

POLITECNICO DI TORINO

**Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Energetica e Nucleare**



Tesi di Laurea Magistrale

**Applicazione di un metodo semplificato
per l'analisi costo-beneficio dell'intervento
sull'involucro e sull'impianto di
climatizzazione di un edificio ad uso
abitativo basato sulla sua localizzazione**

Relatore

Prof. Marco Carlo Masoero

Tutor aziendale

Ing. Pier Luigi Marongiu

Ing. Debora Deiana

Candidato

Alessio Cuccu

A. A. 2017-2018

*Non ereditiamo la terra dai nostri antenati,
la prendiamo in prestito dai nostri figli.*

Proverbio dei nativi americani

Indice

<i>Indice figure</i>	7
<i>Indice tabelle</i>	10
<i>Introduzione</i>	12
CAPITOLO I	14
<i>Quadro normativo in materia di efficienza energetica</i>	14
<i>La normativa europea</i>	14
<i>Direttive 2002/91/CE e 2010/31/UE</i>	14
<i>Direttiva 2006/32/CE</i>	16
<i>La normativa italiana</i>	16
<i>Legge 30 Aprile 1976, n.376</i>	16
<i>Legge 9 gennaio 1991, n.10</i>	17
<i>DPR 26 agosto 1993, n.412</i>	18
<i>D.LGS. 19 agosto 2005, n.192</i>	18
<i>D.LGS. 30 maggio 2008, n.115</i>	19
<i>DPR. 2 aprile 2009, n.59</i>	20
<i>Linee guida nazionali sulla certificazione energetica</i>	21
<i>Specifiche tecniche UNI/TS 11300</i>	23
CAPITOLO II	24
<i>Suddivisione del globo in diverse zone climatiche</i>	24
<i>Temperatura media annuale</i>	25
<i>Temperatura media mensile</i>	26
<i>Gradi giorno di riscaldamento</i>	28
<i>Gradi giorno di raffrescamento</i>	29
<i>Clima e costruzione</i>	31
<i>Costruzioni tradizionali in base al clima</i>	32
<i>Consumi specifici del parco edilizio mondiale</i>	34
CAPITOLO III	37
<i>Comfort termico</i>	37
<i>Sistema di termoregolazione del corpo umano</i>	37
<i>Equazione di bilancio energetico del sistema corpo umano - ambiente</i>	38
<i>Modello di Fanger</i>	40
<i>Modello Adattivo</i>	43
<i>Modello bioclimatico</i>	45
<i>Esempio di valutazione</i>	46
<i>Discomfort termico locale</i>	49
<i>Elevata differenza verticale di temperatura</i>	50

<i>Pavimento troppo caldo o troppo freddo</i>	50
<i>Correnti d'aria</i>	50
<i>Elevata asimmetria della temperatura media radiante</i>	51
<i>Sintesi dei requisiti per il disagio termico locale</i>	51
<i>Interventi pratici per il rispetto del comfort termico</i>	52
CAPITOLO IV	54
<i>Classificazione in funzione del livello di prestazione energetica</i>	54
<i>nZEB</i>	55
<i>Edificio passivo</i>	56
<i>ZEB</i>	58
<i>Stato dell'arte: impianti per la produzione di energia</i>	58
<i>Energia solare</i>	58
<i>Solare fotovoltaico</i>	58
<i>Solare termico</i>	60
<i>Solar cooling</i>	62
<i>Energia eolica</i>	64
<i>Minieolico</i>	65
<i>Biomasse</i>	66
<i>Geotermia a bassa temperatura</i>	67
<i>Cogenerazione</i>	68
<i>Piccola generazione e micro-cogenerazione</i>	69
<i>Caldaie ad alto rendimento energetico</i>	70
<i>Caldaie a premiscelazione</i>	71
<i>Caldaie a condensazione</i>	71
<i>Stato dell'arte dell'involucro edilizio</i>	72
<i>Mura perimetrali</i>	73
<i>Pareti solari passive</i>	73
<i>Pareti in calcestruzzo leggero LWC</i>	74
<i>Pareti ventilate o doppie</i>	74
<i>Pareti con accumulo di calore latente</i>	75
<i>Componenti finestrati</i>	75
<i>Diverse tipologie di superfici trasparenti</i>	75
CAPITOLO V	77
<i>Ricerca di valori di trasmittanza ottimale dei componenti di involucro</i>	77
<i>Ipotesi di lavoro</i>	77
<i>Caratteristiche climatiche</i>	77
<i>Aspetti economico-finanziari</i>	77

<i>Ipotesi tecniche</i>	79
<i>Ipotesi computazionali</i>	79
<i>Costo per l'isolante, costo di esercizio e costo totale</i>	79
<i>Involucro opaco</i>	79
<i>Involucro trasparente</i>	81
CAPITOLO VI	82
<i>Edificio di riferimento</i>	82
<i>Dimensionamento impianto di riscaldamento e/o di raffrescamento</i>	83
<i>Dimensionamento d'impianto in assetto invernale</i>	84
<i>Dimensionamento d'impianto in assetto estivo</i>	84
<i>Determinazione dei costi per le tecnologie impiantistiche considerate</i>	85
<i>Caldaia a pellet</i>	85
<i>Caldaia a condensazione</i>	85
<i>Pompa di calore geotermica</i>	86
<i>Pompa di calore aria-aria</i>	86
CAPITOLO VII	87
<i>Casi studio</i>	87
<i>Fascia climatica "fredda": Svezia-Stoccolma</i>	88
<i>Dati climatici, parametri economici e dati di involucro-impianto</i>	88
<i>Mura perimetrali</i>	89
<i>Copertura</i>	89
<i>Pavimento</i>	90
<i>Componente trasparente</i>	91
<i>Analisi d'insieme sull'involucro edilizio dell'edificio di riferimento</i>	93
<i>Comparazione tra diverse tecnologie impiantistiche a parità di coibentazione</i>	94
<i>Fascia climatica "mite": Italia-Torino</i>	97
<i>Dati climatici, parametri economici e dati di involucro-impianto</i>	97
<i>Mura perimetrali</i>	98
<i>Copertura</i>	99
<i>Pavimento</i>	100
<i>Componente trasparente</i>	101
<i>Analisi d'insieme sull'involucro edilizio</i>	103
<i>Edificio di riferimento e comparazione tra diverse tecnologie impiantistiche</i>	104
<i>Fascia climatica "calda": Camerun-Garoua</i>	109
<i>Dati climatici, parametri economici e dati di involucro-impianto</i>	109
<i>Mura perimetrali</i>	110

<i>Copertura</i>	111
<i>Pavimento</i>	111
<i>Componente trasparente</i>	112
<i>Analisi d'insieme sull'involucro edilizio dell'edificio di riferimento</i>	114
<i>Comparazione tra diverse tecnologie impiantistiche</i>	115
coibentazione mura perimetrali e sostituzione corpi finestrati	115
coibentazione copertura e sostituzione corpi finestrati	116
sostituzione corpi finestrati	117
<i>Conclusione</i>	120
<i>Bibliografia</i>	122
<i>Ringraziamenti</i>	124

Indice figure

<i>Figura 1: posizione geografica delle stazioni meteorologiche. I diversi colori rappresentano l'altitudine [m].</i>	24
<i>Figura 2: distribuzione globale della temperatura media annuale, T [°C]</i>	25
<i>Figura 3: distribuzione della temperatura media mensile, T_m [°C]</i>	27
<i>Figura 4: distribuzione annuale dei gradi giorno di riscaldamento $HDD_{18,3}$ [°C-giorno]</i>	28
<i>Figura 5: distribuzione mensile dei gradi giorno di riscaldamento, $MHDD_{18,3}$ [°C-giorno]</i>	29
<i>Figura 6: distribuzione annuale dei gradi giorno di raffrescamento, $CDD_{18,3}$ [°C-giorno]</i>	30
<i>Figura 7: distribuzione dei gradi giorno mensili, $MCDD_{18,3}$ [°C-giorno]</i>	31
<i>Figura 8: iglù, costruzione tipica del nord del Canada</i>	32
<i>Figura 9: abitazione tipica di un clima caldo secco</i>	33
<i>Figura 10: abitazione tipica per clima caldo umido</i>	33
<i>Figura 11: esempio costruzione tipo per un clima temperato</i>	34
<i>Figura 12: regioni considerate</i>	35
<i>Figura 13: consumi specifici in [kWh/m²] all'anno per le regioni considerate</i>	36
<i>Figura 14: P. Ole Fanger</i>	40
<i>Figura 15: valori della resistenza termica del vestiario I_{cl}</i>	41
<i>Figura 16: percentuale prevista di insoddisfatti (PPD) in funzione del voto previsto medio (PMV)</i>	43
<i>Figura 17: diagramma di Givoni nella forma attuale e completa</i>	46
<i>Figura 18: dati rilevati</i>	47
<i>Figura 19: limiti di misura delle normative e valori delle umidità assolute misurate.</i>	48
<i>Figura 20: diagramma di Givoni con i dati misurati</i>	48
<i>Figura 21: parametri per il discomfort locale</i>	52
<i>Figura 22: abitazione ante e post isolamento</i>	53
<i>Figura 23: classificazione prestazione energetica</i>	55
<i>Figura 24: prima passivhaus in Germania a Darmstadt</i>	56
<i>Figura 25: schema impianto fotovoltaico</i>	59

<i>Figura 26: impianto solare termico a circolazione forzata</i>	62
<i>Figura 27: impianto solar cooling a ciclo chiuso</i>	64
<i>Figura 28: schema impianto eolico ad asse verticale ed orizzontale</i>	66
<i>Figura 29: impianto con caldaia a biomasse</i>	67
<i>Figura 30: schema impianto a geotermia a bassa temperatura per il funzionamento estivo ed invernale</i>	68
<i>Figura 31: schema impianto micro-cogenerazione</i>	70
<i>Figura 32: rappresentazione caldaia tradizionale e a condensazione</i>	72
<i>Figura 33: andamento dei costi in funzione dell'isolante per le mura perimetrali Svezia-Stoccolma</i>	89
<i>Figura 34:andamento dei costi in funzione dell'isolante per la copertura Svezia-Stoccolma</i>	90
<i>Figura 35: andamento dei costi in funzione dell'isolante per il pavimento Svezia-Stoccolma</i>	91
<i>Figura 36: andamento del costo del vetro in funzione della sua trasmittanza termica Svezia-Stoccolma</i>	92
<i>Figura 37: andamento dei costi in funzione della trasmittanza per il componente finestrato Svezia-Stoccolma</i>	93
<i>Figura 38: consumo specifico per il riscaldamento ante e post operam Svezia-Stoccolma</i>	93
<i>Figura 39: costi tecnologie a confronto per Svezia-Stoccolma</i>	95
<i>Figura 40: VAN a vent'anni per le tecnologie a confronto per Svezia-Stoccolma</i>	96
<i>Figura 41:andamento dei costi per riscaldamento e raffrescamento in funzione dell'isolante per le mura perimetrali Italia-Torino</i>	98
<i>Figura 42: andamento dei costi in funzione dell'isolante per le mura perimetrali Italia-Torino</i>	99
<i>Figura 43: andamento dei costi per riscaldamento e raffrescamento in funzione dell'isolante per la copertura Italia-Torino</i>	99
<i>Figura 44:andamento dei costi in funzione dell'isolante per la copertura Italia-Torino</i>	100
<i>Figura 45: andamento dei costi per riscaldamento e raffrescamento in funzione dell'isolante per il pavimento Italia-Torino</i>	100
<i>Figura 46: andamento dei costi in funzione dell'isolante per il pavimento Italia-Torino</i>	101

<i>Figura 47: andamento del costo del vetro in funzione della sua trasmittanza termica Italia-Torino.....</i>	<i>102</i>
<i>Figura 48: andamento dei costi per riscaldamento e raffrescamento in funzione dell'isolante per il componente finestrato Italia-Torino.....</i>	<i>102</i>
<i>Figura 49: andamento dei costi in funzione della trasmittanza per il componente finestrato Italia-Torino</i>	<i>103</i>
<i>Figura 50: limiti di trasmittanza decreto 26 gennaio 2010</i>	<i>103</i>
<i>Figura 51: consumo specifico per il riscaldamento raffrescamento ante e post operam Italia-Torino.....</i>	<i>104</i>
<i>Figura 52: costi tecnologie a confronto per Italia-Torino</i>	<i>107</i>
<i>Figura 53:VAN a vent'anni per le tecnologie a confronto per Italia-Torino.....</i>	<i>107</i>
<i>Figura 54: andamento dei costi in funzione dell'isolante per le mura perimetrali Camerun-Garoua.....</i>	<i>110</i>
<i>Figura 55:andamento dei costi in funzione dell'isolante per la copertura Camerun-Garoua.....</i>	<i>111</i>
<i>Figura 56: andamento dei costi in funzione dell'isolante per il pavimento Camerun-Garoua.....</i>	<i>112</i>
<i>Figura 57: andamento del costo del vetro in funzione della sua trasmittanza termica Camerun-Garoua.....</i>	<i>113</i>
<i>Figura 58: andamento dei costi in funzione della trasmittanza per il componente finestrato Camerun-Garoua</i>	<i>114</i>
<i>Figura 59: consumo specifico per il raffrescamento ante e post operam Camerun-Garoua</i>	<i>114</i>
<i>Figura 60: costi tecnologie a confronto per Camerun-Garoua</i>	<i>118</i>
<i>Figura 61:VAN a vent'anni per le tecnologie a confronto per Camerun-Garoua</i>	<i>118</i>

Indice tabelle

<i>Tabella 1: carichi metabolici in funzione delle attività svolte da un soggetto</i>	<i>39</i>
<i>Tabella 2: parametri economici di riferimento</i>	<i>78</i>
<i>Tabella 3: dati climatici Svezia-Stoccolma.....</i>	<i>88</i>
<i>Tabella 4: parametri economici Svezia-Stoccolma.....</i>	<i>88</i>
<i>Tabella 5: dati involucro-impianto Svezia-Stoccolma</i>	<i>88</i>
<i>Tabella 6: mura perimetrali Svezia-Stoccolma.....</i>	<i>89</i>
<i>Tabella 7: copertura Svezia-Stoccolma</i>	<i>90</i>
<i>Tabella 8: pavimento Svezia-Stoccolma.....</i>	<i>90</i>
<i>Tabella 9: vetrate considerate nell'analisi Svezia-Stoccolma</i>	<i>91</i>
<i>Tabella 10: componente finestrato Svezia-Stoccolma</i>	<i>92</i>
<i>Tabella 11: dati caldaia a pellet Svezia-Stoccolma.....</i>	<i>94</i>
<i>Tabella 12: dati caldaia a condensazione Svezia-Stoccolma.....</i>	<i>94</i>
<i>Tabella 13: dati pompa di calore geotermica Svezia-Stoccolma</i>	<i>95</i>
<i>Tabella 14: dati climatici Italia-Torino</i>	<i>97</i>
<i>Tabella 15: parametri economici Italia-Torino</i>	<i>97</i>
<i>Tabella 16: dati involucro-impianto Italia-Torino</i>	<i>97</i>
<i>Tabella 17: mura perimetrali Italia-Torino</i>	<i>98</i>
<i>Tabella 18: copertura Italia-Torino</i>	<i>99</i>
<i>Tabella 19: pavimento Italia-Torino</i>	<i>100</i>
<i>Tabella 20: vetrate considerate nell'analisi Italia-Torino.....</i>	<i>101</i>
<i>Tabella 21: componente finestrato Italia-Torino.....</i>	<i>102</i>
<i>Tabella 22: dati caldaia a pellet Italia-Torino</i>	<i>105</i>
<i>Tabella 23: dati pompa di calore aria-aria Italia-Torino</i>	<i>105</i>
<i>Tabella 24: dati caldaia a condensazione Italia-Torino.....</i>	<i>105</i>
<i>Tabella 25: dati pompa di calore aria-aria Italia-Torino</i>	<i>106</i>
<i>Tabella 26: dati pompa di calore geotermica Italia-Torino</i>	<i>106</i>
<i>Tabella 27: dati pompa di calore aria-aria Italia-Torino</i>	<i>106</i>
<i>Tabella 28: dati climatici Camerun-Garoua.....</i>	<i>109</i>
<i>Tabella 29: parametri economici Camerun-Garoua</i>	<i>109</i>
<i>Tabella 30: dati involucro-impianto Camerun-Garoua</i>	<i>109</i>
<i>Tabella 31: mura perimetrali Camerun-Garoua</i>	<i>110</i>

<i>Tabella 32: copertura Camerun-Garoua</i>	<i>111</i>
<i>Tabella 33: pavimento Camerun-Garoua</i>	<i>112</i>
<i>Tabella 34: vetrate considerate nell'analisi Camerun-Garoua.....</i>	<i>112</i>
<i>Tabella 35: componente finestrato Camerun-Garoua.....</i>	<i>113</i>
<i>Tabella 36: dati pompa di calore geotermica Camerun-Garoua.....</i>	<i>115</i>
<i>Tabella 37:dati pompa di calore aria-aria Camerun-Garoua.....</i>	<i>116</i>
<i>Tabella 38: dati pompa di calore geotermica Camerun-Garoua.....</i>	<i>116</i>
<i>Tabella 39:dati pompa di calore aria-aria Camerun-Garoua.....</i>	<i>116</i>
<i>Tabella 40: dati pompa di calore geotermica Camerun-Garoua.....</i>	<i>117</i>
<i>Tabella 41:dati pompa di calore aria-aria Camerun-Garoua.....</i>	<i>117</i>

Introduzione

Le attuali modalità di produzione ed utilizzo dell'energia talvolta appaiono fortemente inadeguate, soprattutto a fronte dei continui cambiamenti climatici, e tali carenze si manifestano con frequenti blackout energetici che rendono sempre più necessario il conseguimento di un sistema innovativo con cui produrre ed utilizzare energia. Infatti, ci si scontra quotidianamente con i limiti del sistema che non è più in grado di soddisfare richieste sempre maggiori, né di contenere il progressivo incremento dei prezzi delle forniture. L'incapacità da parte dell'ambiente di far fronte alla crescita dei consumi, da un lato come fornitura di risorse e dall'altro come smaltimento dei rifiuti e inquinamento prodotto, pone come fondamentale obiettivo il risparmio da un punto di vista energetico.

La nuova fonte di energia per il XXI secolo sarà il risparmio inteso come riduzione degli sprechi energetici.

All'interno del complesso scenario dell'energia, particolare attenzione meritano i consumi del settore edilizio. Per quanto riguarda il nostro paese, alcuni dati parlano di un quantitativo imputabile alla gestione del civile (residenziale e terziario) di oltre 70 Mtep (milioni di tonnellate equivalenti di petrolio), contro gli 11 richiesti dai processi di costruzione degli edifici. Il totale di 81 Mtep rappresenta quasi il 45% del fabbisogno energetico nazionale e, quindi, delle emissioni climalteranti. Si è evidenziata la necessità anche per il settore terziario di politiche d'intervento urgente, tuttavia il vero problema è legato alla gestione dell'edificio; si pensi che i 2/3 del parco abitativo italiano sono di costruzione antecedente alla legge n. 373/1976, la quale per prima ha regolamentato l'isolamento degli edifici e la gestione degli impianti. Le possibili soluzioni sono rappresentate da adeguate manutenzioni degli impianti al fine di limitare gli sprechi, dal risparmio energetico, ma soprattutto dall'impiego di tecnologie innovative che richiederebbero un importante sforzo economico da parte delle istituzioni.

La finalità principale di tale lavoro di tesi è quella di quantificare, con l'ausilio di un metodo semplificato ed immediato, il reale beneficio di un intervento su un edificio ad uso abitativo. Tale beneficio è da intendersi sia da un punto di vista economico, sia da un punto di vista ecologico, in quanto finalizzato alla riduzione dei consumi delle risorse energetiche necessarie al riscaldamento e al raffrescamento. L'utilizzo

dell'energia può essere ridotto tramite alcuni accorgimenti: tra questi uno dei più efficaci è senza dubbio l'accuratezza nella scelta del materiale che andrà ad isolare lo spazio abitativo; non meno importante è la tecnologia di climatizzazione adoperata.

[1] [2] [3]

CAPITOLO I

Quadro normativo in materia di efficienza energetica

La normativa europea

A livello comunitario, la strategia è molto chiara: l'obiettivo principale è quello di razionalizzare i consumi di energia e quindi di ridurre gli sprechi.

Il tema della certificazione energetica è argomento di discussione da decenni: infatti, già all'interno della direttiva CEE n. 93/1976 del settembre 1993 è presente un articolo che rivela il proposito di limitare le emissioni di biossido di carbonio migliorando l'efficienza energetica degli edifici. All'interno di tale articolo è espresso l'intento di informare gli utenti finali dell'energia sui consumi degli edifici di loro proprietà, e vengono definiti alcuni parametri energetici per la certificazione. [3] [4] [5]

Direttive 2002/91/CE e 2010/31/UE

A partire dalla direttiva 2002/91/CE denominata EPBD (Energy Performance Building Directive), si è promossa con la certificazione energetica una politica finalizzata al miglioramento delle prestazioni del patrimonio edilizio, sia esistente che nuovo. Tale direttiva è stata abrogata dalla direttiva 2010/31/UE, la quale differisce di poco nei contenuti dalla precedente.

Le disposizioni contenute nella EPBD riguardano essenzialmente:

- un metodo generale e standardizzato per il calcolo del rendimento energetico integrato degli edifici;
- l'applicazione di alcuni requisiti minimi di consumo energetico delle abitazioni esistenti e di nuova costruzione;
- il monitoraggio e l'ispezione periodica dei sistemi di climatizzazione estiva ed invernale.

Il nuovo approccio, proposto da tali normative, tende ad analizzare l'edificio non semplicemente come un involucro ma come un sistema, all'interno del quale gli impianti hanno un ruolo determinante. Il calcolo deve tenere in considerazione: le

trasmissione, l'impianto di riscaldamento e/o raffrescamento, l'impianto di produzione di acqua calda sanitaria, l'impianto di illuminazione, il posizionamento e l'orientamento dell'edificio; infine la ventilazione naturale.

All'interno delle procedure di calcolo devono anche essere tenute in considerazione tutte le fonti energetiche rinnovabili ed i sistemi di cogenerazione e riscaldamento a distanza.

Le direttive ribadiscono l'importanza del ruolo del certificatore e l'indipendenza dello stesso: "...gli Stati membri si assicurano che la certificazione degli edifici e l'elaborazione delle raccomandazioni che la corredano (...) vengano effettuate in maniera indipendente da esperti qualificati e/o riconosciuti, qualora operino come imprenditori individuali o impiegati di enti pubblici o di organismi privati".

Un altro tema fondamentale trattato dalla direttiva comunitaria è il concetto di diagnosi energetica; essa è definita come "la procedura sistematica volta a fornire una adeguata conoscenza del profilo di consumo energetico di un edificio o di un gruppo di edifici, di una attività e/o impianto industriale di servizi pubblici o privati, a individuare e quantificare le opportunità di risparmio energetico sotto il profilo costi-benefici e riferire in merito ai risultati".

Le direttive vengono supportate poi da un pacchetto di norme CEN, costituito da 43 titoli o parti che hanno la funzione di integrare e approfondire gli argomenti trattati all'interno della normativa principale. Le 43 norme, per un totale di circa 2000 pagine, sono così organizzate:

- fisica dell'edificio: calcolo delle dispersioni energetiche per conduzione e ventilazione, apporti energetici, effetti della radiazione solare in estate e in inverno, fabbisogni energetici estivi e invernali, calcolo delle temperature;
- descrizione e proprietà (classificazioni) dei sistemi di ventilazione con raffrescamento e dei sistemi di condizionamento dell'aria;
- descrizione degli impianti di climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda a usi sanitari;
- norme di supporto su sistemi di illuminazione per edifici, controlli ed automazione dei servizi abitativi, classificazione dell'ambiente interno, valutazione economico-finanziaria delle soluzioni energeticamente sostenibili;
- ispezioni: caldaie e impianti di riscaldamento, impianti di raffrescamento e condizionamento d'aria, impianti di ventilazione;

- norme chiave per esprimere la prestazione e la certificazione energetica degli edifici, la valutazione delle emissioni di CO₂ e i consumi di energia primaria.

Tra le norme comunitarie a corredo della direttiva principale EPBD risulta di grande interesse la EN 15217; in essa sono contenuti i metodi per esprimere le prestazioni energetiche degli edifici per una relativa classificazione. All'interno di questa norma, infatti, vengono trattati i possibili approcci alla certificazione energetica con l'obiettivo di definire le procedure di valutazione energetica e indicare all'operatore del settore possibili soluzioni tecniche per il miglioramento delle prestazioni degli edifici. Nel contesto di tale norma sono definiti gli indici globali, le modalità per esprimere il fabbisogno energetico nella progettazione di nuovi edifici, le procedure di benchmark (valori di riferimento) e, infine, gli schemi di certificazione. [3] [4] [5]

Direttiva 2006/32/CE

Questa direttiva ha lo scopo di migliorare l'efficienza degli usi finali dell'energia dal punto di vista dei costi-benefici, in modo da creare le condizioni per lo sviluppo e la promozione di un mercato basato sui servizi energetici. La direttiva è rivolta ai distributori e alle compagnie di vendita di energia, ai gestori dei sistemi di distribuzione e agli utenti finali.

Tale direttiva è recepita ed attuata con il D.lgs. n. 115/2008 dal Consiglio dei Ministri nella seduta del 30 Maggio 2008. [3] [4] [5]

La normativa italiana

Legge 30 Aprile 1976, n.376

Il primo provvedimento di risparmio energetico in Italia, la legge 373/76, ed i suoi strumenti applicativi, il DPR giugno 1977 n. 1052 ed il DM marzo 1977, fissano limiti alla potenza degli impianti di riscaldamento, senza fornire indicazioni sul metodo di calcolo da utilizzare per la verifica. In questo frangente, i tecnici del settore tuttavia spontaneamente ed ordinatamente utilizzano la norma italiana UNI 7357.

La legge 373/76 di fatto prescrive l'isolamento termico degli edifici, tralasciando l'efficienza degli impianti. Inoltre, è opportuno osservare che non si tratta di un limite di potenza vero e proprio, in quanto la norma UNI 7357, finalizzata al calcolo del carico termico per il dimensionamento, fornisce dati molto cautelativi.

La legge risulta poco efficace; ciò nonostante ha il merito di destare un certo interesse sull'argomento del risparmio energetico [3] [6]

Legge 9 gennaio 1991, n.10

La legge n.10 del 9 Gennaio 1991 tratta, in modo esteso ed esauriente, le problematiche del piano energetico nazionale, con particolare attenzione al risparmio energetico ed allo sviluppo delle fonti rinnovabili di energia. Lo scopo di questa legge è quello di migliorare i processi di trasformazione dell'energia, di ridurre i consumi, di considerare le condizioni d'impatto ambientale, ed infine prevedere la certificazione energetica del patrimonio edilizio.

Tale legge ha il merito di regolamentare per prima le fonti rinnovabili e assimilate; per rinnovabili si considerano: il sole, il vento, l'energia idraulica, le risorse geotermiche, le maree, il moto ondoso e la trasformazione dei rifiuti organici e inorganici; per quelle assimilate si intendono invece: la cogenerazione e il calore recuperato dai fumi di scarico, dagli impianti termici, da quelli elettrici e dai processi industriali.

