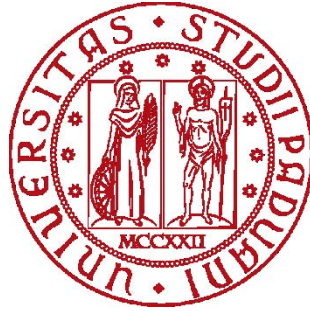


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Industriale DII

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica



Tesi di laurea magistrale

**ANALISI COSTI-BENEFICI DI UNA RIQUALIFICAZIONE
ENERGETICA E STRUTTURALE DI UN EDIFICIO
STRATEGICO PER LA PROTEZIONE CIVILE**

Relatore:

Prof. MICHELE DE CARLI

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Michele De Carli', is written over the printed name.

Correlatori:

Prof.ssa FRANCESCA DA PORTO

Ing. FILIPPO LORENZONI

Laureando: LEONARDO FELETTI

1182799

Anno accademico 2019-2020

SOMMARIO

1	Introduzione	1
1.1	Organizzazione della Tesi.....	2
2	Edifici storici: aspetti energetici e strutturali	5
2.1	Gli edifici storici in italia	6
2.1.1	Inquadramento strutturale edifici esistenti	6
2.1.2	Inquadramento energetico edifici esistenti.....	8
2.2	Riqualificazione degli edifici storici	10
2.2.1	Il progetto di riqualificazione.....	10
2.2.2	Tipologie di intervento.....	11
2.2.3	Conto Termico e incentivazione	13
2.3	Rischio sismico	15
2.3.1	La sismicità nel territorio italiano	15
2.3.2	La vulnerabilità sismica degli edifici	16
2.4	ReLUIS	18
3	Caso studio: l'ex tribunale di Fabriano	21
3.1	Inquadramento generale.....	22
3.1.1	Localizzazione e inquadramento urbano.....	22
3.1.2	Evoluzione costruttiva e funzionale dell'edificio.....	23
3.1.3	Rilievo funzionale.....	24
3.1.4	Rilievo fotografico	24
3.1.5	Rilievo geometrico.....	25
3.2	Rilievo strutturale e involucro edilizio.....	28
3.2.1	Strutture verticali.....	28

3.2.2	Strutture orizzontali.....	30
3.2.3	Copertura.....	33
3.2.4	Chiusure trasparenti.....	33
3.3	Impianti e ambienti interni.....	37
3.3.1	Sistema di generazione.....	37
3.3.2	Terminali di impianto.....	37
3.3.3	Acqua calda sanitaria.....	38
3.3.4	Illuminazione.....	38
3.3.5	Controsoffitto.....	38
3.3.6	Ascensori.....	38
3.4	Stato pre-ristrutturazione.....	39
3.4.1	Involucro edilizio.....	39
3.4.2	Impianti e interni.....	42
3.4.3	Destinazione d'uso.....	43
4	Metodi e modelli utilizzati.....	45
4.1	Prestazioni energetiche degli edifici: il modello quasi stazionario.....	46
4.1.1	Attestato di prestazione energetica.....	46
4.1.2	La norma UNI/TS 11300.....	47
4.1.3	Fabbisogno di energia termica per la climatizzazione invernale.....	48
4.1.4	Fabbisogno di energia primaria.....	51
4.1.5	Indice di prestazione energetica.....	55
4.2	Il modello dinamico.....	57
4.2.1	Bilancio termico di un edificio.....	57
4.2.2	Dati in ingresso.....	58
4.2.3	Risultati della simulazione dinamica.....	59
4.3	Creazione del modello in Edilclima.....	60
4.3.1	Introduzione al software: <i>Edilclima</i>	60
4.3.2	Dati generali.....	61

4.3.3	Componenti involucro.....	62
4.3.4	Input grafico.....	62
4.3.5	Zone/locali climatizzati.....	63
4.3.6	Impianti.....	67
4.3.7	Risultati fabbricato e energia primaria.....	68
4.4	Creazione del modello in Trnsys.....	69
4.4.1	Introduzione al software: TRNSYS.....	69
4.4.2	Impostazione del modello.....	69
4.4.3	Definizione dati generali modello.....	70
4.4.4	Definizione delle zone termiche.....	74
4.4.5	Definizione degli input.....	78
4.4.6	Simulazione dinamica.....	82
4.5	Carico latente e Impianto di ventilazione.....	83
4.5.1	Portata d'aria di rinnovo.....	84
4.5.2	Trattamento aria.....	85
5	Risultati e ipotesi di intervento.....	93
5.1	Risultati modello quasi stazionario.....	94
5.1.1	Potenza invernale.....	94
5.1.2	Energia invernale.....	95
5.1.3	Climatizzazione estiva.....	97
5.1.4	Illuminazione.....	99
5.1.5	Energia primaria.....	99
5.1.6	Attestato energetico.....	102
5.2	Risultati modello dinamico.....	103
5.3	Risultati impianto di ventilazione.....	105
5.4	Ipotesi di intervento.....	106
5.4.1	Scenario 1: involucro opaco e trasparente.....	107
5.4.2	Scenario 2.a: impianti e solai.....	107

5.4.3	Scenario 2.b: impianti, solai e serramenti	108
5.4.4	Scenario 3.a: involucro e impianti.....	108
5.4.5	Scenario 3.b: involucro, impianti e fotovoltaico	109
6	Analisi costi-benefici.....	111
6.1	Risultati fabbisogno e risparmio annuo.....	112
6.1.1	Scenario 0.....	112
6.1.2	Scenario 1.....	113
6.1.3	Scenario 2.a.....	113
6.1.4	Scenario 2.b.....	115
6.1.5	Scenario 3.a.....	115
6.1.6	Scenario 3.b.....	116
6.1.7	Riepilogo.....	118
6.2	Costi di investimento e tempo di ritorno	120
6.2.1	Costo singoli interventi	120
6.2.2	Investimento complessivo scenari.....	121
6.2.3	Convenienza economica degli interventi.....	122
6.3	Incentivi e convenienza investimenti	125
6.3.1	Calcolo degli incentivi.....	125
6.3.2	Incentivo complessivo scenari.....	129
6.3.3	Convenienza e ritorno investimenti.....	130
6.4	Riepilogo.....	132
7	Conclusioni.....	135
7.1	Conclusioni.....	135
8	Riferimenti.....	141

INDICE DELLE FIGURE

<i>Figura 2.1 - Eventi sismici e loro intensità nel territorio italiano (Protezione Civile)</i>	15
<i>Figura 2.2 - Logo di ReLUIS</i>	18
<i>Figura 2.3 - Università e Istituti di Ricerca coinvolti nel consorzio ReLUIS (ReLUIS, 2019)</i>	19
<i>Figura 3.1 - Localizzazione geografica e vista aerea di Fabriano con identificazione del caso studio</i> .	22
<i>Figura 3.2 - Ortofoto dell'area e vista dell'edificio</i>	22
<i>Figura 3.3 - Foto storiche dell'edificio prima (1940) e dopo (1950) l'intervento di sopraelevazione (Fabriano storica)</i>	23
<i>Figura 3.4 – Interni del piano seminterrato</i>	24
<i>Interni del primo piano</i>	25
<i>Interni del secondo piano</i>	25
<i>Esterni dell'edificio</i>	25
<i>Figura 3.5 - Fotografie dell'edificio scattate durante il sopralluogo del 28 giugno 2017</i>	25
<i>Figura 3.6 - Pianta del primo piano</i>	26
<i>Figura 3.7 – Pianta dell'edificio; in ordine da sinistra a destra seminterrato, piano rialzato, primo piano, secondo piano</i>	26
<i>Prospetto Ovest</i>	27
<i>Prospetto Nord</i>	27
<i>Prospetto Est con sezione del corpo trasversale</i>	27
<i>Prospetto Sud</i>	27
<i>Figura 3.8 - Prospetti dell'edificio in scala grafica</i>	27
<i>Figura 3.9 - Dettaglio in sezione della tipologia muraria MUR1, rispettivamente MUR1-A e MUR1-B</i>	28
<i>Figura 3.10 - Tipologie murarie MUR3 e MUR2</i>	29
<i>Figura 3.11 - Schema in pianta delle diverse tipologie murarie in ogni livello dell'edificio</i>	29
<i>Figura 3.12 – Ipotesi di stratigrafia della tipologia di solaio SOL1</i>	30
<i>Figura 3.13 – Ipotesi di stratigrafia per la tipologia di solaio SOL2</i>	31
<i>Figura 3.14 - Ipotesi di stratigrafia per la tipologia di solaio SOL3</i>	31
<i>Figura 3.15 - Stratigrafia della tipologia di solaio SOL4</i>	32
<i>Figura 3.16 - Identificazione delle tipologie di solai</i>	32
<i>Figura 3.17 - Identificazione delle capriate lignee</i>	33
<i>Figura 3.18 - Vista in sezione delle falde</i>	33
<i>Figura 4.2 - Classificazione tipologie di valutazione energetica per applicazioni omogenee all'intero edificio (UNI-TS 11300)</i>	47

<i>Figura 4.3 - Schema dei componenti per la determinazione del fabbisogno di energia termica per la climatizzazione invernale</i>	49
<i>Figura 4.4 - Rappresentazione grafica del coefficiente di utilizzazione degli apporti termici</i>	50
<i>Figura 4.5 - Esempio di suddivisione di impianto in parte "generazione" e "utilizzo" (UNI-TS 11300)</i>	51
<i>Figura 4.6 - Rappresentazione del calcolo del fabbisogno di energia primaria (energia)</i>	52
<i>Figura 4.7 – Bilancio termico di un generico sottosistema Y</i>	53
<i>Figura 4.8 - Fattori di conversione in energia primaria Nren, Ren e globale</i>	56
<i>Figura 4.9 - Schema per la determinazione dell'indice di prestazione energetica</i>	56
<i>Figura 4.10 - Schema dell'edificio visto come sistema aperto e i termini del bilancio energetico</i>	58
<i>Figura 4.11 - Logo di Edilclima</i>	60
<i>Figura 4.12 - Schermata del programma che mostra la definizione di una tipologia muraria</i>	62
<i>Figura 4.13 - Schermata di visualizzazione dell'input grafico. Primo piano dell'edificio</i>	63
<i>Figura 4.14 - Vista 3D dell'intero edificio con edifici vicini</i>	63
<i>Figura 4.15 - Suddivisione del piano rialzato in zone termiche</i>	65
<i>Figura 4.16 - Suddivisione del primo piano in zone termiche</i>	66
<i>Figura 4.17 - Suddivisione del piano rialzato in zone termiche</i>	67
<i>Figura 4.18 – Logo di TRNSYS</i>	69
<i>Figura 4.19 - Vista tridimensionale dell'edificio e divisione delle zone termiche secondo la destinazione d'uso</i>	76
<i>Figura 4.20 - Andamento della temperatura del terreno adottato nel modello</i>	80
<i>Figura 4.21 - Profilo orario settimanale dell'accensione dell'impianto di riscaldamento</i>	80
<i>Figura 4.22 - Profili orari giornalieri per il riscaldamento nell'intero edificio e nelle zone con orario mattutino</i>	81
<i>Figura 4.23 - Profili orari giornalieri di occupazione uffici</i>	82
<i>Figura 4.24 - Schermata del modello in Simulation Studio</i>	82
<i>Figura 4.25 - Portata d'aria di rinnovo necessaria a garantire un benessere adeguato</i>	83
<i>Figura 4.26 - Schema UTA e dettaglio componenti</i>	86
<i>Figura 4.27 - Diagramma psicometrico: funzionamento invernale</i>	86
<i>Figura 4.28 - Diagramma psicometrico: funzionamento estivo</i>	87
<i>Figura 4.29 - Esempio di recuperatore di calore statico a flusso incrociato</i>	88
<i>Figura 4.30 - Schema flussi scambiatore rigenerativo</i>	89
<i>Figura 4.31 - Processo di raffreddamento con deumidificazione</i>	91
<i>Figura 5.1 - Fabbisogno mensile di energia utile per la climatizzazione invernale</i>	96
<i>Figura 5.2 - Fabbisogno mensile di energia utile per la climatizzazione invernale</i>	97
<i>Figura 5.3 - Fabbisogno di energia utile mensile per climatizzazione dell'edificio</i>	98
<i>Figura 5.4 - Prestazione energetica globale dell'edificio riportata nell'APE</i>	102

<i>Figura 5.5 - Fabbisogno di energia utile dell'edificio.....</i>	<i>104</i>
<i>Figura 5.6 - Fabbisogno di energia utile per il trattamento dell'aria di immissione.....</i>	<i>105</i>
<i>Figura 6.1 - Rappresentazione grafica del VAN per i diversi scenari di intervento.....</i>	<i>124</i>
<i>Figura 6.2 - Interventi di incremento dell'efficienza energetica in edifici esistenti (art.4, comma 1..</i>	<i>125</i>
<i>Figura 6.3 - Interventi di piccole dimensioni di produzione di energia termica da fonti rinnovabili e di sistemi ad alta efficienza (art.4, comma 2).....</i>	<i>126</i>
<i>Figura 6.4 - Costi di investimento, incentivi e risparmio annuo dei vari scenari</i>	<i>129</i>
<i>Figura 6.5 - Rappresentazione grafica del VAN con il contributo degli incentivi per i diversi scenari di intervento.....</i>	<i>131</i>

INDICE DELLE TABELLE

<i>Tabella 3.1 - Trasmissione termica dei muri secondo la tipologia e lo spessore.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabella 3.2 - Trasmissione termica dei solai secondo la tipologia</i>	<i>41</i>
<i>Tabella 4.1 - Riepilogo zone termiche climatizzate</i>	<i>64</i>
<i>Tabella 4.2 - Materiali costruttivi e loro proprietà termiche e fisiche</i>	<i>70</i>
<i>Tabella 4.3 - Stratigrafia della tipologia muraria MUR1-A</i>	<i>71</i>
<i>Tabella 4.4 - Stratigrafia della tipologia muraria MUR1-B</i>	<i>71</i>
<i>Tabella 4.5 - Stratigrafia della tipologia muraria MUR2.....</i>	<i>71</i>
<i>Tabella 4.6 - Stratigrafia della tipologia muraria MUR3.....</i>	<i>72</i>
<i>Tabella 4.7 - Stratigrafia dell solaio su terra</i>	<i>72</i>
<i>Tabella 4.8 - Stratigrafia della tipologia di solaio SOL1</i>	<i>72</i>
<i>Tabella 4.9 - Stratigrafia della tipologia di solaio SOL3</i>	<i>73</i>
<i>Tabella 4.10 - Stratigrafia della tipologia di solaio SOL4</i>	<i>73</i>
<i>Tabella 4.11 - Stratigrafia del tetto.....</i>	<i>73</i>
<i>Tabella 4.12 - Zone termiche definite nel modello</i>	<i>75</i>
<i>Tabella 4.13 - Dettaglio ricambio orario e portata d'aria di rinnovo per zona termica</i>	<i>85</i>
<i>Tabella 5.1 - Dettaglio dispersioni potenza invernale</i>	<i>94</i>
<i>Tabella 5.2 - Dettaglio dispersioni potenza invernale per zone termiche</i>	<i>94</i>
<i>Tabella 5.3 - Fabbisogno mensile di energia utile e bilancio delle perdite e degli apporti gratuiti durante la stagione di climatizzazione invernale</i>	<i>95</i>
<i>Tabella 5.4 - Energia utile per la climatizzazione invernale suddivisa per zone</i>	<i>96</i>
<i>Tabella 5.5 - Fabbisogno mensile di energia utile e bilancio delle perdite e degli apporti gratuiti durante la stagione di climatizzazione estiva</i>	<i>97</i>
<i>Tabella 5.6 - Energia utile per la climatizzazione estiva suddivisa per zone</i>	<i>98</i>
<i>Tabella 5.7 - Dettaglio fabbisogni mensili di energia per la climatizzazione invernale.....</i>	<i>100</i>
<i>Tabella 5.8 - Dettaglio fabbisogni mensili di energia per la produzione di ACS</i>	<i>101</i>
<i>Tabella 5.9 - Fabbisogni di energia primaria e indici di prestazione</i>	<i>102</i>
<i>Tabella 5.10 - Fabbisogno mensile di energia utile e bilancio delle perdite e degli apporti gratuiti ..</i>	<i>103</i>
<i>Tabella 6.1 - Dettaglio consumi e costi per servizio energetico Scenario 0.....</i>	<i>112</i>
<i>Tabella 6.2 - Dettaglio consumi, costi e risparmio annuo per servizio energetico Scenario 1</i>	<i>113</i>
<i>Tabella 6.3 - Dettaglio consumi, costi e risparmio annuo per servizio energetico Scenario 2.a</i>	<i>114</i>
<i>Tabella 6.4 - Dettaglio consumi, costi e risparmio annuo per servizio energetico Scenario 2.b</i>	<i>115</i>
<i>Tabella 6.5 - Dettaglio consumi, costi e risparmio annuo per servizio energetico Scenario 3.a</i>	<i>116</i>

<i>Tabella 6.6 - Dettaglio mensile consumi e produzione di energia finale.....</i>	<i>117</i>
<i>Tabella 6.7 - Dettaglio mensile dei consumi complessivi e della spesa per l'energia.....</i>	<i>118</i>
<i>Tabella 6.8 - Riepilogo benefici interventi e risparmio annuo.....</i>	<i>119</i>
<i>Tabella 6.9 - Interventi per singolo scenario e costo complessivo.....</i>	<i>122</i>
<i>Tabella 6.10 - Indici economici dei diversi scenari proposti.....</i>	<i>124</i>
<i>Tabella 6.11 – Incentivi per singolo scenario e incentivo complessivo.....</i>	<i>129</i>
<i>Tabella 6.12 - Indici economici dei diversi scenari proposti tenendo conto degli incentivi del Conto Termico.....</i>	<i>130</i>
<i>Tabella 6.13 - Riepilogo risultati e costi per ogni livello di intervento.....</i>	<i>134</i>

1 INTRODUZIONE

Il tema della salvaguardia del patrimonio artistico e architettonico di un paese come l'Italia è sempre stato oggetto di molta attenzione. La presenza nel territorio italiano di numerosi edifici storici, alcuni dei quali anche di elevato rilievo artistico, è una ricchezza di inestimabile valore; questo patrimonio però, per poter essere fruibile, deve essere salvaguardato e messo in sicurezza. L'Italia è un paese ad elevato rischio sismico e in un tale contesto risulta evidente l'importanza di un adeguamento delle strutture esistenti, spesso costruite senza criteri antisismici o comunque arrivate ormai a fine vita e di conseguenza potenzialmente a rischio.

Un altro problema che caratterizza gli edifici storici è sicuramente il fatto di essere molto energivori, caratterizzati da deficit energetici e scarsi livelli di comfort, principalmente dovuti ad involucri fortemente disperdenti e all'obsolescenza della dotazione impiantistica e delle finiture. In tale scenario emerge chiaramente la necessità di intervenire per fare fronte alle carenze prestazionali e strutturali degli edifici e per ridurre gli attuali insostenibili sprechi di energia attraverso operazioni di riqualificazione energetica e strutturale.

Gli interventi di riqualificazione energetica e consolidamento strutturale, per essere proficui hanno bisogno di una progettazione mirata in base alle caratteristiche dell'edificio. Da qui l'importanza di studi che prevedano dei modelli dettagliati al fine di valutare il comportamento dell'edificio allo stato attuale e determinare i benefici in termini sia di solidità che di consumi energetici che eventuali interventi permetterebbero di ottenere.

Il seguente lavoro di tesi si concentra nello studio energetico di un edificio reale: l'ex Tribunale di Fabriano, in provincia di Ancona. La costruzione è dotata di un sistema di monitoraggio appartenente alla rete dell'Osservatorio Sismico delle Strutture; il Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale dell'Università di Padova, nell'ambito di un progetto pluriennale del consorzio interuniversitario ReLUIIS, ha effettuato, negli anni scorsi, degli studi strutturali al riguardo, con l'obiettivo di realizzare dei modelli numerici più fedeli possibile al comportamento dinamico del caso studio preso in esame e successivamente effettuare uno studio dell'efficacia degli interventi di consolidamento sulla risposta sismica globale della struttura.

Lo scopo dell'elaborato è quello di eseguire uno studio delle caratteristiche energetiche dell'edificio e successivamente proporre degli scenari di intervento volti al miglioramento dell'efficienza. Parallelamente a questo lavoro è stato svolto uno studio strutturale (Caprino

A., *Valutazione dell'efficacia di interventi a diverso livello di invasività ed integrati per la riduzione della vulnerabilità sismica di edifici in muratura: il caso dell'ex-tribunale di Fabriano*) volto a determinare la vulnerabilità e a valutare l'efficacia di eventuali interventi di adeguamento sismico ipotizzando dei livelli crescenti per invasività e costi. Solitamente l'analisi strutturale e quella energetica vengono considerate separatamente e le opere di adeguamento e riqualificazione a volte potrebbero anche rivelarsi contrastanti. Andare ad operare prevedendo scenari di intervento comuni permette di ottimizzare il risultato complessivo e prevedibilmente di ridurre i costi di investimento.

Il comportamento sia energetico che strutturale non è stato analizzato sull'edificio allo stato attuale, ma sulla situazione precedente agli interventi di consolidamento realizzati nel 1999 a seguito dei danni subiti a causa del terremoto di Umbria e Marche del 1997. Si è quindi proceduto alla creazione di due diversi modelli per valutare la prestazione energetica dell'edificio ricondotto allo stato pre-ristrutturazione.

Sulla base di tre livelli di intervento incrementali per adeguare sismicamente l'edificio sono stati proposti 5 diversi scenari di intervento (uno per il primo livello e due varianti per il secondo e il terzo livello). Successivamente sono stati valutati i benefici in termini di risparmio energetico e di "salto di classe" dei diversi scenari e stimati i costi di realizzazione. Infine si è effettuata un'analisi della convenienza economica considerando anche gli incentivi previsti dal Conto Termico per le opere di efficientamento energetico.

1.1 ORGANIZZAZIONE DELLA TESI

Il seguente lavoro di tesi affronta il tema della riqualificazione energetica degli edifici storici e le ipotesi di intervento affrontate parallelamente a interventi strutturali di adeguamento sismico. Si propone un'analisi dei benefici prodotti dal miglioramento dell'efficienza di caso studio reale e una valutazione dei costi di intervento. Di seguito viene riportata sinteticamente la suddivisione dei capitoli e il relativo contenuto:

- 1 – INTRODUZIONE: si mostrano le tematiche che verranno affrontate e l'organizzazione della tesi.
- 2 – EDIFICI STORICI: ASPETTI ENERGETICI E STRUTTURALI: si descrive sinteticamente la situazione del patrimonio costruito nel territorio italiano, rivolgendo l'attenzione alle problematiche degli edifici storici sia in ambito strutturale che in ambito energetico. Si illustra il problema della riqualificazione energetica degli edifici vista anche come strumento di conservazione degli stessi. Viene poi presentato un inquadramento della sismicità in Italia e il problema relativo alle strutture vulnerabili.

- 3 – CASO STUDIO: L'EX TRIBUNALE DI FABRIANO: viene fornito inizialmente un inquadramento generale dell'edificio oggetto di studio, per poi passare a un'analisi più approfondita della struttura e dell'impiantistica, in modo da ottenere un quadro dettagliato dello stato di fatto. L'obiettivo è quello di risalire alle caratteristiche dell'edificio precedente agli interventi al quale è stato sottoposto al fine di porre le basi per una valutazione energetica dello stesso.
- 4 – METODI E MODELLI UTILIZZATI: vengono presentati i metodi utilizzati per lo studio del comportamento energetico dell'edificio. I modelli utilizzati hanno due obiettivi diversi: la valutazione della classe energetica e dell'indice di prestazione secondo normativa e lo studio dinamico al fine di valutare il comportamento reale dell'edificio.
- 5 – RISULTATI E IPOTESI DI INTERVENTO: si riportano i risultati ottenuti dai modelli e si propongono degli scenari di intervento per il miglioramento della prestazione energetica dell'edificio, considerando di andare ad agire parallelamente a diversi livelli di intervento strutturale per l'adeguamento sismico.
- 6 – ANALISI COSTI-BENEFICI: si analizzano i risultati ottenuti dai modelli per i diversi scenari proposti ponendo l'attenzione sui benefici ottenuti. Inoltre si esegue una stima dei costi di realizzazione degli interventi al fine di valutare l'effettiva convenienza economica di ogni scenario.
- 7 – CONCLUSIONI: vengono effettuate delle considerazioni finali sui risultati ottenuti nel lavoro di tesi.

2 EDIFICI STORICI: ASPETTI ENERGETICI E STRUTTURALI

In Italia, ponendo l'attenzione all'insieme degli edifici di tutta la penisola, è possibile identificare diverse tipologie di costruzione a seconda dell'epoca in cui sono stati realizzati ma anche della zona geografica in cui si trovano. Soltanto una parte del totale risale al periodo di costruzione più recente, ma molti edifici e in modo particolare nei centri storici hanno ormai un'età non trascurabile e di conseguenza sono caratterizzati da problematiche di vario tipo.

In questo capitolo inizialmente si presenta quella che è la situazione degli edifici storici in Italia sia dal punto di vista strutturale che dal punto di vista energetico. Molto spesso questi edifici sono costruiti con tecniche che li rendono vulnerabili e facilmente esposti a danneggiamento in caso di terremoto ed essendo l'Italia un paese ad elevato rischio sismico, e in modo particolare alcuni territori della penisola, questa è una problematica che non può e non deve essere sottovalutata. Per quanto riguarda l'aspetto energetico invece si può affermare che la quasi totalità degli edifici storici è caratterizzata da fabbisogni di energia e di conseguenza costi di esercizio molto elevati. In un periodo come questo in cui si sta cercando di porre l'attenzione sulla riduzione delle emissioni e le norme attuali prevedono particolari accorgimenti nella costruzione di edifici sempre più efficienti, non si può ignorare il fatto che il grosso dei consumi in ambito edilizio è dovuto agli edifici di più vecchia realizzazione.

Si illustrano le modalità di riqualificazione energetica negli edifici e le problematiche da affrontare per la salvaguardia del patrimonio storico. Si presentano brevemente le tipologie di intervento per l'efficientamento e le modalità di incentivazione previste dal Conto Termico.

Successivamente si affronta il tema della pericolosità dovuta ai terremoti nel territorio italiano e come viene valutato il rischio sismico. Nel passato anche recente si ha memoria di terremoti di media e alta intensità che hanno provocato danni consistenti alle strutture, ma soprattutto tante vittime. È importante che al verificarsi di un evento sismico di una certa entità gli edifici possano essere considerati sicuri e non soggetti a episodi di crollo con conseguente rischio per le vite delle persone che li occupano.

Infine si presenta la Rete dei Laboratori Universitari di Ingegneria Sismica con cui collabora anche il Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale dell'Università di Padova in programmi di ricerca nel settore della sismica.

2.1 GLI EDIFICI STORICI IN ITALIA

Dal censimento della popolazione e delle abitazioni del 2011 risultano presenti sul territorio italiano circa 14.5 milioni di edifici. Di questi, più della metà risalgono a un periodo di costruzione antecedente al 1970. Risulta chiaro che in una tale situazione non c'è una grande possibilità di realizzazione di nuove opere, ma sta emergendo sempre di più l'importanza della ristrutturazione e della riqualificazione delle strutture esistenti. Tra queste costruzioni risultano di particolare interesse gli edifici storici in quanto fanno parte di un patrimonio unico al mondo e rappresentano per l'Italia una risorsa culturale e materiale molto importante.

L'Italia è un paese caratterizzato da un alto rischio sismico e in un tale contesto risulta evidente l'importanza della salvaguardia del patrimonio edilizio, non tanto per quanto riguarda le strutture di più recente costruzione, edificate secondo criteri antisismici, ma più per l'elevato numero di edifici di interesse storico che risultano inadeguati e a rischio crollo pericolo in caso di terremoto. È importante quindi la sicurezza strutturale: gli edifici devono essere stabili e poter resistere ad azioni conseguenti a eventi di tipo sismico, ma anche idrogeologico, meteorologico, ecc.

Prendendo in considerazione il comportamento energetico invece, molto spesso gli edifici storici sono caratterizzati da un elevato consumo di energia e problemi legati al comfort termico degli ambienti interni, dovuti da diversi fattori. Il potenziale risparmio energetico ottenibile da una riqualificazione energetica di un edificio storico è davvero significativo e può tranquillamente arrivare a due terzi della spesa per l'energia. Considerando anche la situazione attuale per quanto riguarda la salvaguardia dell'ecosistema e la linea guida adottata al fine della riduzione delle emissioni, andare ad agire sul consumo energetico degli edifici esistenti in modo da ridurre la domanda di energia complessiva risulta di fondamentale importanza.

2.1.1 Inquadramento strutturale edifici esistenti

La maggior parte delle costruzioni storiche, in modo particolare fino al XIX prima dell'avvento del calcestruzzo armato e dell'acciaio, è realizzata in muratura ordinaria non armata. Gli edifici storici in muratura si possono identificare in due diverse categorie, ossia le strutture facenti parte dell'edilizia "comune" (abitazioni e altri piccoli edifici) e quelle di tipo "monumentale" (chiese, palazzi, ecc.), che solitamente hanno anche un valore storico e artistico più importante. Le tecniche costruttive generalmente sono di più bassa qualità per l'edilizia comune principalmente per ragioni di tipo economico, mentre per gli edifici storico monumentali si possono riscontrare degli accorgimenti particolari utilizzati per aumentare la stabilità e prevenire potenziali danni o crolli nell'evenienza di un terremoto.

Generalmente le costruzioni in muratura, in caso di sisma, sono quelle che subiscono danni di entità più ingente e spesso sono soggette a crolli parziali o totali. Questo però non è sempre

vero, infatti si possono identificare diverse tipologie costruttive a seconda del periodo di costruzione. Particolarmente importate per il tipo di risposta sismica dell'edificio è il livello di connessione tra le varie pareti murarie e tra le pareti e i solai. A seconda del livello di interconnessione si può definire una classificazione della tipologia strutturale degli edifici in muratura [1]:

- “Mur-1 edifici antichi”: caratterizzata da connessioni tra le pareti facilmente danneggiabili, che in caso di sisma possono portare alla separazione delle pareti murarie tra loro e singoli dei maschi murari. Sono gli edifici che, in caso di terremoti di una certa entità, manifestano in maniera più evidente danneggiamenti e/o crolli. L'epoca di costruzione riguarda tutti gli edifici antecedenti al 1937 nelle zone non sismiche e più in generale gli edifici antecedenti all'anno di emanazione delle norme tecniche sismiche specifiche per quella zona per le zone che hanno subito terremoti dal 1908 fino al 1937 e che sono state di conseguenza considerate come zone sismiche prima del 1937. Le pareti murarie sono realizzate, a seconda della zona geografica di appartenenza, in muratura di pietrame irregolare o semi-regolare e malta di calce in caso di presenza di rocce dure, in pietra prevalentemente regolare e malta di calce nelle zone caratterizzate dalla presenza di rocce tenere, in mattoni pieni e malta di calce nelle zone caratterizzate dalla presenza di argilla. I solai sono spesso deformabili nel piano orizzontale e possono essere di vario tipo: volte di qualsiasi tipologia, doppie o singole; solai costituiti da travi in legno senza particolari irrigidimenti e collegamenti con le murature; solai con travi in ferro, anche questi senza irrigidimenti e collegamenti con le murature.
- “Mur-2 edifici antichi migliorati”: le caratteristiche costruttive sono quelle della prima categoria che però hanno subito degli interventi di rinforzo strutturale e sono dotati quindi di incatenamenti diffusi, interessanti la maggior parte delle pareti murarie a tutti i livelli.
- “Mur-3 edifici moderni”: questa categoria è caratterizzata da un ottimo comportamento scatolare grazie alla connessione tra le pareti verticali e i solai, che interrompono di fatto ad ogni piano la muratura e sono dotati di cordoli armati. L'epoca di costruzione è successiva al 1937 in tutte le zone non sismiche e successiva all'anno di emanazione delle norme tecniche specifiche per le zone terremotate tra il 1908 e il 1937. Anche in questo caso le pareti murarie sono realizzate con la muratura tipica della zona locale, con l'accorgimento di un utilizzo di malta di calce e cemento o malta di cemento invece della sola malta di calce. Inoltre, soprattutto per le costruzioni più recenti, c'è l'aggiunta della muratura in blocchi forati in laterizio o in

calcestruzzo. I solai possono essere in calcestruzzo armato alleggeriti con laterizi o costituiti da travi in acciaio inserite in cordoli perimetrali disposti su tutte le pareti murarie e ben collegate ad essi.

- “Mur-4 edifici semi-moderni”: questa categoria si può definire ibrida in quanto è caratteristica di edifici costruiti prima del 1937 secondo le norme specifiche manate per le zone che hanno subito terremoti dal 1908 fino al 1937.
- “Mur-5 edifici moderni non a norma”: è caratteristica di edifici costruiti dopo il 1937 ma che sono privi di collegamenti di piano tra le pareti murarie e i solai.

Questo tipo di classificazione viene utilizzato per una valutazione preliminare di vulnerabilità degli edifici. Per poter preservare il patrimonio edilizio possono essere necessari interventi di adeguamento sismico e di rinforzo strutturale, che garantiscano da una parte una stabilità della struttura sufficiente ad evitare danneggiamenti e crolli, dall'altra la sicurezza degli occupanti. Ovviamente per definire al meglio dove andare ad agire in maniera mirata con interventi idonei è necessaria prima una fase di conoscenza approfondita dell'edificio, dei metodi costruttivi e anche della sua storia poiché nel corso degli anni potrebbe avere subito delle modifiche più o meno invasive, come degli ampliamenti, delle sopraelevazioni, ecc., che spesso vanno a compromettere gli equilibri strutturali originari.

2.1.2 Inquadramento energetico edifici esistenti

Soltanto negli ultimi anni si è iniziato a volgere l'attenzione all'efficienza energetica degli edifici; gli immobili costruiti prima dell'entrata in vigore della legge 373/76 “Norme per il contenimento del consumo energetico per usi termici negli edifici” non presentano nessun accorgimento in termini di riduzione del fabbisogno di energia. Soltanto il 2% del totale costruito può essere inserito in una classe energetica uguale o superiore alla C. Inoltre nel passato recente c'è stata la tendenza a dimenticarsi del comportamento passivo degli edifici, facendo affidamento soltanto sulla capacità degli impianti per compensare le variazioni climatiche. Molto spesso gli edifici di realizzazione più antica, invece, venivano pensati e costruiti con specifici accorgimenti a seconda del contesto. Erano molto importanti fattori come la localizzazione e l'orientazione, l'inclinazione dei tetti e delle coperture, la geometria della struttura, il colore delle superfici esterne, la dimensione e il posizionamento delle aperture finestrate, i sistemi di ombreggiamento, ecc.

Sulla base delle principali norme di riferimento in materia di prestazione energetica degli edifici che si sono susseguite nel corso degli anni, si possono individuare tre diverse date che hanno segnato grandi cambiamenti in termini di efficienza energetica degli edifici. La prima è il 1976 con la legge 373, quando in seguito alla crisi energetica degli anni '70 si è iniziato a

imporre una regolamentazione riguardo gli impianti di produzione di calore con gli annessi impianti di regolazione e l'isolamento termico degli edifici. Nel 1991 essa è stata integrata e in parte sostituita dalla legge 10 "Norme per l'attuazione del Piano energetico Nazionale in materia di uso razionale dell'energia, di risparmio energetico e sviluppo di fonti rinnovabili di energia". Questa è la prima norma che regolava le modalità progettuali e la gestione del sistema impianto. Nel 2005 poi, con l'entrata in vigore del D.Lgs. n.192 l'Italia si adegua alla direttiva dell'Unione Europea 2002/1/CE sul rendimento energetico degli edifici emanata per conformarsi al protocollo di Kyoto. L'edificio, gli impianti di riscaldamento, di condizionamento, di illuminazione e di aerazione devono essere progettati con costi d'esercizio che prevedono un basso consumo di energia nel rispetto del benessere degli occupanti. Prima del 1976 però non era prevista nessuna regolamentazione sui consumi energetici e non esistevano obblighi. Oltre il 50% del parco costruito risale a prima del 1976, quindi praticamente la totalità degli edifici storici viene risulta avere delle prestazioni energetiche scadenti con consumi molto elevati.

Secondo la Direttiva 31/2010 gli Stati membri possono decidere di non applicare i requisiti di risparmio energetico per edifici tutelati o di particolare valore architettonico o storico nel caso gli interventi possano alterare o compromettere l'estetica o il valore storico. Questo però non significa che sia preferibile non intervenire sui beni culturali al fine di migliorare il rendimento energetico. L'efficienza energetica deve essere considerata una forma di tutela, infatti non è pensabile di conservare gli edifici storici così come sono a causa di eccessivi costi in termini di consumi che rendono di fatto improponibile la gestione e quindi la loro conservazione.

2.2 RIQUALIFICAZIONE DEGLI EDIFICI STORICI

La riqualificazione energetica negli edifici storici e in modo particolare gli interventi sull'involucro edilizio sembrerebbero essere in contrasto con la restaurazione delle opere storiche. Come già detto, però, l'efficientamento energetico deve essere considerato come qualcosa che permetta di tutelare il singolo edificio o un insieme di edifici, il paesaggio, anche urbano ma non solo e addirittura la stessa identità culturale di una comunità. La Convenzione Europea del Paesaggio del 2000 definisce e va oltre i limiti della relazione tra la sostenibilità e il paesaggio, che fino a prima erano considerati appartenenti ai due mondi diversi dell'urbanistica e dell'ecologia. Su questa base, la riqualificazione energetica diventa un mezzo che permette di migliorare l'efficienza energetica e la conservazione di un edificio esistente. La conservazione di edifici storici promuove il rispetto per le generazioni future, la cultura e la storia di una città e agisce anche come incentivo per il turismo del patrimonio e l'economia a esso correlata.

2.2.1 Il progetto di riqualificazione

L'approccio a una ristrutturazione energetica deve prevedere quali sono le priorità da rispettare, oltre a preservare il patrimonio culturale si vuole ottenere un adeguato risparmio energetico attraverso interventi che possano ridurre l'impatto ambientale. L'obiettivo è ridurre i costi di esercizio dell'edificio e migliorare il comfort degli ambienti interni a favore degli occupanti. Attraverso specifici interventi è inoltre possibile andare a contrastare in maniera efficace alcuni problemi che spesso caratterizzano gli edifici storici, come ad esempio fenomeni di discomfort dovuti a infiltrazioni o asimmetria radiante ma anche problemi legati all'umidità che comportano l'insorgenza di muffe.

È però importante preservare e non compromettere il valore storico e estetico dell'edificio, quindi gli interventi devono rispettare dei criteri di non invasività e minimizzare l'impatto visivo estetico e spaziale. Un vincolo rilevante è quello legato al valore architettonico dell'aspetto esterno dell'edificio e questo non permette di intervenire sull'involucro esternamente. Solitamente è preferibile intervenire con strategie di isolamento interno, prestando attenzione a diverse problematiche nelle quali c'è la possibilità di incorrere. Pertanto è fondamentale uno studio preliminare per approfondire la conoscenza tecnologica degli elementi tecnici dell'involucro, delle relative prestazioni e eventuali punti deboli. In questa fase di conoscenza dell'edificio si possono identificare diverse fasi:

- Analisi del contesto climatico e ambientale
- Analisi storica dell'evoluzione dell'edificio e delle eventuali più fasi costruttive e modifiche subite nel corso degli anni

- Analisi delle tipologie edilizie e delle proprietà bioclimatiche intrinseche
- Analisi dei materiali tradizionali e delle proprietà e prestazioni termiche
- Analisi dei prodotti disponibili sul mercato e valutazione vantaggi economici ed energetici

Per quanto riguarda la regolamentazione, attualmente quando si parla di efficienza energetica si tende ad avere un approccio basato su una visione economica del recupero e spesso dimentica di considerare il valore culturale del bene come una risorsa. Inoltre i requisiti sempre più stringenti vengono definiti principalmente per gli edifici di nuova costruzione e risultano difficili da applicare a costruzioni storiche. Per questo motivo nel 2017 è entrata in vigore la norma UNI EN 16883 che fornisce linee guida per il miglioramento sostenibile della prestazione energetica degli edifici storici, come edifici notevoli dal punto di vista storico, architettonico o culturale, nel rispetto del loro significato di bene culturale.

2.2.2 Tipologie di intervento

Come già specificato non esiste un metodo generale di intervento che possa essere applicato in ogni contesto, in modo particolare nel caso degli edifici storici che necessitano di uno studio opportuno a causa dei vincoli architettonici soprattutto sull'involucro esterno, ma non solo.

2.2.2.1 Interventi sulle coperture

Gli interventi sulle coperture servono a ridurre le dispersioni termiche verso l'alto, che in edifici soprattutto di piccole dimensioni possono incidere in buona percentuale sulle dispersioni totali. Le tecniche di isolamento maggiormente utilizzate per la coibentazione del tetto possono essere così definite:

- isolamento dall'esterno (estradosso): il materiale isolante è posto direttamente sotto le tegole o le lastre di copertura. È importante la presenza di un foglio impermeabile al di sotto del pannello isolante con funzione di barriera al vapore
- isolamento dall'interno (intradosso): il materiale isolante viene applicato dall'interno e viene poi realizzata una finitura interna, dopo aver applicato una barriera al vapore. Questa soluzione è vastamente utilizzata negli edifici a falde inclinate in fase di ristrutturazione
- isolamento sul sottotetto (estradosso dell'ultima soletta): il materiale isolante viene posato sul solaio del sottotetto con eventualmente uno strato di materiale di vario tipo al fine di rendere praticabile il sottotetto. È necessaria una barriera al vapore al fine di evitare problemi di condensa.

2.2.2.2 Interventi sulle pareti perimetrali

L'isolamento dell'involucro esterno è fondamentale al fine di ridurre le dispersioni per trasmissione dell'edificio. Nel caso degli edifici storici però le mura perimetrali sono quelle più vincolate dal punto di vista architettonico per la loro valenza artistica o storica. L'isolamento può essere applicato generalmente, in caso di interventi di riqualificazione, dall'esterno o dall'interno. A parità di trasmittanza, il metodo di applicazione dell'isolante può alterare il comportamento di tutta la parete.

L'isolamento esterno, quando applicabile, permette di creare una barriera al passaggio del calore e di controllare la formazione di umidità all'interno della parete. È realizzato applicando esternamente alla parete lo strato di isolamento, generalmente costituito da pannelli e rivestito da uno strato di protezione. Risulta molto vantaggioso dal punto di vista energetico poiché garantisce un isolamento uniforme e tende ad annullare i ponti termici, limita la formazione di condensa superficiale e permette di sfruttare l'inerzia termica delle pareti nel lato interno. Il grosso svantaggio in caso di ristrutturazione è che altera i prospetti esterni dell'edificio e in alcuni casi non è praticabile. Nelle situazioni in cui non è possibile operare in facciata viene preferito l'isolamento interno che consente sì di migliorare la coibentazione dell'involucro, ma di fatto non permette di annullare in maniera efficace tutti i ponti termici, in modo particolare quelli tra la muratura verticale e il solaio di piano. Altri svantaggi sono legati alla diminuzione del volume utile dell'edificio e alla diminuzione dell'inerzia termica dell'edificio rispetto all'isolamento esterno. Inoltre c'è da considerare l'alta probabilità di formazione di condensa interstiziale e per questo in fase progettuale bisogna considerare l'applicazione di una barriera al vapore.

