



**POLITECNICO
DI TORINO**

Area dell'architettura

Corso di Laurea Magistrale in Architettura per il progetto sostenibile

Tesi di Laurea Magistrale

**Applicazione della *cost-optimality* per la
determinazione dei requisiti minimi di
prestazione energetica degli edifici**

Relatore:

Prof. Vincenzo Corrado

Correlatore:

Prof.ssa Ilaria Ballarini

Candidato:

Luca Vanacore

Dicembre 2018

Questa tesi rappresenta la fine di un percorso di studio e di vita.

Innanzitutto vorrei ringraziare il professor Vincenzo Corrado e la professoressa Ilaria Ballarini, i quali hanno permesso di ampliare le mie conoscenze in ambito energetico per la redazione di questa tesi grazie anche alle loro revisioni precise e puntuali. Vorrei inoltre ringraziare Giovanna De Luca per la sua pazienza e gentilezza dimostrata in questi mesi.

In tutti questi anni ci sono state persone più o meno vicine che mi hanno permesso di arrivare dove sono adesso e che mi hanno sopportato/supportato. Tra tutti loro meritano un riconoscimento speciale i miei familiari per il loro sostegno, mia nonna per aver fatto da mamma aggiuntiva, mio cugino per avermi fatto distrarre nei momenti peggiori con i soliti giri in piazza Vittorio, il buon Maestro Edoardo Recaldini senza il quale non sarei mai riuscito a chiudere tutta la tesi in tempo, Federico Guadagnin per il sostegno morale/telefonico data la distanza e Berty e Ele per essere sempre stati degli ottimi amici in tutte le situazioni.

Come non menzionare anche la mia migliore amica Giulia Lege e Nicolò Giovanetto per tutte le serate passate a narrare le storie più improbabili, a giocare al nostro solito gioco della verità e a guardare le mega tattiche di “attacco” di Giova in discoteca.

In aggiunta ringrazio Matteo Landrino, Mattia Mantovani, Bianca Tancao, Camilla Viazzo, Flavio Tanese, Francesca Pertosa, Martina Torchia e Valentina Mazzei per tutte le ore passate a chiacchierare e divertirci in questi lunghi anni.

Per ultimo ma non per importanza ringrazio chi mi ha sempre sostenuto in tutti i momenti di sconforto e tristezza cercando di strapparmi un sorriso, che ha tradotto la tesi da “Luchese” a “Italiano corretto” per poterla rendere comprensibile, che anche con moli di lavoro assurde ha cercato sempre di aiutarmi e che ha sempre saputo come prendere il mio caratteraccio. Per tutto questo..... Grazie di cuore.

I pensieri più che i ringraziamenti vanno anche a chi non è potuto essere presente in questo giorno e che sicuramente sarebbe stato in prima fila a guardarmi vestito di tutto punto in piedi davanti alla commissione a parlare descrivendo il coronamento del mio percorso di studi.

Anche se non è una persona ringrazio la camicia regalatami da mia sorella che, per motivi tecnici, non è potuta essere presente alla discussione ma merita comunque un riconoscimento (così non si offende).

Indice

Abstract	7
Abstract (English version)	11
Introduzione	15
1 - Quadro legislativo in materia di efficienza energetica in edilizia	23
1.1 Escursus legislativo.....	25
1.2 Le recenti disposizioni: la Direttiva EPBD recast e la Direttiva UE 2018/844..	26
1.3 La procedura di cost-optimality.....	29
1.4 Decreto Ministeriale del 26 giugno 2015.....	31
2 - La Cost-Optimality in Italia	33
2.1 Definizione e individuazione degli edifici di riferimento.....	36
2.2 Misure di efficienza energetica.....	40
2.3 Metodologia per il calcolo del costo globale.....	44
2.4 Determinazione dei costi.....	51
2.4.1 Costo di investimento.....	52
2.4.2 Costi energetici.....	54
2.5 Procedura di ottimizzazione.....	63
3 - Metodi di calcolo del fabbisogno energetico e strumenti di ottimizzazione	65
3.1 Modello in regime semi-stazionario: UNI TS 11300.....	67
3.2 Modello in regime dinamico: EnergyPlus.....	72
3.3 Modelli a confronto.....	77
3.4 Modelli di ottimizzazione mono-obiettivo e multi-obiettivo.....	80
3.4.1 Algoritmi di ottimizzazione.....	81
3.4.2 Mono-obiettivo.....	84
3.4.3 Multi obiettivo: NSGA II.....	85

4 - Applicazione della procedura ad un edificio di riferimento.....	91
4.1 Descrizione del caso studio.....	93
4.1.1 Involucro opaco.....	97
4.1.2 Involucro trasparente.....	101
4.1.3 Impianti tecnici dell'edificio.....	101
4.2 Misure di efficientamento energetico dell'edificio.....	105
4.3 Descrizione dei costi.....	106
4.3.1 Costi relativi all'involucro opaco.....	107
4.3.2 Costi relativi all'involucro trasparente.....	112
4.3.3 Costi relativi agli impianti tecnici.....	118
4.3.4 Costi di sostituzione.....	128
4.3.5 Costi di manutenzione.....	130
4.3.6 Costi energetici.....	132
4.4 Opzioni di congruenza tra modelli di calcolo.....	134
4.4.1 DesignBuilder.....	137
4.4.2 Assunzioni riguardanti l'ottimizzatore multi-obiettivo NSGA-II.....	139
5 - Risultati.....	141
5.1 Risultati della cost optimal methodology in regime semi-stazionario.....	143
5.2 Risultati della cost optimal methodology in regime dinamico.....	146
5.3 Risultati a confronto.....	150
6 - Conclusioni.....	155
Bibliografia e sitografia.....	161

Abstract

La presente tesi si inquadra nell'attività del Politecnico di Torino per il Ministero dello Sviluppo Economico di revisione e aggiornamento della metodologia comparativa, detta cost-optimality, per la definizione dei livelli ottimali in funzione dei costi per i requisiti minimi di prestazione energetica negli edifici. Il risultato della cost-optimality consiste nell'individuazione di un pacchetto di misure di efficienza energetica che garantisca il costo minore, considerando i costi d'investimento, di manutenzione e sostituzione e i costi energetici. La tesi, inquadrata in questo contesto, ha l'obiettivo di confrontare i risultati della metodologia comparativa applicata con metodi di calcolo differenti: da un lato, con un modello semi-stazionario associato ad un ottimizzatore mono-obiettivo a soluzioni discrete, previsto dalla metodologia sviluppata in ambito nazionale; dall'altro, con un modello dinamico dettagliato associato ad un ottimizzatore multi-obiettivo.

La procedura seguita nella presente tesi è conforme alla metodologia sviluppata a livello nazionale ed è articolata nelle seguenti fasi: l'individuazione e la modellazione del caso studio a cui applicare la metodologia, l'individuazione delle misure di efficientamento energetico e dei relativi costi, l'ottimizzazione e la valutazione economica ed energetica dei pacchetti di misure di efficienza energetica.

Il caso studio analizzato è uno degli edifici di riferimento individuati nello sviluppo della metodologia a livello nazionale, ed è rappresentativo dei condomini residenziali esistenti di grandi dimensioni. Affinché i risultati possano essere confrontabili, la modellazione dell'edificio di riferimento con i diversi modelli di calcolo devono essere conformi. Per questo motivo, i dati di input necessari per il calcolo in regime quasi-stazionario sono stati rielaborati al fine di essere utilizzati nel modello in regime dinamico. Si tratta, ad esempio, dei profili di utilizzo. Allo stesso modo, anche le misure di efficienza energetica considerate, che comprendono interventi sull'involucro (opaco e trasparente), sugli impianti e sugli impianti a fonti rinnovabili, sono state modellate al fine di essere coerenti con la modellazione semi-stazionaria.

Per entrambi i modelli, il pacchetto ottimale di misure di efficienza energetica è stato

analizzato evidenziandone le riduzioni dal punto di vista del fabbisogno energetico e dei costi rispetto allo stato di fatto. Inoltre, i due pacchetti ottimali sono stati confrontati e ne sono state evidenziate le differenze e le relative criticità.

Abstract (English version)

The present thesis is part of the activity of Politecnico di Torino for the Ministero dello Sviluppo Economico about the revision and the updating of the comparative methodology, called cost-optimality, for the assessment of cost-optimal levels of the building minimum energy performance requirements. The cost-optimality result consists in the individuation of a package of energy efficiency measures which leads to the lowest cost during the building economic lifecycle, considering the investment costs, the maintenance and replacement costs and the energetic costs. Within this framework, the thesis aims to compare the results of the comparative methodology applied with two different calculation methods: on one hand, with a semi-static model associated with a discrete solution mono-objective optimizer, established by the methodology developed in the national framework; on the other hand, with a detailed dynamic model associated with a multi-objective optimizer.

The procedure used in this thesis complies with the methodology developed at the national level and it is articulated in the following phases: the identification and modelling of the case study, the identification of the energy efficiency measures and their relative costs, the optimization and economic and energetic evaluation of the energy efficiency measures packages.

The case study analyzed is one of the reference buildings identified in the development of the methodology at national level, and it is representative of the existing apartment buildings typology. Since the results must be compared, the modelling of the reference building with the different calculation methods must be consistent with each other. For this reason, the required input data for the semi-static regime calculation have been elaborated to be implemented in dynamic model (e.g. user profiles). In the same way, also the considered energy efficiency measures, that consist in measures on the opaque and transparent building envelope and on the building technical systems, including the implementation of photovoltaic and thermal solar systems, have been modeled so as to be consistent with the semi-stationary model.

For both the models, the energy efficiency measures optimal package has been analy-

zed highlighting the improvements in the building energy performance and the package cost-effectiveness against the existing solution. Moreover, the two optimal packages have been compared and the differences and relative critical issues have been highlighted.

Introduzione

Il boom economico che ha coinvolto il settore edilizio dal dopoguerra agli anni '70 ha contribuito in ampia misura all'utilizzo incontrollato del petrolio in quanto le costruzioni venivano progettate pensando soltanto al raggiungimento del comfort interno attraverso un dispendio di energia molto elevato, a scapito della sostenibilità ambientale.

Una delle principali tematiche del settore architettonico moderno è rappresentata dalle diverse applicazioni del concetto di sostenibilità e di uso razionale delle risorse. Tali concetti si sono sviluppati a partire dagli anni '70 quando la politica internazionale ha avuto ripercussione sull'economia mondiale.

Nel 1973, infatti, i paesi del Medio Oriente facenti parte dell'Organisation of the Petroleum Exporting Countries (OPEC) hanno interrotto l'esportazione di petrolio verso gli Stati Uniti ed i paesi Occidentali come protesta per l'aiuto che questi avevano fornito ad Israele. La conseguenza inevitabile di tale azione è stata una importante crisi energetica, considerando che tali Paesi avevano una dipendenza totale da questo vettore energetico. Si è quindi registrato un incremento del costo del petrolio (fino al 300%) che ha costretto i vari Governi a mettere in atto soluzioni immediate per la risoluzione e la prevenzione di future crisi simili. Questo si è tradotto, anche, con la ricerca di nuove fonti energetiche che potessero sostituire quelle non rinnovabili [1].

Per la prima volta si è data importanza ad argomenti quali la sostenibilità delle risorse, il controllo delle emissioni di CO₂ in ambiente e l'incentivo per l'utilizzo delle fonti di energia rinnovabile [2].

La crisi energetica citata, assieme a quelle successive, hanno rappresentato l'occasione per sensibilizzare i governi ad agire seguendo criteri differenti da quelli passati, col fine ultimo sia di limitare gli sprechi energetici e delle emissioni inquinanti sia di promuovere contemporaneamente la ricerca e lo sviluppo di nuove tecnologie e materiali sostenibili. Tali concetti sono stati l'oggetto principale di una lunga serie di incontri e conferenze

internazionali.

Tra le più importanti si ha la conferenza delle Nazioni Unite sull'Ambiente Umano del 1972. Questa rappresenta la prima tappa di un percorso che si è sviluppato progressivamente fino ad oggi [3].

Nel 1980, a Nairobi, è stato scritto il documento ufficiale "*Strategia mondiale per la conservazione*" che racchiude il concetto di progetto sostenibile e di risparmio delle risorse.

La definizione di sostenibilità viene espressa nella sua interezza nel 1987 all'interno del rapporto Bruntland, che la pone come quello sviluppo che soddisfa le esigenze del presente senza compromettere quelle future. La salvaguardia ambientale non è più ritenuta un ostacolo alla crescita umana bensì è posta come un obbligo da rispettare per garantire lo sviluppo socio-economico futuro [4].

Nel 1992, durante il "Summit della Terra", tenutosi a Rio de Janeiro, è stata redatta la Convenzione Quadro da parte delle Nazioni Unite. Il fine era quello di ridurre la quantità di gas serra emessi in atmosfera. Questa Convenzione è entrata in vigore nel 1994 senza tuttavia comportare un vincolo per i singoli Paesi. Sempre in questo anno si è deciso di creare una Conferenza delle Parti (COP), con cadenza annuale, con l'intento di discutere dei cambiamenti climatici.

Nel 1997, durante la Conferenza delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici, viene stilato il protocollo di Kyoto. Esso prevede, con la sottoscrizione di più di 160 paesi, la riduzione della quantità dei principali gas serra emessi in ambiente (anidride carbonica, metano, protossido di azoto, idrofluorocarburi, perfluorocarburi ed esafluoruro di zolfo) nella misura non minore del 5% rispetto a quelli emessi nel 1990 in un periodo compreso tra il 2008 e il 2012. Per poter essere attuato il trattato doveva essere ratificato da un minimo di 55 nazioni che assieme producessero almeno il 55% delle emissioni di gas serra. Ciò è avvenuto solo con l'adesione, nel 2004, della Russia. Non hanno invece sottoscritto il protocollo l'America, l'India e la Cina che rappresentano i maggiori produttori mondiali di gas inquinanti. Allo stesso tempo altre nazioni si sono ritirate progressivamente

riducendo l'applicazione di tale protocollo ai paesi responsabili di una quota pari al 14% delle emissioni mondiali.

Successivamente si sono tenute altre Conferenze delle Parti che hanno cercato di imporre dei limiti sempre maggiori per quanto riguarda l'emissione di gas serra e la limitazione del surriscaldamento globale [5].

Ogni paese ha provveduto alla promulgazione di direttive, decreti e leggi riguardanti l'imposizione di valori limite di prestazione energetica, l'utilizzo di materiali sostenibili, il controllo dei consumi degli edifici, l'arginazione dei fenomeni relativi all'inquinamento e alla produzione di gas ad effetto serra.

Nel panorama normativo italiano, la colonna portante delle leggi riguardanti il risparmio energetico e l'uso razionale dell'energia è sicuramente la legge n. 10 del 9 gennaio 1991 [6].

Successivamente alla sua promulgazione sono state definite e recepite numerose altre norme sull'argomento.

Le principali risultano essere la Direttiva 2002/91/CE [7], detta EPBD, nella quale viene imposto agli Stati Membri di definire un metodo di calcolo per le prestazioni energetiche dell'edificio che rispetti i requisiti minimi imposti. Essa viene sostituita dalla Direttiva europea 2010/31/UE [8], o EPBD recast, recepita attraverso la legge 90 del 3 agosto 2013 [9] che pone dei limiti sul consumo energetico annuo e introduce per la prima volta il concetto di cost-optimality e di edifici ad energia quasi zero. Ad esse si aggiunge la Direttiva UE 2018/844 del 30 maggio 2018 [10] relativa anch'essa allo sviluppo energetico degli edifici e all'introduzione di logiche di automazione per il controllo dell'abitazione. Quest'ultima però è ancora in fase di recepimento.

La tesi è un contributo all'attività, del Politecnico di Torino, di redazione della nuova relazione per il Ministero dello Sviluppo Economico in materia di livelli di requisiti minimi ottimali in funzione dei costi. In aggiunta si è posta l'attenzione sulla differenza che

sussiste tra il calcolo del fabbisogno in condizioni semi-stazionarie, proposto dalla metodologia di calcolo di cost-optimal, ed il calcolo del fabbisogno in regime dinamico. Sono stati inoltre comparati due modelli di ottimizzazione differenti: il primo mono-obiettivo ed il secondo multi-obiettivo. Tale comparazione ha permesso di ottenere rispettivamente dei pacchetti di interventi di efficienza energetica caratterizzati dal minore costo possibile ma composti da set di misure differenti.

Questo concetto assume un valore molto rilevante all'interno dello sviluppo sostenibile del parco edilizio nazionale sia in termini di risparmio di risorse ambientali che di risparmio monetario.

La cost-optimal methodology permette infatti di stabilire quali siano gli interventi di efficientamento energetico, applicabili tanto ad edifici di nuova costruzione quanto a quelli esistenti, che garantiscano un rapporto costo/beneficio elevato.

L'utilizzo di questo metodo porta direttamente all'abbassamento del fabbisogno dell'edificio, ad una riduzione della spesa relativa all'acquisto, manutenzione e sostituzione delle misure per l'efficienza energetica e, indirettamente, ad una diminuzione di CO₂ emessa per via del minor dispendio di energia per il riscaldamento e raffrescamento degli ambienti.

Tramite l'applicazione della cost-optimality il progettista è in grado di interrogarsi su quali siano le misure di efficienza applicabili all'edificio in oggetto che comportino una riduzione del fabbisogno mantenendo, allo stesso tempo, un costo contenuto.

La questione principale risulta essere il fatto che non è sempre verificato che un intervento di miglioramento della prestazione energetica produca anche un risparmio economico. Questo è dato dal fatto che un risparmio effettivo è ottenibile mediante un insieme di interventi compatibili tra loro [11].

Il fine, quindi, della cost-optimality è quello di mantenere il costo più basso possibile a fronte di un intervento di efficienza, considerando l'interazione che gli elementi hanno tra loro e i benefici che producono.

Oltre alla procedura che permette di trovare il pacchetto di interventi ottimali in funzione dei costi utilizzata all'interno della tesi, si è aggiunto un ulteriore elemento. Per il calcolo del fabbisogno si è proceduto infatti sia con il modello in regime semi-stazionario, prescritto dalla normativa UNI TS 11300 [12] [13] [14] [15], che con il modello in regime dinamico, mediante l'utilizzo di EnergyPlus. I risultati, ottenuti applicando i medesimi costi nei due casi distinti, sono stati successivamente paragonati tra loro confrontando gli ottimi globali.

La tesi è così articolata:

Dopo un breve excursus normativo, nel secondo capitolo viene descritta la procedura da applicare per sviluppare il calcolo di cost-optimality in Italia:

- Scelta dell'edificio di riferimento e definizione delle sue caratteristiche tipologiche, costruttive e impiantistiche;
- Identificazione delle misure di efficienza energetica da applicare all'edificio;
- Calcolo del fabbisogno di energia primaria richiesta dall'edificio in relazione alle diverse misure applicate;
- Calcolo del costo globale mediante l'utilizzo della metodologia del VAN;
- Calcolo del livello ottimale in funzione dei costi;

Il capitolo tre si articola in diversi punti riguardanti le metodologie di calcolo energetico ed economico:

- Sintesi dell'utilizzo dello strumento di calcolo UNI/TS 11300 in regime semi-stazionario;
- Sintesi dell'utilizzo del software Energy plus per il calcolo del fabbisogno in regime dinamico;
- Confronto tra modelli di simulazione semi-stazionaria e dinamica;
- Confronto tra modelli di ottimizzazione mono-obiettivo a soluzioni discrete e multi-obiettivo (NSGA-II);

Nel capitolo quattro si analizza l'edificio di riferimento applicando la procedura di cost-optimality descritta nei capitoli precedenti. Nell'ultimo paragrafo sono enunciati i metodi utilizzati per la calibrazione del modello di calcolo in regime stazionario con quello per il calcolo in regime dinamico e l'utilizzo del programma DesignBuilder.

Nel quinto capitolo si confrontano i risultati ottenuti dai due modelli di calcolo a cui seguono le conclusioni finali.

**1 - Quadro legislativo
in materia di efficienza energetica
in edilizia**

1.1 Escursus legislativo

In Italia il 30 aprile 1976 viene emanata la prima legge sul risparmio energetico degli edifici, ovvero la legge ordinaria del Parlamento n.373 [16]. Essa, suddivisa in diverse sezioni, contiene norme riguardanti il controllo del consumo termico dell'edificio, l'isolamento termico della costruzione, l'installazione, le caratteristiche e la manutenzione di nuovi impianti per la produzione di calore e le sanzioni in cui si incorre se tali limiti non vengono rispettati.

Il vero punto cardine nel settore normativo italiano del risparmio energetico è tuttavia la legge 10/91 del 9 gennaio 1991 [6]. Questa legge, che abroga la legge n. 373 [16], pone le basi per la creazione di una procedura standard di verifica dei consumi degli edifici. In aggiunta elenca le fonti rinnovabili che si prestano maggiormente alla produzione di energia, le politiche di uso razionale dell'energia per il risparmio energetico, i contributi e gli incentivi per il contenimento dei consumi e introduce il concetto di certificazione energetica.

La legge 10/91 è seguita da innumerevoli leggi e decreti collegati, come il D.P.R. 26 agosto 1993 – n°412 [17]. Questo è l'attuazione dell'articolo 4 comma 4 della legge 10 che stabilisce le fasce climatiche nelle quali si suddivide il territorio in base ai gradi giorno, differenzia le categorie degli edifici in base alla destinazione d'uso, impone le condizioni interne all'ambiente (temperature da garantire, giorni di accensione/spegnimento degli impianti di riscaldamento) e prescrive la cadenza delle attività di manutenzione.

Un avvicinamento a quanto stabilito dal protocollo di Kyoto lo si ha con la direttiva 93/76/CEE del 13 settembre 1993 [18], dove viene richiesto agli Stati Membri di diminuire le emissioni di biossido di carbonio andando a migliorare l'efficienza energetica degli edifici. Questa direttiva è stata abrogata nel 2006 dalla Direttiva 2006/32/CE [19] che amplia i concetti contenuti nel testo precedente inserendo articoli riguardanti il miglioramento dei costi/benefici nell'utilizzo dell'energia, gli obiettivi per il risparmio energetico e per l'efficienza nel settore pubblico oltre che gli obblighi per i distributori, i gestori e gli enti per la distribuzione energetica.

Il recepimento del protocollo di Kyoto avviene, a livello europeo, attraverso la Direttiva Comunitaria 2002/91/CE “*Energy Performance of Buildings Directive*” (EPBD) [7]. Questa normativa racchiude la metodologia per il calcolo del rendimento energetico degli edifici, le prescrizioni minime di rendimento energetico, il controllo delle emissioni di CO₂ e un calendario per l’ispezione degli impianti che tutti gli Stati Membri devono raggiungere come obiettivo. Pone inoltre l’attenzione sulla relazione costo/efficacia degli interventi di efficienza energetica, regole per le ristrutturazioni importanti, l’approccio degli edifici pubblici nei confronti del risparmio energetico e alcune regole per la stesura del certificato di prestazione energetica. L’EPBD è stata attuata attraverso il decreto Legislativo N°192 del 2005 [20] che apporta anche alcune modifiche alla legge 10/91. La finalità è quella di stabilire i criteri e le modalità per il miglioramento della prestazione energetica degli edifici, di definire il metodo di calcolo per i requisiti minimi e di favorire l’implementazione delle fonti rinnovabili e la diversificazione delle energie utilizzate, in modo da raggiungere gli obiettivi nazionali sanciti dal protocollo di Kyoto per quanto riguarda i gas ad effetto serra e lo sviluppo delle tecnologie.

1.2 Le recenti disposizioni: la Direttiva EPBD recast e la Direttiva UE 2018/844

La Direttiva 2002/91/CE [7] ha subito una rifusione che ha portato alla stesura della Direttiva 2010/31/UE del parlamento Europeo e del Consiglio che prende il nome di EPBD recast [8].

Essa denuncia come più del 40% del consumo energetico sia legato al settore edilizio. Essendo questo campo in continua espansione, si rende necessaria l’attuazione di politiche di riduzione dei consumi e di utilizzo di fonti rinnovabili in sostituzione a quelle non rinnovabili con l’intento di allineare il Paese al protocollo di Kyoto e ai protocolli successivi. Essi prevedono di raggiungere una riduzione del 20% del consumo energetico entro il 2020 aumentando l’efficienza energetica di tutti i Paesi aderenti. In aggiunta è stato posto il raggiungimento di una quota pari al 20% di energia ricavata da fonti rinnovabili

rispetto ai consumi totali.

Una novità inserita all'interno della EPBD recast è quella degli “*Edifici ad energia quasi zero*” o nZEB (Near Zero Energy Buildings). Nella categoria nZEB si trovano tutti quegli edifici aventi un fabbisogno di energia basso o quasi tendente allo zero che viene coperto in maniera pressoché totalitaria da fonti di energia rinnovabili. Quanto detto risulterà un obbligo per tutti gli edifici di nuova costruzione: entro il 31 dicembre 2018 per gli edifici pubblici ed entro il 31 dicembre 2020 per le altre destinazioni d'uso.

Altre novità riguardano l'introduzione di incentivi associati a misure di risparmio energetico e alcune modifiche sia all'attestato di prestazione energetica che alle linee guida per l'ispezione e la manutenzione degli impianti.

In questa direttiva è stato inserito, per la prima volta, il concetto di cost-optimality o livello ottimale in funzione dei costi per i requisiti minimi di prestazione energetica dell'edificio. La definizione riportata all'interno dell'EPBD recast è “*Il livello di prestazione energetica che conduce al costo più basso durante il ciclo di vita economico stimato dell'edificio*”, ovvero l'insieme degli interventi sull'edificio (involucro opaco, trasparente ed impianto), che portano ad un miglioramento dell'efficienza energetica in termini di riduzione del fabbisogno, rapportati al costo che essi hanno sia per l'installazione che per la manutenzione e la sostituzione. Il miglioramento che comporta il costo più basso rappresenta il pacchetto ottimale [8].

Con la promulgazione del Regolamento delegato (UE) n.244/2012 della Commissione del 16 gennaio 2012 [21] e dei successivi orientamenti [22], che integrano la direttiva 2010/31/UE, si definisce il quadro metodologico per la comparazione dei livelli energetici ottimali in funzione dei costi ad essi associati. Vengono elencati gli edifici di riferimento, i metodi per il calcolo del fabbisogno, le diverse categorie di costo e vengono ipotizzati gli andamenti dei costi delle energie nel futuro.

L'applicazione di questo Regolamento delegato è avvenuta attraverso la relazione del Ministero dello Sviluppo Economico “*Applicazione della metodologia di calcolo dei livelli*

ottimali in funzione dei costi per i requisiti minimi di prestazione energetica”, che ha sviluppato le metodologie proposte dalla commissione europea applicandole all’Italia [11]. La relazione derivata dall’applicazione di tale metodologia va aggiornata a scadenze temporali di 5 anni, come stabilito nell’articolo 5 al punto 2 della direttiva 2010/31/UE [8]. Il recepimento e la conversione in legge della Direttiva 2010/31/UE avviene con la legge n. 90/2013 del 3 agosto 2013 [9]. Questa modifica e attua anche il decreto legge N.63/2013 del 4 giugno 2013 [23] e aggiorna il decreto legislativo 192/2005 [20]. Le aggiunte effettuate sono relative alla prestazione energetica degli edifici di nuova costruzione e ristrutturati, all’attestato di prestazione energetica, alle detrazioni fiscali, all’aumento degli edifici ad energia quasi zero, alle misure finanziarie per l’efficientamento energetico e ai livelli ottimali in funzione dei costi.

L’EPBD recast è stata recentemente aggiornata (30 maggio 2018) dalla nuova Direttiva UE 2018/844 del Parlamento Europeo e del Consiglio [10].

L’obiettivo rimane quello di ridurre il consumo energetico relativo al fabbisogno dell’edificio. Tale direttiva è ancora in corso di recepimento da parte degli Stati Membri dell’Unione e dovrà essere recepita entro il 10 marzo 2020.

Essa compie un passo avanti rispetto all’EPBD recast in quanto sancisce:

- La riduzione dei gas ad effetto serra del 40% entro il 2030 rispetto all’anno base di calcolo ovvero il 1990;
- Lo sviluppo delle fonti rinnovabili e aumento del loro consumo;
- Di trovare un equilibrio tra spesa ed emissioni di inquinanti;
- Di intensificare gli sforzi per l’efficientamento energetico dove il consumo di energia è più alto, ovvero nel riscaldamento e raffrescamento delle abitazioni (50% del consumo totale di energia);
- Di arrivare ad avere un parco immobiliare ad alta efficienza energetica e decarbonizzato mediante ristrutturazioni a lungo termine, trasformando gli edifici esistenti in edifici nZEB.
- L’aumento dell’isolamento degli edifici, la diminuzione delle infiltrazioni d’aria e

il mantenimento delle temperature superficiali interne superiori al punto di rugiada per evitare discomfort;

- L'eliminazione di componenti nocivi dalle abitazioni come amianto e composti volatili;
- L'aumento e miglioramento delle tecniche passive per il riscaldamento e il raffrescamento;
- L'aumento dei finanziamenti e degli sgravi fiscali per le opere di ristrutturazione a lungo termine;
- L'installazione all'interno delle abitazioni di dispositivi per il controllo delle temperature e altri dispositivi domotici;
- L'aumento della mobilità elettrica;
- Il maggior controllo e ispezioni per garantire l'efficienza degli impianti;
- Un approccio verso la ristrutturazione che sia legato a una efficienza in termine di costo, tenendo conto della tipologia di edificio, la zona in cui è situato e del ciclo di vita sia dell'edificio che dei singoli componenti;
- L'utilizzo di tecniche di costo/efficienza anche nelle ristrutturazioni a lungo termine.

Di seguito viene riassunta la procedura per il calcolo dei livelli ottimali in funzione dei costi (cost-optimality) che verrà successivamente approfondita nel capitolo 2.

1.3 La procedura di cost-optimality

L'attività di cost-optimality viene inserita all'interno del quadro normativo attraverso l'E-PBD recast [8]. Lo scopo è quello di identificare i requisiti minimi di prestazione energetica in relazione ai costi che andranno ad informare i diversi Decreti Ministeriali nazionali dei singoli stati membri dell'Unione.

La procedura di cost-optimality è stata introdotta dal regolamento delegato n.244/2012 [21] e dalle sue successive linee guida. Il suo iter è descritto nell'"*Applicazione della*

metodologia di calcolo dei livelli ottimali in funzione dei costi per i requisiti minimi di prestazione energetica” successivamente sviluppato all’interno del report del Ministero dello Sviluppo Economico del 2013 [11].

L’obiettivo è quello di arrivare alla costruzione di pacchetti ottimali di prestazione energetica che definiscano in maniera univoca gli interventi da applicare all’edificio per ottenere delle prestazioni ottimali sia in termini energetici che economici. I vari pacchetti sono inseriti all’interno di un grafico avente le ascisse e le ordinate indicanti rispettivamente la prestazione energetica, rappresentata dal fabbisogno di energia primaria necessaria all’edificio durante il periodo di riscaldamento e raffrescamento, espresso in kWh/m² annui, ed il costo globale dell’edificio, espresso in €/m². Tra essi viene scelto il pacchetto con un rapporto costo/beneficio maggiore rappresentato dal punto più basso presente nel grafico. Il fabbisogno di energia primaria da inserire nelle ascisse è ottenuto mediante l’utilizzo di appositi fattori di conversione per rendere paragonabili tra loro energie provenienti da fonti diverse.

Il punto di partenza della procedura è l’individuazione di un edificio di riferimento che rappresenti una determinata categoria di edifici (le categorie sono descritte all’interno della direttiva EPBD 2010/31/CE nell’allegato 1 al paragrafo 5) nei quali è suddiviso il parco edilizio nazionale. La costruzione può essere reale oppure un archetipo.

Di questi edifici vengono studiati gli aspetti climatici e le caratteristiche dell’involucro opaco (stratigrafie), delle chiusure trasparenti, delle schermature e delle partizioni interne. Questi rappresentano tutti i parametri che vanno ad influire sul fabbisogno energetico dell’edificio.

Vengono successivamente analizzati anche i consumi ed i rendimenti degli impianti presenti per il riscaldamento, raffrescamento, produzione di acqua calda sanitaria e ventilazione.

Si procede quindi con l’analisi di tutte le voci di costo.

Il costo globale, ovvero la spesa sostenuta durante il periodo di vita utile dell'edificio per la costruzione, manutenzione e sostituzione di eventuali misure energetiche, viene calcolato seguendo la metodologia del VAN, o valore attuale netto. Questa tecnica è utilizzata per valutazioni finanziarie di medio/lungo periodo e attualizza, ad una specifica data, tutti i flussi di cassa positivi e negativi di un investimento. Per verificare se quest'ultimo risulta più vantaggioso rispetto ad un altro, è sufficiente paragonare i due valori del VAN. Quello inferiore rappresenta l'investimento più vantaggioso.

È necessario precisare che i costi finora considerati sono solo quelli legati direttamente alla prestazione energetica e all'impianto e non quelli relativi ad altre componenti.

Una volta stabilita la metodologia per il calcolo dei singoli fattori si opera mediante un ottimizzatore che utilizza un calcolo iterativo dove ogni singolo pacchetto di varianti viene confrontato con un altro per trovare quello che comporta un esborso minore in relazione ad una maggiore prestazione energetica. Ogni pacchetto è rappresentato da un punto del grafico costo globale/fabbisogno. L'unione di questi punti forma la curva di involuppo che individua appunto l'ottimo globale.

1.4 Decreto Ministeriale del 26 giugno 2015

Il 26 giugno 2015 è stato introdotto un nuovo decreto [24] che approfondisce la metodologia del calcolo della prestazione energetica dell'edificio e ne ridefinisce i requisiti minimi già presenti nel decreto legislativo n.192 del 2005 [20].

In aggiunta divide gli interventi e i requisiti minimi a seconda che l'edificio sia di nuova costruzione o sia una ristrutturazione.

Per i calcoli di prestazione energetica, questo decreto sancisce l'utilizzo delle norme:

- UNI/TS 11300 – 1 “*Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale*”;
- UNI/TS 11300 – 2 “*Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei*

rendimenti per la climatizzazione invernale, per la produzione di acqua calda sanitaria, la ventilazione e l'illuminazione”;

- UNI/TS 11300 – 3 *“Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione estiva”;*

- UNI/TS 11300 – 4 *“Utilizzo di energie rinnovabili e di altri metodi di generazione per riscaldamento di ambienti e preparazione acqua calda sanitaria”;*

- Le raccomandazioni del CTI 14/2013 – *“Determinazione dell'energia primaria e della prestazione energetica EP per la classificazione dell'edificio”*[25];

- UNI EN 15193 – *“Requisiti energetici per illuminazione”*[26].

In aggiunta sancisce la possibilità di utilizzare dei software commerciali per il calcolo a patto che i valori risultanti si discostino al massimo del 5% rispetto ai valori calcolati con le norme sopracitate.

Nell'allegato 1 del decreto è inserita la metodologia del calcolo, i fattori di conversione in energia primaria dei principali vettori energetici, la classificazione degli edifici in base alle destinazioni d'uso, la differenza tra ristrutturazioni importanti e riqualificazione energetica e le prescrizioni per gli edifici di nuova costruzione o in ristrutturazione.

Nelle appendici 1 e 2, invece, vengono descritti tutti i parametri necessari alle verifiche di legge sia relative al fabbricato che all'impianto.

Questo Decreto Ministeriale come la relazione del Ministero dello Sviluppo Economico deve essere aggiornato ogni 5 anni. Risalendo al 2013 la relazione è in fase di aggiornamento ed è proprio in questo frangente che si inserisce il lavoro svolto nella presente tesi.

2 - La Cost-Optimality in Italia

Come indicato nel capitolo 1, il termine cost-optimality compare per la prima volta nella Direttiva 2010/31/UE [8], conosciuta come EPBD recast. La definizione del quadro metodologico per determinare i requisiti energetici degli edifici è stata tuttavia pubblicata il 16 gennaio 2012 nel Regolamento delegato (UE) n .244/2012 [21] e nelle annesse linee guida del 19 aprile 2012. Queste ultime costituiscono il punto di partenza per le successive elaborazioni effettuate dai singoli stati europei.

Per quanto riguarda l'Italia, sono state mantenute in linea generale le indicazioni contenute nel Regolamento Delegato ponendo tuttavia rimedio ad alcune criticità riscontrate:

- 1) La Commissione ha stabilito di comprendere nel calcolo dei costi tutti gli interventi associati, in maniera indiretta, ad un efficientamento energetico, ritenendoli imprescindibili durante un intervento di ristrutturazione (ponteggi, occupazione del suolo pubblico, riposizionamento degli impianti esterni, sostituzione dell'intonaco, ripristino di ante, persiane o davanzali e trasporto in discarica di materiali di scarto). Ad ogni modo è importante sottolineare come il costo derivante dalla somma di tali operazioni possa incrementare notevolmente l'importo totale dell'intervento di efficientamento energetico;
- 2) La Commissione ha scelto di detrarre il surplus di energia elettrica prodotta da fonti rinnovabili dal calcolo totale della prestazione energetica.

Questo crea tuttavia delle discordanze tra la prestazione energetica ed i relativi costi. Non è ad esempio corretto detrarre l'energia elettrica prodotta in surplus dal consumo di gas in quanto i due consumi non sono correlati. Eseguire tale operazione porterebbe ad avere una prestazione energetica molto elevata per via della sovrapproduzione di energia, mantenendo comunque invariati i costi in bolletta relativi al vettore energetico gas.

Per ovviare a tale incongruenza, si è deciso di determinare la qualità energetica tramite:

- Le norme CEN;
- Il calcolo mensile del fabbisogno energetico globale;
- Una compensazione su base mensile e per vettore energetico tra i fabbisogni e l'energia rinnovabile prodotta in loco fino al raggiungimento del consumo totale;
- La non considerazione dell'energia in eccesso proveniente da fonti rinnovabili in loco nel calcolo della prestazione energetica;
- L'espressione della prestazione energetica tramite il valore di energia primaria totale, che comprende tanto una quota rinnovabile quanto una non rinnovabile e di energia primaria da sole fonti non rinnovabili tramite l'applicazione dei coefficienti di trasformazione;
- I rendimenti relativi alle ristrutturazioni parziali.