Per agevolare metodologie finalizzate alla riduzione dei consumi di energia sugli edifici, sono previsti incentivi in conto capitale; i quali, in base all'intervento effettuato, variano da un minimo del 20% ad un massimo del 40% dell'investimento.

Questa legge è d'importanza assoluta non solo per il nostro paese ma anche per gli stati membri; infatti per prima norma possibili soluzioni d'intervento e propone una certificazione energetica degli edifici. In contrapposizione a ciò, la presenza di svariati articoli che richiamano l'emanazione di decreti attuativi ancora in corso di redazione, la rendono "lettera morta" e di fatto non sono previste sanzioni per chi non la rispetta. Si devono attendere altri due anni perché sia dato alla luce il decreto 412 che contiene le "Norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia". [3] [7] [8]

DPR 26 agosto 1993, n.412

Il DPR 26 Agosto 1993, n. 412 è un regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia, in attuazione della legge 9 Gennaio 1991, n. 10.

Questo decreto crea una divisione del territorio nazionale in zone climatiche e in gradi giorno di riscaldamento (GG), i quali consentono di dare delle indicazioni sull'energia termica richiesta per il riscaldamento in relazione al clima e alla localizzazione dell'edificio. I GG, quindi, non sono specifici dell'edificio, ma della zona geografica all'interno della quale lo stesso si colloca. Quanto più è alto il valore di GG, tanto più è rigido il clima, tanto maggiore risulta la quantità di energia necessaria per il riscaldamento dello stabile.

Il territorio nazionale è diviso nelle seguenti sei zone climatiche:

- zona A: comuni che presentano un numero di GG non superiori a 600;
- zona B: comuni che presentano un numero di GG maggiore di 600 e minore di 900;
- zona C: comuni che presentano un numero di GG superiore a 900 e inferiore a 1400;
- zona D: comuni in cui si registra un numero di GG maggiore di 1400 e minore di 2100;
- zona E: comuni aventi un numero di GG maggiore di 2100 e non superiore a 3000;
- zona F: comuni che presentano un numero di GG maggiore di 3000. [3] [9] [10]

D.LGS. 19 agosto 2005, n.192

La carenza normativa a livello italiano è colmata, dopo più di dieci anni, dall'emanazione della direttiva europea 2002/91/CE inerente al rendimento energetico nell'edilizia. A seguito di tale normativa comunitaria, gli stati membri sono tenuti a provvedere al recepimento della stessa, tramite l'emanazione di uno specifico decreto valido a livello nazionale. Nell'agosto del 2005, è emanato il

decreto legislativo n. 192. Esso rappresenta, da un lato, una speranza per l'evolversi di un nuovo metodo costruttivo a livello nazionale e dall'altro la possibilità di instaurare un nuovo concetto di standard abitativo.

Il D.lgs. n. 192 difatti “stabilisce i criteri, le condizioni e le modalità per migliorare le prestazioni energetiche degli edifici al fine di favorire lo sviluppo, la valorizzazione, l'integrazione delle fonti rinnovabili e la diversificazione energetica”

Il decreto disciplina in particolare:

- la metodologia per il calcolo delle prestazioni energetiche integrate degli edifici;
- l'applicazione dei requisiti minimi in materia di prestazioni energetiche;
- i criteri generali per la certificazione energetica degli edifici;
- le ispezioni periodiche degli impianti di climatizzazione;
- i criteri per garantire la qualifica e l'indipendenza degli esperti incaricati per la certificazione energetica e per le ispezioni degli impianti;
- la raccolta delle informazioni, delle esperienze, delle elaborazioni e degli studi necessari all'orientamento della politica energetica nel settore;
- la promozione dell'uso razionale dell'energia anche attraverso l'informazione e la sensibilizzazione degli utenti finali, e la formazione e l'aggiornamento degli operatori del settore.

La legge n. 192 è modificata e integrata dal decreto legislativo 29 dicembre 2006, n. 311. [3] [11]

D.LGS. 30 maggio 2008, n.115

Il 30 Maggio 2008 è pubblicato il D.lgs. n.115 per l'“Attuazione della direttiva 2006/32/CE relativa all'efficienza degli usi finali dell'energia e i servizi energetici e abrogazione della direttiva 93/76/CEE”. Questo decreto apporta alcune interessanti novità per la sicurezza dell'approvvigionamento energetico e la tutela dell'ambiente, già introdotte con la direttiva 2006/32/CE.

Per quanto riguarda l'edilizia, introduce una serie di misure aventi lo scopo di migliorare l'efficienza energetica degli edifici. In particolare, si denotano semplificazioni di carattere urbanistico per lo scomputo dei volumi e deroghe per le distanze tra fabbricati e le altezze di questi ultimi.

Il decreto 115 presenta all'art. 18 i criteri generali di prestazione energetica per l'edilizia pubblica e privata nonché i requisiti professionali dei tecnici e degli organismi abilitati alla certificazione energetica. L'allegato III dello stesso decreto individua le metodologie di calcolo ed i criteri per l'esecuzione delle diagnosi e delle certificazioni energetiche degli edifici. [3]

DPR. 2 aprile 2009, n.59

Il DPR n. 59 del 3 aprile 2009, attuazione dell'articolo 4 del Decreto legislativo n. 192/2005, fornisce importanti precisazioni tecnico-attuarie in merito alle prescrizioni del citato D.lgs. n. 192 e relative alle problematiche di efficienza energetica dell'edificio nel periodo estivo.

Tra le novità, ai fini della valutazione dell'efficienza energetica degli edifici nel periodo estivo, merita particolare attenzione il parametro " Y_{IE} " [$W/(m^2K)$]. Tale grandezza esprime la cosiddetta "trasmittanza termica periodica", ossia il parametro di valutazione della "capacità di una parete opaca di sfasare ed attenuare il flusso termico che la attraversa nell'arco delle 24 ore" [19].

Tecnicamente la Y_{IE} esprime il prodotto tra il cosiddetto fattore di attenuazione " f_d " (parametro adimensionale che esprime il rapporto tra l'ampiezza del flusso termico in uscita e di quello in entrata per una specifica parete dell'edificio) ed il valore della trasmittanza termica in regime stazionario " U ", espressa in [$W/(m^2K)$]. Pertanto, il valore della trasmittanza termica periodica assume la stessa unità di misura di quella stazionaria, e rappresenta sia il grado di smorzamento sia il grado di sfasamento dell'onda termica (tempo che impiega il flusso termico a passare dalla superficie esterna della parete a quella interna).

Per quanto riguarda le metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici l'art. 3 del DPR stabilisce che si debbano adottare le norme tecniche nazionali, definite nel contesto delle norme EN a supporto della direttiva 2002/91/CE, della serie UNI/TS 11300 e loro successive modificazioni.

L'art. 4 definisce infine i "criteri generali e i requisiti delle prestazioni energetiche degli edifici ed impianti", riprendendo così il transitorio dell'Allegato I del D.lgs. 192/2005 con alcune novità. Fra esse emergono le condizioni a cui devono sottostare i parametri:

- il valore dell'indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale EP_i deve essere minore o uguale ai valori riportati nel D.lgs. 192/2005;
- il valore dell'indice EP_e , prestazione energetica per il raffrescamento estivo dell'involucro edilizio deve essere inferiore a quanto previsto dallo stesso art.

4

Per la prima volta nella legislazione italiana si introduce un limite relativo al comportamento energetico durante il regime estivo.

Le prescrizioni non sono quindi di tipo qualitativo o tecnologico, ma di tipo prestazionale e calcolabile. [3] [12] [13]

Linee guida nazionali sulla certificazione energetica

Il 25 luglio 2009 è entrato in vigore il Decreto 26 giugno 2009, contenente le linee guida nazionali sulla certificazione energetica degli edifici.

Si tratta di uno degli attesi decreti di attuazione del D.lgs. 192/05 sul rendimento energetico in edilizia. È pubblicato nello stesso periodo del DPR 59/2009 che fissa i requisiti energetici minimi per i nuovi edifici e per le ristrutturazioni di quelli esistenti. Successivamente è redatto il DPR 16 aprile 2013, n.75 che fissa i requisiti professionali, i criteri di accreditamento per la qualifica alla professione, ed inoltre stabilisce l'indipendenza degli esperti e degli organismi a cui affidare la certificazione energetica degli edifici e l'ispezione degli impianti di climatizzazione. Quest'ultimo DPR n.75 completa il quadro relativo all'aspetto normativo sulla certificazione energetica degli edifici.

Le Linee guida, oltre a definire gli strumenti che rendono uniforme e confrontabile la qualità energetica degli immobili, indicano gli strumenti di raccordo, organizzazione e cooperazione tra lo stato e le regioni. Alcune di queste, in precedenza, hanno definito proprie procedure di certificazione, le quali si sono integrate alla normativa nazionale. Pertanto, le disposizioni contenute nelle Linee guida si sono applicate sin da subito alle regioni e province autonome che non hanno provveduto ad adottare dei propri strumenti di certificazione; mentre le altre hanno assicurato un graduale avvicinamento dei propri requisiti a quelli delle Linee guida nazionali.

Tra i principali contenuti che le Linee guida definiscono, si segnalano:

- prestazione energetica degli edifici: nella fase iniziale la determinazione dell'indice di prestazione considera solamente la climatizzazione invernale e la produzione dell'acqua calda sanitaria. Per la climatizzazione estiva si fa riferimento ad una valutazione qualitativa dell'involucro.
- metodologia di classificazione degli edifici:
 - a) metodo di calcolo di progetto, che è di riferimento per gli edifici di nuova costruzione e per quelli completamente ristrutturati;
 - b) metodo di calcolo da rilievo o standard, che si riferisce agli edifici esistenti;
- metodi di calcolo per la valutazione della prestazione energetica degli edifici, nei quali vengono stabiliti specifici riferimenti tecnici:
 - a) norme UNI TS 11300, parte 1 e 2, per il metodo di calcolo di progetto;
 - b) le norme UNI TS 11300, il programma DOCET di ENEA/CNR ed il metodo semplificato riportato all'Allegato 2 del decreto, per il metodo di calcolo da rilievo o standard
 - c) UNI TS 11300 per la valutazione qualitativa del fabbisogno nel periodo di raffrescamento.
- rappresentazione grafica delle prestazioni e modello di attestato energetico: esso deve contenere l'informazione sintetica in termini di classe energetica globale definita secondo le modalità riportate nell'Allegato 4 per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria.
La rappresentazione grafica globale della prestazione e della classificazione energetica è identificata come sommatoria della prestazione relativa alla climatizzazione invernale ed a quella relativa alla produzione di acqua calda sanitaria;
- classificazione energetica per i singoli appartamenti: le linee guida stabiliscono che per gli edifici residenziali la certificazione riguarda soltanto l'appartamento, indipendentemente dal tipo di impianto centralizzato o individuale. Fanno eccezione alcuni casi specifici, i quali sono in funzione della tipologia di impianto termico e della presenza o meno della regolazione e della contabilizzazione del calore. [3] [14]

Specifiche tecniche UNI/TS 11300

Tali specifiche ad oggi sono le norme di riferimento per la redazione univoca della certificazione energetica e dei calcoli da utilizzare per ricavare gli indici di prestazione. Si tratta di 4 documenti:

1. calcolo per il fabbisogno di energia termica per la climatizzazione invernale e per quella estiva;
2. calcolo per il fabbisogno di energia primaria per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria;
3. calcolo per il fabbisogno di energia primaria per la climatizzazione estiva;
4. l'utilizzo delle energie rinnovabili. [3] [15]

CAPITOLO II

Suddivisione del globo in diverse zone climatiche

Affrontata la parte inerente alla normativa europea ed italiana in materia di certificazione energetica, nel CAPITOLO II è presentata la suddivisione del globo in funzione della temperatura media stagionale, quella annuale e dei gradi giorno di riscaldamento e di raffrescamento. In tale suddivisione sono utilizzati i dati di progetto climatici analizzati dall'ASHRAE¹ nel Handbook-Fundamentals. Essi sono estrapolati dalle 5511 stazioni meteorologiche presenti in tutto il mondo.

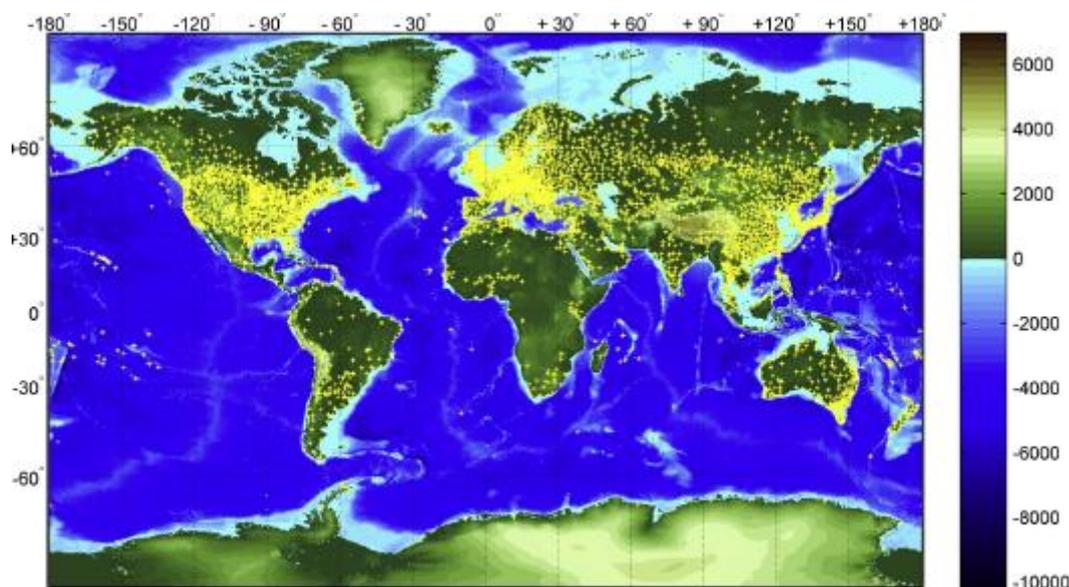


Figura 1: posizione geografica delle stazioni meteorologiche. I diversi colori rappresentano l'altitudine [m].

Nella figura 1 sono presenti sia stazioni a terra sia stazioni marine in modo da poter dettagliare l'intero globo senza significanti discontinuità. Le centraline climatiche presentano una concentrazione maggiore in nord America ed in Europa occidentale. Nelle aree restanti sono distribuite in modo omogeneo, tali da risultare adeguate alla determinazione dei parametri climatici. Tra questi sono d'interesse per la progettazione e l'analisi energetica sugli edifici:

- la temperatura media annuale \bar{T} [°C];
- la temperatura media mensile \bar{T}_m [°C];

¹ ASHRAE: American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers

- i gradi giorno di riscaldamento con temperatura di base di 18,3 [°C],
HDD²_{18,3} [°C-giorno];
- i gradi giorno di raffreddamento con temperatura di base di 18,3 [°C],
CDD³_{18,3} [°C-giorno];

I HDD e i CDD sono ricavati a partire dalla temperatura di base, 18,3 °C, e quella media mensile, con l'utilizzo di interpolazioni lineari, di funzioni probabilistiche e della deviazione standard. [16] [17]

Temperatura media annuale

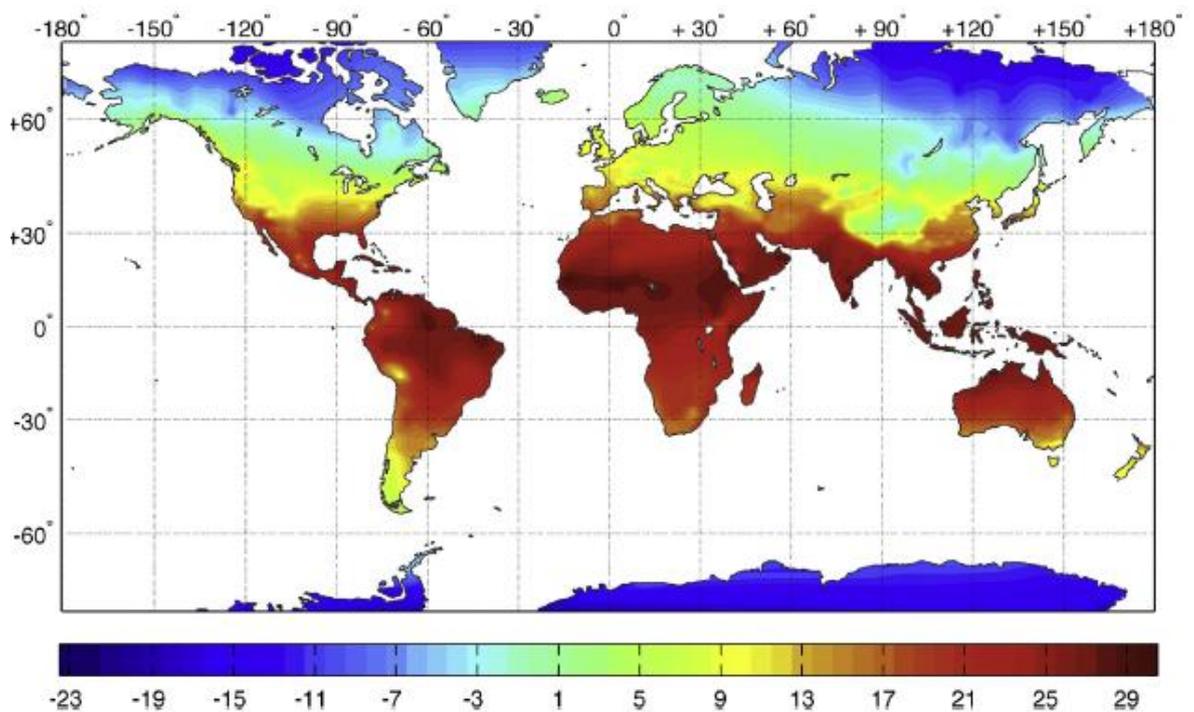


Figura 2: distribuzione globale della temperatura media annuale, \bar{T} [°C]

Nella figura 2 è rappresentata la temperatura media annuale \bar{T} , essa varia tra -22,6 e 31,2 [°C]. La temperatura media è generalmente più alta alle latitudini minori e più bassa in prossimità dei poli.

² HDD: Heating Degree Days

³ CDD: Cooling Degree Days

La fascia climatica più calda si trova tra i 30° N e i 30° S, le aree comprese tra i 30° e i 60° N presentano temperature annuali miti, stesso discorso per quelle comprese tra i 30° e i 60° S.

La fascia climatica più calda è formata dall'Africa Sahariana, da alcune parti dell'Asia e dal Sud America. Le regioni con elevate \bar{T} in Asia sono tipicamente caratterizzate da un clima caldo-umido, invece quelle in Africa Sahariana da uno arido. In quest'ultima, le elevate temperature sono da attribuire al cielo sereno e a piccoli angoli zenitali⁴ combinati ad una trascurabile evapotraspirazione⁵. A parità di latitudine possono essere presenti delle anomalie nella distribuzione della \bar{T} , le quali dipendono dalla topografia e dalla distanza dalle coste. Si nota che la \bar{T} è minore nelle regioni montagnose, l'effetto dell'altitudine è visibile nell'Himalaya nel sud-est asiatico, nelle Ande in sud America, nelle Montagne Rocciose negli Stati Uniti e nelle Alpi in Europa. Siffatto effetto è molto più pronunciato nelle regioni dove le stazioni meteorologiche presentano una densità maggiore. [16]

Temperatura media mensile

Le temperature medie mensili sono presentate nella figura 3; la temperatura media più bassa misurata è pari a -41,9 [°C] nel mese di gennaio nella cittadina di Curapca in Russia; mentre quella media più alta è misurata nel mese di luglio presso l'aeroporto internazionale Kuwait in Kuwait ed è pari a 38,3 [°C].

Si osserva che l'effetto delle regioni montagnose è più marcato nei mesi estivi, e tra queste in quella dell'Himalaya l'effetto è più pronunciato per via della maggiore altitudine. L'oscillazione stagionale della temperatura media è più accentuata nelle aree con elevate latitudini, e meno in quelle comprese tra 15° N – 15° S e in quelle più calde.

Luglio è il mese più caldo nell'emisfero nord, con elevati picchi di temperatura alle latitudini intermedie in nord America, in Europa e in Asia.

⁴ angolo zenitale: nella località considerata, è l'angolo formato dalla direzione dei raggi solari con la perpendicolare alla superficie orizzontale.

⁵ evapotraspirazione: in climatologia, la quantità d'acqua che effettivamente evapora dalla superficie del terreno e traspira attraverso gli apparati fogliari delle piante, in determinate condizioni di temperatura.

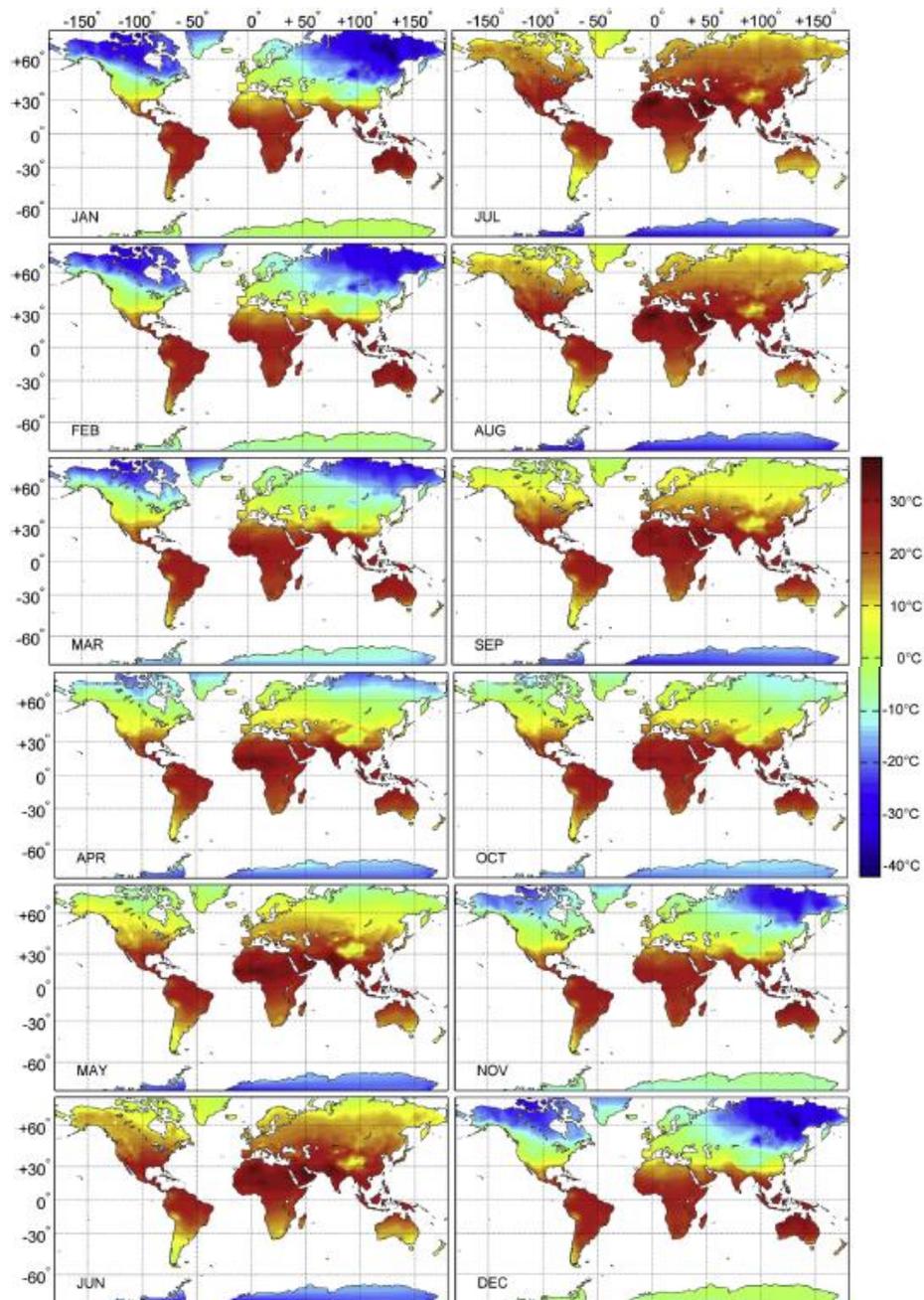


Figura 3: distribuzione della temperatura media mensile, \bar{T}_m [°C]

Le variazioni stagionali sono un ulteriore aspetto da considerare per la progettazione degli edifici. Attualmente, la distribuzione stagionale della temperatura media nei climi freddi fa sì che non sia richiesto il raffrescamento; in altre parole, la progettazione riguarda soltanto l'impianto di riscaldamento. Al contrario nei climi caldi la progettazione dell'impianto riguarda soltanto la parte del raffrescamento. Infine, nelle zone climatiche miti la progettazione riguarda entrambe le fasi, riscaldamento e raffrescamento degli edifici. [16]

Gradi giorno di riscaldamento

I gradi giorno annuali con base 18,3 [°C], $HDD_{18,3}$, sono illustrati in figura 4:

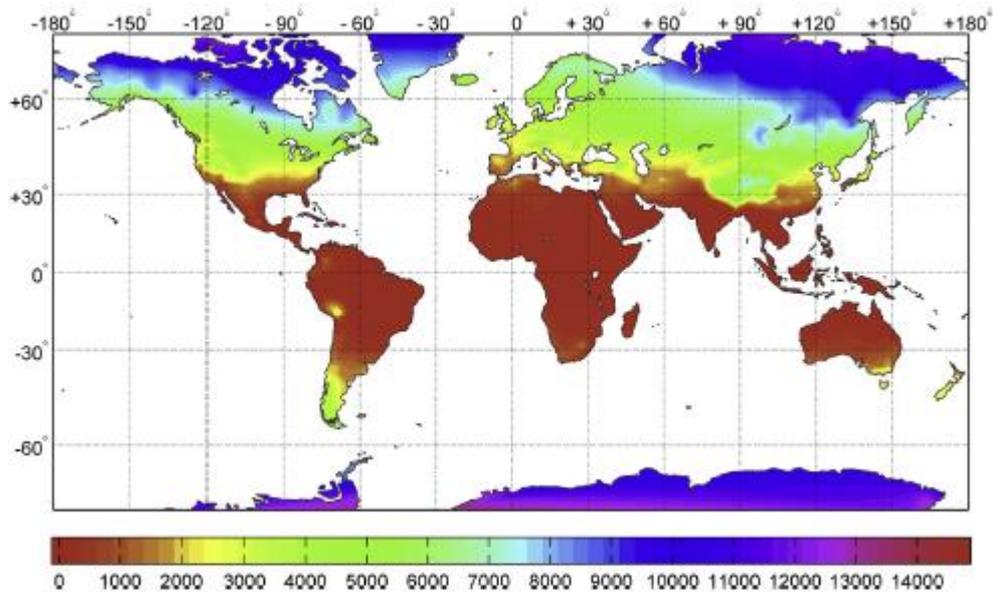


Figura 4: distribuzione annuale dei gradi giorno di riscaldamento $HDD_{18,3}$ [°C-giorno]

Il valore minimo è di 0 [°C-giorno], quello massimo di 14958 [°C-giorno] nella cittadina di Siple Dome nella regione Antartica. La distribuzione dei gradi giorno di riscaldamento segue quella dell'andamento della temperatura media annuale \bar{T} . Nella regione più calda, tra i 30° S e i 30° N, gli $HDD_{18,3}$ sono bassi e prossimi agli [0 °C-giorno]. Nelle restanti aree geografiche l'effetto della latitudine è evidente ma risulta meno marcato rispetto a quello sulla temperatura media annuale \bar{T} ; una delle ragioni può essere l'effetto delle variazioni stagionali o mensili nella distribuzione della temperatura media, che possono comportare una riduzione nell'ampiezza della varianza dei gradi giorno annuali.