2.2.2.3 Interventi sui solai

L'intervento di isolamento sui solai, che possono essere su terra, di interpiano o del sottotetto, prevede l'inserimento di materiale isolante all'intradosso o all'estradosso o su entrambi i lati. L'intervento all'intradosso generalmente non permette di ridurre di molto sui ponti termici, al contrario di quello all'estradosso che risulta più efficiente. Quest'ultimo però potrebbe risultare più complicato, in modo particolare nel caso di pavimenti di edifici storici di particolare pregio. È comunque possibile prevedere la rimozione e riposa del pavimento però potrebbe influire molto sui costi.

2.2.2.4 Interventi sugli infissi

La sostituzione dei serramenti esistenti con infissi a elevato risparmio energetico permette di ridurre le perdite per trasmissione e i ponti termici dovuti alle giunzioni tra le finestre e le

strutture murarie. Questo tipo di intervento solitamente presenta un costo elevato, perché è necessaria l'installazione di finestre create su misura per l'edificio.

2.2.2.5 Interventi sugli impianti

I problemi legati agli impianti negli edifici storici possono essere di vario tipo. Nel caso in cui un edificio non sia dotato di alcun tipo di impianto, in fase di riqualificazione è necessaria una progettazione da zero che preveda tutti i componenti e non è sempre detto che gli spazi a disposizione permettano di intervenire in maniera semplice. In generale per garantire un adeguato livello di comfort sono necessari impianti di riscaldamento e raffrescamento per un adeguato comfort termico degli occupanti, ventilazione meccanica per garantire un corretto ricambio d'aria al fine di mantenere un basso livello di inquinanti, illuminazione consona a seconda della destinazione d'uso, ecc. Molto spesso gli edifici prevedono il solo impianto di climatizzazione invernale, progettato senza porgere attenzione all'efficienza e alle emissioni. È frequente un sovradimensionamento sia del generatore che dei terminali di impianto con in conseguenti svantaggi che ne derivano; la regolazione e la distribuzione sono fonte di perdite non indifferenti.

Nel caso di intervento, per ottenere un risultato ottimale, è importante andare ad operare su tutti i diversi sottosistemi a partire da un sistema di generazione efficiente e possibilmente alimentato da fonti sostenibili. I terminali di impianto operanti a bassa temperatura permettono di sfruttare maggiormente il potenziale di caldaie a condensazione o pompe di calore e garantiscono un miglior comfort degli occupanti. Per quanto riguarda il sistema di regolazione, un controllo di zona o ancora meglio per singolo ambiente risulta molto più efficace della regolazione a livello centralizzato.

2.2.3 Conto Termico e incentivazione

Il Conto Termico è un fondo gestito dal GSE (Gestore Servizi Energetici) nato per incentivare la produzione di energia termica da fonti rinnovabili e per sostenere gli interventi di miglioramento energetico delle abitazioni e degli edifici. È destinato sia alle pubbliche amministrazioni che a imprese e privati; ogni anno vengono stanziati fondi per 900 milioni di euro, di cui 200 per la pubblica amministrazione [2]. È recentemente stato rinnovato, rispetto alla prima versione del 2012 e fornisce il metodo di calcolo degli incentivi.

Gli incentivi previsti variano dal 40% al 65% della spesa sostenuta, più in particolare:

- fino al 65% per la demolizione e ricostruzione di edifici a energia quasi zero (nZEB)
- fino al 40% per gli interventi di isolamento delle pareti e coperture, per la sostituzione di chiusure finestrate con altre più efficienti, per l'installazione di schermature solari,

per la sostituzione dei corpi illuminanti, per l'installazione di tecnologie di building automation e per la sostituzione di caldaie tradizionali con caldaie a condensazione

- fino al 50% per gli interventi di isolamento termico nelle zone climatiche E/F e fino al 55% nel caso di isolamento termico e sostituzione delle chiusure finestrate, se abbinati ad altro impianto (caldaia a condensazione, pompe di calore, solare termico)
- fino al 65% per la sostituzione di impianti tradizionali con impianti a pompe di calore, caldaie e apparecchi a biomassa, sistemi ibridi a pompe di calore e impianti solari termici

Inoltre il Conto Termico è cumulabile con altri incentivi di natura non statale e nell'ambito degli interventi precedentemente indicati. Finanzia inoltre il 100% delle spese per la Diagnosi Energetica e per l'Attestato di Prestazione Energetica (APE) per le PA (e le ESCO che operano per loro conto) e il 50% per i soggetti privati e le cooperative di abitanti e quelle sociali.

2.3 RISCHIO SISMICO

L'Italia è uno dei paesi più a rischio del Mediterraneo per quanto riguarda la frequenza degli eventi sismici che nel corso degli anni hanno interessato il territorio, alcuni dei quali di grave entità che hanno determinato delle problematiche rilevanti, oltre che per i danni materiali in sé, anche per l'impatto sociale e economico che hanno causato.

2.3.1 La sismicità nel territorio italiano

L'elevata sismicità della penisola italiana è dovuta alla sua posizione geografica, infatti si trova nella zona di convergenza tra la placca africana e quella eurasiatica le quali esercitano forti spinte di compressione causando l'accavallamento dei blocchi di roccia. La determinazione della pericolosità sismica si basa sulla misurazione degli eventi sismici e della loro entità che si sono verificati storicamente durante l'intervallo di tempo di cui si dispongono informazioni.

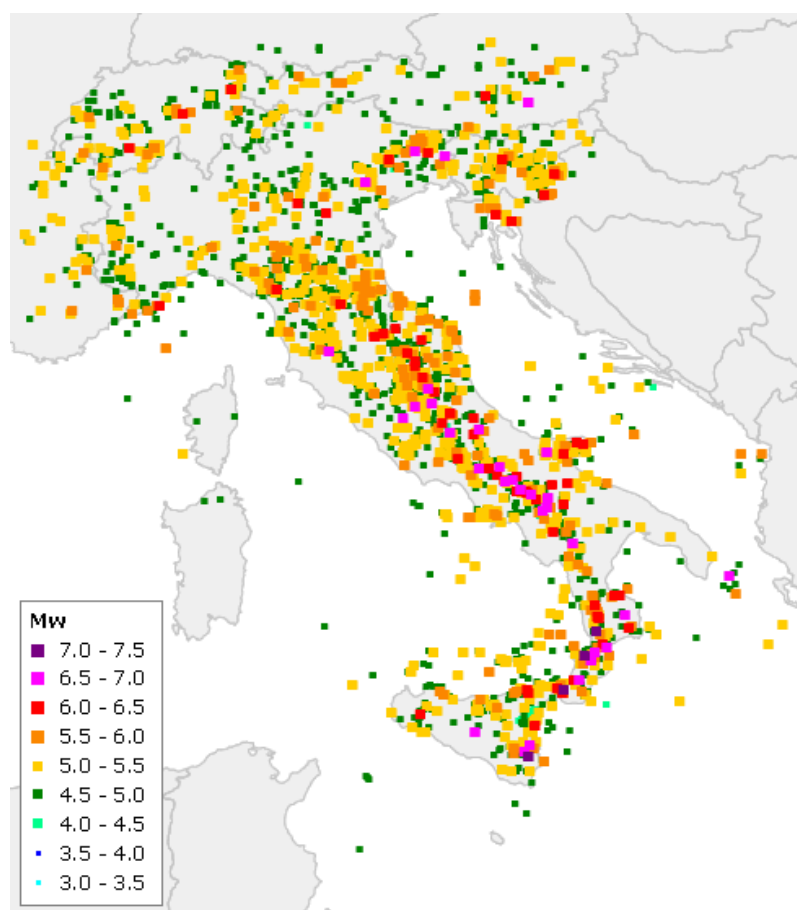


Figura 2.1 - Eventi sismici e loro intensità nel territorio italiano (Protezione Civile)

In Italia, negli ultimi 5000 anni, si hanno testimonianze di oltre 30mila eventi sismici di media e forte intensità, dei quali circa 560 di intensità pari o superiore al grado VIII della scala Mercalli [3]. Nel secolo scorso si sono registrati 7 terremoti di intensità superiore a 6.5 di

magnitudo, con conseguenze valutabili intorno al X e XI grado della scala Mercalli. È evidente l'elevata sismicità che caratterizza la penisola, anche se con delle differenze a seconda della zona geografica. Ci sono infatti zone in cui si verificano eventi con maggiore frequenza ma di bassa intensità e altre zone in cui i terremoti avvengono più raramente ma sono di elevata energia. Ad esclusione della Sardegna, dove non si sono mai registrati eventi neanche di media intensità, praticamente in tutto il territorio nazionale è stato interessato da scosse classificabili con un almeno pari al VI. Se invece si considerano i terremoti di intensità superiore si possono individuare zone meno a rischio, in modo particolare la parte centro-occidentale del Nord Italia. La sismicità più elevata si riscontra nell'Italia centro-meridionale, lungo la dorsale appenninica e si possono ricordare molti eventi che hanno segnato profondamente il territorio interessato e tuttora se ne possono constatare gli effetti.

In Italia ci sono molti studi sulla sismicità del territorio e sono stati utilizzati per analisi territoriali e regionali con l'obiettivo di definire delle zone e microzone secondo la pericolosità sismica. Questi studi possono essere utili anche per individuare quelle opere che potrebbero presentare delle criticità dal punto di vista della sicurezza, del rischio o dell'importanza strategica. La valutazione della pericolosità può essere di tipo deterministico, basata cioè sull'osservazione dei danni che si sono verificati storicamente durante precedenti eventi sismici per ricostruire la frequenza del verificarsi di scosse della stessa entità. Un altro tipo di valutazione, generalmente preferito rispetto al deterministico, è l'approccio probabilistico, che esprime la pericolosità come la probabilità che in un dato intervallo di tempo si verifichi un evento con assegnate caratteristiche.

2.3.2 La vulnerabilità sismica degli edifici

Al verificarsi di un evento sismico di una data intensità, maggiore è il livello dei danni che potenzialmente potrebbe subire una struttura e maggiore è la sua vulnerabilità. Uno dei principali problemi in caso di sisma è il crollo degli edifici e le conseguenze che ne determina sugli occupanti. Questo problema deve essere evitato mettendo in sicurezza gli edifici e le norme di costruzione nelle zone sismiche prevedono che gli edifici non si danneggino per terremoti di bassa intensità, non abbiano danni strutturali per terremoti di media intensità e non crollino in occasione di terremoti forti, pur potendo subire gravi danni. La vulnerabilità di una struttura può essere valutata in diversi modi, tra i quali ci sono metodi di tipo statistico, basati sullo studio dei danni su edifici simili in terremoti passati, e metodi di tipo meccanicistico che prevedono l'utilizzo di modelli teorici.

Il patrimonio storico italiano deve essere tutelato anche dai potenziali danni che un terremoto può provocare. I centri storici una buona parte degli edifici presenta caratteristiche strutturali non sufficienti a resistere a eventi di una certa intensità e in modo particolare nelle zone

dell'Appennino, ad elevato rischio sismico, gli edifici sono spesso costruiti con pietrame sbozzato e malta povera di calce che li rendono decisamente vulnerabili. Andare ad intervenire sugli edifici di interesse storico è un argomento delicato, perché se da una parte la messa in sicurezza può richiedere interventi particolarmente invasivi, dall'altra le normali regole di restauro sono caratterizzate da dei vincoli che non lasciano troppo spazio a eccessivi stravolgimenti. Appare chiaro, però, che nel caso non vada ad agire sulla solidità strutturale permane il rischio, in caso di eventi sismici di forte intensità, di danneggiamento o di crollo dell'edificio.

2.4 RELUIS

ReLUIS, acronimo di Rete dei Laboratori Universitari di Ingegneria Sismica, è un consorzio interuniversitario con l'obiettivo di coordinare l'attività dei Laboratori Universitari di Ingegneria Sismica, fornendo supporti scientifici, organizzativi, tecnici e finanziari alle Università consorziate e promuovendo la loro partecipazione alle attività scientifiche e di indirizzo tecnologico nel campo dell'Ingegneria Sismica, in accordo con i programmi di ricerca nazionali ed internazionali in questo settore [4].



Figura 2.2 - Logo di ReLUIS

Supporta le attività di gestione tecnica dell'emergenza, in particolare per quanto riguarda le valutazioni di danni e di agibilità post-sismica di edifici e strutture strategiche o rilevanti. Supporta, inoltre, le attività legate ai programmi di prevenzione sismica. In collaborazione con altri Centri di Competenza, definisce, organizza e sviluppa programmi di ricerca integrati a livello nazionale nel settore dell'ingegneria sismica, con il coinvolgimento di università, enti di ricerca e privati. Inoltre, sviluppa documenti pre-normativi relativi a tipi strutturali non ancora considerati dalle norme e dà assistenza alla redazione di norme tecniche. Collabora alle attività di formazione, comunicazione e divulgazione sulla vulnerabilità, esposizione e rischio sismico [5].

La sede si trova a Napoli presso il Dipartimento di Ingegneria Strutturale dell'Università Federico II. Il consorzio è stato costituito, con atto convenzionale sottoscritto il 17 aprile 2003, senza fini di lucro. I fondatori sono:

- Università degli Studi della Basilicata – Scuola di Ingegneria (SI)
- Università degli Studi di Napoli Federico II – Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura
- Università degli Studi di Pavia – Dipartimento di Ingegneria Civile ed Architettura (DICAr)

In seguito ha aderito anche il Dipartimento di Ingegneria Civile Ambientale e Meccanica (DICAM) dell'Università di Trento. È stato anche sottoscritto un accordo di collaborazione con l'ENEA UTS Materiali e Nuove Tecnologie Roma (Casaccia). Oltre alle università fondatrici, partecipano all'attività di ricerca di supporto al Dipartimento della Protezione Civile esperti e docenti appartenenti svariate Università e Istituti di Ricerca su tutto il territorio

nazionale, tra cui anche il Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale (ICEA) dell'Università degli Studi di Padova.



Figura 2.3 - Università e Istituti di Ricerca coinvolti nel consorzio ReLUIS (ReLUIS, 2019)

Il consorzio ReLUIS stipula degli accordi con il Dipartimento della Protezione Civile al fine di assicurare il necessario supporto alla realizzazione delle attività di competenza del Servizio Nazionale della Protezione Civile con particolare riferimento allo sviluppo di strumenti, modelli e progetti per la previsione e la prevenzione del rischio sismico. I progetti annuali si pongono il raggiungimento di obiettivi e risultati inquadrati in un Programma pluriennale i cui risultati oltre che in strumenti di calcolo, valutazioni ed analisi specifiche, mirano allo sviluppo, revisione e pubblicazione di manuali, linee guida, documenti pre-normativi, nonché specifiche proposte di modifica e revisione delle norme vigenti, su richiesta del Dipartimento della Protezione Civile. Attualmente sta lavorando al Progetto ReLUIS-DPC 2019-2021, articolato in WP e caratterizzato da due linee principali articolate in 18 working packages:

- da WP2 a WP8: attività nell'ambito del Centro di Vulnerabilità e Rischio Sismico attività di sperimentazione propedeutiche alle attività di cui alla lettera a), e di realizzazione di contributi scientifici e di sintesi di ricerche esistenti utili a tal fine (lettera b), comma 2 dell'art. 19 del D.L. 2 gennaio 2018, n.1)
- da WP9 a WP18: attività di predisposizione della normativa tecnica per la prevenzione e la riduzione del rischio sismico (lettera d), comma 2 dell'art. 19 del D.L. 2 gennaio 2018, n.1)

3 CASO STUDIO: L'EX TRIBUNALE DI FABRIANO

Il caso in esame è l'edificio che fino a prima dello sciame sismico del 2016 e del 2017 ospitava la sede distaccata del tribunale di Ancona. L'ex Tribunale di Fabriano è una delle 155 costruzioni monitorate dall'Osservatorio Sismico delle Strutture del Dipartimento della Protezione Civile.

L'edificio, costruito attorno agli anni 20 e destinato all'utilizzo scolastico, nel corso degli anni ha subito diverse ricollocazioni funzionali. A seguito del terremoto del centro Italia del 2016 e del 2017 è stato utilizzato per ospitare delle scuole rimaste danneggiate dal sisma.

Il Dipartimento di Ingegneria Civile Edile e Ambientale dell'Università di Padova, nell'ambito del progetto ReLUIIS in accordo con Protezione Civile, sta studiando l'edificio dal punto di vista strutturale da diversi anni, quindi le conoscenze a disposizione si possono definire buone.

Gran parte delle informazioni sono state fornite dall'Osservatorio Sismico delle strutture. Si hanno a disposizione delle tavole di progetto esecutivo del 30 maggio 1999 riguardanti la "riparazione dei danni, miglioramento sismico e recupero funzionale" e le relazioni redatte nell'anno 2009 e successivi (rilievo geometrico e strutturale, indagini conoscitive sui materiali e scheda di sintesi della verifica sismica) dalla società SGM Engineering (Perugia) nell'ambito delle "indagini conoscitive su 40 edifici pubblici ed un ponte monitorati nell'ambito dell'Osservatorio Sismico delle Strutture (OSS)".

Inoltre è stato realizzato un primo sopralluogo visivo e dimensionale sul posto, in data 28 giugno 2017 in occasione di un lavoro di tesi [6], durante il quale è stata effettuata la documentazione fotografica presente nei paragrafi successivi.

È stato necessario effettuare un secondo in data 12 dicembre 2019 per poter reperire alcune informazioni mancanti, in particolar modo riguardanti l'aspetto energetico e la destinazione dell'edificio.

Gran parte delle informazioni riportate in questo capitolo riprendono dei lavori di tesi svolte sullo stesso caso studio [6] [7] [8].

3.1 INQUADRAMENTO GENERALE

In questa sezione viene fornito un inquadramento generale dello stabile all'interno del contesto cittadino, la sua evoluzione storica e una descrizione dello stato di fatto della struttura.

3.1.1 Localizzazione e inquadramento urbano

L'ex Tribunale è situato a Fabriano, in provincia di Ancona. La città è conosciuta per essere un importante centro industriale per la produzione di carta in quanto sede delle Cartiere Miliani Fabriano fin dal 1782.

L'immobile è stato edificato nel 1922 per ospitare la Scuola Industriale G. B. Milani, si trova nelle vicinanze del centro storico lungo Viale Aurelio Zonghi.



Figura 3.1 - Localizzazione geografica e vista aerea di Fabriano con identificazione del caso studio

L'edificio è facilmente riconoscibile per la sua pianta a T e si possono identificare due corpi principali, uno più allungato in direzione Nord-Sud e uno più ridotto che si estende dal centro del corpo principale in direzione Est. Proprio questa estremità confina con un altro edificio, per il resto il fabbricato è isolato da costruzioni circostanti.



Figura 3.2 - Ortofoto dell'area e vista dell'edificio

3.1.2 Evoluzione costruttiva e funzionale dell'edificio

Per comprendere meglio lo stato di fatto dell'edificio attuale è utile analizzare l'evoluzione storica del fabbricato per capire quali sono stati gli interventi più importanti e le eventuali trasformazioni.

Purtroppo per questo caso il materiale a disposizione non conteneva tavole risalenti a prima del 1999. Ciò che si conosce della storia dell'edificio è stato reperito attraverso una ricerca online.

Costruito nel 1922 come sede dell'Istituto Industriale specializzato nella lavorazione della carta, ha ospitato la scuola "G. B. Miliani". A differenza dell'edificio allo stato attuale, erano presenti solamente due piani fuori terra. Nel 1941 lo stabile ha subito degli interventi di ampliamento, con l'aggiunta di un terzo piano che corrisponde all'attuale secondo piano della struttura. Le pareti esterne dei primi due piani rivestite con mattoni faccia vista sembrano essere rimaste invariate, così come la simmetria delle finestre.

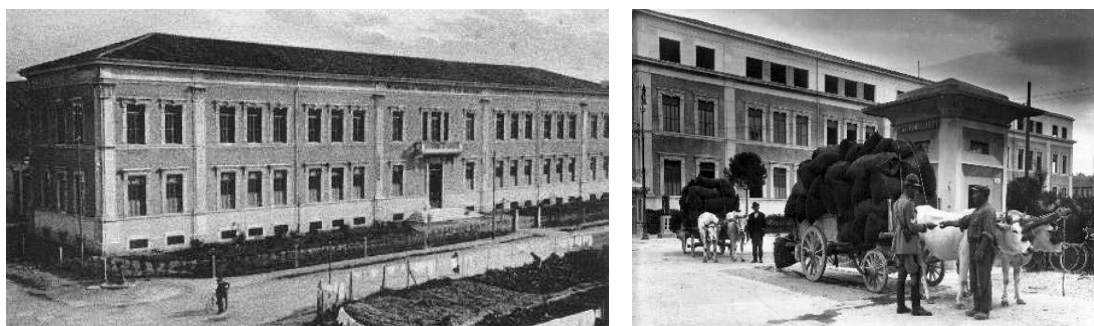


Figura 3.3 - Foto storiche dell'edificio prima (1940) e dopo (1950) l'intervento di sopraelevazione (Fabriano storica)

Verso la metà degli anni 50, in occasione della costruzione dell'attuale IPSIA adiacente all'ala Est dell'edificio, sono stati eseguiti altri importanti opere e lavori di adeguamento con la realizzazione dei due corpi di servizi igienici addossati alle due ali esterne.

Nel 1970 la sede dell'Istituto viene trasferita e l'edificio ha ospitato la scuola "E. Fermi" per un imprecisato periodo di tempo.

Nel 1997 ha subito diversi danni dovuti al terremoto del 26 settembre di Umbria e Marche. Nel 1999 sono iniziati i lavori di ristrutturazione e consolidamento dell'edificio. In modo particolare è stato demolito e ricostruito il corpo scale esterno che permette l'accesso al secondo piano e sono stati rinforzati le pareti murarie e i solai di piano. Sono stati inoltre eseguiti degli interventi riguardanti l'impianto di riscaldamento e la sostituzione dei serramenti.

In seguito ai lavori è diventato la sede distaccata del Tribunale di Ancona fino al 2013, quando gran parte del personale è stato trasferito nel capoluogo di regione.

3.1.3 Rilievo funzionale

Dall'ultimo sopralluogo effettuato il 12 dicembre 2019 è risultato che l'edificio non è del tutto occupato e c'è una situazione provvisoria per quanto riguarda la destinazione d'uso. Dopo l'accentramento del tribunale è rimasto solo l'ufficio del giudice di pace al secondo piano. Una piccola parte del secondo piano è la sede dell'Agenzia delle Entrate. La restante parte del piano attualmente non è occupata, ma c'è in progetto la collocazione di alcuni uffici della Polizia di Stato.

Parte del seminterrato accoglie un piccolo museo del cinema con un ingresso dedicato, mentre la restante parte del seminterrato, una volta destinata ad archivi sembra lasciata in stato di abbandono. L'ufficio tecnico del comune ha detto che dovrebbe venire adibita ad archivio della Polizia.

Il piano rialzato e il primo piano sono occupati dalla Scuola Secondaria di I° Grado "Giovanni Paolo II", poiché in seguito al sisma la sede originaria è stata danneggiata. Durante il sopralluogo del 2017 il piano rialzato ospitava la scuola materna "Don Petruio", quindi attualmente l'edificio è utilizzato come sede temporanea per le scuole che hanno subito danni in occasione del sisma e in attesa di ritornare ad essere accessibili.

Da quanto emerso nei lavori di tesi precedenti sembrava essere intenzione del comune destinare l'intero complesso come sede della Polizia di Stato e della Guardia di Finanza, però durante il sopralluogo ci è stato comunicato che progetto non dovrebbe essere più valido e che attualmente non c'è nulla di certo; il direttore dell'ufficio tecnico ha detto che preferirebbe collocare in via definitiva una scuola della città una volta finito il problema delle ricollocazioni.

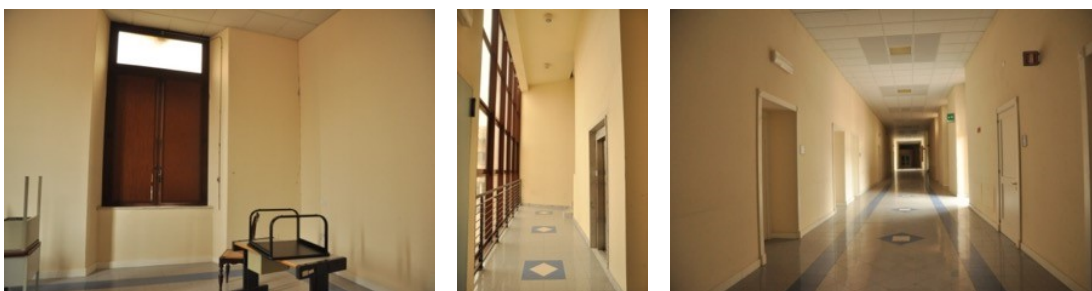
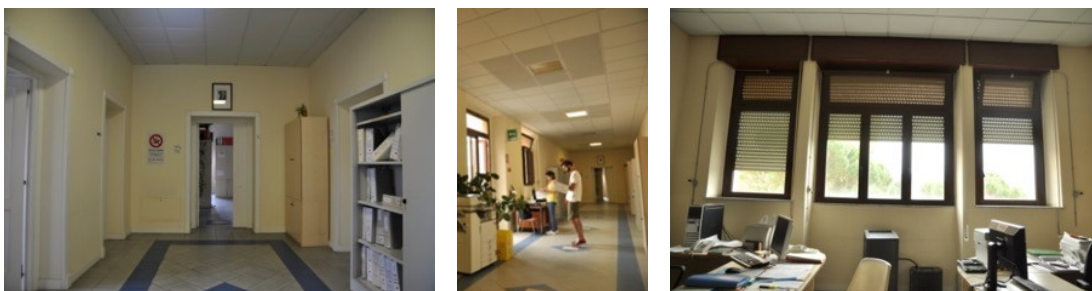
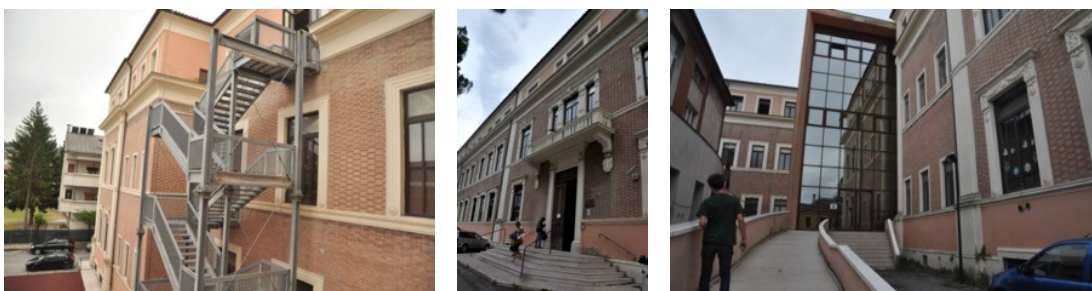
3.1.4 Rilievo fotografico

Le foto riportate in questo paragrafo sono state scattate durante il sopralluogo del 28 giugno 2017. Si specifica che, a causa della presenza di bambini nelle aule della scuola materna, non era stato possibile fare un rilievo fotografico del piano rialzato.

Nel corso del sopralluogo del 12 dicembre 2019 non sono state raccolte ulteriori immagini perché già in possesso di una documentazione sufficientemente dettagliata.



Figura 3.4 – Interni del piano seminterrato

*Interni del primo piano**Interni del secondo piano**Esterni dell'edificio**Figura 3.5 - Fotografie dell'edificio scattate durante il sopralluogo del 28 giugno 2017*

Si vuole precisare che situazione al piano seminterrato ritrovata nell'ultimo sopralluogo era un po' differente rispetto a quella immortalata nell'ispezione del 2017, infatti il piano sembrava lasciato più in stato di abbandono.

3.1.5 Rilievo geometrico

L'edificio si caratterizza per una pianta a forma di T ripetuta per ognuno dei livelli di cui è composto, con un corpo principale più allungato in direzione Nord-Sud e un secondo corpo rettangolare di dimensioni più ridotte ammorsato al centro della facciata Est.

Si possono differenziare 5 livelli distinti, uno seminterrato e 4 fuori terra, 3 dei quali agibili e un sottotetto. L'altezza massima in gronda è di 16.8 metri, La distanza interpiano è particolarmente elevata (attorno ai 5 metri per i primi due piani e poco più di 4 per il secondo piano).

Lo spessore dei muri è anch'esso consistente e varia a seconda del tipo di muro e del piano tra i 110 e i 50 cm.

La superficie in pianta è mediamente pari a 1220 m² e si ripete pressoché uguale in ogni piano; il volume totale costruito è pari a 20400 m³.

La distribuzione interna viene richiamata seguendo lo stesso schema per ogni piano: un corridoio centrale attraversa l'intero edificio da Nord a Sud e la facciata Ovest è interamente occupata da stanze ripetute in maniera simmetrica. Il corpo dell'edificio esteso verso Est è costituito di un corridoio, che si unisce al centro del corridoio principale a formare un unico corridoio a T.

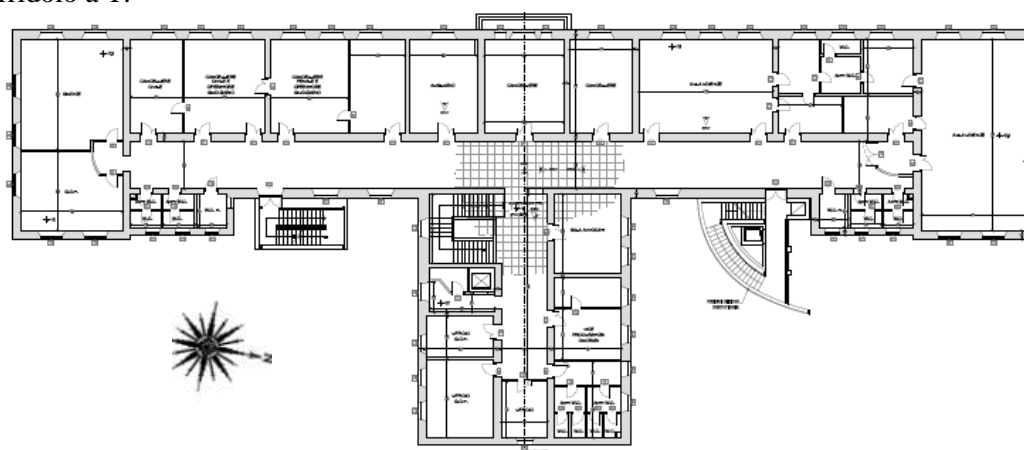


Figura 3.6 - Pianta del primo piano

Sono presenti due diverse scale che collegano i diversi piani: quelle interne, costruite insieme all'edificio originale nel 1940 che mettono in comunicazione i primi due piani, e quelle esterne aggiunte inizialmente in occasione dei lavori per la sopraelevazione del secondo piano e poi demolite e ricostruite interamente durante la ristrutturazione del 1999. Esse permettono di raggiungere il secondo piano che altrimenti non è accessibile dall'interno.

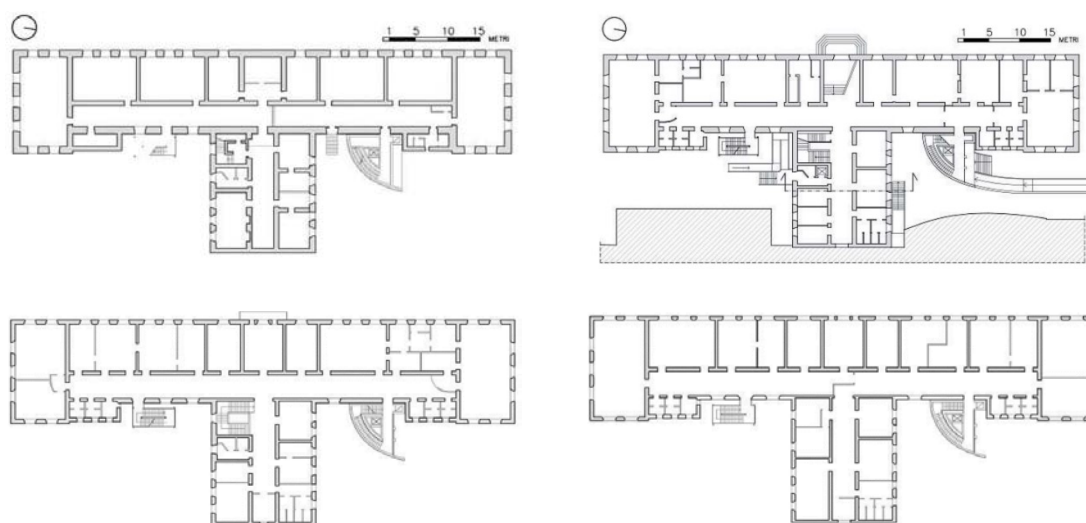
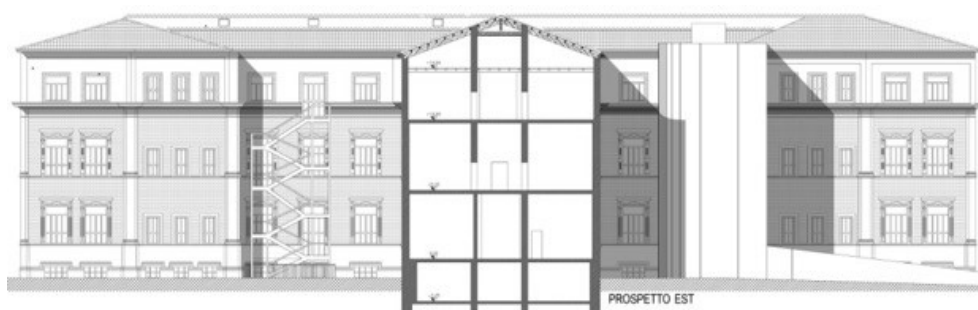


Figura 3.7 – Pianta dell'edificio; in ordine da sinistra a destra seminterrato, piano rialzato, primo piano, secondo piano

L'ingresso principale si trova sul lato Ovest e si affaccia su Viale Aurelio Zonghi. Per accedere al piano rialzato è necessario salire dei gradini poiché la base si trova sopraelevata rispetto al piano del terreno.



Prospetto Ovest



Prospetto Est con sezione del corpo trasversale



Prospetto Sud



Prospetto Nord

Figura 3.8 - Prospetti dell'edificio in scala grafica

I prospetti sono semplici con una ripetizione regolare e simmetrica delle aperture per le finestre. La finitura con i mattoni faccia vista caratterizza parte del piano rialzato (dall'altezza dei davanzali) e l'intero primo piano. Il piano seminterrato e il secondo piano invece non presentano il rivestimento in mattoni.

3.2 RILIEVO STRUTTURALE E INVOLUCRO EDILIZIO

Il rilievo strutturale è stato ricavato dal materiale fornito dall'OSS. Le indagini conoscitive svolte dalla società SGM Engineering hanno permesso di avere a disposizione una buona conoscenza del fabbricato e dei suoi componenti costruttivi, importanti anche dal punto di vista energetico oltre che strutturale per la modellizzazione delle superfici disperdenti dell'edificio. Nonostante questo sono state fatte delle ipotesi sulla stratigrafia di alcune strutture poiché la conoscenza non era sufficientemente esaustiva.

3.2.1 Strutture verticali

L'edificio è costituito sostanzialmente di tre diverse tipologie murarie. Esse si possono classificare in:

- MUR1: è la tipologia di muro maggiormente presente nell'intero edificio, composta principalmente di pietre a spacco con buona tessitura. Ha uno spessore variabile tra i 110 e i 50 cm. Sono state definite a loro volta 2 sottocategorie dovute al tipo di intervento strutturale durante la ristrutturazione del 1999:
- MUR1-A: presenza di intonaco armato su entrambi i lati. Questa tipologia muraria si trova soltanto nelle mura portanti interne
- MUR1-B: presenza di intonaco armato soltanto nel lato interno. Questa tipologia muraria si trova nelle mura perimetrali del piano seminterrato e del secondo piano.

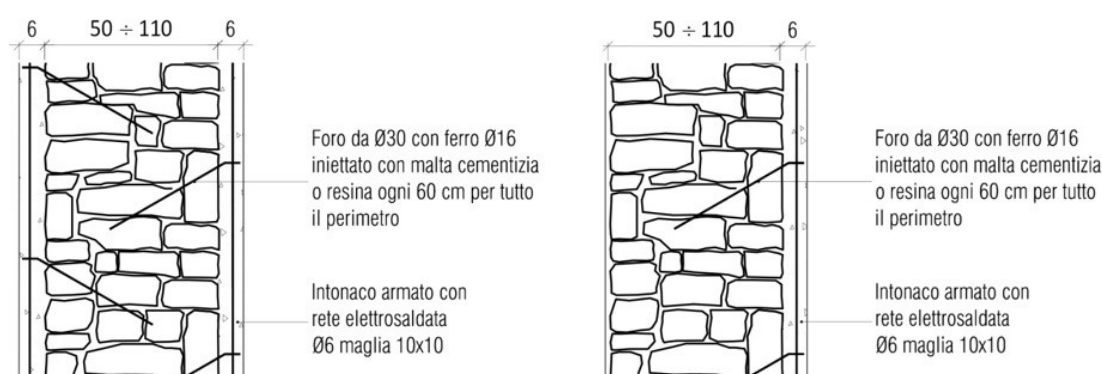


Figura 3.9 - Dettaglio in sezione della tipologia muraria MUR1, rispettivamente MUR1-A e MUR1-B

- MUR2: è la tipologia muraria dei muri interni non portanti. È costituito da mattoni pieni e malta di calce e ha uno spessore che varia tra i 45 e i 25 cm. Anche questo tipo di muro è stato consolidato con intonaco armato su entrambi i lati.
- MUR3: è la tipologia muraria dei muri perimetrali del piano rialzato e del primo piano. È costituito da pietre a spacco all'interno e ha un rivestimento esterno con mattoni

faccia vista. Ha uno spessore variabile tra i 90 e i 55 cm, dei quali la parte esterna di mattoni pieni. C'è la presenza, come per la tipologia MUR1-B, di intonaco armato solo sul lato interno. L'analisi conoscitiva svolta dalla società SGM non ha permesso di avere un dettaglio certo di questa tipologia muraria, quindi era stato ipotizzato, in base ai risultati delle indagini, un'ipotesi di 24 cm di mattoni pieni sul lato esterno e la restante parte dello spessore composta da pietre a spacco con lo strato di intonaco armato.

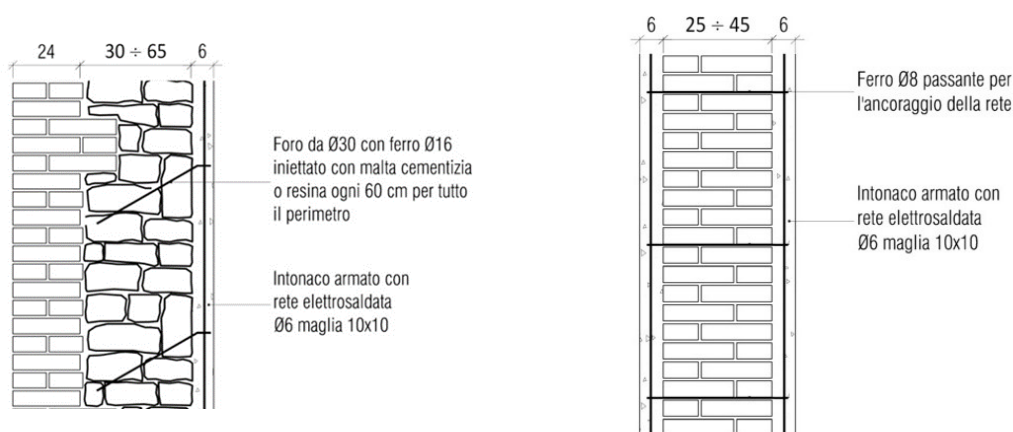


Figura 3.10 - Tipologie murarie MUR3 e MUR2

Mediamente si può dire che per quanto riguarda le mura perimetrali lo spessore varia a seconda del piano, fatta eccezione per alcuni rari casi.

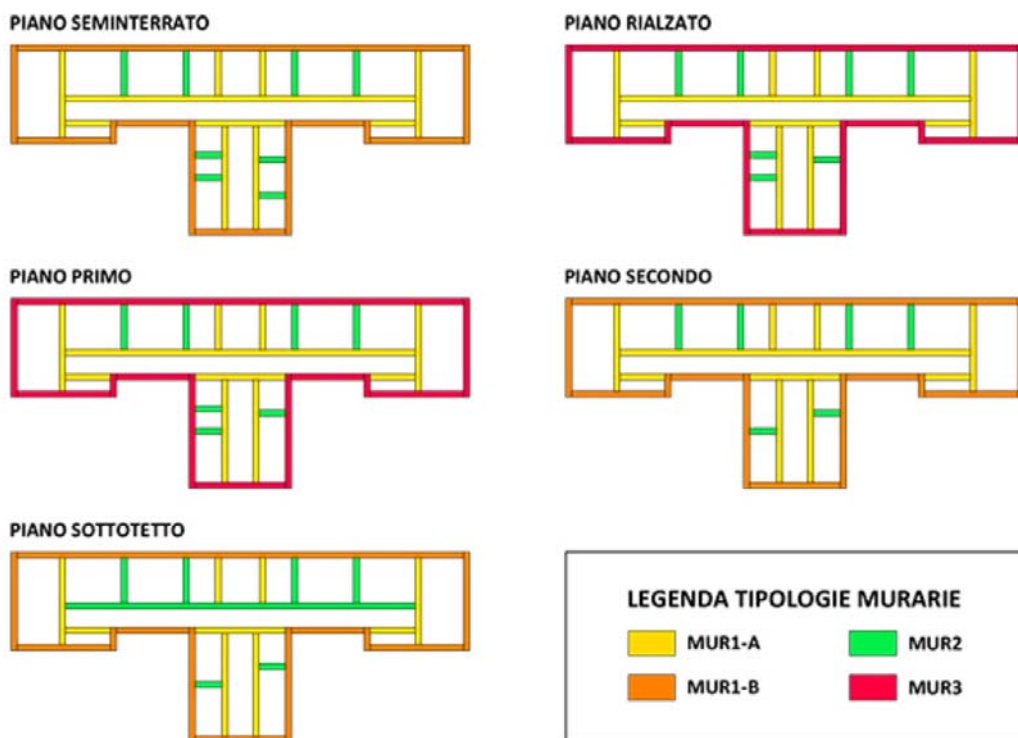


Figura 3.11 - Schema in pianta delle diverse tipologie murarie in ogni livello dell'edificio

Semplificando si ha:

- Piano seminterrato: MUR1-B, spessore medio di 105 cm
- Piano rialzato: MUR3, spessore medio di 90 cm per il corpo principale e 75 cm per l'ala Est
- Piano primo: MUR3, spessore medio di 60 cm
- Piano secondo: MUR1-B, spessore medio 60 cm
- Piano sottotetto: MUR1-B, spessore medio 50 cm

3.2.2 Strutture orizzontali

Le strutture orizzontali dell'edificio sono di diverso tipo

Il fabbricato presenta diverse tipologie di orizzontamenti dovute probabilmente a fasi di costruzione diverse e non tutte ben conosciute. I dati raccolti fanno riferimento alle tavole di progetto del 1999 e alle indagini svolte dalla società SGM, però durante il sopralluogo del 28 giugno 2017 sono state riscontrate alcune incongruenze.