Queste disposizioni trovano attuazione nella “*Applicazione della metodologia di calcolo dei livelli ottimali in funzione dei costi per i requisiti minimi di prestazione energetica (Direttiva 2010/31/UE Art. 5)*” [11] sviluppata dal Ministero dello Sviluppo Economico (MISE) in collaborazione con il Comitato Termotecnico Italiano (CTI), ENEA e RSE. Per quanto riguarda il suo aggiornamento attuale, le parti coinvolte sono il MISE, il CTI, il Politecnico di Torino, ENEA e per quanto riguarda l'analisi relativa ai vettori energetici l'Università Politecnica delle Marche. Nei paragrafi seguenti verranno enunciati e descritti i passaggi della metodologia per il calcolo dei livelli ottimali in funzione dei costi.

2.1 Definizione ed individuazione degli edifici di riferimento

Il primo passo per effettuare il calcolo del livello ottimale in funzione del costo è quello di identificare alcuni edifici di riferimento, come richiesto nella direttiva 2010/31/UE [8] e dal Regolamento delegato n. 244/2012 (UE) [21].

Il parco edilizio nazionale è suddiviso in diverse categorie in relazione alla destinazione d'uso:

- Abitazioni monofamiliari;
- Condomini formati da appartamenti o multifamiliari;
- Edifici ad uso uffici;
- Altri edifici non ad uso residenziale con requisiti minimi di rendimento specifici, come riportato nell'allegato 1.5 della direttiva 2010/31/UE.

Le categorie scelte per la procedura in Italia sono quelle relative ai grandi condomini, agli edifici monofamiliari, agli uffici e alle scuole. Per ognuna di esse si ha almeno un edificio di riferimento per le nuove costruzioni e due per le costruzioni esistenti. Questi canoni sono relativi alle scelte italiane.

Un edificio di riferimento può quindi essere reale o ipotetico. In entrambi i casi esso deve rappresentare le caratteristiche principali che distinguono ogni singola categoria. Queste riguardano:

- Periodo di costruzione;
- Condizioni climatiche;
- Geometria e dimensioni;
- Fattore di forma;
- Materiali;
- Proprietà termo-fisiche;
- Efficienza degli impianti;
- Orientamento ed ombreggiamenti (autoprodotti o portati).

Per estrapolare gli edifici di riferimento residenziali è possibile utilizzare la banca dati del progetto TABULA -Typology Approach for Building stock Energy Assessment- [27]. Questo progetto, iniziato nel giugno 2009 e terminato nel maggio 2012, ha portato alla creazione di una struttura armonizzata di tutte le tipologie edilizie europee residenziali.

Lo scopo è stato quello di stimare la prestazione energetica di ogni edificio e di determinare il potenziale risparmio energetico ottenibile dalla riqualificazione o sostituzione degli impianti termici e dell'involucro edilizio.

Per quanto riguarda gli edifici ad uso ufficio, i riferimenti sono stati tratti dalle tipologie fornite da ENEA -Ente per le Nuove tecnologie, l'Energia e l'Ambiente-.

Per i dati impiantistici e la loro classificazione, si rimanda alle indagini del CRESME - *Center for Research and Engagement in Science and Mathematics Education*-. Questa ricerca, commissionata da ENEA, è stata effettuata per individuare le principali tipologie impiantistiche sulla base dei dati relativi all'alimentazione, al sistema di immissione dell'aria, alla capacità di regolazione delle temperature e ai sistemi di distribuzione.

Un ulteriore fattore determinante per la classificazione di un edificio è la fascia climatica. Sulla base di quanto stabilito dal D.P.R. 412/93 [17] l'Italia si suddivide in sei fasce climatiche, dalla A alla F, in funzione dei gradi giorno. Questi sono definiti come la somma, di tutti i giorni facenti parte del periodo annuale di riscaldamento, delle sole differenze positive giornaliere tra la temperatura ambiente (20°C) e la temperatura media giornaliera esterna. L'unità di misura prestabilita è il grado-giorno (GG).

- Zona A: comuni aventi $GG \leq 600$;
- Zona B: comuni aventi $600 < GG \leq 900$;
- Zona C: comuni aventi $900 < GG \leq 1400$;
- Zona D: comuni aventi $1400 < GG \leq 2100$;
- Zona E: comuni aventi $2100 < GG \leq 3000$;
- Zona F: comuni aventi $GG > 3000$.

Nella tabella 1 sono riportate le sei fasce climatiche in cui è diviso il territorio italiano e, per ognuna di esse, è indicato il numero di persone residenti, i comuni che ricadono in ogni fascia (entrambi espressi con la relativa incidenza percentuale), i GG medi nei comuni e i GG pesati rispetto alla popolazione.

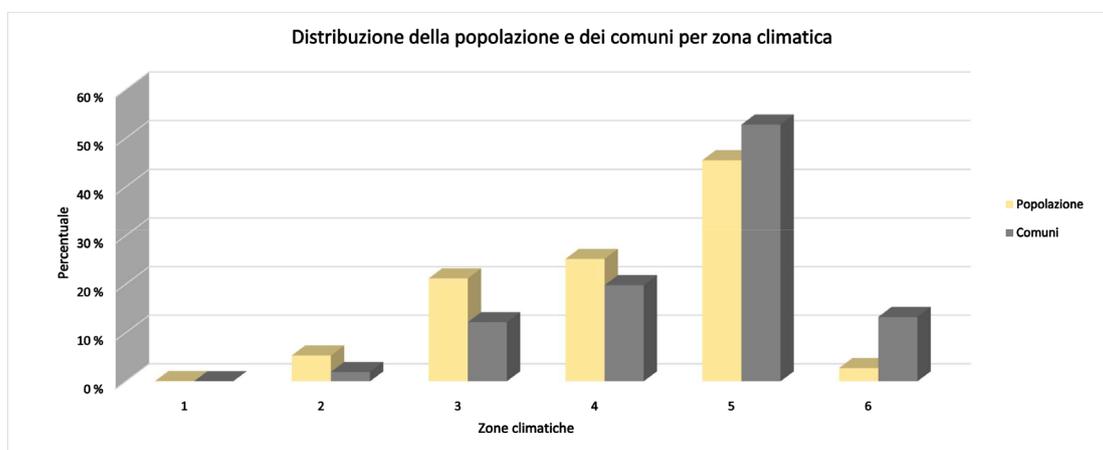
	Zone climatiche						Totale
	A	B	C	D	E	F	
POPOLAZIONE ⁽¹⁾	23.473	3.216.313	12.785.737	15.213.234	27.444.809	1.662.785	60.346.351
Percentuale	0,04%	5,33%	21,19%	25,21%	45,48%	2,76%	100%
N. COMUNI	2	157	985	1.602	4.273	1.074	8.093
Percentuale	0,02%	1,94%	12,17%	19,79%	52,80%	13,27%	100%
GG medi	576	781	1.147	1.658	2.467	3.454	
GG pesati ⁽²⁾	574	782	1.178	1.761	2.524	3.522	

[Tabella 1]: Divisione delle zone climatiche in relazione ai GG [11]

(1) Popolazione residente al 31/12/2009

(2) Media pesata rispetto alla popolazione

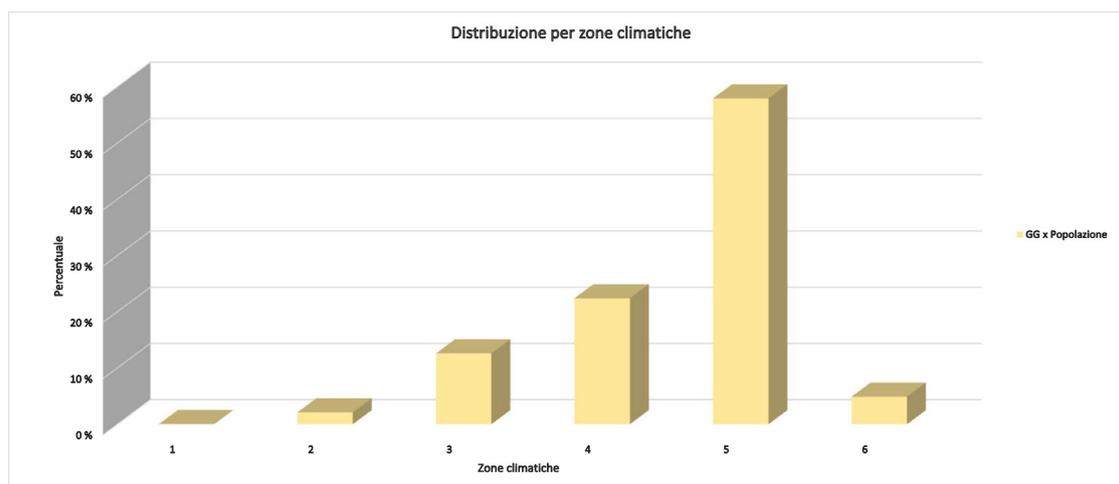
Mediante l'utilizzo di questi dati è stato successivamente estrapolato il grafico 1.



[Grafico 1]: Distribuzione della popolazione e dei comuni per zona climatica [11]

Risulta pertanto evidente che il 92% degli abitanti italiani risiede in località con GG compresi tra $900 < GG \leq 3000$ e, la restante parte (8%), risiede in località con $GG < 900$ e $GG > 3000$.

Per quanto riguarda i consumi per la climatizzazione invernale, si è andato a moltiplicare i GG per la popolazione di ogni fascia climatica, come indicato nel grafico 2. È possibile osservare come le fasce E e B rappresentino quelle con i valori dei consumi rispettivamente maggiori e minori rispetto alle altre, ad esclusione della fascia A che, essendo rappresentativa solo dello 0,04% della popolazione, non è stata tenuta in considerazione.



[Grafico 2]: Distribuzione dei GG per la popolazione delle differenti zone climatiche [11]

Nei calcoli del fabbisogno richiesti dalla procedura di cost-optimality, si è scelto di operare usando i dati climatici delle località di Palermo e Milano, rispettivamente in zona B ed E.

2.2 Misure di efficienza energetica

Una volta scelti gli edifici di riferimento sono state definite le misure di efficienza energetica da applicare a livello nazionale riportate in tabella 2. Esse devono riguardare tanto l'involucro, sia opaco che trasparente, quanto tutti i sistemi impiantistici e di fornitura energetica (teleriscaldamento/teleraffreddamento, pompe di calore, fonti rinnovabili..).

Una corretta progettazione necessita tuttavia di considerare l'insieme degli elementi che si vogliono inserire nell'edificio, e la conseguente interazione tra questi. Prendere in analisi, al contrario, i vari componenti singolarmente risulterebbe un errore in quanto non sarebbe possibile individuare delle incompatibilità, inficiando il risultato dell'intervento di efficientamento energetico.

L'ottenimento quindi dei risultati migliori, in relazione sia ai costi che alla prestazione energetica, è dato dalla creazione di diversi pacchetti di intervento formati dalla combinazione di più interventi singoli. Questi sono rappresentati dalle 17 macrocategorie,

illustrate nella seguente tabella. Esse sono suddivise ulteriormente in più voci costituenti le diverse modalità di applicazione dell'intervento preso in analisi [11].

n.	EEM	Parametro	Simbolo	N. MAX
1	Isolamento termico della parete esterna: sistema a cappotto	Trasmittanza termica (W/m^2K)	U_w	5
2	Isolamento termico della parete esterna: isolamento nell'intercapedine	Trasmittanza termica (W/m^2K)	$U_{w,c}$	1
3	Isolamento termico della copertura	Trasmittanza termica (W/m^2K)	U_r	5
4	Isolamento termico del pavimento	Trasmittanza termica (W/m^2K)	U_f	5
5	Isolamento termico degli elementi trasparenti	Trasmittanza termica (W/m^2K)	U_w	5
6	Sistemi di schermatura solare	Fattore di trasmissione solare	-	3
7	Macchina frigorifera ad alta efficienza	Indice di efficienza energetica in condizioni di progetto	EER	2
8	Generatore di energia termica ad alta efficienza per il riscaldamento	Rendimento di generazione	$\eta_{gn,H}$	5
9	Generatore di energia termica ad alta efficienza per l'acqua calda sanitaria	Rendimento del sistema al 100% del carico	$\eta_{gn,W}$	3
10	Generatore ad alta efficienza combinato per riscaldamento e acqua calda sanitaria	Rendimento di generazione	η_{gn}	2
11	Pompa di calore per riscaldamento, raffrescamento e acqua calda sanitaria	Coefficiente di prestazione	COP	-
		Indice di efficienza energetica in condizioni di progetto	EER	-
12	Impianto solare termico	m^2 di collettori solari	A_{coll}	5
13	Sistema fotovoltaico	Potenza di picco installata [kWp]	P_p	4
14	Sistema di recupero termico sulla ventilazione	Rendimento del recuperatore di calore	η_r	-
15	Sistema di regolazione avanzato	Rendimento di regolazione e controllo	η_{ctr}	4
16	Riqualificazione dell'impianto di illuminazione	Densità della potenza di illuminazione installata (W/m^2)	PN	-
17	Riqualificazione dell'impianto di illuminazione	Fattore di dipendenza dall'occupazione	F_O	-
		Fattore di dipendenza dal daylight	F_C	-
		Fattore di illuminamento costante	F_D	-

[Tabella 2]: Riepilogo degli interventi/misure considerate [11]

Di seguito vengono brevemente descritti i singoli punti:

- 1) Isolamento termico esterno a cappotto; il parametro preso in considerazione è la trasmittanza termica misurata in W/m^2K e avente come simbolo U_p ;
- 2) Isolamento termico per muri esterni all'interno di intercapedine mediante insufflaggio; il parametro preso in considerazione è la trasmittanza termica misurata in W/m^2K e avente come simbolo U_p ;
- 3) Isolamento termico della copertura; il parametro preso in considerazione è la trasmittanza termica misurata in W/m^2K e avente come simbolo U_r ;
- 4) Isolamento termico del primo solaio; il parametro preso in considerazione è la trasmittanza termica misurata in W/m^2K e avente come simbolo U_f ;
- 5) Isolamento termico delle chiusure trasparenti; il parametro preso in considera-

zione è la trasmittanza termica misurata in W/m^2K e avente come simbolo U_w ;

6) Sistema di schermatura solare; i parametri presi in considerazione sono la trasmittanza di energia totale solare (quanta potenza termica solare riesce a passare attraverso l'insieme di vetro più schermatura) avente come simbolo g_{gl} e il fattore di trasmissione solare (quantità di radiazione luminosa che attraversa la schermatura) avente come simbolo τ_{sh} ;

7) Chiller ad alta efficienza (macchina termica che attraverso la compressione ed espansione di un gas, spesso il Freon, scambia calore con acqua o aria per raffreddare un ambiente interno); il parametro preso in considerazione è l'efficienza in condizioni di progetto avente come simbolo EER;

8) Generatore di energia termica ad alta efficienza per il riscaldamento; il parametro preso in considerazione è il rendimento per la generazione avente come simbolo η_{gn} ;

9) Sistemi ad alta efficienza per la produzione di acqua calda sanitaria; il parametro preso in considerazione è il rendimento a pieno carico del sistema avente come simbolo $\eta_{gn,Pn,W}$;

10) Generatore ad alta efficienza combinato per riscaldamento ed acqua calda sanitaria; il parametro preso in considerazione è il rendimento di generazione avente come simbolo η_{gn} ;

11) Pompe di calore per il riscaldamento, il raffrescamento e l'acqua calda sanitaria; i parametri presi in considerazione sono il coefficiente di prestazione COP (quantità di calore impiegata in un sistema rispetto al lavoro svolto) e l'indice di efficienza energetica in condizioni di progetto EER;

12) Sistemi solari termici; il parametro preso in considerazione è la quantità di collettori solari installati espressa in m^2 ;

13) Pannelli fotovoltaici; il parametro preso in considerazione è la potenza di picco installata espressa in kWp.

14) Sistema di recupero termico sulla ventilazione; il parametro preso in considerazione è il rendimento avente come simbolo η_r ;

15) Sistema di regolazione avanzato; il parametro preso in considerazione è il rendimento avente come simbolo η_{ctr} ;

16) Riqualificazione dell'impianto di illuminazione; il parametro preso in considerazione è la quantità di luce emessa per unità di superficie espressa in W/m^2 avente come simbolo PN;

17) Sistemi per il controllo luminoso; i parametri presi in considerazione sono il fattore di dipendenza dall'occupazione F_o , il fattore di dipendenza dall'illuminazione giornaliera F_D e il fattore di illuminazione costante F_C ;

Ogni elemento può assumere un livello compreso tra uno e cinque, dove con uno viene rappresentato lo stato di fatto (solo per gli edifici esistenti) o l'inserimento di una misura base nel caso di una sua assenza totale, mentre con valori da due a cinque si indicano delle caratteristiche progressivamente più performanti. Inoltre, ad ogni valore, sono associati dei costi comprensivi di installazione, manutenzione e sostituzione, in modo tale da permettere il confronto tra prestazioni energetiche differenti in relazione all'esborso economico.

I singoli elementi che compongono un pacchetto di intervento possono utilizzare diversi vettori energetici come ad esempio gas naturale o energia elettrica. Per rendere confrontabili tra loro i diversi valori di energia utilizzata nel calcolo del fabbisogno, è necessario convertirla, tramite fattori di conversione specifici, in energia primaria.

Vettore energetico	$f_{P,ren}$	$f_{P,ren}$	$f_{P,tot}$
Gas naturale	1,05	0	1,05
GPL	1,05	0	1,05
Gasolio e Olio combustibile	1,07	0	1,07
Carbone	1,10	0	1,10
Biomasse solide	0,20	0,80	1,00
Biomasse liquide e gassose	0,40	0,60	1,00
Energia elettrica da rete	1,95	0,47	2,42
Teleriscaldamento	1,5	0	1,5
Rifiuti solidi urbani	0,2	0,2	0,4
Teleraffrescamento	0,5	0	0,5
Energia termica da collettori solari	0	1,00	1,00
Energia elettrica prodotta da fotovoltaico, mini-eolico e mini-idraulico	0	1,00	1,00
Energia termica dall'ambiente esterno – free cooling	0	1,00	1,00
Energia termica dall'ambiente esterno – pompa di calore	0	1,00	1,00

[Tabella 3]: Fattori di conversione in energia primaria di differenti vettori energetici [24]

L'iter per eseguire il calcolo della prestazione energetica è il seguente [11]:

- Calcolare il fabbisogno netto di energia termica richiesto dalle utenze. Ciò si effettua calcolando i guadagni e le perdite dovute all'involucro, alla ventilazione, alle apparecchiature, all'illuminazione, agli occupanti e al riscaldamento solare;
- Detrarre l'energia termica prodotta da fonti rinnovabili presenti in loco;
- Calcolare il consumo di energia dividendolo sia per uso che per vettore energetico tenendo conto della sua produzione, distribuzione, emissione e sistemi di controllo;
- Detrazione dell'energia elettrica consumata in loco prodotta da fonti rinnovabili;
- Sommare i consumi energetici non provenienti da fonti rinnovabili per ottenere l'energia fornita per ciascun vettore;
- Calcolare l'energia primaria fornita mediante i fattori di conversione;
- Calcolo dell'energia primaria relativa all'energia autoprodotta e immessa nel mercato;
- Calcolare l'energia primaria totale sottraendo i due punti precedenti.

Il calcolo dei costi associati si basa sulla metodologia del valore attuale netto (VAN).

2.3 Metodologia per il calcolo del costo globale

Nel precedente paragrafo sono stati esposti i criteri e le componenti che riguardano principalmente la prestazione energetica. In questo, invece, si determina il costo globale dell'edificio come valore attuale netto, espresso in €/ m², per valutare l'efficacia economica di queste misure, andando ad individuare quelle che prevedono l'esborso inferiore.

Il valore attuale netto è definito come: *“La sommatoria attualizzata di tutti i flussi di cassa positivi e negativi in un dato periodo di tempo”*[28]. È utilizzato principalmente per valutazioni finanziarie di medio/lungo termine, attualizzate ad un periodo di riferimento, tramite l'utilizzo di un tasso di attualizzazione. Paragonando i VAN di due pacchetti differenti si riesce a valutare quello più conveniente.

Seguendo le formule si ha:

$$C_g(\tau, r) = I_0 + \sum_{i=1}^{\tau} \frac{FC(i)}{(1+r)^i} = I_0 + \sum_{i=1}^{\tau} FC(i) \cdot R_d(i)$$

$$R_d(i) = (1+r)^{-i}$$

$$r = \frac{(1+r')}{(1+f)} - 1$$

Dove:

C_g : costo globale

τ : rappresenta il tempo in cui agiscono i flussi di cassa

r : tasso di attualizzazione

I_0 : rappresenta l'investimento per l'efficientamento energetico iniziale

$FC(i)$: flusso di cassa nel periodo i -esimo

$R_d(i)$: fattore di attualizzazione

f : inflazione

r' : tasso nominale

Il costo globale C_g è dato dalla somma tra l'investimento iniziale per l'efficientamento energetico, I_0 e la sommatoria attualizzata di tutti i flussi di cassa del periodo i -esimo, $FC(i) \cdot R_d(i)$. Il termine τ rappresenta il periodo all'interno del quale si considerano i flussi di cassa, mentre r è il tasso di attualizzazione calcolato come $(1 + \text{tasso nominale } r') / (1 + \text{inflazione}) - 1$.

Per i calcoli economici si fa riferimento alla norma UNI EN 15459:2018 “*Prestazione energetica degli edifici – Procedura di valutazione economica dei sistemi energetici degli edifici*”[29]. Tale norma permette l'utilizzo di due metodologie di calcolo differenti: il costo globale (global cost) e la rendita finanziaria (annuity cost).

La sostanziale differenza sta nel fatto che il primo costo prevede un calcolo esteso a tutto il periodo di valutazione mentre il secondo usa un fattore di annualità che trasforma tutti i costi del periodo in costi annui.

Con la relazione del Ministero sull' “*Applicazione della metodologia di calcolo dei livelli ottimali in funzione dei costi per i requisiti minimi di prestazione energetica*”, è stato de-

ciso di utilizzare il metodo del costo globale.

Il periodo di calcolo è differente in base alla destinazione d'uso dell'edificio: per fabbricati ad uso residenziale corrisponde a 30 anni mentre per le costruzioni adibite ad ufficio è pari a 20 anni. In Italia si pone come anno di partenza quello di inizio lavori, considerando l'incidenza dei costi annui a partire dall'anno successivo.

Dopo aver posto come periodo di calcolo l'arco temporale corrispondente alla destinazione d'uso del caso studio, è necessario individuare, per tutti gli elementi che compongono l'edificio, la loro vita utile. Questa è definita come quel periodo nel quale il sistema installato mantiene livelli di prestazione elevati fino al momento in cui si manifestino degradi tali da comprometterne le funzionalità. Nella tabella 4 vengono riassunti i principali componenti (edilizi ed impiantistici) con indicato il valore della rispettiva vita utile.

Misure per l'efficienza energetica	Vita utile della misura [anni]
Isolamento termico delle chiusure verticali opache	50
Isolamento termico delle chiusure orizzontali opache	50
Isolamento termico delle chiusure trasparenti	50
Schermature solari fisse	50
Pompe di calore invertibili aria-aria/aria-acqua	20
Caldaie a condensazione	15
Chiller	20
Impianti fotovoltaici	25
Unità di condizionamento aria	15
Boiler	20
Fan coil	15
Radiatori	30 - 40
Collettori solari	15 - 25

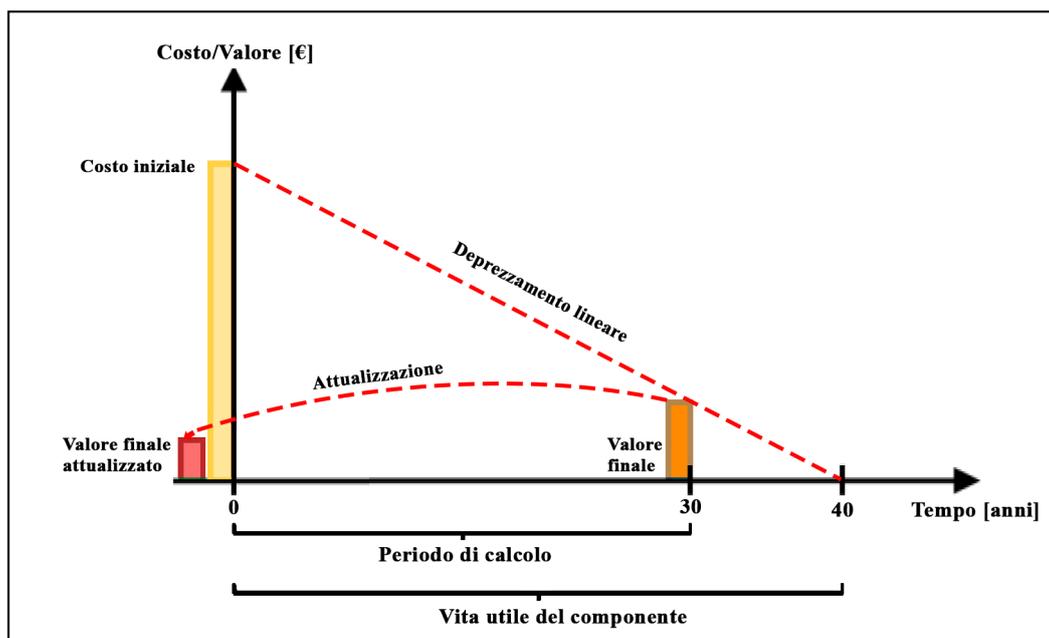
[Tabella 4]: Vita utile di alcuni componenti e sistemi [29]

Analizzando il periodo di calcolo preso in esame e la vita utile dei diversi componenti si hanno tre casi distinti:

Gli elementi dell'edificio hanno una durata superiore a 30 anni.

Ciò implica che il componente preso in considerazione, una volta trascorsi i 30 anni, avrebbe ancora un periodo di utilizzo come visibile nel grafico 3.

In questo caso, quindi, si deve calcolare il valore residuo dell'oggetto mediante un deprezzamento lineare nel tempo, che entrerà a far parte dei flussi di cassa positivi.



[Grafico 3]: Valutazione del valore finale di una misura [11]

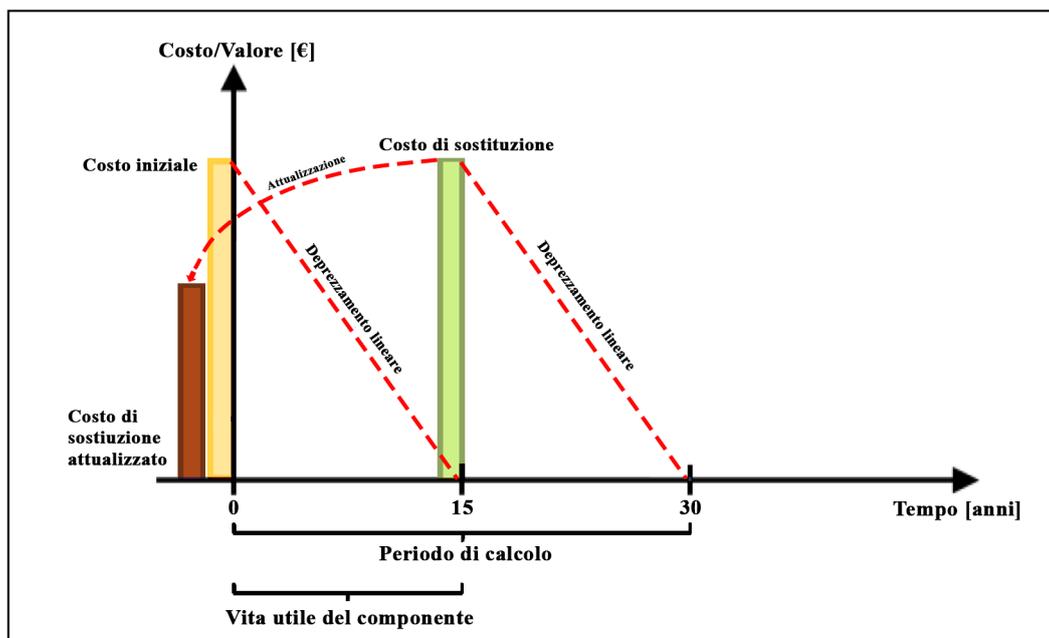
Come si vede dal grafico, il costo iniziale (giallo) subisce un deprezzamento lineare fino ad annullarsi nell'anno in cui si esaurisce la sua vita utile, ovvero 40 anni.

A 30 anni, tuttavia, finisce il periodo di calcolo per gli edifici residenziali (stabilito dalle metodologie per il costo globale) e quindi si ha un valore finale (arancione) del componente.

Esso viene poi attualizzato mediante un coefficiente di attualizzazione al periodo 0, ovvero quello di inizio del calcolo. Il valore finale attualizzato ottenuto (rosso) sarà un flusso di cassa positivo.

Gli elementi dell'edificio hanno una durata che è esattamente la metà del periodo di calcolo.

In questo caso si deve tenere in conto del costo di sostituzione del componente che va attualizzato al periodo zero.

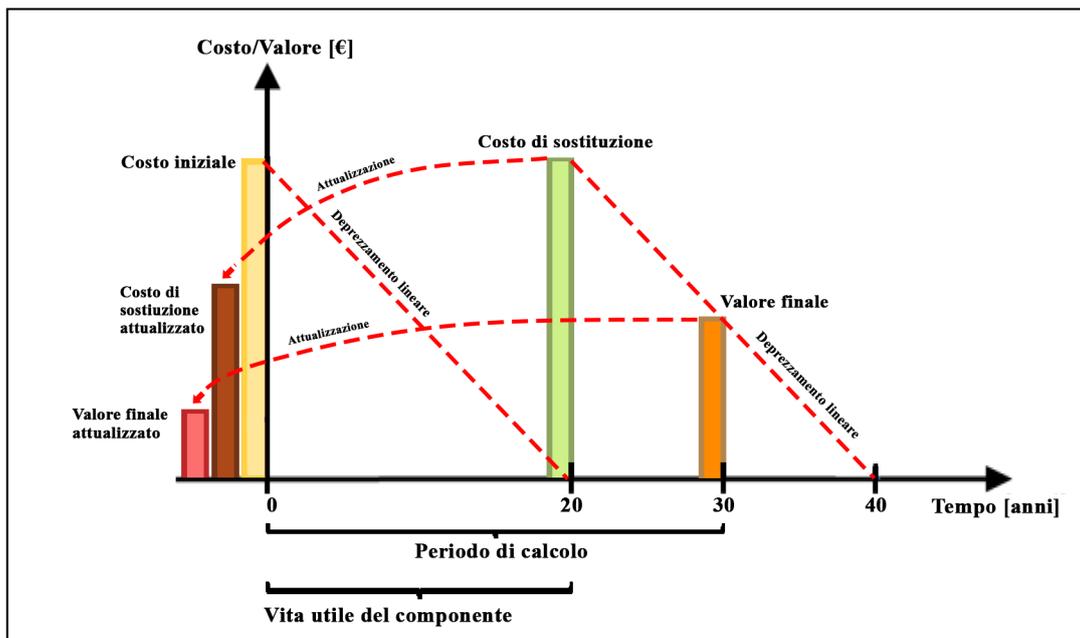


[Grafico 4]: Valutazione del costo di sostituzione di una misura [11]

Come rappresentato nel grafico 4, la vita del componente è esattamente la metà del tempo di calcolo considerato. Il costo iniziale (giallo) subisce un deprezzamento lineare fino a 15 anni. Successivamente si sostituisce il primo componente con uno identico avente la sua stessa vita utile. Il costo di sostituzione (verde) va tuttavia attualizzato e riportato all'anno di partenza utilizzando un fattore di attualizzazione (marrone). Nella realtà, il costo di sostituzione non attualizzato dovrebbe essere inferiore rispetto a quello iniziale a causa del progresso delle tecnologie e quindi della perdita di valore di elementi vetusti. In Italia, seguendo il metodo della cost optimal methodology, non si tiene in conto di tale deprezzamento

Gli elementi dell'edificio hanno una durata minore del periodo di calcolo ma la vita utile dell'elemento sostituito eccede i 30 anni.

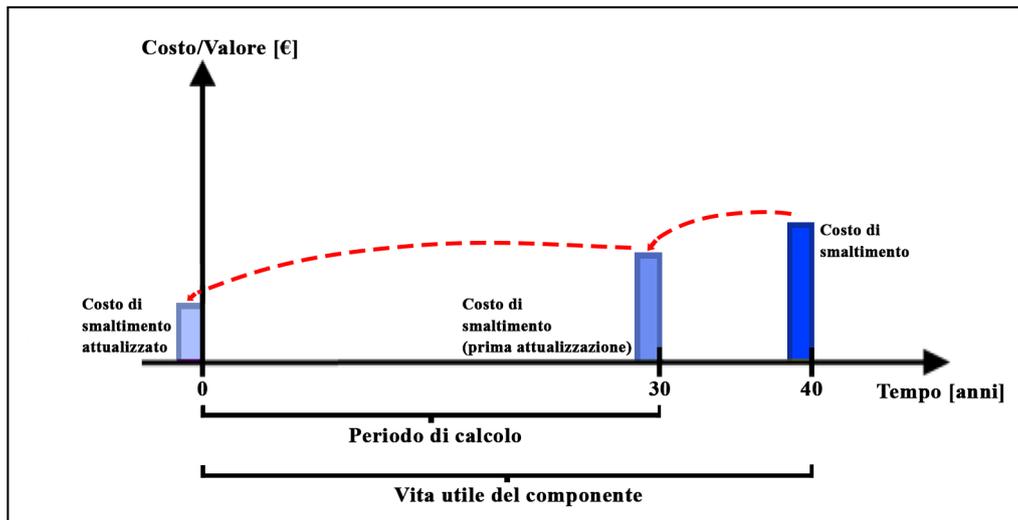
In questo caso si calcola e si attualizza sia il valore rimanente dell'elemento sostituito che il costo di sostituzione.



[Grafico 5]: Valutazione del valore finale nel caso di sostituzione di una misura [11]

Dal grafico 5 si nota come il costo iniziale del componente (giallo) esaurisca la sua vita utile dopo 20 anni dove però insiste il costo di sostituzione (verde). Quest'ultimo subisce un deprezzamento lineare fino al termine della sua vita utile, ovvero 40 anni. Tuttavia, una volta raggiunti 30 anni, questo costo ha ancora un valore residuo (arancione) che va attualizzato al periodo 0 mediante un fattore di attualizzazione. Il costo iniziale e il costo di sostituzione attualizzato saranno dei flussi di cassa negativi mentre il valore finale attualizzato sarà un flusso positivo.

Seguono il metodo dell'attualizzazione anche i costi di smaltimento e altri costi che partecipano al calcolo dei flussi di cassa come visibile nel grafico 6.



[Grafico 6]: Attualizzazione dei costi di smaltimento [11]

La procedura impone che vengano effettuate due diverse valutazioni per il costo globale, sia a livello finanziario che a livello macroeconomico.

Il primo caso riguarda principalmente un investitore privato, in quanto vengono considerati tutti i costi comprensivi di IVA, accise ed eventuali altre tasse, usando come tasso di attualizzazione il tasso di mercato.

Il secondo caso, invece, tiene in considerazione il punto di vista statale non comprendendo pertanto tasse, IVA e accise. Il tasso di attualizzazione è inferiore sebbene tenga in considerazione i costi relativi allo smaltimento delle emissioni di CO₂ in ambiente durante il periodo di utilizzo dell'edificio.

Oltre all'anidride carbonica uno Stato membro può fare riferimento anche ad altri inquinanti, come l'ossido di azoto (NO) miscelato al biossido di azoto (NO₂), gli idrocarburi non metanici (NMHC) e i particolati (PM).

Di seguito viene riportata la tabella 5 contenente il costo per ogni inquinante.

Inquinante	Anidride carbonica [CO ₂]	Ossidi di azoto [NO _x]	Idrocarburi non metanici [NMHC]	Particolato [PM]
Costo [€/Kg]	0,03 - 0,04	4,4	1	87

[Tabella 5]: Costo degli inquinanti [22]

-
- Alla sostituzione degli elementi al termine della loro vita utile;
 - Al valore residuo dell'elemento una volta esaurito il periodo di calcolo;
 - Allo smaltimento;
 - Ai costi per l'approvvigionamento di energia;
 - Alle emissioni di anidride carbonica (soltanto nella prospettiva macroeconomica).

Per calcolare questi costi si hanno due approcci distinti: il full cost, che valuta la spesa sostenuta per l'intero edificio e l'additional cost, che valuta la sola differenza tra i flussi di cassa reali con quelli di un archetipo [29].

In generale, viene imposto l'utilizzo del metodo del full cost per nuove costruzioni o ristrutturazioni totali in quanto è necessario calcolare il costo della costruzione oltre a quello relativo al suo utilizzo. L'additional cost non è adatto in questo caso per diverse ragioni: non tiene in conto della piena compenetrazione tra alcuni pacchetti/varianti sottoposti a valutazione, come ad esempio la posizione delle finestre in relazione all'orientamento, richiede una ripartizione molto specifica e difficilmente fattibile tra i costi della ristrutturazione standard e i costi delle misure di efficienza energetica associate ed inoltre si valorizza solamente la differenza tra i flussi di cassa effettivi e quelli relativi ad un edificio di riferimento.

Nel caso delle ristrutturazioni energetiche si ipotizza che la sostituzione di elementi per l'efficientamento energetico avvengano all'interno di una finestra di opportunità, ovvero che coincidano con le opere di manutenzione straordinaria per fare in modo di trascurare tutti i costi connessi, come le impalcature, finiture ecc...

2.4.1 Costo di investimento

I costi effettivi si dividono in tre macrofamiglie:

- Quelli relativi all'investimento iniziale, ai diversi oneri professionali e quelli dovuti alle imposte e agli imprevisti;
- Quelli relativi all'involucro, all'impianto e alle schermature;

- Quelli relativi all'approvvigionamento di energia rinnovabile e non rinnovabile;

Nella realtà italiana ognuna di queste famiglie è composta da diversi elementi.

La prima è data dalle attività generali, che comprendono oneri e prestazioni professionali, e dalle attività collegate all'intervento di costruzione, come spostamento di pluviali, di macchinari, davanzali, sistemi oscuranti o altri elementi esterni oltre che allo smaltimento di elementi sostituiti.

Della seconda fanno parte tutte le chiusure opache verticali e orizzontali che danno sull'esterno o su locali non riscaldati, gli elementi trasparenti formati da vetro e telaio, le schermature e gli impianti di riscaldamento, di produzione dell'ACS, per la ventilazione e il raffreddamento, l'illuminazione, gli allacciamenti alle reti di distribuzione elettrica (il costo globale dell'impianto comprende quello del generatore, del sistema di regolazione, dei terminali e degli ausiliari).

