		Ventilazione				
4.8	Free cooling					
		0	Nessun controllo automatico	D	X	
		1	Ventilazione notturna	C		
		2	La quantità di aria esterna è modulata durante l'intero arco della giornata per minimizzare il raffrescamento meccanico in base alla temperatura interna	B		X
		3	La quantità di aria esterna è modulata durante l'intero arco della giornata per minimizzare il raffrescamento meccanico in base alla temperatura e all'umidità interna	A		
5		Controllo illuminamento				
5.1	Controllo occupazione					
		0	Interruttore manuale on/off	D	X	
		1	Interruttore manuale on/off + accensione automatica una volta al giorno	C		
		2	Rilevazione automatica [auto on/dimmed off - auto on/auto off]	A		
		3	Auto on/auto off: la logica di controllo accende le luci automaticamente quando la stanza è occupata e le spegne automaticamente qualora non riceva, per 10 minuti consecutivi, l'input di presenza dell'occupante	A		X
5.2	Controllo della luce					
		0	Nessun controllo automatico	D	X	
		1	Controllo manuale	C		
		2	Regolazione automatica: le luci sono completamente spente quando è rilevata una quantità di luce naturale sufficiente al soddisfacimento delle condizioni di comfort visivo	B		X
		3	Regolazione automatica: l'intensità delle luci artificiali è regolata per compensare la quantità rilevata di luce naturale in quanto quest'ultima non risulta sufficiente al soddisfacimento delle condizioni di comfort visivo	A		
6		Controllo sistemi oscuranti				
6.1	Controllo sistemi oscuranti					
		0	Operazione di chiusura manuale	D	X	
		1	Operazione di chiusura motorizzata con controllo manuale	C		
		2	Operazione di chiusura motorizzata con controllo automatico	B		
		3	Operazione di chiusura automatica combinando il controllo delle condizioni di comfort interno	A		X

Figura 66: tabella per la definizione della classe di automazione secondo la norma UNI EN 15232 [9]



***CAPITOLO 6***  
***RISULTATI e CONCLUSIONI***

## **6.1 Risultati finali**

A seguito della simulazione dinamica effettuata si è andati a confrontare i risultati tra la condizione rappresentata dallo stato di fatto simulato, definito “caso A” e la situazione che si avrebbe qualora si volessero applicare i sistemi di automazione, con le relative logiche di controllo sviluppate, ovvero il “caso B”.

Sono stati analizzati i risultati di entrambe le stagioni considerando un intervallo temporale giornaliero (paragrafo 6.1.1), settimanale (paragrafo 6.1.2) e annuale (paragrafo 6.1.3) in tutti i locali dei due edifici. Vengono tuttavia riportati, in tale capitolo, unicamente quelli più significativi al fine di sviluppare e avvalorare un ragionamento conclusivo della presente tesi.

Sono state considerate le condizioni più sfavorevoli dell’anno, rappresentate dai giorni/settimane più calde e più fredde dell’intera annualità sulla base dei dati climatici forniti dal software Ida Ice.

Per quanto riguarda i risultati giornalieri, si è andati ad analizzare i dati relativi all’edificio I nella stagione di riscaldamento e quelli relativi all’edificio II nella stagione di raffrescamento perché quest’ultimo è il solo ad annoverare due condizionatori già nella situazione dello stato di fatto. Questa condizione risulta indispensabile per poter procedere ad una corretta e significativa comparazione poiché la variazione della temperatura interna è da imputare unicamente all’applicazione della domotica. Al contrario, nell’edificio I, essendo il condizionatore presente unicamente nella camera da letto matrimoniale (esposta a nord), esso non riesce ad influire in maniera concreta sulle condizioni di comfort degli altri ambienti, in particolare quelli soggiorno e cucina (esposti a sud). Per tale motivo la variazione delle condizioni interne che si avrebbe in questo caso non sarebbe dovuta esclusivamente dall’applicazione delle relative logiche di controllo bensì anche dall’inserimento del condizionatore nel locale.

La medesima motivazione è alla base anche della scelta dell’edificio II per quanto riguarda i risultati settimanali.

I risultati annuali, invece, sono stati analizzati per entrambi gli edifici modellati.

### 6.1.1.1: RISULTATI GIORNALIERI - STAGIONE INVERNALE

Vengono riportati i risultati di due locali - il soggiorno e la camera da letto 2 dell'edificio I - appartenenti rispettivamente alla zona giorno e alla zona notte. Come si può notare l'inserimento dell'impianto domotico ha permesso di andare a ottimizzare i livelli di comfort a seconda della presenza dell'occupante. Nello specifico risulta evidente come l'impianto di riscaldamento è inattivo nelle ore in cui l'occupante non è presente, sebbene la temperatura interna sia sempre compresa nella fascia di comfort imposta, come descritto nel paragrafo 5.3.3. Per quanto riguarda, invece, l'illuminamento interno è importante sottolineare come il valore indicato nella seconda colonna della tabella sia da riferirsi al valore della sola luce naturale. Questo risulta fondamentale in quanto, nel caso B, l'ottenimento del valore di illuminamento minimo tramite la luce naturale permette di verificare il corretto funzionamento della logica di controllo relativa ai sistemi oscuranti, sia di evitare l'inutile accensione diurna della luce artificiale.

#### SOGGIORNO

GIORNO		20/01/2017				
PARAMETRI	Temperatura interna [°C]	Illuminamento interno (luce naturale) [lux]	Illuminamento interno (luce artificiale) [lux]	Umidità relativa interna [%]	Concentrazione CO <sub>2</sub> [ppm]	
ORA	0	19,12	0	0	47,91	752,3
	1	18,97	0	0	49,41	755,8
	2	18,85	0	0	49,95	749,7
	3	18,73	0	0	51,02	757,2
	4	18,52	0	0	52,08	759,8
	5	18,48	0	0	53,33	761,4
	6	19,01	1,04	298,96	52,01	753,1
	7	19,38	38,24	261,76	48,98	687,5
	8	19,66	61,56	238,44	45,62	676,5
	9	19,82	219,5	80,5	43,15	677,9
	10	19,97	500,3	0	41,47	676,2
	11	20,09	698,7	0	40,14	679,1
	12	20,12	798,1	0	49,05	678,3
	13	20,1	872,2	0	47,78	660,8
	14	20,12	1115,9	0	46,92	614,7
	15	20,12	1158,6	0	47,76	619,2
	16	20,11	910,5	0	48,27	628
	17	20,12	309,2	0	47,81	648,4
	18	20,08	65,8	234,2	48,63	699,8
	19	20,05	16,49	283,51	50,25	704,5
	20	19,96	4,86	295,14	50,76	716,3
	21	19,79	2,64	297,36	49,82	724,9
	22	19,61	0	300	43,07	733,9
	23	19,33	0	300	44,03	745

Figura 67: tabella riassuntiva dei parametri del soggiorno - caso A

GIORNO		20/01/2017				
PARAMETRI	Temperatura interna [°C]	Illuminamento interno (luce naturale) [lux]	Illuminamento interno (luce artificiale) [lux]	Umidità relativa interna [%]	Concentrazione CO <sub>2</sub> [ppm]	
ORA	0	19,16	0	0	47,92	733,6
	1	19,01	0	0	48,51	729,8
	2	18,89	0	0	49,05	731,4
	3	18,81	0	0	50,06	734,7
	4	18,63	0	0	51,08	735,2
	5	18,58	0	0	51,07	739
	6	19,47	1,03	298,97	52,14	734,7
	7	19,91	36,81	263,19	47,99	651,9
	8	19,94	59,63	240,37	46,85	630,4
	9	19,83	214,7	85,3	45,23	602,3
	10	19,79	497,05	0	44,72	599,8
	11	19,64	699,47	0	42,89	601,5
	12	19,59	789,33	0	48,01	604,6
	13	19,81	845,86	0	48,56	583,7
	14	20,05	970,79	0	45,73	589
	15	20,17	981,24	0	46,82	591,2
	16	20,27	903,41	0	48,05	599,8
	17	20,38	302,99	0	48,22	614,1
	18	20,41	64,7	235,3	48,31	669
	19	20,39	17,18	282,82	49,82	692,1
	20	20,26	4,81	295,19	49,06	703,7
	21	20,12	2,36	297,64	49,72	705,4
	22	19,74	0	300	41,99	718,9
	23	19,29	0	300	45,6	722,6