Nella figura 5, si presentano le distribuzioni mensili dei gradi giorno con base 18,3 [°C], $MHDD_{18,3}$; di questi ultimi i valori più elevati sono concentrati nelle zone con elevate latitudini dell'emisfero nord, in particolare in Siberia nei mesi di dicembre e gennaio. [16]

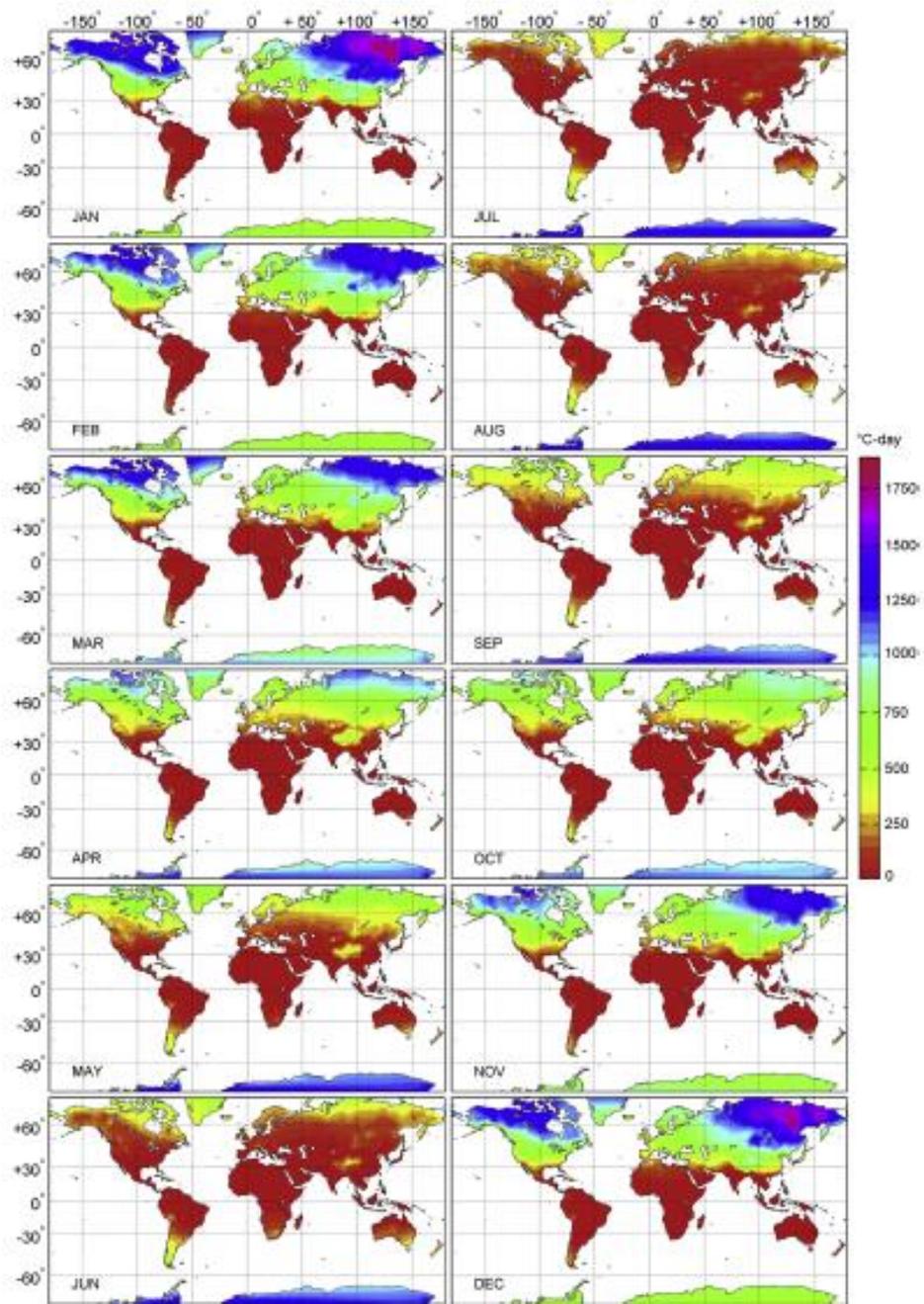


Figura 5: distribuzione mensile dei gradi giorno di riscaldamento, $MHDD_{18,3}$ [$^{\circ}\text{C}\cdot\text{giorno}$]

Gradi giorno di raffrescamento

I gradi giorno annuali di raffrescamento con temperatura di base 18,3 [$^{\circ}\text{C}$], $CDD_{18,3}$, sono illustrati in figura 6; il valore minimo è di 0 [$^{\circ}\text{C}\cdot\text{giorno}$], quello massimo di 4701 [$^{\circ}\text{C}\cdot\text{giorno}$] in Arabia Saudita presso la Mecca. Le zone con elevati $CDD_{18,3}$ sono localizzate alle basse latitudini nel sud America, nell’Africa Sahariana, nel Medio Oriente e nel sud-est asiatico.

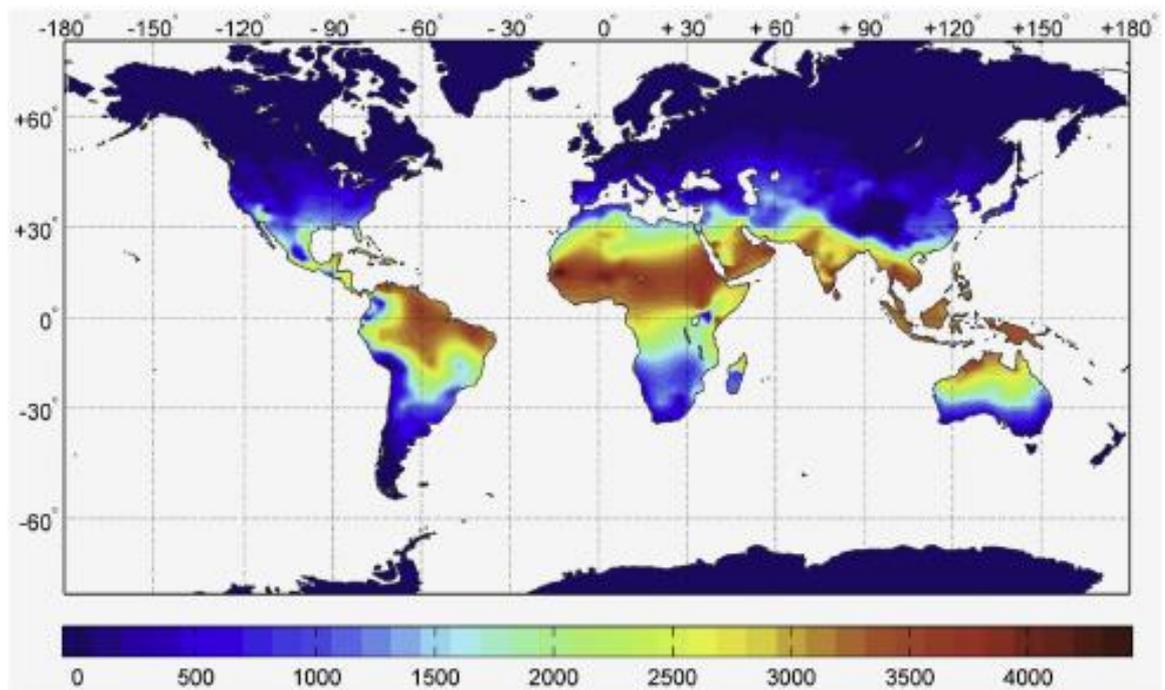


Figura 6: distribuzione annuale dei gradi giorno di raffrescamento, $CDD_{18,3}$ [$^{\circ}\text{C}\text{-giorno}$]

La distribuzione mensile dei gradi giorno di raffrescamento con base $18,3$ [$^{\circ}\text{C}$], $MCDD_{18,3}$ è presentata in figura 7. Le distribuzioni stagionali di temperatura suggeriscono che gli $MCDD_{18,3}$ sono minori nelle stagioni fredde e maggiori in quelle calde.

Le regioni con gradi giorno mensili di raffrescamento più elevati sono concentrate tra le latitudini $0^{\circ} - 30^{\circ}$ N, in particolare in Africa e in Medio Oriente. Alcune aree del sud America, dell’Africa, dell’Asia meridionale e del nord Australia presentano $MCDD_{18,3}$ molto maggiori di zero durante tutto l’anno, ciò indica che all’interno degli edifici occorre soltanto raffrescare. [16]

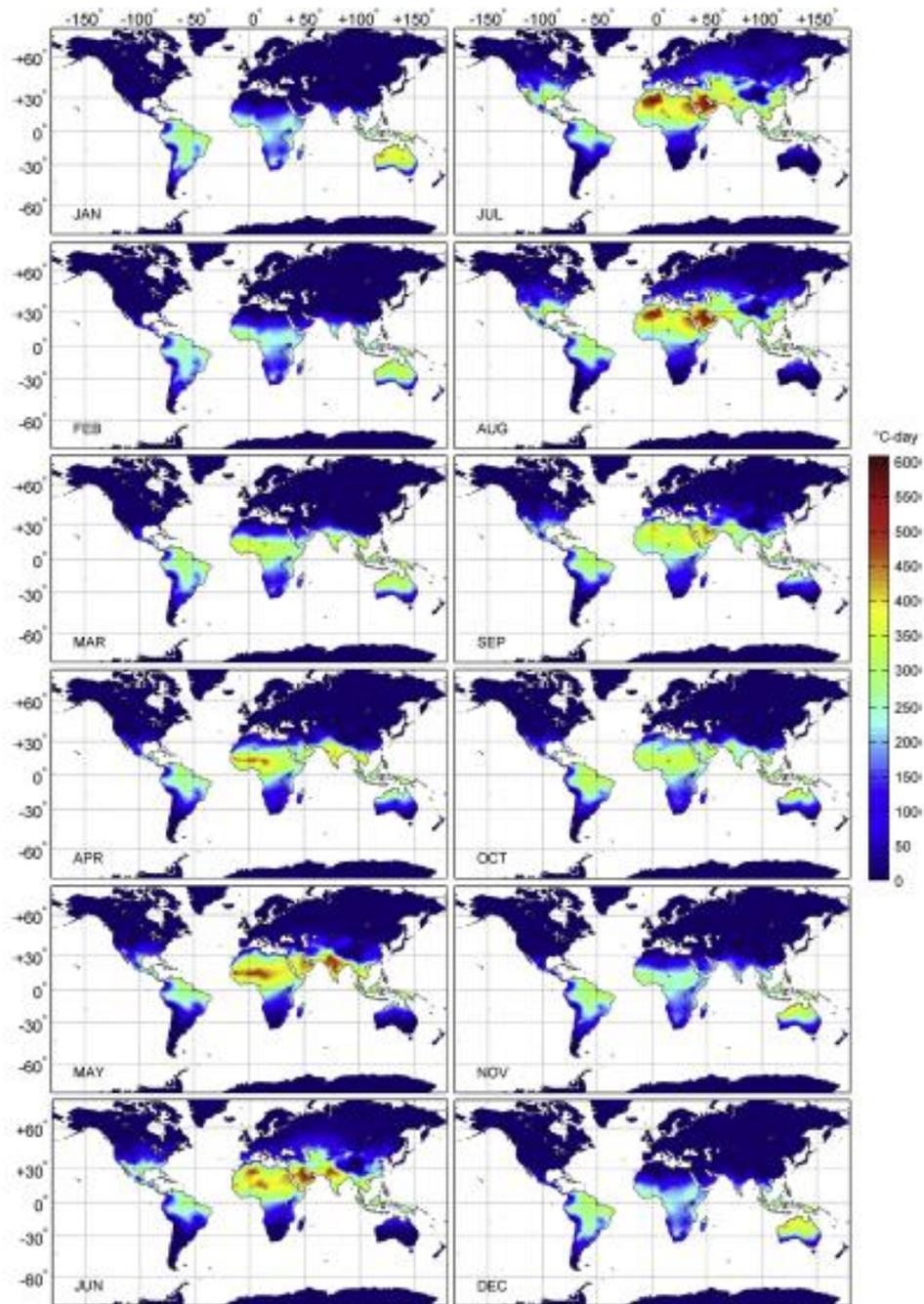


Figura 7: distribuzione dei gradi giorno mensili, $MCD18.3$ [°C-giorno]

Clima e costruzione

Dopo aver analizzato la suddivisione del globo in diverse fasce climatiche, si considerano in questo sottocapitolo le caratteristiche costruttive per i differenti climi. Si può affermare che le risposte costruttive alle svariate condizioni climatiche sono più semplici quando tali condizioni sono estreme e non variano apprezzabilmente durante l'arco dell'anno, come per il clima costantemente freddo, costantemente

caldo secco e costantemente caldo umido. D'altro canto, nei climi temperati come quello mediterraneo caratterizzati dalla presenza di più stagioni, le soluzioni abitative devono essere in grado di rispondere adeguatamente a esigenze contrapposte che mutano durante il corso dell'anno. [18]

Costruzioni tradizionali in base al clima

Di seguito si riportano alcuni esempi di costruzioni tradizionali per le varie condizioni climatiche:

- clima freddo; occorre minimizzare le dispersioni di calore verso l'esterno, ridurre al minimo indispensabile l'aerazione e la ventilazione interna e cercare di sfruttare l'inerzia termica del terreno. Per tanto le strutture devono possedere volumi compatti e in parte seminterrati, pareti massicce e piccole aperture.



Figura 8: iglù, costruzione tipica del nord del Canada

- clima caldo secco; le costruzioni devono minimizzare la captazione solare diurna, favorire il raffrescamento per ventilazione e per evaporazione, e cercare di tenere gli ambienti interni all'ombra. Tali soluzioni si presentano con volumi compatti e addossati, pareti e coperture massicce, corti interne (patii, cortili, etc.) e torri del vento.



Figura 9: abitazione tipica di un clima caldo secco

- clima caldo umido; gli obiettivi devono essere quelli di difendersi dall'umidità, realizzare spazi d'ombra, massimizzare la ventilazione interna e difendersi dalle piogge. Per ottenere tali finalità, le abitazioni devono possedere spazi interni ampi e alti, grandi tetti, schermature solari e pareti perimetrali leggere o assenti.



Figura 10: abitazione tipica per clima caldo umido

- clima temperato; diversamente dagli altri climi trattati, in questo caso bisogna considerare l'alternanza dell'estate con l'inverno e per entrambe ottenere degli scopi differenti; in estate occorre minimizzare la captazione solare e favorire la ventilazione interna; in inverno occorre minimizzare le dispersioni termiche, massimizzare la captazione solare e limitare al minimo la ventilazione interna. Per fare ciò gli edifici devono essere costruiti con pareti perimetrali massicce, grandi aperture a sud e piccole a nord, coperture a terrazzo, a volta se massicce oppure con un sottotetto ventilato se leggere, e schermature solari. [18]



Figura 11: esempio costruzione tipo per un clima temperato

Consumi specifici del parco edilizio mondiale

Nell'ultimo sottocapitolo del CAPITOLO II si analizza il consumo specifico di riscaldamento e raffrescamento sia per gli edifici residenziali, sia per quelli non residenziali.

IIASA⁶, tramite il modello MESSAGE⁷, il quale è utilizzato per la pianificazione e per l'analisi di sistemi energetici a medio-lungo termine, ha suddiviso il pianeta in 11 regioni in base a:

⁶ IIASA: International Institute for Applied Systems Analysis

- fabbisogno energetico
- energia importata, esportata e relativi flussi monetari
- tecnologie energetiche impiegate
- emissioni di inquinanti

Da ciò si ottengono degli indici di energia primaria, secondaria e degli usi finali per vari settori.

In figura 12 si riportano le 11 macroregioni:

NAM: North America	MEA: North Africa and Middle East	SAS: South Asia
LAM: Latin America	AFR: Sub-Saharan Africa	PAS: Other Pacific Asia
WEU: Western Europe	FSU: Former Soviet Union	PAO: Oceania (Pacific OECD Countries)
EEU: Central and Eastern Europe	CPA: Centrally Planned Asia	

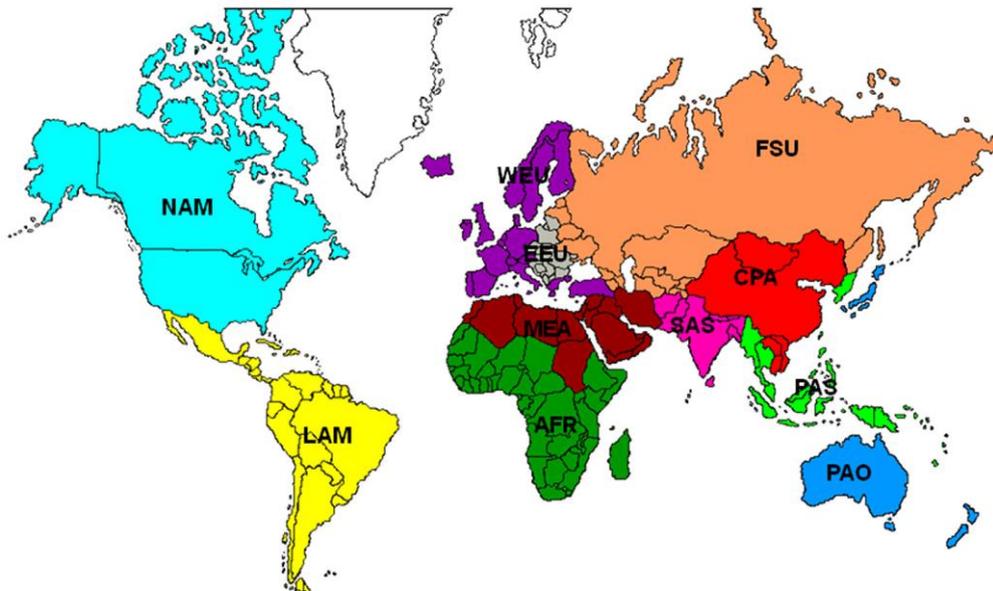


Figura 12: regioni considerate

Per ogni regione si riportano i consumi finali specifici in [kWh/m²] all'anno per il riscaldamento ed il raffrescamento:

⁷ MESSAGE: Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impacts.

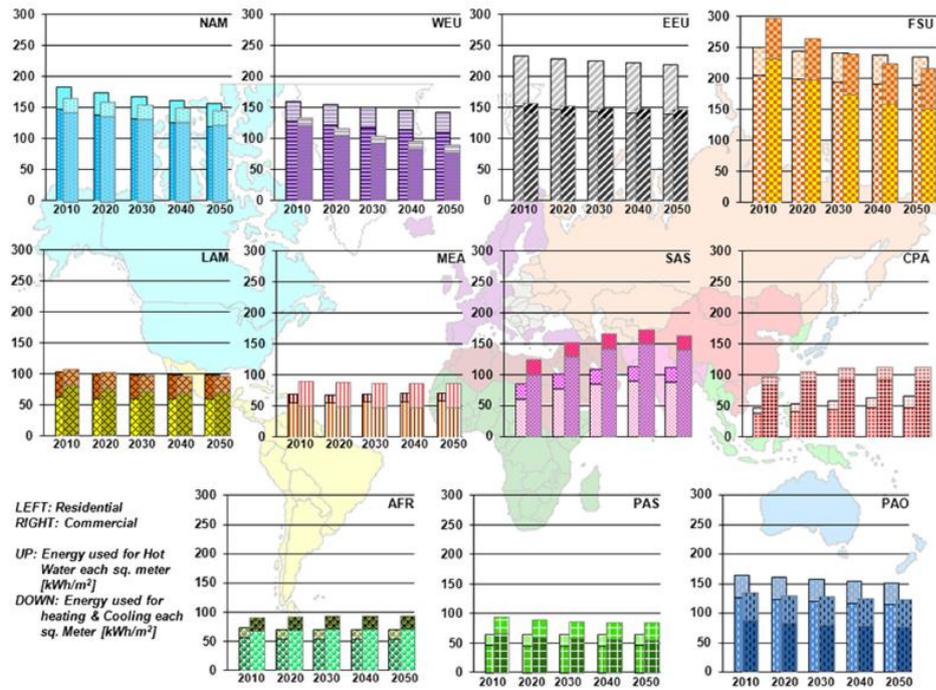


Figura 13: consumi specifici in $[kWh/m^2]$ all'anno per le regioni considerate

Come detto il modello MESSAGE produce delle previsioni nel campo energetico a medio-lungo termine; questo è visibile nella figura 13, nella quale sono presentati possibili scenari per le prossime quattro decadi. Per questa analisi è interessante considerare i valori corrispondenti al 2010 e 2020; in ogni intervallo temporale sono presenti due colonne, quella a sinistra considera gli edifici residenziali, l'altra quelli non residenziali.

Inoltre, è possibile osservare che le macroregioni comprendenti i paesi più poveri del globo e quelli in via di sviluppo, MEA, AFR, LAM, CPA, SAS e PAS presentano dei consumi specifici decisamente bassi, i quali non sono dovuti ad un elevato risparmio energetico ma nella maggior parte dei casi sono ottenuti per l'assenza di impianti di climatizzazione. Le regioni FSU ed EEU, che formano la vecchia Unione Sovietica, presentano i fabbisogni specifici più elevati; questi sono causati oltre che da un clima rigido anche da un parco edilizio datato con scarso isolamento termico per via delle agevolazioni del costo dell'energia durante il periodo del regime comunista. Infine, per le tre macroaree NAM, WEU e PAO comprendenti i paesi più evoluti e ricchi si evidenzia un consumo specifico intorno ai $160\div 180 [kWh/m^2]$ all'anno, esso risulta elevato ma va a diminuire nei prossimi decenni tramite l'ausilio delle politiche sul risparmio energetico. [19] [20]

CAPITOLO III

In questo capitolo si affronta il comfort termico, presentando diversi approcci per la sua determinazione, il discomfort termico locale, analizzando le cause, ed infine si descrivono brevemente due possibili soluzioni d'intervento per limitare le disuniformità termiche locali ed aumentare il comfort dell'ambiente interno.

Comfort termico

Lo sviluppo socioeconomico ha condotto la maggior parte delle persone a trascorrere gran parte del proprio tempo in ambienti confinati, in presenza di un clima artificiale; per questo motivo il presente capitolo ha l'obiettivo di individuare le possibili interazioni fra l'uomo e il clima degli ambienti moderati⁸ evincendo quelle particolari condizioni che determinano il benessere o comfort termico.

Per la definizione di *comfort termico* si hanno diversi approcci:

- approccio fisiologico: si ha comfort quando la quantità dei segnali nervosi che raggiungono l'ipotalamo è minima;
- approccio psicologico: “condizione della mente che esprime soddisfazione nei confronti dello spazio circostante”⁹;
- approccio basato sul bilancio termico: una persona è in condizioni di comfort quando l'energia ricevuta è uguale a quella ceduta. [21] [22]

Sistema di termoregolazione del corpo umano

Per analizzare le condizioni di benessere occorre partire dalle interazioni del corpo umano con l'ambiente circostante. Il corpo umano ha la funzione di regolare la risposta fisiologica in relazione alle sollecitazioni ambientali, attraverso sistemi di controllo finalizzati ad adattarsi il più possibile alle condizioni dell'ambiente, in modo da mantenere costante la temperatura del corpo; questa in condizioni di benessere è di $37 \pm 0,5$ [°C]. Affinché quest'ultima sia rispettata, l'organismo attiva

⁸ ambienti moderati: ambienti confinati dove lo scopo è quello di ricercare le condizioni di comfort (es. residenziale, uffici, negozi etc.)

⁹ ASHRAE Standard 55

un sistema di termoregolazione, il quale ha come sensori una serie di termorecettori che inviano informazioni istante per istante all'ipotalamo, esso nel caso di squilibrio, attiva i sistemi di termoregolazione. [21]

Il corpo umano è suddiviso in due zone:

- *esterna*, formata da pelle e tessuti sottocutanei
- *interna*, comprendente gli organi vitali.

I sistemi di termoregolazione sono:

- termoregolazione *vasomotoria*; i capillari periferici dotati di sfinteri, che aprendosi o chiudendosi, permettono o impediscono l'afflusso di sangue
 - termoregolazione *comportamentale*; il meccanismo contro il caldo consiste nella sudorazione, mentre quello contro il freddo si manifesta con i brividi.
- [23]

Equazione di bilancio energetico del sistema corpo umano - ambiente

Nella condizione di omeotermia¹⁰ l'energia prodotta da un individuo deve essere pari all'energia scambiata con l'ambiente sotto forma di calore o lavoro. Si consideri un sistema costituito dal corpo umano e dall'ambiente circostante, in modo da poter scrivere un'equazione di bilancio energetico. Per ciascuna attività, cioè per un dato lavoro esterno compiuto, si avrà una corrispondente produzione di calore che il corpo in parte cede all'ambiente circostante.

L'unità di misura della potenza metabolica è il Watt per unità di superficie corporea¹¹ oppure il MET¹².

¹⁰ omeotermia: capacità di mantenere costante la temperatura corporea indipendentemente dalle variazioni dell'ambiente esterno. [42]

¹¹ superficie corporea media = 1,8 m²

¹² 1 met = 58,2 W/m².

Tipo di attività	Valore metabolico [W/m ²]	Valore metabolico [met]
Nessuna attività (dormire)	34	0.6
Nessuna attività (posizione sdraiata)	46	0.8
Nessuna attività (posizione seduta, rilassata)	58	1.0
Attività leggera sedentaria (ufficio, casa, scuola,...)	70	1.2
Attività leggera in piedi (compere, lavoro leggero)	93	1.6
Attività media in piedi (lavoro domestico, a macchina)	116	2.0
Attività media in piedi (camminare a 3 km/h)	140	2.4
Attività pesante (fare ginnastica)	174	3.0
Attività pesante (ballare)	290	5.0

Tabella 1: carichi metabolici in funzione delle attività svolte da un soggetto

Il calore prodotto dal metabolismo¹³ nell'unità di tempo viene scambiato con l'esterno tramite radiazione, convezione, conduzione ed evaporazione sia cutanea che respiratoria.

È possibile scrivere l'equazione generale:

$$M - W = (C + R + E_{\text{skin}} + C_k) + (C_{\text{res}} + E_{\text{res}}) + S \quad [\text{W/m}^2] \quad [\text{III.1}]$$

dove:

M: energia nell'unità di tempo associata al metabolismo (funzione dell'attività)

W: potenza meccanica esterna: positiva se è compiuta dal corpo, negativa se è compiuto sul corpo

C: calore scambiato per convezione

R: calore scambiato per irraggiamento

E_{skin}: calore di evaporazione attraverso la pelle

C_k: calore scambiato per conduzione

C_{res}: calore sensibile scambiato attraverso la respirazione

E_{res}: calore latente ceduto per respirazione

S: aumento o diminuzione di energia interna nell'unità di tempo (accumulo termico)

¹³ metabolismo: complesso delle trasformazioni di natura biochimica ed energetica che avvengono negli organismi viventi e attraverso le quali essi si conservano e si rinnovano [43].