I solai si possono classificare sostanzialmente in 4 diverse tipologie:

- SOL0: costituisce il solaio di calpestio del piano seminterrato. Non si hanno informazioni dettagliate al riguardo
- SOL1: presente al piano rialzato e al primo piano, è costituito da putrelle in acciaio e voltine in laterizio forato. Sopra c'è una soletta di cemento armato aggiunta in occasione degli interventi di consolidamento. È presente inoltre il riscaldamento a pavimento che non ha reso possibile determinare con esattezza lo spessore totale del

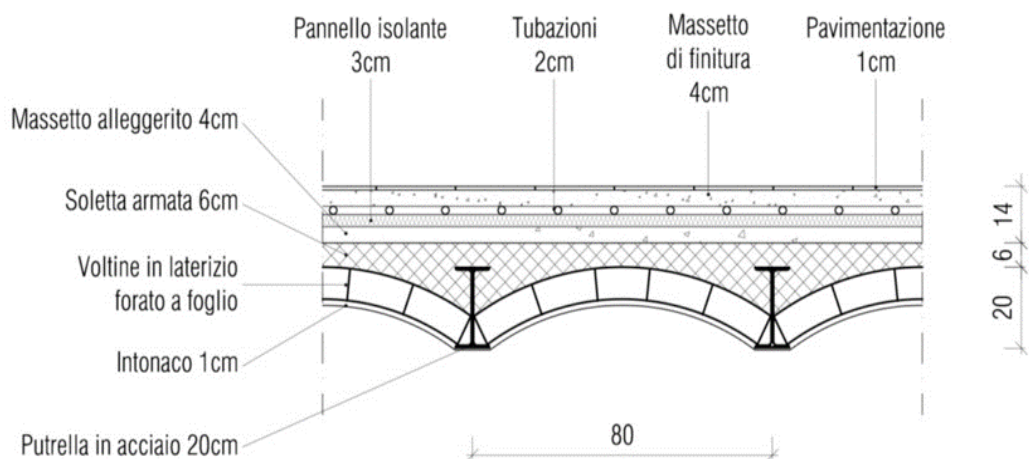


Figura 3.12 – Ipotesi di stratigrafia della tipologia di solaio SOL1

solaio. È quindi stato necessario ipotizzare una stratigrafia possibile, con una stima di uno spessore complessivo di circa 40 cm.

- SOL2: presente solo in alcune zone del piano rialzato e del primo piano e per una superficie molto ridotta rispetto alla superficie totale in pianta. Costruito prima degli interventi di consolidamento con lo scopo di sostituire le zone danneggiate del vecchio solaio a voltine. È costituito da travi di acciaio con pignatte in laterizio di circa 10 cm con sopra una soletta di cemento armato e uno strato di massetto alleggerito fino all'altezza del piano di calpestio del SOL1. Anche in questo solaio ovviamente c'è la presenza del riscaldamento a pannelli radianti, poiché vanno a costituire lo stesso pavimento al piano rialzato e al primo piano.

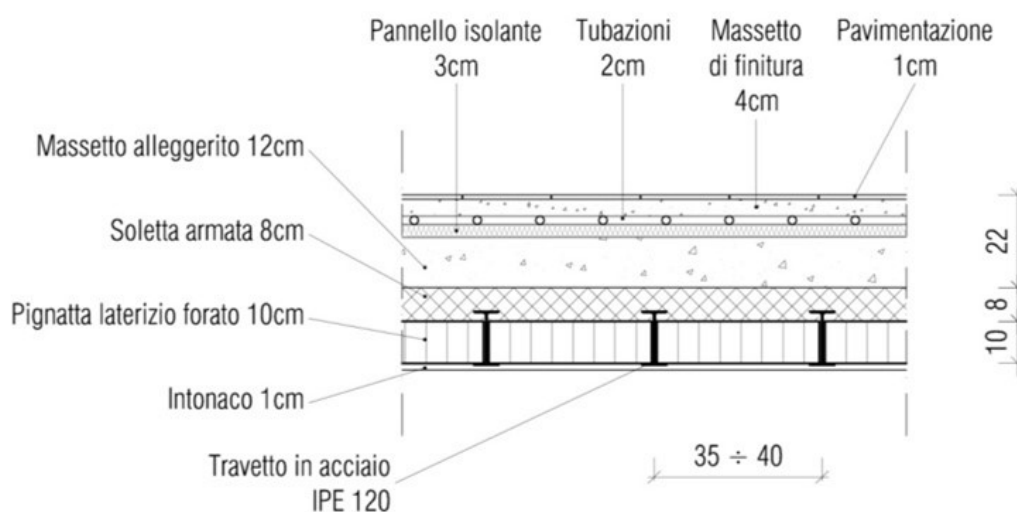


Figura 3.13 – Ipotesi di stratigrafia per la tipologia di solaio SOL2

- SOL3: presente solo al secondo piano, è costituito da travi in acciaio e lamiera grecata con sopra uno strato di calcestruzzo gettato. Anche qui c'è la presenza dell'impianto radiante a pavimento, che fa raggiungere uno spessore stimabile attorno ai 50 cm

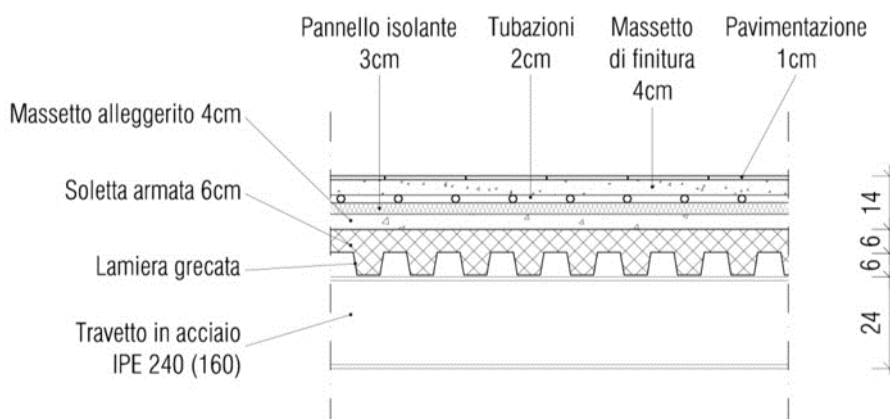


Figura 3.14 - Ipotesi di stratigrafia per la tipologia di solaio SOL3

considerando le travi d'acciaio. Questo solaio è stato sostituito completamente probabilmente a causa di grossi danneggiamenti del vecchio solaio.

- SOL4: presente nel sottotetto e non calpestabile. È costituito da delle travi di acciaio con profilo a Ω e da un tavolato in legno dallo spessore di circa 4 cm.

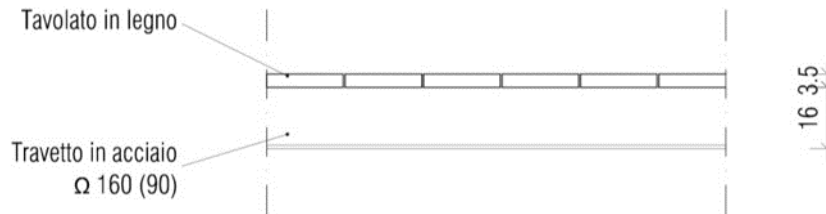


Figura 3.15 - Stratigrafia della tipologia di solaio SOL4

Fatta eccezione per alcune zone molto ridotte dei primi due piani, si può dire che per ogni piano c'è una determinata tipologia di solaio. L'identificazione in pianta dei solai è rappresentata nella seguente figura:

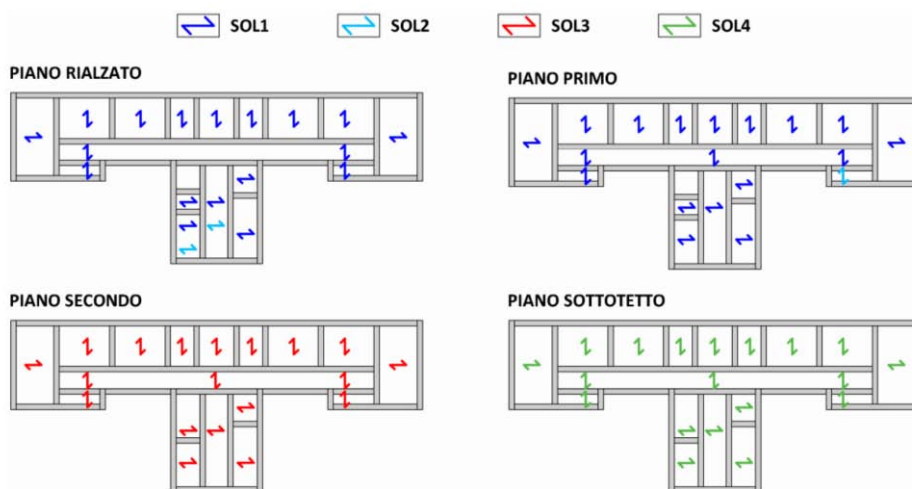


Figura 3.16 - Identificazione delle tipologie di solai

3.2.3 Copertura

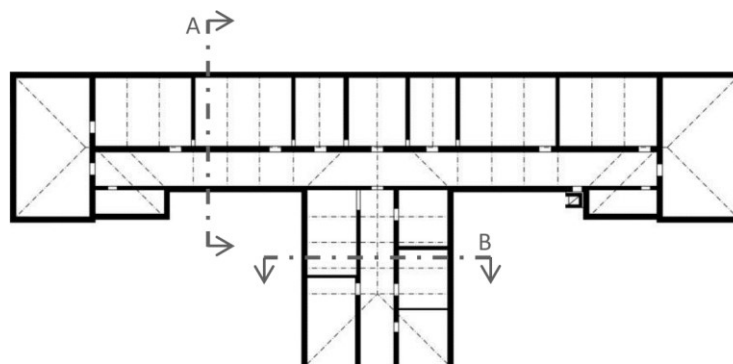


Figura 3.17 - Identificazione delle capriate lignee

La copertura dell'edificio è composta da capriate lignee che sostengono dei travetti sopra i quali si appoggia un tavolato in legno, una guaina impermeabilizzante e delle tegole.

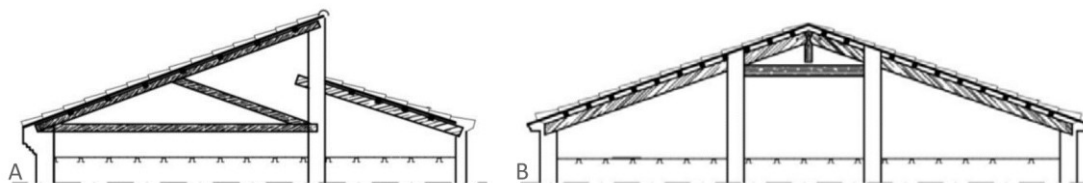


Figura 3.18 - Vista in sezione delle falde

Sul corpo principale Nord-Sud la falda rivolta a Ovest ha il colmo più alto rispetto a quella ad Est.

3.2.4 Chiusure trasparenti

Per quanto riguarda le chiusure trasparenti, importanti dal punto di vista energetico ma non dal punto di vista strutturale non c'è una documentazione particolare al riguardo. Ciò che si è potuto constatare dal sopralluogo del 12 dicembre 2019 è che apparentemente la totalità dei serramenti è caratterizzata da un telaio in alluminio dello spessore di circa 7 cm con taglio termico e vetrocamera con doppio vetro semplice e intercapedine di 12 mm.

Ci sono diverse tipologie di finestre nell'intero edificio e sembrano essere state sostituite tutte nello stesso periodo dato che hanno il telaio dello stesso tipo. Sembrano richiamare lo stile e il colore del corpo scale esterno ricostruito con i lavori del 1999 ma non si hanno informazioni precise né per quanto riguarda l'anno di installazione.

Nelle tavole a disposizione la geometria degli infissi risulta essere la stessa di quella riscontrata durante l'ispezione con la differenza che nelle tavole di progetto sono indicati dei serramenti con telaio in legno.

Si distinguono otto diversi tipi di finestre:

F1: tipologia di finestra che si trova nelle stanze del corpo principale Nord-Sud nel piano seminterrato. La tipologia di serramento è quella riscontrata in tutti i tipo di infissi presenti telaio in alluminio e vetrocamera.

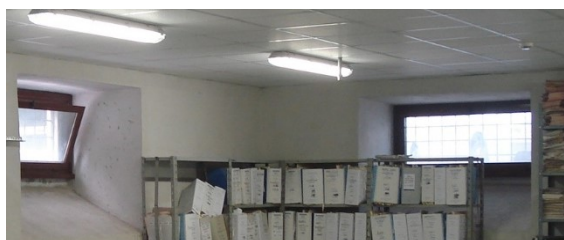
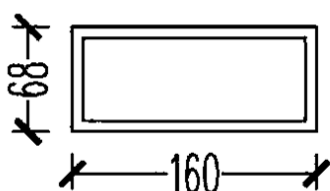


Figura 3.19 - Tipologia di finestra F1

- F2: tipologia di finestra maggiormente presente nell'edificio, si trova nelle stanze e nei corridoi del piano rialzato e del primo piano del corpo principale Nord-Sud. Serramento con telaio in alluminio e vetrocamera. C'è la presenza di pannelli in legno interni accoppiati al telaio che permettono di oscurare la maggior parte della superficie vetrata, ad eccezione del sopraluce.

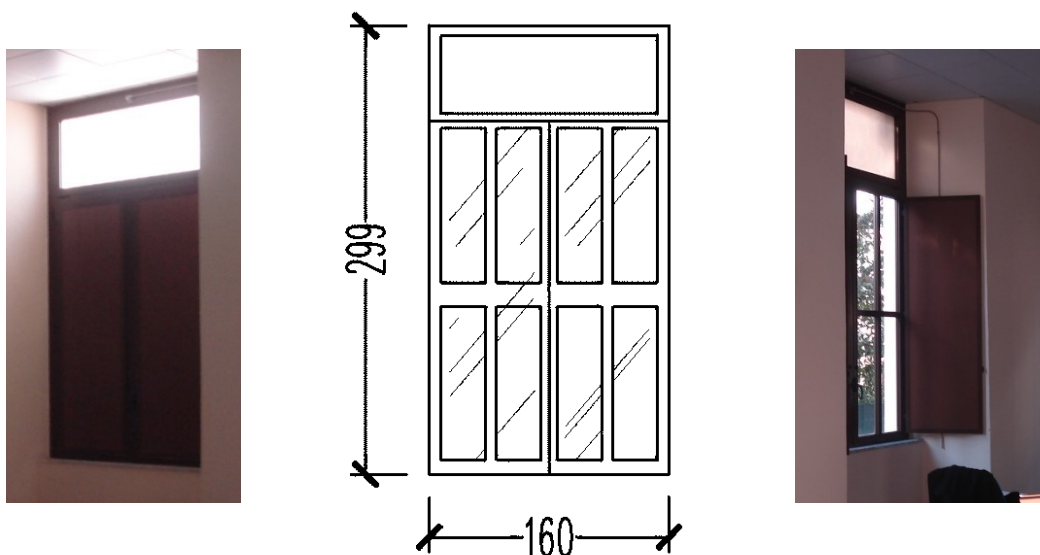


Figura 3.20 - Tipologia di finestra F2

- F3: tipologia di finestra che si trova nelle stanze e nel corridoio del secondo piano del corpo principale Nord-Sud. Serramento con telaio in alluminio e vetrocamera. La tipologia di finestre è diversa rispetto a quelle dei piani sottostanti perché il secondo piano è stato costruito in un secondo momento rispetto all'edificio originale e le

aperture non sono state costruite della stessa dimensione. A differenza delle finestre F2 non sono presenti gli schermi interni, ma si hanno delle persiane esterne alla finestra.

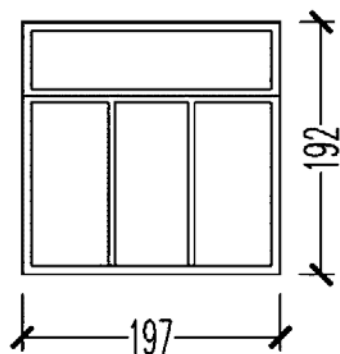


Figura 3.21 - Tipologia di finestra F3

- F4: tipologia di finestra presente nei bagni e nelle stanze del piano rialzato e del primo piano del corpo rivolto a Est. Serramento con telaio in alluminio e vetrocamera. Presenza di scuri interni.
- F5: tipologia di finestra presente nei bagni e nelle stanze del secondo piano del corpo rivolto a Est. Serramento con telaio in alluminio e vetrocamera. Presenza di scuri interni.

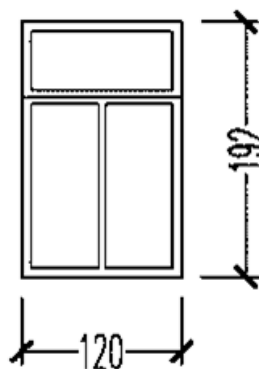
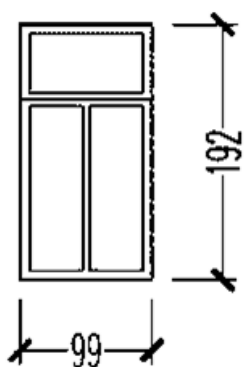


Figura 3.22 - Tipologia di finestra F4 e F5

- F6: tipologia di finestra presente nelle stanze del piano seminterrato del corpo rivolto a Est. Serramento con telaio in alluminio e vetrocamera. Come la tipologia F1 ma con larghezza 120 cm invece che 160.

- F7: tipologia di finestra presente solo ai lati della finestra centrale del primo piano. Serramento con telaio in alluminio e vetrocamera.
- F8: tipologia di finestra presente solo ai lati della finestra centrale del secondo piano. Serramento con telaio in alluminio e vetrocamera.

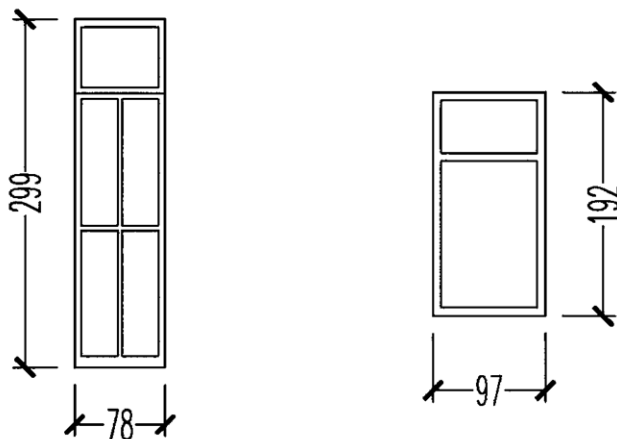


Figura 3.23 - Tipologia di finestra F7 e F8

Per quanto riguarda le porte si conoscono 15 diverse tipologie di porte e per semplicità non vengono riportate per esteso.

3.3 IMPIANTI E AMBIENTI INTERNI

Per eseguire le valutazioni di tipo energetico è necessaria una conoscenza degli impianti presenti nell'edificio. Le informazioni a disposizione sono state raccolte durante l'ispezione del 12 dicembre 2019. Il sistema impiantistico allo stato attuale nell'edificio è relativamente semplice, essendo presente soltanto l'impianto di climatizzazione invernale.

3.3.1 Sistema di generazione

Da quanto si è potuto conoscere l'impianto di riscaldamento è centralizzato. Secondo quanto riportato nelle tavole di progetto del 1999 il locale caldaia si sarebbe dovuto trovare nell'ala sud del piano seminterrato. Nella relazione programmatica sulle strutture del 30 maggio 1999 è riportata nelle ipotesi di progetto la realizzazione di una centrale termica interrata, però durante il sopralluogo però si è constatato che non si trova dove indicato dalle tavole e non è stato possibile effettuare un'ispezione.

Le uniche informazioni reperite per quanto riguarda il generatore sono il fatto che è una caldaia a gas naturale installata nel 2005. Purtroppo non si è riusciti a reperire i dati di targa, però si può ipotizzare che si tratti di una caldaia a condensazione vista l'installazione successiva alla realizzazione dell'impianto radiante a pavimento. Non si conosce la potenza ma si può stimare intorno ai 350 kW. La regolazione si presume sia centralizzata in caldaia.

Per quanto riguarda l'acqua calda sanitaria non si è accertato se è presente un generatore dedicato oppure la produzione è combinata con il riscaldamento.

3.3.2 Terminali di impianto

Come già riportato nel rilievo strutturale i solai sono caratterizzati da un impianto a pannelli radianti per il riscaldamento. Anche in questo caso non si hanno grandissime informazioni, è stato uno degli interventi di ristrutturazione in occasione dei lavori di adeguamento sismico del 1999.

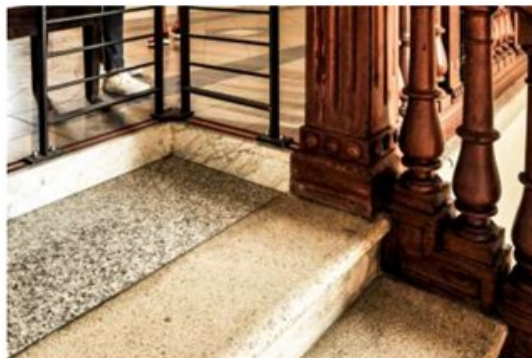


Figura 3.24 - Dettaglio delle scale al primo piano

In Figura 3.24 si può notare il dislivello tra il vecchio piano di calpestio con la pavimentazione in graniglia e il nuovo dovuto alla presenza dell'impianto radiante. È presente sicuramente al piano rialzato, al primo piano e al secondo piano. Non è sicura la presenza al piano seminterrato, che per come è apparso in stato di abbandono durante il sopralluogo del 12 dicembre 2017 si può considerare una zona non climatizzata e priva di impianto di riscaldamento.

3.3.3 Acqua calda sanitaria

Come già specificato nel § 3.3.1, non si hanno conoscenze specifiche riguardo alla produzione di ACS. I sistemi di erogazione sono presenti soltanto nei bagni ad ogni piano, nelle altre stanze non è stata riscontrata la presenza di eventuali rubinetti.

3.3.4 Illuminazione

L'intero edificio presenta corpi illuminanti a fluorescenza. La potenza complessiva installata, considerando una media di 10 W/m², si può stimare attorno ai 40 kW

3.3.5 Controsoffitto

In tutti i piani c'è la presenza di un controsoffitto smontabile e ispezionabile in cartongesso. È stato sostituito in occasione degli interventi del 1999 a causa del danneggiamento subito per il terremoto. L'altezza interpiano è particolarmente elevata di conseguenza anche lo spazio al di sopra del controsoffitto è consistente: circa 88 cm al piano rialzato, 115 cm al primo piano e 51 cm a secondo piano.

3.3.6 Ascensori

Nel corpo scala esterno costruito con i lavori del 1999 sono attualmente presenti due ascensori. Inoltre c'è un ascensore interno adiacente alle scale in muratura interne che però permette di raggiungere soltanto il primo piano.

3.4 STATO PRE-RISTRUTTURAZIONE

Come è stato già specificato più volte nei paragrafi precedenti l'edificio ha subito, soprattutto in seguito al sisma di Umbria e Marche del 1997, dei lavori di ristrutturazione e adeguamento sismico a causa dei danni subiti dal terremoto. Oltre agli interventi di miglioramento strutturale sono stati realizzati degli interventi migliorativi dal punto di vista energetico. Con questo lavoro di tesi, parallelamente a un altro lavoro di tesi sull'analisi strutturale del fabbricato, si ha l'obiettivo di studiare l'edificio nella situazione antecedente alla ristrutturazione quindi degradato sia dal punto di vista strutturale che energetico rispetto allo stato di fatto attuale.

A partire da una situazione iniziale dell'edificio base verranno proposti degli interventi migliorativi incrementali in modo da raggiungere, a seconda della profondità di intervento, un miglioramento di classe sia energetica che sismica.

In questa sezione sono illustrate le caratteristiche dell'edificio pre-ristrutturazione ipotizzato per la creazione del modello nel capitolo successivo e le sostanziali differenze con la condizione corrente.

3.4.1 Involucro edilizio

3.4.1.1 Pareti verticali

I lavori di consolidamento strutturale effettuati non hanno grosse influenze dal punto di vista energetico. Per tutte le tipologie murarie gli interventi possono essere riassunti in:

- Intonaco armato con rete elettrosaldata e inghisaggi di ferri con malta cementizia o resina. Lo spessore totale dovrebbe essere di 6 cm ma in sito sono stati misurati valori variabili tra 3,5 cm e 10 cm. Per tutti i muri perimetrali realizzato soltanto nel lato interno, per i muri interni in entrambi i lati
- Chiodatura armata dei cantonali con barre inserite in perfori sigillati con boiaccia cementizia
- Chiusura di alcuni vani e nicchie con muratura in mattoni

Con questi tipi di modifiche il valore della trasmittanza dei muri non subisce variazioni particolari. La stratigrafia riportata nel rilievo strutturale si può considerare la stessa, con la differenza che invece dei 6 cm medi di intonaco vengono considerati soltanto 2 cm.

Di seguito viene riportata una tabella riassuntiva con le diverse strutture murarie e i rispettivi valori di trasmittanza a seconda dello spessore del muro. Si precisa che gli spessori riportati sono dei valori medi, utilizzati per la costruzione del modello poiché i muri si differenziano in

maniera evidente a seconda del piano di riferimento, ma possono variare di qualche centimetro anche all'interno dello stesso piano.

Tabella 3.1 - Trasmittanza termica dei muri secondo la tipologia e lo spessore

Tipologia muraria	Spessore attuale [cm]	Spessore effettivo [cm]	Trasmittanza [W/m ² K]
MUR1-A	35	27	3.180
	50	42	2.634
	65	57	2.248
	80	72	1.960
MUR1-B	50	48	2.465
	60	58	2.226
	100	98	1.605
MUR2	20	16	2.624
	35	27	1.873
MUR3	50	46	1.633
	60	56	1.524
	75	71	1.387
	90	85	1.279

3.4.1.2 Solai e tetto

I solai hanno subito dei lavori di ristrutturazione importanti vista l'aggiunta della soletta armata e dell'impianto radiante a pavimento.

Dalla relazione programmatica e sulle strutture del 1999 si possono ricavare le informazioni relative alle strutture orizzontali presenti prima degli interventi di ristrutturazione.

- SOL0: piano di calpestio del piano seminterrato. Non si hanno conoscenze particolari al riguardo, si ipotizza un pavimento in graniglia, sotto 8 cm massetto e poi un vespaio di ciottoli.
- SOL1: copertura del piano seminterrato e del piano rialzato. Solaio in ferro e voltine in laterizio, riempimento di 3 cm di spessore e pavimento in graniglia.
- SOL2: non ci sono informazioni riguardanti questo tipo di solaio, si può considerare tutta la superficie dei primi due piani interamente composta dalla tipologia SOL1.

- SOL3: copertura del primo piano. Solaio in laterocemento del SAP costituito da travetti in calcestruzzo armato gettato in opera e pignatte in laterizio, per uno spessore totale di 25 cm e pavimento in graniglia.
- SOL4: non sono presenti informazioni per questo solaio, si considera un tavolato in legno di 4 cm come quello presente allo stato attuale senza le travi in acciaio.
- Tetto: solaio di copertura in legno a falde inclinate costituito da struttura principale in capriate lignee, massetto e manto di copertura in coppi. Non è stato fatto alcun tipo di intervento.
- Controsoffitto: nel progetto degli interventi è specificato il rifacimento del controsoffitto in quanto quello precedente risultava danneggiato. Non conoscendo il periodo di installazione del vecchio controsoffitto, nella modellizzazione dell'edificio si è deciso di non considerarlo.

Di seguito viene riportata una tabella riassuntiva che riporta i valori di trasmittanza dei solai:

Tabella 3.2 - Trasmittanza termica dei solai secondo la tipologia

<i>Solaio/copertura</i>	<i>Spessore attuale [cm]</i>	<i>Spessore effettivo [cm]</i>	<i>Trasmittanza [W/m²K]</i>
<i>SOL1</i>	40	20	2.361
<i>SOL2</i>	40	-	-
<i>SOL3</i>	40	20	3.111
<i>SOL4</i>	4	4	2.703
<i>Tetto</i>	20	20	0.807

Per quanto riguarda il pavimento del piano seminterrato si rimanda al capitolo successivo, poiché la normativa prevede una trattazione particolare.

3.4.1.3 Superfici vetrate

La sostituzione dei serramenti in vetrocamera non è documentata e non si hanno neanche informazioni riguardanti le finestre precedentemente montate. È necessario quindi fare delle ipotesi per poter in seguito definire il modello in maniera verosimile.

Supponendo di mantenere invariati la superficie di apertura totale per ogni tipologia di finestra e la stessa forma per il telaio in modo da avere lo stesso rapporto area del telaio su area totale, è possibile ricavare le caratteristiche delle finestre andando a cambiare i materiali di cui sono costituite.

Vista la data di costruzione dell'edificio si può benissimo considerare un serramento con telaio metallico senza taglio termico e con vetri singoli di 4 mm.

3.4.2 Impianti e interni

Quello che si conosce degli impianti dell'edificio è già stato presentato nel § 3.3, però non si hanno informazioni riguardanti la situazione precedente alla ristrutturazione del 1999. Ad ogni modo è possibile ipotizzare con una buona approssimazione la tipologia di generatore e di terminale di impianto per la condizione pre-interventi.

3.4.2.1 Sistema di generazione

Si ipotizza la presenza di un sistema di riscaldamento centralizzato con una caldaia tradizionale a gas naturale supponendo già presente la linea di distribuzione del gas.

La potenza nominale, considerando un sovradimensionamento di circa 1.5 si può inizialmente stimare attorno ai 500 kW con un rendimento nominale intorno all'89%; un calcolo più dettagliato verrà eseguito con la creazione del modello.

Per semplicità si considera anche in questo caso un unico impianto di generazione combinato per riscaldamento e produzione di acqua calda sanitaria.

3.4.2.2 Distribuzione e terminali di impianto

Visto il periodo di costruzione si ipotizza la presenza di un impianto centralizzato con montanti non isolati. Per quanto riguarda i terminali di impianto sotto le finestre sono presenti delle nicchie di profondità di circa 30 cm, quindi si può ipotizzare la che l'edificio venisse riscaldato attraverso dei radiatori.

3.4.2.3 Illuminazione

Per quanto riguarda il sistema di illuminazione si può considerare uguale a quello attuale, nonostante il cambio di destinazione d'uso da scuola a tribunale dopo gli interventi del 1999.

3.4.2.4 Controsoffitto

Come già specificato nel § 3.4.1.2 non si hanno informazioni precise riguardo al controsoffitto precedente. Per semplicità nella modellizzazione dell'edificio si considerano gli ambienti interni privi di controsoffitto.

3.4.2.5 Ascensori

Il vecchio corpo scala esterno non era dotato di un ascensore. Non si hanno informazioni, invece, per l'ascensore interno. Si ipotizza la presenza di un singolo ascensore che collega il piano rialzato con il primo piano.

3.4.3 Destinazione d'uso

Per eseguire una valutazione dell'efficienza energetica è necessario classificare l'edificio in base alla destinazione d'uso. La struttura inizialmente concepita come scuola è stata convertita in tribunale per una quindicina d'anni e ora, anche se in via provvisoria, ha di nuovo la funzione di edificio scolastico ai primi due piani e di uffici con orario di apertura mattutino per una porzione del secondo piano.

Per poter svolgere una valutazione coerente è opportuno studiare l'edificio a parità di destinazione d'uso. Purtroppo non è ben chiara la situazione attuale, poiché la scuola è presente soltanto in via provvisoria, finché la sede originaria non verrà resa nuovamente agibile. Inoltre, anche per l'ufficio del Giudice di Pace al secondo piano c'è un'ipotesi di trasferimento, ma non si hanno sufficienti informazioni al riguardo.

Per semplicità si è scelto di effettuare lo studio classificando l'intero edificio come adibito a uffici e assimilabili. La normativa prevede dei particolari accorgimenti a seconda della destinazione d'uso che verranno presentati nel capitolo successivo.

4 METODI E MODELLI UTILIZZATI

Una volta identificato l'edificio, quanto è stato fatto finora è stata un'esaminazione delle sue caratteristiche costruttive e impiantistiche. Come già spiegato all'inizio del § 3.4, lo studio non si vuole concentrare sull'edificio allo stato attuale, ma si è voluto cercare di risalire a una ipotetica situazione originaria, precedente agli importanti interventi di adeguamento sismico ai quali è stato sottoposto durante i lavori del 1999.

Definiti i componenti dell'involucro, gli impianti e la destinazione d'uso è possibile proseguire con la creazione di un modello per poter valutare la prestazione energetica dell'edificio.

In questo lavoro di tesi si è scelto di studiare due diversi tipi di modelli:

- Modello quasi stazionario mediante l'utilizzo del software commerciale *Edilclima*
- Modello dinamico mediante l'utilizzo del software *TRNSYS*

Il primo modello permette di effettuare la valutazione energetica secondo la normativa vigente che non prevede un calcolo particolarmente dettagliato. Il modello permette di determinare la prestazione energetica dell'edificio, corrispondente all'energia totale consumata dall'edificio climatizzato per metro quadro di superficie ogni anno (kWh/m² anno). Individuato il fabbisogno è poi possibile determinare la classe di efficienza energetica dell'edificio.

Il secondo modello permette di eseguire una stima più precisa. Infatti un modello dinamico prevede una simulazione dell'edificio ora per ora, a differenza del modello quasi stazionario che utilizza degli intervalli di tempo di un mese e restituisce dei valori indicativi sufficienti per determinare la classe energetica, ma spesso non molto precisi in particolar modo per il regime estivo, quando gli apporti solari sono predominanti. Il modello dinamico tuttavia non permette di valutare direttamente il fabbisogno di energia primaria dell'edificio, ma soltanto il fabbisogno sensibile di energia termica finale per la climatizzazione invernale ed estiva.

Per la determinazione del carico latente è stata effettuata un'analisi a sé stante, basata sul modello dell'edificio in *TRNSYS*, che permette di valutare il fabbisogno di un eventuale impianto di ventilazione con unità di trattamento aria.

4.1 PRESTAZIONI ENERGETICHE DEGLI EDIFICI: IL MODELLO QUASI STAZIONARIO

Prima di descrivere la costruzione dei modelli, in questa sezione si riporta quanto indica la normativa di riferimento italiana per la valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici e per la compilazione dell'APE. L'attestato di prestazione energetica (APE) è il documento che certifica le caratteristiche energetiche di un edificio e prevede la classificazione dell'edificio a seconda del fabbisogno di energia primaria non rinnovabile.

4.1.1 Attestato di prestazione energetica

L'attestato di prestazione energetica è obbligatorio per gli edifici pubblici ed aperti al pubblico; è inoltre necessario in caso di ristrutturazioni e interventi sull'edificio importati.

Come già anticipato l'APE certifica la classe energetica di un edificio. Essa è sostanzialmente un indicatore in una scala che va da A4 a G che viene associato al fabbisogno specifico di energia primaria non rinnovabile dell'edificio in un anno. La determinazione della classe avviene secondo il confronto dell'indice di prestazione energetica globale dell'edificio in esame con l'indice di prestazione dell'edificio di riferimento.

	CLASSE A4	$\leq 0,40$ EP gl, nren,rif, standard
$0,40$ EP gl, nren,rif, standard $<$	CLASSE A3	$\leq 0,60$ EP gl, nren,rif, standard
$0,60$ EP gl, nren,rif, standard $<$	CLASSE A2	$\leq 0,80$ EP gl, nren,rif, standard
$0,80$ EP gl, nren,rif, standard $<$	CLASSE A1	$\leq 1,00$ EP gl, nren,rif, standard
$1,00$ EP gl, nren,rif, standard $<$	CLASSE B	$\leq 1,20$ EP gl, nren,rif, standard
$1,20$ EP gl, nren,rif, standard $<$	CLASSE C	$\leq 1,50$ EP gl, nren,rif, standard
$1,50$ EP gl, nren,rif, standard $<$	CLASSE D	$\leq 2,00$ EP gl, nren,rif, standard
$2,00$ EP gl, nren,rif, standard $<$	CLASSE E	$\leq 2,60$ EP gl, nren,rif, standard
$2,60$ EP gl, nren,rif, standard $<$	CLASSE F	$\leq 3,50$ EP gl, nren,rif, standard
	CLASSE G	$> 3,50$ EP gl, nren,rif, standard

Figura 4.1 - Scala di classificazione energetica degli edifici

L'indice di prestazione energetica globale non rinnovabile (EPgl,nren) si definisce attraverso la somma dei seguenti componenti:

- EPH,nren: indice di prestazione energetica non rinnovabile relativo alla climatizzazione invernale
- EPW,nren: indice di prestazione energetica non rinnovabile relativo all'acqua calda sanitaria

- EPC_{nren}: indice di prestazione energetica non rinnovabile relativo alla climatizzazione estiva
- EPV_{nren}: indice di prestazione energetica non rinnovabile relativo alla ventilazione
- EPL_{nren}: indice di prestazione energetica non rinnovabile relativo all'illuminazione
- EPT_{nren}: indice di prestazione energetica non rinnovabile relativo al trasporto di persone o cose

Ogni componente è da calcolare seguendo il metodo proposto dalla norma [9] [10] che prevede un'analisi termo-energetica di tipo quasi stazionario.

4.1.2 La norma UNI/TS 11300

La norma fornisce la linea guida da seguire per la determinazione del fabbisogno di energia primaria globale. Può essere utilizzata per diversi tipi di applicazioni:

- valutare il rispetto di regolamenti espressi in termini di obiettivi energetici
- confrontare la prestazione energetica di varie alternative progettuali per un edificio in progetto
- indicare un livello convenzionale di prestazione energetica degli edifici esistenti
- stimare l'effetto di possibili interventi di risparmio energetico su un edificio esistente, calcolando il fabbisogno di energia prima e dopo ciascun intervento
- prevedere le esigenze future di risorse energetiche su scala nazionale o internazionale, calcolando i fabbisogni di energia di tipici edifici rappresentativi del parco edilizio

È prevista una diversa tipologia di calcolo in base all'applicazione, facendo riferimento al prospetto in Figura 4.2 per l'applicazione all'intero edificio in modo omogeneo:

Tipo di valutazione		Dati di ingresso		
		Uso	Clima	Edificio
A1	Sul progetto (<i>Design Rating</i>)	Standard	Standard	Progetto
A2	Standard (<i>Asset Rating</i>)	Standard	Standard	Reale
A3	Adattata all'utenza (<i>Tailored rating</i>)	In funzione dello scopo		Reale

Figura 4.2 - Classificazione tipologie di valutazione energetica per applicazioni omogenee all'intero edificio (UNI-TS 11300)

Le valutazioni di tipo A1 e A2 permettono di valutare il fabbisogno convenzionale, mentre la valutazione di tipo A3 fornisce una stima più realistica dei consumi energetici dell'edificio.

Nel caso dell'edificio in esame la valutazione deve essere di tipo A2, ovvero una valutazione in condizioni standard per la determinazione della classe energetica.

La norma si divide in 6 parti, ognuna delle quali indica il metodo per il calcolo:

- UNI/TS 11300 –1 Prestazioni energetiche degli edifici – Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva e invernale;
- • UNI/TS 11300 –2 Prestazioni energetiche degli edifici – Parte 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 Prestazioni energetiche degli edifici – Parte 3: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione estiva;
- • UNI/TS 11300 –4 Prestazioni energetiche degli edifici – Parte 4: Utilizzo di energie rinnovabili e di altri metodi di generazione per riscaldamento di ambienti e preparazione acqua calda sanitaria.
- • UNI/TS 11300-5 Prestazioni energetiche degli edifici – Parte 5: Calcolo dell'energia primaria e dalla quota di energia da fonti rinnovabili
- • UNI/TS 11300-6 Prestazioni energetiche degli edifici – Parte 6: Determinazione del fabbisogno di energia per ascensori, scale mobili e marciapiedi mobili

Di seguito si riporta in maniera sintetica la metodologia di calcolo proposta nella parte 1 e nella parte 2, poiché l'edificio non è dotato degli impianti che sono trattati nelle altre parti della norma.

4.1.3 Fabbisogno di energia termica per la climatizzazione invernale

La prima parte della normativa riporta il metodo di calcolo per la determinazione del fabbisogno di energia termica per la climatizzazione estiva e invernale. In questo paragrafo si riportata soltanto la metodologia per la stima per il riscaldamento, dato che l'edificio non è dotato di un impianto di raffrescamento estivo.

La procedura di calcolo comprende i seguenti passi:

- definizione dei confini dell'insieme degli ambienti climatizzati e non climatizzati dell'edificio
- definizione dei confini delle diverse zone di calcolo, se richiesta
- definizione delle condizioni interne di calcolo e dei dati di ingresso relativi al clima esterno

- calcolo, per ogni mese e per ogni zona dell'edificio, dei fabbisogni ideali di energia termica per riscaldamento ($Q_{H,nd}$) e raffrescamento ($Q_{C,nd}$)
- calcolo della stagione di riscaldamento e di raffrescamento
- aggregazione dei risultati relativi ai diversi mesi e alle diverse zone servite dagli stessi impianti

La domanda di energia termica dell'edificio viene stimata sulla base di un bilancio termico dell'ambiente interno delimitato dall'involucro edilizio. Il metodo semplificato quasi stazionario risolve su base mensile l'equazione di bilancio delle dispersioni e degli apporti di energia termica partendo da dati di input valutati in condizioni medie mensili. Il calcolo mensile è da fare per ogni zona termica in cui è stato suddiviso l'edificio.