Nella terza ricadono tutti i costi per l'acquisto di energia elettrica, gas naturale, altre fonti di energia non rinnovabile e quelli relativi alle fonti di energia rinnovabile.

Per quanto riguarda le prime due, i costi sono stati determinati attraverso l'utilizzo del prezzario DEI dei Prezzi Informativi dell'Edilizia per le Nuove Costruzioni [30], che contiene diverse sezioni suddivise in sola fornitura o per opere complete (fornitura più posa). E' inoltre possibile utilizzare il Prezzario Tipologico [31] in relazione alla regione d'appartenenza dell'edificio, dove si hanno i costi sia dei singoli componenti che della mano d'opera. Un ulteriore metodo risulta quello di reperire una quotazione personalizzata direttamente dalle aziende produttrici.

2.4.2 Costi energetici

Per la metodologia del costo ottimale non viene considerata tutta l'energia elettrica, consumata o prodotta, bensì solo quella relativa ai servizi di riscaldamento/raffrescamento, produzione di ACS, ventilazione e solamente per gli uffici l'illuminazione.

Con il Decreto Bersani (D.L. 16 marzo 1999, n.79) si è liberalizzato il mercato elettrico, permettendo di conseguenza al cittadino di poter scegliere da quale venditore acquistare l'energia elettrica. Data la diversità dei costi relativi ai venditori privati, si fa riferimento al servizio di maggior tutela (AEEG- autorità per l'energia elettrica e il gas).

Per tale motivo i costi dell'energia sono legati alle tariffe offerte dall'AEEG.

La bolletta che riceve il cliente finale è composta da:

- Servizi di vendita: rappresentano la voce di costo maggiore e comprende le attività e i servizi svolti dal fornitore per comprare e rivendere l'energia elettrica all'utilizzatore finale. Sono comprese anche le perdite sulle reti di distribuzione e il costo di dispacciamento, ovvero quel servizio che mantiene l'equilibrio tra domanda e offerta in ogni momento.

- Servizi di rete: riguardano tutte le attività per la distribuzione su rete nazionale, locale e la gestione del contatore.

- Oneri generali: sono oneri fissati per legge che ogni cittadino è tenuto a pagare.

Le differenze tra servizi di rete e di vendita sono il cardine sul quale si fonda il libero mercato. Infatti i diversi operatori possono far variare unicamente il servizio di vendita in quanto quello di rete è stabilito dall'AEEG.

Queste voci vengono successivamente riunite in tre categorie in relazione alla fatturazione degli importi:

-
- Quota fissa: comprende gli importi non dipendenti dai consumi, come i costi per la gestione del cliente, la parte fissa del dispacciamento e dei servizi di rete;
 - Quota potenza: dipende dalla potenza massima scelta dal cliente in funzione della quantità di apparecchi che presume di collegare contemporaneamente (solitamente la potenza prevista nel contratto è pari a 3kW);
 - Quota energia: rappresenta l'energia effettiva consumata. Comprende l'acquisto dell'energia, la parte variabile del dispacciamento, una quota per il trasporto sulla rete nazionale dell'energia utilizzata e una percentuale degli oneri generali.

Fino al 2017 esistevano diverse tariffe elettriche tra cui la D2, la D3 e la BTA.

La prima fa riferimento a tariffe relative ad abitazioni coincidenti alla residenza anagrafica con potenza fino a 3kW, la seconda ad abitazioni coincidenti con la residenza anagrafica e potenze superiori a 3kW oppure ad abitazioni non coincidenti con la residenza anagrafica. La BTA, invece, riguarda le tariffe per abitazioni non domestiche di tutte le potenze. Dopo la data suddetta le fasce D2 e D3 sono state accorpate nella tariffa di distribuzione TD.

Di seguito vengono riportate le tabelle 6 e 7 relative ai costi dell'energia nelle fasce D2 e D3 del primo trimestre del 2013 e successivamente quelle della fascia TD del terzo trimestre del 2018 (tabelle 8 e 9) in modo tale da permettere un paragone tra la situazione antecedente e successiva alle modifiche subentrate.

	Servizi di vendita			Servizi di rete	Oneri generali
	Monorario	Biorario			
Quota energia (€/kWh)	fascia unica	fascia F1	fascia F2-3	fascia unica	fascia unica
kWh/anno: da 0 a 1800	0,09660	0,10307	0,09334	0,00478	0,030550
da 1801 a 2640	0,10061	0,10708	0,09735	0,04129	0,044580
da 2641 a 4440	0,10494	0,11141	0,10168	0,08061	0,063460
da 4441	0,10957	0,11604	0,10631	0,12274	0,063460
Quota fissa (€/anno)	15,48500			6,12000	
Quota potenza (€/kW/anno)				5,50320	0,16970

[Tabella 6]: Tariffa D2, abitazione corrispondente alla residenza anagrafica e potenza fino a 3 kW [32]

	Servizi di vendita			Servizi di rete	Oneri generali
	Monorario	Biorario			
Quota energia (€/kWh)	fascia unica	fascia F1	fascia F2-3	fascia unica	fascia unica
kWh/anno: da 0 a 1800	0,09607	0,10254	0,09281	0,02437	0,063460
da 1801 a 2640				0,04129	
da 2641 a 4440				0,08061	
da 4441				0,12274	
Quota fissa (€/anno)	21,70570			21,78730	
Quota potenza (€/kW/anno)				15,17300	0,16970

[Tabella 7]: Tariffa D3, abitazione non corrispondente alla residenza anagrafica o con potenza superiore a 3 kW [32]

1 luglio - 30 settembre 2018	Servizi di vendita			Servizi di rete	Oneri generali
	Monorario	Biorario			
Quota energia (euro/kWh)	<i>fascia unica</i>	<i>fascia F1</i>	<i>fascia F2-3</i>	0,00786	0,020626 0,055465
kWh/anno: da 0 a 1800	0,09059	0,09945	0,08610		
oltre 1800	0,09475	0,10361	0,09026		
Quota fissa (euro/anno)	34,7998			19,3200	-
Quota potenza (euro/kW/anno)				21,2934	-

[Tabella 8]: Tariffa TD, abitazioni coincidenti con la residenza anagrafica [32]

1 luglio - 30 settembre 2018	Servizi di vendita			Servizi di rete	Oneri generali
	Monorario	Biorario			
Quota energia (euro/kWh)	<i>fascia unica</i>	<i>fascia F1</i>	<i>fascia F2-3</i>	0,00786	0,020626 0,055465
kWh/anno: da 0 a 1800	0,08812	0,09698	0,08363		
oltre 1800					
Quota fissa (euro/anno)	43,1014			19,3200	126,9384
Quota potenza (euro/kW/anno)				21,2934	-

[Tabella 9]: Tariffa TD, abitazioni non coincidenti con la residenza anagrafica [32]

Come si può notare la differenza principale è che la tariffa TD dipende unicamente dal fatto che l'abitazione coincida o meno con la residenza anagrafica.

Questo è utile per ridurre la progressione dei costi in base alla potenza in quanto, prima dell'introduzione di questa tariffa, all'aumentare della potenza richiesta si incrementava-

no anche i costi. L'idea alla base di questa progressione era quella di limitare gli sprechi aumentando il costo dell'energia per coloro che ne facevano un utilizzo maggiore. Tuttavia, ad oggi, questa soluzione non trova più fondamento in quanto ad alti consumi di energia può corrispondere una maggiore efficienza e sostenibilità. Un ulteriore motivo per il quale si è abolito tale metodo risulta essere il fatto che il consumo energetico non era proporzionale al numero di componenti della famiglia.

Risulta invece invariata la divisione in fasce mono-orarie e bi-orarie.

Nella prima l'energia ha un costo costante per tutto il giorno, nella seconda invece si divide in fascia 1 (lunedì – venerdì dalle 08.00 alle 19.00 escluse festività nazionali), fascia 2 (lunedì – venerdì dalle 07.00 alle 08.00 e dalle 19.00 alle 23.00 , sabato dalle 07.00 alle 23.00, escluse le festività nazionali) e fascia 3 (lunedì – sabato dalle 23.00 alle 07.00, tutta la domenica e tutti i giorni festivi). Le fasce sono così suddivise in quanto l'energia elettrica ha dei costi differenti a seconda dell'orario. Nel periodo in cui la domanda è maggiore il costo aumenta, mentre di notte e nei festivi il prezzo diminuisce.

Per facilitare il procedimento nella Cost Optimal Methodology si usa la fascia mono-oraria.

Il costo in bolletta si compone però di altre due voci che sono due imposte:

- L'imposta indiretta sul consumo o accisa;
- L'imposta sul valore aggiunto o IVA.

La prima viene applicata sulla quantità di energia consumata (kWh) e assume dei valori differenti in base ai kWh consumati e alla potenza richiesta come rappresentato nella tabella 10.

USI DOMESTICI		
Tipo di fornitura	Consumi/Potenze	Accisa [€/kWh]
Abitazione di residenza "prima casa"	≤ 150 kWh/mese	0
Abitazione di residenza "prima casa"	> 150 kWh/mese	0,0227
Abitazione di residenza "prima casa"	> 3 kW	0,0227
Abitazione non di residenza "seconda casa"	tutti	0,0227

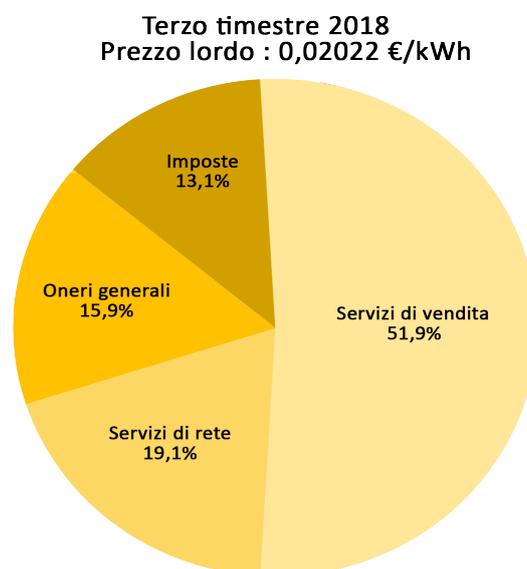
[Tabella 10]: Accise per usi domestici [32]

Per gli usi domestici, le forniture aventi potenza fino a 1,5 kW e consumi fino a 150 kWh/mese non hanno imposte, con potenze comprese tra 1,5 kW e 3 kW o consumi compresi tra 150 kWh/mese e 220 kWh/mese si paga una accisa di 0,0227 €/kWh non applicata però ai primi 150 kWh utilizzati. Superate queste soglie i kWh esenti dall'accisa vanno via via a ridursi.

L'IVA invece è applicata sul costo totale del servizio quindi a ogni voce in euro presente in bolletta compresa l'accisa. Questa imposta è pari:

- Al 10% del costo per gli usi domestici;
- Al 22% del costo per altri usi.

Di seguito viene riportato un grafico esplicativo sul prezzo dell'energia elettrica sostenuto da un consumatore domestico tipo con i pesi relativi ad ogni misura. I dati sono relativi al terzo trimestre del 2018 e provengono dal sito dell'Autorità di Regolazione per Energia Reti e Ambiente (ARERA).



[Grafico 7]: Suddivisione dei costi energetici del terzo trimestre 2018 [32]

L'energia elettrica può anche essere autoprodotta in situ mediante l'utilizzo di pannelli fotovoltaici solari, impianti mini-eolici o cogenerativi. L'energia così ottenuta può essere sia utilizzata direttamente dal produttore che venduta immettendola nella rete elettrica nazionale a particolari condizioni. È di fondamentale importanza riuscire a determinare la quantità di energia destinata all'autoconsumo e quella destinata all'esportazione per poter

quantificare i guadagni o i costi.

Nel primo caso l'energia prodotta e autoconsumata porta un beneficio immediato all'utente in quanto l'energia prelevata dalla rete è inferiore. Quella immessa invece viene "comprata" dal gestore della rete, mediante uno sconto in bolletta, ad un prezzo inferiore rispetto a quello di acquisto da parte dell'utente. Per questi motivi, oltre che per ragioni ambientali, l'autoproduzione è incentivata da parte degli stati membri attraverso degli sgravi fiscali.

Per la cost-optimal methodology tuttavia non si considera nessun incentivo e si tiene in considerazione solo la quota parte di energia autoprodotta necessaria a soddisfare il fabbisogno di energia elettrica per i servizi. La parte in eccesso viene trascurata [32].

Per quanto riguarda il gas naturale, invece, risulta essere il vettore più utilizzato in Italia sia per gli impianti di riscaldamento domestico e acqua calda sanitaria autonomi sia per gli impianti centralizzati.

In maniera analoga al mercato dell'energia elettrica, anche per la distribuzione del gas naturale dal 1° gennaio 2003 è possibile scegliere il fornitore e le condizioni di contratto grazie alla liberalizzazione del mercato. Per la cost-optimal methodology si fa comunque riferimento al servizio di maggior tutela fornito dall'AEEG.

Anche per l'erogazione di gas si ha una suddivisione dei costi in più fasce. Esse dipendono dalla disposizione geografica e non dalle variabili connesse all'utilizzo come accade per la distribuzione dell'energia elettrica. Vengono suddivise in:

- Ambito nord Occidentale: comuni della Valle d'Aosta, Piemonte e Liguria
- Ambito nord Orientale: comuni della Lombardia, Trentino Alto-Adige, Friuli Venezia Giulia, Emilia-Romagna e Veneto
- Ambito centrale: comuni delle Marche, Toscana e Umbria
- Ambito centro-sud Orientale: comuni del Molise, Puglia, Basilicata e Abruzzo
- Ambito centro-sud occidentale: comuni del Lazio e della Campania

-
- Ambito meridionale: comuni della Calabria e della Sicilia.

Come per l'energia elettrica anche le tariffe del gas naturale sono suddivise in:

- Servizio di vendita. Comprende il costo del gas consumato, il suo acquisto e la sua commercializzazione;
- Servizio di rete. Comprendono il trasporto, lo stoccaggio, la distribuzione e la gestione del contatore;
- Oneri generali. Ne fanno parte tutti i costi relativi al miglioramento generale del sistema gas. Può anche assumere valori negativi (credito annuo per l'utente in caso di interessi di mora, restituzione della cauzione, contributi per l'allacciamento ecc..).

Essi sono ancora suddivisi in quota energia e quota fissa.

La prima dipende dai consumi dell'utente e si misura in euro su metro cubo standard [€/Sm³]. Il volume di un gas varia in base alla temperatura e alla pressione, quindi si è stabilito di adottare come convenzione una temperatura di 15°C con una pressione di 1.013,25 millibar. Essendo però il gas misurato dai singoli contatori, in relazione alle condizioni atmosferiche della località in cui sorge la costruzione, bisogna moltiplicare i m³ di gas utilizzati per un fattore C che dipende appunto dal luogo per ottenere così un valore in Sm³. Occorre poi convertire i metri cubi standard in chilowattora [kWh], ciò viene fatto a partire dal potere calorifico del metano che viene preso pari a 8250 kcal/ Sm³.

La seconda quota invece è un costo fisso non dipendente dal consumo e viene misurato in euro all'anno [€/anno].

Di seguito viene riportata, a titolo esemplificativo, la tabella 11 contenente i costi del gas per l'ambito Nord Occidentale, al tipo di servizio, agli oneri e alle quote sia di energia che fisse.

UtENZE DOMESTICHE Ambito nord occidentale 1 luglio - 30 settembre 2018	Servizi di vendita	Servizi di rete	Oneri generali
Quota energia (euro/Sm³) consumo Sm ³ /anno: da 0 a 120 da 121 a 480 da 481 a 1.560 da 1.561 a 5.000 da 5.001 a 80.000 da 80.001 a 200.000	0,291893	0,046237 0,129431 0,122383 0,122703 0,103373 0,075179	0,017466 0,055066 0,039166 0,034766 0,029466 0,021666
Quota fissa (euro/anno) portata contatore: classe fino a G6 * classe da G10 a G40 classe oltre G40	60,01	60,25 449,72 1.057,28	-27,01

G* rappresentano le portate dei contatori del gas in m³/h

[Tabella 11]: Tariffazione del gas naturale per l'ambito Nord Occidentale per uso residenziale [32]

Come per l'energia elettrica anche per il gas naturale il consumatore deve pagare delle imposte:

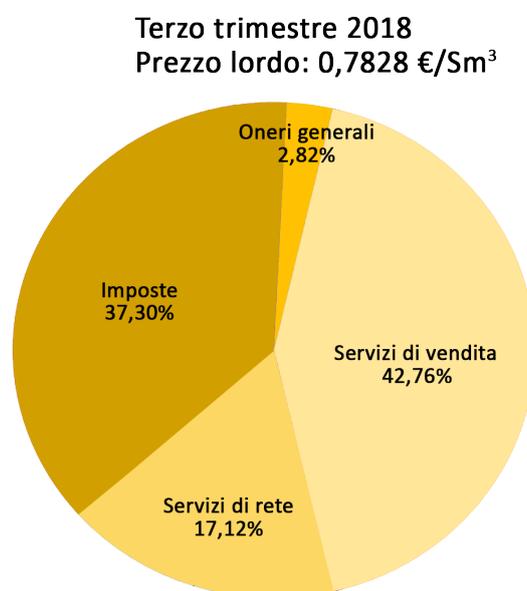
- Imposta sul consumo o accisa. Essa viene pagata in base ai consumi effettuati e ha un valore differente a seconda se ha un utilizzo civile o industriale. Un'altra divisione è effettuata in base all'area geografica, infatti l'accisa è differente tra i Territori ex-Cassa del Mezzogiorno (territori nei quali vengono finanziati degli interventi per lo sviluppo economico per diminuire il divario tra nord e sud) e gli altri territori.

USI CIVILI				
Consumi	< 120 [m ³]	tra 120 e 480 [m ³]	tra 480 e 1.560 [m ³]	> 1560 [m ³]
Accisa Normale [c€/m ³]	4,4	17,5	17	18,6
Accisa per Territori ex Cassa del Mezzogiorno [c€/m ³]	3,8	13,5	12	15

[Tabella 12]: Divisione delle aliquote a seconda della regione geografica [32]

- Imposta addizionale generale. Essa è definita in modo autonomo da ogni regione ad eccetto quelle a statuto speciale dove assume un valore pari a zero come in Lombardia e Sicilia.
- Imposta sul valore aggiunto o IVA è pari al 10% per i consumi minori di 480 Sm³ e pari al 22% per consumi oltre i 480 Sm³.

Viene di seguito riportato il grafico contenente l'incidenza di ogni misura rispetto al costo totale in bolletta. Per i dati ci si riferisce a una famiglia media con riscaldamento autonomo e un consumo annuale medio di 1.400 Sm³ [32][33].



[Grafico 8]: Suddivisione dei costi del gas per il terzo trimestre 2018 [32]

I costi dei vettori energetici utilizzati nella metodologia per la redazione della nuova relazione che verrà pubblicata entro il 2018 sono stati reperiti da una analisi condotta dall'Università Politecnica delle Marche.

Per quanto riguarda l'energia elettrica i consumi analizzati sono quelli relativi al riscaldamento, raffrescamento, produzione di ACS, ventilazione e solo per gli uffici, per l'illuminazione. Ad essi è associata una tariffa media per il 2018 di 20,63 c€/kWh per potenze installate di 3kW e consumo annuo di 2700 kWh.

Per il gas naturale invece si fa sempre riferimento a un consumo tipico di una famiglia media e si impone per il primo trimestre del 2018 un costo di 76,7 c€/Sm³ imposte incluse. A questi costi viene associato un aumento annuo costante pari al 3,4% per l'elettricità e un aumento medio del 2,3% per il gas.

2.5 Procedura di ottimizzazione

Una volta stabilito l'edificio, calcolato il fabbisogno di energia primaria, i diversi pacchetti o varianti per l'efficientamento energetico, i costi dei componenti, per la loro sostituzione, per lo smaltimento e i costi relativi ai vettori energetici energia e gas, si può trovare il pacchetto di interventi che garantisca il miglior livello ottimale in funzione del costo.

Per tale procedura è stato utilizzato il modello per il calcolo del fabbisogno energetico UNI/TS 1300-1, -2, -3, -4 [12] [13] [14] [15] in condizioni semi-stazionarie con l'aggiunta di un modello di ottimizzatore mono-obiettivo a soluzioni discrete, implementato nello strumento di calcolo Microsoft Excel. Ad essi viene aggiunto uno specifico foglio che contiene l'ottimizzatore, ovvero un calcolatore che, mediante dei processi iterativi, combina tra loro tutti i pacchetti impostati .

Dopo ogni confronto l'ottimizzatore ottiene un risultato parziale di "edificio ottimizzato". Questo risultato viene paragonato a successive configurazioni di pacchetti che rappresentino anch'essi degli ottimi parziali. Quindi l'ottimo parziale che presenta un costo minore rispetto a tutti gli altri rappresenterà l'ottimo globale.

Una volta estrapolati i valori dell'ottimo globale, si possono analizzare i suoi risultati e confrontarli sia con l'edificio esistente che con le diverse opzioni per l'efficientamento energetico proposte [11].

Nel seguente capitolo verranno analizzate le metodologie per il calcolo del fabbisogno sia in regime stazionario come richiesto dalla metodologia di calcolo della cost-optimality associata ad un ottimizzatore mono-obiettivo sia in regime dinamico, con l'utilizzo del software EnergyPlus implementato all'interno del programma DesignBuilder, associato ad un ottimizzatore multi-obiettivo (NSGA-II)

3 - Metodi di calcolo del fabbisogno energetico e strumenti di ottimizzazione

3.1 Modello in regime semi-stazionario: UNI/TS 11300

Il fabbisogno energetico dell'edificio è stato calcolato mediante l'utilizzo delle norme contenute nella serie UNI/TS 11300 [12] [13] [14] [15]. Queste normative permettono il calcolo del fabbisogno in tre condizioni differenti:

- Condizione di progetto o design rating;
- Condizione standard o asset rating;
- Condizione di esercizio o tailored rating.

Le differenze principali riguardano il campo di applicazione (progetti o edifici esistenti) e le finalità di utilizzo (per ottenere un permesso di costruire, poter effettuare una certificazione energetica o operare un processo di ottimizzazione e diagnosi di interventi di riqualificazione).

Il calcolo viene effettuato sia nel periodo estivo che in quello invernale e si basa sull'ipotesi di regime semi-stazionario che considera dei valori medi mensili per le variabili climatiche.

Nel dettaglio, le normative della serie UNI/TS 11300 utilizzate per il calcolo del fabbisogno sono:

- UNI/TS 11300 parte 1: *“Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale”*;
- UNI/TS 11300 parte 2: *“Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria”*;
- UNI/TS 11300 parte 3: *“Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione estiva”*;
- UNI/TS 11300 parte 4: *“Utilizzo di energie rinnovabili e di altri metodi di generazione per riscaldamento di ambienti e preparazione acqua calda sanitaria”*.

Per quanto riguarda la procedura del calcolo, segue degli step ben definiti:

- Viene definita la geometria dell'edificio e si individuano gli ambienti climatizzati e quelli non climatizzati;
- Si definiscono le zone che compongono l'edificio rispetto alle quali verrà effettuato il calcolo;
- Si impostano le condizioni di calcolo interne e tutta la serie di dati di input necessari alla definizione del clima esterno;
- Viene calcolato mese per mese e zona per zona il fabbisogno netto di energia termica sia per il riscaldamento ($Q_{H,nd}$) che per il raffrescamento ($Q_{C,nd}$);
- Vengono definiti i rendimenti di tutti gli impianti che compongono il sistema e dei loro fabbisogni di energia primaria;
- Unione di tutti i risultati provenienti dalle singole zone servite dagli stessi impianti.

Relativamente ai dati climatici, la UNI/TS 11300-1 richiede i valori medi mensili delle temperature esterne θ_e , dell'irradianza solare totale media mensile sia sul piano orizzontale ($I_{sol,h}$) che per ogni orientamento (I_{sol}). Questi valori sono presenti all'interno della norma UNI EN 10349 [34].

Le due espressioni di bilancio termico necessarie al calcolo del fabbisogno netto di energia per il riscaldamento (1) e il raffrescamento (2) per ogni zona e mese sono:

$$Q_{H,nd} = Q_{H,ht} - \eta_{H,gn} * Q_{gn} = (Q_{H,tr} + Q_{H,ve}) - \eta_{H,gn} * (Q_{int} + Q_{sol,w})$$

$$Q_{C,nd} = Q_{gn} - \eta_{C,ls} * Q_{C,ht} = (Q_{int} + Q_{sol,w}) - \eta_{C,ls} * (Q_{C,tr} + Q_{C,ve})$$

Dove:

$Q_{H,nd}$ = fabbisogno ideale di energia termica per il riscaldamento [kWh/m2];

$Q_{C,nd}$ = fabbisogno ideale di energia termica per il raffrescamento [kWh/m2];

$Q_{H,ht}$ = scambio di energia termica totale in riscaldamento [MJ];

$\eta_{H,gn}$ = fattore di utilizzazione degli apporti di energia termica;

Q_{gn} = apporti totali di energia termica [MJ];

$Q_{H,tr}$ = scambio di energia termica per trasmissione in riscaldamento [MJ];

$Q_{H,ve}$ = scambio di energia termica per ventilazione in riscaldamento [MJ];

Q_{int} = apporti di energia termica dovuti a sorgenti interne [MJ];

$Q_{sol,w}$ = apporti di energia termica dovuti alla radiazione solare incidente sui componenti vetrati [MJ];

$\eta_{c,ls}$ = fattore di utilizzazione delle dispersioni di energia termica;

$Q_{C,ht}$ = scambio di energia termica totale in raffrescamento [MJ];

$Q_{C,tr}$ = scambio di energia termica per trasmissione in raffrescamento [MJ];

$Q_{C,ve}$ = scambio di energia termica per ventilazione in raffrescamento [MJ].

Nella UNI/TS 11300-2 vengono definiti i rendimenti e le perdite degli impianti durante la climatizzazione invernale. Questa definizione è necessaria in quanto tutti i sistemi impiantistici sono caratterizzati da sottosistemi che influiscono sul calcolo del fabbisogno. I sottosistemi sono suddivisi in: emissione o erogazione, regolazione, distribuzione, accumulo e generazione.

Per la climatizzazione invernale il fabbisogno utile è articolato in:

- Fabbisogno ideale: è quello calcolato mediante la UNI/TS 11300-1 riferito a temperature uniformi in tutto l'ambiente riscaldato, calcolato in esercizio continuo o intermittente.
- Fabbisogno ideale netto: nel quale si deducono le perdite recuperate dal servizio di ACS

$$Q'_H = Q_{H,nd} - Q_{lrh,W}$$

$$Q_{lrh,W} = Q_{lrh,W,d} + Q_{lrh,W,s}$$

Dove:

Q'_H = fabbisogno ideale netto di energia termica utile [kWh];

$Q_{lrh,W}$ = perdite recuperate dal sistema di ACS [kWh];

$Q_{lrh,W,d}$ = perdite recuperate dal sottosistema di distribuzione dell'ACS calcolate

come somma delle perdite recuperate dalla distribuzione finale alle utenze [kWh];

$Q_{l,th,W,s}$ = perdite recuperate dal serbatoio di accumulo esterno nell'impianto di ACS.

- Fabbisogno effettivo: esso tiene in conto delle perdite determinate dai sottosistemi di emissione e regolazione. E serve per calcolare l'energia termica utile effettiva da fornire a ogni zona termica.

$$Q_{hr,i} = Q'_H + Q_{l,e,i} + Q_{l,rg,i}$$

Dove:

$Q_{hr,i}$ = fabbisogno effettivo dell'edificio [kWh];

$Q_{l,e,i}$ = perdite del sottosistema di emissione [kWh];

$Q_{l,rg,i}$ = perdite del sottosistema di regolazione [kWh].

Successivamente alla determinazione delle perdite degli impianti, si calcola per ogni mese il fabbisogno di energia globale richiesto dai sistemi di generazione.

$$Q_{gn,W,out} = Q_W + Q_{l,W,er} + Q_{l,W,d} + Q_{l,W,s} - Q_{W,ghp,in}$$

Dove:

$Q_{gn,W,out}$ = fabbisogno richiesto per la generazione [kWh]

Q_W = fabbisogno di energia termica per la produzione di ACS [kWh];

$Q_{l,W,er}$ = perdite del sottosistema di erogazione [kWh];

$Q_{l,W,d}$ = perdite del sottosistema di distribuzione [kWh];

$Q_{l,W,s}$ = perdite del sottosistema di accumulo [kWh];

$Q_{W,ghp,in}$ = energia termica recuperata nel caso in cui al serbatoio di accumulo siano collegati circuiti per il recupero di calore [kWh].

Queste formule servono per calcolare il fabbisogno di generazione per sistemi a combustione a fiamma oppure per generatori che vengono alimentati mediante combustibili

gassosi/liquidi per l'integrazione termica di altri sistemi polivalenti.

Oggi però questi sistemi stanno venendo sostituiti da impianti poli-generativi e pluri-energetici che utilizzano energie rinnovabili. Per la loro implementazione nei calcoli si utilizza la UNI/TS 11300-4.

Per questo caso si calcola il Q_p che sarebbe il fabbisogno di energia primaria dell'edificio per ogni servizio energetico:

$$Q_p = \sum(Q_{del,i} * f_{p,del,i}) - \sum(Q_{exp,i} * f_{p,exp,i}) \text{ [kWh]}$$

Dove:

$Q_{del,i}$ = energia fornita dal vettore energetico i;

$f_{p,del,i}$ = fattore di conversione del vettore energetico i (energia fornita);

$Q_{exp,i}$ = energia esportata dal vettore energetico i;

$f_{p,exp,i}$ = fattore di conversione del vettore energetico i (energia esportata).

Per quanto riguarda il calcolo dell'energia primaria per la climatizzazione estiva si fa riferimento alla UNI/TS 11300-3. L'equazione è la seguente:

$$Q_{C,P} = \sum_k Q_{aux,k} * f_{p,el} + \sum_k [\sum_x (Q_{Cr,k,x} + Q_{v,k,x}) / (\eta_{mm,k,x})] f_{p,x} \text{ [kWh]}$$

Dove:

$Q_{aux,k}$ = fabbisogno di energia elettrica per ausiliari dell'impianto di climatizzazione [kWh];

$f_{p,el}$ = fattore di conversione da energia elettrica ad energia primaria [-];

Q_{Cr} = fabbisogno effettivo per il raffrescamento [kWh];

Q_v = fabbisogno per trattamenti dell'aria [kWh];

η_{mm} = coefficiente di prestazione medio mensile del sistema di produzione dell'energia frigorifera [-];

$f_{p,x}$ = fattore di conversione in energia primaria del vettore energetico utilizzato da

generatore [-];

k = mese k-esimo della stagione di climatizzazione estiva;

x = indice che indica le diverse fonti di energia in ingresso

Per calcolare il fabbisogno effettivo di raffrescamento Q_{Cr} , occorre sommare al fabbisogno ideale netto di energia termica utile in raffrescamento calcolato mediante la UNI/TS 11300-1 le perdite dei diversi sottosistemi e sottrarre i recuperi. Ciò è visibile nella formula sottostante:

$$Q_{Cr,k} = Q_{C,nd,K} + Q_{l,e,k} + Q_{l,rg,k} + Q_{l,d,k} + Q_{l,d,s,k} - Q_{rr,k} \quad [\text{kWh}]$$

Dove:

$Q_{C,nd,K}$ = fabbisogno ideale dell'edificio [kWh];

$Q_{l,e,k}$ = perdite totali di emissione [kWh];

$Q_{l,rg,k}$ = perdite totali di regolazione [kWh];

$Q_{l,d,k}$ = perdite totali di distribuzione [kWh];

$Q_{l,d,s,k}$ = perdite totali dei serbatoi di accumulo inerziale [kWh];

$Q_{rr,k}$ = energia termica recuperata [kWh].

[35]

3.2 Modello in regime dinamico: EnergyPlus

EnergyPlus è un software che permette di effettuare una simulazione termo-energetica dell'edificio in regime dinamico. Questo programma utilizza dei calcoli basati su funzioni di trasferimento per fornire il valore degli scambi termici delle pareti tra interno ed esterno in regime variabile. Un altro metodo che viene utilizzato è il modello ai volumi finiti che, però, a differenza del precedente (a funzioni di trasferimento), richiede un tempo di simulazione più elevato e non ne differisce in maniera sostanziale.

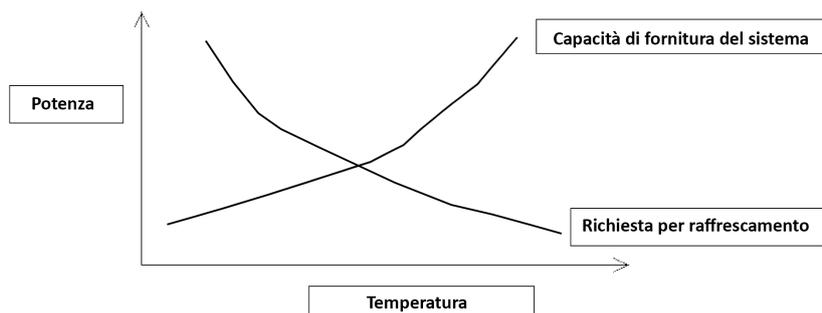
Energy plus permette anche di calcolare i carichi termici, utilizzando il modello ASHRAE HB – Air Heat Balance, i bilanci di vapore acqueo e di simulare l'impianto il tutto con-

temporaneamente e in un lasso di tempo sub-orario [35].

Questo programma deriva da due software: BLAST e DOE-2.

Essi appartengono alla categoria dei programmi a simulazione sequenziale, ovvero i diversi componenti che fanno parte del calcolo come zone termiche, sistemi per il trattamento dell'aria e gli impianti facenti parte della centrale termica vengono trattati in maniera disunita senza alcun feedback tra di loro. Il processo di calcolo in questi programmi segue un ordine preciso: vengono calcolati i bilanci di ogni zona determinando così i differenti carichi termici per il riscaldamento e il raffrescamento per il lasso di tempo stabilito come input. I risultati ottenuti vengono utilizzati per simulare il comportamento del sistema di trattamento dell'aria. Gli output prodotti, però, non vanno a influire sui bilanci precedentemente calcolati. Successivamente utilizzando i dati finora raccolti si procede con il dimensionamento dell'impianto. Anche in questo caso, una volta ultimato questo terzo step, i risultati non producono nessuna modifica ai calcoli precedenti.

Il sistema sequenziale ha un largo utilizzo solo in quei casi in cui la risposta del sistema può essere rappresentata da una funzione determinata dalla temperatura dell'aria interna. Un esempio dell'utilizzo di questa procedura è ad esempio il periodo di raffrescamento in cui due curve corrispondenti a input e output si incrociano in un singolo punto come visibile in figura 18.



[Figura 1]: Curve di domanda e risposta per programmi a simulazione sequenziale [37]

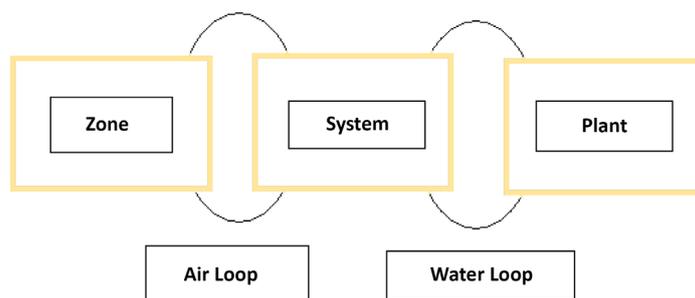
Nella maggior parte dei casi, però, il sistema non dipende solo da una funzione determinata ma da più condizioni esterne e da altri parametri che caratterizzano lo spazio climatizzato. Per questi casi la soluzione precedentemente descritta non risulta essere quella ottimale in quanto la curva della domanda, non essendo più regolare, crea numerosi in-

croci e rende il calcolo molto più complesso. Questo è il limite del calcolo sequenziale in quanto le diverse simulazioni, non avendo una correlazione stretta, non si modificano vicendevolmente. Ciò può portare ad avere degli eccessi di raffreddamento o riscaldamento, in alcuni periodi della giornata o dell'anno, che non vengono bilanciati ma assumono semplicemente la dicitura di “overcooling” o “overheating”.

Energy plus è tuttavia differente da queste tipologie di software perché utilizza una simulazione integrata. Essa comporta la capacità di poter risolvere simultaneamente le tre principali componenti necessarie per il calcolo, ovvero edificio, sistema e impianto.

Per ottenere dei risultati realistici questi tre elementi devono essere calcolati assieme attraverso una simulazione simultanea in grado di far interagire tra loro i feedback di ogni singolo componente.

Quanto detto è riassunto nella figura 19 dove i 3 elementi principali sono interconnessi grazie a due circuiti fluidi, ovvero l'Air Loop e il Water Loop.



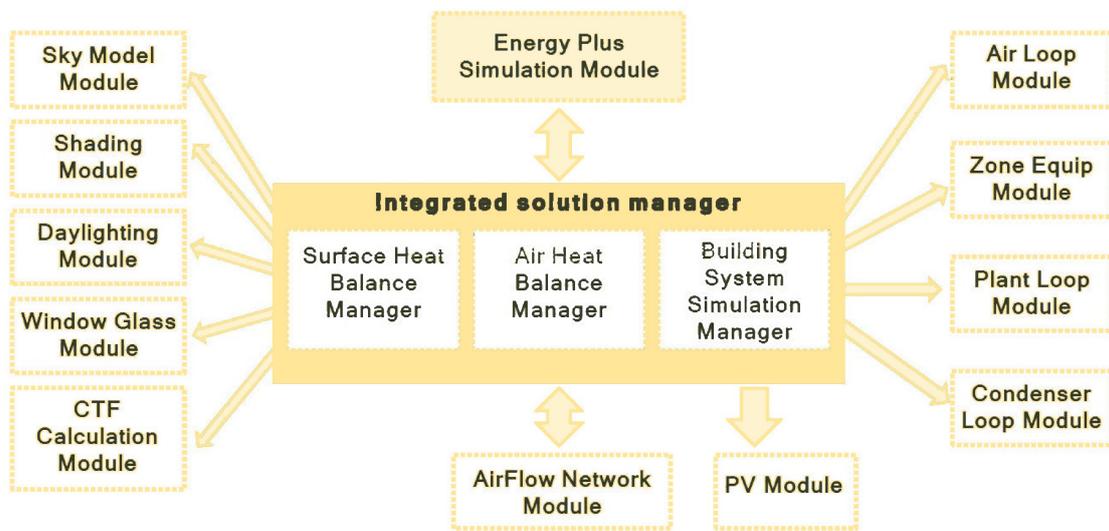
[Figura 2]: Schema di calcolo relativo alla simulazione simultanea [37]

All'interno di EnergyPlus questi elementi fanno parte dell'Integrated Solution Manager. Esso utilizza un metodo di calcolo dinamico a step temporali, che consiste nel mantenere invariate le condizioni esterne e delle zone per un periodo sub-orario stabilito dall'utente. Più è basso il lasso di tempo e più saranno precisi i calcoli ma, contemporaneamente, sarà più lungo il processo di calcolo. Per ovviare in parte a questo problema si è introdotto anche il metodo del “*Lagging with zone capacitance*” che, mantenendo le informazioni derivate dagli step iterativi precedenti, cerca di predire le risposte del sistema e aggiornare le temperature delle zone in tempo reale.