In genere W e C_k sono trascurabili, negli ambienti moderati $S = 0$ (equilibrio termico), il bilancio può essere riscritto come:

$$M - (C + R + E_{\text{skin}}) + (C_{\text{res}} + E_{\text{res}}) = 0 \text{ [W/m}^2 \text{]} \quad [\text{III.2}]$$

Come ultimo passaggio si possono raggruppare i termini con la stessa natura e il bilancio si riduce ulteriormente:

$$M - (C + R + C_{\text{res}}) + (E_{\text{skin}} + E_{\text{res}}) = M - Q_S - Q_L = 0 \text{ [W/m}^2 \text{]} \quad [\text{III.3}]$$

dove:

Q_S : rappresenta il termine sensibile (convezione, radiazione e parte della respirazione)

Q_L : rappresenta il termine latente (evaporazione della pelle e parte della respirazione). [23]

Modello di Fanger

Povl Ole Fanger (luglio 16, 1934 – settembre 20, 2006), è stato professore presso la Technical University of Denmark. Gli studi effettuati lo rendono uno dei massimi esperti nel campo del comfort termico e della percezione del comfort degli individui all'interno di ambienti moderati. [24]

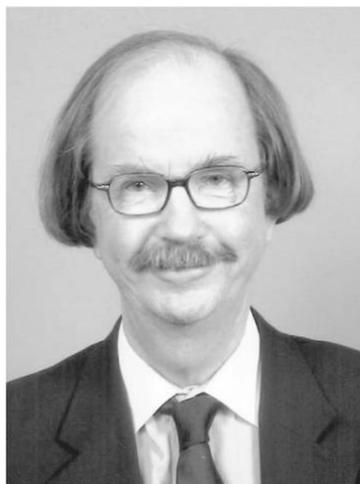


Figura 14: P. Ole Fanger

Il modello di Fanger ha sviluppato due indici di benessere termoisometrico, PMV¹⁴ e PPD¹⁵, in grado di correlare i fattori fisici con quelli fisiologici e psicologici.

I coefficienti considerati sono:

- metabolismo M [met]
- resistenza termica dell'abbigliamento I_{cl} [clo¹⁶]
- temperatura dell'aria T_a [°C]
- temperatura media radiante T_{mr} ¹⁷ [°C]
- velocità dell'aria v_a [m/s]
- pressione parziale del vapor d'acqua P_w [%] (umidità relativa).

Abbigliamento da lavoro	I_{cl}		Abbigliamento giornaliero	I_{cl}	
	clo	m ² , K/W		clo	m ² , K/W
Mutande, tuta, calzini, scarpe	0,70	0,110	Slip, maglietta, pantaloncini, calzini leggeri, sandali	0,30	0,050
Mutande, camicia, pantaloni, calzini, scarpe	0,75	0,115	Slip, sottoveste, calze, abito leggero con maniche, sandali	0,45	0,070
Mutande, camicia, tuta, calzini, scarpe	0,80	0,125	Mutande, camicia con maniche corte, pantaloni leggeri, calzini leggeri, scarpe	0,50	0,080
Mutande, camicia, pantaloni, giacca, calzini, scarpe	0,85	0,135	Slip, calze, camicia a maniche corte, gonna, sandali	0,55	0,085
Mutande, camicia, pantaloni, grembiule, calzini, scarpe	0,90	0,140	Mutande, camicia, pantaloni leggeri, calzini, scarpe	0,60	0,095
Biancheria intima a maniche e gambe corte, camicia, pantaloni, giacca, calzini, scarpe	1,00	0,155	Slip, sottoveste, calze, abito, scarpe	0,70	0,105
Biancheria intima a gambe e maniche corte, camicia, pantaloni, tuta, calzini, scarpe	1,10	0,170	Biancheria intima, camicia, pantaloni, calzini, scarpe	0,70	0,110
Biancheria intima a gambe e maniche lunghe, giacca termica, calzini, scarpe	1,20	0,185	Biancheria intima, completo da corsa (maglia e pantaloni), calzini lunghi, scarpe da corsa	0,75	0,115
Biancheria intima a maniche e gambe corte, camicia, pantaloni, giacca, giacca termica, calzini, scarpe	1,25	0,190	Slip, sottoveste, camicia, gonna, calzettoni spessi al ginocchio, scarpe	0,80	0,120
Biancheria intima a maniche e gambe corte, tuta, giacca termica e pantaloni, calzini, scarpe	1,40	0,220	Slip, camicia, gonna, maglione a girocollo, calzettoni spessi al ginocchio, scarpe	0,90	0,140

Figura 15: valori della resistenza termica del vestiario I_{cl}

Gli esperimenti sono condotti su un campione di 1200 persone sane. A tali soggetti viene richiesto di esprimere il proprio giudizio, in una scala di sette valori¹⁸ che

¹⁴ PMV: Predicted Mean Vote o Voto Medio Previsto.

¹⁵ PPD: Predicted Percentage of Dissatisfied, esprime la percentuale di persone insoddisfatte in un determinato ambiente.

¹⁶ 1 clo = 0,155 m² °C/W

¹⁷ T_{mr} : temperatura di un ambiente fittizio, caratterizzato da pareti aventi stessa temperatura, nel quale un soggetto scambierebbe per irraggiamento lo stesso flusso termico che scambia nell'ambiente reale in cui ogni parete ha una propria temperatura. Utilizzata per caratterizzare, dal punto di vista radiativo, un locale con dissimmetrie termiche, per mezzo di un solo valore della temperatura [44]

¹⁸ scala dei valori: +3 molto caldo, +2 caldo, +1 leggermente caldo, 0 neutro, -1 leggermente freddo, -2 freddo e -3 molto freddo.

vanno da +3 a -3, sulle sensazioni percepite in un ambiente al variare dei sei coefficienti.

Si correlano i dati delle risposte dei soggetti e i termini del bilancio energetico del corpo umano in ambiente, in modo da definire il suddetto indice $PMV = f(M, I_{cl}, T_a, P_w, v_a, T_{mr})$. Esso rappresenta un voto medio che esprime il giudizio di un gruppo di individui; in questo modo si può quantificare la sensazione termica per mezzo di una scala soggettiva che assegna ad ogni ambiente un voto.

Il PMV è stabilito in condizioni di sedentarietà e pertanto è applicabile con qualche riserva per range di valori metabolici diversi. Lo stesso Fanger consiglia di utilizzare l'indice nell'intervallo della scala psicofisica compreso tra -2 e +2 e per valori delle variabili climatiche compresi nei seguenti intervalli: $M = 0,8 - 4$ [met]; $I_{cl} = 0 - 2$ [clo]; $T_a = 10 - 30$ [°C]; $T_{mr} = 10 - 40$ [°C]; $v_a = 0 - 1$ [m/s] e U.R.¹⁹ = 30 - 70 %.

In situazioni tali da determinare un $PMV = 0$, non è possibile avere il 100% di individui soddisfatti. Lo studio prosegue a tale proposito introducendo l'indice PPD, in modo da valutare statisticamente gli insoddisfatti, intendendo come tali tutti quelli che manifestano il giudizio con i voti +3, +2, -2, -3.

Dal legame del PPD e del PMV si ricava la curva che esprime la percentuale di insoddisfatti in funzione del voto medio previsto:

¹⁹ U.R. = umidità relativa; indica il rapporto percentuale tra la quantità di vapore contenuta in una massa d'aria e la quantità massima (cioè a saturazione) che il volume d'aria può contenere nelle stesse condizioni di temperatura e pressione e cioè il rapporto tra la pressione parziale del vapore e la pressione di saturazione.

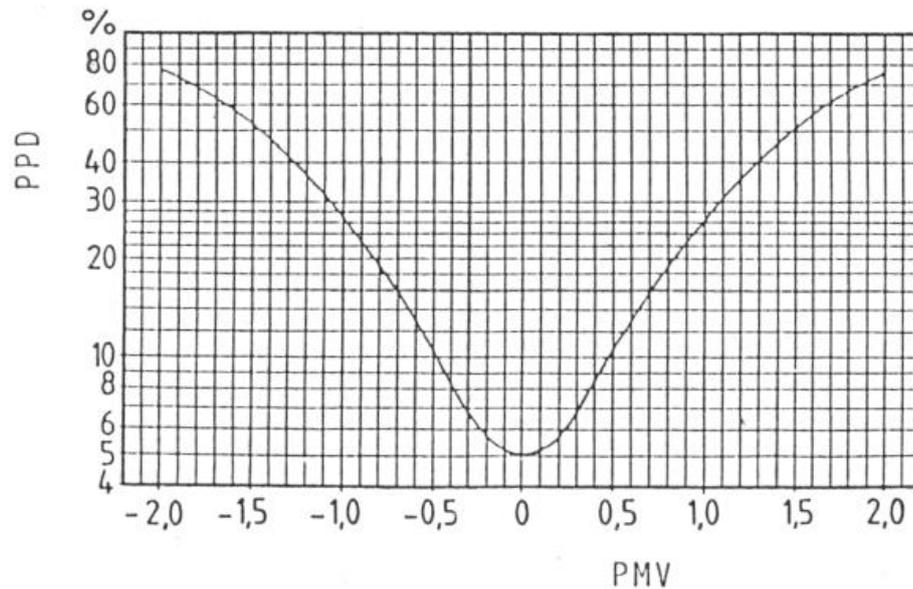


Figura 16: percentuale prevista di insoddisfatti (PPD) in funzione del voto previsto medio (PMV)

Dalla figura 16 si nota che per un voto medio previsto pari a 0 le condizioni ambientali determinano in media un 5% di soggetti insoddisfatti (nei confronti del microclima).

Gli indici determinati da Fanger sono ripresi e stanno alla base della norma UNI EN ISO 7730. [21] [22] [23]

Modello Adattivo

Nel modello di comfort adattivo l'occupante di un edificio non è più semplicemente inteso come un soggetto passivo, così come appariva nel modello statico di Fanger, ma come un agente attivo che interagisce a tutti i livelli con l'ambiente in cui soggiorna.

Alla base c'è la convinzione che il soggetto, consciamente o inconsciamente, svolge un ruolo attivo nella creazione delle condizioni termiche che preferisce per raggiungere più facilmente la soddisfazione nei confronti del microclima; in tal senso attua un processo di adattamento, definito come quel processo di graduale diminuzione delle reazioni individuali agli stimoli ambientali.

Si distinguono tre tipologie di adattamento:

- *comportamentale*: include tutte le azioni condotte, coscientemente e non, da un individuo al fine di interagire sui flussi di calore del bilancio termico corporeo. Tali azioni possono essere classificate in:
 - personali, ad esempio la rimozione di un indumento
 - tecnologiche, l'accensione di un sistema di condizionamento
 - culturali, riposare durante le ore più calde del giorno
- *fisiologico*: dipende dalla capacità dell'uomo di acclimatarsi ad un ambiente attraverso una naturale riduzione dell'attività metabolica. Questo meccanismo è maggiormente sviluppato nei popoli che fronteggiano costantemente condizioni climatiche estreme.
- *psicologico*: la dimensione psicologica di adattamento termico si riferisce all'alterazione percettiva delle informazioni sensoriali dovuta alle passate esperienze. La temperatura di comfort "personale" può risultare anche molto diversa da quella termostatica poiché condizionata dall'assuefazione allo stimolo esterno.

La normativa americana ASHRAE 55 ha suggerito linee guide per l'analisi del comfort termico definito dal modello adattivo per gli ambienti ventilati naturalmente. La 55 indica una temperatura costante all'interno degli edifici per ottenere il comfort. Ulteriori ricerche in campo, elencate nel report ASHRAE RP-884²⁰, in diverse parti del mondo hanno messo in evidenza come la temperatura che viene percepita confortevole varia con stagione e clima. Questo significa che il comfort può essere raggiunto con meno energia in un edificio la cui temperatura interna segue la temperatura esterna; per tanto il modello adattivo, generalmente, definisce temperature di comfort più flessibili rispetto al modello di Fanger.

Nella determinazione del modello è stata individuata una correlazione diretta tra la temperatura di comfort interno e la temperatura esterna del tipo:

$$T_{in,set}=aT_{out}+b \text{ [}^{\circ}\text{C]} \quad \text{[III.4]}$$

dove:

- $T_{in,set}$: temperatura interna di comfort

²⁰ ASHRAE RP-884: database globale di esperimenti su edifici reali sul campo del comfort termico.

- T_{out} : temperatura esterna di riferimento, che può essere mensile²¹ oppure running mean external temperature²²
- a: costante che rappresenta la correlazione tra $T_{in,set}$ e T_{out}
- b: costante che rappresenta la temperatura minima accettabile. [21] [23] [25] [26]

Modello bioclimatico

Il metodo bioclimatico si basa sul “*diagramma di Givoni*²³”, nel quale vengono definite le condizioni di comfort termoigrometrico di un ambiente interno direttamente sul diagramma psicometrico dell’aria umida; tali condizioni sono definite in modo semi-empirico, basandosi sui feed-back²⁴ forniti da una numerosissima popolazione, omogenea dal punto di vista culturale e da quello delle aspettative bioclimatiche.

Il diagramma attualmente in uso è una sintesi, peraltro non semplice, ottenuta a partire da lavori condotti negli Stati Uniti, in Europa ed in Israele.

Normalmente il diagramma è utilizzato durante la fase di progettazione di un edificio; lo stesso può però essere impiegato per la valutazione del comfort termoigrometrico di un edificio esistente. In tal caso in esso sono riportate tutte le coppie di valori temperatura-umidità relativa misurate per l’ambiente sotto osservazione e viene verificato se i punti così identificati ricadono o meno nella zona di comfort (invernale o estivo a seconda della stagione durante la quale è stata effettuata la prova).

²¹ temperatura mensile: è una temperatura media mensile, ricavata dai valori medi giornalieri.

²² running mean external temperature: combinazione lineare delle temperature medie giornaliere dei giorni precedenti, calcolata giornalmente.

²³ Baruch Givoni: architetto israeliano, attualmente è uno dei maggiori esperti in architettura bioclimatica.

²⁴ feed-back: risposta, esito.

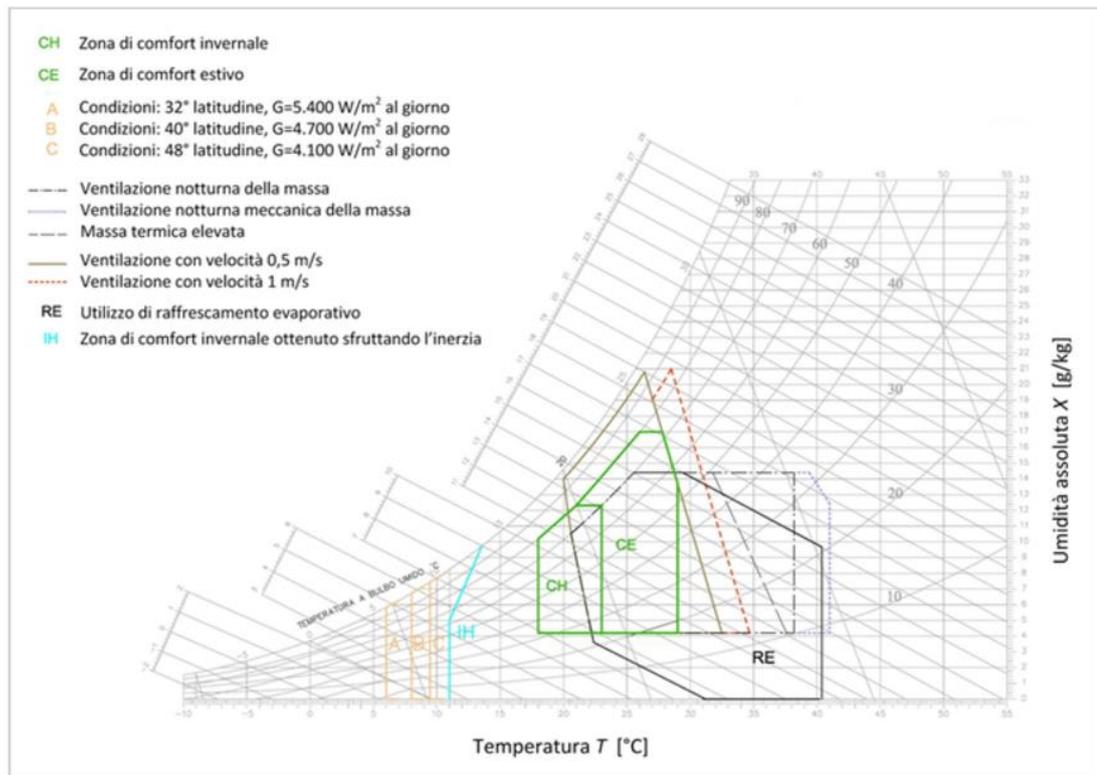


Figura 17: diagramma di Givoni nella forma attuale e completa

Nel diagramma sono indicate le zone di comfort estivo (CE) ed invernale (CH), le quali sono evidenziate in verde. Inoltre, sono evidenziate altre zone che indicano strategie di massima adottabili per risolvere eventuali problemi di discomfort termoigrometrico.

I vantaggi di tale metodo rispetto a quello di Fanger e a quello adattivo, sono l'assoluta obiettività, in quanto non vengono fatte ipotesi soggettive, e la possibilità di stabilire facilmente delle strategie di riqualificazione per migliorare il comfort termoigrometrico.

Inoltre, presenta il vantaggio di richiedere soltanto due misure per poter essere attuato, ossia quello di temperatura e umidità relativa dell'aria. Ciò è fatto mediante un termoigrometro con datalogger, almeno uno per ambiente studiato. [27]

Esempio di valutazione

Si riporta un esempio reale, condotto per un'abitazione ad uso civile situata in provincia di Como. L'analisi è effettuata rilevando i valori della temperatura in

ambiente e dell'umidità relativa dell'aria. Le misure sono acquisite ogni dieci minuti per trenta giorni consecutivi nel periodo primaverile (da fine febbraio a fine marzo).

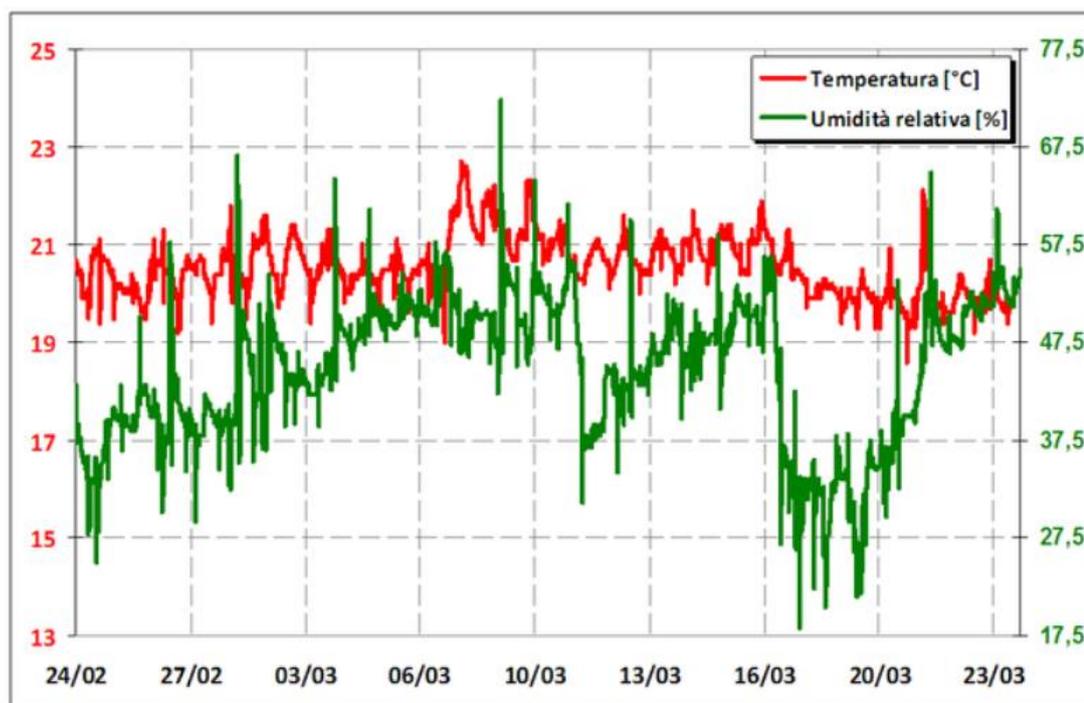


Figura 18: dati rilevati

Si è innanzitutto proceduto ad un confronto di tali dati con i limiti imposti dalla L. 10/1991 dalla DGR VIII/8745²⁵ della regione Lombardia e dal D.lgs. 192/2005. Per ottenere un confronto più semplice ed immediato, si è scelto di ricondurre le due grandezze monitorate ad un unico parametro, ossia l'umidità assoluta²⁶ dell'aria. Si riportano qui sotto i diagrammi utili a tali confronti:

²⁵ DGR VIII/8745: Delibera di Giunta Regionale per le Disposizioni inerenti all'efficienza energetica in edilizia.

²⁶ umidità assoluta: rapporto tra la massa del vapore acqueo e il volume che la contiene.

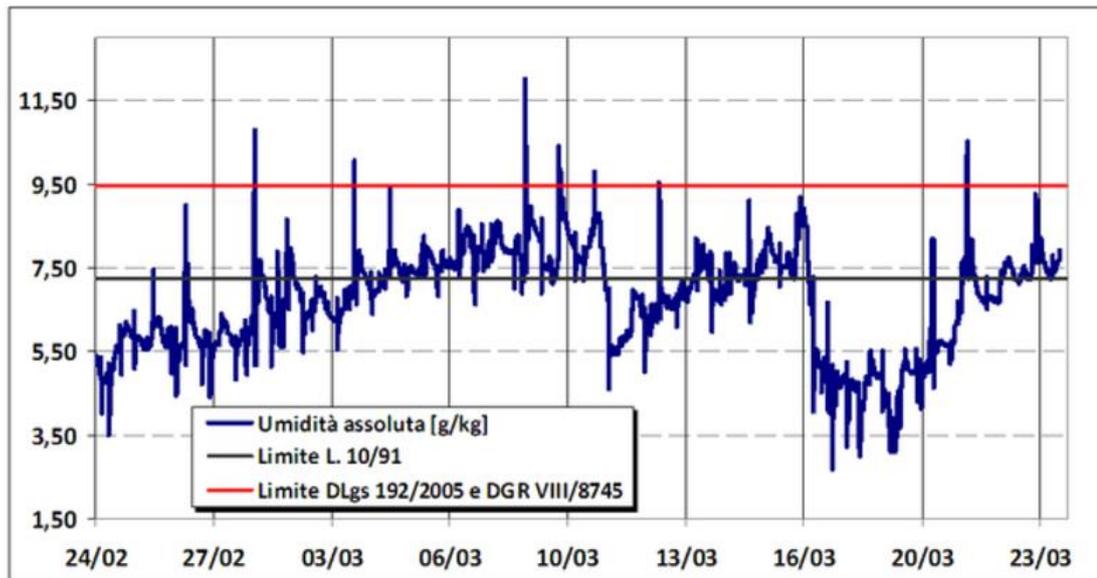


Figura 19: limiti di misura delle normative e valori delle umidità assolute misurate.

Si nota che molti dei punti misurati non rispettano il limite imposto dalla L. 10/91, che corrisponde ad una temperatura in ambiente di 20 [°C] ed un'umidità relativa del 50 %. Si osserva inoltre che il limite imposto di una temperatura di 20 [°C] ed un'umidità relativa del 65 % dalla normativa attuale, D.lgs. 192/2005 e DGR VIII/8745, risulti esser maggiormente rispettato.

Per ovviare a tale problema si è quindi scelto di affidarsi all'analisi supportata dal diagramma bioclimatico di Givoni:

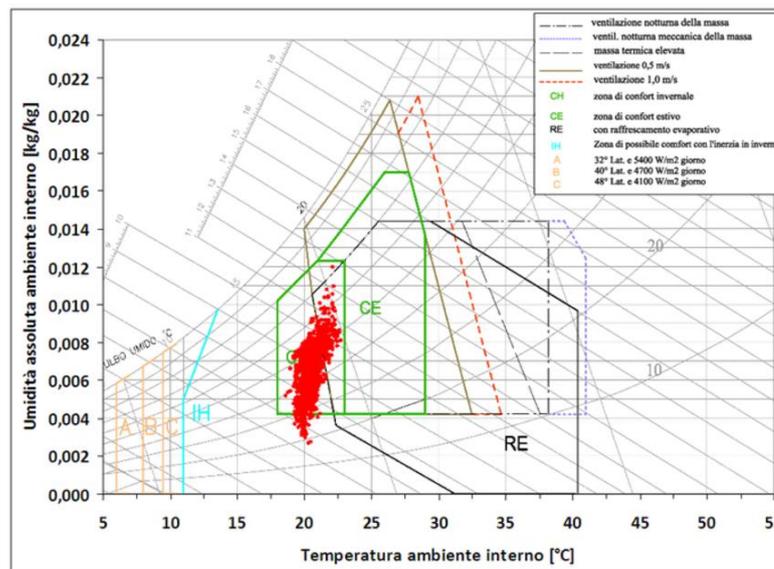


Figura 20: diagramma di Givoni con i dati misurati.

Dalla figura 20: la maggior parte dei valori misurati rientra all'interno della zona caratterizzante l'accettabilità del comfort termoigrometrico durante la stagione invernale. Ciò significa che durante questa stagione sono verificate le condizioni di comfort termoigrometrico.

Fanno eccezione circa il 12% delle condizioni rilevate, le quali risultano, anche se non di molto, al di fuori del limite della zona di comfort invernale e tutte caratterizzate da temperature attorno ai 20 [°C] ma umidità relativa dell'aria insufficiente, inferiore a 0,004 kg/kg ovvero circa il 28 % a 20 [°C].

Questa osservazione ha consentito di porre in evidenza una problematica e risalirne così alla causa, ossia il malfunzionamento dell'impianto di VMC²⁷ installato presso l'abitazione. Essendo questa certificata in classe A ed essendo stata realizzata in modo da minimizzare le perdite per ventilazione dovute a fenomeni naturali (infiltrazioni, ecc.), il malfunzionamento di tale impianto ha causato delle situazioni anomale come quella rilevata strumentalmente; è stato quindi sufficiente ripristinare il corretto funzionamento dell'impianto di VMC per ripristinare anche il corretto comfort termoigrometrico. [27]

Discomfort termico locale

Nella teoria di Fanger, presentata nel sottocapitolo precedente, sono stati introdotti il PMV e il PPD, che valutano il "comfort globale". Le condizioni $-0,5 < PMV < +0,5$ e $5\% < PPD < 10\%$ rappresentano condizioni necessarie ma non sufficienti per il comfort. Perché ci sia effettivamente comfort, infatti, deve essere anche nullo il discomfort dovuto a disuniformità delle variabili ambientali, cioè non deve esserci "disagio termico locale".

Le cause di discomfort locale sono quattro:

- elevata differenza verticale di temperatura;
- pavimento troppo caldo o troppo freddo;
- correnti d'aria;
- elevata asimmetria media radiante. [28]

²⁷ VMC: Ventilazione Meccanica Controllata.

Elevata differenza verticale di temperatura

Generalmente negli ambienti chiusi esiste un gradiente verticale della temperatura dell'aria; in particolare la temperatura in prossimità del soffitto è maggiore di quella del pavimento. Questa differenza, oltre a comportare un maggior consumo di energia (nel caso di ambiente riscaldato), può comportare una sensazione di discomfort locale per i soggetti esposti a quel microclima, che possono avvertire più caldo alla testa che ai piedi.