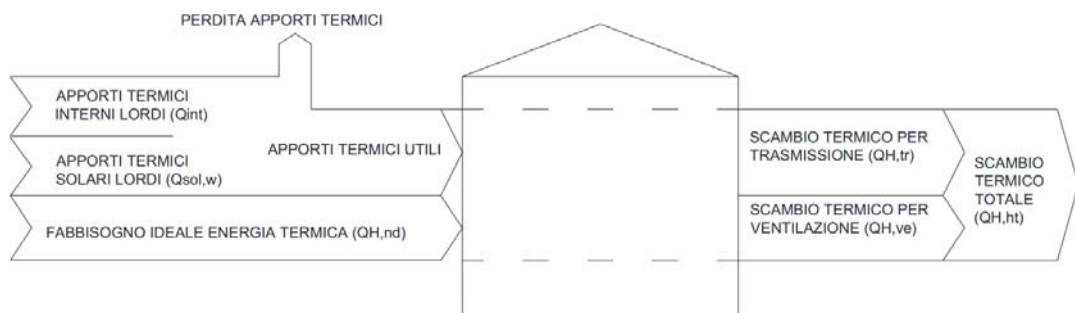


Figura 4.3 - Schema dei componenti per la determinazione del fabbisogno di energia termica per la climatizzazione invernale

Quanto schematizzato nella Figura 4.3 può essere riprodotto nella seguente equazione:

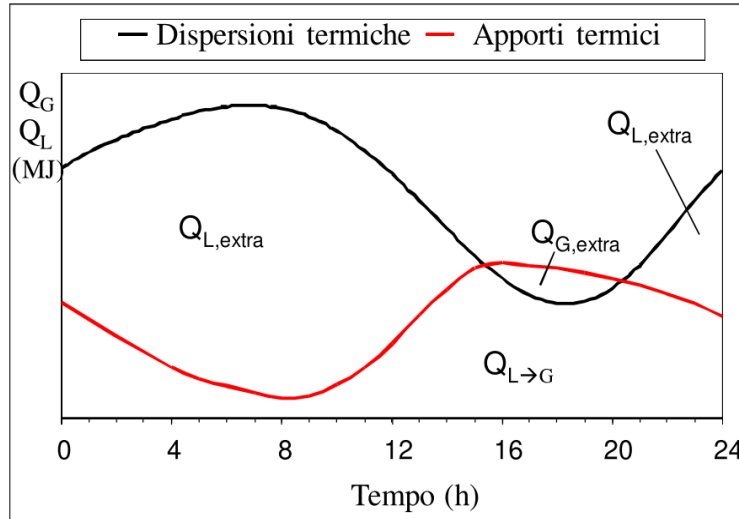
$$Q_{H,nd} = Q_{H,ht} - \eta_{H,gn} \cdot Q_{H,gn}$$

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

Dove:

- $Q_{H,nd}$: è il fabbisogno ideale di energia termica [MJ]
- $Q_{H,gn}$: è l'apporto gratuito di energia termica dato dalla somma degli apporti termici interni lordi Q_{int} e degli apporti termici solari lordi $Q_{sol,w}$ [MJ]
- $Q_{H,ht}$: è lo scambio termico totale dato dalla somma dello scambio termico per trasmissione $Q_{H,tr}$ e dello scambio termico per ventilazione $Q_{H,ve}$ [MJ]
- $\eta_{H,gn}$ è il coefficiente di utilizzazione degli apporti termici in inverno e tiene conto della perdita degli apporti termici

Il coefficiente di utilizzazione degli apporti termici tiene conto della capacità termica dell'edificio di accumulare energia e rilasciarla in secondo momento. In inverno l'energia



$$\eta_{H,gn} = \frac{Q_{L \rightarrow G}}{Q_{L \rightarrow G} + Q_{G,extra}}$$

Figura 4.4 - Rappresentazione grafica del coefficiente di utilizzazione degli apporti termici

termica accumulata durante il giorno grazie agli apporti solari viene rilasciata durante la notte e contribuisce a soddisfare il fabbisogno

La norma fornisce il metodo di calcolo per la valutazione dei vari componenti di bilancio per la determinazione del fabbisogno di energia termica per la climatizzazione estiva e invernale. Per brevità non si riportano all'interno di questa sezione tutte le formule per il calcolo di ogni termine. È importante specificare che per una valutazione di tipo A2 molti dei dati di input sono determinati in base alla tipologia di edificio. Ad esempio, la temperatura interna di set point per la climatizzazione invernale, per edifici di categoria E2 (uffici), deve essere costante pari a 20°C. Anche per gli apporti interni si assumono valori in relazione alla categoria di edificio. I dati d'ingresso per effettuare i calcoli tengono conto di diversi fattori, come le caratteristiche tipologiche dell'edificio (volume lordo e volume netto dell'ambiente climatizzato, superfici di tutti i componenti dell'involucro, tipologie e dimensioni dei ponti termici, ecc.), le caratteristiche termofisiche e costruttive dell'edificio (trasmittanza termica dei componenti dell'involucro edilizio, capacità termica dei componenti della struttura dell'edificio, fattore solare dei componenti trasparenti, ecc.), i dati climatici (medie mensili della temperatura esterna e irradianza solare totale), i dati relativi alle modalità di occupazione e di utilizzo dell'edificio.

4.1.4 Fabbisogno di energia primaria

La seconda parte della norma fornisce dati e metodi di calcolo per la determinazione dei fabbisogni di energia termica utile per il servizio di produzione di acqua calda sanitaria, nonché di energia fornita e di energia primaria per i servizi di climatizzazione invernale e acqua calda sanitaria. Essa fornisce inoltre il metodo di calcolo per la determinazione del fabbisogno di energia primaria per il servizio di ventilazione e le indicazioni e i dati nazionali per la determinazione dei fabbisogni di energia primaria per il servizio di illuminazione.

Il periodo di calcolo dipende dal tipo di valutazione. Per la climatizzazione invernale è indicato nella prima parte della norma e dipende sostanzialmente dalla zona termica del caso in esame, determinata dal numero di gradi giorno; per edifici di uso residenziale e non residenziale si considera l'impianto sempre attivo. Per la produzione di acqua calda sanitaria invece si considera la durata dell'intero anno con calcolo mensile.

È prevista la suddivisione degli impianti di climatizzazione, produzione di ACS e ventilazione in due categorie principali: utilizzazione e generazione. La parte di generazione è formata da tutti i sottosistemi che trasformano l'energia dei diversi vettori energetici (gas, energia elettrica, ecc.) in energia termica utile. La parte di utilizzazione è l'insieme di sottosistemi alla quale viene fornita l'energia termica dalla generazione e che soddisfano le richieste di riscaldamento, acqua calda sanitaria e ventilazione.

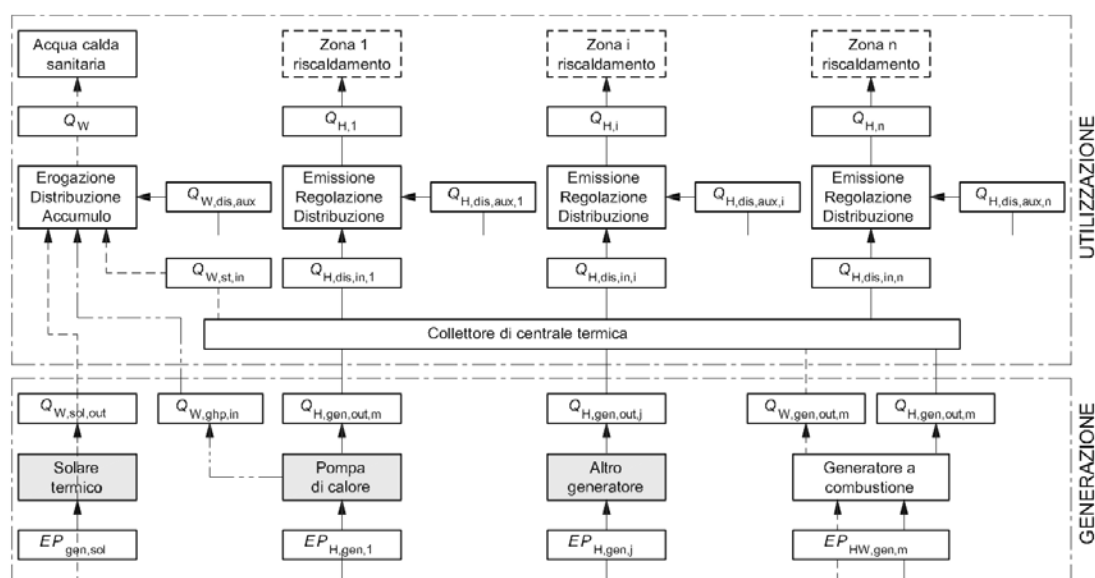


Figura 4.5 - Esempio di suddivisione di impianto in parte "generazione" e "utilizzazione" (UNI-TS 11300)

I sottosistemi di generazione possono essere di vario tipo a seconda del vettore energetico dal quale sono alimentati. Nel caso dell'edificio in esame il generatore è una caldaia a gas tradizionale.

Per quanto riguarda l'utilizzazione invece la suddivisione è diversa per la climatizzazione e per la produzione di acqua calda sanitaria. Per la climatizzazione invernali si considerano i seguenti sottosistemi:

- Emissione
- Regolazione
- Distribuzione (comprendente circuiti primari e secondari)
- Accumulo esterno a componenti d'impianto

Invece per la produzione di acqua calda sanitaria i sistemi di utilizzazione sono:

- Erogazione
- Distribuzione
- Accumulo
- Distribuzione primaria

La determinazione del fabbisogno di energia primaria viene fatta procedendo a ritroso considerando le perdite di energia termica di ogni sottosistema: conoscendo il fabbisogno in uscita da un sottosistema si deve determinare il fabbisogno di energia termica in ingresso.

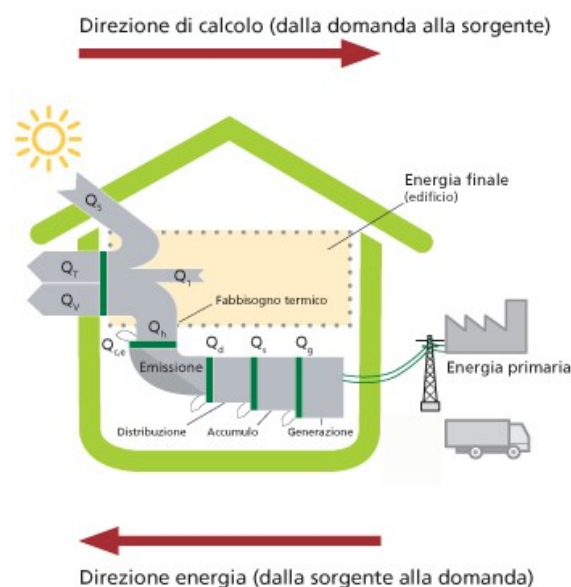


Figura 4.6 - Rappresentazione del calcolo del fabbisogno di energia primaria (energenia)

Le perdite totali di ciascun sottosistema si possono classificare come non recuperabili, recuperabili e effettivamente recuperate. La norma tiene conto delle perdite recuperate dai sottosistemi riducendo le perdite totali di ogni sottosistema. Oltre al fabbisogno in ingresso e in uscita da ciascun sottosistema è necessario considerare i consumi degli ausiliari elettrici e

l'energia termica dissipata sotto forma di calore recuperata dal sottosistema. Nella Figura 4.7 è rappresentato schematicamente il bilancio termico di un generico sottosistema Y che svolge la funzione X.

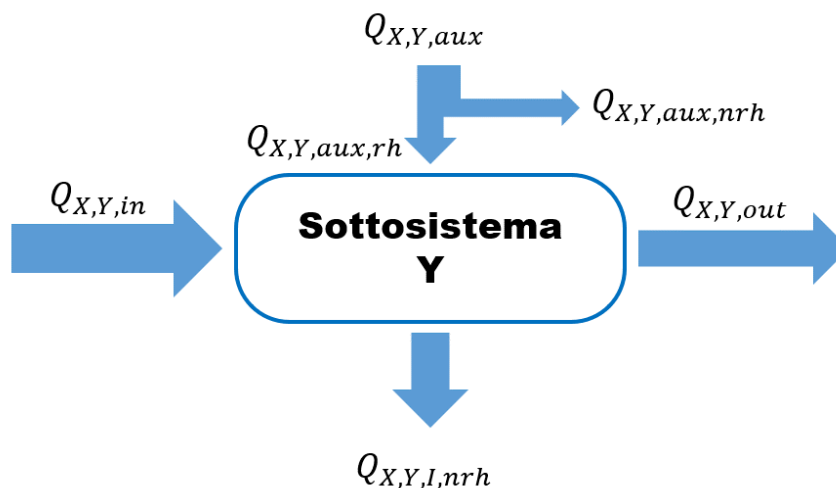


Figura 4.7 – Bilancio termico di un generico sottosistema Y

Il bilancio termico di un sottosistema generico può essere rappresentato mediante la seguente equazione:

$$Q_{X,Y,in} = Q_{X,Y,out} + Q_{X,Y,I,nrh} - Q_{X,Y,aux,rh}$$

Dove:

- $Q_{X,Y,in}$ è l'energia termica in entrata nel sottosistema Y dedicato al servizio X
- $Q_{X,Y,out}$ è l'energia termica in uscita dal sottosistema Y dedicato al servizio X
- $Q_{X,Y,aux,rh}$ è l'energia termica recuperata dall'energia dissipata sotto forma di calore dagli ausiliari del sottosistema Y
- $Q_{X,Y,I,nrh}$ sono le perdite non recuperate nel sottosistema Y

A partire dall'equazione di bilancio termico di un sottosistema, considerando anche il fabbisogno degli ausiliari, è possibile ricavarne il rendimento medio. Attraverso il prodotto dei rendimenti medi di tutti i sottosistemi dell'impianto si ottiene il rendimento globale medio stagionale. Per esempio per la climatizzazione invernale il rendimento globale è dato da:

$$\eta_g = \eta_e \cdot \eta_{rg} \cdot \eta_d \cdot \eta_{gn}$$

Dove:

- η_e rendimento di emissione
- η_{rg} rendimento di regolazione

- η_d rendimento di distribuzione
- η_{gn} rendimento di generazione

I vari rendimenti tengono conto del fattore di conversione in energia primaria del vettore energetico utilizzato dal sottosistema. Per ogni sottosistema la norma fornisce uno o più metodi per il calcolo dei rendimenti, a seconda del tipo di valutazione da effettuare. In linea generale per valutazioni di tipo A1 e A2 la norma fornisce dei valori di rendimenti tabulati che devono essere usati a seconda della destinazione d'uso dell'edificio e del tipo di sottosistema.

Per la produzione di acqua calda sanitaria la stima del fabbisogno la norma fornisce una formula che dipende dalla portata d'acqua giornaliera e la differenza tra la temperatura di erogazione e la temperatura dell'acqua fredda in ingresso:

$$Q_w = \rho_w \cdot c_w \cdot V_w \cdot (\theta_{er} - \theta_0) \cdot G$$

Dove:

- ρ_w è la densità dell'acqua, pari a 1000 [kg/m³]
- c_w calore specifico dell'acqua, pari a $1.162 \cdot 10^{-3}$ [kWh/(kg K)]
- V_w è il volume d'acqua giornaliero espresso in [m³/d]
- θ_{er} è la temperatura di erogazione dell'acqua [°C]
- θ_0 è la temperatura dell'acqua fredda in ingresso [°C]
- G è il numero di giorni considerati [d]

Per valutazioni di tipo A1 e A2 si considerano una temperatura di erogazione pari a 40°C e una temperatura dell'acqua fredda in ingresso pari alla media annuale delle temperature medie mensili dell'aria esterna della località considerata. Il volume d'acqua giornaliero V_w dipende dalla destinazione d'uso dell'edificio. Per edifici non residenziali di tipo E.2 (adibiti a uffici o assimilabili) la normativa prevede la seguente formula:

$$V_w = a \cdot N_u$$

Dove:

- V_w è il volume di acqua calda richiesto [l/d]
- a è il fabbisogno specifico giornaliero, pari a 0.2
- N_u è la superficie netta climatizzata

Come per la climatizzazione invernale, anche per la produzione di acqua calda sanitaria dal fabbisogno si ricava il fabbisogno di energia primaria per la produzione di acqua calda sanitaria.

Il calcolo della prestazione energetica degli edifici per il servizio di illuminazione è fornito dalla norma UNI EN 15193. Il fabbisogno di energia elettrica annuo dipende dalla potenza di corpi illuminanti installata, dalle ore annue di accensione e da dei fattori riduttivi del tempo di accensione che tengono conto della dipendenza dalla luce diurna e della dipendenza dall'occupazione. Per valutazioni di tipo A1 e A2 le ore di accensione sono definite dalla norma a seconda della destinazione d'uso.

4.1.5 Indice di prestazione energetica

L'indice di prestazione energetica di un edificio è dato dal fabbisogno specifico di energia primaria globale non rinnovabile per un anno [kWh/(m²·anno)]. Il fabbisogno specifico di energia primaria globale è dato dalla somma dei fabbisogni specifici di energia primaria dei singoli servizi energetici:

- Impianti di riscaldamento o di climatizzazione invernale (ausiliari compresi)
- Impianti di raffrescamento o di climatizzazione estiva
- Impianti di produzione di acqua calda sanitaria
- Impianti di ventilazione meccanica
- Impianti di illuminazione degli ambienti interni e esterni di pertinenza dell'edificio
- Impianti di trasporto di persone o cose

Come già riportato nel § 4.1.4, il fabbisogno specifico di energia primaria si ricava, ad esempio per la climatizzazione invernale, dal fabbisogno di energia termica tenendo conto del rendimento globale medio stagionale:

$$EP_i = \frac{Q_h}{A_{pav}} \cdot \frac{1}{\eta_g} \cdot \left[\frac{kWh}{m^2 \cdot anno} \right]$$

Dove:

- Q_h : è il fabbisogno di energia termica dell'edificio [kWh]
- A_{pav} : è la superficie in pianta della zona climatizzata dell'edificio [m²]
- η_g : è il rendimento globale medio stagionale

Al fine di determinare la classe energetica di un edificio non è sufficiente il fabbisogno globale di energia primaria, infatti è il fabbisogno di energia primaria non rinnovabile che determina

l'indice di prestazione. Nel caso l'edificio sia dotato di impianti di produzione di energia termica o elettrica rinnovabili è necessario calcolare la quota di energia rinnovabile utilizzata per la climatizzazione invernale, la climatizzazione estiva, ventilazione, produzione di acqua calda sanitaria e illuminazione.

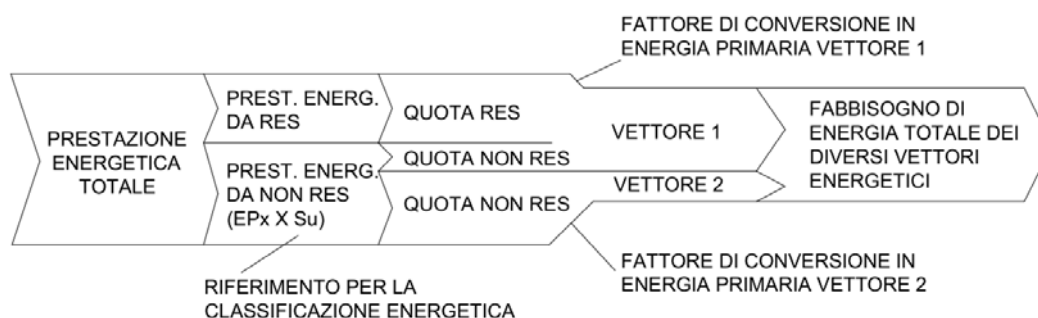


Figura 4.9 - Schema per la determinazione dell'indice di prestazione energetica

Inoltre c'è da tenere conto del fattore di conversione di energia primaria, il quale prevede una quota parte data da energia rinnovabile (Ren) e una quota da energia non rinnovabile (Nren). I fattori di conversione sono standardizzati e dipendono principalmente dal vettore energetico utilizzato [11].

	fattore di conversione in energia primaria Nren	fattore di conversione in energia primaria Ren	fattore di conversione in energia primaria totale
Energia elettrica da rete	1,95	0,47	2,42
Gas naturale	1,05	0	1,05
GPL	1,05	0	1,05
Carbone	1,1	0	1,1
Gasolio e Olio combustibile	1,07	0	1,07
Biomasse solide (tutte)	0,2	0,8	1
Biomasse liquide	0,4	0,6	1
Biomasse gassose	0,4	0,6	1
Solare fotovoltaico "on site"	0	1	1
Solare termico "on site"	0	1	1
Mini-eolico "on site"	0	1	1
Teleriscaldamento	1,5 ^(*)	0	1,5 ^(*)
Teleraffrescamento	0,5 ^(*)	0	0,5 ^(*)

(*) in assenza di valori dichiarati dal gestore

Figura 4.8 - Fattori di conversione in energia primaria Nren, Ren e globale

4.2 IL MODELLO DINAMICO

Il calcolo previsto dalla normativa, per valutazioni di tipo A1 e A2, prevede un computo dei fabbisogni in condizioni standard. Una valutazione di tipo A3, adattata all'utenza, può consentire una previsione realistica dei consumi energetici effettivi. Questo è molto utile per effettuare una stima di eventuali interventi efficientamento energetico da attuare in modo da migliorare l'indice di prestazione energetica.

Sebbene la norma preveda un calcolo di tipo quasi stazionario, questo non può fornire un elevato grado di precisione perché viene effettuato su base mensile. Per una stima più precisa dei fabbisogni energetici è necessario effettuare un calcolo più dettagliato che tenga conto di un maggior numero di variabili, attraverso un modello dinamico.

4.2.1 Bilancio termico di un edificio

L'edificio può essere visto come un sistema fisico confinato dall'involucro esterno che si comporta come un sistema termodinamico aperto che opera in regime mediamente stazionario. Applicando il primo principio della termodinamica si può definire un'equazione di bilancio energetico:

$$\dot{Q}_{nd} + \dot{Q}_{sol} + \dot{Q}_{int} + \dot{Q}_{tr} + \dot{Q}_{ve} = C \cdot \frac{dt}{d\tau}$$

Dove:

- \dot{Q}_{nd} : è la potenza fornita dall'impianto all'ambiente confinato, detta anche carico termico
- \dot{Q}_{sol} : è la potenza fornita dagli apporti solari dovuti all'irraggiamento
- \dot{Q}_{int} : è la potenza data dai carichi interni all'edificio (persone, lampade, macchine)
- \dot{Q}_{tr} : è la potenza uscente trasmessa attraverso l'involucro edilizio
- \dot{Q}_{ve} : è la potenza uscente per ventilazione, areazione o infiltrazione

Il termine al secondo membro rappresenta la variazione dell'energia interna dell'edificio nel tempo e tiene conto della capacità termica efficace dell'edificio e della variazione di temperatura interna media durante un dato intervallo di tempo. I flussi dati dalla radiazione solare possono essere calcolati conoscendo l'irraggiamento e le caratteristiche dell'involucro. I flussi dati dai carichi interni possono essere determinati conoscendo l'occupazione dei locali, i corpi illuminanti e altri apparecchi. Le potenze in uscita per trasmissione possono essere esplicitate in funzione della differenza tra la temperatura esterna e la temperatura dell'ambiente interno. Limitandosi soltanto allo scambio di calore sensibile è possibile

esprimere anche la potenza in uscita per ventilazione in funzione della differenza di temperatura tra interno ed esterno (se si volesse considerare anche il flusso di termico dovuto allo scambio latente il modello si complicherebbe, quindi è conveniente effettuare un calcolo dedicato al bilancio di vapore). La temperatura dell'ambiente esterno t_e è data dalle condizioni climatiche, quindi le uniche due variabili dipendenti sono la temperatura dell'ambiente interno t_i e la potenza fornita dall'impianto \dot{Q}_{nd} . Se si fissa la temperatura interna pari al valore desiderato è possibile calcolare la potenza che l'impianto deve fornire al sistema in modo da mantenere costante la temperatura t_i .

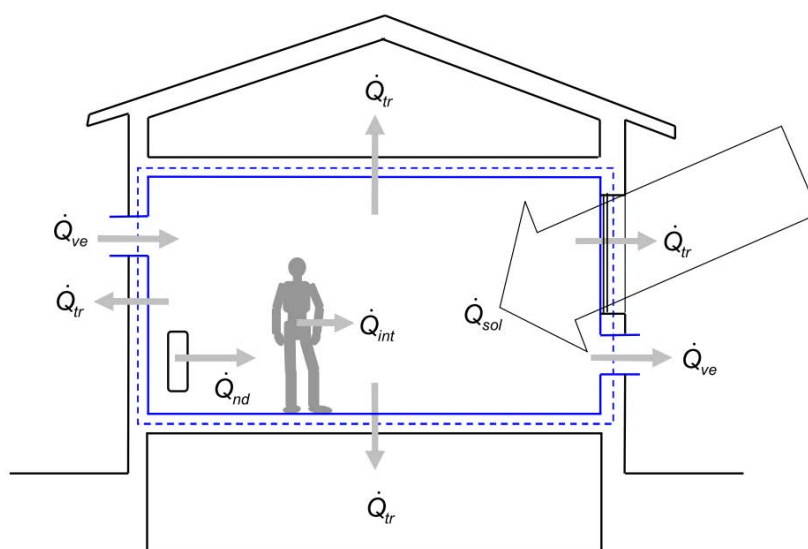


Figura 4.10 - Schema dell'edificio visto come sistema aperto e i termini del bilancio energetico

Per poter effettuare un bilancio dettagliato è necessario definire intervalli temporali sufficientemente piccoli, ad esempio ore o frazioni di ore, e suddividere l'edificio in zone omogenee con proprietà fisiche e condizioni al contorno simili. Per ogni parte in cui si divide l'edificio va definita un'equazione di bilancio termico in cui si considerano i flussi scambiati sia da e verso l'esterno che da e verso le altre parti adiacenti e la variazione di energia interna relativa alla specifica parte. L'insieme delle equazioni definisce un sistema, la cui soluzione restituisce i valori delle temperature e dei flussi termici non noti. È in questo modo possibile valutare la potenza che l'impianto deve fornire per mantenere una determinata temperatura interna fissata. Questo calcolo deve essere ripetuto per ogni intervallo temporale in cui è stato scomposto il periodo di studio.

4.2.2 Dati in ingresso

Una suddivisione dettagliata dell'edificio in varie parti e la definizione di intervalli di tempo orari richiedono una grande quantità di dati in ingresso. La normativa, per semplificare la prassi progettuale, prevede un calcolo su base mensile adottando delle semplificazioni quali la

stazionarietà dei flussi termici, l'assunzione di valori medi mensili di temperatura, irradiazione e altre grandezze climatiche e una valutazione semplificata degli apporti solari e interni. Il modello dinamico permette una valutazione più accurata ma necessita la conoscenza dei valori orari di diverse grandezze climatiche:

- Radiazione solare diretta e diffusa
- Temperatura dell'aria esterna
- Umidità relativa dell'aria esterna
- Temperatura del terreno a una determinata profondità

Inoltre è necessaria la conoscenza dei valori orari del grado di occupazione dei singoli ambienti in modo da poter valutare in maniera dettagliata gli apporti dovuti ai carichi interni di persone, lampade e altri apparecchi.

Solitamente, per i dati climatici sono disponibili i Test Reference Year (TRY) o anno meteorologico tipo di varie località. Il TRY è una sequenza di dati meteorologici orari, realmente misurati, selezionati da una serie storica almeno decennale. Per quanto riguarda le dinamiche interne all'edificio relative ai carichi interni esse vengono definite, a seconda degli orari di occupazione e/o accensione di lampade e altri apparecchi, su base oraria per ogni parte in cui è stato suddiviso il modello edificio.

4.2.3 Risultati della simulazione dinamica

Una volta impostato il modello dell'edificio è possibile effettuare la simulazione dinamica per ottenere i valori orari di:

- Carico termico sensibile che l'impianto deve fornire (per la climatizzazione invernale) o sottrarre (per la climatizzazione estiva) da ciascuna parte in cui è stato suddiviso l'edificio
- Temperatura media dell'aria interna di ciascuna parte in cui è stato suddiviso l'edificio

I risultati ottenuti, essendo anch'essi su base oraria, permettono di inquadrare in maniera molto verosimile la risposta dell'edificio alle diverse condizioni climatiche o ai carichi interni. La creazione di modelli che vadano a simulare interventi di efficientamento energetico permette di valutare con precisione l'efficacia dell'intervento confrontando i risultati ottenuti dai vari modelli.

4.3 CREAZIONE DEL MODELLO IN EDILCLIMA

Per determinare l'indice di prestazione energetica in fase di progetto o di un edificio esistente solitamente si fa ricorso a software di tipo commerciale. In questa sezione viene presentato il software utilizzato e il procedimento seguito per l'impostazione del modello. Si tiene a precisare che l'edificio considerato non è quello allo stato attuale, ma quello ipotizzato nel § 3.4.

4.3.1 Introduzione al software: *Edilclima*

Edilclima è tra le principali software-house a sviluppare programmi di calcolo per la progettazione impiantistica e per la verifica dell'osservanza dei vincoli di legge [12]



Figura 4.11 - Logo di Edilclima

Nello specifico il software utilizzato ai fini del calcolo è *EC700 – Calcolo prestazioni energetiche degli edifici* [13]. Il programma permette di valutare:

- La potenza invernale, per il dimensionamento dell'impianto di riscaldamento secondo la norma UNI EN 12831
- L'energia utile e primaria per il riscaldamento invernale, secondo le specifiche tecniche UNI/TS 11300-1:2014, UNI/TS 11300-2:2014 e UNI/TS 11300-4:2016
- L'energia utile per il raffrescamento estivo, secondo la specifica tecnica UNI/TS 11300-1:2014
- L'energia utile e primaria per la produzione di acqua calda sanitaria, secondo la specifica tecnica UNI/TS 11300-2:2014 e UNI/TS 11300-4:2016
- L'energia primaria per la climatizzazione estiva, secondo la specifica tecnica UNI/TS 11300-3:2010
- L'energia primaria per l'illuminazione artificiale degli ambienti, secondo UNI EN 15193 e UNI/TS 11300-2:2014
- L'energia primaria per la ventilazione meccanica, secondo UNI/TS 11300-2:2014
- L'energia primaria per il trasporto dovuta ad ascensori e scale mobili, secondo UNI/TS 11300-6:2016
- L'energia primaria e quota di energia da fonti rinnovabili, secondo UNI/TS 11300-5:2016

I principali step per la creazione del modello nel software prevedono:

- Scelta della tipologia di calcolo e impostazione della località
- Definizione dei componenti dell'involucro
- Definizione dei volumi climatizzati e non e delle superfici disperdenti e non attraverso la creazione, mediante un input grafico, della geometria dell'edificio
- Suddivisione in zone termiche e locali secondo la destinazione d'uso
- Definizione degli impianti

Di seguito viene riportato il percorso seguito per la creazione del modello dell'edificio relativo al caso studio in esame.

4.3.2 Dati generali

Nella sezione dati generali si definiscono le informazioni relative al tipo di calcolo e ai dati climatici, che dipendono dalla localizzazione geografica.

4.3.2.1 Dati progetto

Si definisce la destinazione d'uso dell'edificio come E.2, adibito a uffici o assimilabili. Si imposta la tipologia di calcolo per il calcolo regolamentare per le valutazioni di tipo A1 e A2. Questo tipo di calcolo blocca certi parametri secondo le condizioni standard definite dalla norma.

4.3.2.2 Dati climatici

Fabriano non dispone di dati climatici e generalmente le località di riferimento sono fornite dalla norma UNI 10349. Per località differenti si procede per interpolazione lineare secondo le coordinate geografiche di latitudine e longitudine e in più si tiene conto di un fattore correttivo che considera l'altitudine. La stazione di riferimento in questo caso è quella di Camerino. La definizione della località con i gradi giorno determina la zona climatica e quindi il periodo di riscaldamento, in questo caso per la zona E è prevista una durata di accensione compresa tra il 15 ottobre e il 15 aprile.

4.3.2.3 Regime normativo

Prevede la scelta del regolamento di legge da applicare e opzioni di calcolo del lavoro.

4.3.2.4 Dati di default

Temperature interne, sono definite dalla norma secondo la destinazione d'uso pari a 20°C per la climatizzazione invernale e 26°C per la climatizzazione estiva. Fattori di conversione in energia primaria definiti sempre dalla norma.

4.3.3 Componenti involucro

In questa sezione vengono definiti tutti i componenti dell'involucro dell'edificio secondo la seguente classificazione:

- Muri
- Pavimenti
- Soffitti
- Ponti termici
- Componenti finestrati

Per ogni componente dell'involucro è necessario definirne la stratigrafia e la tipologia.

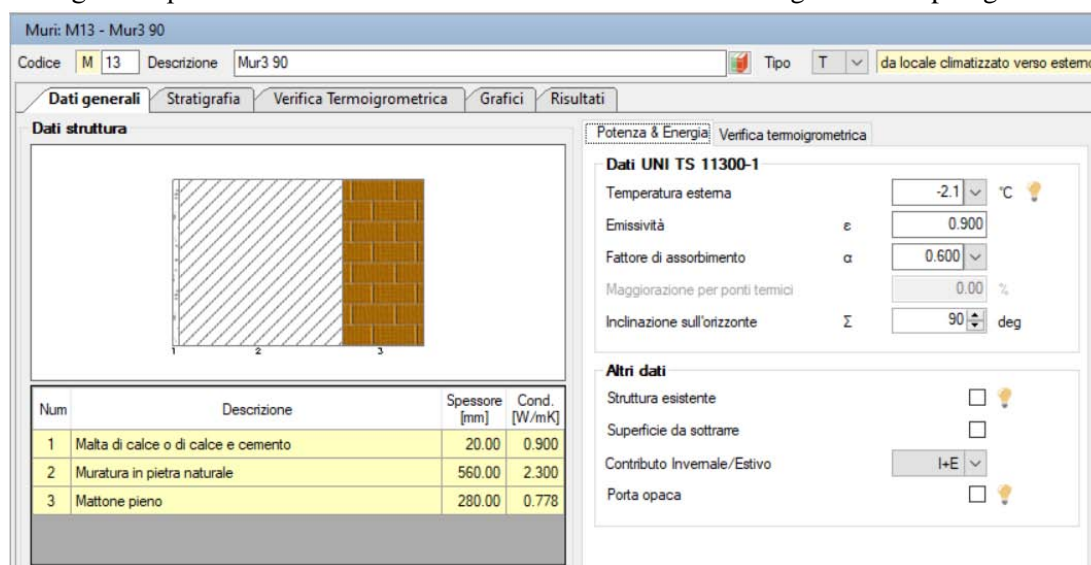


Figura 4.12 - Schermata del programma che mostra la definizione di una tipologia muraria

I componenti dell'involucro sono stati definiti secondo quanto ipotizzato per l'edificio allo stato precedente alla ristrutturazione.

4.3.4 Input grafico

Attraverso l'input grafico è possibile definire la geometria dell'edificio per ogni livello impostando come confini i vari componenti dell'involucro.



Figura 4.13 - Schermata di visualizzazione dell'input grafico. Primo piano dell'edificio

Oltre al disegno in pianta con le tipologie murarie vengono definiti il pavimento e il soffitto del livello o del particolare locale, la quota del pavimento e l'altezza interpiano. Per ogni contorno chiuso viene definito un locale, da assegnare a una delle zone termiche definite, e il programma calcola in automatico superficie in pianta e volume climatizzato. Occorre inoltre definire le informazioni relative alla temperatura interna, al ricambio d'aria interno a seconda della destinazione d'uso e alla potenza installata per l'illuminazione.

L'input grafico permette anche di raffigurare l'edificio in una vista tridimensionale. Come si può osservare in Figura 4.13 e Figura 4.14 il software prevede anche di poter definire gli ostacoli nei pressi dell'edificio per il calcolo analitico degli ombreggiamenti.

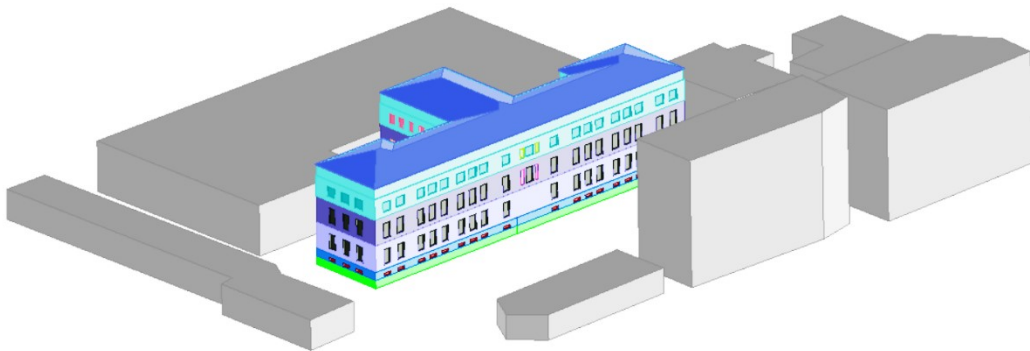


Figura 4.14 - Vista 3D dell'intero edificio con edifici vicini

È necessario esportare le zone termiche e i locali definiti all'interno dell'input grafico per poter generare il modello numerico

4.3.5 Zone/locali climatizzati

La sezione permette di visualizzare le zone climatizzate e i relativi locali creati ed esportati tramite l'input grafico. È possibile modificare eventuali dati in questa sezione o aggiungere

delle zone che non sono state create graficamente. Nel caso di calcolo analitico delle zone non climatizzate è disponibile anche la sezione dedicata ad esse. Di seguito si riportano le zone e i locali climatizzati definiti nel modello.

Tabella 4.1 - Riepilogo zone termiche climatizzate

Nr.	Descrizione	Sup. netta [m ²]	Vol. lordo [m ³]	Sup. lorda [m ²]
1	Uffici 1 (sud)	533.42	3353.58	931.57
2	Uffici 2 (nord)	538.02	3376.00	935.60
3	Bagni Sud	55.99	390.19	218.87
4	Corridoi	969.95	5617.89	1352.16
5	Bagni Nord	55.19	382.92	209.65
6	Bagni Est	89.03	550.21	254.98
7	Uffici 3 (est)	214.13	1369.94	421.47
8	Uffici 4 (centrali)	115.02	708.50	88.56
9	Uffici polizia sud	340.79	1651.73	672.67
10	Uffici polizia est	156.92	770.78	339.31
11	Giudice pace	109.24	521.21	191.35
12	Agenzia Entrate	188.11	920.64	404.30

Sono state definite anche 4 zone non climatizzate, 3 tre per il seminterrato e una per il sottotetto, in modo da definire il coefficiente di energia dispersa per trasmissione e ventilazione dai locali climatizzati a quelli non climatizzati. I valori del coefficiente $b_{tr,u}$ per ogni locale non climatizzato sono i seguenti:

- Archivio 1: 0.40
- Archivio 2: 0.42
- Archivio 3: 0.32
- Sottotetto: 1.00

La suddivisione delle zone termiche è stata fatta considerando orientazione, destinazione d'uso, comportamento degli occupanti, strategie di controllo, modalità di riscaldamento, temperature di riscaldamento dei singoli locali.

- Zona 1: Uffici 1 (sud)
- La zona 1 comprende i locali dell'ala Sud del piano rialzato e del primo piano del corpo principale dell'edificio; sono tutti destinati ad uso ufficio, con l'eccezione di un piccolo locale al piano rialzato che viene destinato come ripostiglio.
- Zona 2: Uffici 2 (nord)
- La zona 2 comprende i locali dell'ala Nord del piano rialzato e del primo piano del corpo principale dell'edificio; è l'equivalente simmetrico della zona 1.
- Zona 3: Bagni Sud
- La zona 3 comprende i bagni dell'ala Sud del piano rialzato, primo piano e secondo piano del corpo principale dell'edificio.
- Zona 4: Corridoi
- La zona 4 comprende il corridoio e il vano scale del piano rialzato, del primo piano e del secondo piano.

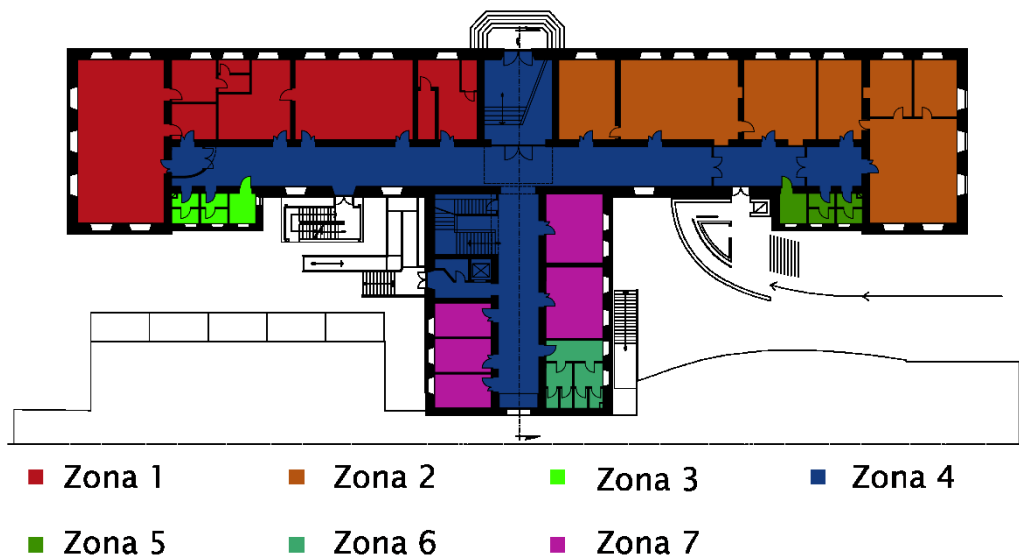


Figura 4.15 - Suddivisione del piano rialzato in zone termiche

- Zona 5: Bagni Nord
- La zona 5 comprende i bagni dell'ala Sud del piano rialzato, primo piano e secondo piano del corpo principale dell'edificio; è l'equivalente simmetrico della zona 3.
- Zona 6: Bagni Est
- La zona 6 comprende i bagni dell'ala Est del piano rialzato, primo piano e secondo piano.
- Zona 7: Uffici 3 (Est)
- La zona 7 comprende i locali dell'ala Sud del piano rialzato e del primo piano del corpo principale dell'edificio; sono tutti destinati ad uso ufficio.
- Zona 8: Uffici 4 (Centrali)
- La zona 8 comprende i locali centrali del primo piano che danno sul viale principale.