L'Integrated Solution Manager è composto da tre comparti principali che vengono risolti contemporaneamente:

- Il Surface Heat Balance Manager che calcola i bilanci termici delle pareti;
- L'Air Heat Balance Manager che risolve i bilanci in ambiente mediante la simulazione simultanea degli scambi termici radiativi e convettivi;
- Il Building Systems Simulation Manager che effettua la simulazione degli impianti.

Essi sono collegati ad altri moduli secondari come visibile nella figura 20.



[Figura 3]: Schema di funzionamento di EnergyPlus [37]

L'equazione principale che descrive il bilancio termico della zona sull'aria interna è la seguente:

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^N \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{sup}} \dot{Q}_{i,s} + Q_v + Q_{sis} = \sum_{i=1}^N \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{sup}} [h_i * A_i * (t_{s,i} - t_z)] + \dot{m}_{inf} * c_p * (t_{\infty} - t_z) + Q_{sis}$$

Dove:

C_z = capacità dell'aria della zona e delle masse termiche in equilibrio con l'aria ambiente [J/°C];

N = numero delle sorgenti convettive interne;

Q_i = flusso termico disperso dalle sorgenti per convezione [W];

N_{sup} = numero di superfici della zona aventi temperatura t_s ;

$Q_{i,s}$ = flusso termico disperso dalle superfici della zona termica;

Q_v = carico di ventilazione [W];

Q_{sis} = carico del sistema impiantistico [W];

h_i = coefficiente di scambio termico convettivo superficie-aria interna [W/m²K];

A_i = area della superficie [m²];

$t_{s,i}$ = temperatura superficiale della parete i-esia [°C];

m_{inf} = portata d'aria di infiltrazione [kg/s];

c_p = calore specifico dell'aria [J/kg°C];

t_∞ = temperatura dell'aria di infiltrazione [°C];

Per il calcolo diretto del bilancio termico delle superfici e per il calcolo del bilancio termico dell'aria ambiente si fa riferimento alla figura 21 dove viene riportato lo schema delle singole componenti che influiscono su questi due bilanci [39].



[Figura 4]: Schema delle componenti che influiscono sui bilanci termici delle superfici e dell'aria [37]

Il programma, per quanto riguarda superfici e temperature opera alcune assunzioni:

- Viene considerata uniforme la temperatura dell'aria in ambiente;
- Si considera uniforme la temperatura di ogni superficie;
- L'irraggiamento viene considerato uniforme sia per alte che per basse lunghezze d'onda;
- Le superfici vengono considerate uniformemente diffondenti;
- La conduzione del calore trasmesso è considerata monodimensionale.

Per quanto riguarda l'impianto per la climatizzazione, viene calcolato mediante la sua scomposizione in 3 sottosistemi:

- Air loop: che riguarda tutti i circuiti areaulici;
- Plant loop: che riguarda tutti i circuiti idronici nei quali scorre un fluido termovettore;
- Condenser loop: che riguarda i circuiti idronici nei quali c'è un fluido di condensazione.

Per ognuno di essi si definiscono i componenti impiantistici con le rispettive efficienze e potenze annesse, la richiesta di energia e la produzione di energia [36] [37].

3.3 Modelli a confronto

Come precedentemente descritto nel paragrafo 1 di questo capitolo, la serie UNI /TS 11300 effettua i calcoli di fabbisogno attraverso un modello di simulazione semi-stazionaria.

Questo metodo, molto utilizzato, permette una rapidità di calcolo più elevata rispetto ai modelli dinamici e ha un grado di complessità minore in quanto i dati di input richiesti presentano un numero e una precisione inferiore. La motivazione è che questo modello effettua i calcoli su base mensile utilizzando dei valori medi, mentre il modello dinamico

sfrutta un lasso di tempo molto inferiore (fino al sub-orario) utilizzando dei valori relativi a tale step temporale [40].

La simulazione dinamica si è diffusa a partire dagli anni '80 ed ha avuto un grande e rapido sviluppo soprattutto negli ultimi decenni. Essa viene utilizzata per diversi obiettivi:

- La determinazione del fabbisogno e dei diversi carichi termici nei singoli ambienti;
- Per la progettazione e verifica degli impianti;
- Come confronto tra diverse ipotesi di progetto sia a livello di materiali che di efficientamenti energetici;
- Verifiche dei consumi relativi ai vettori energetici utilizzati;
- Verifiche sul comfort in ambiente;
- Ipotesi di riqualificazione.

In tutti questi punti nei modelli dinamici, rispetto a quelli stazionari, si ottengono dei risultati aventi una precisione maggiore dovuta al numero di input e allo step temporale stabilito per il calcolo [35].

Ciò comporta però anche alcune difficoltà:

- Elevata conoscenza dei singoli materiali e delle loro proprietà e caratteristiche;
- Conoscenza dei dati climatici con base sub-oraria;
- Conoscenza dei profili di occupazione interni;
- Difficoltà di reperimento dei dati di input relativi sia all'involucro che all'impianto (per edifici esistenti è spesso complicato sia ottenere dei dati sia avere una precisione affidabile degli stessi, con conseguenti errori nella simulazione);
- Tempi di calcolo elevati dovuti all'iterazione tra le diverse componenti costituenti l'edificio e alla mole di dati inserita;
- Avere dei valori attendibili per le condizioni al contorno come ad esempio la temperatura del terreno a contatto con le fondamenta ecc.

L'obiettivo principale è quindi quello di riuscire ad avere un livello di incertezza sui dati di input quasi zero per far in modo che i risultati ottenuti si accostino il più possibile al caso reale. Per raggiungere tale obiettivo, data la diversa precisione sui dati di ingresso richiesta, è necessario apportare alcune opzioni di congruenza per fare in modo che i risultati dei due modelli di calcolo siano simili.

Il metodo utilizzato nel caso studio verrà analizzato successivamente nel paragrafo 4.6 del prossimo capitolo.

I modelli di calcolo dinamici, che stanno alla base dei diversi programmi, si basano sulle leggi fisiche e sulle norme vigenti in ogni paese [41].

Gli algoritmi utilizzati nei modelli di calcolo, che permettono di ottenere gli output da tutti gli input inseriti, si dividono in due categorie:

- Quelli che si basano sulle Funzioni di Trasferimento;
- Quelli che si basano su Modelli ai Volumi Finiti.

Il modello che adotta EnergyPlus è il primo, ovvero l'algoritmo basato sulle funzioni di trasferimento. L'algoritmo permette di legare assieme tutte le sollecitazioni provocate al sistema, come ad esempio le variazioni di temperatura e i flussi di scambio termico, con i feedback del sistema stesso [36].

In questo metodo si utilizzano:

- funzioni di trasferimento "relative alle pareti" (Conduction Transfer Function) per il calcolo dei flussi termici trasmessi per conduzione dagli elementi opachi,
- funzioni di trasferimento "ambiente" (Room Transfer Function) necessarie al calcolo del flusso termico convettivo da fornire all'aria in ambiente;
- funzioni di trasferimento "impianto" (Space Air Transfer Function) che valutano il flusso termico necessario all'impianto per la climatizzazione.

EnergyPlus è stato utilizzato all'interno del programma DesignBuilder poiché l'interfaccia risulta essere user-friendly.

3.4 Modelli di ottimizzazione mono-obiettivo e multi-obiettivo

I modelli di ottimizzazione assolvono al compito di trovare i valori massimi e minimi, appartenenti ad uno specifico dominio, di una funzione. Essi sono stati creati per trovare delle soluzioni a problemi complessi che necessitano di essere risolti contemporaneamente. Il risultato deve legare i diversi input ottenendo così un valore detto ottimo globale, ovvero quel valore che rappresenta la combinazione ottimale dei parametri scelti. Per essere risolti questi modelli devono essere associati a degli algoritmi specifici.

Ci sono due categorie di modelli, quelli mono-obiettivo e quelli multi-obiettivo.

I modelli di ottimizzazione mono-obiettivo vengono utilizzati quando si deve ricercare una singola soluzione ad un problema semplice (SOP, single objective problem) che non prenda in considerazione la commistione di più dati di input in contrasto tra loro. Infatti successivamente al processo di ottimizzazione essi sono in grado di stabilire solo un valore che corrisponde al minimo o al massimo della funzione obiettivo. L'utilità di queste funzioni è quella di poter avere una informazione generale riguardante una possibile soluzione del problema posto in un tempo breve, non permettendo però di fornire delle soluzioni alternative incrociando tra di loro i diversi obiettivi.

Questi casi sono molto ridotti nella realtà, e per questo motivo si opta per l'utilizzo dei modelli di ottimizzazione multi-obiettivo (MOOP, multi objective optimization). Essi sono in grado di trovare una soluzione ottimale ad un problema composto da numerosi obiettivi (MOP, multi objective problem), ciò perché per arrivare ad un ottimo ci sono diversi aspetti da tenere in conto che spesso sono in contrasto tra di loro [39].

Data la loro complessità i MOP devono essere scomposti in SOP, questo comporta però che ogni SOP debba avere un peso differente in base alla sua importanza rispetto al totale. Ciò porta ad avere due metodologie per risolvere un MOP:

- L'approccio basato sulle preferenze: vengono assegnate dall'utente dei pesi e delle preferenze ad ogni SOP che compone il problema e si avvia l'ottimizzatore. Que-

sto approccio però ha una efficacia discutibile perché il risultato dipende in maniera totalitaria dai valori assegnati. Ciò porta ad avere soluzioni differenti ad uno stesso problema variando solo il peso delle misure considerate. In aggiunta questo metodo è soggettivo perché è complicato stabilire univocamente i valori numerici da assegnare ai parametri.

- L'approccio ideale: vengono cercate nella prima fase una serie di soluzioni in modo casuale senza basarsi sulle preferenze, successivamente si utilizzano le eventuali preferenze indicate dall'utente per selezionare quali siano le soluzioni migliori. In questo caso si riduce di molto la soggettività e vengono testate una maggior quantità di soluzioni.

3.4.1 Algoritmi di ottimizzazione

I modelli appena descritti per produrre dei risultati devono essere composti da algoritmi. Ci sono principalmente due categorie di algoritmi con delle differenze sostanziali:

Algoritmi deterministici

- per ogni loro uso sullo stesso problema e con lo stesso punto di partenza si ottengono gli stessi risultati;
- Considerano una singola soluzione come risultato e la modificano in base alle informazioni ottenute analizzando solo quella soluzione;
- In problemi multimodali l'algoritmo è in grado di trovare la soluzione del minimo globale solo nel caso in cui il punto di partenza del calcolo si trova nel bacino del minimo globale e non in quello di un minimo locale;
- Il tempo di calcolo è minore rispetto ai sistemi stocastici.

Algoritmi stocastici

- Forniscono risultati diversi per lo stesso problema. Ciò è dovuto alla natura casua-

le di alcune combinazioni;

- Analizzano contemporaneamente differenti soluzioni che sono progressivamente modificate in base alle informazioni ottenute studiandole tutte assieme;
- Prendendo in considerazione più punti di partenza è più semplice trovare l'ottimo globale, i valori minimi e massimi rispetto ai modelli deterministici;
- Il tempo di calcolo è maggiore per via della loro complessità.

Questi algoritmi sono stati creati basandosi sui concetti di evoluzione naturale, sopravvivenza del più forte, crossover e riproduzione genetica definiti da Charles Darwin nella sua opera "L'origine della specie" [39].

Il nome di algoritmi genetici o GA, deriva appunto da queste teorie. I principi che stanno alla base di questi algoritmi sono stati definiti nel 1975 da Jhon Holland nell'Università del Michigan.

I GA seguono tre fattori principali che vanno ad agire sulla popolazione base dei cromosomi (ovvero sugli input del problema):

- Riproduzione selettiva solo degli individui migliori;
- Il crossover o ricombinazione genetica;
- Le mutazioni casuali.

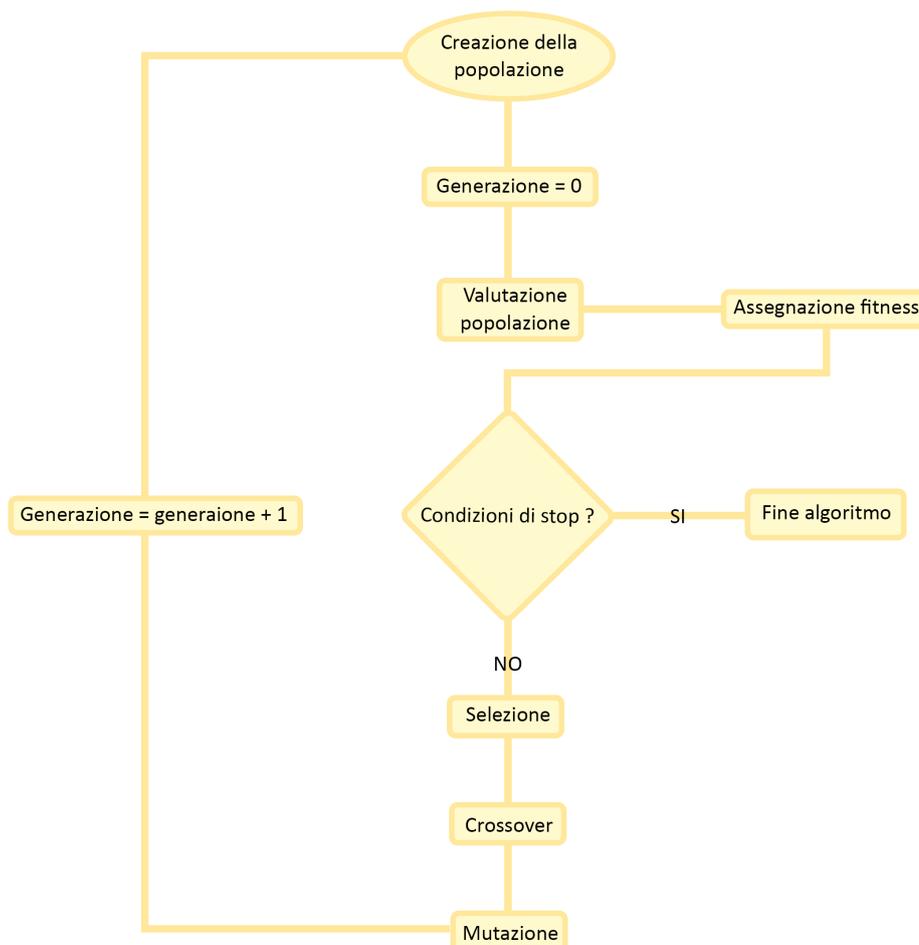
Ciò vuol dire che solo quei cromosomi che hanno una fitness (successo riproduttivo) elevata verranno utilizzati per riproduzione, crossover e mutazione fino ad ottenere un "risultato" che comprenda gli "ottimi" di ogni cromosoma.

Nella pratica l'algoritmo modifica ripetutamente l'insieme degli input per ottenere delle soluzioni. Ad ogni iterazione esso seleziona alcuni elementi facenti parte della "popolazione" corrente e li incrocia in modo da creare dei nuovi individui che presentano alcune delle caratteristiche migliori dei "genitori" che sostituiranno alla popolazione base. Ogni iterazione porta all'ottenimento di un risultato che ad un certo punto combacerà con l'ot-

timo globale del problema di partenza [39].

Nel dettaglio:

- Generazione in modo casuale di una soluzione di partenza che contiene gli input inseriti;
- Creazione mediante iterazione di nuove generazioni partendo dalla popolazione base tenendo in conto della fitness di ogni “genitore”.
- Creazione di un numero di “individui figli” pari al numero dei “genitori” che ne prenderanno il posto nella popolazione;
- Nuovo calcolo iterativo con popolazione di partenza variata;
- Interruzione delle iterazioni quando i criteri stabiliti per gli output sono soddisfatti.



[Figura 5]: Diagramma di flusso dei GA [39]

Successivamente verranno analizzati in maniera più approfondita i due algoritmi di ottimizzazione utilizzati per le UNI TS 11300 (modello di ottimizzatore mono-obiettivo a soluzioni discrete) e per il calcolo in regime dinamico sfruttando il software Design Builder (algoritmo di ottimizzazione NSGA-II).

3.4.2 Mono-obiettivo

Essendo un modello mono-obiettivo, la finalità dell'algoritmo utilizzato nell'ottimizzatore implementato alle UNI/TS 11300 è quella di trovare il costo globale minore relativo a una serie di pacchetti di misure di efficientamento energetico.

Esso esegue una simulazione automatica di ricerca sequenziale con numerose iterazioni per trovare la migliore combinazione di opzioni che porti ad un costo inferiore.

I vantaggi di utilizzo di questo ottimizzatore sono principalmente tre:

- È in grado di trovare degli ottimi intermedi oltre all'ottimo globale;
- Le soluzioni discrete, piuttosto che quelle continue, vengono valutate in modo da riflettere le realistiche opzioni di costruzione;
- Dà la possibilità di avere più opzioni di scelta progettuale tra i differenti livelli di costo trovati.

La procedura di calcolo dell'ottimo globale è la seguente:

- Definizione delle misure di efficienza energetica (EEM) applicabili all'edificio;
- Definizione della compatibilità tra le diverse misure;
- Creazione per ogni EEM dei propri obiettivi di efficienza energetica (EEO);
- Definizione di un set di riferimento che corrisponda allo stato di fatto;
- Calcolo del fabbisogno dell'edificio;
- Calcolo del costo globale ($C_{g,0}$) e imporlo come ottimo globale ($C_{g,opt} = C_{g,0}$);
- Definizione delle N opzioni applicabili all'edificio;
- Imporre la prima opzione o set pari a 1 ($i = 1$);

-
- Calcolo del fabbisogno e del costo globale della prima opzione;
 - Se $i < N$ allora si riparte dall'ipotesi delle opzioni i , se $i > N$ allora si prosegue;
 - Coparazione dei costi globali di tutte le opzioni analizzate;
 - Se il $C_{g,\min}$ tra tutte le opzioni analizzate è $<$ del $C_{g,\text{opt}}$ allora viene definito un ottimo parziale, si impone $C_{g,\text{opt}} = C_{g,\min}$ e si ricomincia dalla definizione delle N opzioni applicabili all'edificio. Se $C_{g,\min} > C_{g,\text{opt}}$ il set preso in analisi rappresenta l'ottimo globale;
 - Fine dell'iterazione.

Questa è una procedura iterativa e sequenziale in quanto l'iter di calcolo del costo globale viene ripetuto fino ad ottenere il costo minore rispetto ad ogni altro [42] [43].

3.4.3 Multi-obiettivo: NSGA II

Della categoria dei GA fa parte l'algoritmo di ottimizzazione, implementato nel software DesignBuilder, NSGA-II (Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm).

Questo algoritmo, basato sul concetto della non dominanza è stato creato da un team di ricercatori indiani avente a capo Kalyanmoy Deb nel 2000. L'idea della non dominanza è nata dall'osservazione effettuata sugli algoritmi evolutivi esistenti. Essi, basati invece sulla dominanza e sulla Fitness Sharing comportavano una elevata complessità del calcolo (accentuata anche dall'assenza dell'elitismo) ed avevano la necessità di un parametro aggiuntivo σ_{sh} per misurare la distanza massima ammissibile tra due obiettivi nel campo delle soluzioni.

L'NSGA-II deriva dall'evoluzione dell'algoritmo NSGA. Esso prodotto nel 1994, classifica la popolazione iniziale seguendo sempre il concetto di dominanza. Gli individui dominanti della popolazione vengono suddivisi in classi o rank. Il primo rank è formato da quegli individui non dominati da nessun altro, questo gruppo poi viene messo da parte

e si formerà il secondo gruppo del quale faranno parte gli altri individui non dominati e così via fino all'esaurimento della popolazione.

Questa tipologia di algoritmi presentano però delle criticità:

- Elevata complessità di calcolo pari a $O(MN^3)$ dove M è il numero di obiettivi e N è il numero di individui della popolazione. Questa complessità è data dal metodo utilizzato per la creazione dei gruppi;
- Non presenta la funzione dell'elitismo e necessita del parametro σ sh.

Nell'NSGA-II la complessità è stata diminuita fino a $O(MN^2)$. Questo perché ogni soluzione avrà due entità associate:

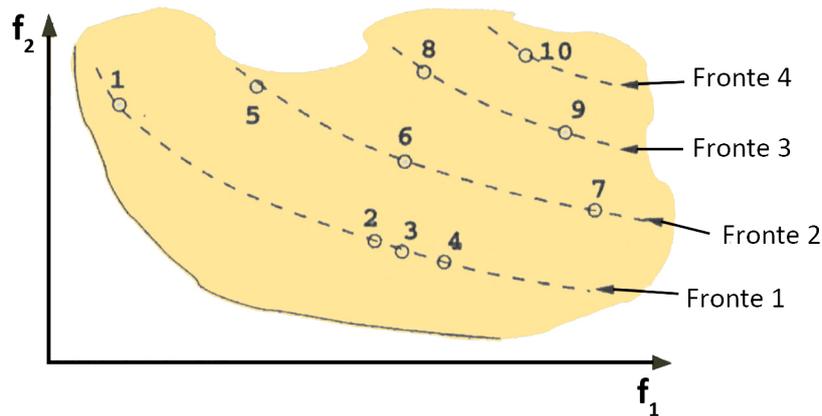
- Il domination count: che sarebbe l'insieme delle soluzioni dominanti di una generica soluzione p ;
- E l' S_p ovvero l'insieme delle soluzioni che vengono dominate in una generica soluzione p .

Le soluzioni dominanti della popolazione iniziale appartenenti al primo fronte (figura 23) avranno un domination count pari a 0 e saranno estratte dalla popolazione generale. I membri "q" analizzati nelle simulazioni successive faranno parte dell' S_p .

Quelli che avranno un domination count pari a 0 rispetto ai membri restanti nell'insieme S_p , verranno trasferiti in una lista differente e andranno a formare così il secondo fronte non dominato con domination count pari a 1. Tale processo viene ripetuto fino all'esaurimento dei membri appartenenti alla famiglia e alla formazione di tutti i rank.

Da tale descrizione si può notare che il domination count assumerà un valore massimo pari a $N-1$ comportando che tutte le soluzioni saranno valutate $N-1$ volte prima che il domination count arrivi a 0.

Perciò nel momento in cui rimangono al massimo $N-1$ soluzioni la complessità per l'identificazione del fronte di ordine 2 o più sarà $O(N^2)$. E di conseguenza la complessità totale sarà $O(MN^2)$.

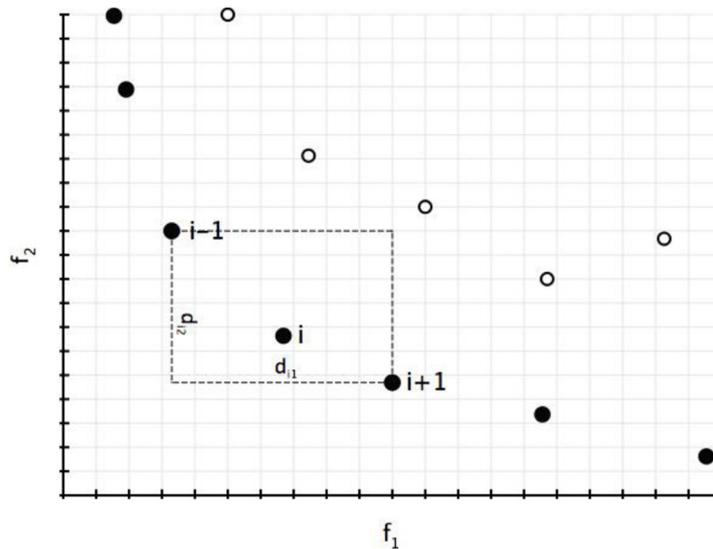


[Figura 6]: Esempio di suddivisione in fronti appartenenti ad un determinato dominio [44]

Un'altra caratteristica dell'NSGA-II è l'utilizzo della crowding-distance.

Essa rappresenta la distanza che esiste tra le diverse soluzioni di ogni fronte e serve per stabilire quella più isolata. Quando si confrontano due o più soluzioni, se il rank è lo stesso si sceglierà quella con la crowded-distance maggiore.

Per determinare la distanza di affollamento tra una soluzione e quelle vicine appartenenti allo stesso fronte si crea un rettangolo avente come lati le distanze tra i due punti che circondano la soluzione (visibile in figura 24). Alle soluzioni estreme di ogni rank si associano dei valori pari ad infinito, mentre per tutte le altre si associa il valore del perimetro del rettangolo.



[Figura 7]: Metodo di assegnazione della crowded-distance [44]

L'elitismo è un altro concetto fondamentale di questo algoritmo.

Esso è stato introdotto per fare in modo che i cromosomi migliori di una generazione siano trasmessi alla generazione figlia. Ciò è permesso seguendo sempre il concetto di ordinamento secondo i rank e quello di crowded-distance [44].

Difatti quando verrà formata la mating pool (insieme in cui vengono riuniti i genitori e i figli) si sceglieranno per ogni generazione, individui aventi rank più basso e crowding-distance maggiore.

Tutti gli algoritmi genetici utilizzano, come anticipato, i concetti di selezione, crossover e mutazione. L'NSGA-II segue anch'esso questi principi ma in modo particolare:

- Selezione: viene utilizzata la selezione per torneo, ovvero si comparano tra loro due diverse soluzioni alla volta, scelte in modo casuale appartenenti ad un insieme. Le soluzioni "vincitori" (con rank più alto e crowded-distance maggiore) andranno a far parte del mating pool dove verrà poi valutata, incrociata con le altre soluzioni e se necessario mutata. La soluzione "perdente" verrà scartata;
- Crossover: serve per generare nuovi individui mediante lo scambio genetico tra i genitori.
- Mutazione: altera alcuni geni di un singolo cromosoma. La probabilità che ciò accada è relativamente bassa.

Riassumendo l'iterazione operata dall'NSGA-II è la seguente:

- 1- Creazione della popolazione;
- 2- Valutazione della funzione che si ha come obiettivo;
- 3- Assegnazione di un rank seguendo il concetto del fronte di pareto/dominanza;
- 4- Creazione di una generazione di figli;

-
- 5- Selezione per torneo;
 - 6- Ricombinazione e mutazione;
 - 7- Valutazione della funzione che si ha come obiettivo sulla nuova popolazione;
 - 8- Riassegnazione del rank sempre secondo il metodo del fronte di pareto/dominanza;
 - 9- Con il mating-pool creare i fronti non dominati;
 - 10- Ricerca di altre possibili soluzioni in ogni fronte;
 - 11- Determinazione della crowding-distance;
 - 12- Selezionare i punti con rank più basso e crowded-distance maggiore;
 - 13- Ripetere fino al raggiungimento del numero di generazioni richieste.

Tutto parte dalla definizione del numero di individui appartenenti alla popolazione iniziale. Essa verrà valutata in base alla funzione obiettivo per l'assegnazione di un rank ad ogni parametro (seguendo il concetto di non-dominanza) [45].

Dopodichè si procederà mediante l'iterazione di un ciclo che verrà ripetuto un numero di volte pari al numero di generazioni scelto. Viene creata quindi la popolazione dei discendenti utilizzando la selezione per torneo, la ricombinazione e la mutazione. A questo punto si rivalutano le funzioni obiettivo in questo gruppo e i parametri vengono ordinati sempre seguendo l'ordinamento del rank.

Nel passaggio successivo si genererà il mating-pool (una popolazione che comprende sia genitori che figli). Nella pool gli individui verranno nuovamente divisi in rank formando dei fronti non-dominati. Con questo passaggio il concetto relativo all'elitismo è verificato e i membri appartenenti al rank più basso saranno le soluzioni migliori. Se in questo rank il numero di individui presenti è più basso rispetto al numero indicato all'inizio dall'utente, nell'iterazione successiva si andranno a selezionare altri individui presenti nel secondo fronte, nel terzo e così via fino a raggiungere tale numero.

L'indice che tiene in conto il numero di generazioni verrà aumentato di uno e tutti i passaggi verranno ripetuti un numero di volte pari al numero di generazioni scelte dall'utente [46].

4 - Applicazione della procedura ad un edificio di riferimento

4.1 Descrizione del caso studio

Tra tutte le tipologie di edifici di riferimento rappresentate nella figura 1 è stata scelta quella degli edifici a blocchi di appartamenti costruiti tra il 1946 e il 1960. Nello specifico L’RGC_E1_E ovvero il grande condominio ad uso residenziale situato in fascia climatica E [24].

Classe di dimensione edilizia

Classe di epoca di costruzione	Area climatica media	Case monofamiliari	Case a schiera	Edifici multifamiliari	Blocchi di appartamenti
	1 Fino al 1900				
	2 1901 - 1920				
	3 1921 - 1945				
	4 1946 - 1960				
	5 1961 - 1975				
	6 1976 - 1990				
	7 1991 - 2005				
	8 Dopo il 2005				

[Figura 8]: “Matrice della tipologia edilizia” italiana con illustrazione attraverso una immagine reale degli edifici-tipo [27]

Di seguito viene descritta la procedura generale del calcolo del livello ottimale in funzione dei costi, applicata ad esso [11].

La tipologia edilizia viene definita mediante alcuni dati geometrici principali che sono il volume netto, l’area di pavimento, il rapporto di forma, il numero di appartamenti e il numero di piani. Nelle tabelle seguenti oltre a questi dati ne saranno forniti altri necessari alla costruzione del modello dettagliato dell’edificio di riferimento nel software per la simulazione dinamica.

Nella tabella 13 vengono riportati i dati generali dell'edificio e successivamente alcune immagini di riferimento dei due orientamenti principali. La localizzazione e i dati climatici sono stati forniti dal Comitato Termotecnico Italiano (CTI).

Dati generali RGC_E1_E	
Località	Milano
Gradi giorno	2404
Zona climatica	E
Destinazione d'uso	Residenziale
Tipologia	Grande condominio
Tipo di fabbricato	Esistente
Anno di costruzione	1946 - 1976

[Tabella 13]: Dati generali edificio RGC_E1_E [47]



[Figura 9]: Prospetto nord-ovest



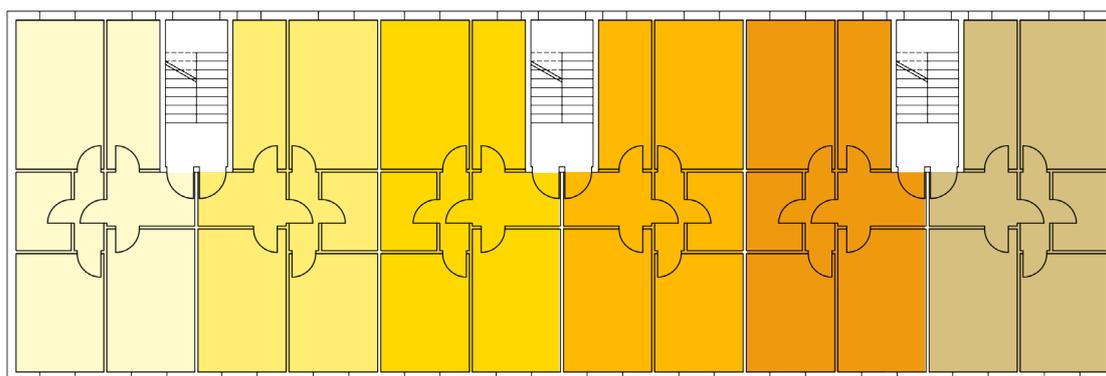
[Figura 10]: Prospetto sud-est

L'edificio presenta una pianta rettangolare con orientamento principale delle due facciate principali N/O – S/E mentre i due lati corti non presentano aperture nonostante non siano addossati ad altre costruzioni.

Esso è composto da quattro piani fuori terra, un sottotetto non abitabile ed un locale semi interrato adibito a cantine.

Ogni piano è composto da 6 alloggi speculari tra loro per un totale di 24 appartamenti. L'intero complesso è servito da tre rampe di scale che servono ognuna due appartamenti per piano.

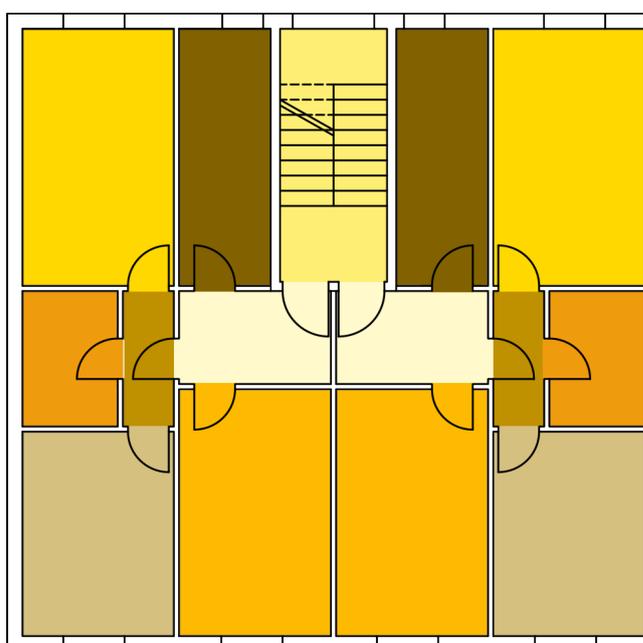
Questi dettagli e i seguenti, servono per poter andare a disegnare correttamente l'edificio di riferimento sul software per la modellazione dinamica in quanto esso necessita di geometrie precise e di una disposizione interna degli appartamenti.



[Figura 11]: Pianta fuori scala del piano tipo recante la suddivisione degli appartamenti



Legenda appartamenti:



Legenda suddivisione interna degli appartamenti:



[Figura 12]: Stralcio di pianta fuori scala rappresentante due alloggi affiancati e loro suddivisione interna

Appartamento tipo	
Superficie netta totale	65 m ²
Ingresso	5,7 m ²
Camera doppia	15,4 m ²
Soggiorno	14,2 m ²
Bagno	5,3 m ²
Camera singola	12,1 m ²
Disimpegno	2,8 m ²
Cucina	9,5 m ²
Vano scale	10,6 m ²

L'edificio presenta un'unica zona termica che racchiude tutti gli alloggi, escludendo gli ambienti non riscaldati (sottotetto, scale e cantine). Il modello 3D in figura 13 sintetizza graficamente tale divisione.

[Tabella 14]: Metrature appartamento tipo [47]



[Figura 13]: 3D dell'edificio con suddivisione degli ambienti climatizzati e non climatizzati

Legenda:



In tabella 15 vengono riportati e riassunti tutti i principali parametri tipologici costituenti l'edificio, necessari alla costruzione del modello.

Dati tipologici RGC_E1_E					
Tipologia di struttura	Mista	Lunghezza lato corto	12,6 m	Superficie netta appartamento tipo	65 m ²
Tipologia di costruzioni	Pesante	Lunghezza lato lungo	37,5 m	Area di pavimento netta degli ambienti riscaldati	1552 m ²
Numero di appartamenti	24	Altezza netta interpiano	3 m	Superficie esterna	2740 m ²
Numero di appartamenti per piano tipo	6	Perimetro esterno del vano scala	43,8 m	Volume netto ambiente riscaldato	4655 m ³
Numero di piani climatizzati	4	Superficie lorda piano tipo	472,5 m ²	Volume totale	5949 m ³
Altezza edificio	13,5 m	Superficie del vano scala su piano tipo	31,8 m ²	Rapporto di forma	0,46 m ⁻¹

[Tabella 15]: dati tipologici dell'edificio di riferimento RGC_E1_E per la costruzione del modello [47]

Tutti i dati riportati in questo capitolo provengono dal report ENEA “*Aggiornamento della metodologia comparativa per la determinazione dei livelli ottimali di prestazione energetica negli edifici*” in via di pubblicazione [46].

4.1.1 Involucro opaco

Le tipologie di muratura sono state selezionate dalla banca dati del progetto TABULA [27] utilizzando l'anno di costruzione dell'edificio. Le singole stratigrafie con le loro caratteristiche associate ad ogni materiale sono state aggiunte successivamente in quanto TABULA fornisce solo le trasmittanze totali U, mentre nel programma di simulazione è necessario specificare i valori di conducibilità o resistenza di ogni singolo strato.

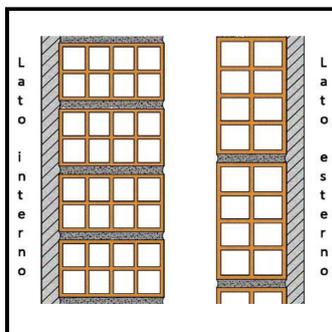
Successivamente verranno illustrate le murature selezionate con le loro proprietà suddivise in:

Chiusure verticali opache verso l'esterno

Esse sono composte da una muratura a cassa vuota avente uno spessore complessivo di 30 cm con caratteristiche generali:

- Trasmittanza $U = 1,15 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Coefficiente di assorbimento solare $\alpha_{\text{sol,c}} = 0,6$
- Emissività $\varepsilon = 0,9$

Le proprietà dei singoli strati sono state riassunte nella figura 7.



The figure shows two cross-sectional diagrams of a vertical opaque wall. The left diagram is labeled 'Lato interno' (inner side) and the right is 'Lato esterno' (outer side). The wall consists of several layers: an internal finishing layer, a perforated brick layer, an air gap, another perforated brick layer, an external finishing layer, and an external finishing layer. The table below provides the thermal properties for each layer.