La UNI-EN-ISO 7730 assume come limite un gradiente di 3 [°C/m] al quale corrisponde una percentuale di insoddisfatti minore del 5 %. [28]

Pavimento troppo caldo o troppo freddo

La temperatura del pavimento ha una doppia influenza sulla sensazione termica: da una parte è determinante ai fini del valore della temperatura media radiante, dall'altra può causare discomfort locale ai piedi.

Per la UNI-EN-ISO 7730, in inverno, per persone che indossano calzature idonee, sono accettabili valori della temperatura del pavimento comprese tra 18 e 26 [°C] (si può arrivare a 29 [°C] per pavimenti riscaldati), limiti ai quali corrisponde una percentuale di insoddisfatti del 10 %. Per la stagione estiva non esiste alcun limite. [28]

Correnti d'aria

Il discomfort da corrente d'aria è definito come un indesiderato raffreddamento locale del corpo umano, causato dal movimento dell'aria. È un problema molto delicato e dibattuto; delicato, perché spesso sono proprio le correnti d'aria le cause del discomfort, soprattutto negli ambienti provvisti di impianti di climatizzazione con ventilazione forzata e nei mezzi di locomozione (auto, treni, ecc.); dibattuto, perché sono in corso molte ricerche e forse non si sono ancora ottenuti risultati definitivi.

Sperimentalmente si è verificato che la sensazione di discomfort da corrente d'aria è influenzata:

- dal valore massimo e dalle fluttuazioni della velocità, che sono ben rappresentati dal valore medio e dall'intensità di turbolenza;
- dalla temperatura della corrente (al crescere della temperatura diminuisce il discomfort);
- dalla zona del corpo che viene investita dalla corrente (le zone più sensibili sono testa, collo, spalle e caviglie);
- dall'attività del soggetto (la sensibilità delle persone alle correnti d'aria diminuisce al crescere dell'attività). [28]

Elevata asimmetria della temperatura media radiante

L'asimmetria della temperatura media radiante è la differenza tra le temperature piane radianti misurate sulle due facce opposte di un elementino piano. Nel caso degli ambienti reali non isotermi, la temperatura piana radiante dipende dalla posizione della faccia dell'elementino.

Tale discomfort si verifica raramente e solo nella stagione invernale. In pratica la causa può essere la presenza di una o più superfici esterne vetrate o di un impianto di riscaldamento a soffitto. [28]

Sintesi dei requisiti per il disagio termico locale

Nella figura 21 si riportano i valori per il periodo estivo e per quello invernale normati dalla UNI-EN-ISO 7730 per le cause di discomfort termico locale:

Variabile	Periodo invernale	Periodo estivo
Temperatura operativa	20 – 24 °C	23 – 26 °C
Differenza verticale di temperatura (tra 1,1m e 0,1 m dal pavimento)	< 3 °C	< 3 °C
Temperatura superficiale del pavimento	19 – 26 °C (29 °C per riscaldamento a pavimento)	–
Asimmetria temperatura radiante pareti	< 10 °C	–
Asimmetria temperatura radiante soffitto	< 5 °C	–
Umidità relativa	30 – 70 %	30 – 70 %
Velocità aria (ad es. per DR 15% da grafico precedente)	0,15 m/s (22 °C)	0,17 m/s (24 °C)

Figura 21: parametri per il discomfort locale

Interventi pratici per il rispetto del comfort termico

I principali fattori che influenzano l'ambiente termo-igrometrico in uno spazio confinato sono:

- le caratteristiche dell'involucro edilizio,
- le sorgenti di calore e di vapore presenti all'interno,
- il clima esterno,
- le caratteristiche dell'impianto di climatizzazione.

Per tanto al fine del miglioramento del comfort termico risulta efficace agire mediante coibentazione dell'involucro opaco e trasparente. Nel primo caso i sistemi a cappotto risultano essere i migliori interventi per l'isolamento della struttura opaca, in quanto riducono le perdite di calore dell'edificio durante la stagione invernale e limitano il surriscaldamento durante quella estiva. Nel secondo caso, la sostituzione di serramenti datati con tecnologie in grado di offrire elevate prestazioni di isolamento termico sia in inverno che in estate.



Figura 22: abitazione ante e post isolamento

In figura 22 è considerato un edificio ante e post coibentazione a cappotto, in particolare la figura confronta per il periodo invernale le temperature in più punti della stanza; si nota nella foto a sinistra (ante coibentazione) che l'aria interna si trova a 23 [°C] e le zone in prossimità del pavimento, del soffitto, della parete, del vetro e degli angoli hanno temperature non uniformi, ciò è indice di scarso comfort termico ed elevati disagi termici locali; invece nella foto a destra (post coibentazione) l'andamento delle temperature nei diversi punti è prossimo a quello dell'aria interna.

Oltre all'intervento a cappotto, un'altra soluzione è quella di un'adeguata progettazione del sistema di climatizzazione, in grado di fornire 20 [°C] nel periodo invernale e 26 [°C] nel periodo estivo; attualmente con l'ausilio di tecnologie inverter è possibile modulare la potenza erogata, eliminando la sequenza di accensioni/arresti dei climatizzatori tradizionali.

La combinazione di isolamento e d'impianto di climatizzazione ben progettato permette sia di migliorare il comfort termico sia di ridurre i consumi di energia. [21]
[22]

CAPITOLO IV

Nel CAPITOLO IV si affronta in dettaglio: lo stato dell'arte. Si analizzano le prestazioni energetiche degli edifici, considerando le varie classi; infine si presentano le molteplici tecnologie sia impiantistiche per la climatizzazione sia dell'involucro abitativo.

Classificazione in funzione del livello di prestazione energetica

Attualmente la tecnologia tradizionale si affianca a sistemi più innovativi per garantire una progettazione sempre più attenta al comportamento energetico dell'edificio; i componenti dell'involucro edilizio non sono considerati a sé stanti, ma sono parte integrante di un sistema edificio-impianto in cui interagiscono tra loro per lo sviluppo di strategie finalizzate al conseguimento di elevate prestazioni energetiche.

In senso più generale si può classificare il patrimonio edilizio in funzione del livello di prestazione energetica, secondo le seguenti macro-aree:

- *edifici convenzionali che non risultano adeguati alle normative sul risparmio energetico*
- *edifici convenzionali che corrispondono a tali normative*
- *edifici a basso consumo energetico (nZEB²⁸)*
- *edifici passivi*
- *edifici a consumo energetico zero (ZEB²⁹)*

Da questa classificazione risulta evidente che le prestazioni energetiche sono tanto più performanti quanto più ci si avvicina all'ultima voce dell'elenco.

²⁸ nZEB: nearly Zero Emission Building

²⁹ ZEB: Zero Emission Building

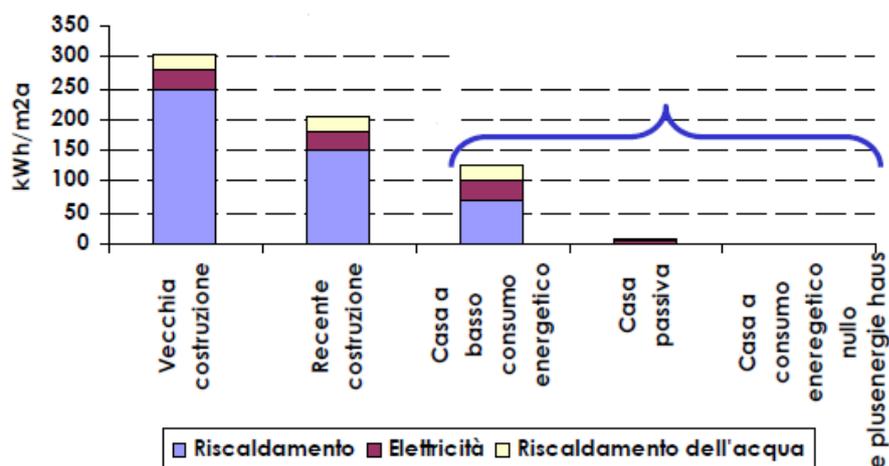


Figura 23: classificazione prestazione energetica

Si analizzano di seguito queste ultime tre macro-aree, le quali meritano un'attenzione maggiore perché costituiscono l'obiettivo verso cui dovrà tendere tutta la futura progettazione edilizia; dopo di che si analizzano gli impianti per la produzione di energia ed infine si dedicherà un ulteriore sottocapitolo per trattare nel dettaglio lo stato dell'arte dell'involucro edilizio, sia per quanto riguarda la parte opaca che quella trasparente. [29]

nZEB

Gli nZEB sono degli edifici ad altissima prestazione energetica, in grado di bilanciare nel miglior modo possibile l'impiego dell'energia consumata e di quella prodotta; sono edifici con una domanda di energia "convenzionale"³⁰ molto bassa o addirittura vicina allo zero, perché viene coperta in misura significativa da fonti energetiche rinnovabili, siano esse collocate in situ o nelle vicinanze.

Gli edifici nZEB sono in grado di azzerare il loro fabbisogno energetico annuale per lo più attraverso l'efficientamento degli apporti energetici, sfruttando quindi le energie rinnovabili, non sempre quindi con significativi risultati in termini di contenimento delle dispersioni energetiche dell'involucro. [30]

³⁰ convenzionale: energia fornita da combustibili fossili.

Edificio passivo

Il concetto di edificio passivo nasce nel maggio del 1988 dalla collaborazione tra Bo Adamson dell'università di Lund in Svezia e Wolfgang Feist dell'Institut für Umwelt und Wohnen³¹ in Germania. La loro idea è poi sviluppata attraverso un numero di progetti di ricerca, col sostegno finanziario da parte dello stato tedesco di Hessen³²; l'obiettivo è quello di realizzare edifici a basso consumo energetico ed a costi ragionevoli per il clima nordeuropeo. Le prime abitazioni passive furono costruite a Darmstadt in Germania nel 1990.



Figura 24: prima passivhaus in Germania a Darmstadt

Il Passivhaus Institute è fondato nel settembre 1996, sempre a Darmstadt. Da allora si sono costruiti migliaia di edifici in varie parti del mondo, diventando un vero e proprio standard costruttivo.

Una passivhaus³³ è un edificio che deve rispettare determinati criteri: fra gli altri, il fabbisogno termico per il riscaldamento ed il raffrescamento deve rimanere al di sotto di 15 [kWh/m²] all'anno; il fabbisogno totale di energia primaria deve essere

³¹ Institut für Umwelt und Wohnen: istituto per l'ambiente e l'edilizia.

³² Stato tedesco di Hessen: uno degli stati confederati della Germania.

³³ Passivhaus: casa passiva.

minore di 120 [kWh/m²] all'anno³⁴ ed il valore n_{50} ³⁵ deve risultare in opera minore di 0,6 h⁻¹. Queste prestazioni si ottengono con una progettazione molto attenta, specie nei riguardi del sole, con l'adozione di isolamento termico ad altissime prestazioni su murature perimetrali, tetto e superfici vetrate e mediante l'adozione di sistemi di ventilazione controllata a recupero energetico.

I 5 punti fondamentali richiesti dallo standard *Passivhaus* sono:

- ottima protezione termica di tutti gli elementi costruttivi dell'involucro termico dal pavimento alle pareti esterne fino al tetto;
- finestre e portafinestre con doppi/tripli vetri basso emissivi con un elevato valore di fattore solare g e telai molto ben coibentati; accurata progettazione e controllo degli apporti solari passivi progettando accuratamente le superfici finestrate, eventualmente differenziate per ogni lato dell'edificio, garantendo al contempo assenza di surriscaldamento estivo;
- esecuzione a regola d'arte della protezione termica fino ai minimi dettagli con riduzione al minimo di tutti i ponti termici;
- tenuta all'aria degli elementi costruttivi esterni verificata mediante test di pressione con blower door³⁶;
- ventilazione controllata con recupero di calore particolarmente efficiente per evitare dispersioni di calore e garantire al contempo un'idonea qualità di aria interna.

Grazie al raggiungimento di questi valori si è generalmente in grado di garantire il benessere termico senza che sia necessaria l'installazione di alcun impianto di tipo convenzionale. L'energia necessaria per pareggiare il bilancio termico residuo della struttura viene in genere provvista attraverso sistemi non convenzionali³⁷. [30] [31] [32]

³⁴ 120 kWh/m² all'anno: fabbisogno di energia primaria totale, di riscaldamento, raffrescamento, di acqua calda sanitaria, energia elettrica dei dispositivi e corrente elettrica "ausiliari".

³⁵ n_{50} : ricambio di aria interna per perdite attraverso gli spifferi in corrispondenza di una depressione/sovrappressione di 50 Pascal.

³⁶ blower door: porta soffiante.

³⁷ non convenzionali: impianti di produzione di energia da rinnovabili.

ZEB

Uno degli obiettivi a lungo periodo dell'UE e degli Stati Uniti è la promozione degli ZEB, per ridurre il consumo di energia e far sì che l'energia necessaria sia prodotta tramite fonti rinnovabili; avendo come obiettivo dunque l'autosufficienza energetica. Si definiscono ZEB gli edifici residenziali o non residenziali che riducono drasticamente il proprio fabbisogno energetico grazie alla progettazione di un involucro efficiente e all'ottimizzazione dei guadagni termici e in cui il fabbisogno energetico viene soddisfatto tramite impianti che producono energie da fonti rinnovabili. Dunque, alla base della definizione di ZEB c'è l'idea che questi edifici siano in grado di soddisfare tutte le proprie esigenze di energia tramite fonti di energia a basso costo, disponibili in loco, non inquinanti e rinnovabili.

Concludendo, per ottenere uno ZEB è necessario far convergere queste tre strategie:

- risparmio energetico sull'edificio e involucro;
- efficienza energetica degli impianti;
- produzione di energia da fonti rinnovabili. [33]

Stato dell'arte: impianti per la produzione di energia

Lo scopo del presente sottocapitolo è quello di analizzare in modo dettagliato le tecnologie principali di produzione di energia per gli edifici.

Energia solare

Dal punto di vista energetico, con l'espressione "energia solare" si intende l'energia raggiante sprigionata dal Sole, per effetto delle reazioni termonucleari che avvengono al suo interno, e trasmessa alla Terra sotto forma di radiazione elettromagnetica.

Solare fotovoltaico

Il funzionamento dei dispositivi fotovoltaici si basa sulla capacità di alcuni materiali di convertire l'energia della radiazione solare in energia elettrica in corrente

continua, effetto fotoelettrico, senza l'ausilio di parti meccaniche in movimento. Tali materiali sono detti semiconduttori, il più conosciuto dei quali è il silicio.

I tipi di pannello fotovoltaico più comuni sono tre:

- silicio monocristallino, che utilizza silicio purissimo, con atomi perfettamente allineati che garantiscono la massima conducibilità, rendimento di circa 16÷18%;
- silicio policristallino, con monocristalli di silicio aggregati con forme e orientamenti diversi, rendimento di circa 14÷16%;
- silicio amorfo o a film sottile, che non ha struttura cristallina e i cui atomi vengono depositi chimicamente in ordine casuale senza alcun allineamento, struttura amorfa, utilizzando quantità di silicio molto basse; rendimento di circa 10%.

Un sistema fotovoltaico è composto da:

- pannelli fotovoltaici;
- strutture di sostegno per installare i moduli sul terreno, su un edificio o qualsiasi struttura edilizia;
- inverter, che converte la corrente da continua in alternata;
- quadri elettrici, cavi di collegamento e il contatore dell'energia elettrica prodotta.

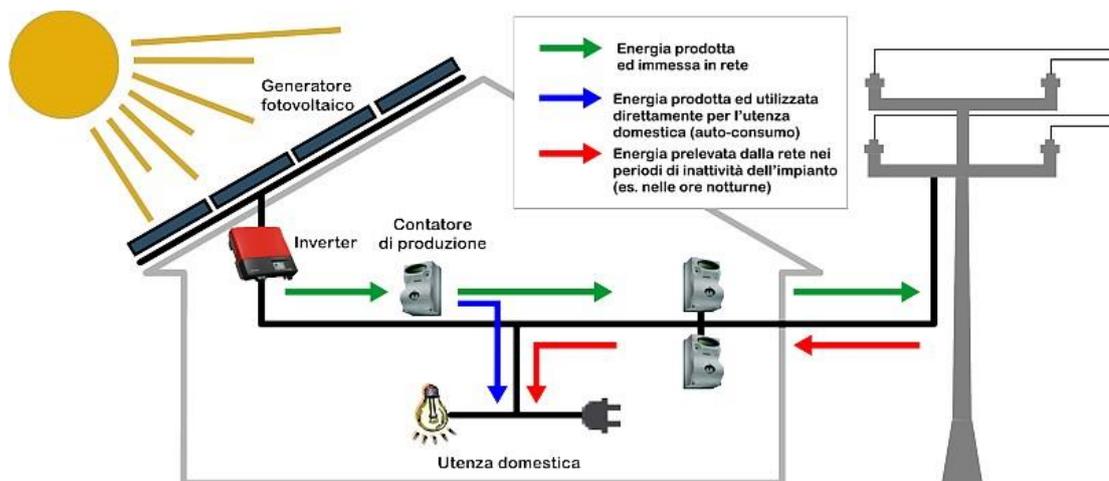


Figura 25: schema impianto fotovoltaico

Le principali applicazioni del fotovoltaico sono:

- impianti per utenze isolate, con sistema di accumulo;
- impianti per utenze collegate alla rete a bassa tensione;

- centrali di produzione di energia elettrica, in genere collegate alle reti di media ed alta tensione.

La potenza di picco di un impianto fotovoltaico si esprime in [kWp³⁸], ed è la potenza teorica massima che esso può produrre nelle condizioni standard, 1000 [W/m²] e 25 [°C], di insolazione e temperatura ambiente.

L'energia elettrica media annua prodotta da un impianto fotovoltaico può essere valutata tenendo conto della radiazione solare annuale del sito di installazione, di un fattore di correzione calcolato sulla base dell'orientamento, dell'angolo d'inclinazione dei moduli e della presenza di eventuali ombre temporanee, delle prestazioni tecniche dei moduli, dell'inverter e degli altri componenti dell'impianto e delle condizioni ambientali di riferimento del sito nelle quali opera l'impianto; per esempio, con l'aumento della temperatura di funzionamento diminuisce l'energia prodotta. La vita utile di un impianto fotovoltaico è di 25-30 anni. [34]

Solare termico

Il solare termico sfrutta l'energia contenuta nella radiazione solare per riscaldare un fluido termovettore, tipicamente acqua.

L'impianto in questione è formato in genere da:

- uno o più pannelli solari, detti collettori;
- uno scambiatore di calore, che trasferisce l'energia termica del liquido termovettore all'acqua;
- un serbatoio di accumulo, contenente l'acqua da riscaldare.

Il collettore è costituito da un corpo nero assorbente, che ha la funzione di captare l'energia irradiata dal sole attraverso la superficie scura e trasferirla sotto forma di energia termica al fluido termovettore; e da una copertura selettiva trasparente sulla parte esposta al sole in modo da limitare le dispersioni per irraggiamento verso l'ambiente esterno. Il tutto è racchiuso in un "contenitore" opportunamente isolato sulle pareti laterali e sulla parete opposta a quella di ricezione della radiazione.

Il pannello solare più utilizzato e diffuso è il collettore solare vetrato piano, caratterizzato dalla presenza di una intercapedine tra la superficie trasparente e la piastra assorbente.

Sul mercato esistono anche altre tipologie di pannelli:

³⁸ kWp: chilowatt di picco.

- collettori non vetrati scoperti, semplicemente realizzati con tubi in materiale plastico; i quali risultano essere molto economici, ma forniscono prestazioni accettabili solo se utilizzati durante la stagione estiva o a latitudini equatoriali
- collettori sottovuoto, realizzati eliminando l'aria nell'intercapedine. In tal modo si riducono le perdite ed è possibile lavorare con temperature del fluido riscaldato più elevate ($70\div 80$ [°C]); sono più efficienti dei collettori vetrati piani, ma sono più fragili e costosi;
- collettori a concentrazione, caratterizzati da un elemento assorbente lineare o puntuale, sul quale viene concentrata la radiazione solare tramite uno specchio. Utilizzati per la produzione di calore ad alta pressione e temperatura ($100 - 250$ [°C]).

Gli impianti si distinguono in:

- impianti a circolazione naturale, in cui il fluido termovettore è l'acqua stessa che, riscaldandosi, sale per differenza di densità in un serbatoio di accumulo, che deve essere posto più in alto del collettore. Dall'accumulo viene poi distribuita alle utenze domestiche. Tale impianto è semplice ed economico, ma ha una elevata dispersione termica, a svantaggio del rendimento;
- impianti a circolazione forzata, in cui è presente un circuito composto dal collettore, una serpentina posta all'interno dell'accumulo ed i tubi di raccordo; una pompa, detta circolatore, permette la cessione del calore raccolto dal fluido termovettore alla serpentina posta all'interno dell'accumulo.

Il circuito è più complesso ed ha un consumo elettrico dovuto alla pompa ed alla centralina di controllo, ma ha una efficienza termica più elevata.

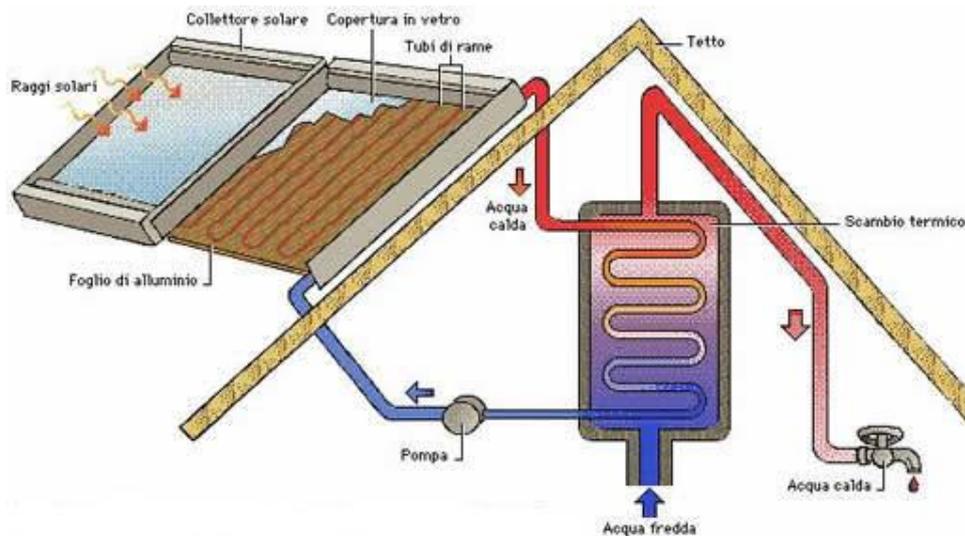


Figura 26: impianto solare termico a circolazione forzata

Inoltre, il circuito solare può essere aperto, se il fluido termovettore che circola nei collettori è lo stesso del circuito di utilizzo o chiuso, se il fluido termovettore cede calore all'acqua di utilizzo tramite uno scambiatore.

La vita utile dell'impianto si stima generalmente intorno ai 20 anni. [34]

Solar cooling

Il solar cooling combina assieme l'uso di collettori solari con l'uso di macchine ad assorbimento. In questo modo si può produrre "freddo", sotto forma di acqua refrigerata o di aria condizionata, a partire da una sorgente "calda".

I pannelli comunemente utilizzati sono:

- pannelli piani vetrati di tipo selettivo;
- pannelli sottovuoto;
- pannelli ad aria, solo per sistemi DEC³⁹.

I pannelli solari assorbono la radiazione solare e la cedono al fluido termovettore per produrre acqua o aria calda; la quale transita attraverso la macchina frigorifera per produrre acqua o aria fredda; quest'ultima viene impiegata per raffrescare gli ambienti oppure per la refrigerazione industriale.

Esistono due grandi famiglie di tecnologie per il solar cooling, che si distinguono tra loro per le diverse modalità con cui il "freddo" viene prodotto e distribuito:

³⁹ DEC: Dessicant and Evaporative Cooling systems.

- sistemi a ciclo chiuso, si realizzano con macchine frigorifere ad assorbimento e in misura minore con macchine frigorifere ad adsorbimento. Queste macchine possono produrre acqua refrigerata alla temperatura di circa 7°C, partendo da acqua calda, proveniente dai pannelli solari, alla temperatura di 80÷100 [°C]. L'acqua refrigerata, attraverso un sistema di tubazioni, viene distribuita ai terminali di raffrescamento, ad esempio ventilconvettori, dislocati nei locali da climatizzare. Il vantaggio dei sistemi a ciclo chiuso consiste nella possibilità di realizzare l'impianto con qualsiasi tipo di rete di distribuzione, sia ad aria che ad acqua.
- sistemi a ciclo aperto, si realizzano con sistemi DEC, che combinano deumidificazione e raffreddamento evaporativo. Si tratta di innovativi sistemi di trattamento diretto dell'aria, alternativi ai tradizionali sistemi a compressione. La tecnologia più comune prevede l'utilizzo di deumidificatori rotanti con sostanze assorbenti solide. L'aria prelevata dall'esterno viene prima deumidificata e successivamente raffreddata, attraverso l'utilizzo di acqua come refrigerante. Il calore prodotto dai pannelli solari serve invece a rigenerare il deumidificatore. Possono venire impiegati anche pannelli solari ad aria. Si tratta di una tecnologia applicabile su edifici di una certa dimensione provvisti di sistema di ventilazione, in cui alla necessità di raffrescare si aggiunge anche la necessità di controllare il tasso di umidità dell'aria. [35] [36]

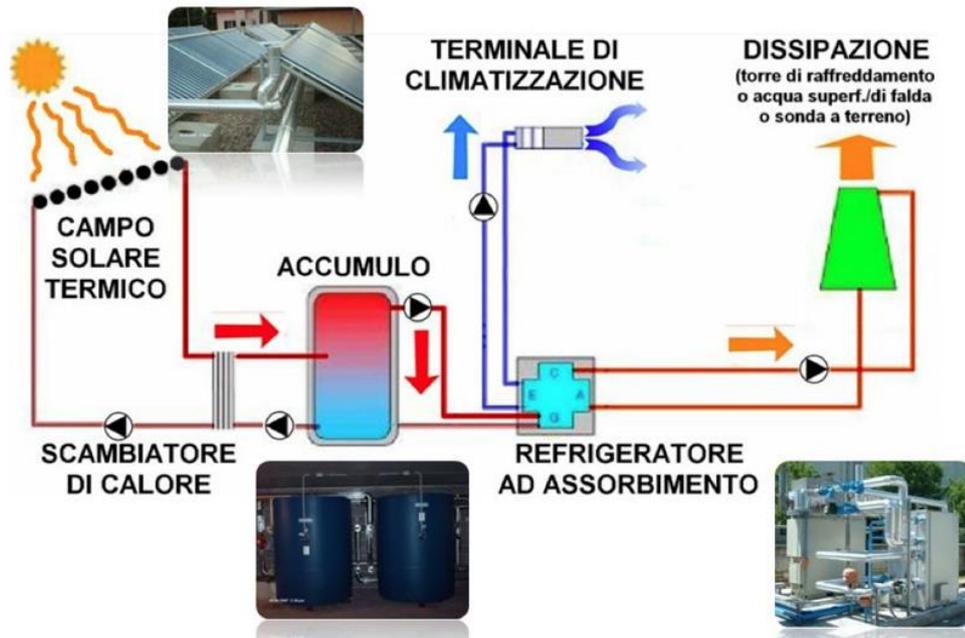


Figura 27: impianto solar cooling a ciclo chiuso

Energia eolica

L'energia eolica è l'energia derivata dal vento e rappresenta una delle fonti di energia più antiche: veniva infatti utilizzata nei mulini a vento per la conversione in energia meccanica, o come energia motrice nelle imbarcazioni a vela. In tempi recenti il miglioramento della tecnologia ha permesso un'ulteriore applicazione dell'energia eolica: la conversione in energia elettrica tramite gli aerogeneratori, le cosiddette pale eoliche.