Figura 68: tabella riassuntiva dei parametri del soggiorno - caso B

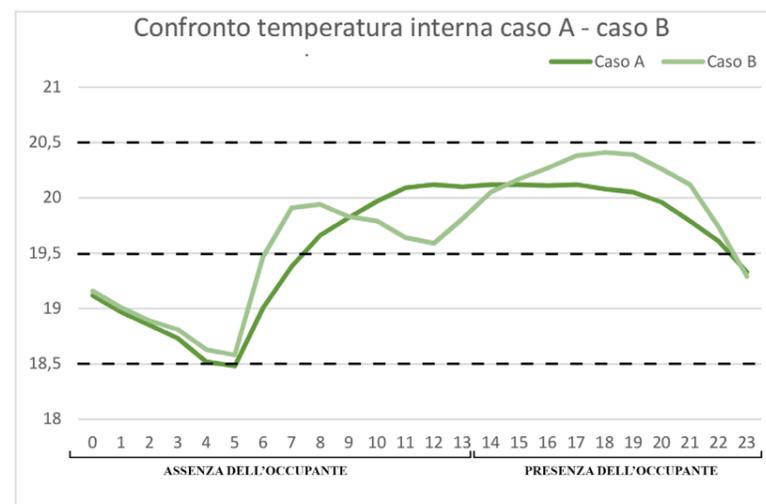


Figura 69: grafico di confronto tra le temperature interne del soggiorno del caso A e B

#### CAMERA 2

GIORNO		20/01/2017				
PARAMETRI	Temperatura interna [°C]	Illuminamento interno (luce naturale) [lux]	Illuminamento interno (luce artificiale) [lux]	Umidità relativa interna [%]	Concentrazione CO <sub>2</sub> [ppm]	
ORA	0	19,02	0	0	48,01	781,9
	1	18,88	0	0	51,72	782,5
	2	18,76	0	0	51,99	782,4
	3	18,69	0	0	53,63	783,6
	4	18,51	0	0	55,72	784,8
	5	18,43	0	0	56,64	785,5
	6	19,04	1,1	148,9	55,48	779,1
	7	19,85	5	145	52	788,3
	8	19,76	86	0	47,74	721,5
	9	19,83	264,5	0	44,11	732,8
	10	19,91	490	0	41,74	741,9
	11	20,04	737,3	0	40,26	753,8
	12	20,08	799,8	0	39,27	759,4
	13	20,1	718,2	0	38,59	604,2
	14	20,13	676,3	0	38,31	605,8
	15	20,09	605,6	0	39,31	614,2
	16	20,08	415,2	0	41,51	624,3
	17	20,05	287,3	0	43,91	639,7
	18	20,04	46,11	0	46,23	687,1
	19	20,03	15,29	0	48,45	695,1
	20	19,84	6,61	0	49,35	706,8
	21	19,76	2,9	0	47,85	721,4
	22	19,59	0	150	46,27	729,6
	23	19,27	0	150	46,2	739,2

Figura 70: tabella riassuntiva dei parametri della camera doppia - caso A

GIORNO		20/01/2017				
PARAMETRI	Temperatura interna [°C]	Illuminamento interno (luce naturale) [lux]	Illuminamento interno (luce artificiale) [lux]	Umidità relativa interna [%]	Concentrazione CO <sub>2</sub> [ppm]	
ORA	0	19,12	0	0	47,89	774,6
	1	18,98	0	0	51,34	775,1
	2	18,86	0	0	51,76	774,9
	3	18,73	0	0	52,99	775,2
	4	18,69	0	0	54,81	775,3
	5	18,61	0	0	56,02	776,8
	6	19,38	1,7	148,3	55,85	759,1
	7	19,91	4,9	145,1	51,9	742,3
	8	20,07	91	0	47,03	734,7
	9	19,95	265,3	0	43,86	741,5
	10	19,86	487,51	0	40,99	748,9
	11	19,72	741,62	0	20,15	756,2
	12	19,61	796,28	0	39,21	761,3
	13	19,73	721,43	0	38,49	605,8
	14	19,78	599,74	0	38,22	599,4
	15	19,75	601,95	0	39,41	608,2
	16	19,66	385,01	0	40,56	621,5
	17	19,69	289,69	0	43,71	641,7
	18	19,57	44,88	0	45,23	675,9
	19	19,85	16,14	0	46,45	688,2
	20	20,14	6,8	0	48,39	699,1
	21	20,04	3,1	0	48,06	716,8
	22	19,81	0	150	47,28	736,4
	23	19,41	0	150	47,65	759,7

Figura 71: tabella riassuntiva dei parametri della camera doppia - caso B

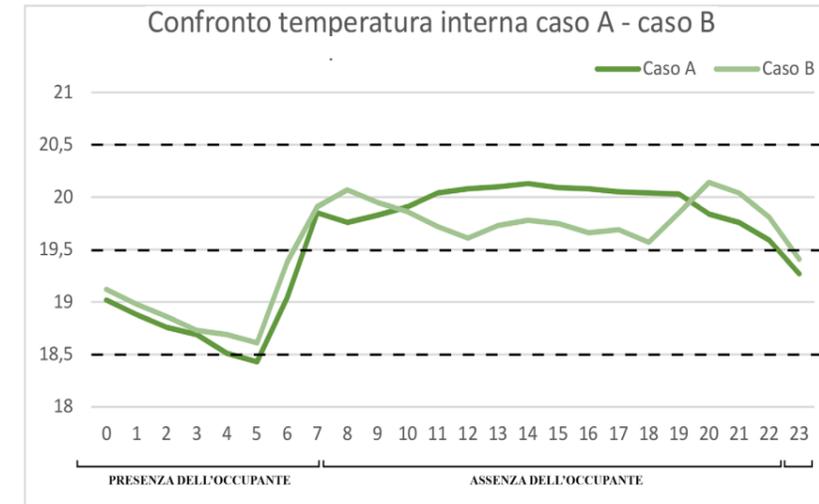


Figura 72: grafico di confronto tra le temperature interne della camera doppia del caso A e B



## 6.1.1.2: RISULTATI GIORNALIERI - STAGIONE ESTIVA

### SOGGIORNO

Vengono riportati i risultati di due locali - il soggiorno e la camera da letto matrimoniale dell'edificio II - in quanto, in tale edificio, sono già presenti entrambi i condizionatori nello stato di fatto reale, al contrario dell'edificio I che prevede la presenza del condizionatore unicamente nella camera matrimoniale.

Come è possibile notare, per tutti e due i locali, si ha una diminuzione di temperatura interna dato, oltre che dall'accensione dell'impianto di raffrescamento, anche dalla chiusura dei sistemi oscuranti in modo tale da evitare l'eccessivo innalzamento della temperatura interna che comporterebbe, a sua volta, un incremento del periodo di accensione dell'impianto. Rimane tuttavia sempre verificato il valore minimo di illuminamento interno, dato dalla luce naturale, posto per ogni locale, nonostante risulti inevitabile una leggera diminuzione di tale fattore tra il caso B ed il caso A. E' inoltre possibile notare come si sia registrato anche un miglioramento della qualità dell'aria interna.