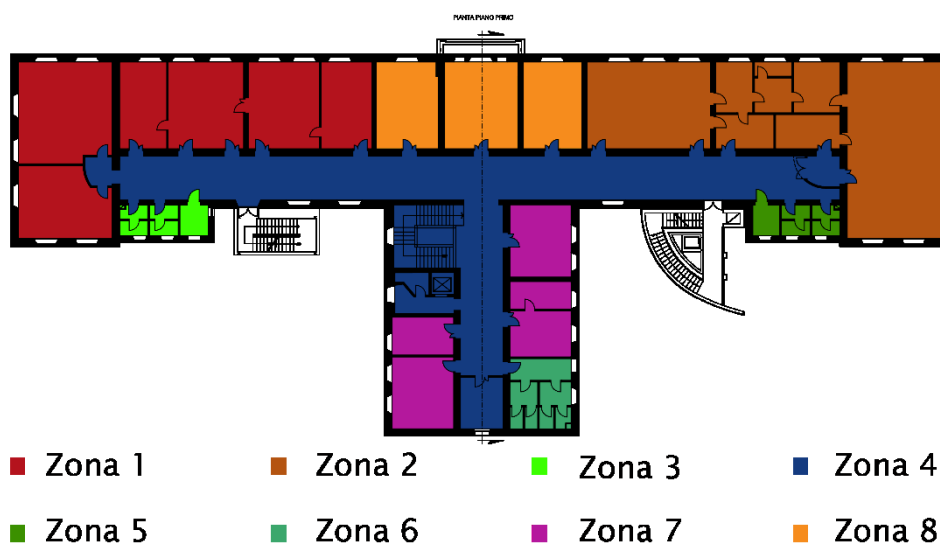


Figura 4.16 - Suddivisione del primo piano in zone termiche

- Zona 9: Uffici polizia Sud
- La zona 9 comprende i locali dell'ala Sud del secondo piano, attualmente non utilizzati ma definiti come ad uso ufficio.
- Zona 10: Uffici polizia Est
- La zona 10 comprende i locali dell'ala Est del secondo piano, anch'essi attualmente non occupati ma definiti ad uso ufficio.
- Zona 11: Giudice di pace

- La zona 11 comprende i due locali al secondo piano occupati dagli uffici del Giudice di pace.
- Zona 12: Agenzia delle Entrate
- La zona 12 comprende i locali dell'ala Nord al secondo piano occupati dagli uffici dell'Agenzia delle entrate e dalla sala d'attesa.

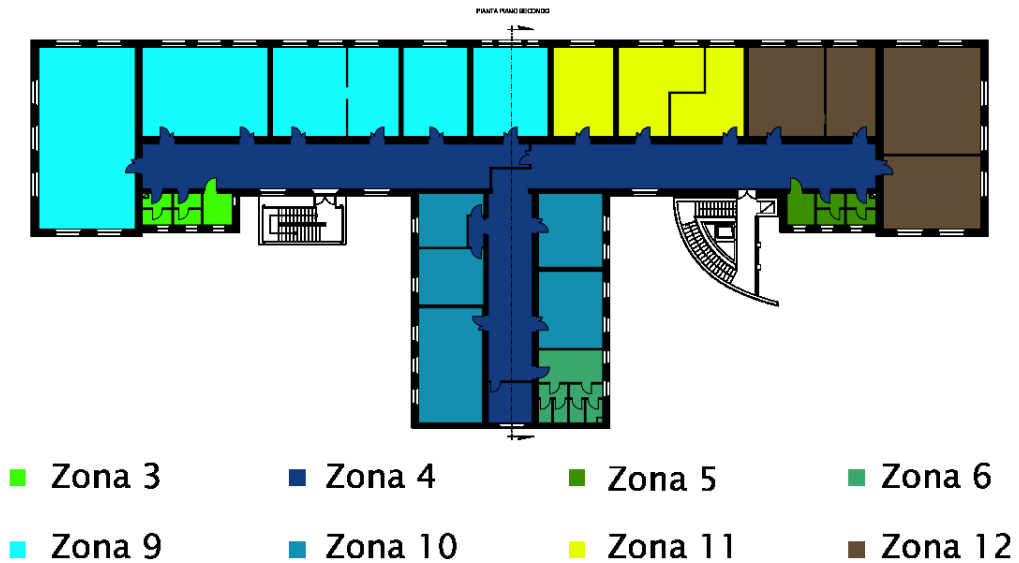


Figura 4.17 - Suddivisione del piano rialzato in zone termiche

4.3.6 Impianti

La sezione dedicata agli impianti permette di definire i sistemi di impianto di cui è dotato l'edificio. C'è la possibilità di definire i seguenti tipi di impianti:

- Impianto di riscaldamento
- Impianto di ventilazione
- Impianto di acqua calda
- Impianto di raffrescamento
- Pannelli solari termici
- Pannelli fotovoltaici.

Nella creazione del modello sono stati definiti soltanto l'impianto di riscaldamento centralizzato e l'impianto per la produzione di acqua calda sanitaria, combinato con il riscaldamento.

4.3.6.1 Impianto di riscaldamento

Il regime di funzionamento, secondo il calcolo regolamentare per una valutazione di tipo A2, è continuo. La valutazione dei rendimenti di emissione, regolazione e distribuzione dipende dai tipi di impianti presenti.

- Emissione: radiatori su parete esterna non isolata con temperatura di mandata di progetto di 80°C. Il rendimento è pari a 89.3%
- Regolazione: di tipo manuale, con solo termostato di caldaia
- Distribuzione: impianto centralizzato con montanti non isolati correnti nel lato interno delle pareti esterne. Il rendimento è pari a 91.9%. Per il calcolo del fabbisogno elettrico degli ausiliari per l'impianto di distributore si stima una potenza del circolatore di 1300 W

Non si studia l'accumulo in quanto non ipotizzato nel modello, mentre per quanto riguarda la generazione si considera una caldaia tradizionale a gas naturale:

- Potenza utile nominale: 500 kW
- Potenza a carico intermedio: 150 kW
- Rendimento a potenza nominale: 89.2%
- Rendimento a carico intermedio: 87.8%

Per il calcolo del fabbisogno elettrico degli ausiliari per l'impianto di distributore si stima una potenza del circolatore di 114 W.

4.3.6.2 Impianto di produzione di ACS

Il calcolo del fabbisogno di energia per la produzione di acqua calda sanitaria viene fatto secondo la norma e dipende dalla destinazione d'uso di ogni locale. Sono fissati quindi la temperatura di erogazione pari a 40°C e il fabbisogno giornaliero. Il rendimento di erogazione viene considerato pari a 1, mentre per il rendimento di distribuzione si considera il sistema installato prima dell'entrata in vigore della legge 373/76.

4.3.7 Risultati fabbricato e energia primaria

La sezione dei risultati permette di analizzare nel dettaglio i risultati ottenuti per l'interno edificio o per le singole zone termiche. Non si riporta quanto ottenuto dal calcolo in questo paragrafo, poiché c'è un intero capitolo dedicato all'analisi dei risultati

4.4 CREAZIONE DEL MODELLO IN TRNSYS

Come già spiegato nei paragrafi precedenti, un calcolo di tipo dinamico permette di ottenere un quadro più dettagliato e preciso del comportamento dell'edificio. Per la determinazione del fabbisogno di energia termica (solo sensibile) per la climatizzazione estiva e invernale è stato creato un modello dinamico attraverso l'uso del software *TRNSYS*. In questa sezione viene presentato il software utilizzato e il procedimento seguito per l'impostazione del modello. Anche in questo caso il modello si basa sull'edificio riportato alle condizioni precedenti ai lavori di ristrutturazione del 1999.

4.4.1 Introduzione al software: TRNSYS

TRNSYS è un ambiente software basato su grafici estremamente flessibile utilizzato per simulare il comportamento dei sistemi transitori. Viene utilizzato in molte applicazioni ingegneristiche perché molto affidabile e versatile.



Figura 4.18 – Logo di TRNSYS

Il software ha una struttura di tipo modulare e una grande possibilità di personalizzazione dei progetti. Il software prevede l'utilizzo di una serie di moduli preinstallati chiamati "Type" messi in collegamento tra di loro a seconda dell'obiettivo del progetto.

La versione più recente del software è la numero 18, ma per eseguire lo studio del caso in esame è stata utilizzata la numero 16.

4.4.2 Impostazione del modello

Lo sviluppo del modello per la stima del fabbisogno del caso studio in esame può essere distinto in due fasi differenti:

- Creazione del modello dell'edificio multi-zona tramite l'utilizzo di TRNBUILD. Esso è un'interfaccia grafica che permette di definire i parametri della Type 56 da utilizzare nella simulazione, vista la complessità dei parametri degli edifici multi-zona
- Dati generali edificio:
- Definizione delle strutture opache
- Definizione delle strutture trasparenti
- Definizione dai ricambi d'aria dovuto ad areazione e ventilazione

- Definizione delle temperature di set point
- Definizione dei carichi interni
- Suddivisione dell'edificio in zone termiche e definizione per ogni zona di:
- Superfici opache e trasparenti e relativa orientazione/zona confinante/muri interni
- Volume climatizzato
- Infiltrazione e ventilazione
- Riscaldamento e raffrescamento
- Carichi interni (luci, occupazione, eventuali apparecchi elettrici)
- Creazione del modello dinamico tramite l'utilizzo di Simulation Studio, attraverso il collegamento della Type dell'edificio definita in TRNBUILD con altre Type di input definite dall'utente (dati climatici, temperature di riscaldamento, occupazione dei locali, ecc.).

4.4.3 Definizione dati generali modello

Prima di effettuare la suddivisione in zone termiche vengono definiti i dati generali dell'edificio relativi all'involucro, alle temperature di set point, alla ventilazione e ai carichi interni.

4.4.3.1 Componenti opachi involucro

Per definire i componenti dell'involucro sono stati immessi manualmente i dati di conduttività, densità e capacità di tutti i materiali di cui sono costituiti i singoli componenti.

Tabella 4.2 - Materiali costruttivi e loro proprietà termiche e fisiche

MATERIALE	λ [kJ/kg·K]	ρ [kg/m ³]	c [kJ/kg·K]
Blocchi pietra	8.28	2500	0.84
Calcestruzzo	5.76	1800	0.21
Intonaco	3.24	1800	0.91
Laterizio Forato	1.55	620	0.92
Massetto	4.18	2000	0.88
Mattoni pieni	2.59	1800	0.92
Pavimento	3.60	2300	0.80
Tavolato	0.72	600	0.60

I componenti opachi dell'involucro inseriti nel modello sono quelli riportati anche nelle tabelle 3.1 e 3.2. Essi sono definiti dai materiali di cui sono costituiti e dal loro relativo spessore. Di seguito si riportano i componenti e le proprietà fisiche.

- MUR1-A

Tabella 4.3 - Stratigrafia della tipologia muraria MUR1-A

MUR1-A	Spessore [m]
Intonaco	0.02
Blocchi pietra	0.23 – 0.38 – 0.53 – 0.68
Intonaco	0.02

Lo strato di blocchi di pietra è variabile poiché ci sono 4 diversi spessori per la tipologia muraria MUR1-A. Il valore di trasmittanza vale 1.94, 2.63, 2.25, 3.18 W/m²·K rispettivamente per i muri di spessore 80, 65, 50, 35 cm. Essendo una tipologia muraria interna il coefficiente convettivo di scambio termico è uguale per entrambi i lati e si considera pari a 3.05 W/m²·K.

- MUR1-B

Tabella 4.4 - Stratigrafia della tipologia muraria MUR1-B

MUR1-B	Spessore [m]
Intonaco	0.02
Blocchi pietra	0.44 – 0.94
Intonaco	0.02

Lo strato di blocchi di pietra è variabile poiché ci sono 3 diversi spessori per la tipologia muraria MUR1-B. Il valore di trasmittanza vale 2.47, 2.23, 1.61 W/m²·K rispettivamente per i muri di spessore 50, 60, 100 cm. Il coefficiente convettivo di scambio termico lato interno vale 3.05 W/m²·K, lato esterno vale 17.78 W/m²·K.

- MUR2

Tabella 4.5 - Stratigrafia della tipologia muraria MUR2

MUR2	Spessore [m]
Intonaco	0.02
Mattoni pieni	0.12 – 0.23
Intonaco	0.02

Il valore di trasmittanza vale 2.62, 1.87 W/m²·K rispettivamente per i muri di 20 e 35 cm.

- MUR3

Tabella 4.6 - Stratigrafia della tipologia muraria MUR3

MUR3	Spessore [m]
Mattoni pieni	0.24
Blocchi pietra	0.20 – 0.30 – 0.45 – 0.59
Intonaco	0.02

Il valore di trasmittanza vale 1.63, 1.52, 1.38, 1.28 W/m²·K rispettivamente per i muri di 50, 60, 75, 90 cm. Tipologia di muro esterno, coefficienti di scambio termico convettivo pari a 3.05 W/m²·K lato interno, 17.78 W/m²·K lato esterno.

- SOL0

Tabella 4.7 - Stratigrafia dell solaio su terra

SOL0	Spessore [m]
Blocchi pietra	0.50
Masseto	0.10
Pavimento	0.01

Il valore di trasmittanza è pari a 2.07 W/m²·K.

- SOL1

Tabella 4.8 - Stratigrafia della tipologia di solaio SOL1

SOL1	Spessore [m]
Laterizio forato	0.06
Calcestruzzo	0.04
Masseto	0.08
Pavimento	0.02

Il valore di trasmittanza è pari a 2.36 W/m²·K.

- SOL3

Tabella 4.9 - Stratigrafia della tipologia di solaio SOL3

SOL3	Spessore [m]
Calcestruzzo	0.10
Masseto	0.08
Pavimento	0.02

Il valore di trasmittanza è pari a $3.11 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$.

- SOL4

Tabella 4.10 - Stratigrafia della tipologia di solaio SOL4

SOL4	Spessore [m]
Tavolato	0.04

Il valore di trasmittanza è pari a $2.70 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$.

- TETTO

Tabella 4.11 - Stratigrafia del tetto

TETTO	Spessore [m]
Laterizio forato	0.05
Tavolato	0.20

Il valore di trasmittanza è pari a $0.77 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$.

Si può notare che sono state effettuate delle semplificazioni nella definizione della stratigrafia dei componenti dell'involucro, tenendo conto dei principali materiali che determinano le proprietà termiche delle strutture.

4.4.3.2 Componenti vetrati involucro

I componenti finestrati sono stati definiti tenendo conto del rapporto tra la superficie del telaio e la superficie totale del serramento. Sono state considerati vetri singoli con le proprietà definite dalla libreria di TRNSYS e telaio metallico con trasmittanza pari a $7 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$. I coefficienti convettivi di scambio termico, come per le superfici opache, sono stati posti pari a $3.05 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ lato interno e $17.78 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ lato esterno.

4.4.3.3 Ventilazione e infiltrazione

Per quanto riguarda il ricambio d'aria all'interno dell'edificio sono stati definiti:

- Infiltrazione base, pari a un ricambio orario di 0.15 volumi/h. Questo è costante per tutto il periodo della simulazione
- Ventilazione data dall'areazione dei locali, pari a un ricambio orario di 0.25 volumi/h attivo soltanto per il tempo di occupazione dei locali e nullo nei periodi in cui i locali sono chiusi. Il controllo sulla ventilazione avviene tramite uno scheduling inserito nei dati di input nel modello dinamico in *Simulation studio*.

4.4.3.4 Riscaldamento e raffrescamento

La temperatura di set point per il riscaldamento è stata posta pari a 20°C per gli orari di occupazione e 16°C per il tempo restante. Sono stati definiti due diversi controlli al riscaldamento poiché gli uffici al secondo piano hanno degli orari diversi rispetto agli altri. Anche in questo caso il controllo di accendimento e spegnimento avviene tramite uno scheduling apposito. La potenza disponibile viene ipotizzata illimitata per permettere al modello di raggiungere subito le condizioni di temperatura interna desiderata e calcolare in maniera precisa il fabbisogno.

Per quanto riguarda la climatizzazione estiva si è fissata una temperatura di set point pari a 26°C per gli orari di occupazione e a 30°C per gli altri orari. Come per il riscaldamento sono stati previsti due diversi scheduling per il controllo sull'accensione.

4.4.3.5 Guadagni interni

È stato definito il carico termico generato dalle postazioni computer, in parte di tipo radiativo pari a 30 W e in parte convettivo pari a 120 W. I carichi interni generati dalle persone sono già presenti nelle librerie e vengono impostati nelle singole zone termiche. Il carico termico dato dalle lampade si stima pari a 10 W/m².

4.4.3.6 Input

Si sono definiti diversi input esterni da collegare alla type dell'edificio multi-zona all'interno di *Simulation Studio*. Gli input esterni servono per il controllo sull'attivazione di riscaldamento, raffrescamento, ventilazione, illuminazione, occupazione. I file per i dati di input sono stati creati esternamente mediante l'utilizzo di *MATLAB*. Una descrizione più dettagliata degli scheduling di input si rimanda ai parametri successivi.

4.4.4 Definizione delle zone termiche

Una suddivisione corretta delle zone termiche è fondamentale per ottenere dei risultati accurati. La definizione delle zone termiche deve essere fatta accorpando locali con caratteristiche simili di esposizione solare, occupazione, temperature di climatizzazione, ecc.

Si è cercato di suddividere l'edificio in maniera simile a quella fatta per il modello quasi stazionario, considerando però un numero maggiore di zone per aumentare il grado di dettaglio. Le zone termiche definite sono riportate nella tabella seguente:

Tabella 4.12 - Zone termiche definite nel modello

Zona	Destinazione d'uso	V climatizzato [m ³]	A pianta [m ²]
1	Archivi polizia	1 191.90	474.86
2	Archivi polizia	823.54	256.55
3	Archivi polizia	1 191.90	474.86
4	Corridoio	3 010.07	631.47
5	Uffici	828.96	208.54
6	Uffici	1 118.55	281.40
7	Uffici	1 117.46	281.12
8	Uffici	816.77	205.48
9	Bagni	203.00	54.09
10	Bagni	205.87	54.85
11	Uffici	476.29	119.82
12	Uffici	342.19	86.09
13	Bagni	315.98	84.19
14	Uffici	470.60	119.14
15	Corridoio	328.99	99.39
16	Uffici Agenzia entrate	479.44	144.85
17	Sala attesa	152.00	45.92
18	Giudice di pace	364.81	110.21
19	Corridoio	593.48	179.30
20	Uffici Polizia	774.88	234.10
21	Uffici Polizia	374.04	113.00
22	Uffici Polizia	212.23	64.12
23	Uffici Polizia	317.39	95.89
24	Sottotetto	559.98	370.12
25	Sottotetto	746.24	464.86
26	Sottotetto	559.98	370.12

Per ogni zona termica è necessario definire le superfici disperdenti verso l'esterno, verso le zone adiacenti e le superfici dei muri interni alla zona termica stessa. È inoltre necessario definire il tipo di infiltrazione, ventilazione, riscaldamento, raffrescamento, guadagni termici interni. Si riassumono di seguito le caratteristiche delle zone termiche in base alla destinazione d'uso.

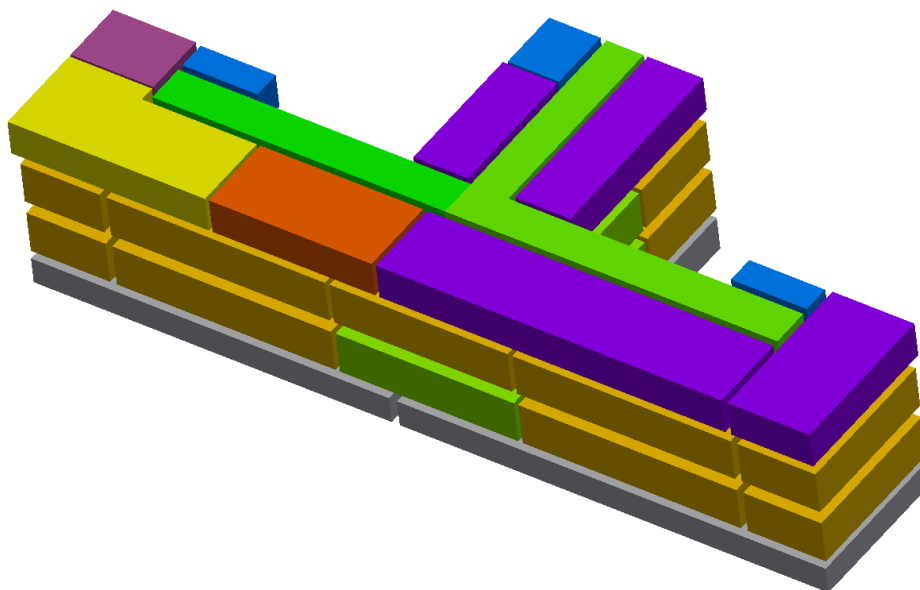


Figura 4.19 - Vista tridimensionale dell'edificio e divisione delle zone termiche secondo la destinazione d'uso

4.4.4.1 Archivi polizia

Il seminterrato è stato suddiviso in 3 differenti zone, con la destinazione ad archivio.

- Solo infiltrazione base, nessun ricambio d'aria per ventilazione
- Riscaldamento e raffrescamento assenti
- Guadagni: soltanto luci 5 W/m^2 , fattore di scala 0.2

Riferimento colore in Figura 4.19: grigio.

4.4.4.2 Corridoio

Sono state definite 3 zone termiche per il corridoio; una per il corridoio del piano rialzato e del primo piano e le scale interne, una per il corridoio degli uffici al secondo con orario mattutino (Agenzia Entrate, Giudice di pace) e una per il corridoio della zona attualmente non occupata del secondo piano, destinata alla Polizia di Stato.

- Infiltrazione base e areazione

- Riscaldamento e raffrescamento attivi secondo gli input
- Guadagni: luci 5 W/m², persone 1/3 secondo gli orari

Riferimento colore in Figura 4.19: verde.

4.4.4.3 Uffici

Tutti i locali del piano rialzato e del primo piano, ad eccezione dei servizi, sono stati definiti ad uso ufficio per un totale di 7 zone termiche. Dove possibile si è cercato di inglobare all'interno della stessa zona termica i locali situati uno sopra l'altro con lo stesso tipo di orientazione.

- Infiltrazione base e areazione
- Riscaldamento e raffrescamento attivi negli orari di apertura
- Guadagni: luci 10 W/m², persone 1 px/15 m², 1 postazione pc a persona

Riferimento colore in Figura 4.19: arancione chiaro.

4.4.4.4 Bagni

Le zone termiche destinate ai servizi sono 3, anche in questo caso esse sono state definite in verticale considerando i bagni di piano rialzato, primo e secondo piano appartenenti alla stessa ala dell'edificio.

- Infiltrazione base e areazione
- Solo riscaldamento attivo negli orari di apertura, no raffrescamento
- Guadagni: luci 5 W/m², persone come uffici con fattore di scala 0.2

Riferimento colore in Figura 4.19: azzurro.

4.4.4.5 Uffici Agenzia entrate

Locali dell'ala Nord del secondo piano, hanno orario solo mattutino quindi uno scheduling di input dedicato.

- Infiltrazione base e areazione
- Riscaldamento e raffrescamento attivi negli orari di apertura
- Guadagni: come uffici, ma con orario mattutino

Riferimento colore in Figura 4.19: giallo.

4.4.4.6 Sala d’attesa

Locale con condizioni particolari dovute all’eventuale affollamento.

- Infiltrazione base e areazione
- Riscaldamento e raffrescamento attivi negli orari di apertura
- Guadagni: luci 10 W/m², persone mediamente 3 negli orari di apertura

Riferimento colore in Figura 4.19: violetto.

4.4.4.7 Giudice di pace

Sostanzialmente come gli uffici dell’Agenzia delle entrate, però è stata definita una zona a sé vista l’orientazione diversa.

Riferimento colore in Figura 4.19: arancione scuro.

4.4.4.8 Uffici Polizia

Locali dell’ala Sud e Est del secondo piano. Sono stati definiti come gli uffici ai piani rialzato e primo non avendo a disposizione informazioni più dettagliate.

Riferimento colore in Figura 4.19: viola.

4.4.4.9 Sottotetto

Sono state definite 3 zone termiche per il sottotetto, anche se è un ambiente non climatizzato e non occupato, per ottenere una simulazione più precisa. Solo infiltrazione e ventilazione. Non rappresentato in Figura 4.19.

4.4.5 Definizione degli input

Gli input necessari alla simulazione dinamica sono i dati climatici, la temperatura del terreno, gli orari di funzionamento degli impianti di riscaldamento e raffrescamento, gli orari di occupazione degli uffici e accensione luci. Il file di input è composto da una sequenza di 0 e 1 ad indicare la presenza/accensione o assenza/spengimento per un totale di valori pari al numero di ore in un anno (8760). Per definire i file è stata impostata una giornata tipo e poi ripetuta secondo una certa sequenza considerando anche eventuali chiusure stagionali.

4.4.5.1 Dati climatici

Per l’inserimento dei dati climatici è stato usato il Test Reference Year di Perugia essendo la località disponibile più vicina. Il file climatico è stato scaricato dal sito di Energyplus [14] e comprende i dati orari relativi a:

- Temperatura di bulbo secco

- Umidità relativa
- Temperatura di bulbo bagnato
- Radiazione diffusa sul piano orizzontale
- Radiazione globale sul piano orizzontale
- Radiazione normale diretta

4.4.5.2 Temperatura del terreno

Per il calcolo della temperatura del terreno è stata utilizzata l'equazione analitica di diffusione del calore di un piano semi infinito dovuto a una sollecitazione sinusoidale di temperatura [15]

$$T_g(D, t) = T_m - \Delta T \cdot e^{-D \sqrt{\frac{\pi}{\alpha_g \tau}}} \cdot \cos \left[\frac{2\pi}{\tau} \cdot \left(t - t_{T_{min}} - \frac{D}{2} \sqrt{\frac{\tau}{\pi \cdot \alpha_g}} \right) \right]$$

Dove:

- $T_g(D, t)$: è la temperatura del terreno alla profondità D dopo t giorni dal primo giorno di gennaio [°C];
- T_m : è la temperatura media annuale dell'aria esterna della località, pari a 12.88 °C
- ΔT : è l'ampiezza di oscillazione annuale della temperatura, pari a 20 °C
- $t_{T_{min}}$: è il numero del giorno, riportato in ore, corrispondente alla temperatura minima del terreno. Il riferimento è il 30 gennaio, che corrisponde a 720 h [h]
- D : è la profondità [m], considerata pari a 2 m
- α_g : è la diffusività termica oraria equivalente del terreno, definita dal rapporto tra la conduttività termica del terreno λ_g , pari a 1.5 W/(m·K), e la sua capacità termica c_g , pari a 2000 kJ/(m³·K). Ne consegue α_g uguale a 0.0027 m²/h
- τ : è l'intervallo di tempo considerato, pari a 8760 h

La stima della temperatura del terreno è un'approssimazione che tiene conto soltanto della temperatura media della località, della differenza di temperatura massima e minima registrate nell'anno tipo e della diffusività termica del terreno. In Figura 4.20 è rappresentato graficamente il profilo di temperatura del terreno alla profondità di 2 m, utilizzato come dato di input nel modello.

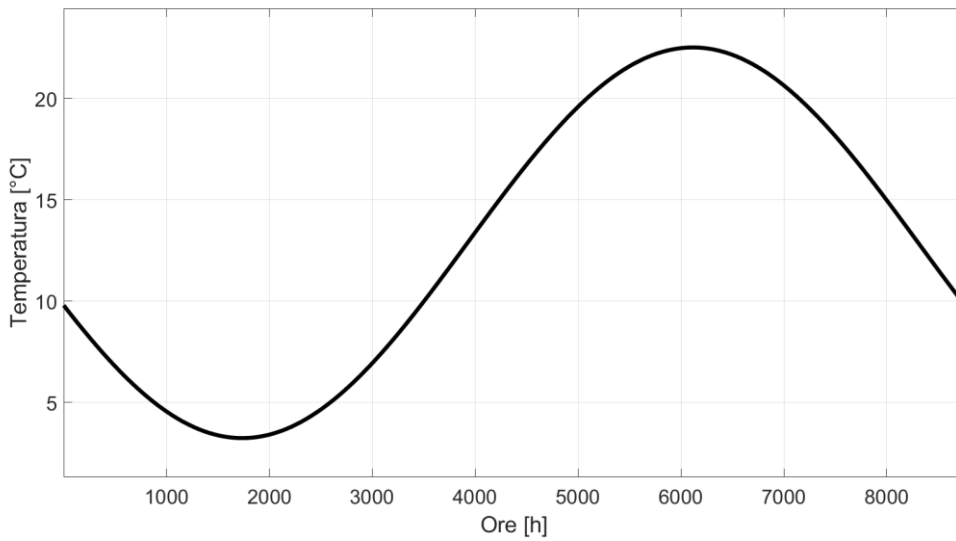


Figura 4.20 - Andamento della temperatura del terreno adottato nel modello

4.4.5.3 Riscaldamento

La regolazione dell'accensione sull'impianto di riscaldamento è fatta attraverso il controllo della temperatura di set point secondo la relazione:

$$T_{risc} = 15 + 5 \cdot risc \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Dove la voce *risc* è il file di input del profilo orario di accensione o spegnimento del riscaldamento. L'accensione dell'impianto avviene dalle 8:00 alle 19:00 per tutti i giorni dal lunedì al venerdì, in cui la temperatura di set point è pari a 20°C. Per le ore notturne e per tutto il sabato e la domenica l'impianto entra in funzione solo per mantenere una temperatura minima nei locali di 15°C.

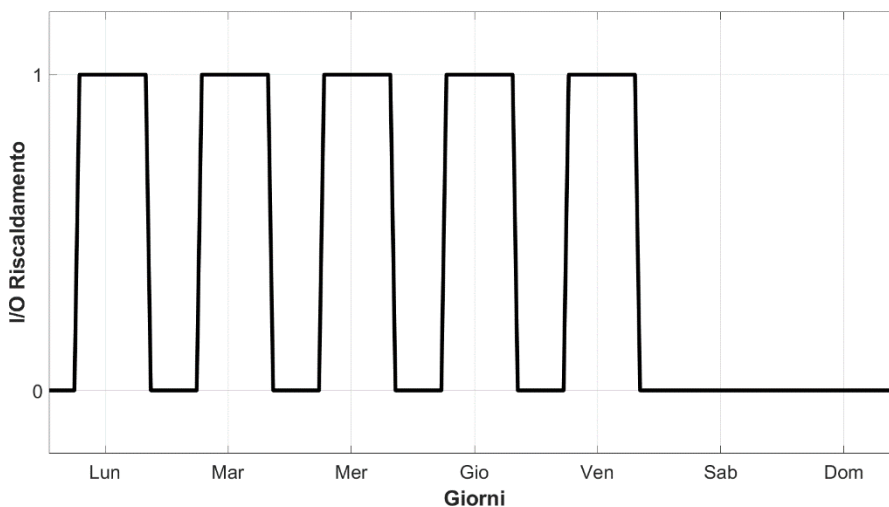


Figura 4.21 - Profilo orario settimanale dell'accensione dell'impianto di riscaldamento

Il profilo settimanale è ripetuto per tutta la stagione di accensione del riscaldamento, tenendo conto di due settimane di pausa nel periodo di fine e inizio anno. È quindi ripetuto dal 7 gennaio al 15 aprile e dal 15 ottobre al 23 dicembre.

È stato creato anche un profilo orario soltanto per le zone termiche dedicate ai locali del secondo piano del Giudice di pace e dell’Agenzia delle entrate con orario di accensione dalle 8:00 alle 13:00, sempre dal lunedì al venerdì.

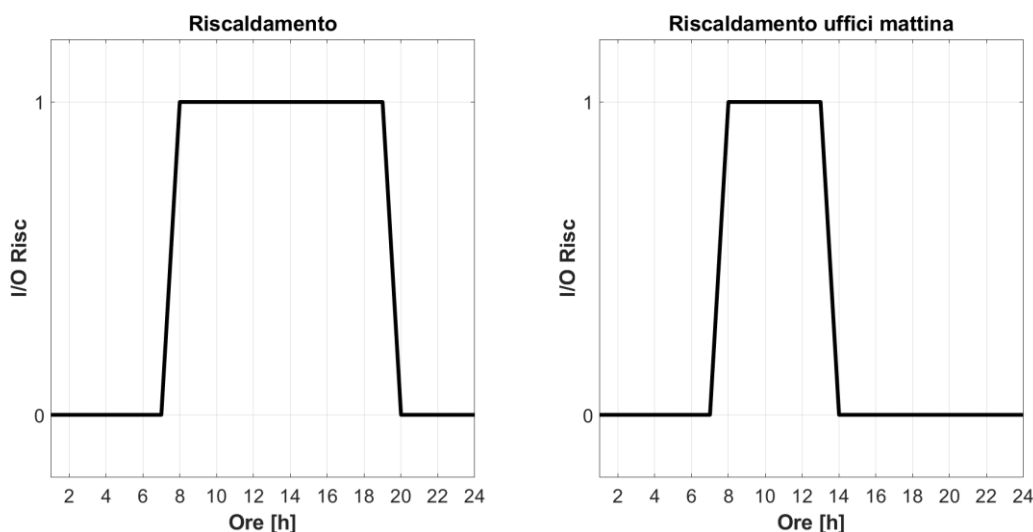


Figura 4.22 - Profili orari giornalieri per il riscaldamento nell'intero edificio e nelle zone con orario mattutino

4.4.5.4 Raffrescamento

La regolazione sul raffrescamento estivo viene effettuata allo stesso modo di quella per il riscaldamento impostando una temperatura di set point secondo la relazione:

$$T_{raffr} = 32 - 6 \cdot raffr \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Il termine *raffr* è dato dal file di input del profilo orario di accensione o spegnimento del raffrescamento. I profili orari settimanali sono sempre due e sono uguali a quelli del riscaldamento con la differenza che si considera una stagione di accensione che va dal 15 maggio al 15 settembre, tenendo conto di due settimane in cui l’edificio non è occupato tra l’8 e il 22 agosto.

4.4.5.5 Uffici

La regolazione sull’accensione di luci, sull’occupazione delle persone e sul carico interno delle postazioni PC avviene attraverso un file di input unico che come per il riscaldamento e il raffrescamento è composto da una serie di 1 e 0 a regolare la presenza/accensione o spegnimento. Sono previsti due diversi profili orari: il primo per l’intero edificio con orario di

attivazione 8–12 e 15–19; il secondo per le zone termiche con orario mattutino attivo dalle 8:00 alle 13:00.

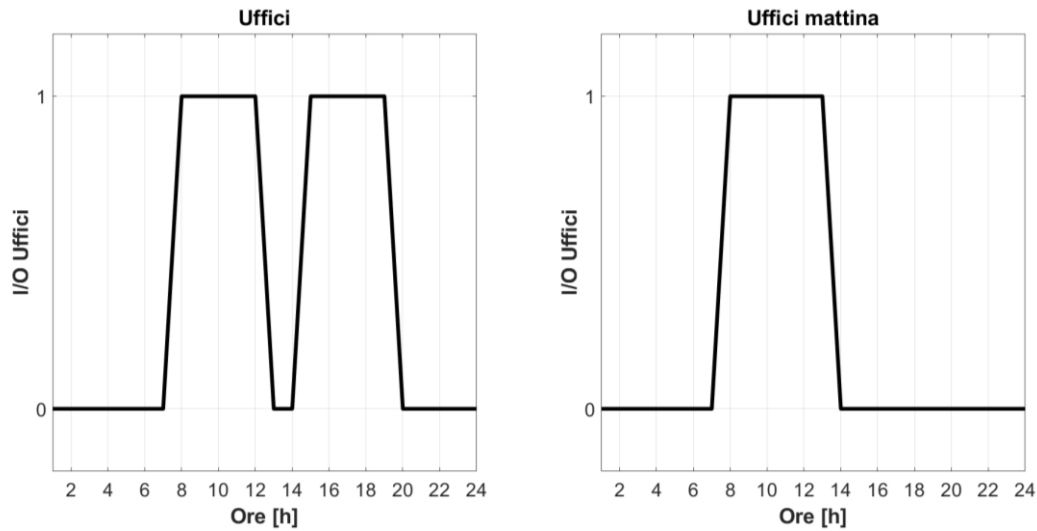


Figura 4.23 - Profili orari giornalieri di occupazione uffici

Il tipo di controllo è di solo tipo on/off, non è impostato un valore minimo per il quale c'è un carico minimo di base.

4.4.6 Simulazione dinamica

Una volta definiti la Type dell'edificio multi zona e tutti gli input necessari alla simulazione dinamica si è creato il modello in *Simulation Studio*:

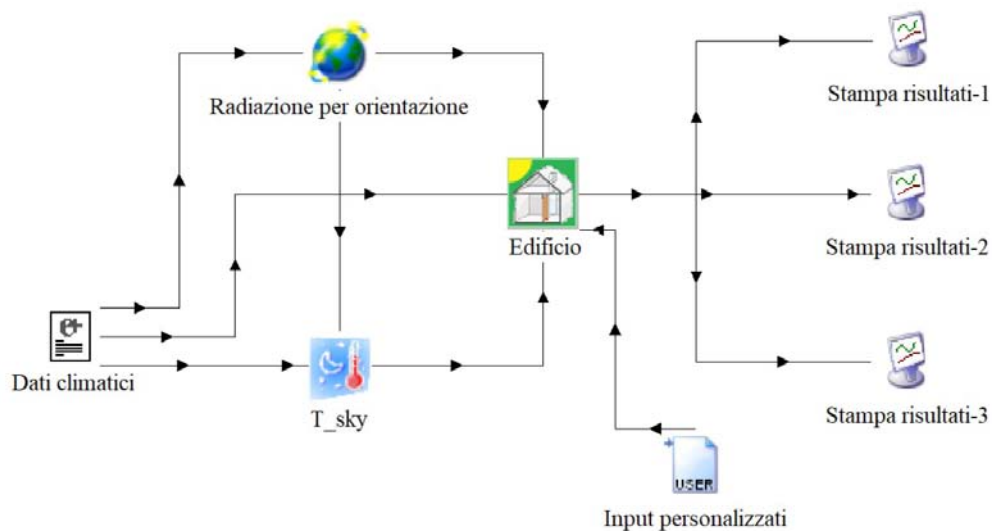


Figura 4.24 - Schermata del modello in Simulation Studio

Il tempo di simulazione è stato impostato di un anno con cadenza oraria, per un totale quindi di 8769 step.

4.5 CARICO LATENTE E IMPIANTO DI VENTILAZIONE

Sia il modello quasi stazionario che il modello dinamico non tengono conto dello scambio di calore latente nel bilancio termico delle zone termiche e permettono quindi di fare una valutazione sul solo calore sensibile. Per garantire un adeguato benessere degli individui occupanti è necessario un controllo delle condizioni termiche e igrometriche. I soli impianti di riscaldamento o di raffrescamento non permettono un controllo sullo scambio di vapore né sul ricambio d'aria di rinnovo, quindi ai fini di garantire condizioni ottimali risulta di fondamentale importanza l'impianto di ventilazione e trattamento dell'aria.

La qualità dell'aria è definita accettabile quando non sono presenti contaminanti (di origine esterna, ma anche prodotti all'interno dell'edificio dagli occupanti, dagli impianti e dalle macchine) in concentrazioni pericolose e rispetto alla quale la maggioranza delle persone non esprime insoddisfazione ($PD < 20\%$). C'è da tenere conto di due aspetti quindi:

- Portata d'aria di rinnovo minima per garantire una purezza dell'aria adeguata
- Umidità dell'aria ottimale

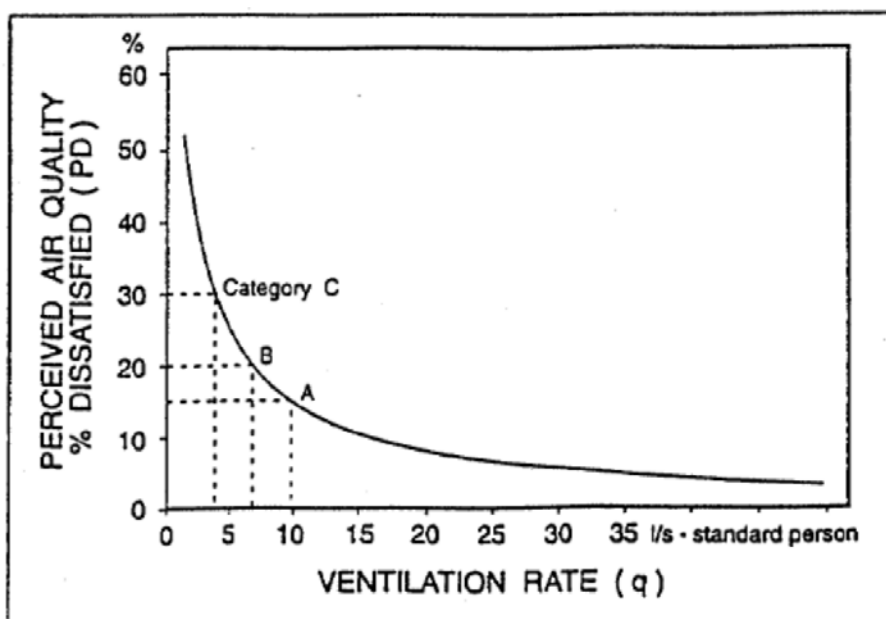


Figura 4.25 - Portata d'aria di rinnovo necessaria a garantire un benessere adeguato

Solitamente per gli edifici del terziario si considera una portata d'aria di rinnovo per ogni persona di circa $40 \text{ m}^3/\text{h}$. L'aria di immissione deve essere portata a una temperatura costante (circa $18 - 20 \text{ }^\circ\text{C}$) per non generare fenomeni di discomfort localizzato e deve avere un contenuto di vapore tale da poter garantire un grado di umidità costante intorno al $55 - 60\%$. Per questo è necessaria un'unità di trattamento aria che prevede batterie di riscaldamento e raffreddamento con deumidificazione per il controllo della temperatura e del tasso di umidità, e filtri per garantire un basso grado di inquinanti nell'aria immessa negli ambienti.

4.5.1 Portata d'aria di rinnovo

Tutti i calcoli per il fabbisogno per l'impianto di ventilazione sono stati fatti basandosi sul modello in *TRNSYS*. La portata d'aria di rinnovo è stata determinata a seconda della destinazione d'uso delle zone termiche e dell'occupazione delle stesse. Si è continuato a considerare per tutte le zone termiche un'infiltrazione base con un ricambio di 0.15 vol/h che è stato sottratto alla portata d'aria di rinnovo calcolata. La portata di ventilazione è stata calcolata in base alla destinazione d'uso:

- Zone termiche adibite ad uso “archivio”: portata nulla
- Zone termiche adibite ad uso “corridoio”: ricambio orario 0.15 vol/h
- Zone termiche adibite ad uso “bagni”: ricambio orario 2.85 vol/h
- Zone termiche adibite ad uso “ufficio”: 40 m³/h a persona

Per le zone ad uso ufficio il ricambio orario è stato calcolato secondo la seguente relazione:

$$r_{vent} = n_{px} \cdot \frac{40}{Vol} - 0.15$$

Dove:

- r_{vent} : è il ricambio orario in volumi ora della zona termica [vol/h]
- n_{px} : è il numero di persone occupanti, dato dalla superficie in pianta della zona diviso 15, considerando un'occupazione una persona ogni 15 m² [px]
- 40: è la portata d'aria di rinnovo per singola persona [m³/(h·px)]
- Vol : è il volume netto della zona termica [m³]
- 0.15: è il ricambio orario per infiltrazione sottratto [vol/h]

Una volta noto il ricambio d'aria minimo per ogni zona è sufficiente moltiplicare il ricambio orario per il volume netto della zona climatizzata per determinare la portata d'aria da immettere in ogni ambiente. La portata d'aria di rinnovo complessiva, derivante dalla somma di tutte le portate di zona, risulta essere pari a 6376 m³/h. Questa è la portata che attraversa l'unità di trattamento aria e che deve essere portata alle condizioni di immissione di temperatura e contenuto di vapore.