L'aria, passando tra le pale, crea una differenza di pressione e le mette in movimento: l'energia cinetica del vento si trasforma in energia meccanica, trasferita ad appositi rotor che, con l'effetto dell'induzione magnetica, la convertono in energia elettrica.

Gli aerogeneratori sono diversi per forma e dimensione: possono essere impiegati infatti per la produzione di pochi kW di potenza, fino a punte di 3 MW. Più aerogeneratori insieme formano le wind-farm⁴⁰, che possono considerarsi come delle centrali elettriche. Per produrre energia elettrica in quantità sufficiente occorre installare gli aerogeneratori in luoghi ventosi. Per determinare l'energia eolica potenzialmente sfruttabile in una data zona bisogna conoscere l'andamento nel

⁴⁰ wind-farm: fattorie del vento

tempo della direzione e della velocità del vento, e la sua distribuzione con la quota. In particolare la conformazione di un terreno influenza la velocità del vento: più un terreno è corrugato, cioè presenta variazioni brusche di pendenza, boschi, edifici e montagne, più il vento incontra ostacoli che riducono la sua velocità. La potenza estraibile dal vento con un aerogeneratore cresce all'aumentare della velocità del vento e dell'area spazzata dalle pale e dipende inoltre dalla densità dell'aria, funzione delle caratteristiche condizioni meteo del luogo. Per valutare l'effettiva potenzialità di un impianto è indispensabile svolgere delle campagne di misura sul posto, campagne anemometriche. [34]

Minieolico

Il settore del mini eolico va considerato in modo distinto da quello eolico tradizionale per quanto riguarda le potenze erogate.

I generatori hanno dimensioni ridotte e anche dal punto di vista estetico sono poco invasivi; per questo sono indicati per le installazioni nei settori dell'agricoltura, del turismo, della piccola e media impresa, ma anche nel contesto cittadino.

Ci sono due tipologie di impianti mini eolici:

- ad asse verticale, in cui il rotore gira con un asse perpendicolare alla direzione del vento, con le pale che si muovono nella stessa direzione. Sono caratterizzati da una bassa velocità di rotazione e sono adatti per utilizzazioni meccaniche come le pompe per l'acqua. Hanno il vantaggio di non doversi orientare secondo la direzione del vento.
- ad asse orizzontale, in cui l'asse del rotore è parallelo alla direzione del vento. Hanno un'alta velocità di rotazione ed un elevato coefficiente di portanza e quindi una potenza elevata. Sono utilizzati principalmente per produrre elettricità. [34]

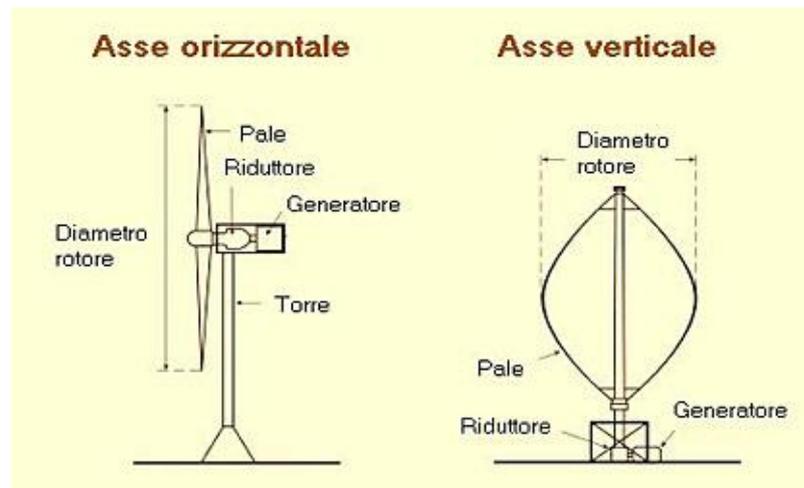


Figura 28: schema impianto eolico ad asse verticale ed orizzontale

Biomasse

Biomassa è un termine utilizzato per indicare materiali di natura estremamente eterogenea che hanno in comune la matrice organica; le più importanti tipologie di biomasse sono costituite dai residui forestali, dagli scarti dell'industria di trasformazione del legno, trucioli, segatura, etc.; dagli scarti delle aziende zootecniche, liquami e altre deiezioni; dagli scarti dell'industria alimentare.

Le principali applicazioni delle biomasse sono:

- produzione di energia, elettricità e calore;
- sintesi di carburanti, etanolo, biodiesel, etc.
- sintesi di altri prodotti, compost, bioplastica, etc.

Le biomasse sono utilizzate prevalentemente per la produzione di energia termica, ad esempio in ambito domestico negli impianti di riscaldamento individuale, con le caldaie a pellet o a tronchetti, mentre con impianti di grandi dimensioni è possibile produrre in maniera combinata energia elettrica e termica. [34]

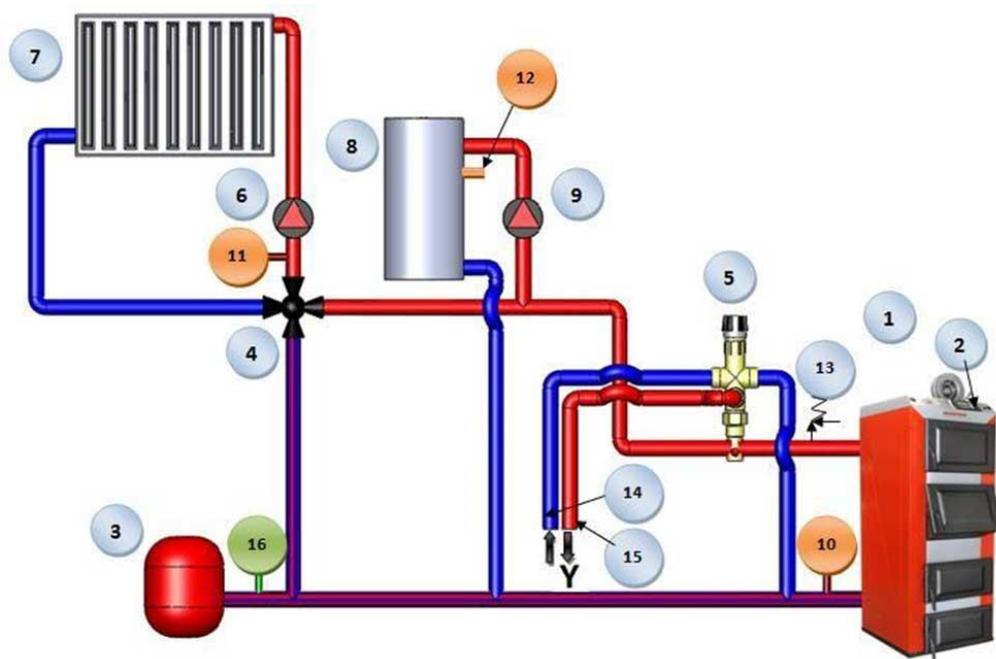


Figura 29: impianto con caldaia a biomasse

Geotermia a bassa temperatura

L'energia geotermica è l'energia generata per mezzo di fonti geologiche di calore e può essere considerata una forma di energia alternativa e rinnovabile. Poco sotto la superficie terrestre il flusso geotermico è molto basso e di conseguenza la temperatura del terreno a 20 metri di profondità oscilla mediamente tra i 16 e 22°C.

Le tecnologie a bassa temperatura hanno bisogno di una pompa di calore che prelevi energia termica dal sottosuolo e la ceda al circuito di riscaldamento. La pompa di calore è una macchina termodinamica che nell'assetto invernale opera tra due sorgenti una "fredda", il sottosuolo, dalla quale il calore viene prelevato a bassa temperatura e una "calda", l'abitazione da scaldare, verso la quale il calore viene ceduto a temperatura più alta.

I sistemi di riscaldamento e raffrescamento con pompe di calore geotermiche sfruttano la temperatura del terreno, che si mantiene circa costante durante l'arco dell'anno già a pochi metri di profondità. La costanza della temperatura del suolo comporta un duplice benefico effetto:

- durante l'inverno il terreno si trova a temperature relativamente più calde dell'aria esterna;
- durante l'estate la temperatura è più bassa di quella dell'aria.

Le applicazioni a bassa temperatura più comuni sono le sonde geotermiche, i pozzi di captazione e re-immissione di acque sotterranee, le serpentine nel terreno ed i pali energetici.

Dal punto di vista impiantistico, per quanto riguarda il caso invernale, si fa circolare un fluido termovettore all'interno degli scambiatori geotermici di diversa forma, si estrae il calore dal suolo; il fluido, attraverso uno scambiatore, riscalda il refrigerante, che evapora in un circuito interno alla pompa di calore; il refrigerante viene compresso da un compressore, che fa innalzare considerevolmente la sua temperatura; il calore è ceduto attraverso il condensatore all'acqua. Infine la pressione del refrigerante viene abbassata con una valvola di espansione.

Nel caso di pompe di calore reversibili, per quanto riguarda il caso estivo, il ciclo è esattamente l'opposto di quello visto, cioè viene prelevato calore dagli ambienti.

I sistemi di riscaldamento interni possono essere di qualsiasi genere: a pavimento, a parete, a soffitto, radiatori, battiscopa, ventilconvettori o unità ad aria; il raffrescamento estivo può avvenire in modo naturale, collegando gli scambiatori geotermici direttamente al sistema interno (raffrescamento passivo) o utilizzando pompe di calore reversibili (raffrescamento attivo). [34]

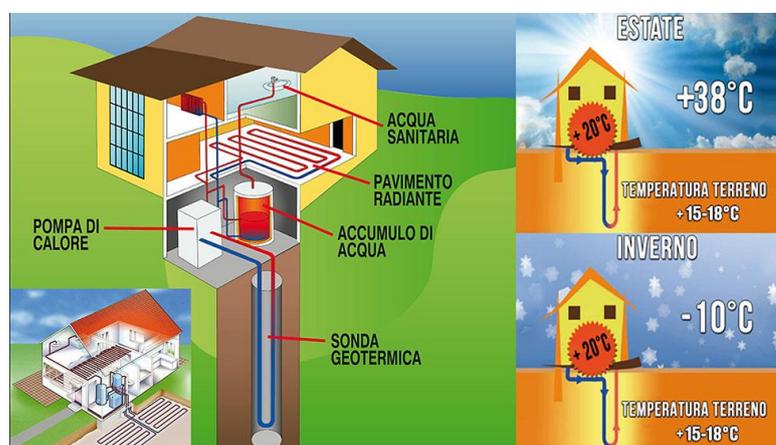


Figura 30: schema impianto a geotermia a bassa temperatura per il funzionamento estivo ed invernale

Cogenerazione

Con il termine cogenerazione, si indica la produzione contemporanea di energia elettrica o meccanica ed energia termica, a partire da una singola fonte energetica fossile o rinnovabile, attuata in un unico sistema integrato.

La cogenerazione, nota anche come CHP⁴¹, ha come scopo un più efficiente utilizzo dell'energia primaria, con relativi risparmi economici, soprattutto nei processi produttivi laddove esista una forte contemporaneità tra prelievi elettrici e prelievi termici.

I sistemi cogenerativi sono in genere composti da un motore primario, da un generatore, da un sistema di recupero termico e dalle connessioni elettriche.

Il motore primario è utilizzato per convertire il combustibile in energia meccanica, il generatore la trasforma in energia elettrica, mentre il sistema di recupero termico raccoglie l'energia contenuta negli scarichi del motore primario, ottenendo così energia termica utilizzabile.

La produzione combinata può incrementare l'efficienza di utilizzo del combustibile fino ad oltre l'80%, con conseguenti minori costi e minori emissioni di inquinanti e di gas ad effetto serra, rispetto alla produzione separata di elettricità e di calore.

Il più comune esempio di impianto cogenerativo è quello realizzato con turbogas o motore alternativo e caldaia a recupero; i fumi del turbogas o del motore alternativo vengono convogliati, attraverso un condotto, nella caldaia. I fumi in caldaia permettono di produrre acqua calda, vapore saturo o vapore surriscaldato; di solito si utilizza acqua calda per il riscaldamento ambiente, vapore saturo per le utenze industriali e vapore surriscaldato per le turbine a vapore e utenze.

Il periodo di vita utile di queste macchine arriva fino a 30-40 anni. [34]

Piccola generazione e micro-cogenerazione

La microcogenerazione o microCHP è un'estensione dell'idea di cogenerazione per le abitazioni singole o plurifamiliari e per i piccoli edifici di uffici; il prefisso micro si riferisce alla potenza elettrica dell'impianto, che non supera i 50 kW.

La differenza principale tra i sistemi a microcogenerazione e la cogenerazione con potenze elevate sono i parametri che ne guidano l'operatività: i sistemi CHP industriali generano principalmente energia elettrica, con il calore come utile sottoprodotto; i sistemi di microCHP producono principalmente calore, generando elettricità come sottoprodotto.

⁴¹ CHP: Combined Heat and Power

La maggior parte dei sistemi a cogenerazione usano il gas naturale come combustibile poiché brucia bene ed in maniera “pulita”, ha un costo relativamente basso, è disponibile in moltissime zone e può essere facilmente trasportato. [34]

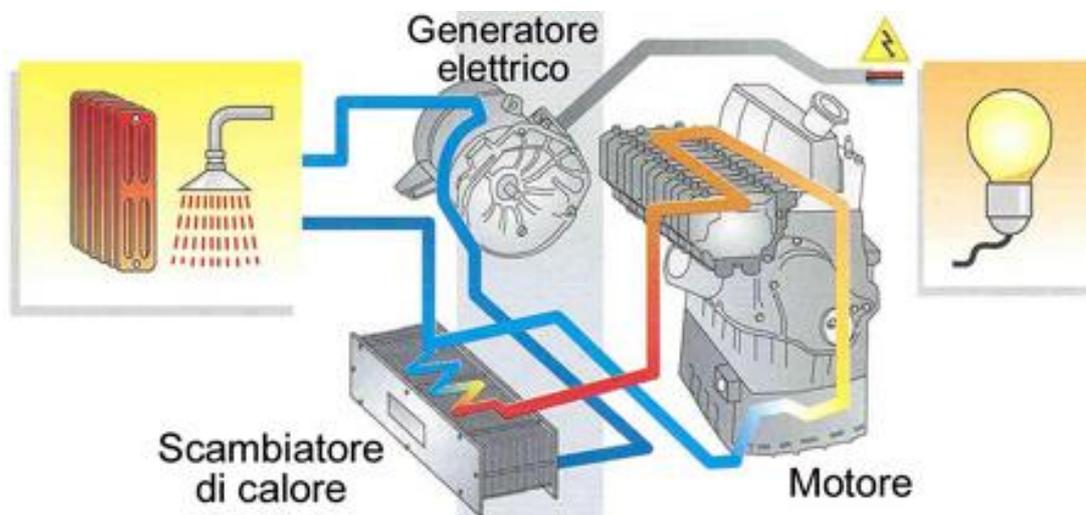


Figura 31: schema impianto micro-cogenerazione

Caldaie ad alto rendimento energetico

La caldaia rappresenta il cuore dell’impianto di riscaldamento, dove il combustibile viene bruciato per scaldare un fluido termovettore, acqua o aria, che tramite l’impianto permette di trasferire il calore all’ambiente abitativo.

Generalmente è composta da:

- un bruciatore, che miscela l’aria con il combustibile e alimenta una camera di combustione;
- una camera di combustione, nella quale vengono prodotti i gas caldi che, passando attraverso una serie di tubi, riscaldano l’acqua dell’impianto;
- un involucro di materiale isolante protetto da una lamiera, detto mantello isolante.

L’energia contenuta nel combustibile viene per la maggior parte trasferita al fluido termovettore, ed in piccola parte dispersa verso l’esterno dal corpo stesso della caldaia e soprattutto con i fumi di scarico attraverso il camino.

Una caldaia ad alta efficienza è una caldaia in cui la quasi totalità, oltre il 90% dell’energia contenuta nel combustibile viene trasferita al fluido termovettore. L’efficienza di una caldaia viene quantificata con il rendimento di combustione, che

rappresenta la percentuale dell'energia derivante dalla combustione trasferita al fluido termovettore. In altri termini, maggiore è il rendimento della caldaia, maggiore è il risparmio di combustibile, il che si traduce in un risparmio energetico ed economico.

Le caldaie tradizionali sono dotate di un bruciatore in cui l'aria comburente viene convogliata con un flusso costante. Hanno un rendimento medio che si aggira intorno all'85÷86 %: nei periodi meno freddi, quando non viene erogata tutta la potenza disponibile, l'efficienza decade in maniera significativa perché non avendo un controllo significativo dell'aria comburente la combustione non avviene nelle condizioni ottimali, e di conseguenza, il consumo di combustibile aumenta in modo proporzionale.

Le caldaie ad alto rendimento disponibili sul mercato sono delle seguenti tipologie:

- caldaie a premiscelazione;
- caldaie a condensazione. [37]

Caldaie a premiscelazione

Le caldaie a premiscelazione sono dotate di un particolare bruciatore in cui la combustione avviene sempre in condizioni ottimali, grazie al perfetto bilanciamento fra gas metano ed aria comburente. In questo modo, il rendimento si mantiene costante al di sopra del 90% a qualsiasi potenza. La tecnologia a premiscelazione, garantendo rendimenti elevati su tutto il campo di modulazione assicura un consumo inferiore del 10% rispetto a una caldaia tradizionale, con conseguente risparmio economico e basse emissioni di sostanze inquinanti. [37]

Caldaie a condensazione

Le caldaie a condensazione sono attualmente la tecnologia più avanzata per quanto riguarda le caldaie. Tali caldaie permettono di recuperare parte del calore contenuto nei gas di scarico sotto forma di vapore acqueo, consentendo un migliore sfruttamento del combustibile e quindi il raggiungimento di rendimenti più alti.

Nelle caldaie tradizionali i gas combusti vengono normalmente espulsi ad una temperatura di circa 110°C e sono in parte costituiti da vapore acqueo. Nella caldaia

a condensazione, i prodotti della combustione, prima di essere espulsi all'esterno, sono costretti ad attraversare uno speciale scambiatore all'interno del quale il vapore acqueo condensa, cedendo parte del calore latente di condensazione all'acqua del primario. In tal modo, i gas di scarico fuoriescono ad una temperatura di circa 40°C. La quota di energia recuperabile tramite la condensazione del vapore acqueo contenuto nei gas di scarico è dell'ordine del 16÷17%.

Le caldaie a condensazione esprimono il massimo delle prestazioni quando vengono utilizzate con impianti che funzionano a bassa temperatura, 30÷50°C, come ad esempio con impianti a pannelli radianti. [37]

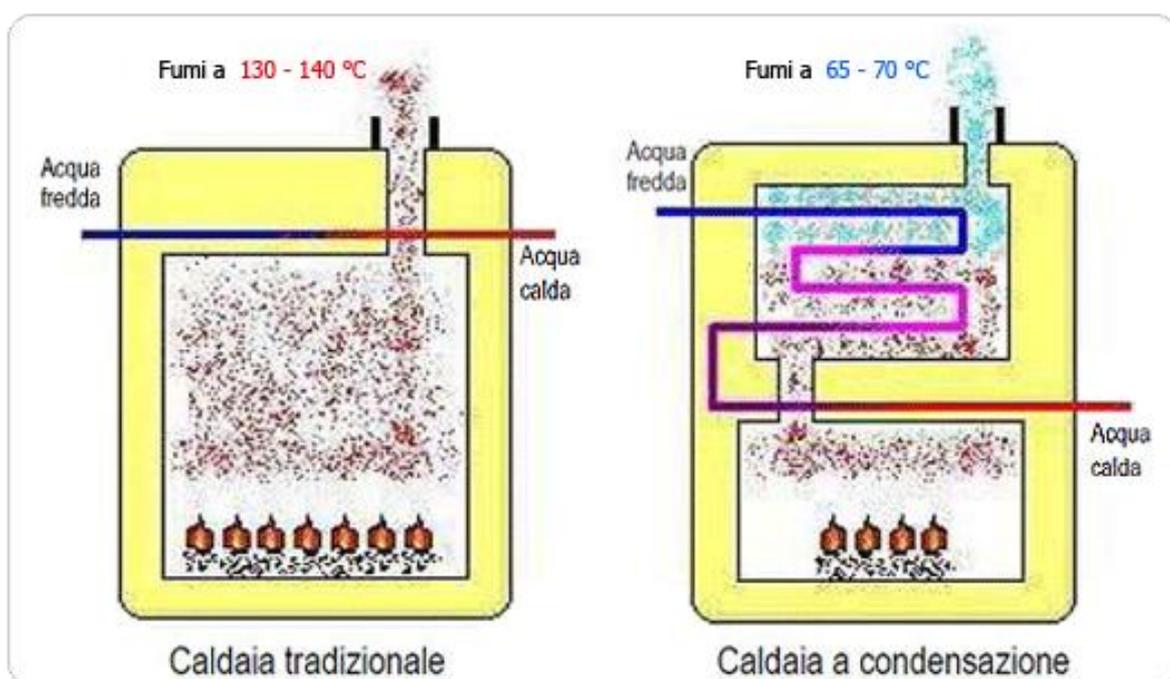


Figura 32: rappresentazione caldaia tradizionale e a condensazione

Stato dell'arte dell'involucro edilizio

In quest'ultimo sottocapitolo del CAPITOLO IV si esaminano gli ultimi sviluppi per quanto riguarda i componenti dell'involucro edilizio.

Mura perimetrali

Le mura risultano essere la frazione predominante dell'involucro edilizio e si aspetta che esse provvedano al comfort termico e acustico dell'edificio. La resistenza termica, R_{th} , del muro influenza pesantemente i consumi di energia dell'edificio, in particolare negli edifici nei quali il rapporto tra le mura e il totale dell'involucro è elevato. Le mura con isolante termico presentano un'elevata probabilità di formazione di condensa superficiale quando l'umidità relativa esterna è maggiore dell'80%. Questo problema è molto più accentuato nei mesi invernali e nelle regioni climatiche più fredde e con elevati livelli di umidità. Questa condensa nelle mura esterne è promotrice della formazione di una vita microbica indesiderata, che riduce il tempo di vita delle mura.

Convenzionalmente, in base ai materiali usati, le mura possono essere classificate in: pareti in legno, in metallo e in muratura. Ci sono altri tipi di pareti con una tecnologia più avanzata, che aumentano l'efficienza energetica e i livelli di comfort negli edifici. Le seguenti sezioni descrivono come vengono sviluppate queste tecnologie avanzate. [38]

Pareti solari passive

Tipicamente usate nei climi freddi, le pareti che accumulano e trasmettono in modo efficiente l'energia solare all'interno dell'edificio sono chiamate pareti solari passive. Queste tipologie di pareti sono sviluppate inizialmente da E.S. Morse⁴² nel 19esimo secolo e successivamente riprese da Trombe⁴³; esse, tipicamente, utilizzano uno spessore di calcestruzzo di 12 pollici⁴⁴ nella facciata esposta a sud (nell'emisfero nord) per assorbire la radiazione solare. Una parete vetrata è utilizzata come copertura esterna in modo da sfruttare l'effetto serra.

Uno dei sistemi pensati per le regioni fredde presenta un pannello in acciaio unito ad un pannello di polistirolo (come isolante) montati lungo la facciata sud. Tale sistema ha migliorato l'efficienza operativa del classico muro di Trombe del 56%.

⁴² Edward Sylvester Morse: Portland, 18 giugno 1938 – Salem, 20 dicembre 1925.

⁴³ Félix Trombe: ingegnere francese; Nogent (Francia), 1906 – Ganties (Francia), 1985.

⁴⁴ 1 pollice è pari a 2,54 cm.

Altri tipi di configurazione di pareti solari sono: mura solari non ventilate, mura di Trombe, mura di Trombe isolate e mura solari composite. [38]

Pareti in calcestruzzo leggero LWC

Le pareti in calcestruzzo leggero possiedono una densità minore di 2000 kg/m^3 . Per scopi strutturali la densità degli LWC varia tra i 1600 e i 2000 kg/m^3 ; mentre per utilizzo da isolante termico la densità è spesso inferiore a 1450 kg/m^3 . La resistenza termica degli LWC può essere migliorata con l'utilizzo di aggregati. Tali aggregati possono avere origine naturale, come la pomice e diatomite; essere dei sottoprodotti, come ceneri e schiume espanse; oppure dei materiali non processati.

Il cemento aerato ermetico (AAC) è un tipo di LWC prodotto dall'inserimento di polvere di alluminio in modo da generare delle minuscole bolle d'aria; tale parete presenta una resistenza superiore rispetto agli altri LWC. L'AAC è introdotto inizialmente nel 20esimo secolo in Europa, attualmente sta prendendo piede come parete per esterni e per interni nei paesi in via di sviluppo in alternativa ai mattoni in argilla. La densità dell'AAC varia tra 600 e 800 kg/m^3 .

Tutte le tipologie di pareti LWC sono particolarmente utilizzate nei paesi dove le costruzioni in calcestruzzo sono predominanti e l'uso dell'isolamento nelle pareti non è una pratica comune. Inoltre, possono essere costruiti più velocemente e con una manodopera meno qualificata. [38]

Pareti ventilate o doppie

Una camera d'aria tra due pareti ancorate con fissaggi metallici costituiscono una parete ventilata o una doppia parete. Ci sono due tipologie di pareti ventilate, la prima tipologia presenta una ventilazione forzata all'interno dell'intercapedine; la seconda è governata da una ventilazione naturale, quindi sfrutta l'effetto camino. Solitamente, le pareti ventilate vengono utilizzate per migliorare il raffrescamento passivo degli edifici. Con un'accurata progettazione di una parete ventilata si può avere un risparmio energetico del 40%. Tuttavia, una scadente qualità nella messa in opera può introdurre dei ponti termici. [38]

Pareti con accumulo di calore latente

I materiali a cambiamento di fase (PCM) sono incorporati nelle pareti LWC per migliorare la capacità di accumulo termico. Il PCM è solitamente impregnato nelle pareti in gesso o in quelle in calcestruzzo. I materiali porosi come il cartongesso presentano un potenziale di impregnazione del PCM migliore rispetto ai blocchi di cemento pomice. L'accumulo termico nei PCM nelle pareti dipende dalla percentuale in peso del PCM impregnato. [38]

Componenti finestrati

I componenti finestrati, come le finestre e le porte finestre, giocano un ruolo vitale per il raggiungimento del comfort termico e per ottenere un elevato livello di illuminazione nell'edificio. Negli ultimi anni, sono stati effettuati ulteriori passi in avanti per quanto riguarda le tecnologie sulla parte vetrata del componente finestrato. Queste tecnologie includono vetri con il controllo solare, unità di vetri isolanti, rivestimenti basso emissivi, vetri evacuati, aerogel e cavità riempite con gas. [38]

Diverse tipologie di superfici trasparenti

- Vetri con aerogel; gli aerogel sono una categoria di solidi mesoporosi⁴⁵ con una porosità maggiore del 50%. Hanno una densità che varia nel range di 1 – 150 kg/m³, e il 90 – 99,8% del volume è tipicamente aria. I vetri con aerogel si affacciano sul mercato nei primi anni del 21esimo secolo; presentano un peso minore del 20% e hanno una resistenza di circa 200 volte maggiore rispetto ai vetri tradizionali.