GIORNO		10/08/2017				
PARAMETRI	Temperatura interna [°C]	Illuminamento interno (luce naturale) [lux]	Illuminamento interno (luce artificiale) [lux]	Umidità relativa interna [%]	Concentrazione CO <sub>2</sub> [ppm]	
ORA	0	26,31	0	0	49,56	650,2
	1	26,3	0	0	51,52	649,8
	2	26,32	0	0	52,85	651,9
	3	26,28	0	0	53,02	648,3
	4	26,31	0	0	53,18	647,3
	5	26,37	0	0	53,87	651,2
	6	26,08	9,3	290,7	54,91	601,9
	7	26,25	46,57	253,43	49,97	584,4
	8	27,48	160,4	139,6	48,15	555,5
	9	28,54	305,9	0	47,83	564,3
	10	28,72	500,7	0	46,55	571,1
	11	28,98	708,5	0	45,71	577,8
	12	28,04	900,1	0	47,23	583,6
	13	27,09	1022,9	0	48,51	559,1
	14	26,26	1249,5	0	44,67	548,3
	15	26,24	1196,9	0	44,52	539,5
	16	26,21	1045,7,2	0	43,91	522,7
	17	26,25	618,8	0	44,14	525,8
	18	26,23	398,2	0	44,18	518,7
	19	26,16	231,5	68,5	45,25	523,2
	20	26,23	107,3	192,7	46,83	529,6
	21	26,23	25,59	274,41	47,66	549,7
	22	26,31	0	300	47,84	567,3
	23	26,32	0	300	48,21	589,1

Figura 73: tabella riassuntiva dei parametri del soggiorno - caso A

GIORNO		10/08/2017				
PARAMETRI	Temperatura interna [°C]	Illuminamento interno (luce naturale) [lux]	Illuminamento interno (luce artificiale) [lux]	Umidità relativa interna [%]	Concentrazione CO <sub>2</sub> [ppm]	
ORA	0	25,45	0	0	47,23	601,4
	1	25,41	0	0	49,82	602,2
	2	25,48	0	0	48,74	601,9
	3	25,47	0	0	47,51	601,8
	4	25,48	0	0	49,63	601,6
	5	25,46	0	0	49,95	603,7
	6	25,8	9,2	290,8	50,04	593,4
	7	26,1	45,81	254,19	47,42	501,4
	8	26,57	158,3	141,7	46,15	487,3
	9	27,03	301,4	0	47,28	499,1
	10	27,28	426,7	0	47,73	514,7
	11	27,51	483,1	0	48,02	523,6
	12	27,87	625,8	0	48,57	531,9
	13	25,87	704,3	0	46,7	499,8
	14	25,76	716,24	0	43,37	487,1
	15	25,79	732,84	0	43,16	486,5
	16	25,81	723,49	0	44,82	483,2
	17	25,82	588,12	0	44,31	482,8
	18	25,79	365,37	0	44,29	485,1
	19	25,83	229,7	70,3	44,68	484,6
	20	25,84	105,19	194,81	45,71	499,8
	21	25,86	23,62	276,38	46,92	518,1
	22	25,54	0	300	46,98	549,3
	23	25,51	0	300	47,15	587,9

Figura 74: tabella riassuntiva dei parametri del soggiorno - caso B

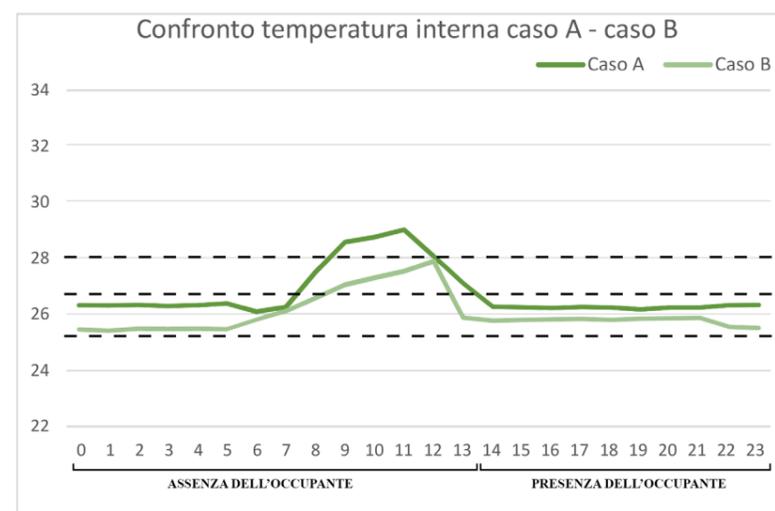


Figura 75: grafico di confronto tra le temperature interne del soggiorno del caso A e B

### CAMERA 1

GIORNO		10/08/2017				
PARAMETRI	Temperatura interna [°C]	Illuminamento interno (luce naturale) [lux]	Illuminamento interno (luce artificiale) [lux]	Umidità relativa interna [%]	Concentrazione CO <sub>2</sub> [ppm]	
ORA	0	25,86	0	0	49,78	689,7
	1	25,79	0	0	50,06	687,4
	2	25,83	0	0	50,47	688,5
	3	25,85	0	0	50,83	688,3
	4	25,87	0	0	50,91	687,1
	5	25,86	0	0	51,05	689,8
	6	25,88	6,8	143,2	51,18	618,5
	7	25,92	49,75	100,25	50,17	601,7
	8	26,12	150,02	0	49,82	617,9
	9	26,83	221,63	0	48,21	623,5
	10	27,09	316,69	0	48,57	641,4
	11	27,38	405,87	0	48,79	651,9
	12	27,81	473,12	0	49,07	655,8
	13	27,92	609,36	0	47,28	659,7
	14	28,34	654,08	0	47,15	612,2
	15	28,61	661,41	0	47,34	584,7
	16	29,05	627,85	0	47,42	569,1
	17	29,18	619,62	0	47,48	550,4
	18	30,01	399,74	0	47,39	549,8
	19	30,27	241,56	0	47,51	553,7
	20	30,23	117,98	0	47,93	584,3
	21	28,58	31,83	0	48,09	599,1
	22	27,99	0	150	48,72	645,8
	23	26,42	0	150	49,07	676,9

Figura 76: tabella riassuntiva dei parametri della camera doppia - caso A

GIORNO		10/08/2017				
PARAMETRI	Temperatura interna [°C]	Illuminamento interno (luce naturale) [lux]	Illuminamento interno (luce artificiale) [lux]	Umidità relativa interna [%]	Concentrazione CO <sub>2</sub> [ppm]	
ORA	0	25,38	0	0	48,65	666,5
	1	25,36	0	0	49,72	667,8
	2	25,41	0	0	49,98	665,2
	3	25,43	0	0	49,91	668,4
	4	25,39	0	0	50,05	667,9
	5	25,41	0	0	50,19	669,3
	6	25,82	6,1	143,9	50,27	652,4
	7	25,81	38,61	111,39	49,87	592,2
	8	25,51	147,92	0	49,76	578,3
	9	26,98	201,83	0	49,01	589,1
	10	27,14	231,57	0	48,56	605,6
	11	27,43	316,69	0	48,44	623,8
	12	27,79	322,41	0	48,49	634,9
	13	26,83	305,61	0	48,43	599,7
	14	26,81	303,84	0	48,45	561,4
	15	26,75	301,63	0	48,47	555,3
	16	26,79	302,87	0	48,46	548,7
	17	26,63	305,42	0	48,45	549,2
	18	26,58	312,79	0	48,49	548,6
	19	26,47	256,64	0	48,51	551
	20	26,31	116,82	0	48,49	579,4
	21	25,75	29,27	0	48,52	587,2
	22	25,53	0	150	48,55	638,5
	23	25,49	0	150	48,59	669,6