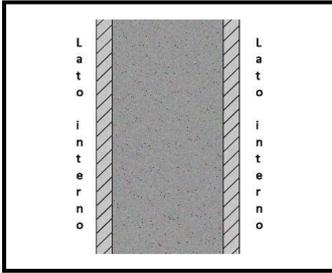
Descrizione	Spessore [m]	Conducibilità termica λ [W/mK]	Resistenza R [m ² K/W]
Strato liminare interno	-	-	0,13
Intonaco	0,02	0,70	-
Laterizio forato	0,12	0,43	-
Intercapedine d'aria	0,06	-	0,18
Laterizio forato	0,08	0,43	-
Intonaco	0,02	0,90	-
Strato liminare esterno	-	-	0,04

[Figura 14]: Stratigrafia delle chiusure verticali opache verso l'esterno

Chiusura verticale opaca di separazione tra ambienti riscaldati e non riscaldati

La muratura, rappresentata in figura 8, che separa le scale (ambiente non riscaldato) dagli alloggi ha uno spessore complessivo di 18 cm con caratteristica generale:

- Trasmittanza $U = 2,32 \text{ W/m}^2\text{K}$

	Descrizione	Spessore [m]	Conducibilità termica λ [W/mK]	Resistenza R [m ² K/W]
		Strato liminare interno	-	-
	Intonaco	0,02	0,70	-
	Clacestruzzo	0,06	1,16	-
	Intonaco	0,02	0,90	-
	Strato liminare interno	-	-	0,13

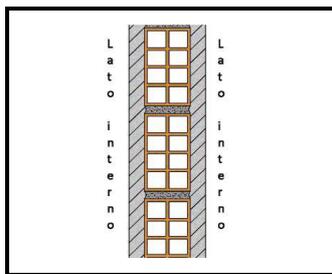
[Figura 15]: Stratigrafia della muratura verticale opaca di separazione tra ambienti riscaldati e non riscaldati

Tramezzi di separazione interni

I tramezzi interni, che dividono i diversi locali appartenenti ai singoli alloggi, presentano come caratteristica generale:

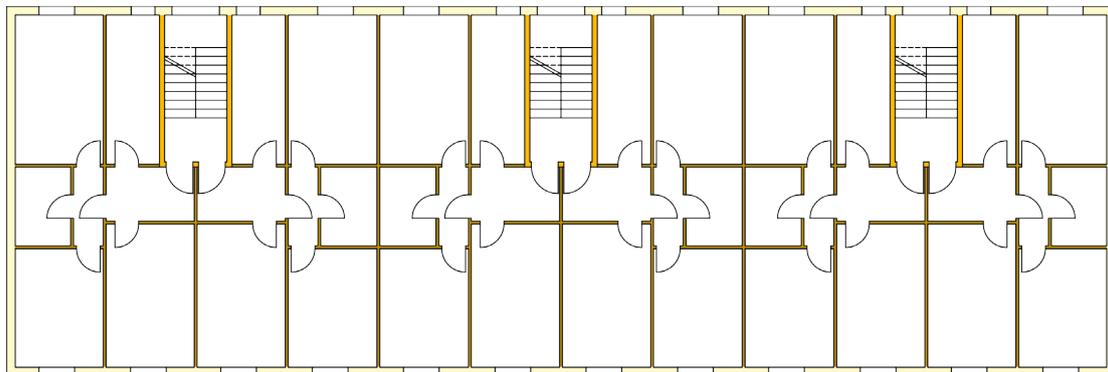
- Trasmittanza $U = 2,18 \text{ W/m}^2\text{K}$

Essi sono composti dalla stratigrafia visibile in figura 9.

	Descrizione	Spessore [m]	Conducibilità termica λ [W/mK]	Resistenza R [m ² K/W]
		Strato liminare interno	-	-
	Intonaco	0,02	0,35	-
	Laterizio	0,06	0,72	-
	Intonaco	0,02	0,35	-
	Strato liminare interno	-	-	0,13

[Figura 16]: Stratigrafia dei tramezzi di separazione interni

Nella figura 10 viene rappresentata la disposizione dei muri all'interno della pianta fuori scala del piano tipo.



[Figura 17]: Pianta piano tipo fuori scala con indicazione delle murature verticali

Legenda:

	Chiusura verticale opaca verso l'esterno		Chiusura verticale opaca amb. riscaldato/non riscaldato		Tramezzi interni
---	--	---	---	---	------------------

Chiusura orizzontale inferiore (primo solaio)

Essa è composta da un solaio latero-cementizio con uno spessore totale di 29 cm con le seguenti caratteristiche:

- Trasmittanza $U = 1,30 \text{ W/m}^2\text{K}$

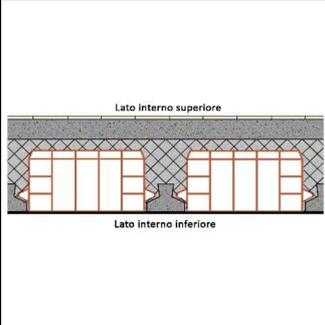


Diagramma della stratigrafia della chiusura orizzontale inferiore, mostrando un'interfaccia tra il lato interno superiore (sopra) e il lato interno inferiore (sotto). La struttura è composta da strati sovrapposti: un strato liminare superiore, piastrelle in ceramica, un massetto in calcestruzzo alleggerito, un solaio latero-cementizio e un strato liminare inferiore.

Descrizione	Spessore [m]	Conducibilità termica λ [W/mK]	Resistenza R [m ² K/W]
Strato liminare interno superiore	-	-	0,17
Piastrelle in ceramica	0,01	1,00	-
Massetto in calcestruzzo alleggerito	0,06	0,65	-
Solaio latero-cementizio	0,22	-	0,33
Strato liminare interno inferiore	-	-	0,17

[Figura 18]: Stratigrafia della chiusura orizzontale inferiore

Chiusura orizzontale superiore (ultimo solaio)

Questa struttura divide gli ambienti riscaldati del quarto piano dal sottotetto non riscaldato. Essa è composta da tre strati con spessore totale di 30 cm aventi le seguenti caratteristiche:

- Trasmittanza $U = 1,65 \text{ W/m}^2\text{K}$

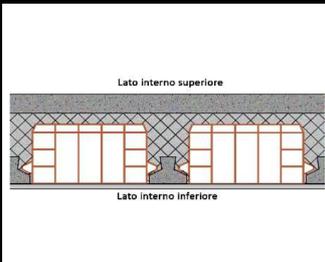


Diagramma della stratigrafia della chiusura orizzontale superiore, mostrando un'interfaccia tra il lato interno superiore (sopra) e il lato interno inferiore (sotto). La struttura è composta da strati sovrapposti: un strato liminare superiore, un massetto in calcestruzzo, un solaio latero-cementizio, un intonaco e un strato liminare inferiore.

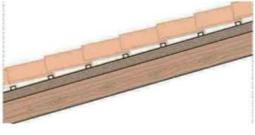
Descrizione	Spessore [m]	Conducibilità termica λ [W/mK]	Resistenza R [m ² K/W]
Strato liminare interno superiore	-	-	0,10
Massetto in calcestruzzo	0,06	1,16	-
Solaio latero-cementizio	0,22	-	0,33
Intonaco	0,09	0,90	-
Strato liminare interno inferiore	-	-	0,10

[Figura 19]: Stratigrafia della chiusura orizzontale superiore

Tetto a falde con struttura e tavolato in legno

Per quanto riguarda la copertura della costruzione, che chiude l'ultima parte di edificio non riscaldato (sottotetto), si prende in considerazione solo lo strato di materiale che resiste alla trasmissione del calore, ovvero l'assito in legno di abete. Quindi i coppi non rientrano nello spessore totale che risulta essere di 5 cm. Le sue caratteristiche generali sono :

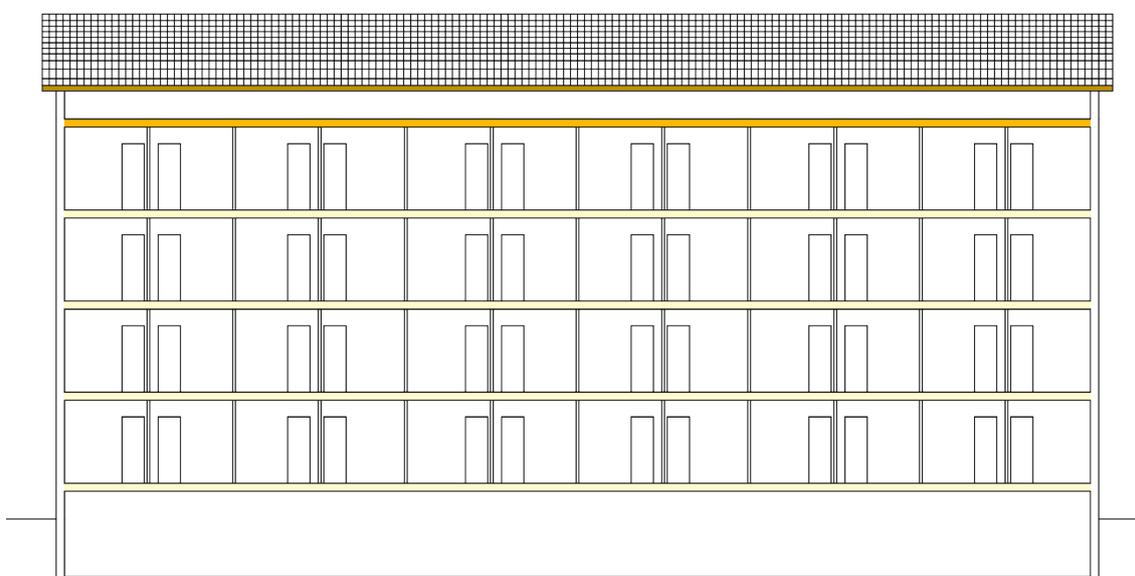
- Trasmittanza $U = 1,80 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Coefficiente di assorbimento solare $\alpha_{sol,c} = 0,6$
- Emissività $\varepsilon = 0,9$



Descrizione	Spessore [m]	Conducibilità termica λ [W/mK]	Resistenza R [m ² K/W]
Strato liminare esterno	-	-	0,04
Assito in legno (abete)	0,05	0,12	-
Strato liminare interno	-	-	0,10

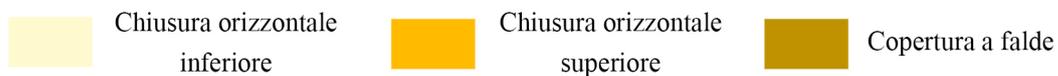
[Figura 20]: Stratigrafia del tetto a falde con struttura e tavolato in legno

Nella figura 14 viene riportata una sezione con la posizione delle diverse chiusure opache orizzontali.



[Figura 21]: Sezione fuori scala con indicazione delle chiusure opache orizzontali

Legenda:



4.1.2 - Involucro trasparente

Definizioni	Valori	Unità di misura
Tipologia di vetro	Singolo	-
Tipologia di telaio	Legno	-
Trasmittanza termica vetro + telaio U_{wtot}	4,90	W/m ² K
Fattore solare vetro $g_{gl,n}$	0,85	-
Fattore solare vetro + schermatura g_{gl+sh}	0,85	-
Fattore telaio Ff $\frac{sup_{telaio}}{sup_{tot,finestra}}$	0,20	-
Fattore di schermatura solare Fc	0,80	-
Fattore di riduzione per ombreggiamento Fs	0,90	-

Per quanto riguarda le chiusure verticali trasparenti nello stato di fatto presentano le stesse caratteristiche tecnologiche visibili nella tabella 16, mentre l'unico parametro variabile è la dimensione.

Nella tabella 17, invece, sono riportate le differenti tipologie di finestre suddivise per dimensione e orientamento.

[Tabella 16]: Caratteristiche tecnologiche delle chiusure trasparenti [47]

Tipologia	Numero totale	Dimensioni [cm]	Numero di finestre per esposizione			
			N/E	S/E	S/O	N/O
A	24	120x230	-	24	-	-
B	18	110x230	-	18	-	-
C	30	120x150	-	6	-	24
D	24	80x250	-	-	-	24
E	9	162x100	-	-	-	9
F	3	160x270	-	-	-	3
G	6	120x40	-	-	-	6

[Tabella 17]: Tipologie di chiusure trasparenti predefinite suddivise per dimensione e orientamento

4.1.3 Impianti tecnici dell'edificio

Il complesso è fornito da un impianto di riscaldamento centralizzato, un impianto per l'acqua calda sanitaria autonomo e uno per il raffrescamento autonomo. Non sono presenti né impianti di ventilazione né tecnologie per il recupero di calore.

Gli impianti sono composti da sottosistemi che si distinguono in:

- Sottosistema di generazione;
- Sottosistema di accumulo;
- Sottosistema di distribuzione;
- Sottosistema di regolazione;
- Sottosistema di emissione.

Impianto di riscaldamento

L'edificio è servito da un impianto di riscaldamento centralizzato ad acqua calda con radiatori in ambiente.

Il sottosistema di generazione è composto da un generatore standard posizionato all'interno di una centrale termica (interna all'edificio) alimentato a gas naturale. L'installazione è antecedente al 1996.

Il generatore standard è una caldaia tradizionale che, a differenza di quelle di nuova generazione, non sfrutta né il recupero del calore dei fumi prodotti durante il processo di combustione né quello prodotto dall'evaporazione dell'acqua riscaldata. La caldaia installata ha un rendimento, definito come il rapporto tra la quantità di energia prodotta dal sistema e la quantità di energia necessaria richiesta per produrla, pari a $\eta_{H,gn} = 0,85$.

Gli ausiliari elettrici del sottosistema di generazione (ovvero tutti gli elementi che consumano energia elettrica appartenenti a questo sottosistema), consumano una potenza $W_{aux,H,gn}$ pari a 542 W.

In questo edificio non è presente il serbatoio di accumulo quindi l'impianto è privo del relativo sottosistema.

Il sottosistema di distribuzione, ovvero l'insieme delle pompe e tubazioni che permettono la distribuzione del fluido per il riscaldamento degli ambienti, ha un rendimento pari a $\eta_{H,d} = 0,901$ ed è composto da dei montanti di distribuzione.

Questi non presentano un isolamento adeguato in quanto il periodo di realizzazione è antecedente al 1961.

Per quanto riguarda gli ausiliari elettrici appartenenti a questo sottosistema, come le pompe per la circolazione del fluido termovettore, hanno una velocità variabile con una potenza pari a $W_{po,H,d} = 902 \text{ W}$. In aggiunta presentano un fattore di carico FC pari a 1.

Il sottosistema di regolazione racchiude tutte quelle componenti che hanno un controllo sulla temperatura. Nel caso preso in esame è presente una tipologia di regolazione solo climatica che prevede una sonda esterna in grado di percepire la temperatura e mandare un feedback alla caldaia. Questo permette il corretto funzionamento della caldaia rispetto alle temperature esterne.

Del sottosistema di emissione, invece, fanno parte tutti quegli elementi che permettono al fluido vettore di scambiare calore con l'ambiente finale. In questo caso negli ambienti sono posti dei radiatori con efficienza $\eta_{H,e}$ pari a 0,925.

Impianto di produzione di acqua calda sanitaria (ACS)

Nell'edificio è presente un impianto per la produzione di ACS autonomo per ogni appartamento. Si precisa inoltre che l'acqua calda prodotta per uso domestico non entra in relazione con quella destinata al riscaldamento.

Il sottosistema di generazione per l'ACS è composto da un bollitore elettrico composto da una resistenza che porta l'acqua alla temperatura richiesta. Questo bollitore presenta un rendimento pari a $\eta_{w,gn} = 0,75$.

In questo impianto non è presente il sottosistema di accumulo, mentre per quanto riguarda il sottosistema di distribuzione, sprovvisto di ricircolo dell'acqua, è stato installato prima dell'entrata in vigore della legge 373/76. Ciò significa che non era sottoposto a nessun obbligo in quanto essi, assieme alle varie sanzioni applicabili per gli inadempienti, sono stati formulati dopo la suddetta legge.

Impianto di raffrescamento

Anche in questo caso l'edificio ha un impianto di raffrescamento autonomo in ogni alloggio composto da un circuito ad aria sprovvisto di una macchina predisposta al trattamento dell'aria.

Il sottosistema di generazione è composto da una macchina ad espansione diretta "aria-aria", ciò significa che sono raffreddate ad aria e che il fluido termovettore è l'aria stessa. Per il loro funzionamento sfruttano come vettore energetico l'energia elettrica.

L'unità di generazione, che comprime ed espande il vapore, presenta un rapporto di efficienza energetica (EER) differente in relazione al fattore di carico (F) che varia in base alle condizioni climatiche e alla dimensione della macchina installata.

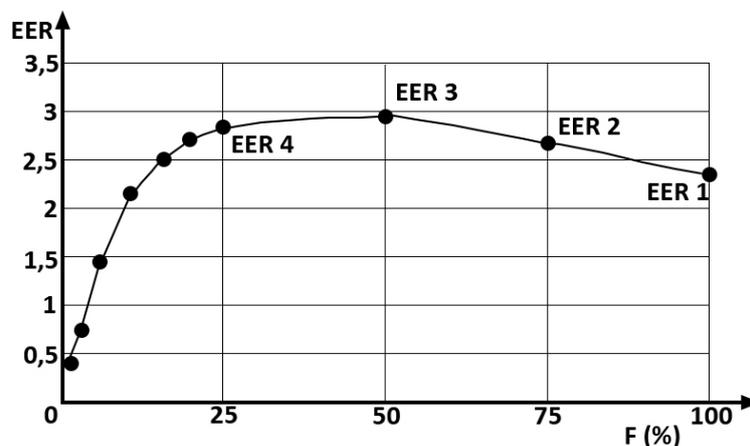
L'unità presente nello stato di fatto ha le seguenti caratteristiche:

EER = 2,35 con F = 100%

EER = 2,68 con F = 75%

EER = 2,94 con F = 50%

EER = 2,83 con F = 20%



[Grafico 9]: Andamento dei valori dell'EER in relazione al fattore di carico [47]

Il rapporto di efficienza energetica, a differenza del rendimento, può assumere anche valori superiori a 1. Questo perché, oltre a convertire il lavoro fornito in calore utile, sfrutta anche il calore proveniente da un'altra sorgente come ad esempio l'aria interna o esterna.

La potenza complessiva di tutti gli apparecchi installati relativa all'impianto di generazione è pari a $\Phi_{pn} = 36 \text{ kW}$.

Per quanto riguarda il sottosistema di regolazione, presenta un sistema di controllo nei singoli ambienti e una tipologia di regolazione di tipo on/off. Il rendimento del sottosistema è pari a $\eta_{C,rg} = 0,94$.

Il sottosistema di distribuzione è composto da unità autonome monoblocco di tipo split ad espansione diretta. Tutte le perdite dovute alla distribuzione del circuito frigorifero vengono comprese nel rendimento dell'unità ad espansione diretta.

Tale sottosistema presenta efficienza pari a $\eta_{C,e} = 0,97$. Gli ausiliari elettrici associati hanno complessivamente una potenza pari a $\Phi_{\Sigma vn,C,e} = 1200 \text{ W}$ [46].

4.2 Misure di efficientamento energetico dell'edificio

Gli interventi di efficientamento energetico, che verranno proposti, sono di varia natura e presenteranno delle caratteristiche via via maggiori per garantire al processo di ricerca dell'ottimo globale un parco interventi/costi ampio sul quale poter effettuare dei confronti in base alle prestazioni richieste, alle prestazioni energetiche fornite e al costo che questi elementi presentano sia per la loro installazione, che per la loro manutenzione e sostituzione.

Nella tabella 18 vengono rappresentate tutte le misure per l'efficientamento energetico (EEM) proposte e i loro obiettivi di prestazione (EEO) indicati da 1 a 5.

n.	EEM	Parametro	Simbolo	Livello di EEM					
				N	1	2	3	4	5
1	Isolamento termico della parete esterna: sistema a cappotto	Trasmittanza termica (W/m ² K)	U _w	5	SF*	0,36	0,30	0,28	0,19
2	Isolamento termico della parete esterna: isolamento nell'intercapedine	Trasmittanza termica (W/m ² K)	U _{w,c}	1	0,37	-	-	-	-
3	Isolamento termico della copertura	Trasmittanza termica (W/m ² K)	U _r	5	SF*	0,46	0,37	0,34	0,29
4	Isolamento termico del pavimento	Trasmittanza termica (W/m ² K)	U _f	5	SF*	0,63	0,52	0,48	0,32
5	Isolamento termico degli elementi trasparenti	Trasmittanza termica (W/m ² K)	U _w	5	SF*	2,30	1,90	1,40	1,10
6	Sistemi di schermatura solare	Fattore di trasmissione solare	-	3	SF*	Fissa	Mobile	-	-
7	Macchina frigorifera ad alta efficienza	Indice di efficienza energetica in condizioni di progetto	EER	2	SF*	3,00	-	-	-
8	Generatore di energia termica ad alta efficienza per il riscaldamento	Rendimento di generazione	η _{gn,H}	5	SF*	0,95 + radiatori	1,00 + fancoil	3,7 + fancoil	4,1 + fancoil
9	Generatore di energia termica ad alta efficienza per l'acqua calda sanitaria	Rendimento del sistema al 100% del carico	η _{gn,W}	3	SF*	0,93	1,00	-	-
10	Generatore ad alta efficienza combinato per riscaldamento e acqua calda sanitaria	Rendimento di generazione	η _{gn}	2	0,93 + radiatori	1,00 + fancoil	-	-	-
11	Pompa di calore per riscaldamento, raffreddamento	Coefficiente di prestazione	COP	-	-	-	-	-	-
		Indice di efficienza energetica	EER	-	-	-	-	-	-
12	Impianto solare termico	m ² di collettori solari	A _{coll}	5	SF*	20	30	50	70
13	Sistema fotovoltaico	Potenza di picco installata [kWp]	P _p	4	SF*	7,2	9	10,8	-
14	Sistema di recupero termico sulla ventilazione	Rendimento del recuperatore di calore	η _r	-	-	-	-	-	-
15	Sistema di regolazione avanzato	Rendimento di regolazione e controllo	η _{ctr}	4	SF*	1	2	3	-
16	Riqualificazione dell'impianto di illuminazione	Densità della potenza di illuminazione installata (W/m ²)	PN	-	-	-	-	-	-
17	Riqualificazione dell'impianto di illuminazione	Fattore di dipendenza dall'occupazione	F _O	-	-	-	-	-	-
		Fattore di dipendenza dal daylight	F _C	-	-	-	-	-	-
		Fattore di illuminamento costante	F _D	-	-	-	-	-	-

SF*: corrisponde allo stato di fatto

[Tabella 18]: Misure di efficienza energetica e loro obiettivi

4.3 Descrizione dei costi

Per l'analisi dei costi di investimento relativi alle misure di efficienza energetica si fa riferimento all'analisi condotta dal Comitato Termotecnico Italiano (CTI).

Tutti i costi provengono da:

- Analisi di mercato;
- Prezzari tipologici della regione Piemonte [28];
- Prezzario DEI (Tipografia del Genio Civile) dei Prezzi Informativi dell'Edilizia per le nuove costruzioni 2017 [27].

I costi provenienti dai prezzari sono maggiorati di un 30% rispetto a quelli di mercato.

Per questo motivo vengono già considerati comprensivi di IVA, spese di trasporto e installazione.

Il prezzario DEI invece fornisce i costi relativi all'involucro opaco e trasparente dividendo quelli sostenuti per le opere compiute, per i materiali e per altri costi relativi all'efficiamento energetico dell'edificio, come ponteggi ecc..

I costi relativi agli impianti, invece, non vengono forniti in maniera unitaria bensì attraverso alcune formule che tengono conto sia della potenza fornita che della dimensione.

Di seguito vengono descritti i vari costi relativi alle misure per l'efficienza energetica proposti precedentemente in tabella 18. Nei casi ove presente la dicitura SF, corrispondente allo sgato di fatto, il costo è pari a zero.

4.3.1 Costi relativi all'involucro opaco

La procedura di calcolo per gli EEM1, EEM2, EEM3, EEM4 è la medesima sebbene si abbiano alcune differenze, tra cui il costo dei materiali e alcuni costi aggiuntivi rispetto alla sola fornitura del materiale. Una volta stabiliti i valori minimi di trasmittanza da raggiungere, riassunti nella tabella 18, si deve calcolare lo spessore di isolante, espresso in centimetri, da inserire necessario al raggiungimento di tale limite.

Questo è ottenibile mediante la formula in figura 15:

$$S_{\text{iso}} = \lambda_{\text{iso}} * \left(\frac{1}{U_{\text{new}}} - \frac{1}{U} \right)$$

[Figura 22]: Formula per il calcolo dello spessore di isolante in relazione della trasmittanza richiesta

Dove:

- S_{iso} = spessore dell'isolante da inserire per raggiungere la trasmittanza richiesta [cm]
- λ_{iso} = conducibilità termica dell'isolante scelto [W/mK]
- U_{new} = trasmittanza che si vuole ottenere [W/m²K]
- U = trasmittanza del pacchetto presente senza interventi [W/m²K]

La tabella 19 riporta i valori in centimetri dello spessore di isolante da inserire per rispettare gli obiettivi di prestazione energetica imposti e il tipo di materiale utilizzato. La scelta del materiale verrà esplicitata nel paragrafo seguente.

n.	EEM	Parametro	Unità di misura	Livello di EEO					
				N	1	2	3	4	5
1	Isolamento termico della parete esterna: sistema a cappotto	Spessore di EPS	cm	5	0,00	6,50	8,40	9,20	14,90
2	Isolamento termico della parete esterna: isolamento nell'intercapedine	Spessore di EPS	cm	1	6,00	-	-	-	-
3	Isolamento termico della copertura	Spessore di lana di vetro	cm	5	0,00	6,74	9,02	10,04	12,22
4	Isolamento termico del pavimento	Spessore di EPS	cm	5	0	2,70	3,81	4,34	7,77

[Tabella 19]: Spessori di isolante necessari al raggiungimento del livello di EEO

Successivamente è necessario calcolare il prezzo al metro quadro di facciata dell'isolante scelto in base allo spessore richiesto.

Per questo calcolo si utilizza la formula rappresentata nella figura 16:

$$C_{\text{suf}} = P_b + P_{\text{cm,a}} * (S_i - S_b)$$

[Figura 23]: Formula per il calcolo del costo per la superficie utile di facciata

Dove:

- C_{suf} = costo per superficie utile di facciata [€/m²]
- P_b = prezzo base dell'isolante per i suoi centimetri base [€/m²]
- $P_{\text{cm,a}}$ = prezzo per ogni centimetro di isolante aggiunto [€/m²]
- S_i = spessore dell'isolante da installare [cm]
- S_b = spessore base dell'isolante [cm]

In seguito all'ottenimento del costo per unità di superficie è necessario moltiplicare quest'ultimo per la superficie totale da isolare.

Il risultato è il costo totale del materiale isolante.

A questo costo, qualora fosse necessario, si deve aggiungere quello della manodopera e di altri costi aggiuntivi. Sommandoli al costo totale, definito precedentemente, si ottiene il prezzo complessivo per l'installazione della misura scelta.

I costi di manutenzione e sostituzione, che avvengono in un secondo momento rispetto

all'installazione dell'elemento, verranno trattati nel paragrafo 4.3.4 e 4.3.5

Di seguito vengono riportate le tabelle contenenti i passaggi sopra citati per i diversi EEM ed i loro livelli di EEO.

EEM 1 – Isolamento a cappotto

Per l'isolamento a cappotto si è scelto di utilizzare l'EPS, o polistirene espanso. La motivazione di tale scelta (presa dal CTI) è data dalla sua economicità rispetto agli altri materiali isolanti considerati, per ottenere un costo totale minore possibile. Tale assunzione, ovvero la scelta del materiale più conveniente, viene applicata anche a tutti gli isolanti degli EEM successivi. La tabella 20 indica il prezzo al m² dell'EPS riferito ad uno spessore base e un prezzo, sempre al m², per ogni centimetro aggiunto, fino all'ottenimento dello spessore richiesto indicato nella tabella 19.

Parete esterna - Sistema a cappotto				
Materiale	Prezzo base [€/m²]	Spessore base [cm]	Prezzo ogni cm aggiunto [€/m²]	Conducibilità termica λ [W/mK]
EPS	63,12	3	2,49	0,034

[Tabella 20]: Prezzo dell'EPS per spessore base e per centimetro aggiunto EEM 1 [47]

Oltre al costo relativo al materiale sono da aggiungere anche i prezzi relativi al ponteggio.

- 7,14 €/m² di facciata per il montaggio, trasporto, scarico e avvicinamento;
- 2,67 €/m² di facciata per lo smontaggio;
- 5,74 €/m² di superficie del piano di lavoro che comprende la posa di tavole metalliche o in legno per una larghezza di un metro, una lunghezza pari al perimetro dell'edificio e moltiplicata per il numero dei piani.

Dal momento che si ipotizza l'installazione una cappottatura esterna, è necessario considerare anche il costo relativo alla tinteggiatura, attraverso l'applicazione di due strati di idropittura a base di resine silossaniche, oltre a quelli relativi alla preparazione dello strato di fondo. In totale i costi di finitura ammontano a 15,81 €/m² di facciata.

La tabella 21 riporta tutti i costi aggiuntivi per l'EEM1, mentre le seguenti vanno a rias-

sumere il procedimento di calcolo descritto all'inizio del paragrafo 4.3.1.

Costi aggiuntivi per edifici esistenti							
Intervento	Prezzo [€/m ²]	Superficie esterna opaca totale [m ²]	Perimetro dell'edificio [m]	Numero di piani [n]	Larghezza della superficie di lavoro del ponteggio [m]	Costo dei singoli interventi [€]	Costo totale [€]
Ponteggio (montaggio)	7,14	1179	-	-	-	8418,06	32506,57
Ponteggio (smontaggio)	2,67	1179	-	-	-	3147,93	
Ponteggio (per piano)	5,74	-	100,2	4	1	2300,59	
Tinteggiatura	15,81	1179	-	-	-	18639,99	

[Tabella 21]: Costi aggiuntivi per l'EEM 1

n.	EEM	Parametro	Unità di misura	Livello di EEO					
				N	1	2	3	4	5
1	Isolamento termico della parete esterna: sistema a cappotto	Costo per superficie unitaria di facciata	€/m ²	5	0	71,80	76,51	78,52	92,85

[Tabella 22]: Costo per superficie unitaria di facciata per l'EEM 1

n.	EEM	Parametro	Unità di misura	Livello di EEO					
				N	1	2	3	4	5
1	Isolamento termico della parete esterna: sistema a cappotto	Costo complessivo dell'isolante	€	5	0	84658,01	90203,24	92579,77	109465,62

[Tabella 23]: Costo complessivo dell'isolante per l'EEM 1

n.	EEM	Parametro	Unità di misura	Livello di EEO					
				N	1	2	3	4	5
1	Isolamento termico della parete esterna: sistema a cappotto	Costo complessivo isolante + costi aggiuntivi	€	5	0	117164,58	122709,81	125086,34	141972,19

[Tabella 24]: Costo complessivo dell'isolante più costi aggiuntivi per l'EEM 1

EEM 2 – Isolamento in intercapedine

Per quanto riguarda l'isolamento in intercapedine tra i materiali isolanti proposti è stato scelto sempre l'EPS per via della sua economicità. Come modalità di intervento è stata scelta la posa di pannelli in intercapedine.

Parete esterna - Intercapedine riempita con pannelli				
Materiale	Prezzo base [€/m ²]	Spessore base [cm]	Prezzo ogni cm aggiunto [€/m ²]	Conducibilità termica λ [W/mK]
EPS	10,58	3	2,04	0,033

[Tabella 25]: Prezzo dell'EPS per spessore base e per centimetro aggiunto EEM 2 [47]

I costi aggiuntivi per questo livello di efficienza energetica sono gli stessi del livello precedente visibili in tabella 21 ad esclusione della tinteggiatura che non risulta necessaria data la natura dell'intervento. Per questo motivo il costo totale va depurato del prezzo

della sola tinta. Successivamente vengono riportate le tabelle con riportati i risultati del calcolo del costo totale dell'intervento.

n.	EEM	Parametro	Unità di misura	Livello di EEO					
				N	1	2	3	4	5
2	Isolamento termico della parete esterna: isolamento nell'intercapedine	Costo per superficie unitaria di facciata	€/m ²	1	16,80	-	-	-	-

[Tabella 26]: Costo per superficie unitaria di facciata per l'EEM 2

n.	EEM	Parametro	Unità di misura	Livello di EEO					
				N	1	2	3	4	5
2	Isolamento termico della parete esterna: isolamento nell'intercapedine	Costo complessivo dell'isolante	€	1	19808,00	-	-	-	-

[Tabella 27]: Costo complessivo dell'isolante per l'EEM 2

n.	EEM	Parametro	Unità di misura	Livello di EEO					
				N	1	2	3	4	5
2	Isolamento termico della parete esterna: isolamento nell'intercapedine	Costo complessivo isolante + costi aggiuntivi	€	1	33674,59	-	-	-	-

[Tabella 28]: Costo complessivo dell'isolante più costi aggiuntivi per l'EEM 2

EEM 3 – Isolamento termico della copertura

Essendo il sottotetto un ambiente non riscaldato si è deciso di intervenire mediante isolamento dell'ultimo solaio. Il materiale isolante utilizzato in questo caso è la lana di vetro, che ha un costo al metro quadro inferiore rispetto agli altri materiali ipotizzati. Oltre alla tabella 29 che riporta i prezzi del materiale in relazione allo spessore, vengono riportate le tabelle riassuntive della metodologia di calcolo del costo totale. Per ottenerlo è stato necessario moltiplicare il valore in €/m² ottenuto, per l'area netta dell'ultimo solaio che risulta essere pari a 442,8 m².

Per questa misura non sussistono costi aggiuntivi.

Copertura - Isolamento termico del sottotetto				
Materiale	Prezzo base [€/m ²]	Spessore base [cm]	Prezzo ogni cm aggiunto [€/m ²]	Conducibilità termica λ [W/mK]
MW (glass)	6,71	5	0,65	0,043

[Tabella 29]: Prezzo dell'MW (glass) per spessore base e per centimetro aggiunto EEM 3

n.	EEM	Parametro	Unità di misura	Livello di EEO					
				N	1	2	3	4	5
3	Isolamento termico della copertura	Costo per superficie unitaria di facciata	€/m ²	5	0	9,14	10,62	11,29	12,70

[Tabella 30]: Costo per superficie unitaria di pavimento per l'EEM 3

n.	EEM	Parametro	Unità di misura	Livello di EEO					
				N	1	2	3	4	5
3	Isolamento termico della copertura	Costo complessivo dell'isolante	€	5	0	4048,14	4702,59	4997,73	5625,33

[Tabella 31]: Costo complessivo dell'isolante per l'EEM 3

EEM 4 – Isolamento termico del primo solaio

Per quanto riguarda l'isolamento termico del primo solaio, dato che le cantine sono un ambiente non riscaldato, si è optato per il posizionamento dell'isolante (EPS) all'intradosso, ovvero verso il lato inferiore della soletta. Come nel caso precedente, anche per l'EEM 4 non sussistono costi aggiuntivi. Nelle tabelle seguenti vengono riportati i costi del materiale (tabella 32) e i risultati della procedura di calcolo del costo totale (tabelle 33 e 34).

Primo solaio - Isolamento dell'intradosso				
Materiale	Prezzo base [€/m ²]	Spessore base [cm]	Prezzo ogni cm aggiunto [€/m ²]	Conducibilità termica λ [W/mK]
EPS	53,72	3	2,04	0,033

[Tabella 32]: Prezzo dell'EPS per spessore base e per centimetro aggiunto EEM 4 [47]

n.	EEM	Parametro	Unità di misura	Livello di EEO					
				N	1	2	3	4	5
4	Isolamento termico del pavimento	Costo per superficie unitaria di facciata	€/m ²	5	0	53,11	55,37	56,45	63,46

[Tabella 33]: Costo per superficie unitaria di pavimento per l'EEM 4

n.	EEM	Parametro	Unità di misura	Livello di EEO					
				N	1	2	3	4	5
4	Isolamento termico del pavimento	Costo complessivo dell'isolante	€	5	0	23515,89	24516,81	24994,53	28099,66

[Tabella 34]: Costo complessivo dell'isolante per l'EEM 4

4.3.2 Costi relativi all'involucro trasparente

EEM 5 – Isolamento termico degli elementi trasparenti

I costi di seguito analizzati fanno riferimento a finestre composte da un vetro camera basso emissivo con Argon e telaio in legno a due battenti.

Per avere un più ampio range di costi e trasmittanze, si è deciso di utilizzare i prezzi medi di mercato reperiti e, mediante l'interpolazione lineare di questi valori, si è ottenuta la

formula necessaria a ricavare i costi per elementi aventi trasmittanze fino a 5 W/m²K. Per queste ultime non si sono trovati dei prezzi associati in quanto i serramenti in commercio aventi tali caratteristiche non vengono più prodotti.

Per considerare tutte la possibilità di serramento sia per edifici di nuova costruzione che non, sono stati selezionati elementi con un range di trasmittanza da 1,1 W/m²K fino a 5 W/m²K.

Più la trasmittanza è bassa e più ovviamente il costo ricavato mediante la formula risulta basso. Per non arrivare a valori inverosimili si è optato per stabilire un prezzo minimo di 250 €/m² per tutti quegli elementi che ne presentavano uno minore per via dell'interpolazione.