In Tabella 4.13 sono riportati i valori di ricambio orario per ogni ambiente utilizzati nel modello in *TRNSYS*. È stato creato un file di input nel quale sono stati inseriti i valori orari della temperatura di immissione dell'aria trattata dalla UTA. Per il dettaglio del calcolo relativo alla determinazione della temperatura di immissione e del fabbisogno di energia per il trattamento dell'aria si rimanda al paragrafo successivo.

Tabella 4.13 - Dettaglio ricambio orario e portata d'aria di rinnovo per zona termica

Zona	Volume netto [m3]	Occupazione [px]	Ricambio orario [1/h]	Portata d'aria [m3/h]
1	1191.86	0	0	0
2	823.54	0	0	0
3	1191.9	0	0	0
4	3010.07	0	0.15	451.51
5	828.96	13	0.45	373.03
6	1118.55	18	0.45	503.35
7	1117.46	18	0.45	502.86
8	816.77	13	0.45	367.55
9	203	0	2.85	578.55
10	205.87	0	2.85	586.73
11	476.29	7	0.4	190.52
12	342.19	5	0.4	136.88
13	315.98	0	2.85	900.54
14	470.6	7	0.4	188.24
15	328.99	0	0.15	49.35
16	479.44	9	0.6	287.66
17	152	3	0.6	91.20
18	364.81	4	0.25	91.20
19	593.48	0	0.15	89.02
20	774.88	15	0.6	464.93
21	374.04	7	0.55	205.72
22	212.23	4	0.6	127.34
23	317.39	6	0.6	190.43
TOTALE	15710.3	129	-	6376.61

4.5.2 Trattamento aria

L'unità di trattamento aria permette di portare l'aria di immissione negli ambienti alle condizioni di temperatura e contenuto di vapore stabilite. Con riferimento alla **Errore**. **L'origine riferimento non è stata trovata.** i principali componenti dell'UTA sono:

- 1: ventilatore

- 2: filtri
- 3: batteria di preriscaldamento (solo inverno)
- 4: batteria di raffreddamento e deumidificazione (solo estate)
- 5: saturatore adiabatico (solo inverno)
- 6: batteria di post-riscaldamento

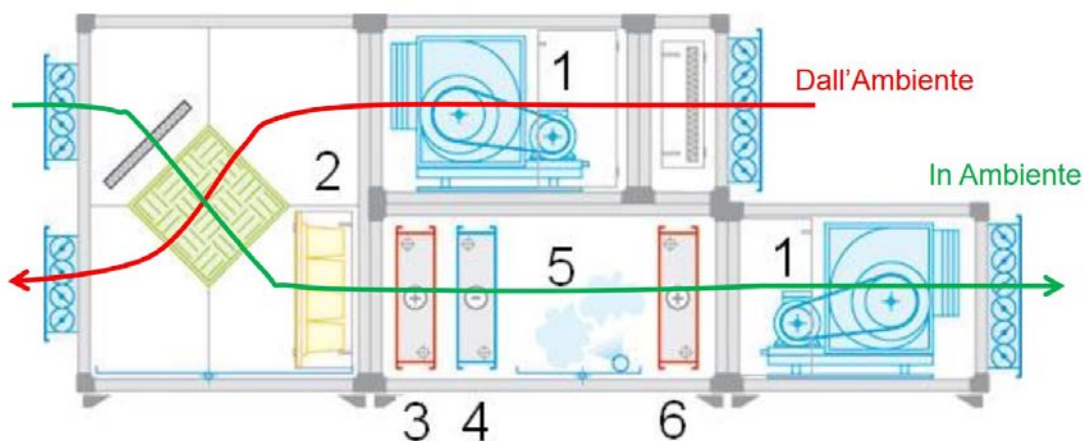


Figura 4.26 - Schema UTA e dettaglio componenti

Nel funzionamento invernale la batteria di preriscaldamento determina l'umidità specifica in ingresso all'ambiente e la batteria di post-riscaldamento controlla la temperatura di immissione.

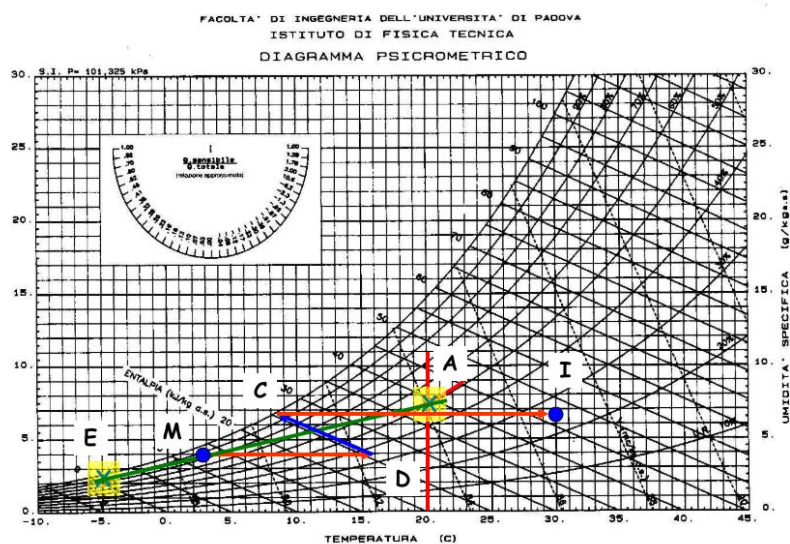


Figura 4.27 - Diagramma psicometrico: funzionamento invernale

Nel funzionamento estivo invece la batteria di raffreddamento determina l'umidità specifica di ingresso e la batteria di post-riscaldamento controlla la temperatura di immissione.

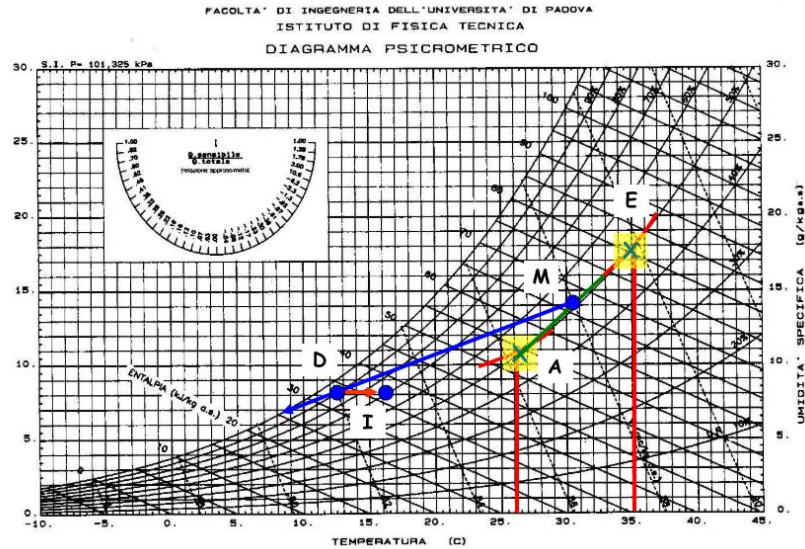


Figura 4.28 - Diagramma psicrometrico: funzionamento estivo

Nel caso di impianti a tutta aria l'intero fabbisogno di riscaldamento o raffreddamento deve essere coperto dall'impianto di ventilazione e è necessario soddisfare i bilanci termici del seguente sistema di equazioni:

$$\begin{cases} q_p = G_I \cdot c_p(t_a - t_I) \\ G_{vp} = G_I(x_a - x_I) \\ q_p + G_{vp} = G_I(h_a - h_I) \end{cases}$$

Dove:

- q_p : è lo scambio termico sensibile
- G_{vp} : è la portata di vapore
- G_I : è la portata d'aria di immissione
- t_a è la temperatura dell'aria ambiente
- t_I : è la temperatura dell'aria di immissione
- x_a : è l'umidità specifica dell'aria ambiente
- x_I : è l'umidità specifica dell'aria di immissione
- h_a : è l'entalpia dell'aria ambiente
- h_I : è l'entalpia dell'aria di immissione

In questo modo, conoscendo le condizioni ambiente, il carico termico e di vapore da fornire o asportare è possibile determinare le condizioni dell'aria di immissione.

In questo caso studio non si ha in mente di effettuare una regolazione termica degli ambienti attraverso l'aria di immissione, quindi non è necessario un calcolo del bilancio termico e di vapore. Le condizioni di funzionamento stabilite sono:

- Temperatura di immissione costante circa pari a 18 °C sia in estate che in inverno
- Umidità specifica di immissione tale da garantire un valore di umidità relativa accettabile all'interno delle zone climatizzate

Si prevede inoltre l'introduzione di uno scambiatore rigenerativo che permette uno scambio di calore sensibile tra l'aria di espulsione e l'aria in ingresso alla UTA in modo da diminuire il carico che l'impianto deve fornire.

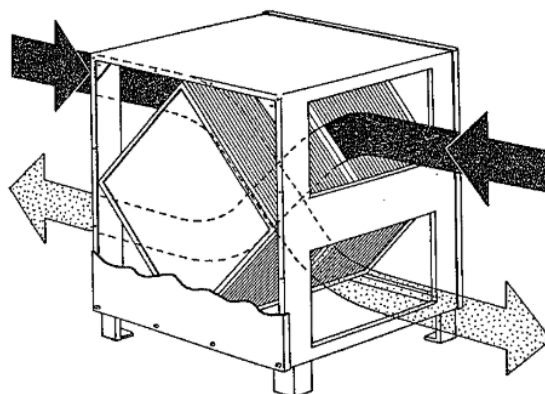


Figura 4.29 - Esempio di recuperatore di calore statico a flusso incrociato

4.5.2.1 Scambiatore rigenerativo

Per prima cosa si definiscono le condizioni in ingresso e in uscita dello scambiatore rigenerativo. È previsto un bypass nel caso le condizioni dell'aria esterna siano simili a quelle dell'aria di espulsione poiché non si avrebbe alcun beneficio in termini di risparmio di energia da fornire o asportare all'aria di immissione, ma soltanto delle perdite di carico inutili.

Per prima cosa è necessario determinare le condizioni dell'aria di espulsione:

$$t_e = \frac{\sum_i t_i \cdot G_i}{\sum_i G_i}$$

Dove:

- t_e : è la temperatura dell'aria di espulsione
- t_i : è la temperatura dell'aria ambiente di ogni zona termica

- G_i : è la portata estratta da ogni zona termica

Conoscendo la temperatura interna e la portata d'aria di rinnovo di ogni zona termica per ogni ora è possibile determinare l'andamento orario nell'intero anno della temperatura dell'aria espulsa dall'impianto di ventilazione. Dati la temperatura dell'aria esterna, la temperatura di espulsione e l'efficienza del recuperatore di calore è possibile determinare la temperatura dell'aria in ingresso all'unità di trattamento aria:

$$\begin{cases} q = G'_a \cdot (h_2 - h_1) \\ q = G''_a \cdot (h_4 - h_3) \end{cases}$$

Con riferimento alla Figura 4.30:

- q : calore scambiato
- G_a : portata d'aria
- h : entalpia dell'aria



Figura 4.30 - Schema flussi scambiatore rigenerativo

Si definisce “efficienza del recuperatore” il rapporto tra il flusso effettivamente scambiato e il flusso massimo scambiabile:

$$\varepsilon = \frac{q}{G_{a,min} \cdot (h_3 - h_1)}$$

Utilizzando come flusso di riferimento il flusso che l'aria espulsa cederebbe fino a raggiungere le condizioni esterne si può definire un parametro diverso, chiamato “rendimento del recuperatore”:

$$\eta = \frac{q}{G''_a \cdot (h_3 - h_1)} = \frac{h_4 - h_2}{h_3 - h_1}$$

L'efficienza e il rendimento dello scambiatore assumono lo stesso valore nel caso in cui la portata espulsa sia minore o uguale a quella in ingresso. Nel caso di solo scambio di calore sensibile è possibile riscrivere la relazione sostituendo i valori di entalpia con i valori di temperatura.

Sono previsti due diversi funzionamenti, uno invernale e uno estivo:

- Caso invernale
 - o Se $t_{ext} > 19^\circ C$ → bypass: $t_1 = t_{ext}$
 - o Se $t_{ext} < 19^\circ C$ → $t_1 = \varepsilon \cdot (t_{espulsa} - t_{ext}) + t_{ext}$

- Caso estivo:

○ Se $t_{ext} < 16^{\circ}C$ \rightarrow $t_1 = \varepsilon \cdot (t_{espulsa} - t_{ext}) + t_{ext}$

○ Se $16^{\circ}C < t_{ext} < t_{espulsa}$ \rightarrow bypass: $t_1 = t_{ext}$

○ Se $t_{ext} > t_{espulsa}$ \rightarrow $t_1 = t_{ext} - \varepsilon \cdot (t_{ext} - t_{espulsa})$

L'aria di immissione attraversando lo scambiatore va incontro soltanto a uno scambio di calore sensibile senza alcuno scambio di vapore. L'umidità specifica dell'aria in ingresso all'UTA quindi è la stessa dell'aria esterna.

4.5.2.2 Unità di trattamento aria

Non si prevede l'umidificazione dell'aria di immissione durante la stagione di climatizzazione invernale, quindi è necessario fornire soltanto il salto termico dalle condizioni di temperatura in cui si trova l'aria in uscita dal recuperatore di calore alla temperatura di immissione negli ambienti fissata a 18°C. Il calore fornito dalla batteria di post-riscaldamento è dato da:

$$q_{postrisc} = G_I \cdot (h_I - h_1) = G_I \cdot c_p \cdot (t_I - t_1)$$

Dove:

- G_I : è la portata dell'aria di immissione
- h_I : è l'entalpia dell'aria di immissione
- h_1 : è l'entalpia dell'aria in uscita dal recuperatore e in ingresso alla batteria di post-riscaldamento
- c_p : è il calore specifico dell'aria
- t : sono le temperature relative all'aria di immissione e in ingresso alla batteria

Nel caso estivo l'aria di immissione attraversa prima la batteria di raffreddamento, dove viene raffreddata fino a una temperatura tale da deumidificare l'aria fino a un valore di umidità specifica stabilito. In seguito l'aria attraversa la batteria di post-riscaldamento perché non può essere immessa negli ambienti a una temperatura troppo bassa, altrimenti genererebbe delle condizioni di discomfort. È necessario considerare quindi anche lo scambio latente.

Solitamente la batteria di raffreddamento è raffreddata da un flusso d'acqua con un salto termico di 5°C tra i 7 e i 12°C, quindi si può considerare una temperatura superficiale media di 9.5°C. Nel caso in cui la temperatura di rugiada dell'aria esterna sia maggiore della temperatura della batteria di raffreddamento si va incontro a condensazione e quindi c'è uno scambio di calore latente oltre che sensibile. Il processo di raffreddamento può essere visto

come un miscelamento adiabatico con una portata d'aria di bypass, come rappresentato in Figura 4.31:

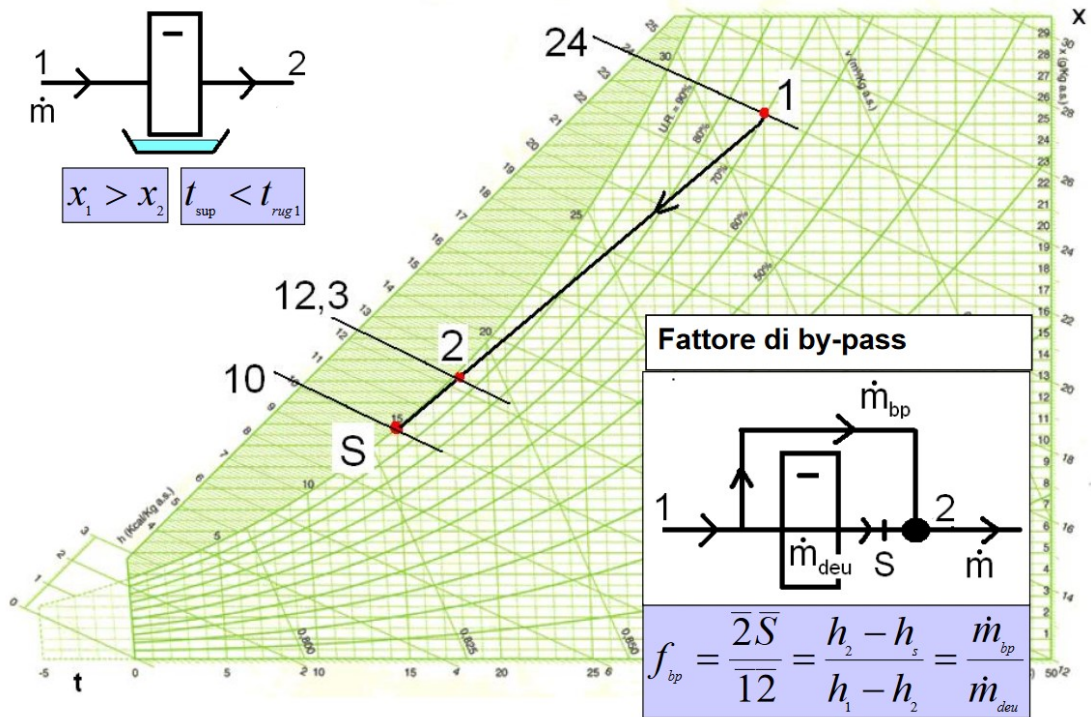


Figura 4.31 - Processo di raffreddamento con deumidificazione

Il punto 1) rappresenta le condizioni dell'aria esterna o all'uscita del recuperatore di calore, il punto S) è dato dalla temperatura della superficie della batteria di raffreddamento e si trova sulla curva di saturazione, il punto 2) è dato dalla miscelazione adiabatica di una portata d'aria alle condizioni S) e una portata di bypass alle condizioni 1). Nella creazione del modello è stato scelto un valore limite di umidità specifica x_s pari a 7.38 g/kg corrispondente alla temperatura di rugiada di 9.5°C, ovvero la temperatura superficiale della batteria. Nel caso in cui l'umidità specifica dell'aria esterna sia superiore al valore limite fissato si ha raffreddamento con deumidificazione, altrimenti soltanto raffreddamento sensibile. Il fattore di bypass è definito dalla seguente relazione, con riferimento sempre alla Figura 4.31:

$$f_{bp} = \frac{h_2 - h_s}{h_1 - h_2} = \frac{x_2 - x_s}{x_1 - x_2}$$

Fissando un valore costante per il valore del f_{bp} è possibile, conoscendo le condizioni di entalpia e di umidità specifica per i punti 1) e S), determinare le condizioni nel punto 2):

$$h_2 = \frac{f_{bp} \cdot h_1 + h_s}{1 + f_{bp}}$$

$$x_2 = \frac{f_{bp} \cdot x_1 + x_s}{1 + f_{bp}}$$

Noti h_2 e x_2 è facile determinare la temperatura dell'aria all'uscita della batteria di raffreddamento. Essa poi viene portata alla temperatura di immissione di 18°C attraverso la batteria di post-riscaldamento. Il carico termico nelle singole batterie è dato da:

$$q_{\text{raffreddamento}} = G_I \cdot (h_1 - h_2)$$

$$q_{\text{post-risc}} = G_I \cdot (h_{\text{imm}} - h_2)$$

Se invece l'umidità specifica dell'aria esterna è minore del valore limite x_S fissato c'è soltanto raffreddamento sensibile, senza scambio latente. Inoltre se la temperatura t_1 in uscita dal recuperatore di calore è inferiore ai 20°C si bypassa direttamente la batteria di raffreddamento. Le temperature dell'aria di immissione sono state calcolate per ogni ora della simulazione e sono state inserite in un file di input aggiunto al modello in *TRNSYS* per determinare il fabbisogno di energia utile per il riscaldamento e per il raffreddamento sgravato dal carico del trattamento dell'aria.

Nel caso specifico di ipotesi di impianto, invece della batteria di post-riscaldamento, nel funzionamento estivo, viene utilizzato il calore ceduto gratuitamente del compressore della pompa di calore e diminuendo di fatto il fabbisogno complessivo.

I risultati del fabbisogno per la ventilazione sono riportati nel capitolo successivo insieme ai risultati dei modelli dell'edificio.

5 RISULTATI E IPOTESI DI INTERVENTO

Nel seguente capitolo vengono riportati prima i risultati ottenuti tramite il modello quasi stazionario per una valutazione d'insieme dell'edificio e della classificazione energetica e in seguito i risultati prodotti dal modello dinamico in *TRNSYS* con un'analisi sulla sola domanda di energia del caso di funzionamento reale dell'edificio e non di valutazione standard. Un confronto tra i due modelli non è molto significativo visto il diverso tipo di valutazione per il quale vengono utilizzati.

Successivamente si riportano delle proposte di intervento in modo incrementale. La valutazione del miglioramento viene effettuata attraverso *Edilclima* in modo particolare per determinare il salto di classe energetica e attraverso *TRNSYS* per una valutazione effettiva della diminuzione del fabbisogno di energia utile e del risparmio. Gli interventi vanno ad agire sia sull'involucro edilizio sia sui vari sistemi di impianto.

Oltre agli interventi di miglioramento energetico, sono previsti anche interventi di rinforzo strutturale per un miglioramento della classe di rischio sismico della struttura. Si è cercato di accorpare alcuni interventi di tipo energetico e strutturale che andavano ad agire sugli stessi componenti dell'edificio in modo da ottenere un beneficio più elevato sia in termini di manodopera che di costi.

Infine sono stati valutati gli interventi necessari per garantire una conversione dell'edificio in nZEB (edificio a energia quasi zero).

5.1 RISULTATI MODELLO QUASI STAZIONARIO

In questa sezione si riportano i risultati ottenuti dal modello quasi stazionario impostato in *Edilclima*.

5.1.1 Potenza invernale

Il software prevede il calcolo della potenza di progetto invernale, ovvero la potenza termica necessaria a mantenere la temperatura interna desiderata costante con le condizioni esterne di progetto. È un calcolo di tipo stazionario ed è utile per il dimensionamento degli impianti.

La potenza di progetto dell'intero edificio è pari a 388.72 kW.

Tabella 5.1 - Dettaglio dispersioni potenza invernale

Dettaglio dispersioni		Potenza [kW]	Termini relativi
Trasmissione	Φ_{tr}	210.951	54.27 %
Ventilazione	Φ_{ve}	96.989	24.95 %
Intermittenza	Φ_{rh}	80.779	20.78%
TOTALE		Φ_{hl}	388.72

Una suddivisione dei risultati per zone termiche permette di valutare in maniera più specifica le perdite:

Tabella 5.2 - Dettaglio dispersioni potenza invernale per zone termiche

Zona	Φ_{tr} [kW]	Φ_{tr} [kW]	Φ_{tr} [kW]	Φ_{tr} [kW]	%
1	38.192	9.151	12.802	60.145	15.5%
2	39.92	9.148	12.912	61.981	15.9%
3	9.39	15.289	1.344	26.023	6.7%
4	35.172	2.715	23.279	61.165	15.7%
5	8.755	15.123	1.325	25.202	6.5%
6	9.799	24.332	2.137	36.268	9.3%
7	15.138	3.884	5.139	24.161	6.2%
8	5.554	2.086	2.76	10.4	2.7%
9	20.032	6.182	8.179	34.393	8.8%
10	10.247	2.846	3.766	16.859	4.3%
11	4.917	1.982	2.622	9.52	2.4%
12	13.837	4.251	4.515	22.603	5.8%

5.1.2 Energia invernale

Il fabbisogno di energia termica per la climatizzazione invernale è necessario per la determinazione dell'indice di prestazione e della classe di efficienza energetica. Di seguito si riporta il fabbisogno mensile con il dettaglio delle dispersioni e degli apporti di energia gratuita:

Tabella 5.3 - Fabbisogno mensile di energia utile e bilancio delle perdite e degli apporti gratuiti durante la stagione di climatizzazione invernale

Mese	$Q_{h,tr}$ [kWh]	$Q_{h,r}$ [kWh]	$Q_{h,ve}$ [kWh]	$Q_{h,ht}$ [kWh]	$Q_{sol,w}$ [kWh]	Q_{int} [kWh]	Q_{gn} [kWh]	$Q_{h,nd}$ [kWh]
Ottobre	16817	4781	3815	25413	10675	8240	18915	7716
Novembre	48432	8456	9070	65957	11570	14540	26110	39911
Dicembre	77055	9060	13516	99630	9374	15025	24399	75236
Gennaio	85394	8759	14601	108754	6532	15025	21557	87198
Febbraio	70860	9318	13010	93187	14435	13571	28006	65199
Marzo	51384	10406	10457	72248	20842	15025	35867	36712
Aprile	14875	5480	3693	24048	12956	7270	20227	5867
TOTALE	364817	56260	68162	489237	86384	88696	175081	317839

Dove i componenti sono:

- $Q_{h,tr}$: energia dispersa per trasmissione
- $Q_{h,r}$: energia dispersa per extraflusso
- $Q_{h,ve}$: energia dispersa per ventilazione
- $Q_{h,ht}$: dispersioni totali
- $Q_{sol,w}$: apporti solari gratuiti
- Q_{int} : apporti interni gratuiti
- Q_{gn} : apporti gratuiti totali
- $Q_{h,nd}$: energia utile per la climatizzazione invernale

Le perdite per trasmissione sono predominanti rispetto agli altri tipi di perdite, pari circa al 75% delle perdite totali. In caso di intervento di efficientamento si deve tenere conto di questo, perché andare ad agire sull'involucro è sicuramente prioritario rispetto a un intervento sulla ventilazione. Gli apporti gratuiti invece sono bilanciati e contribuiscono a coprire un 35% delle perdite totali.

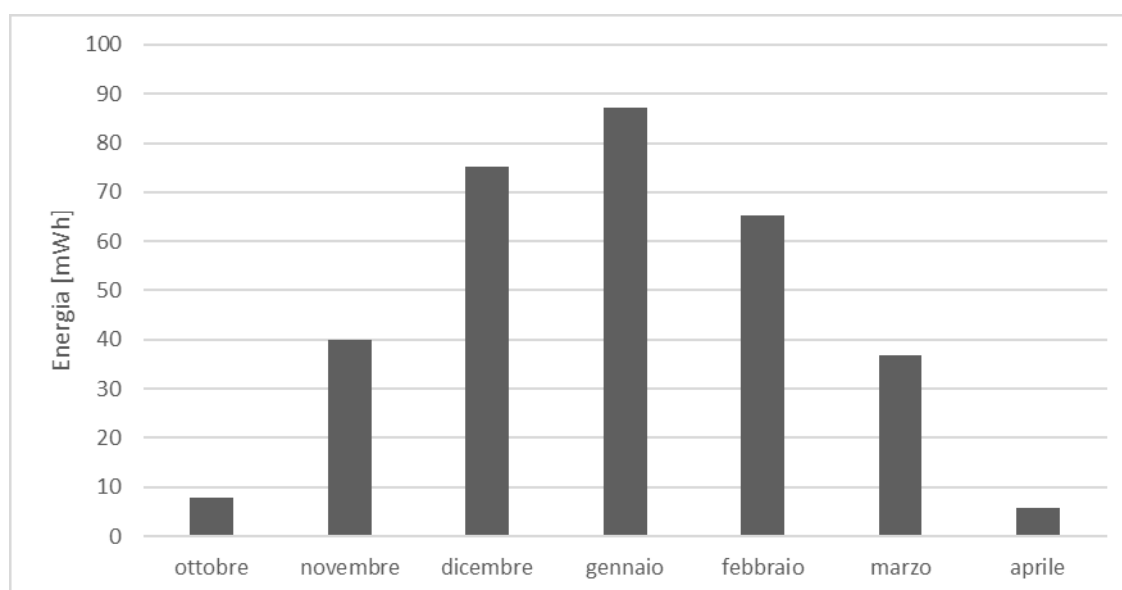


Figura 5.1 - Fabbisogno mensile di energia utile per la climatizzazione invernale

Di seguito si riporta la richiesta termica totale per la stagione di climatizzazione invernale nel dettaglio per zona termica:

Tabella 5.4 - Energia utile per la climatizzazione invernale suddivisa per zone

Zona	Superficie [m ²]	Energia utile [kWh]	Termini relativi [%]	En. specifica [kWh/m ²]
1	533	57311	18%	107.53
2	538	63964	20%	118.89
3	56	16650	5%	297.32
4	970	37699	12%	38.86
5	55	15225	5%	276.82
6	89	20084	6%	225.66
7	214	25657	8%	119.89
8	115	8278	3%	71.98
9	341	27752	9%	81.38
10	157	15594	5%	99.32
11	109	7097	2%	65.11
12	188	22529	7%	119.84
TOTALE	3365	317840		94.45

5.1.3 Climatizzazione estiva

Il fabbisogno di energia termica per la climatizzazione estiva in questo caso è indicativo per capire il comportamento dell'edificio, che però non è dotato di un impianto di raffrescamento e quindi non viene considerato nel conteggio per la determinazione dell'indice di prestazione energetica. Di seguito si riporta il fabbisogno mensile con il dettaglio delle dispersioni e degli apporti di energia gratuita:

Tabella 5.5 - Fabbisogno mensile di energia utile e bilancio delle perdite e degli apporti gratuiti durante la stagione di climatizzazione estiva

Mese	$Q_{h,tr}$ [kWh]	$Q_{h,r}$ [kWh]	$Q_{h,ve}$ [kWh]	$Q_{h,ht}$ [kWh]	$Q_{sol,w}$ [kWh]	Q_{int} [kWh]	Q_{gn} [kWh]	$Q_{h,nd}$ [kWh]
Maggio	15227	6178	4124	25529	16937	8240	25176	3131
Giugno	11577	11312	4869	27759	30714	14540	45254	18137
Luglio	-16447	14700	888	-859	36947	15025	51972	52830
Agosto	-12068	13168	1184	2284	32413	15025	47438	45155
Settembre	11409	5625	3049	20082	12102	7270	19372	2298
TOTALE	9698	50983	14114	74795	129113	60100	189212	121551

I componenti del bilancio di energia termica sono gli stessi riportati nella Tabella 5.3. Il fabbisogno di energia utile per la climatizzazione estiva risulta poco più di un terzo rispetto a quello per la climatizzazione invernale.

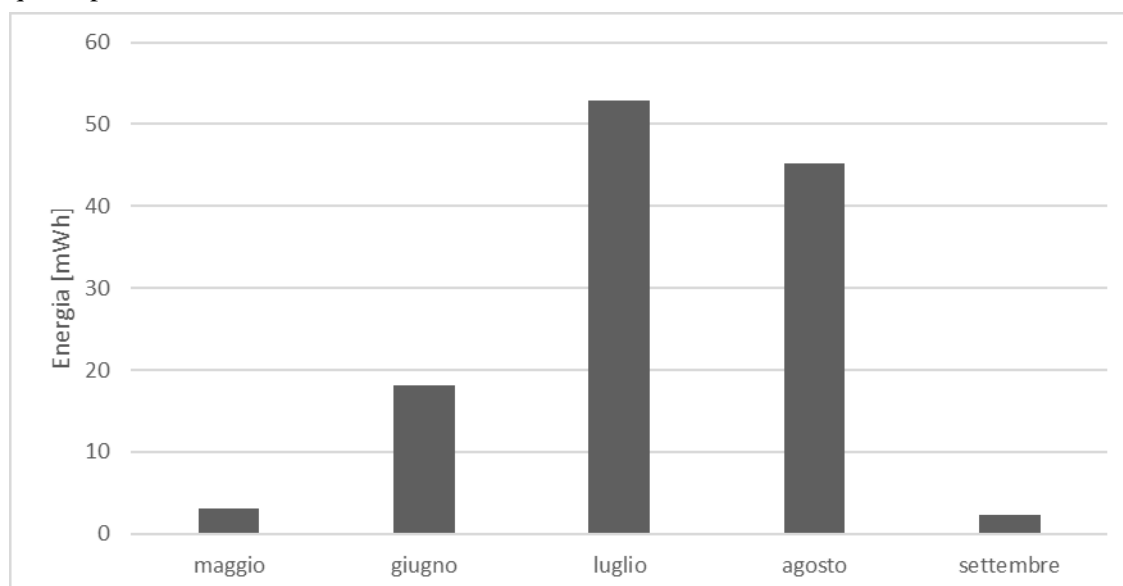


Figura 5.2 - Fabbisogno mensile di energia utile per la climatizzazione invernale

Di seguito si riporta la richiesta termica totale per la stagione di climatizzazione estiva nel dettaglio per zona termica:

Tabella 5.6 - Energia utile per la climatizzazione estiva suddivisa per zone

Zona	Superficie [m ²]	Energia utile [kWh]	Termini relativi [%]	En. specifica [kWh/m ²]
1	533	23191	19%	43.51
2	538	23074	19%	42.89
3	56	3634	3%	64.89
4	970	24487	20%	25.24
5	55	3798	3%	69.05
6	89	1921	2%	21.58
7	214	4102	3%	19.17
8	115	4849	4%	42.17
9	341	16021	13%	46.98
10	157	3495	3%	22.26
11	109	4684	4%	42.97
12	188	8293	7%	44.11
TOTALE	3365	121549		36.12

I mesi più critici sono gennaio per la climatizzazione invernale e luglio per la climatizzazione estiva.

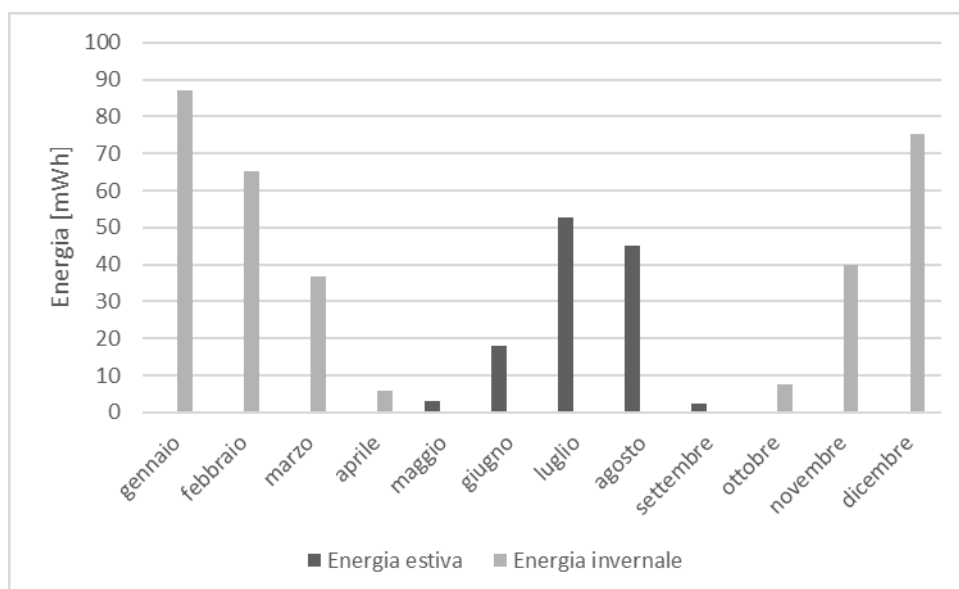


Figura 5.3 - Fabbisogno di energia utile mensile per climatizzazione dell'edificio

5.1.4 Illuminazione

Il fabbisogno di energia elettrica per gli impianti di illuminazione è anch'esso un elemento necessario per la determinazione dell'indice di prestazione energetica. Non verrà analizzato in maniera approfondita in seguito perché non sono previsti interventi che vadano ad agire sui corpi illuminanti.

<i>Mese</i>	<i>Q_{ill}</i> [kWh]	<i>Q_{p,ill}</i> [kWh]	<i>Q_{ill,spec}</i> [kWh/m ²]	<i>Q_{p,ill,spec}</i> [kWh/m ²]
<i>Gennaio</i>	5153	10048	1.53	2.99
<i>Febbraio</i>	4502	8778	1.34	2.61
<i>Marzo</i>	4789	9338	1.42	2.78
<i>Aprile</i>	4543	8859	1.35	2.63
<i>Maggio</i>	4654	9074	1.38	2.70
<i>Giugno</i>	4496	8768	1.34	2.61
<i>Luglio</i>	4643	9053	1.38	2.69
<i>Agosto</i>	4674	9114	1.39	2.71
<i>Settembre</i>	4639	9047	1.38	2.69
<i>Ottobre</i>	4915	9585	1.46	2.85
<i>Novembre</i>	4934	9621	1.47	2.86
<i>Dicembre</i>	5201	10142	1.55	3.01
TOTALE	57143	111427	16.98	33.11

Dove:

- **Q_{ill}**: è il fabbisogno elettrico totale per l'illuminazione
- **Q_{p,ill}**: è il fabbisogno di energia primaria per l'illuminazione
- **Q_{ill,spec}**: è il fabbisogno elettrico specifico per l'illuminazione
- **Q_{p,ill,spec}**: è il fabbisogno di energia primaria specifico per l'illuminazione

5.1.5 Energia primaria

Il fabbisogno di energia primaria non rinnovabile per la determinazione dell'indice di prestazione e della classe energetica dell'edificio è calcolato per la climatizzazione invernale, la produzione di acqua calda sanitaria, l'illuminazione e il trasporto di persone e cose. La determinazione della quota rinnovabile e non rinnovabile dell'energia primaria globale dipende dal vettore energetico.

5.1.5.1 Riscaldamento

Si riporta di seguito il dettaglio del fabbisogno mensile di energia per il riscaldamento a partire dall'energia utile fino all'energia primaria:

Tabella 5.7 - Dettaglio fabbisogni mensili di energia per la climatizzazione invernale

Mese	sys,out [kWh]	sys,out,c [kWh]	gen,out [kWh]	gen,in [kWh]	QH,el [kWh]	QHp,nren [kWh]	QHp,tot [kWh]
Gennaio	87198	87170	125931	143281	472	151365	151587
Febbraio	65199	65174	101323	115676	388	122216	122398
Marzo	36712	36685	65706	75576	256	79855	79975
Aprile	5867	5854	12776	15071	53	15928	15953
Maggio	-	-	-	-	-	-	-
Giugno	-	-	-	-	-	-	-
Luglio	-	-	-	-	-	-	-
Agosto	-	-	-	-	-	-	-
Settembre	-	-	-	-	-	-	-
Ottobre	7716	7701	15946	18739	66	19803	19834
Novembre	39911	39884	66322	76229	258	80544	80665
Dicembre	75236	75208	112251	128149	430	135395	135596
Totale	317841	317677	500255	572720	1923	605106	606009

Dove:

- sys,out: fabbisogno dell'edificio, energia utile QH,sys,out
- sys,out,c: fabbisogno ideale netto, dedotto dai recuperi Q'H,sys,out
- gen,out: fabbisogno in uscita dalla generazione Q,gen,out
- gen,in: fabbisogno in ingresso alla generazione Q,gen,in
- QH,el: fabbisogno elettrico complessivo
- QHp,nren: energia primaria non rinnovabile per il riscaldamento
- QHp,tot: energia primaria totale per il riscaldamento

Il rendimento globale medio stagionale per la climatizzazione invernale risulta pari al 52.5%. Questo è dovuto al fatto che i rendimenti dei vari sottosistemi dell'impianto di riscaldamento sono scadenti.

5.1.5.2 Acqua calda sanitaria

Si riporta di seguito il dettaglio del fabbisogno mensile di energia per la produzione di acqua calda sanitaria a partire dall'energia utile fino all'energia primaria:

Tabella 5.8 - Dettaglio fabbisogni mensili di energia per la produzione di ACS

Mese	$QW_{sys,out}$ [kWh]	$QW_{gen,out}$ [kWh]	$QW_{gen,in}$ [kWh]	QW_{el} [kWh]	$QW_{p,nren}$ [kWh]	$QW_{p,tot}$ [kWh]
Gennaio	626	680	753	0	790	791
Febbraio	566	614	680	0	714	714
Marzo	626	680	753	0	790	791
Aprile	606	658	728	0	765	765
Maggio	626	680	1114	11	1192	1197
Giugno	606	658	1078	11	1153	1158
Luglio	626	680	1114	11	1192	1197
Agosto	626	680	1114	11	1192	1197
Settembre	606	658	1078	11	1153	1158
Ottobre	626	680	753	0	790	791
Novembre	606	658	728	0	765	765
Dicembre	626	680	753	0	790	791
TOTALE	7373	8010	10645	56	11287	11313

Dove:

- $QW_{sys,out}$: fabbisogno di energia termica utile
- $QW_{gen,out}$: fabbisogno in uscita dalla generazione
- $QW_{gen,in}$: fabbisogno in ingresso alla generazione $Q_{gen,in}$
- QW_{el} : fabbisogno elettrico complessivo
- $QW_{p,nren}$: energia primaria non rinnovabile per l'ACS
- $QW_{p,tot}$: energia primaria totale per l'ACS

Il rendimento globale medio stagionale per la produzione di acqua calda sanitaria risulta essere pari al 65.3%.

5.1.5.3 Risultati complessivi

Si riportano di seguito i fabbisogni complessivi di energia primaria e gli indici di prestazione energetica dell'edificio:

Tabella 5.9 - Fabbisogni di energia primaria e indici di prestazione

Servizio	$Q_{p,nren}$ [kWh]	$Q_{p,ren}$ [kWh]	$Q_{p,tot}$ [kWh]	$EP,nren$ [kWh/m ²]	EP,ren [kWh/m ²]	EP,tot [kWh/m ²]
Riscaldamento	605106	904	606009	179.78	0.27	180.05
ACS	11287	26	11313	3.35	0.01	3.36
Illuminazione	111428	26857	138284	33.11	7.98	41.09
Trasporto	997	240	1238	0.30	0.07	0.37
Globale	728817	28028	756845	216.54	8.33	224.86

5.1.6 Attestato energetico

Come si può intuire dai fabbisogni molto elevati dell'edificio, la prestazione dell'edificio risulta molto bassa.

La classe energetica del fabbricato risulta essere la "G", la più bassa nella scala di valutazione, con un indice di prestazione energetica di 216.54 kWh/(m²·anno).