Figura 77: tabella riassuntiva dei parametri della camera doppia - caso B

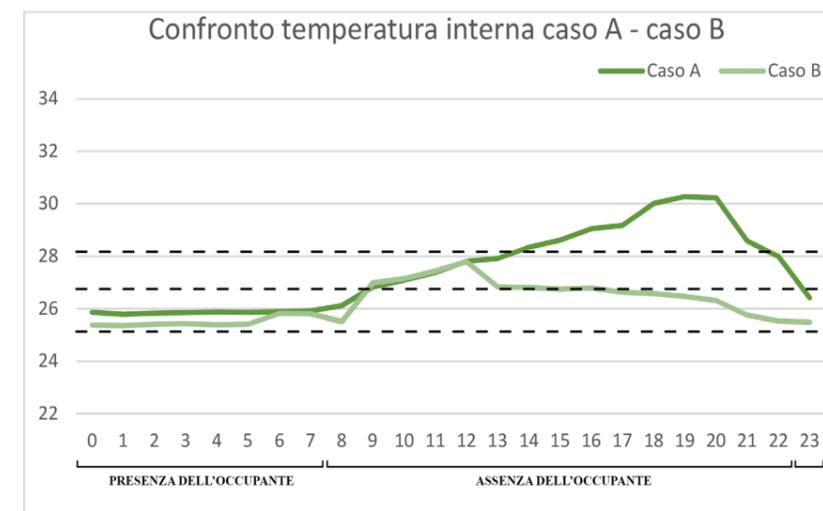
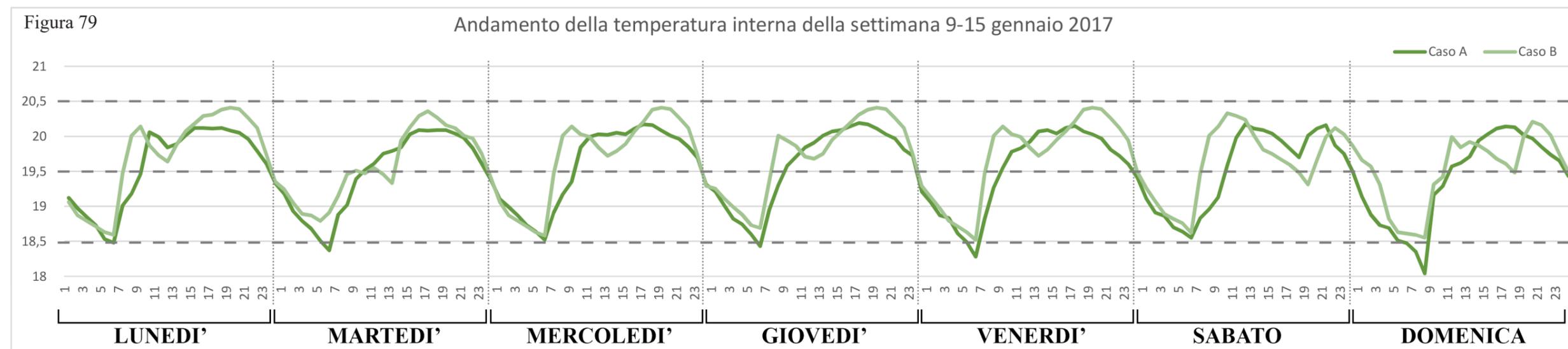


Figura 78: grafico di confronto tra le temperature interne della camera doppia del caso A e B



### 6.1.2.1: RISULTATI SETTIMANALI - stagione invernale



Vengono qui comparati i risultati ottenuti tra lo stato di fatto (caso A) e la condizione di applicazione del sistema di automazione (caso B) considerando un arco temporale pari ad una intera settimana sia durante la stagione di riscaldamento che di raffrescamento. Sono state scelte rispettivamente la settimana più fredda (figura 79) e quella più calda (figura 82) in modo tale da analizzare le situazioni peggiori dell'intera annualità.

Per quanto riguarda la stagione invernale (figura 79) si registra innanzitutto una modifica delle ore di accensione dell'impianto di riscaldamento mettendolo in correlazione con la presenza dell'occupante. Come si può notare, nello stato di fatto (in verde scuro) l'impianto risulta spesso acceso, nei giorni feriali, anche nelle ore della mattina quando non si hanno occupanti presenti nell'appartamento mentre a seguito dell'inserimento del sistema di automazione (in verde chiaro) in quelle stesse ore l'impianto si accende nel caso in cui la temperatura interna scenda al di sotto della fascia di comfort impostata.

Si registra, inoltre, un leggero miglioramento delle temperature interne nel caso B, condizione che garantisce un maggior comfort all'occupante.

Nei giorni del fine settimana, invece, si accentua quanto detto sia in termini di risparmio che di

comfort interno, ponendo sempre attenzione alla presenza/assenza dell'occupante.

Bisogna sottolineare che un fattore influente sulle temperature interne dell'appartamento risulta essere, oltre che l'accensione dell'impianto, il controllo sui sistemi oscuranti. Analizzando i grafici relativi ai movimenti nell'arco della giornata di questi ultimi, si può affermare che nella stagione invernale i sistemi oscuranti non modificano le condizioni di comfort interno, dal momento che essi non si chiudono né in maniera parziale né totale, come rappresentato in figura 81, mentre nella stagione estiva essi hanno un ruolo fondamentale per quanto riguarda il controllo delle temperature interne (figura 85) e, di conseguenza, l'accensione dell'impianto di condizionamento. La riduzione di quest'ultimo porta, ovviamente, ad una importante riduzione dei consumi elettrici.

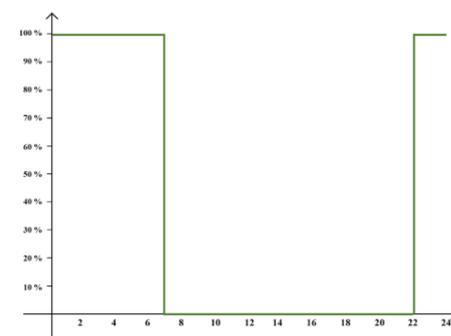


Figura 80: grafico relativo alla chiusura giornaliera dei sistemi oscuranti del caso A in data 9 gennaio

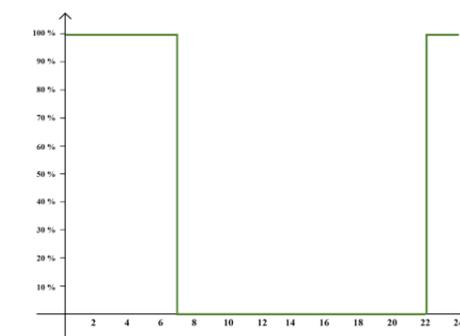
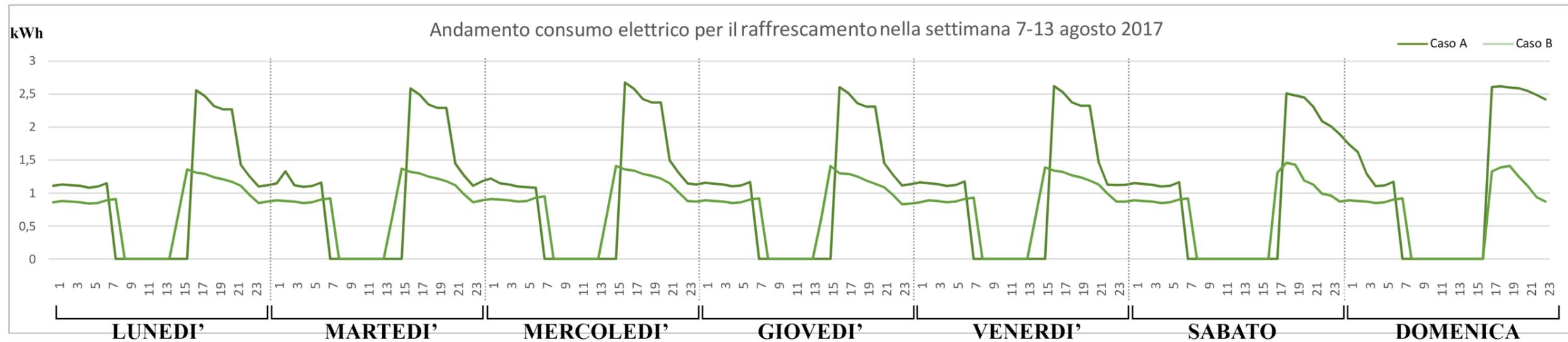
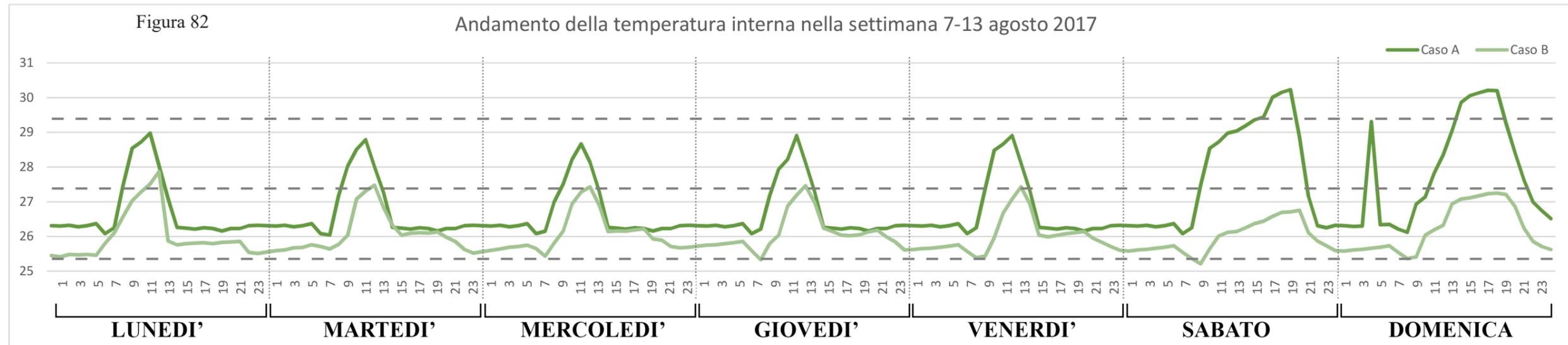