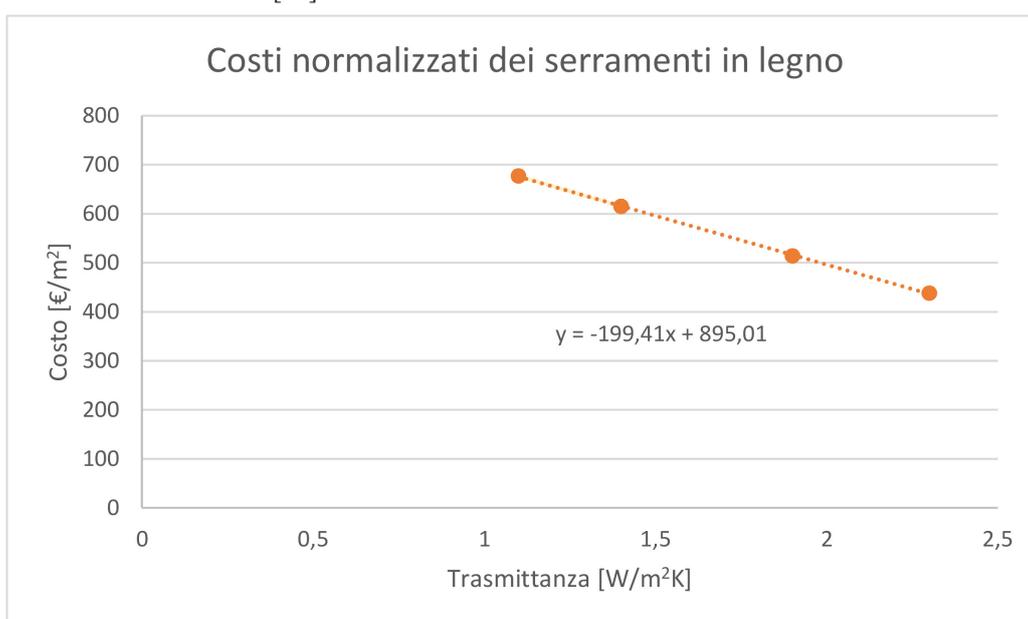
Di seguito viene riportata la tabella 35 contenente i costi dei serramenti con telaio in legno, la tabella 36 elencante i costi aggiuntivi per la posa in opera e il grafico 10 contenente l'equazione utilizzata per effettuare l'interpolazione lineare.

Serramenti	
Trasmittanza termica [W/m ² K]	Telaio in legno [€/m ²]
1,1	677,00
1,4	615,00
1,9	514,00
2,3	438,00

[Tabella 35]: Costo del serramento in relazione alla trasmittanza [47]

Costi aggiuntivi		
Posa in opera [€/m ²]	Superficie di serramento [m ²]	Costo totale della posa [€]
50	244,20	12210

[Tabella 36]: Costi aggiuntivi EEM 5 [47]



[Grafico 10]: Interpolazione lineare dei costi di mercato EEM 5

Una volta definiti i costi per unità di superficie (tabella 37) rispettando le trasmittanze imposte in tabella 18 per l'EEM 5, si procede con il calcolo sommando i costi aggiuntivi (tabella 38) e moltiplicandoli per i m² di facciata in maniera da ottenere il costo totale (tabella 39).

n.	EEM	Parametro	Unità di misura	Livello di EEO					
				N	1	2	3	4	5
5	Isolamento termico degli elementi trasparenti	Costo per unità di superficie	€/m ²	5	0	438,00	514,00	615,00	677,00

[Tabella 37]: Costi per unità di superficie di serramento EEM 5

n.	EEM	Parametro	Unità di misura	Livello di EEO					
				N	1	2	3	4	5
5	Isolamento termico degli elementi trasparenti	Costo totale elementi trasparenti + posa per unità di superficie	€/m ²	5	0	488,00	564,00	665,00	727,00

[Tabella 38]: Costi per unità di superficie di serramento più posa in opera EEM 5

n.	EEM	Parametro	Unità di misura	Livello di EEO					
				N	1	2	3	4	5
5	Isolamento termico degli elementi trasparenti	Costo totale elementi trasparenti + posa	€	5	0	119169,60	137728,80	162393,00	177533,40

[Tabella 39]: Costo totale del serramento più posa in opera EEM 5

EEM 6 – Sistemi di schermatura solare

Sono stati presi in considerazione due livelli di EEO (oltre allo stato di fatto che non le prevede) che consistono nell'installazione di schermature fisse e mobili.

Per le schermature solari fisse si è deciso di optare per dei frangisole con spessore compreso tra 200 e 300 mm in lamiera in alluminio presso-piegata completi di struttura portante realizzata con bracci di supporto delle pale in tubolare di alluminio, fissati a staffe in acciaio zincato. Il costo di questi elementi varia soltanto in relazione all'altezza dell'elemento.

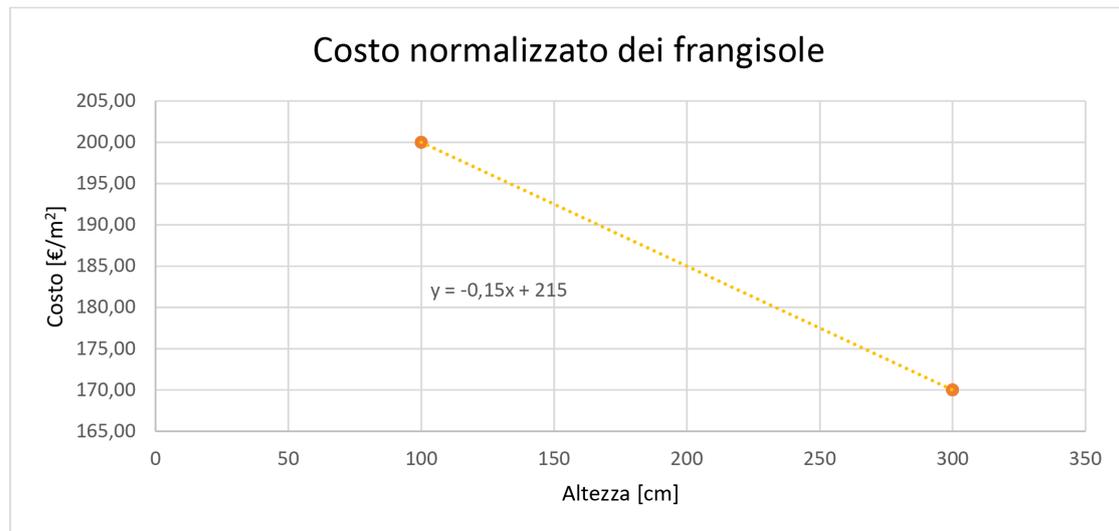
Dato che il livello di EEO richiede un singolo valore di costo, non è possibile assegnare un prezzo a tutti i tipi di finestre presenti nell'edificio e si procede quindi mediante un calcolo medio del costo ponderato sull'area complessiva occupata dalle singole tipologie rispetto al totale, corrispondente a 244,20 m².

I passaggi per ottenere il costo ponderato medio sono i seguenti:

Frangisole in alluminio		
Larghezza [mm]	Altezza [cm]	Costo [€/m ²]
200 - 300	100	200,00
	300	170,00

Il primo passaggio consiste nell'interpolazione lineare dei costi reperiti sul mercato (tabella 40) per ottenere un'equazione che permetta di stabilire i costi relativi alle dimensioni di serramento presenti nello stato di fatto (grafico 11).

[Tabella 40]: Valori di mercato per i frangisole [47]



[Grafico 11]: Interpolazione lineare dei costi di mercato EEM 6

Ricavata questa formula che permette di ottenere il costo relativo a una qualsiasi altezza di frangisole inserita, si ottengono i singoli costi in €/m² per tutte le tipologie di finestra. Successivamente per calcolare il valore medio ponderato si utilizza la formula descritta nella figura 17.

$$C_{m,p} = \frac{(C_{f1} * A_{f1}) + (C_{f2} * A_{f2}) + \dots + (C_{fn} * A_{fn})}{(A_{f1} + A_{f2} + \dots + A_{fn})}$$

[Figura24]: Formula per il calcolo del costo medio ponderato per i frangisole

Dove:

$C_{m,p}$ = costo medio ponderato [€/m²];

C_{f1} = costo finestra tipologia 1 [€/m²];

A_{f1} = area finestra tipologia 1 [m²];

C_m = costo finestra n-esima [€/m²];

A_m = area finestra n-esima [m²];

Nella tabella 41 vengono riportati i costi per le singole finestre, il costo medio ponderato e il costo totale complessivo.

Tipo	Altezza [cm]	Numero [n]	Area delle finestre [m ²]	Costo finestre [€/m ²]	Costo medio ponderato [€/m ²]	Costo totale [€]
A	230	24	66,24	180,50	183,75	44870,73
B	230	18	45,54	180,50		
C	150	30	54,00	192,50		
D	250	24	48,00	177,50		
E	100	9	14,58	200,00		
F	270	3	12,96	174,50		
G	40	6	2,88	209,00		

[Tabella 41]: Costo medio ponderato e costo totale del frangisole per tutte le tipologie di finestra

Per quanto riguarda le schermature solari mobili, invece, si è optato per l'utilizzo di veneziane composte da lamelle di spessore pari a 50 mm, in alluminio verniciato a fuoco, complete di cassonetto in lamiera zincata e verniciata, nastri di nylon per il raccoglimento e asta in plastica per la movimentazione. Il costo varia a seconda dell'altezza del serramento.

Come per i frangisole, è richiesto un solo valore di costo che sia ponderato per tutte le tipologie di finestra in relazione all'area occupata. Il procedimento è simile a quello svolto per i frangisole con alcune differenze.

Di seguito viene riportato a titolo esemplificativo la metodologia per il calcolo del costo della tipologia A di finestre che risulta essere il medesimo per tutte le altre tipologie.

Si comincia calcolando l'equazione lineare che mette in relazione i costi e le altezze reperite da indagini di mercato visibili in tabella 42.

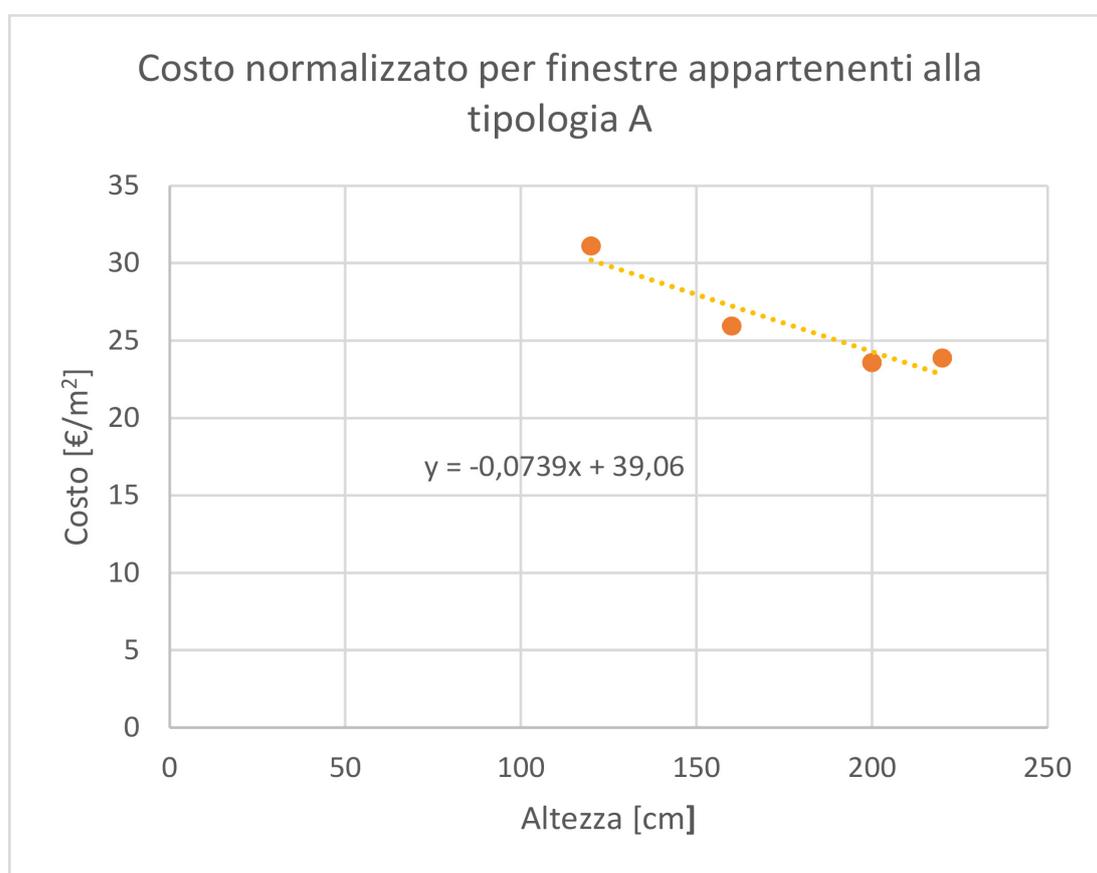
Elementi schermanti a veneziana		
Altezza finestra [cm]	Spessore lamelle [mm]	Costo [€/m ²]
120	50	- 0,0731*B + 31,755
160		- 0,0484*B + 31,775
200		- 0,0453*B + 29,022
220		- 0,066*B + 31,794

[Tabella 42]: Costi e altezze di mercato per elementi schermanti a veneziana [47]

Mediante l'utilizzo di queste equazioni che permettono il calcolo dei costi, che presentano come unica variabile la base della finestra, si utilizza come valore in sostituzione della B, la base della finestra di tipologia A ottenendo i costi relativi alle altezze indicate visibili in tabella 42.

I valori di costo ottenuti, relativi alle altezze standard, sono stati interpolati come visibile nel grafico 12, al fine di ottenere una equazione lineare dipendente unicamente dall'altezza dell'infisso.

A questo punto si sostituisce la variabile x dell'equazione con l'altezza della tipologia di finestra A e si ottiene così il costo relativo ad essa (tabella 43).



[Grafico 12]: Interpolazione lineare dei costi per l'installazione di veneziane per finestre di tipologia A

Finestre tipologia A				
Altezza [cm]	Base tipologia A [cm]	Costo relativo alla base della tipologia A [€/m²]	Altezza tipo A [cm]	Costo tipo A [€/m²]
120	120	31,105	230	22,063
160		25,947		
200		23,586		
220		23,874		

[Tabella 43]: Costo delle veneziane per la tipologia di finestra A

Questi passaggi devono essere ripetuti per tutte le tipologie di chiusure verticali trasparenti presenti.

Una volta ottenuti tutti i valori di costo, si opera mediante l'equazione del costo medio ponderato visibile in figura 24, per ottenere il costo medio unitario per le schermature mobili.

Successivamente occorre moltiplicare il valore ottenuto per l'area totale finestrata ricavando così il prezzo complessivo. Questi passaggi sono riassunti nella tabella 44.

Costo medio ponderato							
Tipo	Base finestra [cm]	Altezza finestra [cm]	Numero finestre [n]	Costo per tipologia [€/m ²]	Area delle finestre [m ²]	Costo medio [€/m ²]	Costo totale [€]
A	120	230	24	22,06	66,24	23,88	5832,29
B	110	230	18	22,58	45,54		
C	120	150	30	27,98	54,00		
D	80	250	24	22,58	48,00		
E	162	100	9	28,88	14,58		
F	160	270	3	17,20	12,96		
G	120	40	6	36,10	2,88		

[Tabella 44]: Costo medio ponderato per l'installazione di schermature mobili EEM 6

4.3.3 - Costi relativi agli impianti tecnici

EEM 7 – Installazione di macchina frigorifera

Per questo edificio si ipotizza l'installazione di un chiller ad alta efficienza. La macchina frigorifera scelta è un sistema a motocondensante esterno per sistemi di condizionamento autonomo multisplit a pompa di calore funzionante con R410A, fatto di lamiera zincata verniciata. Presenta un compressore ermetico rotativo ad alta efficienza, batteria di scambio termico e ventilatore elicoidale ad espulsione orizzontale, collegabile a più unità interne.

Il chiller è composto da 24 sistemi multisplit da 5,2 kW di potenza, aventi un costo normalizzato di 470,25 €/kW.

Questo costo deve essere moltiplicato sia per i kW di ogni multisplit che per il numero di unità installate, ovvero una per appartamento. Ad esso va sommata l'incidenza della manodopera sulla tecnologia che risulta essere del 10% per gli edifici esistenti.

Nella tabella 45 viene riportato il procedimento per il calcolo dei costi unitari dell'elemento più la manodopera.

Condizionatori autonomi multisplit									
Unità	Potenza [kW _i]	EER [-]	Costo normalizzato [€/kW _i]	Costo per unità [€]	Numero unità [n]	Manodopera [%]	Costo manodopera per unità [€]	Costo elemento + manodopera per unità [€]	Costo totale [€]
Esterna + interna	5,20	3	470,25	2445,30	24	10	244,53	2689,83	64555,92

[Tabella 45]: Costo totale per le macchine frigorifere multisplit autonome

EEM 8 – Generatore di calore per il riscaldamento centralizzato

In questa misura viene considerata l'ipotesi di sostituzione del generatore esistente con altri aventi maggior efficienza.

Si valuta l'installazione di:

- Una caldaia tradizionale a bassa temperatura con sistema di emissione a radiatori;
- Una caldaia a condensazione con sistema di emissione a fancoil;
- Due PDC con COP differenti con sistema di emissione a fancoil.

Come caldaia tradizionale ne è stata scelta una murale ad alto rendimento (0,95) da esterno di classe C. Utilizza come vettore energetico il gas metano o gasolio e presenta una classe 2 relativa alle emissioni NO_x, ha una camera aperta a tiraggio naturale, una valvola per il gas, un pressostato per l'acqua, un circolatore, una valvola deviatrice, una valvola di sicurezza protetta dal gelo fino a temperature di – 15 °C e alimentazione elettrica 230 V-1-50 Hz in riscaldamento.

I costi sono stati valutati in base alla potenza della caldaia e sono visibili in tabella 46.

Con generatori aventi potenza di 24 kW (livello minimo ammissibile) il costo è unitario e corrisponde a 840 €. Per caldaie aventi potenza superiore a 24 kW si moltiplica il costo unitario di 35 €/kW per la potenza nominale del generatore. I costi di manodopera sono assunti pari al 10% della tecnologia.

Caldaia tradizionale a bassa temperatura					
Potenza caldaia [kW]	Costo normalizzato [€/kW]	Costo generatore [€]	Manodopera [%]	Costo manodopera [€]	Costo totale generatore + manodopera [€]
151,70	35,00	5309,50	10	530,95	5840,45

[Tabella 46]: Costo totale per caldaia tradizionale a bassa temperatura

Al costo del generatore va aggiunto quello relativo ai sistemi di emissione, ovvero i radiatori, per i quali si assume un costo unitario di 118,4 €/kW per potenze installate maggiori o uguali a 2,2 kW.

Radiatori			
Potenza [kW]	Costo normalizzato [€/kW]	Costo manodopera [%]	Costo totale [€]
151,70	118,40	incluso	17961,28

[Tabella 47]: Costo complessivo dei sistemi di emissione a radiatori

Per la caldaia a condensazione ne è stata considerata una di taglia grande ad alto rendimento (1,00) di classe A.

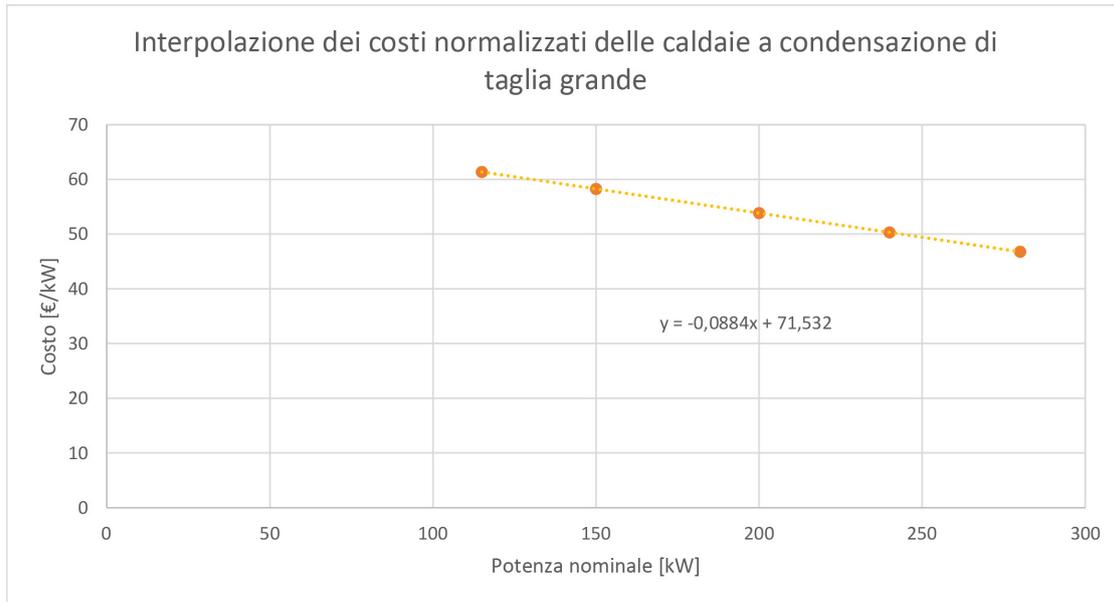
Essa presenta le seguenti caratteristiche: predisposizione per l'installazione a cascata, scambiatore termico in alluminio-silicio, bruciatore in acciaio inox avente superficie composta da fibra metallica per la combustione del metano con bassa emissione di sostanze nocive, ventilatore a velocità costante alimentato a corrente continua, controllo dell'aria comburente attraverso un sensore di pressione differenziale, regolatore gas/aria per ottimizzare la combustione e modulare la potenza, funzionamento automatico del bruciatore, accensione ad alta tensione e controllo della fiamma di ionizzazione, pannello di comando della caldaia integrato, dispositivo di sicurezza e microprocessore, valvola del gas combinata da due valvole.

Per il costo normalizzato della caldaia si è fatto riferimento alla relazione tra costo nominale e potenza nominale del generatore.

I valori di mercato reperiti sono stati interpolati per ottenere una equazione in grado di stabilire il costo normalizzato per qualsiasi potenza richiesta. In aggiunta sono state fatte delle assunzioni per non ottenere costi eccessivamente alti o eccessivamente bassi per potenze inferiori a 17 kW o superiori a 300 kW.

In particolare, per il valore minimo di 17 kW, si assume un costo di 1780 €, per valori compresi tra 17 kW e 300 kW (ovvero il nostro caso) si fa riferimento all'equazione che mette in relazione potenza nominale e taglia del generatore visibile nel grafico 13, mentre per valori superiori a 300 kW si assume un valore di 45 €/kW.

Per la manodopera si assume un valore del 10% sul prezzo della tecnologia.



[Grafico 13]: Interpolazione lineare dei costi in relazione alle potenze per caldaie a condensazione di taglia grande

Successivamente è stato calcolato il costo totale del generatore (tabella 48) e i costi dei sistemi di emissione a fancoil (tabella 49).

Caldaia a condensazione di taglia grande					
Potenza caldaia [kW]	Costo normalizzato [€/kW]	Costo generatore [€]	Manodopera [%]	Costo manodopera [€]	Costo totale generatore + manodopera [€]
151,70	57,24	8683,31	10,00	868,33	9551,64

[Tabella 48]: Costo totale della caldaia a condensazione di taglia grande

Fancoil			
Potenza [kW]	Costo normalizzato [€/kW]	Costo manodopera [%]	Costo totale [€]
151,70	8,53	incluso	1294,00

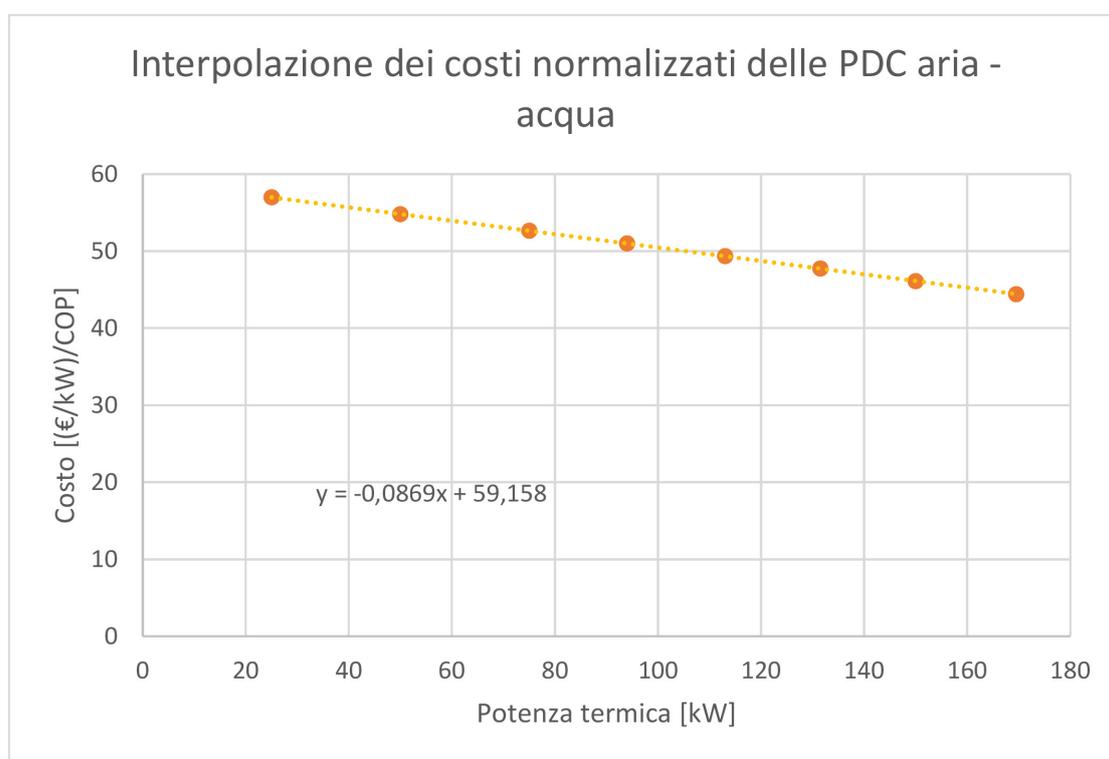
[Tabella 49]: costo dei sistemi di emissione - Fancoil

Le due pompe di calore aria-acqua considerate sono composte dagli stessi elementi ma presentano due COP differenti, più precisamente di 3,7 e 4,1.

L'unità considerata è una macchina con unità motocondensante esterna a flusso di refrigerante variabile con recupero di calore, condensata ad aria dotata di compressori ermetici del tipo scroll ad inverter, variazione automatica e dinamica della temperatura di

evaporazione/condensazione del refrigerante, riscaldamento continuo durante la fase di sbrinamento, delle funzioni di carica e verifica automatica del quantitativo di refrigerante presente all'interno dell'impianto, possibilità di alimentazione mediante circuito frigorifero a due o tre tubi in rame di unità interne di diversa tipologia con una potenzialità totale sino al 200% della potenzialità totale dell'unità esterna, trasmissione dati mediante cavo di bus del tipo bipolare non polarizzato, struttura esterna in lamiera zincata con verniciatura acrilica, griglie di ripresa aria batterie disposte sui lati maggiori della macchina con espulsione dall'alto mediante uno o più ventilatori elicoidali a basso numero di giri equilibrati dinamicamente e staticamente.

Come per le caldaie a condensazione per trovare il costo normalizzato rispetto alla potenza e al COP, si è utilizzata l'equazione di regressione dei costi rilevati sul mercato visibile nel grafico 14.



[Grafico 14]: Interpolazione dei costi rilevati sul mercato in relazione alla potenza

Il costo del generatore è stato ottenuto moltiplicando il costo normalizzato per il coefficiente di prestazione e per la potenza della PDC (tabella 50).

Ad essi, per ottenere il costo totale, viene sommato il costo della manodopera pari al 10% della tecnologia per edifici esistenti.

Pompa di calore aria - acqua						
Potenza Pdc [kW]	Coefficiente di prestazione [-]	Costo normalizzato [€/kW*COP]	Costo generatore [€]	Manodopera [%]	Costo manodopera [€]	Costo totale generatore + manodopera [€]
151,70	3,70	45,98	25805,46	10,00	2580,55	28386,01
151,70	4,10	45,98	28595,24	10,00	2859,52	31454,76

[Tabella 50]: Costo totale delle pompe di calore aria-acqua per il riscaldamento

Per quanto riguarda i terminali di emissione (fancoil) presentano gli stessi costi indicati nella tabella 49.

EEM 9 – Generatore di calore per la produzione di ACS

In relazione a quanto richiesto nell'EEM 9, oltre al mantenimento del generatore esistente, si fa riferimento all'installazione di due caldaie: la prima tradizionale a bassa temperatura e la seconda a condensazione.

Entrambe presentano alte efficienze, rispettivamente pari a 0,93 e a 1.

La descrizione dei componenti utilizzati è la medesima delle caldaie per il riscaldamento definite nell'EEM 8.

Per quanto riguarda la caldaia tradizionale è stato scelto un generatore avente una potenza pari a 1,9 kW.

Seppure essendo questa la potenza necessaria, per il calcolo dei costi è stato posto come livello minimo ammissibile una caldaia avente potenza di 10 kW. Per questo motivo il costo del generatore risulta essere pari a 350 €/u.a., ovvero il costo unitario di 35 €/kW moltiplicato per i 10 kW minimi.

La manodopera, pari al 10% del costo della tecnologia, viene sommata al costo del generatore. Il risultato ottenuto va successivamente moltiplicato per il numero di appartamenti in quanto i generatori sono autonomi per ogni singolo alloggio. Il procedimento è riassunto nella tabella 51.

Caldaia tradizionale a bassa temperatura							
Potenza caldaia [kW]	Costo normalizzato [€/kW]	Unità abitative [n]	Costo generatore per unità abitativa [€/u.a.]	Manodopera [%]	Costo manodopera per unità abitativa [€/u.a.]	Costo totale generatore + manodopera per unità abitativa [€/u.a.]	Costo totale [€]
1,90	35,00	24	350,00	10	35	385	9240,00

[Tabella 51]: Costo totale della caldaia tradizionale a bassa temperatura per ACS

La procedura per il calcolo del costo totale della caldaia a condensazione è la medesima di quella utilizzata per la caldaia tradizionale, con la sola differenza del costo normalizzato, che in questo caso è pari a 105 €/kW. Esso va moltiplicato per la potenza minima ammissibile che equivale a 10 kW.

Caldaia a condensazione							
Potenza caldaia [kW]	Costo normalizzato [€/kW]	Unità abitative [n]	Costo generatore per unità abitativa [€/u.a.]	Manodopera [%]	Costo manodopera per unità abitativa [€/u.a.]	Costo totale generatore + manodopera per unità abitativa [€/u.a.]	Costo totale [€]
1,90	105,00	24	1050,00	10	105	1155	27720,00

[Tabella 52]: Costo totale della caldaia a condensazione per ACS

EEM 10 – Generatore di calore combinato per riscaldamento e produzione di ACS

I due livelli di efficienza energetica considerati sono relativi all'installazione di due caldaie a condensazione combinate per il riscaldamento e la produzione di ACS aventi però due efficienze e due sistemi di emissione differenti. La prima ha una efficienza di 0,93 con sistema di emissione a radiatori, la seconda invece ha una efficienza di 1,00 e sistemi di emissione a fancoil.

Le caratteristiche tecniche della caldaia sono le medesime: caldaia murale a condensazione ad alto rendimento di classe A con scambiatore termico e bruciatore in acciaio inox avente superficie composta da fibra metallica per la combustione del metano con bassa emissione di sostanze nocive, ventilatore a velocità variabile alimentato a corrente continua, regolatore gas/aria per ottimizzare la combustione, valvola del gas combinata, modulazione della potenza, funzionamento automatico del bruciatore, accensione ad alta tensione e controllo della fiamma di ionizzazione, pannello di comando della caldaia integrato, dispositivo di sicurezza e microprocessore, in opera esclusi circolatori, vaso d'espansione e collegamenti elettrici.

Il calcolo dei costi per le due caldaie è il medesimo in quanto esso dipende non dall'efficienza ma dalla potenza installata, che è la stessa per entrambi i generatori.

Il costo normalizzato di 94 €/kW, ottenuto ponendo come potenza minima ammissibile 25 kW, è stato moltiplicato per i kW di ogni caldaia autonoma inserita e moltiplicata per il numero delle caldaie. In questo caso la manodopera è inclusa. Il procedimento è riassunto nella tabella 53, mentre i costi dei sistemi di emissione annessi sono riportati in tabella 54 e 55.

Cladaia a condensazione					
Potenza caldaia [kW]	Costo normalizzato [€/kW]	Unità abitative [n]	Costo generatore per unità abitativa [€/u.a.]	Manodopera [%]	Costo totale [€]
6,30	94,00	24	592,20	Inclusa	14212,8

[Tabella 53]: Costo delle caldaie a condensazione autonome EEM 10

Radiatori			
Potenza [kW]	Costo normalizzato [€/kW]	Costo manodopera [%]	Costo totale [€]
6,30	118,40	incluso	745,92

[Tabella 54]: Costo radiatori EEM 10

Fancoil			
Potenza [kW]	Costo normalizzato [€/kW]	Costo manodopera [%]	Costo totale [€]
6,30	83,75	incluso	527,62

[Tabella 55]: Costo fancoil EEM 10

EEM 12 – Impianto solare termico

Nella definizione dei livelli di EEO per l'impianto solare termico è stato deciso, oltre allo stato di fatto dove non sono presenti, di inserire 4 livelli aggiuntivi di collettori. Essi, implementati nell'impianto di produzione di ACS, sono composti da collettori solari a tubi sottovuoto in acciaio inox, un bollitore per l'acqua a doppio scambiatore e doppia vetrificazione interna e rivestimento esterno in PVC e poliuretano. Da uno scambiatore in acciaio al carbonio, una stazione solare premontata, una centralina per la gestione del circuito solare e una valvola miscelatrice termostatica.

I costi relativi all'installazione di questo impianto sono stati reperiti attraverso ricerche di mercato effettuate dal CTI. Per superfici di collettore maggiori di 10 m² (ovvero tutti e 4 i livelli di EEO) il prezzo è il medesimo e corrisponde a 804 €/m² comprensivo di manodopera e accumulo.

Per il calcolo del costo totale è sufficiente moltiplicare i metri quadri di pannello presenti nel livello di EEO stabilito per l'EEM 12 (tabella 18) per 804 €/m². I risultati ottenuti sono riportati nella tabella 56.

n.	EEM	Parametro	Unità di misura	Livello di EEO					
				N	1	2	3	4	5
12	Impianto solare termico	Costo dell'impianto	€	5	0	16080	24120	40200	56280

[Tabella 56]: Costo totale dei collettori solari EEM 12

EEM 13 – Impianto solare fotovoltaico

Nell'EEM 13 sono presenti 4 livelli di EEO. Il primo che corrisponde allo stato di fatto avrà un costo pari a zero, mentre per i restanti livelli si è optato per l'inserimento di pannelli in silicio multi-cristallino posizionati in copertura, comprensivi di inverter e quadro di controllo.

I costi, sempre reperiti tramite indagini di mercato, sono relativi alle potenze installate. In questo caso, essendo la potenza di picco superiore a 5 kW, è stato stabilito un costo unitario di 1250 €/kW.

Il procedimento per l'ottenimento del costo globale, riassunto nella tabella 57, si compone di una moltiplicazione tra il livello di EEO indicato in tabella 18 e il costo unitario in €/kW precedentemente indicato.

n.	EEM	Parametro	Unità di misura	Livello di EEO					
				N	1	2	3	4	5
13	Sistema fotovoltaico	Costo dell'impianto	€	4	0	9000	11250	13500	-

[Tabella 57]: Costo totale per l'installazione del sistema fotovoltaico EEM 13

EEM 15 – Sistema di regolazione

I sistemi di regolazione considerati sono di 3 tipologie altre allo stato di fatto:

- Di zona: posizionamento di un termostato per ogni zona con regolazione a due posizioni, per montaggio a parete in cassetta con grado di protezione IP30, con manopola di regolazione del set-point su scala 5 – 30 °C, isteresi 0,5 k, ed elemento sensibile bimetallico, alimentazione 230 V-1-50 Hz, con commutazione estate inverno.
- Ambiente: posizionamento di un termostato per ogni ambiente con regolazione a due posizioni, per montaggio a parete in cassetta con grado di protezione IP30, con manopola di regolazione del set-point su scala 5 – 30 °C, isteresi 5 k, alimentazione 230 V-1-50 Hz, con commutazione estate inverno.
- Zona + climatica: posizionamento di una sonda di temperatura ambiente da esterno in contenitore con grado di protezione IP54, per montaggio a parete, campo di misura – 50-80 °C. in questo caso va considerato anche un costo aggiuntivo di 34,30 € per unità immobiliare rispetto al costo della tecnologia.

In tabella 58 vengono riportati i costi normalizzati, i costi aggiuntivi, l'incidenza della manodopera, il costo per unità immobiliare e il costo totale dell'intervento.

Sistema di regolazione avanzato						
Regolazione e controllo	Costo normalizzato [€/unità immobiliare]	Costi aggiuntivi [€/unità immobiliare]	Manodopera [%]	Unità immobiliari	Costo per unità immobiliare sistema + manodopera [€/unità immobiliare]	Costo totale [€]
Di zona	47,60	-	10	24	52,36	1256,64
Ambiente	95,20	-			104,72	2513,28
Zona + climatica	49,00	34,30			88,20	2116,80

[Tabella 58]: Costo totale per l'installazione dei sistemi di regolazione EEM 15

Nella tabella 59 vengono riassunti tutti i costi di installazione per gli EEM e dei loro livelli di EEO.

n.	EEM	Parametro	Simbolo	N	Livello di EEO				
					1	2	3	4	5
1	Isolamento termico della parete esterna: sistema a cappotto	Costo isolante + costi aggiuntivi	€	5	0,00	117164,58	122709,81	125086,34	141972,19
2	Isolamento termico della parete esterna: isolamento nell'intercapedine	Costo isolante + costi aggiuntivi	€	1	33674,59	-	-	-	-
3	Isolamento termico della copertura	Costo isolante	€	5	0,00	4048,14	4702,59	4990,73	5625,33
4	Isolamento termico del pavimento	Costo isolante	€	5	0,00	23515,89	24516,81	24994,53	28099,66
5	Isolamento termico degli elementi trasparenti	Costo elementi trasparenti + posa	€	5	0,00	119169,60	137728,80	162393,00	177533,40
6	Sistemi di schermatura solare	Costo sistemi di schermatura fissi e mobili	€	3	0,00	44870,73	5832,29	-	-
7	Macchina frigorifera ad alta efficienza	Costo elementi + manodopera	€	2	0,00	64555,92	-	-	-
8	Generatore di energia termica ad alta efficienza per il riscaldamento	Costo generatore + manodopera	€	5	0,00	5840,45	9551,64	28386,01	31454,76
		Costo radiatori e fancoil			0,00	17961,28	1294,00	1294,00	1294,00
9	Generatore di energia termica ad alta efficienza per l'acqua calda sanitaria	Costo generatore + manodopera	€	3	0,00	9240,00	27720,00	-	-
10	Generatore ad alta efficienza combinato per riscaldamento e acqua calda sanitaria	Costo generatore + manodopera	€	2	14212,80	14212,80	-	-	-
		Costo radiatori e fancoil			745,92	527,62	-	-	-
11	Pompa di calore per riscaldamento, raffrescamento e acqua calda sanitaria	-	-	-	-	-	-	-	-
12	Impianto solare termico	Costo dell'impianto	€	5	0,00	16080,00	24120,00	40200,00	56280,00
13	Sistema fotovoltaico	Costo dell'impianto	€	4	0,00	9000,00	11250,00	13500,00	-
14	Sistema di recupero termico sulla ventilazione	-	-	-	-	-	-	-	-
15	Sistema di regolazione avanzato	Costo sistema + manodopera	€	4	0,00	1256,64	2513,28	2116,80	-
16	Riqualificazione dell'impianto di illuminazione	-	-	-	-	-	-	-	-
17	Riqualificazione dell'impianto di illuminazione	-	-	-	-	-	-	-	-
		-	-	-	-	-	-	-	-
		-	-	-	-	-	-	-	-

[Tabella 59]: Sintesi di tutti i costi di installazione

Ai costi di installazione si aggiungono però altre due voci di costo relative alla sostituzione degli elementi la cui vita utile risulta essere inferiore al periodo di calcolo e quelli

relativi alla manutenzione degli elementi presenti allo stato di fatto o di successiva installazione.