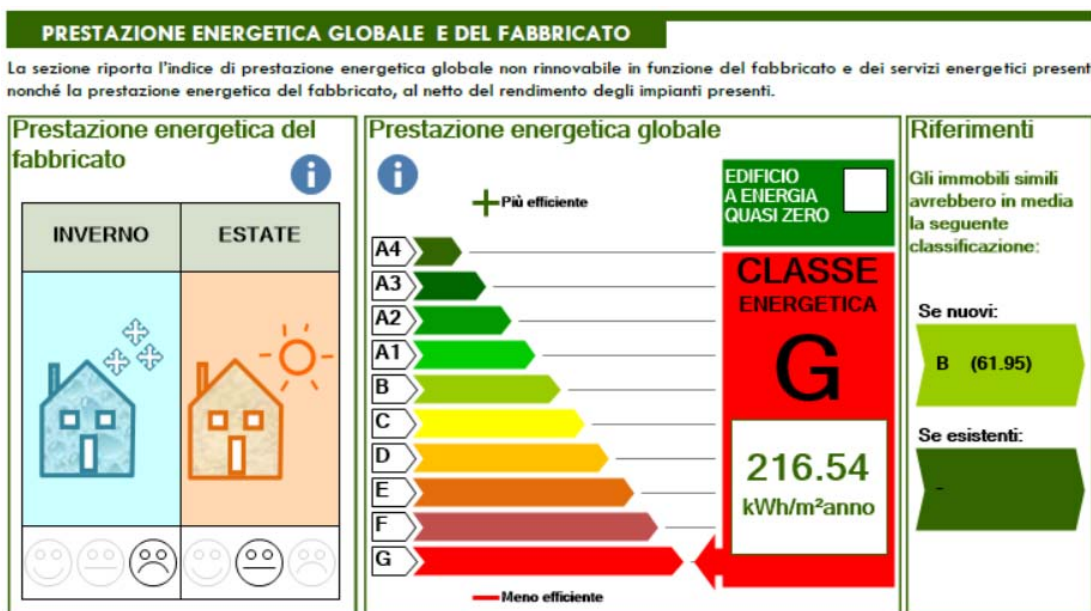


Figura 5.4 - Prestazione energetica globale dell'edificio riportata nell'APE

5.2 RISULTATI MODELLO DINAMICO

In questa sezione si riportano i risultati ottenuti dalla simulazione dinamica in *TRNSYS* relativi al fabbisogno di energia termica utile per la climatizzazione invernale e estiva. I risultati ottenuti dal modello dinamico non sono confrontabili con quelli del modello quasi stazionario viste le diverse condizioni al contorno riguardanti soprattutto l'occupazione e gli orari di attivazione degli impianti. Si ricorda inoltre che i dati climatici utilizzati sono diversi.

Si riporta di seguito il fabbisogno mensile dell'edificio con in dettaglio delle dispersioni per ventilazione e infiltrazione e gli apporti solari e interni gratuiti:

Tabella 5.10 - Fabbisogno mensile di energia utile e bilancio delle perdite e degli apporti gratuiti

Mese	Q_{heat} [kWh]	Q_{cool} [kWh]	Q_{inf} [kWh]	Q_{vent} [kWh]	Q_{sol} [kWh]	Q_{int} [kWh]
Gennaio	71800	0	-8402	-12420	7175	9898
Febbraio	64990	0	-6644	-10310	9140	10790
Marzo	54610	0	-6068	-9689	15400	11880
Aprile	19230	0	-3153	-5359	19590	11350
Maggio	228	0	-1622	-3100	23500	12370
Giugno	0	337	-1656	-3084	24480	11350
Luglio	0	6704	-1787	-3073	24760	11880
Agosto	0	3846	-1707	-2644	22170	7425
Settembre	0	988	-3421	-4781	17830	10850
Ottobre	8439	0	-4152	-5587	13220	12370
Novembre	33900	0	-5635	-7903	8022	11840
Dicembre	64350	0	-7611	-11030	6136	8908
TOTALE	317547	11875	-51858	-78980	191423	130911

Dove:

- Q_{heat} : fabbisogno di energia termica utile per la climatizzazione invernale
- Q_{cool} : fabbisogno di energia termica utile per la climatizzazione estiva
- Q_{inf} : perdite per infiltrazione
- Q_{vent} : perdite per ventilazione
- Q_{sol} : apporti solari gratuiti
- Q_{int} : apporti interni gratuiti

Il fabbisogno per il riscaldamento (317 MWh) risulta molto elevato rispetto al fabbisogno per la climatizzazione estiva (11.9 MWh), pari addirittura al 96.4% del fabbisogno complessivo.

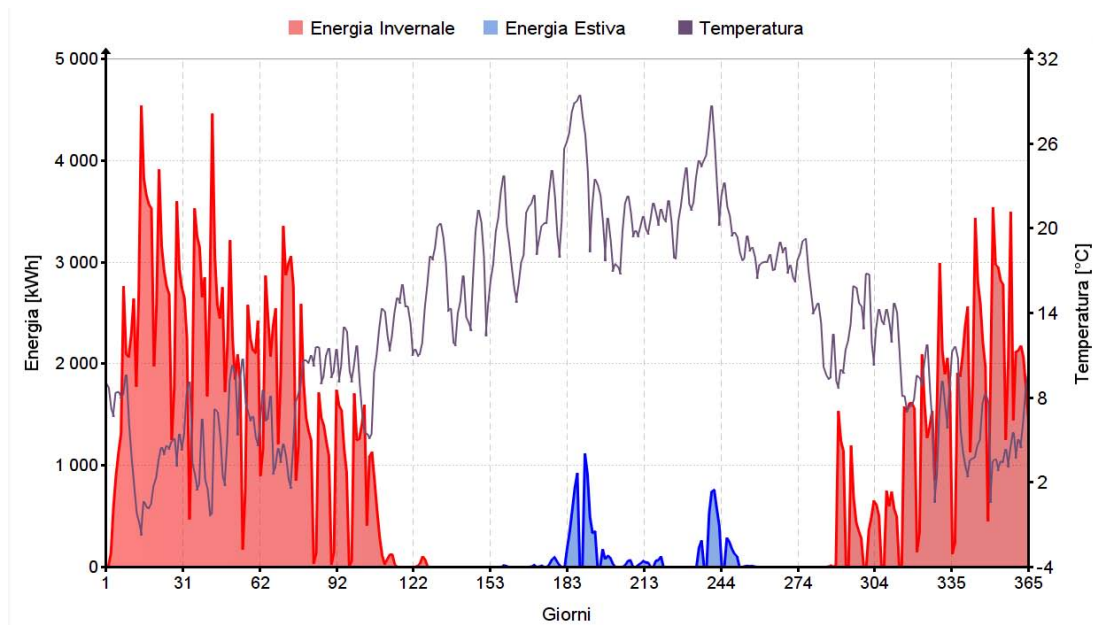


Figura 5.5 - Fabbisogno di energia utile dell'edificio

Il modello dinamico non prevede la valutazione di altre grandezze, ma risulta interessante nel determinare i benefici dati da eventuali interventi di efficientamento. Questo perché il modello quasi stazionario è stato definito in condizioni standard, mentre questo è adattato in maniera specifica all'utenza dell'edificio in esame.

5.3 RISULTATI IMPIANTO DI VENTILAZIONE

I risultati del fabbisogno di energia utile per il trattamento dell'aria nell'UTA dipendono dalle condizioni dell'aria esterna, che sono sempre uguali date dal Test Reference Year e anche, per lo scambiatore rigenerativo, dalla temperatura di espulsione, la quale dipende dalla temperatura degli ambienti interni. Siccome la temperatura interna è mantenuta costante dall'impianto di riscaldamento in inverno e dall'impianto di raffrescamento in estate, anche in caso di interventi di efficientamento energetico dell'edificio, si può affermare che il fabbisogno per il trattamento dell'aria praticamente non varia.

Si ricorda che la batteria di post-riscaldamento non viene utilizzata durante la stagione estiva grazie al calore gratuito del compressore. I fabbisogni complessivi di energia utile delle batterie dell'unità di trattamento aria risultano essere:

- 6939 kWh: batteria di post-riscaldamento
- 18857 kWh: batteria di raffreddamento e deumidificazione

Si riporta la rappresentazione grafica del fabbisogno giornaliero di energia utile per il trattamento dell'aria:

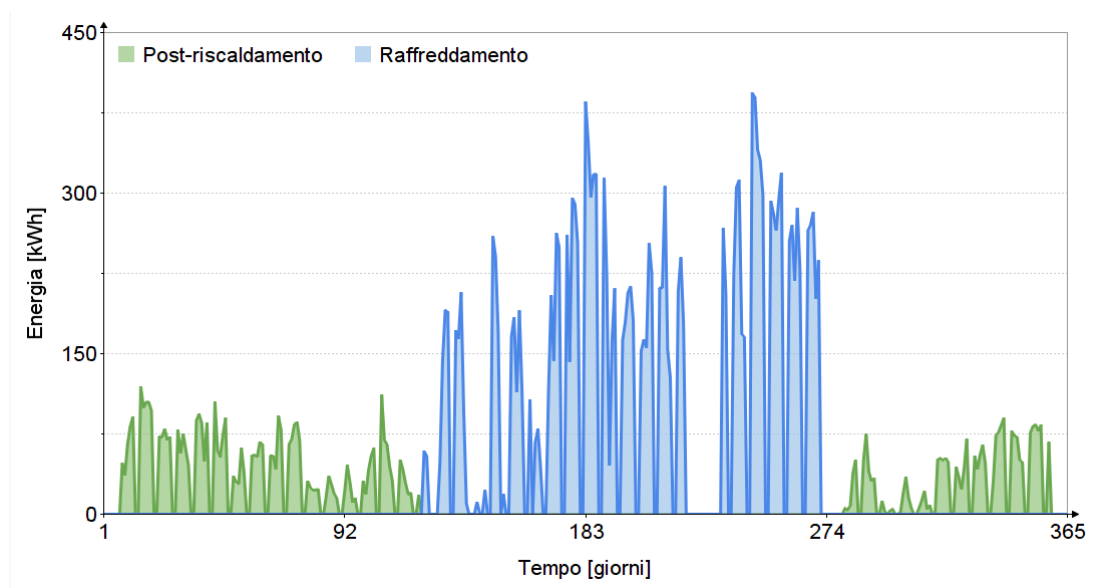


Figura 5.6 - Fabbisogno di energia utile per il trattamento dell'aria di immissione

È possibile osservare che il fabbisogno complessivo della batteria di raffreddamento e deumidificazione risulta più elevato del fabbisogno per la climatizzazione estiva che considera soltanto lo scambio sensibile.

5.4 IPOTESI DI INTERVENTO

Parallelamente all'analisi energetica dell'edificio, è stata fatta una valutazione delle caratteristiche strutturali della struttura e della risposta a dei possibili eventi sismici. L'edificio allo stato pre-ristrutturazione risulta molto scadente anche dal punto di vista strutturale, infatti gli viene attribuita una classe di rischio "F".

Per ottenere un miglioramento dell'edificio dal punto di vista strutturale sono stati ipotizzati tre diversi livelli di intervento di adeguamento sismico:

- 1 – Interventi sulle murature che prevedono:
 - o Ammorsamento pareti
 - o Iniezioni di malta su pareti esterne
 - o Intonaco armato ed Iniezioni su pareti interne
- 2 – Interventi sui solai che prevedono:
 - o Ammorsamento pareti
 - o Consolidamento dei solai di ogni piano
- 3 – Interventi 1 e 2 combinati

Sulla base di questi interventi a livello strutturale sono state fatte delle ipotesi di intervento per il miglioramento delle prestazioni energetiche che andassero ad interessare gli stessi componenti strutturali. Inizialmente sono stati ipotizzati 5 diversi scenari per valutare la convenienza di un tipo di investimento rispetto a un altro:

- 1) – Intervento sull'involucro edilizio con isolamento interno dei muri esterni e sostituzione dei serramenti con finestre a basso consumo energetico. Questo tipo di intervento è pensato nel caso di intervento di consolidamento sismico sulle pareti verticali.
- 2.a) – Intervento sugli impianti con passaggio su solaio o sotto solaio, sostituzione del sistema di generazione e aggiunta impianto di trattamento aria e ventilazione meccanica. Questo tipo di intervento è pensato nel caso di intervento di consolidamento sismico dei solai.
- 2.b) – Variante dello scenario 2.a) che prevede anche la sostituzione dei serramenti.
- 3.a) – Interventi combinati degli scenari 1) e 2.a) nel caso di intervento di livello 3 a livello strutturale.

- 3.b) – Variante dello scenario 3.a) che prevede anche l'installazione di un impianto fotovoltaico per la produzione di energia elettrica. Questa variante è stata pensata in modo particolare per trasformare l'edificio in nZEB (a energia quasi zero), in modo da accedere a degli incentivi molto consistenti da parte del GSE.

Di seguito vengono presentati più nel dettaglio i diversi scenari di intervento.

5.4.1 Scenario 1: involucro opaco e trasparente

Lo *Scenario 1*, nel caso di intervento di rinforzo strutturale delle murature, prevede l'isolamento interno di tutte le mura perimetrali. Al fine di accedere agli incentivi previsti dal Conto Termico del GSE [16] è necessario che il valore di trasmittanza complessivo del muro isolato sia inferiore a $0.23 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Considerando di utilizzare come materiale isolante dei pannelli di lana di roccia, lo spessore di isolamento che garantisce di stare sotto al valore limite per l'ottenimento dell'incentivo va da un minimo di circa 13 cm nei muri più spessi a un massimo di 15 cm per le pareti più sottili.

Per quanto riguarda la sostituzione dei serramenti il valore limite massimo di trasmittanza termica delle chiusure trasparenti è pari a $1.30 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Si è ipotizzato di installare delle finestre con telaio in alluminio con taglio termico e tripli vetri 4/15/4/15/4 mm isolati con Argon. Riassumendo lo scenario prevede:

- Isolamento interno muri perimetrali: 13-15 cm lana di roccia, $U_{\text{parete}} = 0.22 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
- Serramenti con triplo vetro basso emissivo: $U_{\text{telaio}} = 1.2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ e $U_{\text{vetro}} = 0.6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
- Controsoffitto nelle zone climatizzate per diminuire il volume climatizzato

Un intervento di questo tipo andrà sicuramente a diminuire il fabbisogno di energia utile per la climatizzazione invernale, però senza nessuna azione sul sistema impiantistico i vari sottosistemi risultano sovradimensionati e ne consegue un peggioramento del rendimento globale, che di per sé è molto basso.

5.4.2 Scenario 2.a: impianti e solai

Lo *Scenario 2.a*, nel caso di intervento di rinforzo sui solai, prevede di sostituire gli impianti di generazione e i terminali di impianto esistenti con dei sistemi più efficienti. Inoltre prevede l'isolamento dei solai verso le zone non climatizzate, quindi il pavimento del piano rialzato e il soffitto del secondo piano. Gli interventi previsti sono:

- Impianti radianti a pavimento in sostituzione ai radiatori

- Pompa di calore aria-acqua invertibile in sostituzione alla caldaia, con possibilità di funzionamento anche in regime di raffrescamento estivo
- Unità di trattamento aria e canali di distribuzione dell'aria per ventilazione meccanica
- Isolamento termico dei solai (10-13 cm lana di roccia) verso le zone non climatizzate
- Controsoffitto nelle zone climatizzate per diminuire il volume climatizzato

Questo tipo di intervento va ad agire lato impianti, quindi il fabbisogno di energia utile rimane pressoché lo stesso dell'edificio iniziale, ma un più elevato rendimento globale permette di avere una minore richiesta di energia primaria. Inoltre con l'aggiunta dell'impianto di ventilazione e la possibilità di invertire il funzionamento della pompa di calore si ha un miglioramento a livello di comfort degli ambienti interni.

5.4.3 Scenario 2.b: impianti, solai e serramenti

Lo *Scenario 2.b* è una variante nel caso di intervento di rinforzo strutturale dei solai e prevede gli stessi interventi agli impianti proposti dallo *Scenario 2.a* con l'aggiunta della sostituzione dei serramenti. La tipologia di finestra è la stessa riportata nello *Scenario 1*. Rispetto alla prima variante (2.a) si va ad intervenire anche sull'involucro, diminuendo di fatto il fabbisogno di energia utile. La scelta potrà dipendere dall'incremento del beneficio ottenuto e dalla convenienza economica dell'investimento.

5.4.4 Scenario 3.a: involucro e impianti

Lo *Scenario 3.a*, in caso di intervento di adeguamento sismico combinato sulle murature e sui solai, comprende gli interventi previsti dai primi due scenari, quindi:

- Isolamento pareti e solai verso zone non climatizzate
- Sostituzione serramenti
- Impianto radiante a pavimento
- Pompa di calore
- Impianto di trattamento aria e canali per la ventilazione meccanica
- Controsoffitto

Questo scenario garantisce una diminuzione del fabbisogno di energia utile e un miglioramento dell'efficienza degli impianti, che vengono dimensionati sul fabbisogno effettivo e non si ha il problema dei vecchi impianti sovradimensionati con un rendimento del sistema globale ancora più penalizzato. Inoltre, anche in questo caso, c'è un miglioramento a livello di comfort e benessere degli ambienti interni.

5.4.5 Scenario 3.b: involucro, impianti e fotovoltaico

Lo *Scenario 3.b* è una variante dello *Scenario 3.a* previsto nel caso di intervento complessivo sulle strutture verticali e orizzontali dell'edificio. Si presume di attuare gli stessi interventi dell'altro scenario e in aggiunta l'installazione di un impianto fotovoltaico sul tetto per la produzione di energia elettrica. Questo scenario è stato ipotizzato per poter raggiungere lo stato di edificio nZEB, siccome il Conto Termico mette a disposizione un incentivo sostanzioso nel caso di trasformazione degli edifici esistenti in "edifici a energia quasi zero".

Vista la geometria del tetto a falde dell'edificio si è deciso di posizionare i moduli fotovoltaici nella falda maggiormente estesa dell'edificio, quella della facciata principale. Purtroppo non è l'esposizione migliore possibile, infatti la falda è orientata con un angolo di 79 gradi Ovest rispetto al Sud e un'inclinazione di 20°. Questa è comunque stata ritenuta la scelta più adatta dal punto di vista pratico, poiché le altre falde non sono molto estese e potrebbero incorrere in ombreggiamenti (in modo particolare per l'ala Est dell'edificio) che penalizzerebbero notevolmente la resa complessiva dell'impianto. La potenza di picco che si riesce a raggiungere sfruttando al meglio la superficie del tetto è di circa 76 kW.

Anche in questo caso, come per gli scenari 2, la scelta ricadrà sull'intervento che garantisce il miglior compromesso tra il beneficio ottenuto e la convenienza economica. L'analisi dei risultati ottenuti attraverso la simulazione dei diversi scenari di intervento e la valutazione economica in termini di costi e convenienza dell'investimento viene riportata nel capitolo successivo.

6 ANALISI COSTI-BENEFICI

In questo capitolo si riportano inizialmente i risultati del fabbisogno di energia utile per riscaldamento e raffrescamento ottenuti dai modelli in *TRNSYS* dei 5 diversi scenari proposti e i relativi indici di prestazione e classi energetiche ottenuti in *Edilclima*.

Successivamente si è voluta effettuare una valutazione dei costi di intervento per i diversi scenari e del beneficio economico generato da ogni scenario senza considerare gli incentivi attualmente in vigore in Italia per l'efficientamento degli edifici. Si è constatato che alcuni tipi di interventi, anche se garantiscono un buon miglioramento delle prestazioni a livello di consumi, non sono recuperabili nel tempo perché non producono un sufficiente risparmio annuo in termini di spesa energetica. Altri interventi invece, anche se non rendono l'edificio ottimo a livello prestativo, permettono di avere un tempo di ritorno più breve e quindi risultano economicamente più vantaggiosi.

Infine è stata fatta la stessa valutazione, considerando però anche gli incentivi previsti dal Conto Termico del GSE per gli interventi atti a migliorare l'efficienza energetica degli edifici. Le spese di adeguamento sismico fanno parte delle spese ammissibili al fine del calcolo dell'incentivo, quindi un intervento combinato in ambito energetico e strutturale risulta più vantaggioso.

6.1 RISULTATI FABBISOGNO E RISPARMIO ANNUO

In questa sezione si presentano i risultati relativi al fabbisogno di energia utile per la climatizzazione estiva e invernale per i diversi scenari proposti nel § 5.4. Per ottenere i seguenti è stato utilizzato lo stesso modello *TRNSYS* utilizzato per l'edificio allo stato pre-ristrutturazione, modificando i vari componenti dell'involucro (pareti, finestre) e la ventilazione delle zone termiche nel caso di intervento con installazione dell'impianto di ventilazione meccanica. Per valutare la spesa annua, a partire dal fabbisogno di energia utile, si è valutato, attraverso i rendimenti globali stagionali, il fabbisogno di energia in ingresso alla generazione e il relativo costo del vettore energetico con il quale viene alimentato. Nel computo dei costi energetici dell'edificio si è tenuto conto anche dell'energia necessaria per la produzione di acqua calda sanitaria e per l'illuminazione anche se non sono previsti interventi sui corpi illuminanti.

6.1.1 Scenario 0

Si considera come *Scenario 0* l'edificio allo stato pre-interventi. Il fabbisogno di energia utile è quello riportato nella Tabella 5.10 ed è pari a 317.56 MWh annui per la climatizzazione invernale e 11.88 MWh annui per la climatizzazione estiva. Il rendimento globale medio stagionale dell'impianto di riscaldamento è pari al 55.8%. Il costo per la produzione di un kWh termico con l'utilizzo del metano è di 0.11 €/kWh.

Per quanto riguarda l'ACS è stato utilizzato un rendimento globale medio stagionale pari al 65% e considerato un prezzo di 0.11 €/kWh. Per quanto riguarda l'illuminazione invece si è considerato un prezzo dell'energia elettrica di 0.22 €/kWh. Nella tabella seguente si riportano i risultati ottenuti per lo *Scenario 0*:

Tabella 6.1 - Dettaglio consumi e costi per servizio energetico Scenario 0

Servizio	Energia utile	Energia finale	Costo energia	Spesa annua
	[MWh]	[MWh]	[€/kWh]	[k€]
Riscaldamento	317.56	569.08	0.11	62.60
Raffrescamento	11.88	-	-	-
ACS	7.37	11.34	0.11	1.25
Illuminazione	57.84	57.84	0.22	12.72
<i>Totale</i>				76.57

La spesa annua dello *Scenario 0* è il valore di partenza dalla quale viene calcolato il risparmio annuo per ogni diverso scenario proposto.

6.1.2 Scenario 1

Lo *Scenario 1* prevede di andare a intervenire soltanto sull'involucro esterno dell'edificio (pareti, finestre) e sul controsoffitto. Si riporta il risultato del fabbisogno mensile di energia utile per riscaldamento e raffrescamento rapportato all'edificio iniziale. Si ricorda che, non intervenendo sugli impianti, non è presente un sistema di climatizzazione estiva, quindi il fabbisogno di energia per il raffrescamento è soltanto indicativo. Come specificato nel § 5.4.1 un intervento di questo tipo porta a una minore richiesta di energia utile da parte dell'edificio, ma produce peggioramento del rendimento globale medio stagionale degli impianti che si ritrovano ad essere sovradimensionati. Per l'impianto di riscaldamento si è considerato un rendimento pari al 44.03% (emissione = 0.903; regolazione = 0.64; distribuzione = 0.919; generazione = 0.829) mentre per la produzione di ACS si è mantenuto un rendimento del 65%. Si riportano i risultati dello *Scenario 1*:

Tabella 6.2 - Dettaglio consumi, costi e risparmio annuo per servizio energetico Scenario 1

Servizio	Energia utile [MWh]	Energia finale [MWh]	Costo energia [€/kWh]	Spesa annua [k€]	Risparmio [k€]	Risparmio relativo [%]
Riscaldamento	100.04	227.21	0.11	22.99	37.61	60.07
Raffrescamento	13.49	-	-	-	-	-
ACS	7.37	11.34	0.11	1.25	0	0
Illuminazione	57.84	57.84	0.22	12.72	0	0
Totale				38.97	37.61	49.11

L'unico miglioramento a livello sia di consumi che di costi è dato dalla minore spesa annua per il riscaldamento. La richiesta di ACS rimane invariata e l'impianto di generazione è lo stesso. La stessa cosa succede per la spesa per l'illuminazione dato che non è previsto nessun intervento di sostituzione dei corpi illuminanti e la richiesta è invariata.

Dal modello in *Edilclima* sono stati determinati la classe e l'indice di prestazione: l'edificio diventa in classe "C" con un indice di prestazione energetica $EP_{gl,nren} = 74.79 \text{ kWh/m}^2\text{a}$.

6.1.3 Scenario 2.a

Lo *Scenario 2.a* prevede di andare intervenire sugli impianti esistenti, con l'aggiunta dei sistemi di raffrescamento e ventilazione meccanica. Questo comporta sicuramente un aumento del fabbisogno di energia utile dovuti agli impianti che non erano presenti nell'edificio iniziale, quindi un semplice confronto della spesa annua non rende propriamente l'idea del miglioramento ottenuto, perché c'è da considerare un miglioramento del benessere e del comfort interno. Rispetto allo *Scenario 0* il fabbisogno di energia utile rimane comunque

elevato anche se diminuisce di poco per via dell'isolamento dei solai verso i locali non climatizzati e per la diminuzione del volume climatizzato grazie al controsoffitto. La gran parte della diminuzione dei consumi finali è però dovuta all'efficienza molto più elevata degli impianti. I rendimenti utilizzati per la determinazione del fabbisogno di energia finale sono:

- Riscaldamento: $\eta = 3.03$, che comprende:
 - η emissione = 0.99, pannelli radianti a pavimento
 - η regolazione = 0.95, regolazione a banda proporzionale
 - η distribuzione = 0.91, montanti
 - η generazione = 3.5, pompa di calore aria/acqua
- Raffrescamento: $\eta = 2.84$, considerando gli stessi rendimenti dei sottosistemi, ma un rendimento di generazione di 3.2
- Acqua calda sanitaria: $\eta = 3.2$
- Ventilazione: $\eta = 2.8$

Il costo unitario dell'energia è quello dell'energia elettrica, poiché tutti gli impianti sono alimentati a elettricità, pari a 0.22 €/kWh. Si riportano i risultati dello *Scenario 2.a*:

Tabella 6.3 - Dettaglio consumi, costi e risparmio annuo per servizio energetico Scenario 2.a

Servizio	Energia utile [MWh]	Energia finale [MWh]	Costo energia [€/kWh]	Spesa annua [k€]	Risparmio [k€]	Risparmio relativo [%]
Riscaldamento	257.45	85.1	0.22	18.72	43.88	70.09
Raffrescamento	13.56	4.77	0.22	1.05	-1.05	-100
ACS	7.37	2.3	0.22	0.51	0.74	59.38
Ventilazione	25.47	9.73	0.22	2.14	-2.14	-100
Illuminazione	57.84	57.84	0.22	12.72	0	0
<i>Totale</i>				35.15	41.43	54.1

Nonostante si abbia una spesa aggiuntiva dovuta agli impianti di trattamento e distribuzione dell'aria e di raffrescamento, si ha un notevole risparmio annuo per il riscaldamento. Il risparmio annuo generato risulta superiore al 50% e la spesa per l'illuminazione inizia ad assumere un peso non indifferente sulla spesa annua complessiva (36%).

Dal modello in *Edilclima* sono stati determinati la classe e l'indice di prestazione: l'edificio diventa in classe "C" con un indice di prestazione energetica $EP_{gl,nren} = 133.90$ kWh/m²a.

L'indice di prestazione risulta molto più elevato di quello dello *Scenario 1*, però tiene conto anche del fatto che sono presenti anche dei servizi energetici non previsti nell'edificio iniziale.

6.1.4 Scenario 2.b

Lo *Scenario 2.b* è una variante dello *Scenario 2.a* e prevede gli stessi interventi con in più la sostituzione delle chiusure trasparenti con finestre a basso consumo, che permettono di ridurre il fabbisogno di energia utile per riscaldamento e climatizzazione estiva. I valori dei rendimenti sono gli stessi dello *Scenario 2.a*, infatti gli impianti e i loro sottosistemi sono gli stessi. Si riportano nella tabella seguente i risultati dello *Scenario 2.b*:

Tabella 6.4 - Dettaglio consumi, costi e risparmio annuo per servizio energetico Scenario 2.b

Servizio	Energia utile [MWh]	Energia finale [MWh]	Costo energia [€/kWh]	Spesa annua [k€]	Risparmio [k€]	Risparmio relativo [%]
Riscaldamento	182.33	60.27	0.22	13.26	49.34	78.82
Raffrescamento	12.52	4.40	0.22	0.97	-0.97	-100
ACS	7.37	2.30	0.22	0.51	0.74	59.38
Ventilazione	25.47	9.73	0.22	2.14	-2.14	-100
Illuminazione	57.84	57.84	0.22	12.72	0	0
Totale				29.60	46.97	61.34

Rispetto alla variante *2.a* lo *Scenario 2.b* permette di raggiungere un risparmio annuo complessivo del 61%. Maggiore è il risparmio prodotto e più elevato è il contributo dell'illuminazione sulla spesa complessiva (42%).

Dal modello in *Edilclima* sono stati determinati la classe e l'indice di prestazione: l'edificio diventa in classe "B" con un indice di prestazione energetica $EP_{gl,nren} = 113.89 \text{ kWh/m}^2\text{a}$.

6.1.5 Scenario 3.a

Lo *Scenario 3.a* prevede interventi combinati sull'involucro e sugli impianti che caratterizzano gli scenari 1 e 2. Si riduce il fabbisogno di energia utile per il riscaldamento, ma aumenta leggermente quello per il raffrescamento. Gli impianti vengono sostituiti e quindi anche il problema del sovradimensionamento e del basso rendimento globale medio stagionale che si presenta nello *Scenario 1* viene evitato. I rendimenti di conversione da energia utile a energia finale sono gli stessi considerati nello *Scenario 2.a*. Si riportano nella tabella di seguito i risultati dello *Scenario 3.a*:

Tabella 6.5 - Dettaglio consumi, costi e risparmio annuo per servizio energetico Scenario 3.a

Servizio	Energia utile [MWh]	Energia finale [MWh]	Costo energia [€/kWh]	Spesa annua [k€]	Risparmio [k€]	Risparmio relativo [%]
Riscaldamento	88.15	29.14	0.22	6.41	56.19	89.76
Raffrescamento	19.28	6.78	0.22	1.49	-1.49	-100
ACS	7.37	2.30	0.22	0.51	0.74	59.38
Ventilazione	25.47	9.73	0.22	2.14	-2.14	-100
Illuminazione	57.84	57.84	0.22	12.72	0	0
Totale				23.28	53.30	69.60

Il risparmio annuo complessivo rispetto al caso dell'edificio iniziale raggiunge quasi il 70% e il contributo dell'illuminazione sulla spesa complessiva supera il 54%, diventando di fatto la spesa energetica predominante.

Dal modello in *Edilclima* sono stati determinati la classe e l'indice di prestazione: l'edificio diventa in classe "A2" con un indice di prestazione energetica $EP_{gl,nren} = 65.68 \text{ kWh/m}^2\text{a}$.

6.1.6 Scenario 3.b

Lo *Scenario 3.b* è la variante dello *Scenario 3.a* che permette di trasformare l'edificio in nZEB aggiungendo un impianto di produzione di energia elettrica rinnovabile in modo da garantire la copertura di almeno il 55% del fabbisogno da energia rinnovabile. Sostanzialmente il fabbisogno di energia utile è lo stesso di quello dello *Scenario 3.a* però parte di esso viene coperto attraverso l'autoconsumo dell'energia prodotta dall'impianto. Per effettuare una valutazione della spesa annua complessiva è stato necessario suddividere i consumi in intervalli mensili proprio per valutare la quantità di energia autoconsumata e la quantità di energia immessa in rete. Per valutare il fabbisogno di energia finale dei vari servizi energetici è stato utilizzato, per semplicità, sempre il rendimento globale medio stagionale senza considerare la variazione dovuta ai carichi più o meno parziali e all'intermittenza. La produzione mensile di energia elettrica dei pannelli è quella calcolata dal software *Edilclima*. L'energia che non è possibile auto consumare viene immessa nella rete elettrica e quindi venduta. Si può considerare un prezzo di vendita dell'energia elettrica prodotta da fotovoltaico di 0.05 €/kWh. Bisogna comunque precisare che non si è tenuto conto nel calcolo dei consumi energetici dovuti ad esempio ai computer e altre macchine all'interno dell'edificio, quindi in realtà l'energia autoconsumata potrebbe essere maggiore. Nella tabella seguente sono riportati i valori mensili di energia finale consumati e prodotti:

Tabella 6.6 - Dettaglio mensile consumi e produzione di energia finale

Mese	E_H [kWh]	E_C [kWh]	E_W [kWh]	E_v [kWh]	E_{ill} [kWh]	E_{PV} [kWh]
Gennaio	6653	0	192	508	4320	1753
Febbraio	7560	0	174	446	4800	3926
Marzo	6276	0	192	380	5280	6034
Aprile	1611	0	186	247	5040	8136
Maggio	0	1	192	814	5520	10153
Giugno	0	419	186	1298	5040	10167
Luglio	0	2971	192	1928	5280	12243
Agosto	0	2056	192	1121	3120	10424
Settembre	0	1337	186	2260	4800	7455
Ottobre	35	0	192	50	5520	5411
Novembre	1627	0	186	272	5280	3004
Dicembre	5378	0	192	409	3840	2289
TOTALE	29138	6783	2263	9733	57840	80995

Con riferimento alla Tabella 6.6 si ha:

- E_H : fabbisogno di energia finale per il riscaldamento
- E_C : fabbisogno di energia finale per il raffrescamento
- E_W : fabbisogno di energia finale per la produzione di ACS
- E_v : fabbisogno di energia finale per il trattamento dell'aria e la ventilazione
- E_{ill} : fabbisogno di energia finale per l'illuminazione
- E_{PV} : energia elettrica prodotta dall'impianto fotovoltaico

Si può osservare che nei mesi invernali l'energia richiesta per i vari servizi energetici è maggiore di quella prodotta dall'impianto fotovoltaico, mentre durante i mesi estivi si ha un'inversione di tendenza, con un surplus di energia prodotta che deve essere immessa in rete. Il bilancio mensile è dato dalla seguente relazione:

$$E_{tot} = E_H + E_C + E_W + E_v + E_{ill} - E_{PV}$$

Nel caso in cui l'energia totale sia positiva si calcola una spesa al costo unitario di 0.22 €/kWh, mentre nel caso in cui sia negativo significa che l'energia viene immessa in rete e si calcola un costo unitario di vendita di 0.05 €/kWh.

Tabella 6.7 - Dettaglio mensile dei consumi complessivi e della spesa per l'energia

Mese	E_{tot} [kWh]	Spesa mensile [€]	Ricavo mensile [€]
Gennaio	9920	2182.44	0
Febbraio	9053	1991.66	0
Marzo	6094	1340.75	0
Aprile	-1053	0	52.64
Maggio	-3626	0	184.77
Giugno	-3225	0	166.79
Luglio	-1872	0	101.87
Agosto	-3935	0	201.55
Settembre	1127	205.43	0
Ottobre	386	85.02	0
Novembre	4361	959.33	0
Dicembre	7530	1656.61	0
TOTALE	-	8421	708

La spesa complessiva dello *Scenario 3.b* è data dalla differenza tra il totale della spesa mensile e il totale del ricavo mensile, ovvero 7714 € che, a fronte di una spesa complessiva di circa 76 mila euro dello *Scenario 0*, genera un risparmio annuo pari a 69.13 k€ ovvero una diminuzione del 90.28%.

Dal modello in *Edilclima* sono stati determinati la classe e l'indice di prestazione: l'edificio diventa in classe "A4" con un indice di prestazione energetica $EP_{gl,nren} = 22.26 \text{ kWh/m}^2\text{a}$. L'edificio inoltre viene trasformato in edificio a energia quasi zero poiché rispetta i limiti di legge previsti per gli edifici nZEB, tra cui la copertura del fabbisogno per almeno il 55% da fonti di energia rinnovabili (si raggiunge il 55.13%).

6.1.7 Riepilogo

I cinque scenari proposti sulla base dei tre diversi livelli di intervento di adeguamento sismico permettono di ottenere dei benefici in termini di consumi di energia finale e quindi di minore costo annuo relativo ai vari servizi energetici. C'è anche da considerare che alcuni scenari permettono di raggiungere un miglior livello di comfort e benessere degli ambienti interni pur garantendo un risparmio annuo rispetto alla situazione iniziale dell'edificio. In questa fase non è stato considerato il costo di investimento iniziale dei vari scenari, analisi che verrà svolta nel paragrafo successivo insieme alla valutazione della convenienza economica degli interventi,

ma ci si è limitati a stimare i benefici generati da questi. Di seguito viene riportata una tabella riassuntiva dei benefici prodotti dai diversi scenari:

Tabella 6.8 - Riepilogo benefici interventi e risparmio annuo

	<i>Scenario</i>	<i>Scenario</i>	<i>Scenario</i>	<i>Scenario</i>	<i>Scenario</i>	<i>Scenario</i>
	<i>0</i>	<i>1</i>	<i>2.a</i>	<i>2.b</i>	<i>3.a</i>	<i>3.b</i>
<i>Indice di prestazione</i> <i>[kWh/m²a]</i>	216.54	74.79	133.9	113.89	65.68	22.26
<i>Spesa annua</i> <i>[k€/anno]</i>	76.57	38.97	35.01	29.46	23.14	7.44
<i>Risparmio annuo</i> <i>[k€/anno]</i>	0.00	37.61	41.57	47.11	53.44	69.13
<i>Servizi aggiuntivi:</i> <i>Raffrescamento, ventilazione</i>	-	-	✓	✓	✓	✓
<i>Classe</i> <i>energetica</i>	G	C	C	B	A2	A4

6.2 COSTI DI INVESTIMENTO E TEMPO DI RITORNO

In questo paragrafo si presenta il modo in cui sono stati valutati i costi dei diversi interventi applicati nei vari scenari di riqualificazione. È stato valutato separatamente ogni intervento per poi determinare il costo complessivo di ogni singolo scenario. Infine si è effettuata una stima dei tempi di ritorno e della convenienza economica degli investimenti.

6.2.1 Costo singoli interventi

6.2.1.1 Isolamento pareti verticali

Per la coibentazione dei muri perimetrali è previsto l'utilizzo di pannelli di lana di roccia dello spessore di 13-15 cm e di una barriera al vapore in cartone bitumato per limitare la formazione di condensa e la generazione di muffe. La superficie totale di intervento è pari a 2994 m² e si può considerare un costo unitario per la fornitura dei materiali e la messa in opera pari a 55 €/m² per un costo complessivo di 164'661 euro.

6.2.1.2 Isolamento solai verso locali non climatizzati

La coibentazione dei solai prevede sempre l'utilizzo di pannelli di lana di roccia di 10-15 cm. La superficie di intervento comprende il solaio del piano rialzato e il solaio del sottotetto per un totale di 2292 m². Considerando un costo unitario per fornitura e messa in opera dei materiali di 55 €/m² si ottiene un costo complessivo di 126'052 euro.

6.2.1.3 Sostituzione serramenti

La sostituzione dei serramenti prevede l'installazione di finestre con telaio in alluminio e triplo vetro isolato con Argon. Si è considerato un costo unitario di fornitura e installazione pari a 800 €/m² per una superficie totale di intervento di 537 m². Il costo complessivo risulta quindi essere pari a 429'576 euro.

6.2.1.4 Pompa di calore

Per quanto riguarda il costo per la pompa di calore è stato scelto un valore uguale per tutti gli scenari anche se teoricamente la potenza richiesta dall'edificio non è costante al variare degli scenari. Si è considerato un valore arbitrario di potenza di circa 220 kW termici, da cui ne consegue un costo di investimento di 125'000 euro.

6.2.1.5 Unità di trattamento aria e canali di ventilazione

Per l'unità di trattamento aria si è considerato un costo complessivo di 40'000 euro. Per quanto riguarda i canali per la distribuzione dell'aria negli ambienti si è calcolata la quantità di materiale a partire dalla portata di ventilazione. Considerando una portata complessiva di

6376.61 m³/h e una velocità massima dell'aria di 6 m/s è possibile ricavare la sezione del canale principale, pari a 0.295 m². Da questa, suddividendo la portata equamente nei tre piani climatizzati si ottiene una sezione dei canali di distribuzione principali di circa 0.1 m². Ipotizzando di utilizzare dei canali rettangolari di altezza 20 cm e larghezza 50 cm si ha un perimetro di 1.4 m per ogni canale. La lunghezza complessiva dei canali può essere stimata attorno ai 250 m, che moltiplicati per il perimetro di un canale restituiscono una superficie complessiva di 350 m² di canali preisolati. Considerando un costo unitario di 35 €/m² si ottiene una spesa di circa 12'000 euro. Questo valore è da moltiplicare per un fattore 4 per tenere conto di altre spese per il completamento dell'impianto (bocchette, ecc.), quindi si ottiene un costo complessivo per la canalizzazione di 49'000 €, che sommati all'UTA portano ad un costo di investimento per l'impianto di trattamento e distribuzione dell'aria di 89'000 euro.

6.2.1.6 Impianto radiante a pavimento

L'intervento sui terminali di impianto riguarda il pavimento di tre piano, per una superficie complessiva di circa 3300 m². Il costo unitario di fornitura e posa in opera si può considerare di 60 €/m², da cui ne deriva un costo complessivo di 198'000 euro.

6.2.1.7 Controsoffitto

L'intervento che prevede l'installazione del controsoffitto interessa la stessa superficie relativa all'impianto radiante solo che l'intervento è fatto sul soffitto invece che sul pavimento. Il costo unitario per la fornitura dei materiali e la posa in opera si può valutare intorno ai 40 €/m², che determina un costo complessivo di intervento pari a 132'000 euro.

6.2.1.8 Impianto fotovoltaico

La potenza complessiva dei moduli fotovoltaici è di 76 kW e considerando un costo unitario di circa 1500 €/kW_p si ottiene un costo complessivo di 114'000 euro.

6.2.2 Investimento complessivo scenari

Il costo complessivo di ogni scenario ipotizzato è dato dalla somma del costo dei singoli interventi. La valutazione di questi costi comunque non tiene conto di altri costi secondari derivanti dai costi di assicurazione, finanziamento, ecc. Si è tenuto conto soltanto del costo derivante dalla fornitura dei materiali e dalla messa in opera degli stessi. Si riporta di seguito una tabella riassuntiva dei costi da sostenere per la realizzazione dei diversi scenari.

Tabella 6.9 - Interventi per singolo scenario e costo complessivo

Intervento	Costo intervento	Scenario	Scenario	Scenario	Scenario	Scenario
	[k€]	1	2.a	2.b	3.a	3.b
Isolamento muri	164.66	✓	-	-	✓	✓
Isolamento solai	126.05	-	✓	✓	✓	✓
Serramenti	429.58	✓	-	✓	✓	✓
Pompa di calore	125	-	✓	✓	✓	✓
UTA e canali	89	-	✓	✓	✓	✓
Impianto radiante	198	-	✓	✓	✓	✓
Controsoffitto	132	✓	✓	✓	✓	✓
Fotovoltaico	114	-	-	-	-	✓
TOTALE [k€]	-	726.24	670.05	1099.63	1264.29	1378.29

Lo scenario meno oneroso dal punto di vista economico è lo *Scenario 2.a*, mentre quello che comporta la spesa maggiore è ovviamente quello che comprende tutti gli interventi. Si può osservare come l'intervento che riguarda la sostituzione dei serramenti sia di gran lunga quello che implica l'esborso più alto, addirittura 2 o volte il costo degli altri interventi. Questo influirà sui tempi di ritorno degli scenari che comprendono questo intervento, infatti il beneficio ottenuto dalla sostituzione delle finestre non riesce a ripagare la spesa iniziale sostenuta.