Figura 81: grafico relativo alla chiusura giornaliera dei sistemi oscuranti del caso B in data 9 gennaio



### 6.1.2.2: RISULTATI SETTIMANALI - stagione estiva



Viene qui analizzato l'andamento della temperatura interna nella stagione estiva (figura 82) in relazione al consumo di energia elettrica (figura 83) per la sola funzione di raffrescamento (non sono pertanto inclusi i consumi dell'illuminazione o degli elettrodomestici presenti nel locale). Risulta evidente come nelle ore in cui il consumo elettrico è nullo, ovvero nei momenti di assenza dell'occupante, le temperature interne sono notevolmente più alte rispetto alle altre ore della giornata. Questo avviene sia per il caso A che per il caso B. Tuttavia è importante sottolineare come in quest'ultimo caso sia il consumo elettrico che le temperature interne rimangano più basse rispetto allo stato di fatto. Tale aspetto è dovuto all'efficacia della logica di controllo sui sistemi oscuranti, descritta nel paragrafo

5.3.2, poiché previene un eccessivo innalzamento della temperatura interna, dovuto all'irraggiamento solare incidente sul serramento, che comporta, come dimostrato nel caso A, ad un aumento del consumo del condizionatore per ripristinare le condizioni di comfort interne. Nella figura 85 è possibile notare come le ore di chiusura del serramento corrispondano alle ore in cui, nel caso B, si evita un incremento della temperatura interna. Si può inoltre rimarcare come la chiusura totale del sistema oscurante avvenga unicamente nel periodo della giornata - la mattina - in cui l'occupante non è presente. Al contrario il pomeriggio, essendo presente l'occupante e dovendo pertanto garantire il comfort visivo dato dalla luce naturale, il sistema oscurante raggiunge la chiusura parziale massima posta per quello specifico locale.



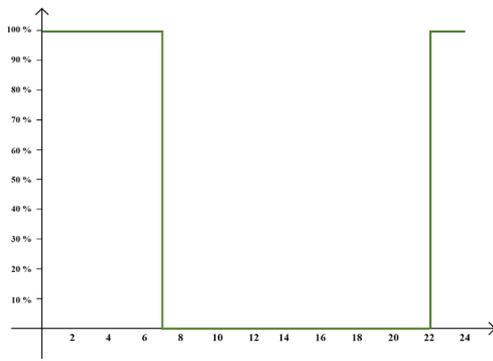


Figura 84: grafico relativo alla chiusura giornaliera dei sistemi oscuranti del caso A in data 7 agosto

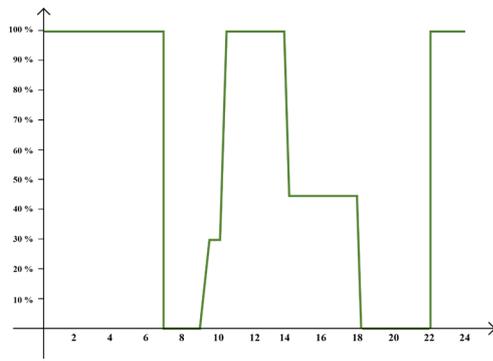


Figura 85: grafico relativo alla chiusura giornaliera dei sistemi oscuranti del caso B in data 7 agosto

Si riportano di seguito i grafici relativi alla chiusura giornaliera dei sistemi oscuranti, sia del caso A che del caso B, collocati in altri giorni dell'anno in modo tale da sottolineare il cambiamento delle condizioni di apertura/chiusura degli stessi in relazione alle condizioni climatiche al contorno. Quanto detto è possibile notarlo nei giorni, ad esempio, di giugno o di settembre nei quali si ha una radiazione solare diretta incidente sul serramento superiore al limite imposto nella logica di controllo bensì inferiore al valore di agosto. Questo porta ad avere una chiusura massima del sistema oscurante inferiore rispetto a quella che si registra nei giorni più caldi della stagione estiva.

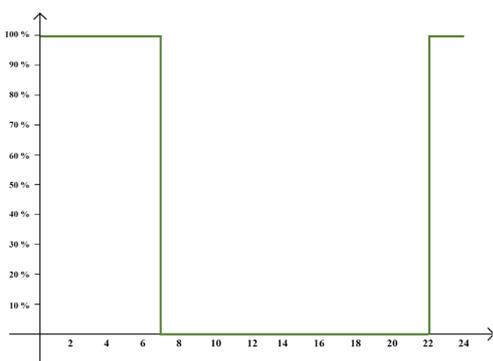


Figura 86: grafico relativo alla chiusura giornaliera dei sistemi oscuranti del caso A in data 9 settembre

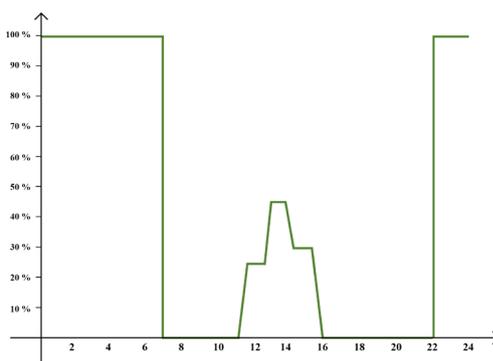


Figura 87: grafico relativo alla chiusura giornaliera dei sistemi oscuranti del caso B in data 9 settembre

### 6.1.3.1: RISULTATI ANNUALI - fabbisogno termico

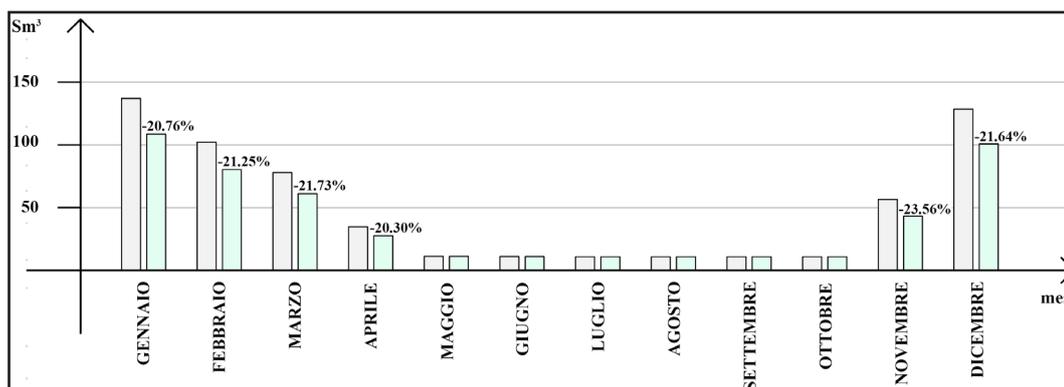


Figura 88: risultati annuali del consumo di gas dello stato di fatto (grigio) e della situazione post intervento (verde) relativi all'edificio I