4.3.4 - Costi di sostituzione

Come specificato nel capitolo precedente tutti i costi seguono il modello del calcolo del valore attuale netto o VAN. Quindi tutti i costi vengono attualizzati a un istante iniziale per poter essere paragonati tra di loro.

All'interno di questo calcolo rientrano anche tutti i costi dovuti alla sostituzione dei componenti per l'efficientamento energetico, sopra descritti, al termine della loro vita utile.

Seguendo le disposizioni espresse nel testo "*Applicazione della metodologia di calcolo dei livelli ottimali in funzione dei costi per i requisiti minimi di prestazione energetica*" non viene preso in considerazione il deprezzamento dovuto all'obsolescenza delle misure installate con il passare del tempo, ma si stabilisce un costo di sostituzione pari al costo di investimento iniziale nei casi ove la vita utile dell'elemento sostituito sia inferiore al periodo di calcolo stabilito.

Un altro dato necessario per il calcolo del VAN è il fattore di attualizzazione. Esso è definito come quel tasso di interesse necessario al trasferimento al tempo iniziale di un capitale riscosso ad una data futura. Questo consente di poter aggiungere costi relativi a periodi temporali diversi che altrimenti non potrebbero essere comparati.

Il tasso di attualizzazione può essere uguale al rendimento dei titoli di stato (attività risk-free) oppure può dipendere dall'inflazione e da parametri differenti dipendenti dai rischi di intervento.

Per questo lavoro di tesi si è deciso di utilizzare un fattore di attualizzazione pari al 4%.

Di seguito viene elencata la metodologia per il calcolo dei costi di sostituzione. Nei casi ove la vita utile del componente sia maggiore di 30 anni (periodo di calcolo stabilito) o

nei casi dove la misura considerata non è presente nello stato di fatto si impone un costo di 0 euro. Per tutti gli altri casi si segue quanto successivamente descritto:

- EEM 5: per lo stato di fatto si impone un costo di sostituzione pari a 200 €/m² di serramento che andrà moltiplicato per la superficie finestrata. Questo costo insisterà solo al decimo anno in quanto, una volta sostituiti i serramenti, avranno una vita utile maggiore di 30 anni;
- EEM 7: si ipotizza un costo di sostituzione dell'unità installata pari a 1000 € per unità abitativa, con una vita utile di 15 anni;
- EEM 8: si prevede la sostituzione della caldaia presente nello stato di fatto con una identica avente costo di 6000 €, per una vita utile di 15 anni;
- EEM 9: per lo stato di fatto si considera un costo di sostituzione del generatore pari a 1000 € per tutte e 24 le unità abitative ponendo come vita utile 15 anni;
- Per i sistemi di distribuzione, i radiatori, avendo vita utile superiore ai 30 anni avranno un costo di sostituzione pari a 0, mentre per i fancoil, aventi vita utile di 15 anni, il costo è pari al prezzo di installazione.

In tabella 60 vengono riportati i costi di sostituzione per tutti i livelli di EEO e le relative vite utili. L'anno in cui incide la sostituzione corrisponde all'anno in cui si esaurisce la vita utile dell'elemento.

n.	EEM	Parametro	Simbolo	Periodo di sostituzione [anni]	Livello di EEO					
					N	1	2	3	4	5
1	Isolamento termico della parete esterna: sistema a cappotto	Costo di sostituzione dell'isolante	€	> 30	5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	Isolamento termico della parete esterna: isolamento nell'intercapedine	Costo di sostituzione dell'isolante	€	> 30	1	0,00	-	-	-	-
3	Isolamento termico della copertura	Costo di sostituzione dell'isolante	€	> 30	5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	Isolamento termico del pavimento	Costo di sostituzione dell'isolante	€	> 30	5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	Isolamento termico degli elementi trasparenti	Costo di sostituzione degli elementi trasparenti	€	10 per lo SF > 30 per elementi nuovi	5	48840,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	Sistemi di schermatura solare	Costo di sostituzione delle schermature	€	> 30	3	0,00	0,00	0,00	-	-
7	Macchina frigorifera ad alta efficienza	Costo di sostituzione del generatore	€	15	2	24000,00	64555,92	-	-	-
8	Generatore di energia termica ad alta efficienza per il riscaldamento	Costo di sostituzione del generatore	€	15 per le PDC	5	6000,00	5840,45	9551,64	28386,01	31454,76
		Costo di sostituzione dei radiatori e dei fancoil		15 per i fancoil		0,00	0,00	1294,00	1294,00	1294,00
9	Generatore di energia termica ad alta efficienza per l'acqua calda sanitaria	Costo di sostituzione del generatore	€	20	3	1000,00	9240,00	27720,00	-	-
10	Generatore ad alta efficienza combinato per riscaldamento e acqua calda sanitaria	Costo di sostituzione del generatore	€	20	2	14212,80	14212,80	-	-	-
		Costo di sostituzione dei radiatori e dei fancoil		> 30 per i radiatori 15 per i fancoil		0,00	527,62	-	-	-
11	Pompa di calore per riscaldamento, raffrescamento e acqua calda sanitaria	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	Impianto solare termico	Costo di sostituzione dell'impianto	€	20	5	0,00	16080,00	24120,00	40200,00	56280,00
13	Sistema fotovoltaico	Costo di sostituzione del sistema fotovoltaico	€	20	4	0,00	9000,00	11250,00	13500,00	-
14	Sistema di recupero termico sulla ventilazione	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	Sistema di regolazione avanzato	Costo di sostituzione del sistema di regolazione	€	15	4	0,00	1256,64	2513,28	2116,80	-
16	Riqualificazione dell'impianto di illuminazione	-	-	-	-	-	-	-	-	-
17	Riqualificazione dell'impianto di illuminazione	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		-	-	-	-	-	-	-	-	-
		-	-	-	-	-	-	-	-	-

[Tabella 60]: Sintesi di tutti i costi di sostituzione

4.3.5 - Costi di manutenzione

In questa categoria ricadono tutti quei costi che hanno una cadenza annuale.

Come per tutti i costi essi dipendono dai diversi EEM e dai loro livelli di EEO:

- EEM 1, 2, 3, 4: non sono previsti costi di manutenzione per l'isolante;
- EEM 5: per lo stato di fatto è previsto un costo di 25 €/unità immobiliare all'anno, mentre per gli interventi di efficientamento proposti si ha un costo pari all'1% del costo di installazione;
- EEM 6: il costo di manutenzione per lo stato di fatto è pari a zero in quanto non sono presenti elementi schermanti, mentre per i successivi livelli è pari all'1% del costo di installazione;
- EEM 7: il costo di manutenzione per il chiller installato è di 80 €/unità immobiliaria;

re all'anno, mentre per i restanti livelli è pari al 4% del costo di installazione;

- EEM 8: l'impianto di riscaldamento centralizzato ha un costo di manutenzione pari a 200 €/ all'anno per lo stato di fatto. Per i boiler dei livelli di EEO 2 e 3 ha un costo pari all'1,5% del valore totale, mentre per le PDC è pari al 3,5%;

- EEM 9: per l'impianto autonomo di produzione di ACS il costo per lo stato di fatto è di 80 €/unità immobiliare all'anno, mentre per i boiler è nuovamente l'1,5% del costo di installazione;

- EEM 10: anche per questa misura si ipotizza l'inserimento di boiler con costo di manutenzione pari all'1,5%;

- EEM 12, 13: si prevede un costo di manutenzione pari al 4% del costo di installazione per tutti i livelli di efficienza proposti, tranne per lo stato di fatto dove, non essendo presenti collettori solari e pannelli fotovoltaici, si ha un costo pari a 0;

- EEM 15: queste misure hanno un costo di manutenzione pari al 4% del costo di installazione;

- Radiatori e fancoil: per i radiatori il costo di manutenzione è pari a zero, mentre per i fancoil è pari al 4% del valore totale di installazione.

Nella tabella 61 vengono riportati per ogni misura di efficienza energetica i relativi costi di manutenzione.

n.	EEM	Parametro	Simbolo	Livello di EEO					
				N	1	2	3	4	5
1	Isolamento termico della parete esterna: sistema a cappotto	Costo di manutenzione	€/anno	5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	Isolamento termico della parete esterna: isolamento nell'intercapedine	Costo di manutenzione	€/anno	1	0,00	-	-	-	-
3	Isolamento termico della copertura	Costo di manutenzione	€/anno	5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	Isolamento termico del pavimento	Costo di manutenzione	€/anno	5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	Isolamento termico degli elementi trasparenti	Costo di manutenzione	€/anno	5	600,00	1191,70	1377,29	1623,93	1775,33
6	Sistemi di schermatura solare	Costo di manutenzione	€/anno	3	0,00	448,71	58,32	-	-
7	Macchina frigorifera ad alta efficienza	Costo di manutenzione	€/anno	2	1920,00	2582,24	-	-	-
8	Generatore di energia termica ad alta efficienza per il riscaldamento	Costo di manutenzione	€/anno	5	200,00	87,61	143,27	993,51	1100,92
		Costo di manutenzione			0,00	269,42	51,76	51,76	51,76
9	Generatore di energia termica ad alta efficienza per l'acqua calda sanitaria	Costo di manutenzione	€/anno	3	1920,00	138,60	415,80	-	-
10	Generatore ad alta efficienza combinato per riscaldamento e acqua calda sanitaria	Costo di manutenzione	€/anno	2	213,19	213,19	-	-	-
		Costo di manutenzione			11,19	21,10	-	-	-
11	Pompa di calore per riscaldamento, raffrescamento e acqua calda sanitaria	-	-	-	-	-	-	-	-
12	Impianto solare termico	Costo di manutenzione	€/anno	5	0,00	80,40	120,60	201,00	281,40
13	Sistema fotovoltaico	Costo di manutenzione	€/anno	4	0,00	45,00	56,25	67,50	-
14	Sistema di recupero termico sulla ventilazione	-	-	-	-	-	-	-	-
15	Sistema di regolazione avanzato	Costo di manutenzione	€/anno	4	0,00	50,27	100,53	84,67	-
16	Riqualificazione dell'impianto di illuminazione	-	-	-	-	-	-	-	-
17	Riqualificazione dell'impianto di illuminazione	-	-	-	-	-	-	-	-
		-	-	-	-	-	-	-	-
		-	-	-	-	-	-	-	-

[Tabella 61]: Sintesi di tutti i costi di manutenzione

4.3.6 - Costi energetici

Dopo aver dato delle informazioni generali per quanto riguarda la composizione delle spese relative al consumo elettrico e di gas naturale nel capitolo 2 al paragrafo 2.4.2, si vanno a indicare i costi dell'energia e del gas effettivamente utilizzati.

Energia elettrica

I consumi relativi all'applicazione della metodologia, riguardano soltanto quelli dovuti al

servizio di riscaldamento, raffrescamento, produzione di ACS, ventilazione e trasporto di materiali e persone.

Per le utenze residenziali, nel 2018, viene considerata una tariffa media di 20,63 c€/kW per potenze installate pari a 3 kW e consumi annui fino a 2700 kWh.

Relativamente a questo vettore energetico sono state fatte delle previsioni sull'andamento dei costi negli anni a venire. Questo per avere una determinazione più reale dei costi relativi ai consumi negli anni successivi all'inizio del calcolo.

Nella tabella 62 risulta visibile come i costi aumentino di un fattore costante nel tempo pari al 4,5%. Una precisazione necessaria è che questo aumento riguarda soltanto la componente energia, mentre i costi relativi alla distribuzione e agli oneri di sistema avranno un aumento minore. Per ovviare a ciò, si considera un aumento del 75% rispetto agli incrementi annui ipotizzati, ottenendo così un aumento costante del 3,4%.

Andamento dei costi - energia elettrica																
Anno	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Costo [€/MWh]		43	45	47	49	51	54	56	59	61	64	67	70	73	76	80
Variazione [%]			4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5

[Tabella 62]: Andamento dei costi dell'energia elettrica [47]

Gas naturale

La scelta di questo vettore energetico è relativa al suo larghissimo uso nel panorama italiano.

Per utenze domestiche in relazione ai consumi medi tipici delle famiglie, l'autorità Nazionale ARERA stabilisce un costo medio di 76,7 c€/m³ incluse le imposte e consumi annui di 1400 m³.

Come per l'energia elettrica anche per il gas naturale sono state fatte delle previsioni riportate nella tabella 63.

In questo caso, essendo l'aumento relativo alla sola componente gas ed avendo un impatto minore sugli altri fattori di costo, si considera un incremento medio del 2,3 % [47].

Andamento dei costi - gas naturale																
Anno	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Costo [€/MWh]	30,8	40,7	42,6	44,5	46,4	48,3	49,1	49,9	50,6	51,4	52,2	53,1	54,0	55,0	55,9	57,0
Variazione [%]		4,9	4,7	4,5	4,3	4,1	1,6	1,6	1,6	1,5	1,5	1,8	1,7	1,7	1,7	1,6

[Tabella 63]: Andamento dei costi del gas naturale [47]

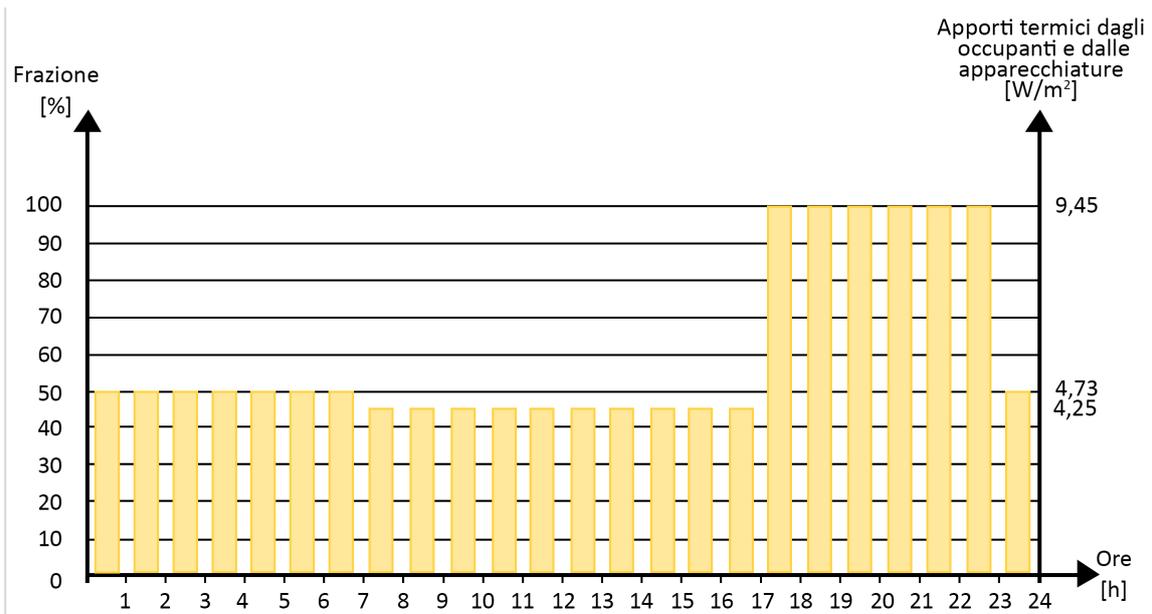
4.4 Opzioni di congruenza tra modelli di calcolo

Dopo aver descritto la procedura standard per il calcolo del livello ottimale in funzione dei costi espressa all'interno della relazione del Ministero dello Sviluppo Economico [11], che utilizza un modello semi-stazionario per il calcolo del fabbisogno di energia primaria associato ad un ottimizzatore mono-obiettivo a soluzioni discrete, si passa alla descrizione del calcolo dei livelli ottimali in funzione dei costi attraverso l'utilizzo di un modello dinamico associato ad un ottimizzatore multiobiettivo.

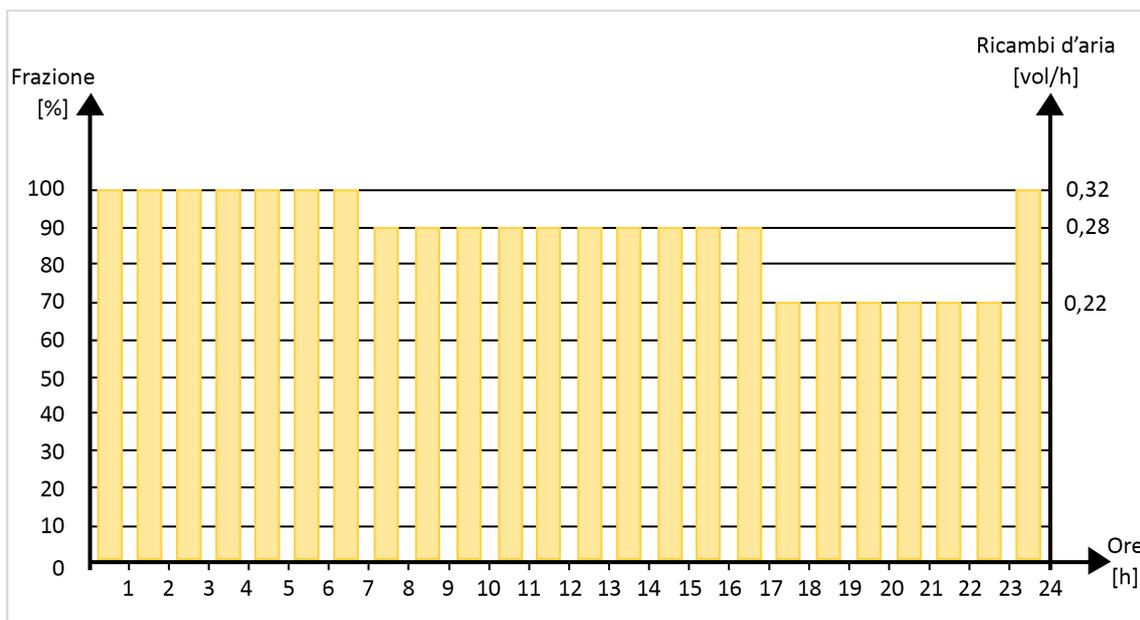
Una volta analizzate le differenze che sussistono sia tra modelli semi-stazionari che dinamici e sia tra ottimizzatori mono-obiettivo che multi-obiettivo (capitolo 3), occorre definire le opzioni di congruenza per allineare i dati di input prima di procedere alla creazione del modello sul software DesignBuilder. In esso è implementato sia EnergyPlus (per il calcolo del fabbisogno in regime dinamico) che l'ottimizzatore multi-obiettivo NSGA-II.

Per essere congruenti i due modelli di partenza devono avere gli stessi dati di input. Data la complessità di quelli richiesti nel modello di calcolo dinamico rispetto a quelli di calcolo semi-stazionario sono stati apportati alcuni accorgimenti:

- Sulle stratigrafie dei componenti opachi: nel modello è stato necessario associare a ogni singolo strato un valore relativo alla conducibilità termica, allo spessore e alla massa volumica per ottenere un valore di trasmittanza complessivo. Ciò perché nel modello semi-stazionario è richiesta solamente la trasmittanza;
- I profili orari di occupazione, degli apporti interni e di ventilazione sono stati modellati in EnergyPlus in modo tale che il valore medio mensile dei parametri, quali flusso termico e tasso di ricambio d'aria, corrisponda a quello della norma UNI/TS 11300-1. Di seguito vengono rappresentati due grafici contenenti i profili di occupazione (grafico 15) e ventilazione (grafico 16) utilizzati nel software, comparati con i valori richiesti nella UNI/TS 11300-1;



[Grafico 15]: Profilo orario degli apporti termici degli occupanti e delle apparecchiature



[Grafico 16]: Profilo orario per i ricambi d'aria

- Il fattore di correzione dello scambio termico dei locali non climatizzati (b_{tr}) è stato dapprima inserito nel calcolo semi-stazionario seguendo le indicazioni fornite dalle UNI/TS 11300-1, successivamente è stato modificato utilizzando i b_{tr} ottenuti mediante il calcolo dinamico;
- I ponti termici sono stati trascurati in tutti e due i modelli;
- Per il calcolo del fabbisogno utilizzando il modello semi-stazionario gli elementi

trasparenti necessitano soltanto del valore della trasmittanza complessiva di vetro + telaio, mentre in DesignBuilder è necessario definire tutte le caratteristiche proprie sia del telaio che del vetro e successivamente il programma calcolerà la trasmittanza complessiva;

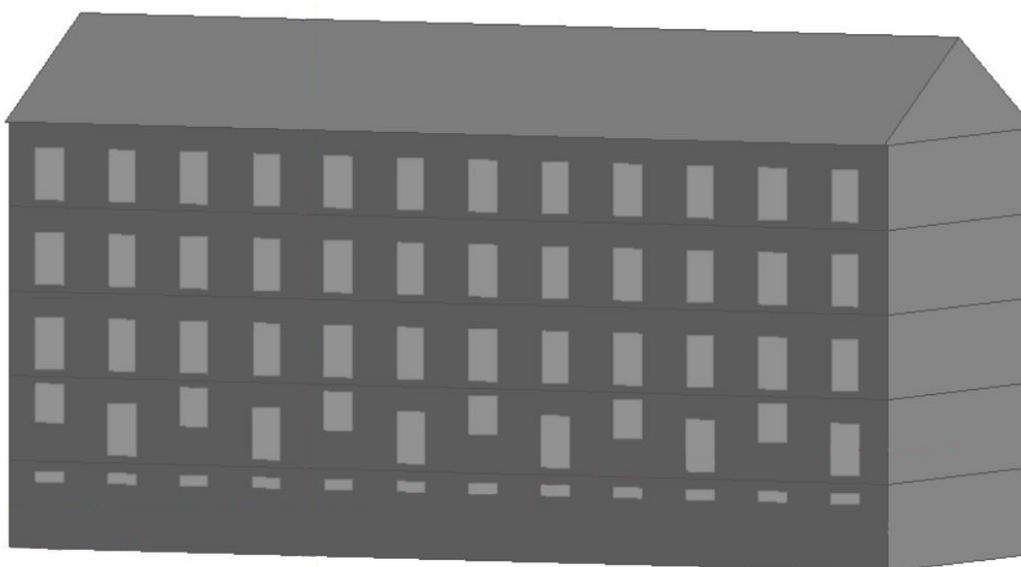
4.4.1 DesignBuilder

DesignBuilder è stato scelto per via della sua interfaccia grafica che rende meno complesso l'utilizzo del software di calcolo per il fabbisogno in regime dinamico, in quanto, permette di disegnare e creare tutte le parti che costituiscono l'edificio come l'involucro, le partizioni interne, gli impianti e i vari profili di utilizzo [48].

Oltre a ciò permette anche l'associazione di tutti i costi relativi ai singoli componenti compresi anche quelli di manutenzione e sostituzione.

In questo paragrafo verrà descritta brevemente l'interfaccia del programma e alcune delle schede per l'inserimento dei dati di input.

Nella figura 25 viene riportato il modello geometrico dell'edificio di riferimento rappresentata sul software.



[Figura 25]: Rappresentazione grafica della geometria dell'edificio di riferimento

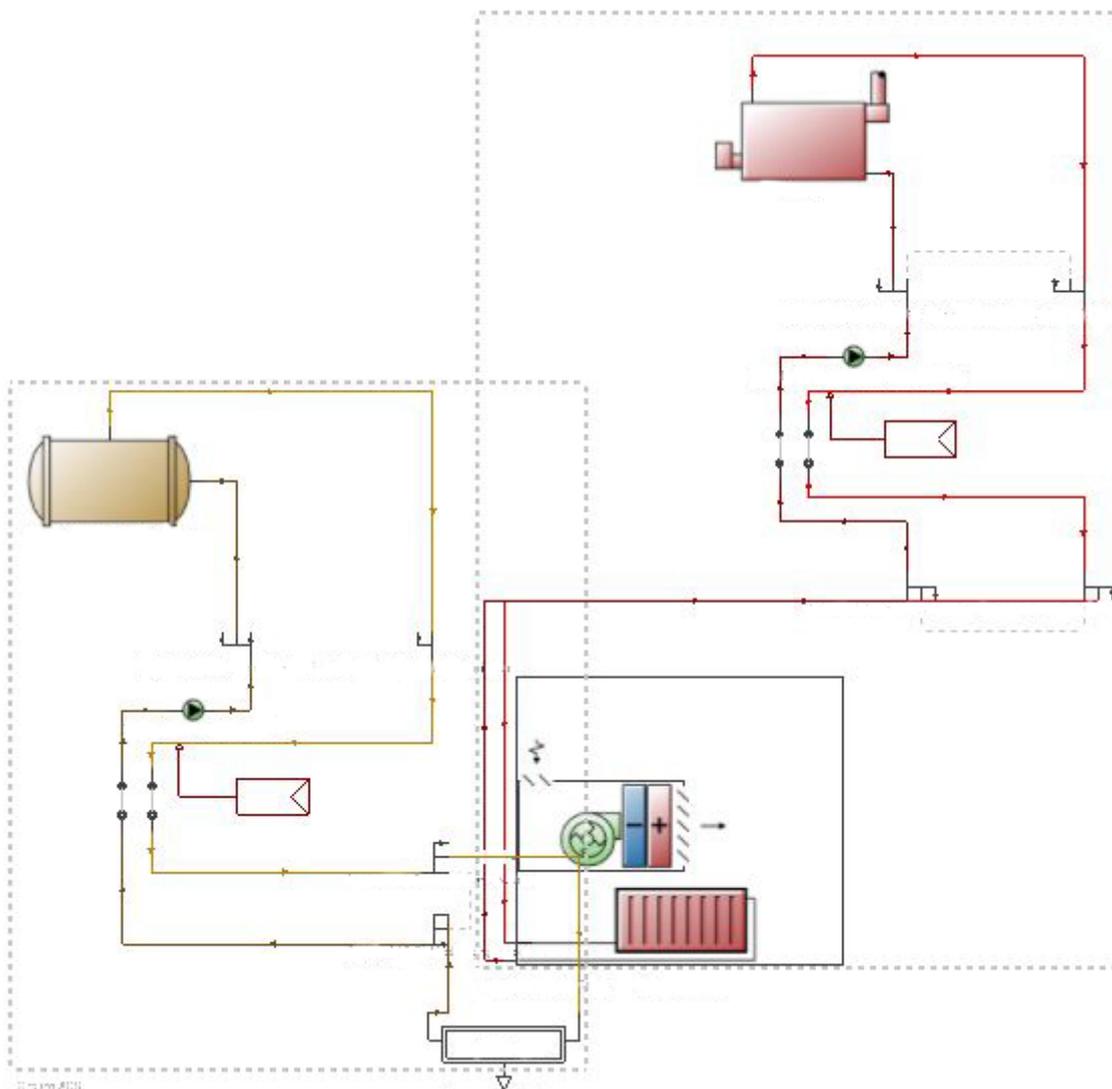
Per la costruzione del modello, il software, richiede la definizione di tutte le stratigrafie dell'involucro opaco che costituiscono l'edificio. Una volta impostati tutti i parametri nell'apposita scheda relativa alla costruzione, si definiscono le caratteristiche fisiche e tipologiche degli elementi trasparenti.

Successivamente alla creazione del modello, alla definizione delle zone termiche e degli ambienti interni, all'inserimento di tutti i parametri e delle schedule richieste, si definisce

il sistema impiantistico.

Come visibile nella figura 26, il sistema è composto da:

- Gruppo di zone: esso, graficamente rappresentato da un riquadro nero, contiene tutti gli ambienti facenti parte della stessa zona termica e serviti dal medesimo impianto, ovvero un chiller e il sottosistema di emissione a radiatori collegato all'impianto di riscaldamento centralizzato;
- Circuito ad acqua calda: rappresentato in figura da una caldaia (rossa) collegata al gruppo di zone;
- Circuito per l'acqua calda sanitaria: rappresentato da un tank color ocra collegato al sottosistema di emissione dei singoli alloggi.



[Figura 26]: Rappresentazione grafica del sistema impiantistico allo stato di fatto dell'edificio di riferimento

Prima di poter procedere con il processo di ottimizzazione è necessario definire i costi sia dei singoli interventi che dei vettori energetici. Il programma consente di associare un prezzo a tutti gli elementi costituenti l'edificio come involucro opaco, involucro trasparente ed impianto, ma anche di definire la variazione dei costi dei vettori energetici nel periodo di calcolo stabilito e tutte le spese relative a manutenzione e sostituzione degli elementi alla fine della loro vita utile. In aggiunta permette anche di calcolare i recuperi monetari dovuti al non esaurimento della vita utile di un componente alla fine del periodo di calcolo e, impostando il tasso di attualizzazione utilizzato (4%), attualizza tutti i costi al periodo base definito.

4.4.2 Assunzioni riguardanti l'ottimizzatore multi-obiettivo NSGA-II

A seguito della creazione dei livelli di efficienza energetica con tutti i loro obiettivi, è possibile iniziare con il processo di ottimizzazione. Per poterlo rendere più agevole, rapido e preciso, è stato necessario operare tre ottimizzazioni distinte e successivamente unire le nuvole di punti create per definire il fronte di Pareto contenente gli ottimi parziali e l'ottimo globale.

I parametri utilizzati per il processo di ottimizzazione sono i seguenti:

- Numero di generazioni massime: 15
- Dimensione della popolazione iniziale: 8
- Dimensione massima della popolazione: 5
- Dimensione della selezione per torneo: 2
- Tasso di crossover: 1
- Probabilità di mutazione: 0,4

5 - Risultati

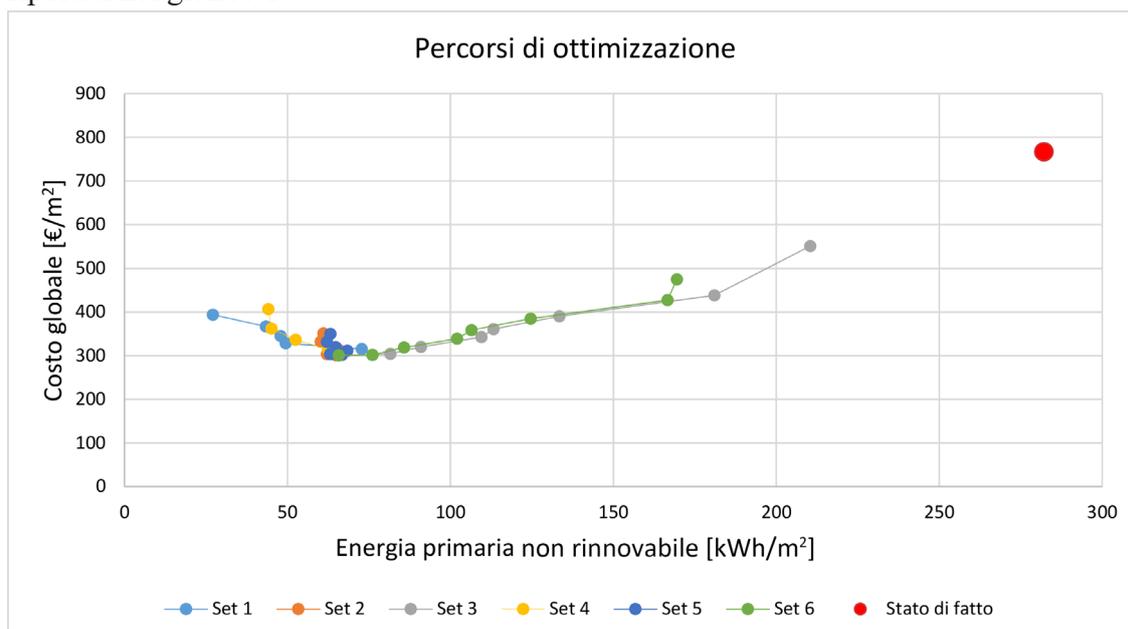
5.1 Risultati della cost optimal methodology in regime semi-stazionario

In questo paragrafo vengono analizzati i risultati della metodologia di cost optimality.

Nello strumento di calcolo Microsoft Excel il foglio, in cui confluiscono tutti i dati di input inseriti e descritti fino ad ora, necessario al calcolo degli ottimi parziali e dell'ottimo globale è stato impostato per escludere la sovrapposizione delle misure di efficienza energetica (EEM) che non possono coesistere tra loro come ad esempio, la numero 1 (isolamento a cappotto) con la numero 2 (isolamento in intercapedine) oppure della numero 10 (impianto combinato di riscaldamento e ACS) con la numero 8 (impianto per il solo riscaldamento) e la numero 9 (impianto ACS).

Per verificare che l'ottimizzatore porti al raggiungimento dello stesso ottimo globale, a prescindere dal set di misure di partenza, sono necessarie due iterazioni con set di partenza differenti. Nel caso in analisi le simulazioni effettuate sono state sei, ed in ognuna sono stati variati sia gli EEM che i loro obiettivi di efficienza energetica (EEO) imponendo livelli poco performanti, mediamente performanti e altamente performanti.

I percorsi delle ottimizzazioni e gli ottimi parziali rappresentati dai singoli punti, vengono riportati nel grafico 17.



[Grafico 17]: Percorsi di ottimizzazione

Il punto in cui convergono tutte le iterazioni è l'ottimo globale che è composto dal pacchetto di misure di efficienza energetica indicate in tabella 64.

n.	EEM	Parametro	Simbolo	Valore	Livello di EEO
1	Isolamento termico della parete esterna: sistema a cappotto	Trasmittanza termica (W/m ² K)	U _w	-	0
2	Isolamento termico della parete esterna: isolamento nell'intercapedine	Trasmittanza termica (W/m ² K)	U _{w,c}	0,37	2
3	Isolamento termico della copertura	Trasmittanza termica (W/m ² K)	U _r	0,29	5
4	Isolamento termico del pavimento	Trasmittanza termica (W/m ² K)	U _f	1,30	1
5	Isolamento termico degli elementi trasparenti	Trasmittanza termica (W/m ² K)	U _w	2,30	2
6	Sistemi di schermatura solare	Fattore di trasmissione solare	-	Mobile	3
7	Macchina frigorifera ad alta efficienza	Indice di efficienza energetica in condizioni di progetto	EER	2,35	1
8	Generatore di energia termica ad alta efficienza per il riscaldamento	Rendimento di generazione	η _{gn,H}	0,95 + Radiatori	2
9	Generatore di energia termica ad alta efficienza per l'acqua calda sanitaria	Rendimento del sistema al 100% del carico	η _{gn,W}	0,93	2
10	Generatore ad alta efficienza combinato per riscaldamento e acqua calda sanitaria	Rendimento di generazione	η _{gn}	-	0
11	Pompa di calore per riscaldamento, raffrescamento e acqua calda sanitaria	Coefficiente di prestazione	COP	-	-
		Indice di efficienza energetica in condizioni di progetto	EER	-	-
12	Impianto solare termico	m ² di collettori solari	A _{coll}	20	2
13	Sistema fotovoltaico	Potenza di picco installata [KWp]	P _p	10,8	4
14	Sistema di recupero termico sulla ventilazione	Rendimento del recuperatore di calore	η _r	-	-
15	Sistema di regolazione avanzato	Rendimento di regolazione e controllo	η _{ctr}	Zona + Climatica	4
16	Riqualificazione dell'impianto di illuminazione	Densità della potenza di illuminazione installata (W/m ²)	PN	-	-
17	Riqualificazione dell'impianto di illuminazione	Fattore di dipendenza dall'occupazione	F _O	-	-
		Fattore di dipendenza dal daylight	F _C	-	-
		Fattore di illuminamento costante	F _D	-	-

[Tabella 64]: Set ottimale ottenuto mediante il processo di cost optimality in regime semi-stazionario

Il pacchetto ottimale consiste in:

- Isolamento in intercapedine rispetto al cappotto esterno;
- Isolamento in copertura molto efficiente rispetto all'isolamento del primo solaio dove viene mantenuto lo stato di fatto;
- Sostituzione degli elementi trasparenti con altri più performanti e installazione di schermature mobili;

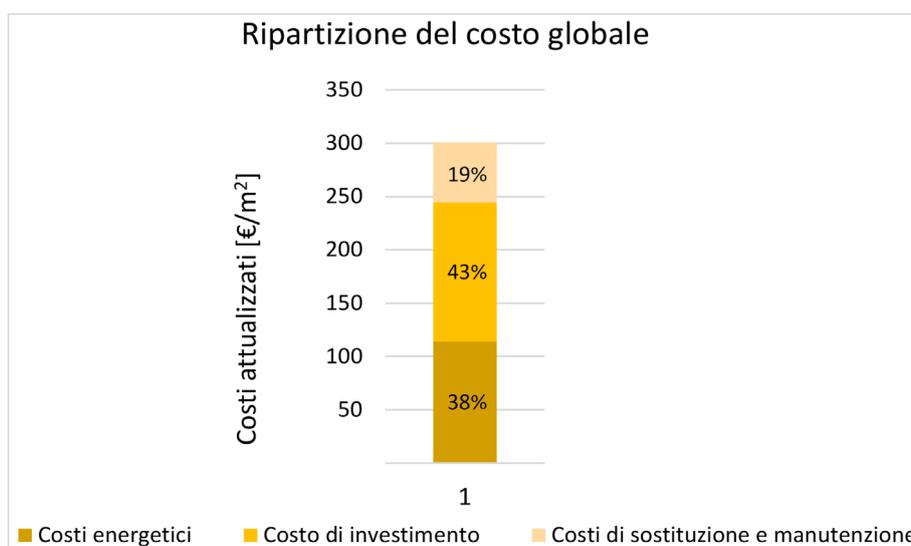
- Mantenimento del chiller presente allo stato di fatto e sostituzione della caldaia con una caldaia tradizionale a bassa temperatura con sistema di emissione a radiatori. Sostituzione del generatore di energia termica per ACS con una caldaia a bassa temperatura;
- Installazione di un sistema di collettori solari (20 m²) per la produzione di ACS e di un sistema fotovoltaico con una potenza di picco di 10,8 kWh;
- L'installazione di un sistema di regolazione composto da una sonda di zona + climatica.