6.2.3 Convenienza economica degli interventi

Per valutare la convenienza degli investimenti e il loro tempo di ritorno sono stati utilizzati degli indici economici basandosi sul risparmio annuo generato dalla minore spesa rispetto allo stato iniziale dell'edificio.

Una prima valutazione per determinare il tempo di ritorno dell'investimento può essere fatta tramite il pay-back, determinato dalla seguente relazione:

$$PB = \frac{\text{Investimento iniziale}}{\text{Risparmio annuo}}$$

Questo indice economico è molto semplice da valutare, ma non tiene conto di fattori legati alle disponibilità che si verificano dopo il recupero dell'investimento e non valorizza il tempo, cosa che in investimenti di questo tipo con tempi di ritorno dell'ordine delle decine di anni non è da trascurare. Per una valutazione più completa e precisa, che tiene conto anche dell'attualizzazione dei flussi di cassa futuri, è stato calcolato il valore attuale netto VAN, che richiede di definire ex ante un tasso di attualizzazione "a", sulla base del costo opportunità del denaro e del fattore di rischio dell'intervento. Inoltre solitamente viene definito un tempo di

calcolo “n” pari agli anni di vita utile dell’investimento. È Possibile determinare il VAN secondo la seguente relazione:

$$VAN = -I_0 + \sum_{j=1}^n \frac{D_j}{(1+a)^j}$$

Dove:

- I_0 : è la spesa sostenuta per la realizzazione dello scenario di intervento
- D_j : è il flusso di cassa generato all’anno j-esimo
- n : è il numero di anni di vita utile
- a : è il tasso di attualizzazione

Considerando il flusso di cassa costante derivante dal risparmio annuo “R” si può riscrivere il VAN come:

$$VAN = -I_0 + R \cdot \sum_{j=1}^n \frac{1}{(1+a)^j}$$

Se il VAN risulta positivo significa che l’investimento è accettabile, mentre se risulta negativo non è conveniente. Per confrontare diversi investimenti tra loro, e quindi i vari scenari proposti, è possibile utilizzare l’indice di profittabilità, dato dal VAN diviso il costo iniziale di investimento:

$$IP = \frac{R}{I_0} \cdot \sum_{j=1}^n \frac{1}{(1+a)^j} - 1$$

Il valore di “n” per cui si azzerava il VAN, fissato il tasso di attualizzazione “a”, si può considerare il come il tempo di ritorno dell’investimento tenendo conto anche di fattori quale il tempo e altre variabili. Utilizzando un tasso di attualizzazione nullo si ottiene esattamente il valore del tempo di ritorno calcolato con la formula del pay-back semplice.

Per la valutazione dei tempi di ritorno e della convenienza dei diversi scenari di intervento ipotizzati per l’edificio si è considerato un tasso di attualizzazione del 3% valutato su un intervallo temporale di 30 anni. I risultati ottenuti evidenziano quanto specificato in precedenza riguardo l’intervento di sostituzione dei serramenti in quanto l’elevato costo di investimento iniziale per l’installazione delle finestre non viene ripagato in termini di risparmio annuo. Si riportano di seguito i risultati della valutazione economica dei diversi scenari.

Tabella 6.10 - Indici economici dei diversi scenari proposti

	Scenario 1	Scenario 2.a	Scenario 2.b	Scenario 3.a	Scenario 3.b
Risparmio annuo [k€]	37.61	41.57	47.11	53.44	69.13
Costo iniziale [k€]	734.24	672.55	1102.13	1266.79	1380.79
Pay-back [anni]	19.52	16.18	23.40	23.71	19.97
VAN [k€]	10.85	144.65	-176.27	-216.94	-23.33
Indice profittabilità	0.01	0.22	-0.16	-0.17	-0.02
PB attualizzato [anni]	29.30	22.36	40.76	41.86	30.84

Secondo il pay-back il tempo di ritorno di tutti gli scenari risulta compreso tra i 16 e i 24 anni e si potrebbe considerare un valore accettabile considerando la vita utile degli interventi effettuati. Però se si considera il tasso di attualizzazione le cose cambiano, infatti soltanto gli scenari 1 e 2.a risultano economicamente convenienti.

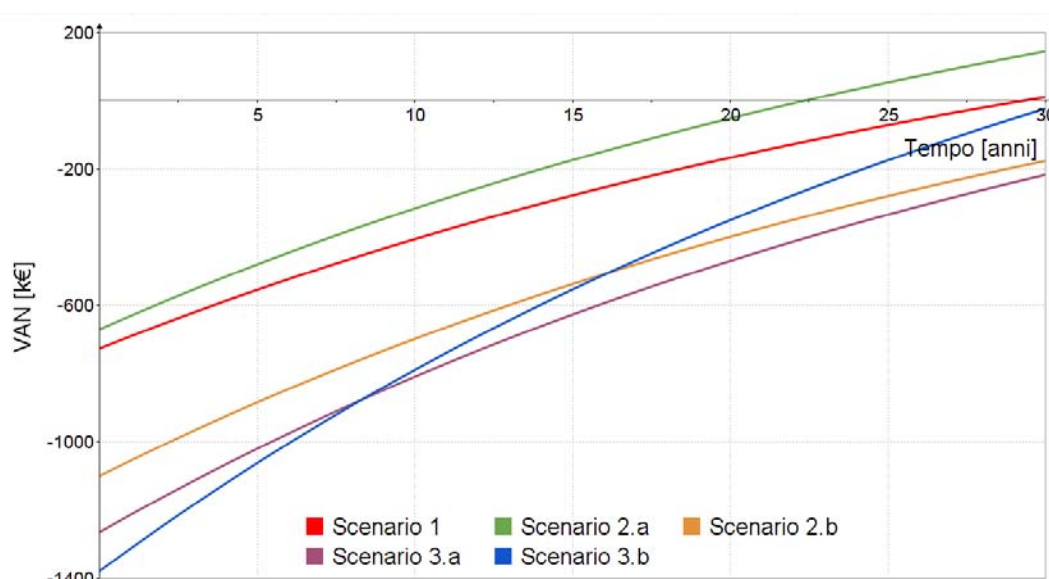


Figura 6.1 - Rappresentazione grafica del VAN per i diversi scenari di intervento

6.3 INCENTIVI E CONVENIENZA INVESTIMENTI

In questo paragrafo si presenta il metodo di calcolo degli incentivi previsti dal GSE nel Conto Termico per poi passare a una valutazione economica degli investimenti già presentata nel § 6.2, tenendo conto anche del flusso di cassa derivante dagli incentivi.

6.3.1 Calcolo degli incentivi

Per gli interventi di efficientamento energetico negli edifici esistenti sono previsti degli incentivi da parte del GSE. In modo particolare sono incentivabili gli interventi incremento dell'efficienza energetica in edifici esistenti, parti di essi o unità immobiliari esistenti (art. 4, comma 1) e gli interventi di piccole dimensioni di produzione di energia termica da fonti rinnovabili e di sistemi ad alta efficienza realizzati in edifici esistenti, parti di essi o unità immobiliari esistenti (art. 4, comma 2):

Categoria	Sigla (*)	Tipologia di intervento	Riferimenti Decreto
1 - interventi di incremento dell'efficienza energetica in edifici esistenti parti di essi o unità immobiliari esistenti	1.A	Isolamento termico di superfici opache delimitanti il volume climatizzato	Art. 4, comma 1, lettera a)
	1.B	Sostituzione di chiusure trasparenti comprensive di infissi delimitanti il volume climatizzato	Art. 4, comma 1, lettera b)
	1.C	Sostituzione di impianti di climatizzazione invernale con generatori di calore a condensazione	Art. 4, comma 1, lettera c)
	1.D	Installazione di sistemi di schermatura e/o ombreggiamento di chiusure trasparenti con esposizione da ESE a O, fissi o mobili, non trasportabili	Art. 4, comma 1, lettera d)
	1.E	Trasformazione in "edifici a energia quasi zero"	Art. 4, comma 1, lettera e)
	1.F	Sostituzione di sistemi per l'illuminazione di interni e delle pertinenze esterne esistenti con sistemi di illuminazione efficienti	Art. 4, comma 1, lettera f)
	1.G	Installazione di tecnologie di gestione e controllo automatico (<i>building automation</i>) degli impianti termici ed elettrici, inclusa l'installazione di sistemi di termoregolazione e contabilizzazione del calore	Art. 4, comma 1, lettera g)

Figura 6.2 - Interventi di incremento dell'efficienza energetica in edifici esistenti (art.4, comma 1)

Il D.M. del 16 febbraio 2016 fornisce le regole applicative per il calcolo degli incentivi.

Gli interventi incentivabili dei diversi scenari proposti risultano essere:

- Isolamento muri verticali (tipologia 1.A)
- Isolamento solai verso locali non climatizzati (tipologia 1.A)
- Sostituzione serramenti (tipologia 1.B)
- Trasformazione in edificio nZEB (tipologia 1.E)
- Sostituzione della caldaia con pompa di calore (tipologia 2.A)

Categoria	Sigla (*)	Tipologia di intervento	Riferimenti Decreto
2 - interventi di piccole dimensioni di produzione di energia termica da fonti rinnovabili e di sistemi ad alta efficienza in edifici esistenti parti di essi o unità immobiliari esistenti	2.A	Sostituzione di impianti di climatizzazione invernale esistenti con impianti di climatizzazione invernale utilizzando pompe di calore elettriche o a gas, anche geotermiche (con potenza termica utile nominale fino a 2000 kW)	Art. 4, comma 2, lettera a)
	2.B	Sostituzione di impianti di climatizzazione invernale o di riscaldamento delle serre esistenti e dei fabbricati rurali esistenti con generatori di calore alimentati da biomassa (con potenza termica nominale fino a 2000 kW _t)	Art. 4, comma 2, lettera b)
	2.C	Installazione di collettori solari termici, anche abbinati a sistemi di solar cooling (con superficie solare lorda fino a 2500 m ²)	Art. 4, comma 2, lettera c)
	2.D	Sostituzione di scaldacqua elettrici con scaldacqua a pompa di calore	Art. 4, comma 2, lettera d)
	2.E	Sostituzione di impianti di climatizzazione invernale esistenti con sistemi ibridi a pompa di calore	Art. 4, comma 2, lettera e)

Figura 6.3 - Interventi di piccole dimensioni di produzione di energia termica da fonti rinnovabili e di sistemi ad alta efficienza (art.4, comma 2)

Si riportano di seguito il metodo utilizzato per il calcolo dell'incentivo e i risultati ottenuti.

6.3.1.1 Interventi 1.A: isolamento termico superfici opache

L'incentivo previsto dal Conto Termico per l'isolamento di coperture, solai e pareti perimetrali prevede che si raggiungano dei valori di trasmittanza termica delle superfici disperdenti massimi che variano a seconda della tipologia di superficie opaca e a seconda della zona climatica. Nelle ipotesi di intervento si è tenuto conto di questi valori limite al fine di poter accedere all'incentivo. La determinazione dell'incentivo viene fatta attraverso la seguente formula:

$$I_{tot} = \%_{spesa} \cdot C \cdot S_{int}$$

Dove:

- I_{tot} : è l'incentivo totale dell'intervento
- $\%_{spesa}$: è la percentuale incentivata sulla spesa totale
- C : è il costo specifico sostenuto, $\frac{\text{spesa sostenuta in €}}{\text{superficie oggetto di intervento}}$
- S_{int} : è la superficie oggetto di intervento

Il costo unitario massimo ammissibile è di 100 €/m² per l'isolamento dei solai e di 80 €/m² per l'isolamento interno delle pareti perimetrali. Tra le spese ammissibili ai fini del calcolo dell'incentivo sono comprese:

- fornitura e messa in opera di materiale coibente per il miglioramento delle caratteristiche termiche delle strutture esistenti, comprensiva dei costi sostenuti per le opere provvisorie e accessorie

- fornitura e messa in opera di materiali ordinari, necessari alla realizzazione di ulteriori strutture murarie a ridosso di quelle preesistenti realizzate contestualmente alle opere di cui al punto precedente, per il miglioramento delle caratteristiche termiche delle strutture esistenti
- demolizione e ricostruzione dell'elemento costruttivo, ove coerente con gli strumenti urbanistici vigenti
- prestazioni professionali connesse alla realizzazione degli interventi

Il costo specifico per gli interventi di adeguamento sismico è molto più elevato del costo specifico massimo ammissibile (circa 220 €/m² per le pareti verticali e 150 €/m² per i solai) quindi già solo considerando i costi strutturali occorre limitarsi al costo massimo per il calcolo dell'incentivo. Le superfici di intervento considerate sono le stesse utilizzate per il calcolo dei costi nel § 6.2.1. La percentuale di spesa ammissibile incentivabile per interventi realizzati in zona climatica E è del 50%, inoltre se oltre all'isolamento termico sono previsti interventi sul sistema di generazione la percentuale della spesa incentivabile è del 55% (scenari 2 e 3, ma non *Scenario 1*).

6.3.1.2 Interventi 1.B: sostituzione di chiusure trasparenti comprensive di infissi

Come per gli interventi di tipo 1.A è necessario, al fine di poter accedere agli incentivi, soddisfare dei requisiti minimi di trasmittanza dei quali si è tenuto conto nelle ipotesi sulla scelta degli interventi. La determinazione del valore dell'incentivo viene fatta come per gli interventi sulle superfici opache secondo la relazione:

$$I_{tot} = \%_{spesa} \cdot C \cdot S_{int}$$

Il costo specifico massimo ammissibile è di 450 €/m², che è minore del costo unitario utilizzato per la valutazione del costo della sostituzione dei serramenti. La percentuale di spesa incentivabile è pari al 40%, ma nel caso in cui si preveda anche l'isolamento delle superfici opache e un intervento sull'impianto di generazione arriva al 55% (scenari 2.b e 3a/b). In ogni caso l'incentivo complessivo massimo erogabile è di 100'000 € e nel caso di conteggio con percentuale incentivabile del 55% viene superato.

6.3.1.3 Interventi 1.E: Trasformazione degli edifici esistenti in nZEB

Per quanto riguarda questo tipo di incentivo l'intervento incentivabile consiste nella trasformazione degli edifici esistenti, dotati di impianto di climatizzazione, in "edifici a energia quasi zero" (nZEB). Tra le spese ammissibili ai fini del calcolo dell'incentivo ci sono tutte le spese che conseguono al miglioramento dell'efficienza energetica dell'edificio e sono

comprese anche (come per gli interventi di tipo 1.A) le spese relative a eventuali interventi di adeguamento sismico. L'incentivo viene calcolato secondo la seguente relazione:

$$I_{tot} = 65\% \cdot C \cdot S_{int}$$

In cui la superficie oggetto di intervento è da considerarsi la superficie utile calpestabile pari a 3300 m². Il costo specifico massimo ammissibile, per interventi in zona climatica E, è di 575 €/m². Considerando i costi di adeguamento strutturale (oltre 1.5 milioni di €), i costi di isolamento delle superfici opache delimitanti il volume climatizzato e i costi di sostituzione dei serramenti, il costo specifico ottenuto risulta maggiore del costo massimo ammissibile, quindi ai fini del calcolo viene utilizzato il valore limite.

6.3.1.4 Interventi 2.A: Sostituzione di impianti di climatizzazione invernale con impianti di climatizzazione invernale dotati di pompe di calore

Il calcolo dell'incentivo viene fatto solo sul generatore, quindi l'intervento di sostituzione dei terminali di impianto con l'installazione dei pannelli radianti a pavimento non risulta incentivabile. Al fine di poter accedere all'incentivo è necessario che la pompa di calore installata abbia un COP minimo di 3.8 considerando un'evaporazione a 7°C e una condensazione a 35°C. L'incentivo viene determinato secondo la seguente relazione:

$$I_{a,tot} = E_i \cdot C_i$$

Dove:

- $I_{a,tot}$: è l'incentivo annuo, l'incentivo totale deve essere moltiplicato per 5
- C_i : è il coefficiente di valorizzazione dell'energia termica prodotta. Dipende da diversi fattori, il suo valore per pompe di calore aria/acqua di potenza superiore ai 35 kW è pari a 0,045
- E_i : è l'energia termica incentivata prodotta in un anno, espressa in kWh e calcolata con la seguente relazione:

$$E_i = Q_u \cdot \left[1 - \frac{1}{COP} \right]$$

Il valore del COP utilizzato ai fini del calcolo è pari a 4. Q_u è il calore totale prodotto dall'impianto e dipende dalla potenza nominale della pompa di calore installata (220 kW) e dal coefficiente di utilizzo della pompa di calore determinato dalla zona climatica.

6.3.2 Incentivo complessivo scenari

L'incentivo complessivo ottenibile da ogni scenario è dato dalla somma degli incentivi per i diversi interventi incentivabili che riguardano ogni scenario. Si riporta di seguito una tabella riassuntiva degli incentivi riguardanti i diversi scenari.

Tabella 6.11 – Incentivi per singolo scenario e incentivo complessivo

Intervento incentivabile	Incentivo [k€]	Scenario 1	Scenario 2.a	Scenario 2.b	Scenario 3.a	Scenario 3.b
Isolamento muri 50%	119.75	✓	-	-	-	-
Isolamento solai 50%	137.51	-	-	-	-	-
Sostituzione finestre 40%	96.65	✓	-	-	-	-
Isolamento muri 55%	131.73	-	-	-	✓	✓
Isolamento solai 55%	151.26	-	✓	✓	✓	✓
Sostituzione finestre 55%	100	-	-	✓	✓	✓
Pompa di calore	63.11	-	✓	✓	✓	✓
nZEB	1233.38	-	-	-	-	✓
TOTALE [k€]	-	216.41	214.37	314.37	446.1	1679.48

Si vuole sottolineare che l'incentivo complessivo raggiunto per lo *Scenario 3.b* è addirittura superiore al costo complessivo degli interventi di efficientamento ipotizzati. Questo è dovuto al fatto che tra i costi ammissibili per il calcolo dell'incentivo si sia tenuto conto anche delle spese sostenute per l'adeguamento sismico della struttura.

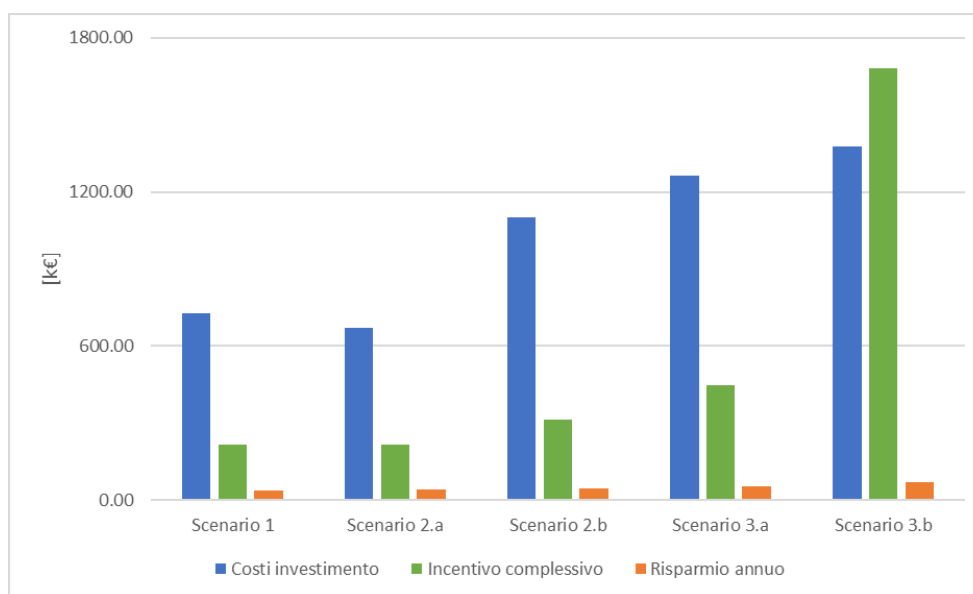


Figura 6.4 - Costi di investimento, incentivi e risparmio annuo dei vari scenari

6.3.3 Convenienza e ritorno investimenti

La valutazione della convenienza economica dell'investimento è stata fatta come nel § 6.3.3 con l'aggiunta dell'incentivo (diviso in 5 rate uguali) nel flusso di cassa.

Per il pay-back semplice viene calcolato secondo la seguente relazione:

$$PB = \frac{\text{Costo iniziale} - \text{Incentivo}}{\text{Risparmio annuo}}$$

Nel caso dello *Scenario 5* il pay-back time risulta negativo perché l'incentivo è maggiore del costo di investimento. Questo indice però non considera il fatto che l'incentivo viene erogato a rate. Per questo si utilizza anche in questo caso il VAN:

$$VAN = -I_0 + R \cdot \sum_{j=1}^n \frac{1}{(1+a)^j} + \frac{I}{5} \cdot \sum_{k=1}^m \frac{1}{(1+a)^k}$$

Dove:

- I_0 : è la spesa sostenuta per la realizzazione dello scenario di intervento
- D_j : è il flusso di cassa generato all'anno j-esimo
- I : è l'incentivo complessivo erogato dal GSE
- n : è il numero di anni di vita utile, considerato pari a 30
- a : è il tasso di attualizzazione, pari al 3%
- m : è il numero di rate in cui viene erogato l'incentivo, pari a 5

Tabella 6.12 - Indici economici dei diversi scenari proposti tenendo conto degli incentivi del Conto Termico

	Scenario 1	Scenario 2.a	Scenario 2.b	Scenario 3.a	Scenario 3.b
Risparmio annuo [k€]	37.61	41.57	47.11	53.44	69.13
Costo iniziale [k€]	726.24	670.05	1099.63	1264.29	1378.29
Incentivo complessivo [k€]	216.41	214.37	314.37	446.10	1679.48
Pay-back [anni]	13.56	10.96	16.67	15.31	-4.36
VAN [k€]	197.52	329.57	94.91	167.87	1425.40
Indice profittabilità	0.27	0.49	0.09	0.13	1.03
PB attualizzato [anni]	18.50	14.15	24.61	22.15	3.64

Anche in questo caso è possibile calcolare l'indice di profittabilità dato dal rapporto tra il VAN e il costo iniziale dell'investimento.

Tenendo conto del contributo degli incentivi tutti gli scenari risultano validi dal punto di vista del ritorno economico. In Figura 6.5 si può osservare come per i primi 5 anni dell'intervallo di calcolo del VAN ci sia un forte contributo dovuto agli incentivi mentre negli anni successivi l'unico flusso di cassa è soltanto quello dovuto al risparmio annuo.

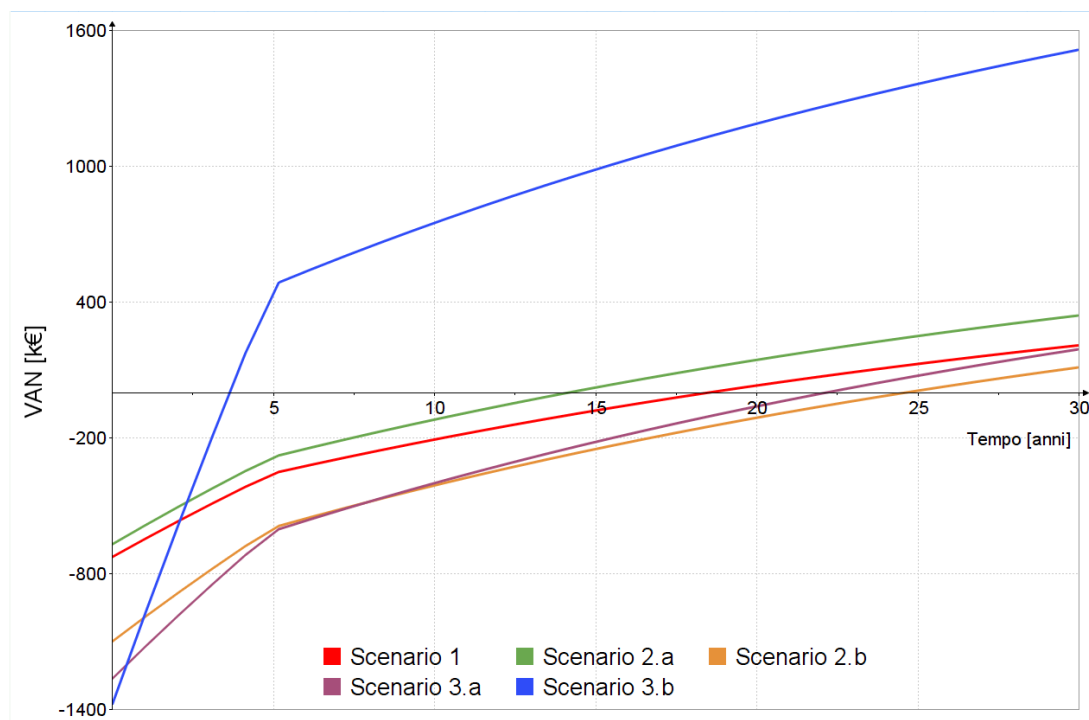


Figura 6.5 - Rappresentazione grafica del VAN con il contributo degli incentivi per i diversi scenari di intervento

Lo scenario che risulta essere nettamente il più vantaggioso è lo *Scenario 3.b* e questo è dovuto al fatto che l'incentivo disponibile è addirittura maggiore della spesa complessiva degli interventi per realizzarlo. Guardando invece agli altri scenari si può notare che tutti hanno un valore del VAN positivo, con tempi di ritorno attualizzati che vanno dai 14 anni dello *Scenario 2.a* ai circa 25 della variante *2.b*.

6.4 RIEPILOGO

Volendo riassumere i risultati degli scenari proposti per beneficio generato e in termini di convenienza economica si può dire che quello che sembra più conveniente è lo *Scenario 3.b*, ovviamente considerando la valutazione che tenga conto degli incentivi previsti dal Conto termico. C'è però da considerare che l'edificio è un edificio storico e non è certa la possibilità di poter installare l'impianto fotovoltaico sul tetto. In caso di impossibilità, diventa impossibile trasformare l'edificio in nZEB e quindi accedere all'incentivo che rende così vantaggioso questo scenario.

Bisogna ricordare che gli scenari previsti sono stati ipotizzati sulla base dei diversi livelli di intervento di adeguamento sismico della struttura. Occorre quindi considerare questo aspetto in modo da avere più chiaro il quadro d'insieme. Se si valutano gli interventi soltanto dal punto di vista della convenienza economica sicuramente lo *Scenario 2.a* appare il più vantaggioso, con un edificio dotato di impianti di climatizzazione invernale, estiva e sistema di trattamento e distribuzione dell'aria nei singoli ambienti. Rimane comunque il fatto che l'edificio è scarsamente isolato con dei serramenti con vetro singolo e di conseguenza una classe energetica relativamente bassa per un edificio ristrutturato. La valutazione economica, al netto degli incentivi, tenderebbe ad escludere gli scenari *2.b* e *3.a*; la valutazione fatta considerando gli incentivi del Conto Termico, però, stima un valore del VAN positivo per tutti i 5 diversi scenari nell'intervallo considerato di 30 anni. Questo significa che è possibile prediligere la soluzione che permette di ottenere il miglior beneficio in termini di efficienza energetica, senza comunque dover incorrere in una perdita economica per l'eccessiva spesa di investimento. Si propongono quindi i seguenti scenari a seconda del livello di intervento di rinforzo strutturale:

- Livello I:
 - o Interventi strutturali: ammorsamento pareti, iniezioni di malta su pareti esterne, intonaco armato ed iniezioni su pareti interne
 - o Interventi energetici: *Scenario 1* coibentazione dei muri perimetrali dei piani rialzato, primo e secondo, sostituzione dei serramenti delimitanti il volume climatizzato dei piani rialzato, primo e secondo
- Livello II:
 - o Interventi strutturali: ammorsamento pareti, consolidamento dei solai dei piani rialzato, primo, secondo e sottotetto
 - o Interventi energetici:
 - *Scenario 2.a*: coibentazione dei solai delimitanti il volume climatizzato (piano rialzato e sottotetto), impianto radiante a

pavimento, pompa di calore per aria-acqua per climatizzazione estiva e invernale e ACS, unità di trattamento aria e rete di ventilazione meccanica

- *Scenario 2.b*: come scenario 2.a e in aggiunta sostituzione dei serramenti delimitanti il volume climatizzato dei piani rialzato, primo e secondo

- Livello III:

- Interventi strutturali: tutti gli interventi compresi nei livelli I e II
- Interventi energetici:
 - *Scenario 3.a*: tutti gli interventi compresi nei livelli I e II
 - *Scenario 3.b*: come scenario 3.a e in aggiunta impianto fotovoltaico sul tetto con autoconsumo

La scelta della variante 2.b è dovuta al fatto che permette di ottenere un maggiore risparmio in termini di consumi e inoltre l'edificio diventa in classe B a differenza dello *Scenario 2.a* che permette di raggiungere solamente la classe C. Per quanto riguarda il livello III di intervento, non essendo a conoscenza dell'effettiva possibilità di installare un impianto fotovoltaico sul tetto, ci si limita allo *Scenario 3.a* che, anche se non garantisce una trasformazione dell'edificio in nZEB, risulta comunque un investimento economicamente valido e permette di portare effettuare un salto di 7 classi energetiche rispetto all'edificio iniziale fino alla A2.

Un'altra cosa da sottolineare è che si è osservato che il fabbisogno di energia elettrica per l'illuminazione, all'aumentare del livello di intervento, diventa sempre più rilevante sul fabbisogno complessivo di energia finale. In questo studio non è stata fatta una valutazione sull'eventuale possibilità di andare ad agire sull'impianto di illuminazione, ma sarebbe una cosa da tenere in considerazione in caso di ristrutturazione.

Come già specificato in precedenza, parallelamente a questo lavoro di tesi è stato svolto un altro lavoro al fine di valutare la struttura dal punto di vista sismico e l'efficacia dei livelli di intervento strutturale. La classificazione sismica e la stima dei costi per gli interventi strutturali è stata svolta da Amedeo Caprino nel suo lavoro di tesi "Valutazione dell'efficacia di interventi a diverso livello di invasività ed integrati per la riduzione della vulnerabilità sismica di edifici in muratura: il caso dell'ex-tribunale di Fabriano". Si è cercato di individuare i costi comuni per le opere di miglioramento strutturale e energetico per fare in modo di ottenere un valore della spesa complessiva per ogni livello di intervento il più veritiero possibile. Si riporta di

seguito una tabella riassuntiva dei benefici, sia energetici che strutturali, ottenuti per tre diversi livelli di intervento e dei costi da sostenere per l'attuazione di questi interventi.

Tabella 6.13 - Riepilogo risultati e costi per ogni livello di intervento

Valutazione	Pre-intervento	Livello I		Livello II		Livello III	
		Scenario 0	Scenario 1	Scenario 2.a	Scenario 2.b	Scenario 3.a	Scenario 3.b
Strutturale	Classe IS-V	F	E	B	A	A	
	Classe PAM	G	F	A		A	
	Classe energetica	G	C	C	B	A2	A4
Energetica	EPgl,riuren [kWh/m ² a]	216,54	74,79	133,90	113,89	65,68	22,26
	Opere strutturali		€ 804 369,51	€ 765 154,96		€ 1 569 524,47	
Economica	Opere efficientamento		€ 594 237,20	€ 538 051,75	€ 967 627,75	€ 1 132 288,95	€ 1 246 288,95
	Demolizione e ripristino finitura		€ 339 962,23	€ 566 851,81		€ 906 814,04	
	TOTALE INTERVENTI		€ 1 738 568,94	€ 1 870 058,52	€ 2 299 634,52	€ 3 608 627,46	€ 3 722 627,46
	Incentivi Sismabonus		€ 96 000,00	€ 96 000,00		€ 96 000,00	
	Incentivi Conto Termico		€ 216 408,20	€ 214 374,60	€ 314 374,60	€ 446 103,56	€ 1 679 478,56
	TOTALE INCENTIVI		€ 312 408,20	€ 310 374,60	€ 410 374,60	€ 542 103,56	€ 1 775 478,56
	Rapporto incentivo/spesa		18%	17%	18%	15%	48%

7 CONCLUSIONI

Nel presente lavoro di tesi è stata effettuata un'analisi energetica di un edificio reale, l'ex Tribunale di Fabriano in provincia di Ancona, con lo scopo di proporre e valutare degli interventi di efficientamento energetico basati su diversi livelli di intervento di tipo strutturale, finalizzati all'adeguamento sismico della struttura. La valutazione strutturale della vulnerabilità dell'edificio e degli interventi di adeguamento sismico sono stati svolti parallelamente in un altro lavoro di tesi da Amedeo Caprino (*Valutazione dell'efficacia di interventi a diverso livello di invasività ed integrati per la riduzione della vulnerabilità sismica di edifici in muratura: il caso dell'ex-tribunale di Fabriano*).

Analizzato il caso studio allo stato attuale e la sua storia costruttiva, sono state determinate le caratteristiche energetiche dell'involucro e la tipologia di impianti di cui l'edificio era dotato prima della ristrutturazione del 1999 (a seguito dal terremoto di Umbria e Marche del 1997 la struttura è rimasta danneggiata ed è stato necessario intervenire per un adeguamento sismico). Lo scopo è stato quello di studiare il comportamento e le prestazioni della costruzione allo stato originario per effettuare una valutazione dell'edificio storico.

Si sono riscontrate delle complessità nella definizione della destinazione d'uso, dovute al fatto che l'edificio, concepito inizialmente come scuola, dall'inizio degli anni 2000 fino al 2013 è stato la sede distaccata del Tribunale di Ancora. A seguito degli eventi sismici del terremoto del Centro Italia del 2016-2017, l'edificio sta ospitando delle scuole le cui sedi originali sono state danneggiate e sono in attesa di essere rese nuovamente agibili. Inoltre sembrerebbe esserci una possibilità futura di una conversione dello stabile a centro operativo della Polizia di Stato. Non avendo a disposizione un quadro ben preciso si è deciso di trattare l'edificio ad uso di ufficio.

Si è proceduto alla creazione dei modelli per effettuare l'analisi energetica. Il primo modello, realizzato con il software *Edilclima*, permette di valutare l'edificio secondo il metodo quasi stazionario, che è quello previsto dalla normativa italiana vigente, e di ottenere l'indice di prestazione energetica necessario alla determinazione della classe energetica. Il secondo modello, creato mediante il software *TRNSYS*, consiste in una simulazione dinamica dell'edificio per valutare più nel dettaglio e con un miglior grado di precisione il fabbisogno di energia termica utile per il riscaldamento e il raffrescamento.

Una volta analizzati i risultati sono stati proposti degli interventi di miglioramento energetico in cinque diversi scenari, basati su tre livelli di intervento strutturale:

- Livello I: rinforzo strutture verticali
 - o *Scenario 1*: Coibentazione superfici perimetrali verticali e sostituzione infissi
- Livello II: rinforzo strutture orizzontali
 - o *Scenario 2.a*: coibentazione solai, interventi sugli impianti
 - o *Scenario 2.b*: coibentazione solai, interventi sugli impianti, sostituzione infissi
- Livello III: rinforzo strutture verticali e orizzontali
 - o *Scenario 3.a*: coibentazione involucro dell'intero volume climatizzato, sostituzione infissi, interventi sugli impianti
 - o *Scenario 3.b*: coibentazione involucro dell'intero volume climatizzato, sostituzione infissi, interventi sugli impianti, produzione da fotovoltaico. Trasformazione in edificio a energia quasi zero (nZEB)

Per ogni scenario è stato realizzato un modello dinamico per valutare il fabbisogno di energia utile per la climatizzazione estiva e invernale. Dai risultati delle simulazioni dinamiche sono stati calcolati i fabbisogni di energia finale e i costi di esercizio per il funzionamento degli impianti. Si è stimata la spesa annua in consumi energetici per ognuno dei cinque scenari proposti e ricavato il risparmio generato dall'attuazione di ognuno degli scenari (Tabella 6.8).

Lo *Scenario 1* prevede di intervenire solo sull'involucro per ottenere una riduzione del fabbisogno di energia finale. La riduzione della spesa per l'energia è data da una minore domanda di energia. Non andando a intervenire negli impianti, però, questi risultano sovradimensionati e il risultato è un peggioramento del rendimento globale medio stagionale, già inizialmente molto basso. Inoltre l'edificio rimane privo di climatizzazione estiva.

In tutti gli altri scenari sono previsti gli interventi ai sistemi di impianto, che comprendono sistema radiante a pavimento, generatore a pompa di calore aria-acqua, unità di trattamento e canali di distribuzione dell'aria. In questo modo si riesce a ottenere un notevole miglioramento della qualità degli ambienti interni in termini di comfort termico e qualità dell'aria. Inoltre si riesce a raggiungere una riduzione dei consumi finali e quindi della spesa energetica grazie all'elevata efficienza di questi sistemi. La differenza tra i vari scenari che prevedono gli interventi agli impianti è dovuta al diverso grado di isolamento dell'involucro e quindi al minore fabbisogno di energia utile. L'aggiunta dell'impianto fotovoltaico permette l'autoconsumo di una quota dell'energia richiesta dagli impianti e dal sistema di illuminazione,

garantendo così un maggiore risparmio sulla spesa annua. Per di più rispetta i parametri richiesti per poter essere considerato un edificio nZEB grazie a una copertura del fabbisogno di oltre il 55% con fonti di energia rinnovabili.

In seguito è stato valutato il costo singolo di ogni intervento previsto e il costo complessivo per ogni scenario proposto. Una volta stimati i costi di intervento è stato possibile effettuare una valutazione della convenienza economica dei diversi scenari (Tabella 6.10). Sono stati poi calcolati anche gli incentivi previsti dal Conto Termico del GSE per gli interventi di efficientamento energetico ed è stata eseguita una valutazione della convenienza economica tenendo conto del contributo dato dagli incentivi (Tabella 6.12).

Considerando soltanto il ritorno economico degli interventi, al netto degli incentivi, soltanto gli scenari *1* e *2.a* potrebbero apparire convenienti, Tenendo conto anche degli incentivi, invece, tutti gli scenari risultano convenienti, in modo particolare lo *Scenario 3.b* poiché gli incentivi previsti per la trasformazione dell'edificio in nZEB sono davvero consistenti.

Occorre comunque considerare che la profittabilità degli investimenti è stata valutata su un intervallo di 30 anni, ma non è detto che tutti gli interventi previsti abbiano una tale durata di vita. In modo particolare lo *Scenario 1*, che prevede soltanto di andare ad agire sull'involucro, non tiene conto del fatto che molto probabilmente la caldaia e i radiatori potrebbero arrivare a fine vita molto prima.

Un'altra considerazione da fare riguarda l'effettiva possibilità di realizzazione dello *Scenario 3.b* dovuta al fatto che gli edifici storici possono essere vincolati e spesso non è possibile modificare l'estetica della facciata esterna. Prevedere l'installazione di un impianto fotovoltaico sul tetto potrebbe quindi essere una soluzione non applicabile. Un'alternativa potrebbe essere lo scambio sul posto delocalizzato, che però attualmente non è accessibile ai comuni con una popolazione oltre i 20 mila residenti. Una prospettiva sicuramente interessante è offerta dai coppi in cui le celle di silicio sono completamente inglobate nel corpo degli stessi, però di certo molto più onerosa dal punto di vista economico e meno efficiente, il che comporta una maggiorazione significativa della superficie interessata al fine di raggiungere la producibilità minima per garantire una copertura del fabbisogno da fonti rinnovabili superiore al 55%.

Infine è stato effettuato, in collaborazione con Amedeo Caprino, un computo complessivo dei costi accomunando le spese relative alle opere di adeguamento sismico e quelle relative agli interventi di efficientamento energetico (Tabella 6.13).

8 RIFERIMENTI

- [1] B. C. E. S. A. Calderoni, «una classificazione tipologica strutturale degli edifici esistenti in muratura ed in c.a. finalizzata alla valutazione della vulnerabilità sismica su scala territoriale,» *In concreto n.140*, 2016.
- [2] GSE, «Conto Termico,» [Online]. Available: <https://www.gse.it/servizi-per-te/efficienza-energetica/conto-termico>.
- [3] P. Civile, «La sismicità in Italia,» [Online]. Available: <http://www.protezionecivile.gov.it/>.
- [4] ReLUIS, «Cos'è ReLUIS,» [Online]. Available: www.reluis.it/.
- [5] P. Civile, «Consorzio interuniversitario Reluis,» [Online]. Available: <http://www.protezionecivile.gov.it/servizio-nazionale/attivita/previsione/centri-competenza/reluis>.
- [6] G. Iraci Sareri, Modelli numerici per l'analisi sismica di edifici in muratura colpiti dal sisma centro Italia 2016: confronto tra metodi ad elementi finiti e a telaio equivalente, Padova: Tesi di laurea magistrale, Università degli studi di Padova, 2018.
- [7] L. Lazzarini, Analisi modale sperimentale e calibrazione numerica del comportamento dinamico di edifici strategici monitorati durante lo sciame sismico in centro Italia (2016), Padova: Tesi di laurea magistrale, Università degli Studi di Padova, 2018.
- [8] E. Modolo, , Calibrazione numerica e validazione dell'efficacia degli interventi di un edificio in muratura monitorato dall'Osservatorio Sismico delle Strutture, Padova: Tesi di laurea magistrale, Università degli Studi di Padova, 2019.
- [9] UNI/TS 11300 Parte 1, Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale, 2014.
- [10] UNI/TS 11300 Parte 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, 2014.

- [11] GSE, Incentivazione della produzione di energia termica da impianti a fonti rinnovabili ed interventi di efficienza energetica di piccole dimensioni, 2016.
- [12] Edilclima, «<https://www.edilclima.it/>,» [Online].
- [13] Edilclima, EC700 Calcolo Prestazioni Energetiche Degli Edifici - Versione 9 EC701 Progetto e Verifiche Edificio Impianto - Versione 12 EC705 Attestato Energetico - Versione 6 EC709 Ponti Termici - Versione 3 - Manuale d'uso, 2019.
- [14] Energyplus, «Weather Data | EnergyPlus,» [Online]. Available: <https://energyplus.net/>.
- [15] Bonacina, Cavallini e Mattarolo, Trasmissione del calore, Padova: CLEUP, 1989.
- [16] Decreto MISE, Allegato DM 16/02/2016, 2016.
- [17] AA. VV., Linee guida di indirizzo per il miglioramento dell'efficienza energetica nel patrimonio culturale, Ministero per i beni e le attività culturali, 2015.