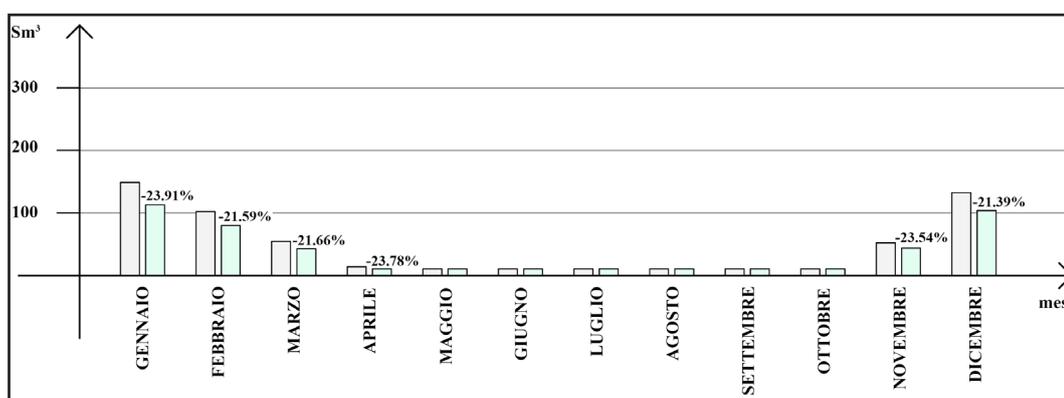


Figura 89: risultati annuali del consumo di gas dello stato di fatto (grigio) e della situazione post intervento (verde) relativi all'edificio II

Vengono riportati i risultati annuali relativi al consumo di gas, espresso in  $\text{Sm}^3$ , per entrambi gli edifici modellati. La situazione rappresentata dallo stato di fatto è indicata in grigio mentre quella post-intervento in verde. E' riportata, per ogni mese, la percentuale di risparmio ottenuta grazie l'inserimento dell'impianto domotico. Il consumo di gas nei mesi della stagione di raffrescamento è destinato alla produzione di acqua calda sanitaria. Tale quota si aggira, come dimostrato nelle firme energetiche presenti nel paragrafo 4.3 "Risultati modellazione", attorno al 20-30 % del consumo totale annuale.

A seguito dell'analisi dei dati riportati in figura 88 e 89, si può constatare come il risparmio di gas si attesti attorno al 21-22%, risultando generalmente maggiore nei mesi più freddi della stagione di riscaldamento (dicembre - gennaio).

### 6.1.3.2: RISULTATI ANNUALI - fabbisogno elettrico

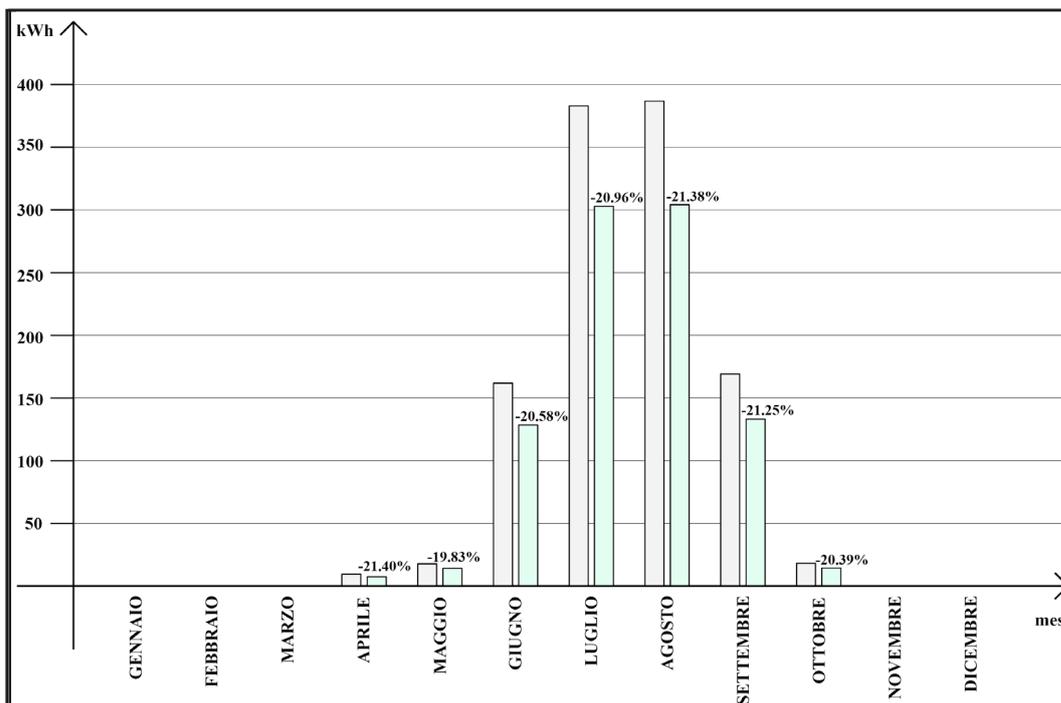


Figura 90: risultati annuali del consumo elettrico dello stato di fatto (grigio) e della situazione post intervento (verde) relativi all'edificio I

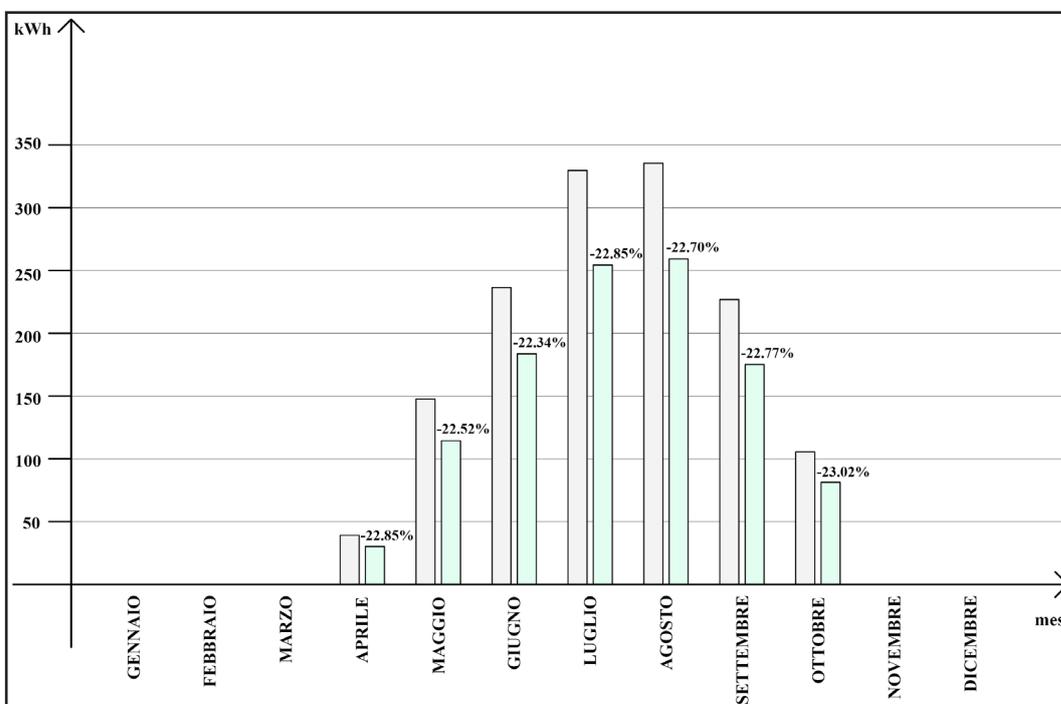


Figura 91: risultati annuali del consumo elettrico dello stato di fatto (grigio) e della situazione post intervento (verde) relativi all'edificio II

Vengono riportati i risultati annuali relativi al consumo elettrico, espresso in kWh, per entrambi gli edifici modellati. E' importante sottolineare come il consumo elettrico confrontato sia relativo unicamente alla funzione di raffrescamento, escludendo quindi il consumo elettrico dovuto all'illuminazione, agli elettrodomestici presenti nelle abitazioni e agli apparecchi ausiliari necessari per il funzionamento dell'impianto. La situazione rappresentata dallo stato di fatto è indicata in grigio mentre quella post-intervento in verde. E' riportata, per ogni mese, la percentuale di risparmio ottenuta grazie l'inserimento dell'impianto domotico.