La luce trasmessa e la trasmittanza del pannello di aerogel sono funzione dello spessore. Avendo elevate prestazioni, bassa densità ed eccezionali proprietà di diffusione della luce sono consigliati per le applicazioni a soffitto.

- Vetri evacuati; viene creato il vuoto nell'intercapedine per eliminare il trasferimento di calore conduttivo e convettivo. Molte volte si applica in uno

⁴⁵ mesoporosi: materiali con diametro dei pori compreso tra 2 e 50 nm.

dei due o in entrambi i vetri un rivestimento basso emissivo per ridurre l'emissione verso l'ambiente interno.

- Vetri riflettenti; sono essenzialmente dei vetri che variano il proprio colore, sono utilizzati negli edifici che presentano un'elevata radiazione solare e quindi un elevato carico di raffrescamento all'interno. In molti tipi di vetri riflettenti le proprietà ottiche cambiano in base alla radiazione solare incidente.
- Film con particelle sospese (SPD); inserito nell'intercapedine tra due vetri, presenta particelle allineate casualmente che assorbono la radiazione e formano una barriera opaca. Tale tecnologia ha alcuni inconvenienti come la temperatura radiante, il riflesso, la prestazione del colore, la trasparenza e la vita utile.
- Elementi ottici olografici (HOE); presentano un film olografico nell'intercapedine. La radiazione solare incidente è reindirizzata, attraverso un predefinito angolo di diffrazione, verso il soffitto dell'edificio. Possiede alcuni punti deboli come l'abbagliamento, dispersione della luce, trasparenza tendente al bianco, gamma limitata nell'esposizione di determinati angoli azimutali e zenitali.

Tale tecnologia non è ancora in commercio. [38]

CAPITOLO V

Trattata la parte introduttiva del lavoro di tesi, in questo CAPITOLO V si presenta la metodologia utilizzata per la determinazione della trasmittanza sia per l'involucro opaco (mura perimetrali, copertura e pavimento) sia per l'involucro trasparente.

Ricerca di valori di trasmittanza ottimale dei componenti di involucro

Ipotesi di lavoro

Per l'analisi costi-benefici della coibentazione dell'involucro di un edificio, occorre adottare preventivamente una serie di ipotesi che riguardano le condizioni al contorno di tipo:

- climatico;
- economico-finanziario;
- tecnico;
- computazionale. [39] [40] [41]

Caratteristiche climatiche

Per quanto riguarda le caratteristiche climatiche, sono considerati i gradi giorno di riscaldamento o/e raffrescamento della località in esame.

I gradi giorno di riscaldamento sono calcolati ipotizzando una temperatura interna all'edificio di 20 °C, per quelli di raffrescamento si è considerata una temperatura interna di 26 °C. [39] [40] [41]

Aspetti economico-finanziari

Il metodo utilizzato, per valutare il risparmio energetico, è quello del "costo globale", il quale viene analizzato in dettaglio nei capitoli successivi.

Nella tabella 2 si riportano i dati relativi ai parametri economici utilizzati nell'analisi, e successivamente si dà una breve illustrazione di ciascuno di essi.

<i>definizione</i>	<i>simbolo</i>	<i>unità di misura</i>
tasso di interesse del committente	i^{46}	[%]
tasso di inflazione	d^{47}	[%]
periodo di analisi	n^{48}	[anni]
costo dell'energia	c_{en}^{49}	[€/kWh]

Tabella 2: parametri economici di riferimento

Per poter tener conto contemporaneamente del tasso di interesse e del tasso di inflazione, al fine di attualizzare i costi dell'energia, è opportuno definire un tasso di interesse effettivo i' :

$$i' = \frac{i-d}{1+d} \text{ [%]} \quad [V.1]$$

Dal valore di n e di i' si può calcolare la funzione di attualizzazione del valore FVA, essa consente di attualizzare all'anno zero i vari flussi di cassa negli n anni di analisi:

$$FVA = \frac{1-(1+i')^{-n}}{i'} \text{ [-]} \quad [V.2]$$

Moltiplicando il risparmio economico annuale per FVA si ottiene il valore attuale di tutti i risparmi conseguiti durante il periodo considerato. Nel caso in cui il tasso di interesse ed il tasso di inflazione coincidano, FVA è esattamente pari al numero di anni di analisi n . Nel caso in cui il tasso di inflazione sia maggiore del tasso di interesse, il tasso di interesse effettivo risulta negativo, e la funzione di attualizzazione del valore superiore ad n ; in caso contrario essa risulta minore. [39] [40] [41]

⁴⁶ tasso di interesse “ i ”: è il costo del denaro, ossia la percentuale dell'interesse su un prestito è la somma che riceve chi ha prestato il denaro.

⁴⁷ tasso di inflazione “ d ”: con il termine inflazione si indica l'aumento nel tempo dei prezzi. Per misurare tale incremento si utilizza il *tasso di inflazione*

⁴⁸ periodo di analisi “ n ”: non è la vita utile delle soluzioni tecnologiche considerate, ma è il tempo su cui è estesa l'analisi finanziaria, che deve naturalmente essere inferiore o uguale alla vita utile della soluzione esaminata.

⁴⁹ costo dell'energia “ c_{en} ”: è il costo dell'energia specifica, del combustibile o elettrica, pagata per riscaldare o/e raffrescare l'abitazione

Ipotesi tecniche

L'isolante scelto è un isolante di lana di roccia con una conducibilità termica, λ , di 0,035 [W/(mK)]. I costi del materiale e messa in opera sono valutati tramite preventivi, analisi di mercato e pubblicazioni scientifiche. Allo stesso modo si è proceduto per i serramenti; optando per un telaio in PVC.

Il rendimento globale medio stagionale di una caldaia a gas metano ed il valore di EER⁵⁰ per una pompa di calore in assetto estivo sono estrapolati da studi effettuati sul parco edilizio esistente delle località considerate.

Ipotesi computazionali

I parametri degli edifici in analisi sono parametri di edifici esistenti.

Per la determinazione delle trasmittanze ottimali nel periodo di riscaldamento ed in quello di raffrescamento sono considerati soltanto i flussi di trasmissione.

Si è ipotizzato che la copertura e le mura perimetrali siano a contatto con l'ambiente esterno ed il pavimento con il terreno. Per tener conto della diversa temperatura del terreno rispetto a quella dell'aria esterna, nel calcolo del pavimento sono considerati la metà dei gradi giorno della località; in quanto proporzionali alla temperatura esterna dell'aria.

Costo per l'isolante, costo di esercizio e costo totale

Negli aspetti economici-finanziari si è introdotto il metodo di calcolo utilizzato nel seguente lavoro di tesi, in questo sottocapitolo lo si affronta nel dettaglio.

Si analizza in primis l'involucro opaco e successivamente quello trasparente.

Involucro opaco

L'utilizzo di un isolante, come detto, contribuisce a ridurre i consumi di riscaldamento o/e raffrescamento e di conseguenza i costi in bolletta. La riduzione

⁵⁰ EER: Energy Efficiency Ratio, ovvero efficienza di un condizionatore in modalità di raffrescamento.

dei consumi e quella dei costi di energia è tanto importante quanto maggiore è lo spessore installato.

Il costo totale o globale (C_t), considerato durante il periodo di analisi, dipende dal costo di investimento (C_i) e dal costo di esercizio (C_e).

In prima approssimazione il costo di investimento è funzione soltanto del costo del materiale isolante. Si tiene conto del costo di messa in opera, del ponteggio e degli accessori successivamente.

$$C_t = C_i + C_e \quad (51) = c_{is} \cdot s_{is} \quad (52) + C_e \quad \left[\frac{\text{€}}{\text{m}^2} \right] \quad [\text{V.3}]$$

Il costo di esercizio (C_e) deriva dal costo dell'energia attualizzato e dal flusso termico di trasmissione.

Il flusso termico di trasmissione a sua volta è legato: ai gradi giorno (di riscaldamento e di raffrescamento) della località, al rendimento medio stagionale della caldaia e/o dell'EER della pompa di calore in assetto estivo e alla trasmittanza dell'involucro.

Pertanto la formulazione del costo d'esercizio (C_e) è:

$$C_e = FVA \cdot c_{en} \cdot Q = FVA \cdot c_{en} \cdot 0,024 \cdot \left(\frac{GG_{\text{riscaldamento}}}{\eta} + \frac{GG_{\text{raffrescamento}}}{EER} \right) \cdot \left(\frac{1}{R_0 + \frac{s_{is}}{\lambda_{is}}} \right) \quad \left[\frac{\text{€}}{\text{m}^2} \right] \quad [\text{V.4}]$$

L'equazione del costo totale:

$$C_t = 0,024 \cdot \left(\frac{GG_{\text{riscaldamento}}}{\eta} + \frac{GG_{\text{raffrescamento}}}{EER} \right) \cdot \left(\frac{1}{R_0 + \frac{s_{is}}{\lambda_{is}}} \right) \cdot c_{en} \cdot FVA + c_{is} \cdot s_{is} \quad \left[\frac{\text{€}}{\text{m}^2} \right] \quad [\text{V.5}]$$

Minimizzando il costo totale, ovvero svolgendo la derivata prima, si ricava lo spessore ottimale di isolante:

$$s_{\text{ottimo}} = \sqrt{\frac{0,024 \cdot FVA \cdot \left(c_{en} \frac{GG_{\text{riscaldamento}}}{\eta(\text{COP})} + c_{en} \frac{GG_{\text{raffrescamento}}}{EER} \right) \cdot \lambda_{is}}{c_{is}}} - R_0 \cdot \lambda_{is} \quad [\text{m}] \quad [\text{V.6}]$$

⁵¹ C_e : costo di esercizio o di gestione.

⁵² s_{is} : spessore dell'isolante.

[39] [40] [41]

Involucro trasparente

Per l'involucro trasparente, in prima analisi, si fa riferimento ai soli vetri, e non ai serramenti nel loro complesso (vetro più telaio). Questo è dovuto a diverse motivazioni:

- dal punto di vista termico, l'influenza del telaio sulla trasmittanza dell'intero serramento è funzione della grandezza della finestra (più è piccola, più si sente la presenza del telaio) e del suo modello geometrico;
- dal punto di vista del costo, in [€/m²], il telaio ha un'incidenza diversa a seconda della grandezza della finestra (più essa è piccola, più il costo del telaio è influente);
- è ormai pratica costruttiva utilizzare dei telai in legno, metallici a taglio termico o in PVC. Quindi nel confrontare diversi vetri (doppi, tripli, basso-emissivi) e ammettendo che tutti questi siano montati sullo stesso tipo di telaio, questo fa sì che si possa omettere dal confronto.

Come per il componente opaco, il costo totale è dato dalla somma del costo di investimento del vetro e del costo di gestione. [39] [40] [41]

CAPITOLO VI

Per completare l'analisi e valutare i reali benefici dei valori di trasmittanza ottenuti, si considera un edificio di riferimento. Si sono scelte diverse tecnologie per la climatizzazione e si sono considerate alcune configurazioni per la valutazione della più conveniente. Lo studio è svolto località per località.

Edificio di riferimento

L'edificio di riferimento presenta le seguenti caratteristiche:

- altezza pari a 3 [m],
- superficie in pianta, per semplicità di forma quadrata, pari a 100 [m²],
- superficie finestrata pari al 20% della superficie in pianta.

Affinché non vengano sottostimati i consumi effettivi, sono formulate delle ipotesi semplificative:

- per il periodo di riscaldamento si considera soltanto il flusso di trasmissione, stesse ipotesi utilizzate per la determinazione della trasmittanza ottimale;
- per il periodo di raffrescamento, la determinazione dei soli flussi di trasmissione comporta una sottostima dei consumi dell'edificio. Per tale motivo sono valutati anche gli apporti solari e quelli interni.

Gli apporti solari sono considerati tramite una formulazione ripresa dalla UNI 11300:

$$Q_{\text{solare}} = A_{\text{sol}} \cdot H_{\text{sol}} \text{ [kWh]} \quad [\text{VI.1}]$$

dove:

- A_{sol} è l'area di captazione solare:
 - Involucro opaco:

$$A_{\text{sol}} = \alpha_{s,i} R_{s,e} U_1 A_i \text{ [m}^2\text{]} \quad [\text{VI.2}]$$

con:

- $\alpha_{s,i}$: assorbimento della superficie i-esima, pari a 0,4
 - $R_{s,e}$: resistenza superficiale esterna, pari a 0,04 [(m²K)/W]
 - U_i : trasmittanza della superficie i-esima [W/(m²K)]
 - A_i : area della superficie i-esima [m²].
- Involucro trasparente:

$$A_{sol} = F_s \cdot g_g \cdot (1 - F_F) \cdot A_f \text{ [m}^2\text{]} \quad [\text{VI.3}]$$

in cui:

- F_s : fattore di ombreggiamento per ostruzioni mobili (tende), pari a 1;
 - g_g : trasmittanza solare del vetro; 0,85 per singolo vetro, 0,4 per vetro triplo e basso emissivo;
 - F_F : fattore telaio, pari a 0.
 - A_f : area totale dell'elemento vetrato [m²]
- H_{sol} : è la radiazione solare giornaliera media mensile sul piano orizzontale [kWh/m²]

Gli apporti interni sono considerati pari a 6 [W/m²] di superficie calpestabile.

Dimensionamento impianto di riscaldamento e/o di raffrescamento

Il dimensionamento degli impianti nel periodo di riscaldamento e/o in quello di raffrescamento è ottenuto con l'ausilio di metodologie semplificate, le quali comunque permettono un dimensionamento verosimile ed una conseguente valutazione dei costi e dei benefici attesi.

Dimensionamento d'impianto in assetto invernale

Nel periodo di riscaldamento il metodo utilizzato è quello fornito dalla normativa prEN 12831, la quale considera per il dimensionamento la potenza di trasmissione dispersa e quella di ventilazione:

$$\Phi_{\text{impianto}} \cong \Phi_{\text{trasmissione}} + \Phi_{\text{ventilazione}} \text{ [W]} \quad [\text{VI.4}]$$

La potenza di trasmissione dispersa dipende: dalla temperatura esterna di progetto della località, dalla temperatura interna all'ambiente, dalla trasmittanza dei diversi componenti d'involucro e dalla superficie disperdente di quest'ultimi.

Invece, quella di ventilazione è funzione: dei ricambi d'aria all'interno del volume dell'ambiente, della densità e del calore specifico dell'aria e del salto di temperatura tra interno ed esterno (nelle condizioni di progetto).

L'equazione totale risulta:

$$\Phi_{\text{impianto}} = \sum_{i=1}^n U_i A_i (T_{\text{interna}} - T_{\text{esterna, progetto}}) + n V \frac{\rho_{\text{aria}} c_{p, \text{aria}}}{3600} (T_{\text{interna}} - T_{\text{esterna, progetto}}) \text{ [W]} \quad [\text{VI.5}]$$

Dimensionamento d'impianto in assetto estivo

Per il dimensionamento in assetto estivo si sfrutta il metodo semplificato proposto dall'ENEA⁵³

$$\Phi_{\text{impianto}} = L_1 \cdot L_2 \cdot h \cdot K \text{ [W]} \quad [\text{VI.6}]$$

dove:

- L_1 : primo lato della stanza/zona da raffrescare in [m],
- L_2 : secondo lato della stanza/zona da raffrescare in [m],
- h : altezza della stanza/zona [m],
- K : fattore empirico [W/m^3]; pari a 25 se la stanza/zona è ben isolata, 29 se mal isolata.

⁵³ ENEA: agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile

Determinazione dei costi per le tecnologie impiantistiche considerate

Si procede in questo CAPITOLO VI riportando per le diverse tecnologie considerate i rispettivi costi. Quest'ultimi ricavati da analisi di mercato e preventivi.

Caldaia a pellet

La caldaia a pellet scelta è la Vitoligno 300-C della casa produttrice Viessmann; dai dati di targa presenta una potenza variabile da 2,4 a 8 [kW], un rendimento fino a 95,3 % (considerato pari al 90 % per questa trattazione), una temperatura massima di mandata di 90 [°C] ed un costo totale di 10322 [€].

Il costo di montaggio considerato è di 500 [€].

I costi di gestione delle caldaie a pellet risultano elevati e pari a circa 80 [€/anno].

Il costo medio di mercato del pellet, confezionato solitamente in sacchi da 15 kg, è di 6 €/sacco.

Caldaia a condensazione

La caldaia a condensazione considerata è la Vitodens 200-W della Viessmann, il cui campo di regolazione varia da un minimo di 1,9 ad un massimo di 13,0 [kW] con una temperatura di mandata di 50 ed un ritorno di 30 [°C] presenta un rendimento medio stagionale pari al 94 %. Il costruttore dichiara che la caldaia è di classe A secondo il regolamento (UE) n. 18/2013.

Il costo è pari a 2560 [€].

Il costo di montaggio si aggira sui 500 [€].

La gestione e la manutenzione di tale tecnologia risultano essere in termine di costi inferiori a quelli della caldaia a pellet; si è considerato un costo di gestione pari a 100 [€] ogni due anni.

Pompa di calore geotermica

La pompa di calore geotermica ha un costo di investimento iniziale abbastanza importante, suddiviso in due voci principali:

- costo specifico e montaggio: 1600 [€/kW] più 700/800 [€] di montaggio,
- costo trivellazione sonda verticale: 40÷50 [€/m].

La pompa di calore scelta è la Vitocal 200-G della Viessmann, le gamme di potenza analizzate sono:

- la prima da: 5,6 [kW] in riscaldamento e 4,3 [kW] in raffrescamento;
- la seconda da: 8,5 [kW] in raffrescamento.

La temperatura massima di mandata è pari a 60 [°C], il COP⁵⁴ (B0/W35) pari a 4,6 e l'EER a 3,6 con dispositivi da 230 [V].

I costi di gestione risultano essere modesti e per questa trattazione considerati pari a 80 [€] ogni quattro anni.

Pompa di calore aria-aria

La pompa di calore aria-aria presenta un costo specifico di investimento di 240 [€/kW] ed un costo di montaggio pari a 500 [€]. La macchina scelta è la PEDZ-P71JAL della Mitsubishi electric. La sua potenzialità in assetto estivo è variabile da 0,9 a 8,5 [kW], l'EER è pari a 3,2.

I costi di gestione risultano essere leggermente superiori a quelli della pompa di calore geotermica e considerati pari a 80 [€] ogni due anni.

⁵⁴ COP: Coefficient Of Performance, tradotto in italiano, Coefficiente di Prestazione.

CAPITOLO VII

Casi studio

In questo ultimo capitolo, si riportano i risultati ottenuti con il metodo implementato per i tre casi analizzati.

Le località considerate sono:

- Stoccolma, Svezia
- Torino, Italia
- Garoua, Camerun

Queste località sono scelte con l'intento di valutare quali possano essere le migliori configurazioni di intervento, involucro più impianto, tra quelle analizzate per un edificio residenziale esistente situato in tre fasce climatiche ed in tre paesi differenti (quindi dati in input diversi sia per il clima sia per i costi specifici).

Le fasce climatiche considerate sono:

- “fredda”, situata nelle latitudini più elevate dell'emisfero boreale e in quelle più basse dell'emisfero australe, come ampiamente trattato nel CAPITOLO II. Il rappresentante di questa fascia, in questa analisi, è la Svezia.
- “mite”, situata tra 35° e i 55° N e i -35° e i -55° S, il cui rappresentante è l'Italia.
- “calda”, a cavallo tra le due fasce “miti”, rappresentata dal Camerun.

Fascia climatica “fredda”: Svezia-Stoccolma

Dati climatici, parametri economici e dati di involucro-impianto

Si riportano di seguito le tabelle con i dati utilizzati in ingresso, ovvero dati climatici, parametri economici e dati di involucro-impianto.

Svezia-Stoccolma

	Gradi Giorno Riscaldamento [°C-giorno]
<i>Annuale</i>	4600

Tabella 3: dati climatici Svezia-Stoccolma

Svezia-Stoccolma

<i>definizione</i>	<i>simbolo</i>	<i>valore</i>	<i>u.m.</i>
<i>Tasso di interesse del committente</i>	<i>i</i>	-0,5%	[%]
<i>Tasso di inflazione</i>	<i>d</i>	2%	[%]
<i>Periodo di analisi</i>	<i>n</i>	15	[anni]
<i>Costo energia gas naturale</i>	c_{gas}	0,11	[€/kWh]
<i>Costo energia elettrica</i>	c_{el}	0,2	[€/kWh]
<i>Tasso di interesse effettivo</i>	<i>i'</i>	-2%	[%]
<i>Valore presente/attualizzato</i>	FVA	18,4	[-]

Tabella 4: parametri economici Svezia-Stoccolma

Dal progetto TABULA⁵⁵, i parametri involucro-impianto scelti per l'analisi sono quelli di un edificio residenziale antecedente al 1960.

Svezia-Stoccolma

<i>definizione</i>	<i>simbolo</i>	<i>valore</i>	<i>u.m.</i>
<i>Mura perimetrali</i>	U_{parete}	0,6	[W/m ² /K]
<i>Copertura</i>	$U_{\text{copertura}}$	0,4	[W/m ² /K]
<i>Pavimento</i>	$U_{\text{pavimento}}$	0,5	[W/m ² /K]
<i>Componente trasparente</i>	U_{finestra}	2,6	[W/m ² /K]
<i>Caldaia a gas metano</i>	η_{gl}	88	[%]

Tabella 5: dati involucro-impianto Svezia-Stoccolma

⁵⁵ Progetto TABULA: progetto finalizzato alla creazione di una struttura armonizzata delle tipologie edilizie europee e del parco edilizio esistente dei paesi europei aderenti.

Mura perimetrali

Tabella riassuntiva, relativa ai costi di intervento e alla situazione ante e post operam:

<i>Svezia-Stoccolma</i>			
<i>Mura perimetrali</i>			
<i>c_{is}</i>		208 [€/m ³]	
<i>Costi messa in opera, accessori ecc.</i>		55 [€/m ²]	
<i>Ante operam</i>		<i>Post operam</i>	
		<i>Sottimo</i>	15 [cm]
<i>U_{parete}</i>	0,6 [W/m ² /K]	<i>U_{parete}</i>	0,17 [W/m ² /K]
<i>E_{consumata}</i>	75,3 [kWh/m ² /y]	<i>E_{consumata}</i>	21,1 [kWh/m ² /y]
<i>Costo Energia</i>	8,3 [€/m ² /y]	<i>Costo Energia</i>	2,3 [€/m ² /y]
		<i>Costo Isolante</i>	31,3 [€/m ²]

Tabella 6: mura perimetrali Svezia-Stoccolma

A supporto di ciò, si riporta il grafico degli andamenti per i differenti costi in funzione dello spessore di isolante.

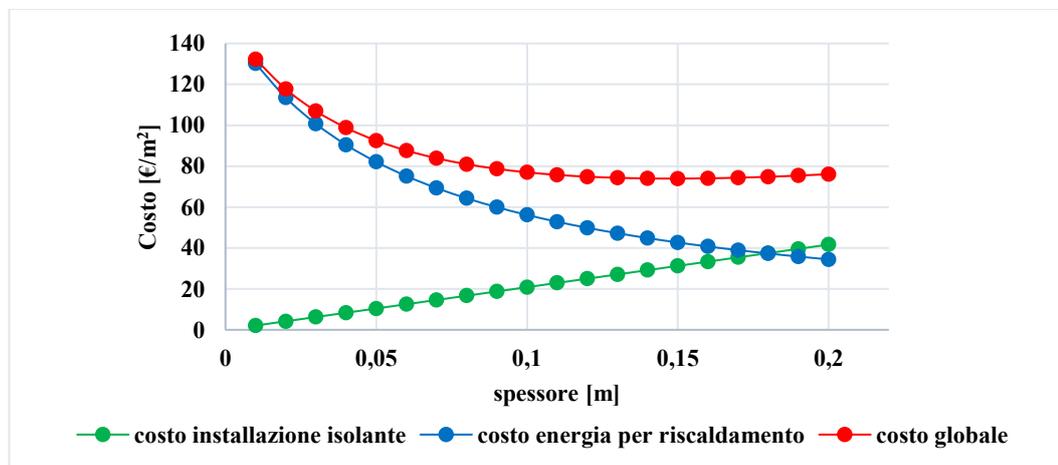


Figura 33: andamento dei costi in funzione dell'isolante per le mura perimetrali Svezia-Stoccolma

Copertura

<i>Svezia-Stoccolma</i>	
<i>Copertura</i>	
<i>c_{is}</i>	253 [€/m ³]
<i>Costi messa in opera, accessori ecc.</i>	60 [€/m ²]

<i>Ante operam</i>		<i>Post operam</i>	
		<i>Sottimo</i>	10 [cm]
$U_{\text{copertura}}$	0,4 [W/m ² /K]	$U_{\text{copertura}}$	0,19 [W/m ² /K]
$E_{\text{consumata}}$	50,2 [kWh/m ² /y]	$E_{\text{consumata}}$	23,4 [kWh/m ² /y]
Costo Energia	5,5 [€/m ² /y]	Costo Energia	2,6 [€/m ² /y]
		Costo Isolante	25,3 [€/m ²]

Tabella 7: copertura Svezia-Stoccolma

Andamento dei costi in funzione dello spessore di isolante per la copertura.