Questo pacchetto di misure mantiene la stessa configurazione impiantistica dello stato di fatto, ovvero una produzione separata con impianto di riscaldamento centralizzato e chiller e impianto per ACS autonomi.

Il costo globale attualizzato del pacchetto descritto, che ammonta a 301 €/m², è composto dalle seguenti voci:

- Costo di investimento;
- Costi energetici;
- Costi per la manutenzione e sostituzione.

L'incidenza che essi hanno sul prezzo totale viene riportata nel grafico 18.



[Grafico 18]: Ripartizione del costo globale della soluzione cost-optimal

Il pacchetto ottimale è composto da tutte quelle misure che comportano un costo globale minore a fronte di un miglioramento dell'efficienza energetica dell'edificio, come visibile in tabella 65.

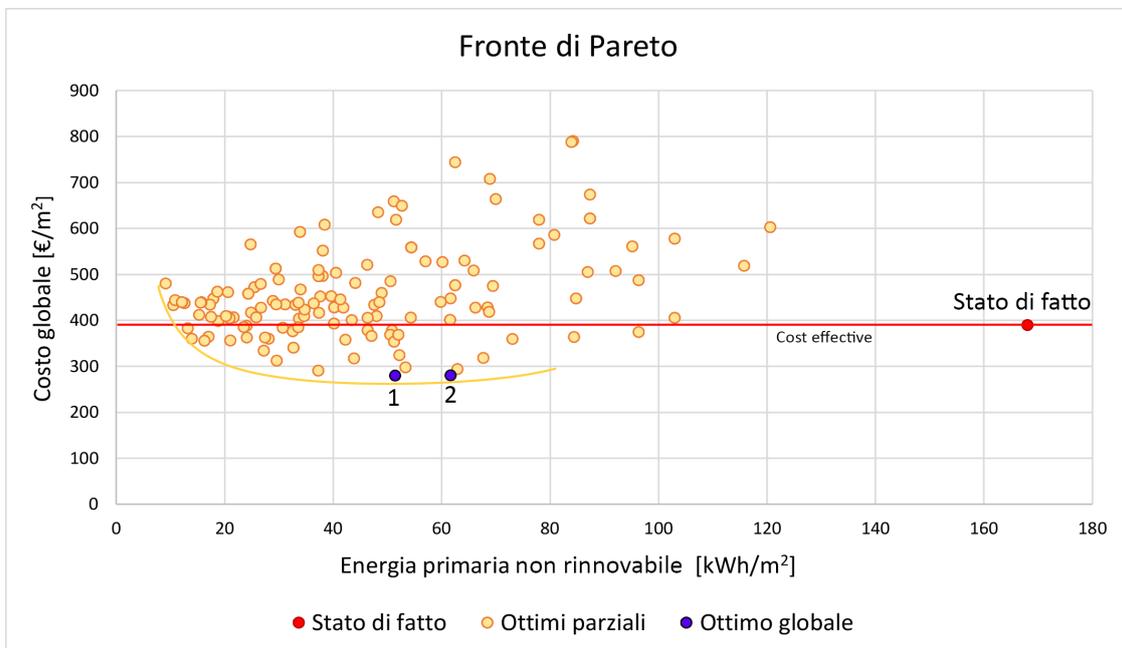
	Stato di fatto	Cost optimal
Energia primaria [kWh/m²]	168,26	65,72
Costo globale [€/m²]	390,00	301,00

[Tabella 65]: Confronto tra EP e Costo globale tra lo stato di fatto e il pacchetto di misure ottimali.

5.2 Risultati della Cost-optimal methodology in regime dinamico

Nel seguente paragrafo vengono riportati i risultati ottenuti dall'utilizzo della metodologia di cost optimality, associata ad uno strumento di calcolo del fabbisogno in regime dinamico (EnergyPlus) e all'ottimizzatore multi-obiettivo (NSGA-II).

Il risultato del processo di ottimizzazione è riportato nel grafico 19.



[Grafico 19]: Fronte di Pareto

Come visibile nel grafico tutti i valori che stanno al di sotto della linea rossa, che rappresenta il costo dello stato di fatto, sono ottimi parziali aventi una Cost-effective, ovvero

rappresentano tutti quei pacchetti che hanno un costo globale inferiore rispetto allo stato di fatto. La differenza tra il fronte ottenuto mediante la procedura di cost optimality in regime semi-stazionario e quello ottenuto in regime dinamico è che nel primo tutti i punti rappresentati nel grafico 17 sono soluzioni Cost-Effective rispetto allo stato di fatto, mentre nel grafico 18 i punti rappresentano tutte le soluzioni testate ed è necessario definire l'area di Cost-effective.

I punti evidenziati in blu rappresentano i due pacchetti di intervento cost-optimal. Essi verranno denominati punto 1, quello a sinistra, e punto 2, quello a destra. Le misure componenti i due set vengono riportate nella tabella 66.

n.	EEM	Parametro	Simbolo	Valore punto 1	Valore punto 2
1	Isolamento termico della parete esterna: sistema a cappotto	Trasmittanza termica (W/m^2K)	U_w	-	-
2	Isolamento termico della parete esterna: isolamento nell'intercapedine	Trasmittanza termica (W/m^2K)	$U_{w,c}$	0,37	0,37
3	Isolamento termico della copertura	Trasmittanza termica (W/m^2K)	U_f	1,65	0,37
4	Isolamento termico del pavimento	Trasmittanza termica (W/m^2K)	U_f	1,30	1,30
5	Isolamento termico degli elementi trasparenti	Trasmittanza termica (W/m^2K)	U_w	2,30	1,90
6	Sistemi di schermatura solare	Fattore di trasmissione solare	-	-	-
7	Macchina frigorifera ad alta efficienza	Indice di efficienza energetica in condizioni di progetto	EER	2,35	3,00
8	Generatore di energia termica ad alta efficienza per il riscaldamento	Rendimento di generazione	$\eta_{gn,H}$	-	1,00 + Fancoil
9	Generatore di energia termica ad alta efficienza per l'acqua calda sanitaria	Rendimento del sistema al 100% del carico	$\eta_{gn,W}$	-	0,93
10	Generatore ad alta efficienza combinato per riscaldamento e acqua calda sanitaria	Rendimento di generazione	η_{gn}	1,00 + Fancoil	-
11	Pompa di calore per riscaldamento, raffrescamento e acqua calda sanitaria	Coefficiente di prestazione	COP	-	-
		Indice di efficienza energetica in condizioni di progetto	EER	-	-
12	Impianto solare termico	m^2 di collettori solari	A_{coll}	-	70,00
13	Sistema fotovoltaico	Potenza di picco installata [KWp]	P_p	7,20	-
14	Sistema di recupero termico sulla ventilazione	Rendimento del recuperatore di calore	η_r	-	-
15	Sistema di regolazione avanzato	Rendimento di regolazione e controllo	η_{ctr}	Zona + Climatica	Zona + Climatica
16	Riqualificazione dell'impianto di illuminazione	Densità della potenza di illuminazione installata (W/m^2)	PN	-	-
17	Riqualificazione dell'impianto di illuminazione	Fattore di dipendenza dall'occupazione	F_o	-	-
		Fattore di dipendenza dal daylight	F_c	-	-
		Fattore di illuminamento costante	F_D	-	-

[Tabella 66]: Misure di efficienza energetica e loro livelli per i due punti con costo minore del fronte di Pareto

Il pacchetto ottimale di misure di efficienza energetica per il punto 1 consiste in:

- Isolamento in intercapedine;
- Mantenimento dello stato di fatto per l'isolamento del primo e dell'ultimo solaio;
- Sostituzione degli infissi con altri a doppio vetro senza nessuna schermatura;
- Mantenimento del chiller esistente e installazione di un generatore ad alta efficienza combinato per il riscaldamento e ACS costituito da un generatore a condensazione e sistemi di emissione a fancoil autonomi;
- Installazione dei pannelli fotovoltaici (7,20 kWp) ma non dei collettori solari;
- Installazione di un sistema di regolazione composto da una sonda di zona + climatica.

La scelta di non inserire collettori solari è data dal fatto che i costi di installazione e manutenzione sarebbero troppo elevati rispetto al beneficio che esso fornirebbe all'impianto combinato. Relativamente all'impianto fotovoltaico, avendo numerosi elementi che sfruttano come vettore energetico l'elettricità, è stato scelto quel livello di potenza di picco in quanto i costi sono bilanciati dal risparmio fornito.

Il pacchetto ottimale di misure di efficienza energetica per il punto 2 consiste in:

- Isolamento in intercapedine;
- Isolamento con un livello di EEO medio per l'ultimo solaio e mantenimento dello stato di fatto per il primo solaio;
- Sostituzione degli infissi con altri aventi un livello di EEO medio, ma senza nessuna schermatura solare;
- Mantenimento della configurazione impiantistica esistente sostituendo il chiller con uno più efficiente, installando una caldaia a condensazione con sistema di emissione a fancoil e un impianto di produzione per ACS con caldaia a bassa temperatura;
- Posizionamento in copertura di 70 metri quadri di collettori solari ma nessun pannello fotovoltaico;

- Installazione di un sistema di regolazione composto da una sonda di zona + climatica.

Diversamente alle caratteristiche del pacchetto precedente, in questo caso, si predilige l'installazione di un impianto con produzione separata per il riscaldamento e la produzione di ACS, associato ad un impianto a collettori solari ma senza l'impianto fotovoltaico.

I due punti però hanno anche delle caratteristiche comuni o simili come ad esempio l'isolamento in intercapedine, la scelta di non isolare il primo solaio, la sostituzione delle finestre ma senza nessun tipo di schermatura e il posizionamento di un sistema di regolazione di zona + climatico.

In termini di energia primaria e costo per unità di superficie i due punti presentano i valori indicati in tabella 67.

	Stato di fatto	Cost optimal punto 1	Cost optimal punto 2
Energia primaria [kWh/m²]	168,26	51,40	61,70
Costo globale [€/m²]	390,00	280,00	281,00

[Tabella 67]: Confronto tra EP e Costo globale tra lo stato di fatto e il punto 1 e 2

Confrontando le energie primarie e i costi dei due punti con lo stato di fatto è subito chiaro come entrambi vadano a migliorare tutti e due i parametri considerati. Tra di loro, invece, differiscono del 17% per quanto riguarda il fabbisogno di energia primaria non rinnovabile e dello 0,3% in termini di costo globale.

Seppur discostandosi di una percentuale bassissima, il pacchetto ottimale in relazione al costo è quello rappresentato dal punto 1.

5.3 Risultati a confronto

Nel presente paragrafo vengono comparati i risultati derivanti dai modelli precedentemente descritti.

I tre set degli ottimi globali vengono riportati nella tabella 68.

n.	EEM	Parametro	Simbolo	Pacchetti cost optimal		
				Valore UNI/TS 11300	Valore punto 1	Valore punto 2
1	Isolamento termico della parete esterna: sistema a cappotto	Trasmittanza termica (W/m^2K)	U_w	-	-	-
2	Isolamento termico della parete esterna: isolamento nell'intercapedine	Trasmittanza termica (W/m^2K)	$U_{w,c}$	0,37	0,37	0,37
3	Isolamento termico della copertura	Trasmittanza termica (W/m^2K)	U_r	0,29	1,65	0,37
4	Isolamento termico del pavimento	Trasmittanza termica (W/m^2K)	U_f	1,30	1,30	1,30
5	Isolamento termico degli elementi trasparenti	Trasmittanza termica (W/m^2K)	U_{Wt}	2,30	2,30	1,90
6	Sistemi di schermatura solare	Fattore di trasmissione solare	-	Mobile	-	-
7	Macchina frigorifera ad alta efficienza	Indice di efficienza energetica in condizioni di progetto	EER	2,35	2,35	3,00
8	Generatore di energia termica ad alta efficienza per il riscaldamento	Rendimento di generazione	$\eta_{gn,H}$	0,95 + Radiatori	-	1,00 + Fancoil
9	Generatore di energia termica ad alta efficienza per l'acqua calda sanitaria	Rendimento del sistema al 100% del carico	$\eta_{gn,W}$	0,93	-	0,93
10	Generatore ad alta efficienza combinato per riscaldamento e acqua calda sanitaria	Rendimento di generazione	η_{gn}	-	1,00 + Fancoil	-
11	Pompa di calore per riscaldamento, raffrescamento e acqua calda sanitaria	Coefficiente di prestazione	COP	-	-	-
		Indice di efficienza energetica in condizioni di progetto	EER	-	-	-
12	Impianto solare termico	m^2 di collettori solari	A_{coll}	20	-	70,00
13	Sistema fotovoltaico	Potenza di picco installata [KWp]	P_p	10,8	7,20	-
14	Sistema di recupero termico sulla ventilazione	Rendimento del recuperatore di calore	η_r	-	-	-
15	Sistema di regolazione avanzato	Rendimento di regolazione e controllo	η_{ctr}	Zona + Climatica	Zona + Climatica	Zona + Climatica
16	Riqualificazione dell'impianto di illuminazione	Densità della potenza di illuminazione installata (W/m^2)	PN	-	-	-
17	Riqualificazione dell'impianto di illuminazione	Fattore di dipendenza dall'occupazione	F_O	-	-	-
		Fattore di dipendenza dal daylight	F_C	-	-	-
		Fattore di illuminamento costante	F_D	-	-	-

[Tabella 68]: Set ottimali a confronto

Questi set presentano delle caratteristiche comuni:

- Isolano l'intercapedine;
- Non isolano il primo solaio;
- Sistema di regolazione di zona + climatico;
- Nessuno opta per l'installazione di pompe di calore per il riscaldamento.

Una considerazione che si può trarre riguarda l'interazione tra il sistema impiantistico e l'isolamento esterno: quando si prevede l'installazione di un impianto performante si tende a non isolare o isolare poco l'involucro edilizio (punto 2), mentre se si predilige l'isolamento esterno si utilizza un impianto meno performante. Questo perché una ristrutturazione molto prestazionale di tali fattori comporterebbe un costo elevato rispetto al beneficio ottenibile in termini di efficienza energetica.

A livello generale, invece, confrontando i valori dei punti 1 e 2 con quelli dell'UNI/TS 11300, si nota come il punto 2 si accosti maggiormente alle caratteristiche scelte dal modello in regime semi-stazionario in quanto i livelli di isolamento sono simili e si utilizza la stessa tipologia di impianto composta da chiller e sistema di produzione di ACS autonomi e impianto di riscaldamento centralizzato.

Confrontando invece il pacchetto ottimale della UNI/TS 11300 con il set ottimale del punto 1 risulta che i due sono simili per quanto riguarda l'isolamento dell'intercapedine e del primo solaio ma optano per due impianti opposti.

Al fine di poter paragonare i risultati provenienti dall'ottimizzazione in regime semi-stazionario con quelli in regime dinamico, i tre ottimi sono stati calcolati anche invertendo i modelli. Quindi il set ottimale proveniente dall'ottimizzatore mono-obiettivo è stato testato sul modello dinamico e viceversa.

I risultati in termini di energia primaria non rinnovabile e costo globale sono visibili nella tabella 69 e 70.

Cost optimal modello in regime semi-stazionario			
Ottimo	UNI/TS 11300	Punto 1	Punto 2
Energia primaria [kWh/m²]	65,72	97,53	72,60
Costo globale [€/m²]	301,00	389,00	443,00
Costi energetici [€/m²]	114,00	183,00	161,00

[Tabella 69]: Confronto EP e costo globale in regime semi-stazionario

Cost optimal modello in regime dinamico			
Ottimo	UNI/TS 11300	Punto 1	Punto 2
Energia primaria [kWh/m²]	35,00	51,40	61,70
Costo globale [€/m²]	327,00	280,00	281,00
Costi energetici [€/m²]	90,00	142,00	126,00

[Tabella 70]: Confronto EP e costo globale in regime dinamico

Confrontando tra loro i valori di EP e costo globale delle due tabelle è subito chiaro come gli ottimi globali varino in relazione al modello di calcolo utilizzato.

Questa variazione è data dalla diversità dei due modelli come spiegato nel paragrafo 3.3.

Nel primo caso (tabella 69) in cui i set dei livelli di efficienza energetica caratteristici dei punti 1 e 2 sono stati applicati al metodo semi-stazionario, si discostano molto dalla soluzione ottimale in termini di costo. Nel secondo caso (tabella 70), invece, il costo globale ha una variazione minore rispetto al valore di EP. In generale il set di interventi dell'UNI/TS 11300 risulta essere sempre quello con un dispendio energetico minore mentre il più alto risulta sempre il set del punto 1.

Si può notare come il valore di energia primaria del pacchetto ottimale delle UNI/TS 11300, in tabella 69, sia maggiore rispetto a quello in tabella 70 seppur comportando un costo globale inferiore. Questo è motivato dal fatto che i costi di manutenzione, sostituzione e installazione sono calcolati in modo diverso tra i due modelli. In DesignBuilder, a differenza delle UNI/TS 11300, vengono applicate delle medie aritmetiche di tali costi per poter effettuare l'ottimizzazione in quanto il programma non permette una efficace distinzione tra di essi.

Analizzando nel dettaglio i costi energetici, è possibile affermare che quelli relativi alle UNI/TS 11300 risultano essere più bassi in quanto è prevista l'installazione dell'impianto fotovoltaico, di collettori solari e di schermature mobili ai serramenti.

Il punto 1 presenta invece il più alto costo energetico dal momento che non si prevede un incremento dello spessore di isolante sia in copertura che nel primo solaio ma la sostituzione dell'impianto esistente con un generatore combinato.

Conclusioni

Con la presente tesi si è voluta applicare la metodologia di cost optimality ad un edificio di riferimento, nel contesto di revisione della metodologia comparativa per la definizione dei livelli ottimali in funzione dei costi per i requisiti minimi di prestazione energetica negli edifici del Politecnico di Torino per il Ministero dello Sviluppo economico.

L'obiettivo è quello di definire, tra tutti i livelli di efficienza energetica proposti, quel pacchetto di misure che porta all'ottenimento del costo minore possibile.

Il procedimento utilizzato è quello riportato all'interno della Relazione del Ministero dello Sviluppo Economico, "Applicazione della metodologia di calcolo dei livelli ottimali in funzione dei costi per i requisiti minimi di prestazione energetica".

Tale procedimento è stato effettuato utilizzando per il calcolo del fabbisogno due modelli differenti, quello in regime semi-stazionario, attraverso l'utilizzo delle norme UNI/TS 11300, e quello in regime dinamico, attraverso l'utilizzo di EnergyPlus, associati rispettivamente ad un ottimizzatore mono obiettivo a soluzioni discrete e ad un ottimizzatore multi obiettivo NSGA-II.

Il processo di ottimizzazione ha portato all'ottenimento di tre ottimi distinti aventi i valori di energia primaria e costo globale simili nonostante siano composti da livelli di efficienza energetica differenti.

A seguito dell'utilizzo dei due modelli si può stabilire che il modello dinamico, data la complessità, la quantità e la precisione degli input, risulta più adatto qualora si abbiano a disposizione tutti i dati richiesti. Questo avviene più frequentemente nel caso di edifici di nuova costruzione o quelli in fase progettuale. Al contrario, per edifici esistenti di cui non si dispongano tali dati è consigliabile utilizzare un modello semi-stazionario.

Risulta evidente come un modello di simulazione dinamica fornisca un output più preciso che rispecchia maggiormente il comportamento reale dell'edificio.

In conclusione si può affermare che, qualora si volesse intervenire su edifici esistenti al fine di migliorarne la prestazione energetica, la soluzione ottimale risulta essere quella che fornisce il miglior rapporto tra i costi sostenuti per l'esecuzione dell'intervento ed i benefici che da esso ne conseguono.

Sarebbe quindi errato prevedere l'installazione di tutti gli interventi più performanti sia

per quanto riguarda l'involucro che le componenti impiantistiche.

Tutte queste considerazioni sottolineano l'importanza della cost-optimality sia in fase di progettazione che di ristrutturazione al fine di evitare inutili sprechi a livello economico oppure di rendere meno efficaci gli interventi di efficientamento energetico.

Bibliografia e sitografia

- [1] www.ansa.it, consultato il 5/08/2018;
- [2] www.raistoria.rai.it, consultato il 05/08/2018;
- [3] www.liberenergie.altervista.org, consultato il 05/08/2018;
- [4] <http://www.minambiente.it/>, consultato il 10/08/2018;
- [5] <https://www.legambiente.it/>, consultato il 12/08/2018;
- [6] Legge italiana n.10, “*Norme per l’attuazione del Piano nazionale in materia di uso razionale dell’energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia*”, 9 gennaio 1991;
- [7] Direttiva Comunitaria 2002/91/CE “*Energy Performance of Buildings Directive*” (EPBD), 16 dicembre 2002;
- [8] Direttiva Comunitaria 2010/31/UE (EPBD recast), “*Prestazione energetica nell’edilizia (rifusione)*”, 19 maggio 2010;
- [9] Legge italiana n.90, “*Disposizioni urgenti per il recepimento della Direttiva 2010/31/UE del Parlamento europeo e del Consiglio del 19 maggio 2010, sulla prestazione energetica nell’edilizia per la definizione delle procedure d’infrazione avviate dalla Commissione europea, nonché altre disposizioni in materia di coesione sociale*”, 3 agosto 2013;
- [10] Direttiva (UE) 2018/844 del Parlamento Europeo e del Consiglio del 30 maggio 2018;
- [11] Relazione del Ministero dello Sviluppo Economico, “*Applicazione della metodologia di calcolo dei livelli ottimali in funzione dei costi per i requisiti minimi di prestazione energetica*” (Direttiva 2010/31/UE Art.5), luglio 2013;
- [12] Ente Italiano di Normazione, UNI/TS 11300-1, “*Determinazione del fabbisogno di energia termica dell’edificio per la climatizzazione estiva ed invernale*”, ottobre 2014;
- [13] Ente Italiano di Normazione, UNI/TS 11300-2, “*Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale, per la produzione di acqua calda sanitaria, per la ventilazione e per l’illuminazione in edifici non residenziali*” ottobre 2014;
- [14] Ente Italiano di Normazione, UNI/TS 11300-3, “*Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione estiva*”, marzo 2010;
- [15] Ente Italiano di Normazione, UNI/TS 11300-4, “*Utilizzo di energie rinnovabili e di altri metodi di generazione per la climatizzazione invernale e per la*

-
- produzione di acqua calda sanitaria*”, maggio 2012;
- [16] Legge ordinaria del Parlamento n.373, “*Norme per il contenimento del consumo energetico per usi termici negli edifici*”, 30 aprile 1976;
- [17] Decreto del Presidente della Repubblica n.412, “*Regolamento recante norme per la progettazione, l’installazione, l’esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia, in attuazione dell’art. 4, comma 4, della L. 9 gennaio 1991, n.10*”, 26 agosto 1993;
- [18] Direttiva 93/76/CEE del Consiglio del 13 settembre 1993;
- [19] Direttiva 2006/32/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio, “*Efficienza degli usi finali dell’energia e i servizi energetici recante abrogazione della Direttiva 93/76/CEE del consiglio*”, 5 aprile 2006;
- [20] Decreto Legislativo n.192, “*Attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell’edilizia*”, 19 agosto 2005;
- [21] Regolamento delegato (UE) n.244/2012 della Commissione, “*Integrazione della direttiva 2010/31/UE del Parlamento europeo e del Consiglio sulla prestazione energetica nell’edilizia istituendo un quadro metodologico comparativo per il calcolo dei livelli ottimali in funzione dei costi per i requisiti minimi di prestazione energetica degli edifici e degli elementi edilizi*”, 16 gennaio 2012;
- [22] Relazione della Commissione Europea, “*Orientamenti che accompagnano il regolamento delegato (UE) n.244/2012 del 16 gennaio 2012 della Commissione che integra la direttiva 2010/31/UE del Parlamento europeo e del Consiglio sulla prestazione energetica nell’edilizia istituendo un quadro metodologico comparativo per il calcolo dei livelli ottimali in funzione dei costi per i requisiti minimi di prestazione energetica degli edifici e degli elementi edilizi*”, 19 aprile 2012;
- [23] Testo coordinato del decreto legge 4 giugno 2013, n.63;
- [24] Decreto del Ministero dello Sviluppo Economico, “*Applicazione della metodologia di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici*”, 26 giugno 2015;
- [25] <https://www.cti2000.it/>, consultato il 20/07/2018;
- [26] <http://www.uni.com/>, consultato il 25/08/2018;
- [27] <http://www.building-typology.eu/>, consultato il 30/08/2018;
- [28] Elena Fregonara, “*Valutazione sostenibilità progetto_Life Cycle Thinking e indirizzi internazionali*”, Franco Angeli, Milano, 2015;
- [29] Ente Italiano di Normazione, UNI EN 15459:2018 “*Prestazione energetica degli*

-
- edifici – Procedura di valutazione economica dei sistemi energetici degli edifici*”, 8 marzo 2018;
- [30] DEI Tipografia del Genio Civile. Prezzi informativi dell’edilizia per, Recupero, Ristrutturazione e Manutenzione; 2011;
- [31] Prezzario regione Piemonte, 2018, disponibile sul sito <https://www.regione.piemonte.it/>, consultato il 1/10/2018;
- [32] <https://www.arera.it/>, consultato il 12/09/2018;
- [33] <https://luce-gas.it/>, consultato il 15/09/2018;
- [34] Ente Italiano di Normazione, UNI EN 10349, “*Riscaldamento e raffrescamento degli edifici*”, 31 marzo 2016;
- [35] Pacchiega Claudia, “*Simulazione termo-energetica dinamica di edifici ad alte prestazioni: Procedure di validazione dei modelli, applicazioni progettuali e casi studio*”, Dottorato di ricerca in “Scienze dell’ingegneria”, Università degli Studi di Ferrara, Settore disciplinare ING-IND/11, Ciclo XXV, anni 2010-2014;
- [36] Venturini Licia, “*Calcolo dinamico delle prestazioni energetiche di un edificio secondo le prescrizioni del protocollo LEED: il museo Magi del ‘900 di Pieve di Cento*”, tesi di laurea, Alma Mater studiorum - Università di Bologna, Facoltà di Ingegneria, Corso di laurea in ingegneria civile, anno accademico 2011-2012;
- [37] Manuale “*Engineering Reference*” di EnergyPlus™, versione 9.0.1, ottobre 2018;
- [38] <https://energyplus.net/>, consultato il 20/08/2018;
- [39] F. Moretti, S. Panzieri, “*Metodologia di ottimizzazione multi-obiettivo della climatizzazione termica di edifici. Validazione su sistema di simulazione*”, report ENEA rds/2013/122;
- [40] <https://www.infobuildenergia.it/>, consultato il 23/10/2018;
- [41] <http://www.mygreenbuildings.org/>, consultato il 23/10/2018;
- [42] C. Christensen, S. Horowitz, R. Anderon, A. Courtney, J. Spencer, “*BEopt™ software for building energy optimization: features and capabilities*”, Colorado, 2006;
- [43] V. Corrado, I. Ballarini, S. Paduos, “*Assessment of Cost-optimal Energy Performance Requirements for the Italian Residential Building Stock*”, *Energy Procedia* 45, 2014;
- [44] D. Kalyanmoy, “*A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-IP*”, aprile 2002;
- [45] Federica Mangiatordi, “*Tecniche di intelligenza artificiale per l’ottimizzazione energetica di una microgrid*”, Tesi di dottorato, Università degli Studi di Roma

-
- Tre, Ciclo XXVI, Anno accademico 2014-2015;
- [46] Eva Sciacca, “*Algoritmi evolutivi multiobiettivo e possibilistici worst-case distance per l’ottimizzazione di circuiti elettronici*”, Tesi di laurea, Università degli Studi di Catania, Facoltà di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali, Corso di Laurea Specialistica in Informatica, Anno accademico 2005-2006;
- [47] V. Corrado, I. Ballarini, G. De Luca, E. Primo, “*Aggiornamento della metodologia comparativa per la determinazione dei livelli ottimali di prestazione energetica negli edifici*”, Report ricerca di sistema elettrico Enea, 2018 (in pubblicazione);
- [48] <https://www.designbuilder.co.uk/>, consultato il 15/07/2018;

Indice delle tabelle:

- [Tabella 1] Divisione delle zone climatiche in relazione ai GG;
- [Tabella 2] Riepilogo degli interventi/misure considerate;
- [Tabella 3] Fattori di conversione in energia primaria di differenti vettori energetici;
- [Tabella 4] Vita utile di alcuni componenti e sistemi;
- [Tabella 5] Costo degli inquinanti;
- [Tabella 6] Tariffa D2, abitazione corrispondente alla residenza anagrafica e potenza fino a 3 kW;
- [Tabella 7] Tariffa D3, abitazione non corrispondente alla residenza anagrafica o con potenza superiore a 3 kW;
- [Tabella 8] Tariffa TD, abitazioni coincidenti con la residenza anagrafica;
- [Tabella 9] Tariffa TD, abitazioni non coincidenti con la residenza anagrafica;
- [Tabella 10] Accise per usi domestici;
- [Tabella 11] Tariffazione del gas naturale per l'ambito Nord Occidentale per uso residenziale;
- [Tabella 12] Divisione delle aliquote a seconda della regione geografica;
- [Tabella 13] Dati generali edificio RGC_E1_E
- [Tabella 14] Metrature appartamento tipo;
- [Tabella 15] Dati tipologici dell'edificio di riferimento RGC_E1_E per la costruzione del modello;
- [Tabella 16] Caratteristiche tecnologiche delle chiusure trasparenti;
- [Tabella 17] Tipologie di chiusure trasparenti predefinite suddivise per dimensione e orientamento;
- [Tabella 18] Misure di efficienza energetica e loro obiettivi;
- [Tabella 19] Spessori di isolante necessari al raggiungimento del livello di EEO;
- [Tabella 20] Prezzo dell'EPS per spessore base e per centimetro aggiunto EEM 1;
- [Tabella 21] Costi aggiuntivi per l'EEM 1;
- [Tabella 22] Costo per superficie unitaria di facciata per l'EEM 1;
- [Tabella 23] Costo complessivo dell'isolante per l'EEM 1;
- [Tabella 24] Costo complessivo dell'isolante più costi aggiuntivi per l'EEM 1;
- [Tabella 25] Prezzo dell'EPS per spessore base e per centimetro aggiunto EEM 2;
- [Tabella 26] Costo per superficie unitaria di facciata per l'EEM 2;
- [Tabella 27] Costo complessivo dell'isolante per l'EEM 2;
- [Tabella 28] Costo complessivo dell'isolante più costi aggiuntivi per l'EEM 2;

-
- [Tabella 29] Prezzo dell'MW (glass) per spessore base e per centimetro aggiunto EEM 3;
- [Tabella 30] Costo per superficie unitaria di pavimento per l'EEM 3;
- [Tabella 31] Costo complessivo dell'isolante per l'EEM 3;
- [Tabella 32] Prezzo dell'EPS per spessore base e per centimetro aggiunto EEM 4;
- [Tabella 33] Costo per superficie unitaria di pavimento per l'EEM 4;
- [Tabella 34] Costo complessivo dell'isolante per l'EEM 4;
- [Tabella 35] Costo del serramento in relazione alla trasmittanza;
- [Tabella 36] Costi aggiuntivi EEM 5;
- [Tabella 37] Costi per unità di superficie di serramento EEM 5;
- [Tabella 38] Costi per unità di superficie di serramento più posa in opera EEM 5;
- [Tabella 39] Costo totale del serramento più posa in opera EEM 5;
- [Tabella 40] Valori di mercato per i frangisole;
- [Tabella 41] Costo medio ponderato e costo totale del frangisole per tutte le tipologie di finestra;
- [Tabella 42] Costi e altezze di mercato per elementi schermanti a veneziana;
- [Tabella 43] Costo delle veneziane per la tipologia di finestra A;
- [Tabella 44] Costo medio ponderato per l'installazione di schermature mobili EEM 6;
- [Tabella 45] Costo totale per le macchine frigorifere multisplit autonome;
- [Tabella 46] Costo totale per caldaia tradizionale a bassa temperatura;
- [Tabella 47] Costo complessivo dei sistemi di emissione a radiatori;
- [Tabella 48] Costo totale della caldaia a condensazione di taglia grande;
- [Tabella 49] Costo dei sistemi di emissione - fancoil;
- [Tabella 50] Costo totale delle pompe di calore aria-acqua per il riscaldamento;
- [Tabella 51] Costo totale della caldaia tradizionale a bassa temperatura per ACS;
- [Tabella 52] Costo totale della caldaia a condensazione per ACS;
- [Tabella 53] Costo delle caldaie a condensazione autonome EEM 10;
- [Tabella 54] Costo radiatori EEM 10;
- [Tabella 55] Costo fancoil EEM 10;
- [Tabella 56] Costo totale dei collettori solari EEM 12;
- [Tabella 57] Costo totale per l'installazione del sistema fotovoltaico EEM 13;
- [Tabella 58] Costo totale per l'installazione dei sistemi di regolazione EEM 15;
- [Tabella 59] Sintesi di tutti i costi di installazione;
- [Tabella 60] Sintesi di tutti i costi di sostituzione;
- [Tabella 61] Sintesi di tutti i costi di manutenzione;

-
- [Tabella 62] Andamento dei costi dell'energia elettrica;
- [Tabella 63] Andamento dei costi del gas naturale;
- [Tabella 64] Set ottimale ottenuto mediante il processo di cost optimality in regime semi-stazionario;
- [Tabella 65] Confronto tra EP e Costo globale tra lo stato di fatto e il pacchetto di misure ottimali;
- [Tabella 66] Misure di efficienza energetica e loro livelli per i due punti con costo minore del fronte di Pareto;
- [Tabella 67] Confronto tra EP e Costo globale tra lo stato di fatto e il punto 1 e 2;
- [Tabella 68] Set ottimali a confronto;
- [Tabella 69]: Confronto EP e costo globale in regime semi-stazionario;
- [Tabella 70]: Confronto EP e costo globale in regime dinamico.

Indice dei grafici:

- [Grafico 1] Distribuzione della popolazione e dei comuni per zona climatica;
- [Grafico 2] Distribuzione dei GG per la popolazione delle differenti zone climatiche;
- [Grafico 3] Valutazione del valore finale di una misura;
- [Grafico 4] Valutazione del costo di sostituzione di una misura;
- [Grafico 5] Valutazione del valore finale nel caso di sostituzione di una misura;
- [Grafico 6] Attualizzazione dei costi di smaltimento;
- [Grafico 7] Suddivisione dei costi energetici del terzo trimestre 2018;
- [Grafico 8] Suddivisione dei costi del gas per il terzo trimestre 2018;
- [Grafico 9] Andamento dei valori dell'EER in relazione al fattore di carico. Dati tratti dalla relazione del Ministero dello Sviluppo Economico;
- [Grafico 10] Interpolazione lineare dei costi di mercato EEM 5;
- [Grafico 11] Interpolazione lineare dei costi di mercato EEM 6;
- [Grafico 12] Interpolazione lineare dei costi per l'installazione di veneziane per finestre di tipologia A;
- [Grafico 13] Interpolazione lineare dei costi in relazione alle potenze per caldaie a condensazione di taglia grande;
- [Grafico 14] Interpolazione dei costi rilevati sul mercato in relazione alla potenza;
- [Grafico 15] Profilo orario degli apporti termici degli occupanti e delle apparecchiature;
- [Grafico 16] Profilo orario per i ricabi d'aria;
- [Grafico 17] Percorsi di ottimizzazione;
- [Grafico 18] Ripartizione del costo globale della soluzione cost optimal;
- [Grafico 19] Fronte di Pareto;

Indice delle figure:

- [Figura 1] Curve di domanda e risposta per programmi a simulazione sequenziale;
- [Figura 2] Schema di calcolo relativo alla simulazione simultanea;
- [Figura 3] Schema di funzionamento di EnergyPlus;
- [Figura 4] Schema delle componenti che influiscono sui bilanci termici delle superfici e dell'aria;
- [Figura 5] Diagramma di flusso dei GA;
- [Figura 6] Esempio di suddivisione in fronti appartenenti ad un determinato dominio;
- [Figura 7] Metodo di assegnazione della crowded-distance;
- [Figura 8] "Matrice della tipologia edilizia" italiana con illustrazione attraverso una immagine reale degli edifici-tipo;
- [Figura 9] Prospetto nord-ovest;
- [Figura 10] Prospetto sud-est;
- [Figura 11] Pianta fuori scala del piano tipo recante la suddivisione degli appartamenti;
- [Figura 12] Stralcio di pianta fuori scala rappresentante due alloggi affiancati e loro suddivisione interna;
- [Figura 13] 3D dell'edificio con suddivisione degli ambienti climatizzati e non climatizzati;
- [Figura 14] Stratigrafia delle chiusure verticali opache verso l'esterno;
- [Figura 15] Stratigrafia della muratura verticale opaca di separazione tra ambienti riscaldati e non riscaldati;
- [Figura 16] Stratigrafia dei tramezzi di separazione interni;
- [Figura 17] Pianta piano tipo fuori scala con indicazione delle murature verticali;
- [Figura 18] Stratigrafia della chiusura orizzontale inferiore;
- [Figura 19] Stratigrafia della chiusura orizzontale superiore;
- [Figura 20] Stratigrafia del tetto a falde con struttura e tavolato in legno;
- [Figura 21] Sezione fuori scala con indicazione delle chiusure opache orizzontali;
- [Figura 22] Formula per il calcolo dello spessore di isolante in relazione della trasmittanza richiesta;
- [Figura 23] Formula per il calcolo del costo per la superficie utile di facciata;
- [Figura 24] Formula per il calcolo del costo medio ponderato per i frangisole;
- [Figura 25] Rappresentazione grafica della geometria dell'edificio di riferimento;
- [Figura 26] Rappresentazione grafica del sistema impiantistico allo stato di fatto dell'edificio di riferimento;