A seguito dell'analisi dei dati riportati in figura 90 e 91, si può constatare come il risparmio di energia elettrica si attesti attorno al 19%.

In conclusione, analizzando i risultati relativi al fabbisogno termico ed elettrico di entrambi gli edifici modellati, si sono ottenuti i seguenti valori:

	<b>FABBISOGNO TERMICO ANNUALE STATO DI FATTO SIMULATO [Sm<sup>3</sup>]</b>	<b>FABBISOGNO TERMICO ANNUALE con AUTOMAZIONE [Sm<sup>3</sup>]</b>	<b>RISPARMIO [%]</b>
EDIFICIO I	609,75	487,56	20,04
EDIFICIO II	575	460,22	19,96

Figura 92: risultati relativi al fabbisogno termico dello stato di fatto e della situazione post intervento

	<b>FABBISOGNO ELETTRICO ANNUALE RAFFRESCAMENTO STATO DI FATTO MODELLATO [kWh]</b>	<b>FABBISOGNO ELETTRICO ANNUALE RAFFRESCAMENTO con AUTOMAZIONE [kWh]</b>	<b>RISPARMIO [%]</b>
EDIFICIO I	1145,9	904,47	21,07
EDIFICIO II	2841,81	2196,83	22,70

Figura 93: risultati relativi al fabbisogno elettrico dello stato di fatto e della situazione post intervento

## 6.2 Conclusioni

L'obiettivo della presente tesi è quello di sviluppare delle logiche di controllo dell'impianto domotico in modo tale da ottenere e quantificare sia un risparmio del fabbisogno termico ed elettrico dell'edificio sia un miglioramento delle condizioni di comfort per l'occupante.

Tale risultato è emerso a seguito della modellazione di due casi studio aventi caratteristiche tali da poter essere considerati edifici tipologici.

Sulla base di quanto detto è possibile affermare che l'applicazione di sistemi di automazione su edifici esistenti comporta un risparmio sul fabbisogno termico ed elettrico pari a circa il 20% dei consumi totali. Tale risultato è stato ottenuto su entrambi i casi studio, nonostante questi avessero caratteristiche molto diverse. Essi si differenziano innanzitutto per le proprietà geometriche, essendo l'area del primo appartamento circa il doppio di quella del secondo, successivamente per le stratigrafie relative all'involucro opaco, dal momento che le diverse epoche di costruzione hanno portato ad avere due pacchetti stratigrafici differenti, ed infine per i distinti profili di occupazione dei locali.

Il risparmio energetico dimostrato si traduce inoltre in un risparmio economico per l'occupante che ha la possibilità di ridurre gli sprechi di energia termica ed elettrica avendo, allo stesso tempo, un miglioramento delle condizioni di comfort termico e visivo nei momenti di presenza nel locale dell'appartamento considerato.

Questo, in una visione più ampia, porta ad una gestione più consapevole ed oculata dei consumi domestici da parte degli abitanti che possono, in tale maniera, contribuire al raggiungimento degli obiettivi internazionali riguardanti gli standard ambientali riassunti nell'introduzione della presente tesi.

Si può concludere sottolineando l'importanza e la centralità dei professionisti - architetti ed ingegneri - del settore edilizio in quanto una corretta progettazione, sostenuta dalla ricerca e dalla sperimentazione di nuove soluzioni architettoniche ed impiantistiche, comporta notevoli conseguenze dal momento che l'edilizia impatta per il 40% circa delle emissioni inquinanti e dei consumi delle risorse a livello mondiale [1].





## **BIBLIOGRAFIA**

- [1] Appunti delle lezioni del corso “Sostenibilità di processi e prodotti nei materiali per l’architettura” del prof. J.M. Tulliani, anno accademico 2017-2018;
- [2] [www.isprambiente.gov.it](http://www.isprambiente.gov.it);
- [3] [www.lamiaterravale.it](http://www.lamiaterravale.it);
- [4] <https://www.bmj.com/content/351/bmj.h6316/infographic>, 24 novembre 2015;
- [5] [www.raistoria.rai.it](http://www.raistoria.rai.it);
- [6] Rossano Basili, *Il quadro normativo nazionale per l’efficienza energetica degli edifici*, Conference paper, 2011;
- [7] <https://www.legambiente.it>;
- [8] [www.minambiente.it](http://www.minambiente.it);
- [9] Norma UNI EN 15232, *Performance energetica degli edifici \_Impatto dell’automazione, controllo e gestione degli edifici*, novembre 2016;
- [10] Pedro Domingues, P.Carreira, R.Vieira, W.Kastner, “*Building automation system: concepts and technology reviews*”, Computer standards&Interfaces, 2015, 2-12;
- [11] Maria Pia Fanti, A. Mangini, M. Roccotelli, “*A simulation and control model for building energy management*”, Control Engineering Practice, 2017, 192-205;
- [12] Norma UNI EN ISO 52016, *Prestazione energetica degli edifici - Fabbisogni energetici per riscaldamento e raffrescamento, temperature interne e carichi termici sensibili e latenti - Parte 1: Procedure di calcolo*, marzo 2018;
- [13] Norma UNI/TS 11300, *Determinazione del fabbisogno di energia termica dell’edificio per la climatizzazione estiva ed invernale*, 2014;
- [14] Giorgio Galbusera, “*Chiarimenti sulla nuova norma per il calcolo in regime dinamico UNI EN ISO 52016*”, Ingenio, febbraio 2018;
- [15] <https://www.domusweb.it>;

[16] Immagini renderizzate tratte dal sito <https://www.archilovers.com/projects/192319/mountain-design-hotel-eden-selva.html#images>;

[17] Immagine tratta dal sito <https://carloratti.com/project/lift-bit/>;

[18] Simon Elias Bibri, “*The IoT for smart sustainable cities of the future: an analytical framework for sensor-based big data applications for environmental sustainability*”, *Sustainable Cities and Societies*, 2017, 230-253;

[19] <http://www.agendaurbana.it/smart-city/torino-54ed9b2b62c9a47815000138/>

[20] Immagine tratta dal sito [www.adriaticonews.it/wpcontent/uploads/2018/04/iot-smart-city-components-desktop.jpg](http://www.adriaticonews.it/wpcontent/uploads/2018/04/iot-smart-city-components-desktop.jpg);

[21] <https://www.axelero.it>;

[22] Kevin Ashton, *How to Fly a Horse: The Secret History of Creation, Invention, and Discovery*, Doubleday, New York, 2015;

[23] Roberto Siagri, *La trasformazione dei prodotti e delle imprese attraverso i dati. L’IoT da technology hype a strumento imprescindibile della trasformazione digitale*, pagg. 43-68 del documento del 35° Convegno Nazionale *Energia e comfort negli edifici nell’era della digitalizzazione e dell’intelligenza distribuita*, Firenze, 2018;

[24] Tommaso Addabbo, A. Fort, M. Mugnaini, E. Panzardi, A. Pozzebon, V. Vignoli, *A city-scale IoT architecture for monumental structures monitoring*, *Measurement* 131, 2018, 349-357;

[25] Angel Perles, E.P. Marin, R. Mercado, D. Segrelles, I. Blanquer, M. Zarzo, J. Garcia-Diego, *An energy-efficient internet of things (IoT) architecture for preventive conservation of cultural heritage*, *Future Generation Computer System* 81, 2018, 566-581;

[26] Andreas P. Plageras, K. Psannis, C. Stergiou, H. Wang, B.B. Gupta, “*Efficient IoT-based sensor Big Data collection-processing and analysis in smart building*”, *Future Generation Computer Systems*, 2017, 349-357;

[27] A. Yassine, S. Singh, M. Hossain, G. Muhammed, “*IoT big data analytics for smart homes with fog and cloud computing*”, *Future Generation Computer*

Systems, 2018, 563-573;

[28] <https://www.bigdata4innovation.it>;

[29] <https://www.mip.polimi.it>;

[30] Citazione tratta dall'articolo "*A Torino Carlo Ratti rinnova la Fondazione Agnelli inaugurando l'Office 3.0*" pubblicato sul sito [www.ingenio.it](http://www.ingenio.it);

[31] Livio de Santoli, Francesco Mancini, "*Studio di un modello di aggregatore di uno smart district*", Report ENEA pubblicato nel settembre 2016;

[32] Immagine riassuntiva delle informazioni presenti sul sito [www.arera.it](http://www.arera.it);

[33] Immagine tratta dal sito [www.mercatoelettrico.org](http://www.mercatoelettrico.org);

[34] Valentina Fabi, V.M. Barthelmes, M. Schweiker, S.P. Corganti, "*Insights into the effects of occupant behaviour lifestyles and building automation on building energy use*", Energy Procedia, 2017, 48-56;

[35] Simona D'Oca, V. Fabi, S.P.Corganti, R.K.Andersen, "*Effect of thermostat and window opening occupant behaviour models on energy use in homes*", Journal of Building Simulation, luglio 2014, 683-694;

[36] Kanae Matsui, "*Proposal and implementation of real-time certification system for smart home using IoT technology*", Energy Procedia 142, 2017, 2027-2034;

[37] Dario Fusco, M. Picco, D. Chiaroni, M. Marengo, *L'impatto della building automation nelle nuove costruzioni residenziali nZEB*, pagg. 97-112 del documento del 35° Convegno Nazionale *Energia e comfort negli edifici nell'era della digitalizzazione e dell'intelligenza distribuita*, Firenze, 2018;

[38] Immagini tratte dal manuale illustrativo per l'impianto domotico\_II edizione. Pubblicato da Gewiss, Tecniche nuove SPA, Como, 2015;

[39] Massimo Cipolla, *Progettare la domotica*, Maggioli Editore, Repubblica di San Marino, 2007;

[40] Immagine tratta dal manuale illustrativo per l'impianto domotico. Pubblicato da Gewiss, Tecniche nuove SPA, Zingonia, 2008;

- [41] Giuseppe Gustavo Quaranta, *La domotica per l'efficienza energetica delle abitazioni. Seconda edizione*, Repubblica di San Marino, 2013;
- [42] Normativa UNI/TR 11552 “*Abaco delle strutture costituenti l'involucro opaco degli edifici - Parametri termofisici*”;
- [43] Informazioni tratte dal sito [www.logical.it](http://www.logical.it);
- [44] Informazioni tratte dal sito [www.enup.it](http://www.enup.it)
- [45] Behrang Vand, S. Alam, M. All, M.Z. Degefa, *Influence of energy demand response actions on thermal comfort and energy cost in electrically heated residential houses*, Indoor and Built Environment, 2015;
- [46] Enrico Fabrizio, V. Monetti, *Methodologies and advancements in the calibration of building energy models*, Energies, Università degli studi di Torino, Politecnico di Torino, ISSN 1996-1073, 2015;
- [47] <https://www.wunderground.com/>;
- [48] Norma UNI EN 15251, *Criteri per la progettazione dell'ambiente interno e per la valutazione della prestazione energetica degli edifici, in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica*, 2008;
- [49] Norma UNI EN 12831, *Prestazione energetica degli edifici - Metodo per il calcolo del carico termico di progetto - Parte 1: Carico termico per il riscaldamento degli ambienti*, 2018;
- [50] Norma UNI EN 12464, *Luce e illuminazione - Illuminazione dei posti di lavoro*, 2011;
- [51] F. Behrooz, A.R. Ramli, K. Samsudin, *A new fuzzy logic approach to Building Automation from Safety and Health Perspective*, Conference Paper, 2009;
- [52] Franca Caliò, *Algebra booleana e circuiti combinatori: esercizi e complementi*, Levrotto e Bella, Torino, 1979;
- [53] *The ultimate guide to building automation*, [www.buildingautomationmonthly.com](http://www.buildingautomationmonthly.com), 2017;
- [54] Matteo De Felice, Stefano Panzieri, *Sviluppo di metodi di controllo per il siste-*

ma edificio-impianto, Report RSE/2009/69, 2009;

[55] Andrea Bonarini, Sistemi fuzzy, *www.archivio-mondodigitale.aicanet.net*, 2003;

[56] Mi-Su Shin, Kyu-Nam Rhee, Eun-Tack Lee, Gun-Joo Jung, *Performance evaluation of CO<sub>2</sub>-based ventilation control to reduce CO<sub>2</sub> concentration and condensation risk in residential buildings*, Building and Environment 142, 2018, 451-463;

[57] G.Agrisani, A.Rosalto, C.Rosselli, M.Sasso, S.Sibilio, A.Unich, *Influence of climatic conditions and control logic on NO<sub>x</sub> and CO emissions of a micro-cogeneration unit serving an Italian residential building*, Applied Thermal Engineering 71, 2013, 858-871;

[58] Alexandros Pantazaras, S.E. Lee, M. Santamouris, J. Yang, *Predicting the CO<sub>2</sub> levels in buildings using deterministic and identified models*, Energy and Buildings 127, 2016, 774-785;

[59] G.Settimo, S.Brini, L.T.Baldassarri, A. De Martino, A.Lepore, F.Moricci, *Presenza di CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S in ambienti indoor-residenziali: analisi critica delle conoscenze di letteratura*”, *www.old.iss.it*;

[60] *L’anidride carbonica (CO<sub>2</sub>) negli ambienti interni*, Documento Arpat pubblicato sul sito <http://www.arpat.toscana.it>, ottobre 2013;

[61] Daria Baranova, D. Sovetnikov, D. Semashkina, A. Borodinecs, *Correlation of energy efficiency and thermal comfort depending on the ventilation strategy*, Procedia Engineering 2015, 2017, 503-510;

[62] M.R. Brambley, P. Haves, S.C. McDonald, P. Torcellini, D. Hansen, D.R. Holmberg, K. W. Roth, *Advanced sensors and controls for Building Applications*, 2005;

[63] A.Atzeri, F.Cappelletti, A.Gasparella, G.Pernigotto, *Energy performance of shading devices for thermal and lighting comfort offices*, Conference paper, 2013;

[64] Anna Atzeri, F. Cappelletti, A. Gasparella, *Internal versus external shading devices performance in office buildings*, Energy Procedia 45, 2014, 463-472;

[65] G.R. Dell’Osso, F. Iannone, A. Pierucci, A. Rinaldi, S. Vacca, *La gestione dei carichi termici estivi mediante sistemi di Building Automation*,

Conference Paper, 2015;

[66] Anna Pellegrino, *Illuminotecnica. Indicatori di comfort visivo e fabbisogno di energia per l'illuminazione artificiale*, Forte Chance Piemonte, Torino, 2011;

[67] Francesco Fabbro, *Implementazione di strategie di gestione energetica intelligente in edifici residenziali esistenti*, Tesi di laurea magistrale, Politecnico di Torino, Facoltà di Architettura, Corso di laurea magistrale in architettura per il progetto sostenibile, anno accademico 2017-2018;

[68] Alexander Nilsson, *A new energy strategies for controlling heating system in existing buildings\_ Investigation in IDA ICE simulation environment*, Tesi di laurea in ingegneria energetica, Università di Umeå, 2015;

[69] Anna Pellegrino, *BACS: i benefici del controllo dell'illuminazione negli uffici*, articolo pubblicato su Ingenio, febbraio 2018;

[70] C.Aghemo, J.Virgone, G.V.Fracastoro, A.Pellegrino, L.Blaso, J.Savoyat, K.Johannes, *Management and monitoring of public buildings through ICT based systems: control rules for energy saving with lighting and HVAC services*, Frontiers of Architectural Research, 2013, 147-161;

[71] C.Aghemo, L.Blaso, A.Pellegrino, *Building automation and control systems: a case study to evaluate the energy and environmental performances of a lighting control system in offices*, Automation in construction 43, 2014, 10-22;

[72] N. Zemmouri, M.E. Schiller, *Application of fuzzy logic in interior daylight estimation*, www.cder.dz, 2005;