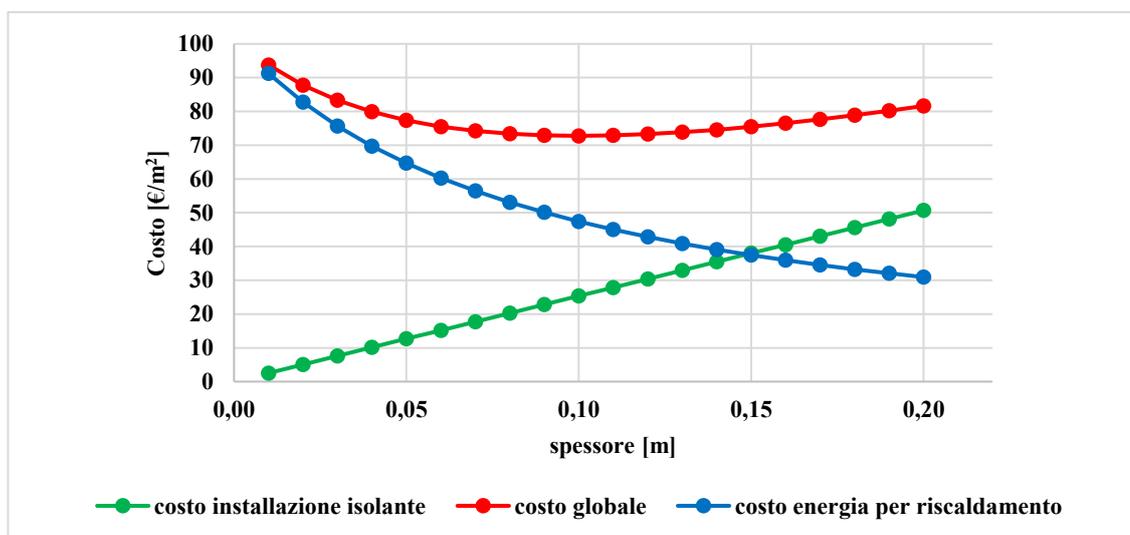


Figura 34: andamento dei costi in funzione dell'isolante per la copertura Svezia-Stoccolma

Pavimento

<i>Svezia-Stoccolma</i>	
Pavimento	
<i>c_{is}</i>	253 [€/m ³]
Costi messa in opera, accessori ecc.	60 [€/m ²]
<i>Ante operam</i>	
	<i>Sottimo</i> 6 [cm]
$U_{\text{pavimento}}$	0,5 [W/m ² /K]
$E_{\text{consumata}}$	31,4 [kWh/m ² /y]
Costo Energia	3,5 [€/m ² /y]
<i>Post operam</i>	
$U_{\text{pavimento}}$	0,27 [W/m ² /K]
$E_{\text{consumata}}$	16,9 [kWh/m ² /y]
Costo Energia	1,9 [€/m ² /y]
	Costo Isolante 17,7 [€/m ²]

Tabella 8: pavimento Svezia-Stoccolma

Andamento dei costi in funzione dello spessore d'isolante per il pavimento

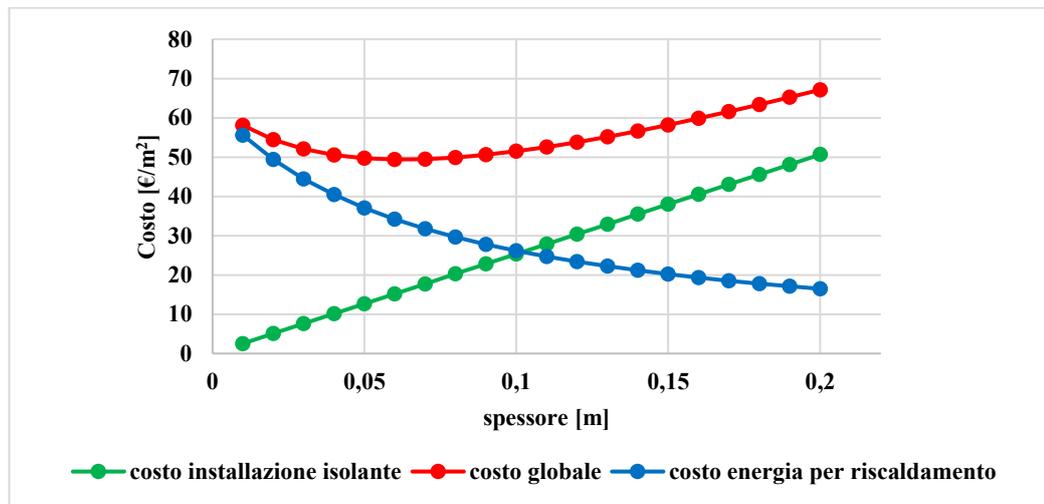


Figura 35: andamento dei costi in funzione dell'isolante per il pavimento Svezia-Stoccolma

Componente trasparente

L'indagine ha come oggetto quattro tipologie di vetrate con differenti valori di trasmittanza.

<i>Svezia-Stoccolma</i>				
<i>vetro</i>	<i>tipo</i>	<i>spessori [mm]</i>	$U_f [W/(m^2K)]$	<i>Costo vetro [€/m²]</i>
doppio	vetro senza trattamento superficiale Aria	4 6 4	3,3	78
-	vetro con trattamento superficiale (medio emissivo) Argon	4 20 4	2,0	114
-	vetro con trattamento superficiale Krypton	4 20 4	1,2	144
triplo	vetro con trattamento superficiale Krypton	4 12 4 12 4	0,5	312

Tabella 9: vetrate considerate nell'analisi Svezia-Stoccolma

Il costo del vetro appare dipendente dal valore di trasmittanza secondo una legge piuttosto regolare. Dall'indagine è emerso, con buona approssimazione, che il costo del vetro assume un andamento così come si evince dal grafico:

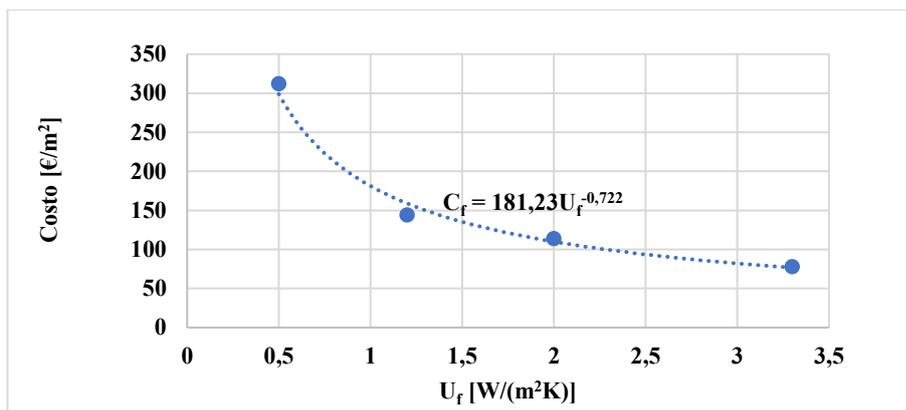


Figura 36: andamento del costo del vetro in funzione della sua trasmittanza termica Svezia-Stoccolma

Come per il componente opaco, è opportuno conoscere i seguenti costi:

- costo infisso 150 [€/m²]
- costo montaggio 80 [€/m²]

Tabella riassuntiva ante e post operam per quanto riguarda il componente vetrato.

<i>Svezia-Stoccolma</i>			
<i>Componente finestrato</i>			
	<i>C_{inv,vetro}</i>		181,23U _f ^{-0,722} [€/m²]
	<i>Costo infisso.</i>		150 [€/m²]
	<i>Costo montaggio</i>		80 [€/m²]
<i>Ante operam</i>		<i>Post operam</i>	
<i>U_{finestra}</i>	2,6 [W/m²/K]	<i>U_{finestra}</i>	0,8 [W/m²/K]
<i>E_{consumata}</i>	326,2 [kWh/m²/y]	<i>E_{consumata}</i>	100,4 [kWh/m²/y]
<i>Costo Energia</i>	36 [€/m²/y]	<i>Costo Energia</i>	11,1 [€/m²/y]

Tabella 10: componente finestrato Svezia-Stoccolma

Gli andamenti dei costi in funzione della trasmittanza.

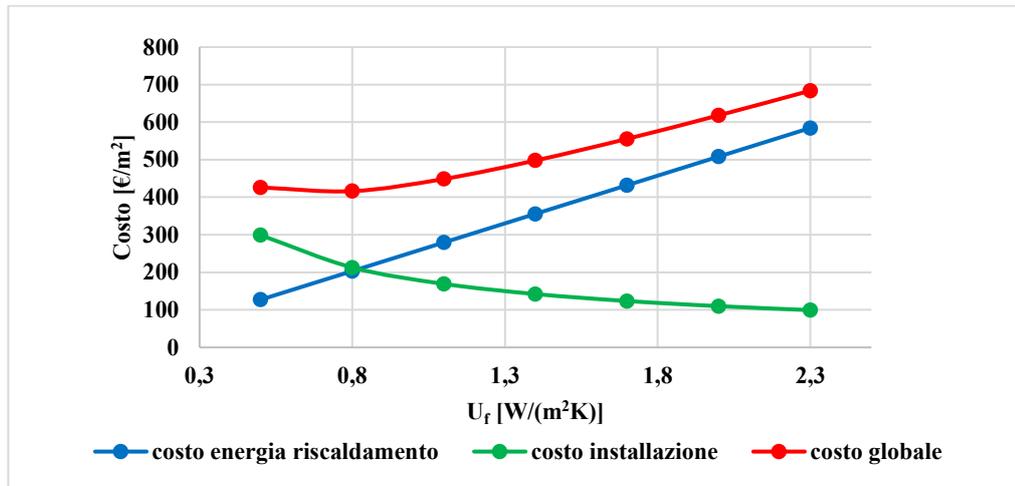


Figura 37: andamento dei costi in funzione della trasmittanza per il componente finestrato Svezia-Stoccolma

Analisi d'insieme sull'involucro edilizio dell'edificio di riferimento

Dall'analisi effettuata componente per componente, è opportuno osservare i valori ottenuti in un quadro più generale.

Dagli interventi singoli si valuteranno i consumi e i costi di energia ante e post operam sull'edificio di riferimento.

Il grafico seguente mostra la riduzione del consumo specifico di riscaldamento:

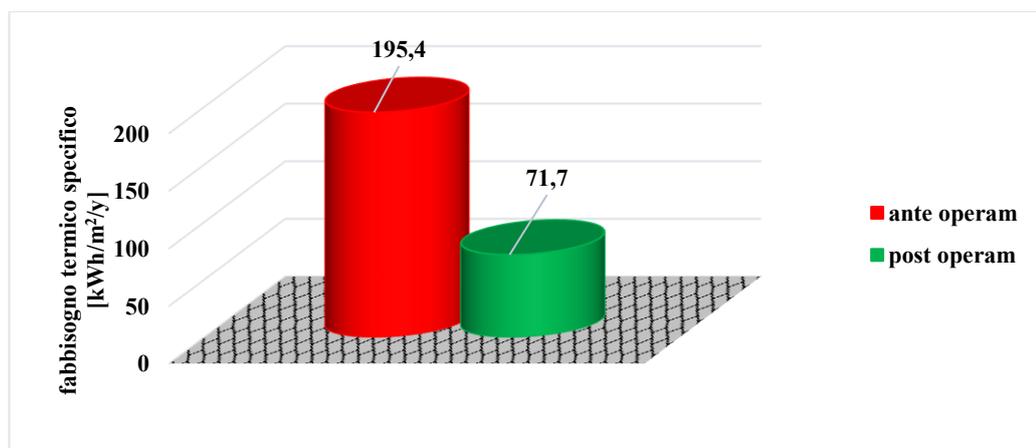


Figura 38: consumo specifico per il riscaldamento ante e post operam Svezia-Stoccolma

Il costo totale di investimento per la coibentazione dell'edificio di riferimento risulta pari a 32710 €. I risparmi all'anno sono di circa 1550 €, dati dalla differenza tra costi in bolletta ante (2450 €) e post (900 €) operam.

Comparazione tra diverse tecnologie impiantistiche a parità di coibentazione

Calcolati i nuovi fabbisogni di energia in seguito alla coibentazione totale dell'edificio, si dimensiona l'impianto con il metodo presentato precedentemente.

In questo caso, si ha bisogno di una potenza di circa 5 kW.

Le tecnologie di impianti considerate per il clima "freddo" sono:

- caldaia a pellet,
- caldaia a condensazione,
- pompa di calore geotermica.

- caldaia a pellet Vitoligno 300-C:

CALDAIA A PELLETT

potenza [kW]	costo specifico [€/kW]	costo [€]	costo montaggio [€]	η [-]	Hi [kWh/kg]	sacco pellet [€/sacco]	peso sacco pellet [kg]	costo pellet [€/y]
2,4 a 8 kW	1290	10322	500	0,9	4,6	6	15	693

Tabella 11: dati caldaia a pellet Svezia-Stoccolma

- caldaia a condensazione Vitodens 200-W:

CALDAIA A CONDENSAZIONE

potenza [kW]	costo specifico [€/kW]	costo [€]	costo montaggio [€]	η [-]	Hi [kWh/kg]	costo specifico metano [€/kWh]	costo in bolletta [€]
1,9 a 13 kW	197	2560	500	0,94	10,4	0,11	839

Tabella 12: dati caldaia a condensazione Svezia-Stoccolma

- pompa di calore geotermica Vitocal 200-G:

POMPA DI CALORE GEOTERMICA

potenza [kW]	costo specifico [€/kW]	costo [€]	costo montaggio [€]	costo specifico sonde [€/m]	scambio termico sonde [W/m]	COP [-]
5,6	1592	8914	700	40	50	4,6
consumo Elettrico [kWh]	calore prelevato dal terreno [kWh]	potenza max sottratta al terreno [kW]	lunghezza sonde [m]	costo sonde impianto geotermico [€]	costo specifico energia elettrica [€/kWh]	costo in bolletta [€]
1558	5610	4,4	88	3900	0,2	311,6

Tabella 13: dati pompa di calore geotermica Svezia-Stoccolma

Infine, è calcolato il VAN⁵⁶ per effettuare un confronto sulle diverse tecnologie in abbinamento alla coibentazione totale dell'edificio.

Si riportano i grafici dei costi preventivati ed il valore del VAN a venti anni:

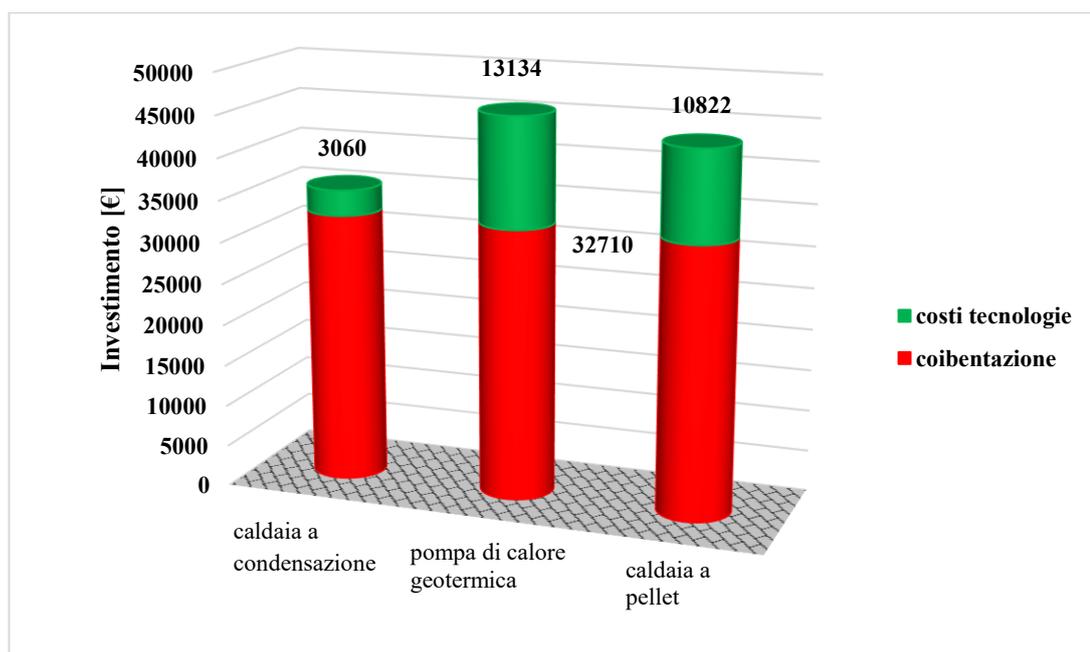


Figura 39: costi tecnologie a confronto per Svezia-Stoccolma

⁵⁶ VAN: Valore Attualizzato Netto

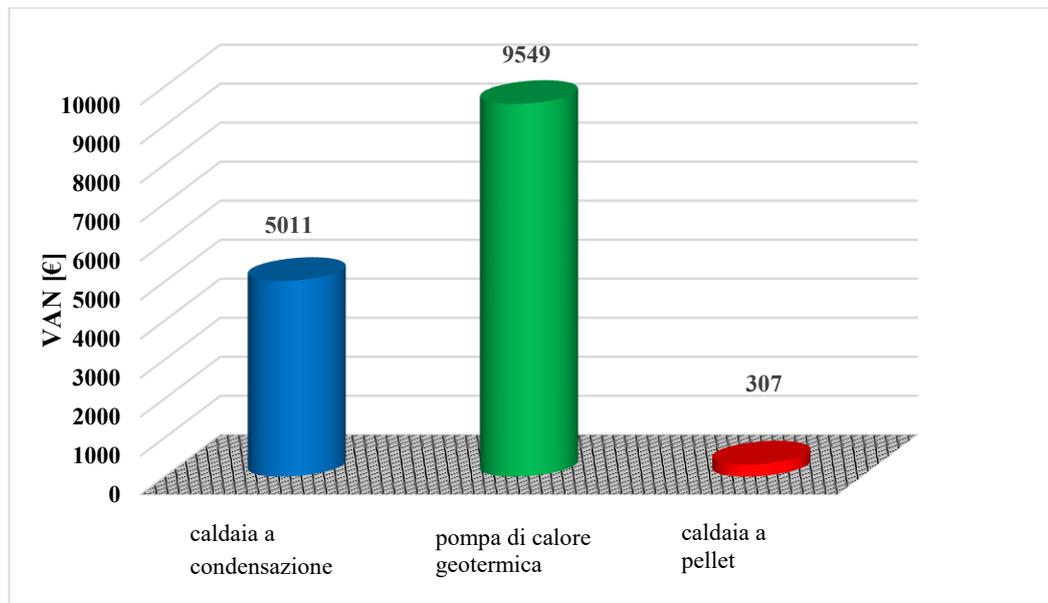


Figura 40: VAN a vent'anni per le tecnologie a confronto per Svezia-Stoccolma

Le tecnologie considerate “rinnovabili” (caldaia a pellet e pompa di calore geotermica) presentano dei costi maggiori, in particolar modo la seconda, nonostante ciò il tempo di ritorno dell’investimento risulta essere circa uguale a quello della caldaia a condensazione (17÷18 anni). Questo è prevedibile in quanto i costi specifici del gas metano presentano lo stesso ordine di grandezza di quelli di energia elettrica. Dal grafico del VAN a vent’anni, si evince che la pompa di calore geotermica risulta essere la tecnologia più conveniente.

Per concludere la trattazione sulla Svezia, si può affermare che per via dei tassi d’interesse negativi convenga maggiormente chiedere un prestito rispetto a tenere “fermi” dei capitali nei conti bancari.

Fascia climatica “mite”: Italia-Torino

Dati climatici, parametri economici e dati di involucro-impianto

Si riportano di seguito le tabelle con i dati utilizzati in ingresso, ovvero dati climatici, parametri economici e dati di involucro-impianto.

Italia-Torino

	Gradi Giorno Riscaldamento [°C-giorno]	Gradi Giorno Raffrescamento [°C-giorno]
<i>Annuale</i>	2617	127

Tabella 14: dati climatici Italia-Torino

Italia-Torino

<i>definizione</i>	<i>simbolo</i>	<i>valore</i>	<i>u.m.</i>
<i>Tasso di interesse del committente</i>	i	5%	[%]
<i>Tasso di inflazione</i>	d	1%	[%]
<i>Periodo di analisi</i>	n	15	[anni]
<i>Costo energia gas naturale</i>	c_{gas}	0,071	[€/kWh]
<i>Costo energia elettrica</i>	c_{el}	0,22	[€/kWh]
<i>Tasso di interesse effettivo</i>	i'	4%	[%]
<i>Valore presente/attualizzato</i>	FVA	11,1	[-]

Tabella 15: parametri economici Italia-Torino

I parametri involucro-impianto scelti per l'analisi sono quelli di un edificio residenziale antecedente al 1960.

Italia-Torino

<i>definizione</i>	<i>simbolo</i>	<i>valore</i>	<i>u.m.</i>
<i>Mura perimetrali</i>	U_{parete}	1,2	[W/m ² /K]
<i>Copertura</i>	$U_{copertura}$	1,3	[W/m ² /K]
<i>Pavimento</i>	$U_{pavimento}$	1,3	[W/m ² /K]
<i>Componente trasparente</i>	$U_{finestra}$	4,8	[W/m ² /K]
<i>Caldaia a gas metano</i>	η_{gl}	84	[%]
<i>EER</i>	EER	2	[-]

Tabella 16: dati involucro-impianto Italia-Torino

Mura perimetrali

Tabella riassuntiva, relativa ai costi di intervento e alla situazione ante e post operam:

<i>Italia-Torino</i>			
<i>Mura perimetrali</i>			
<i>c_{is}</i>		104 [€/m ³]	
<i>Costi messa in opera, accessori ecc.</i>		40 [€/m ²]	
<i>Ante operam</i>		<i>Post operam</i>	
<i>U_{parete}</i>	1,2 [W/m ² /K]	<i>Sottimo</i>	12 [cm]
<i>E_{consumata}</i>	75,3 [kWh/m ² /y]	<i>U_{parete}</i>	0,23 [W/m ² /K]
<i>Costo Energia</i>	8,3 [€/m ² /y]	<i>E_{consumata}</i>	17,9 [kWh/m ² /y]
		<i>Costo Energia</i>	1,4 [€/m ² /y]
		<i>Costo Isolante</i>	12,5 [€/m ²]

Tabella 17: mura perimetrali Italia-Torino

A supporto di ciò si riportano i grafici degli andamenti per i differenti costi in funzione dello spessore di isolante. Nel primo grafico vengono presentati gli andamenti sia per il caso di raffreddamento sia di riscaldamento; nel secondo si hanno gli andamenti totali, in modo da trovare uno spessore ottimale.

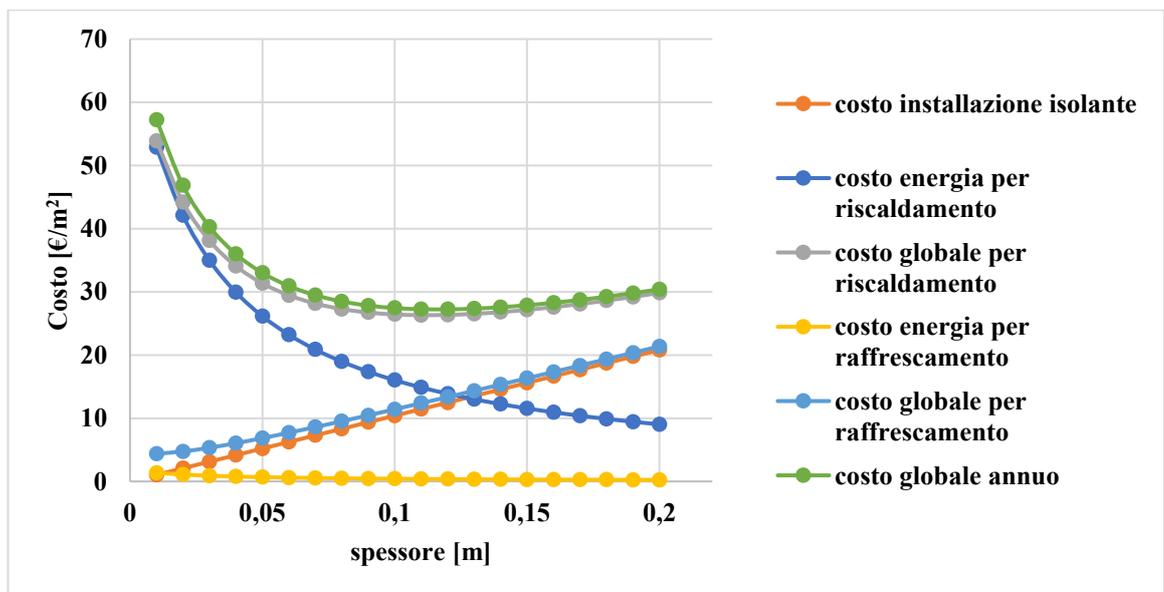


Figura 41: andamento dei costi per riscaldamento e raffreddamento in funzione dell'isolante per le mura perimetrali Italia-Torino

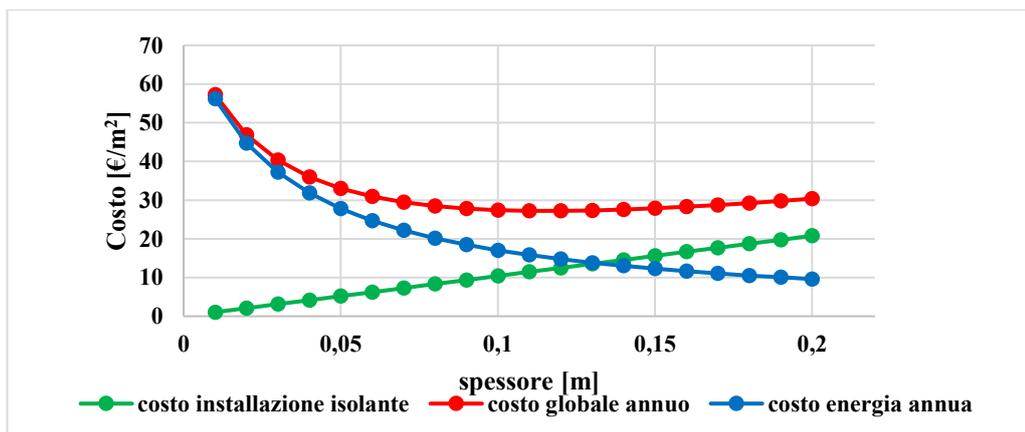


Figura 42: andamento dei costi in funzione dell'isolante per le mura perimetrali Italia-Torino

Copertura

Italia-Torino			
Copertura			
<i>Cis</i>		126 [€/m³]	
<i>Costi messa in opera, accessori ecc.</i>		45 [€/m²]	
<i>Ante operam</i>		<i>Post operam</i>	
		<i>Sottimo</i> 11 [cm]	
<i>U_{copertura}</i>	1,3 [W/m²/K]	<i>U_{copertura}</i>	0,26 [W/m²/K]
<i>E_{consumata}</i>	99,2 [kWh/m²/y]	<i>E_{consumata}</i>	19,5 [kWh/m²/y]
<i>Costo Energia</i>	6,9 [€/m²/y]	<i>Costo Energia</i>	2,6 [€/m²/y]
		<i>Costo Isolante</i> 13,8 [€/m²]	

Tabella 18: copertura Italia-Torino

Andamento dei costi in funzione dello spessore di isolante per la copertura.

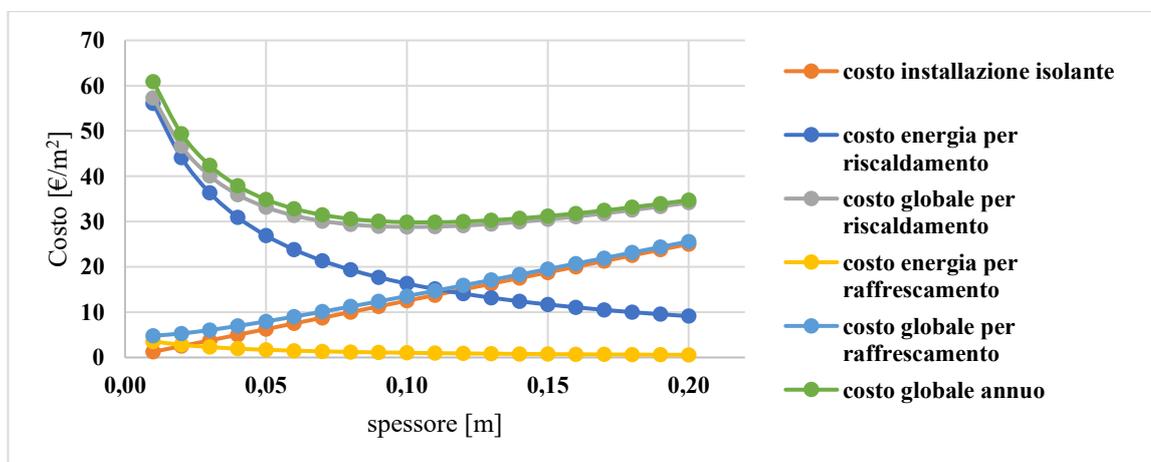


Figura 43: andamento dei costi per riscaldamento e raffrescamento in funzione dell'isolante per la copertura Italia-Torino

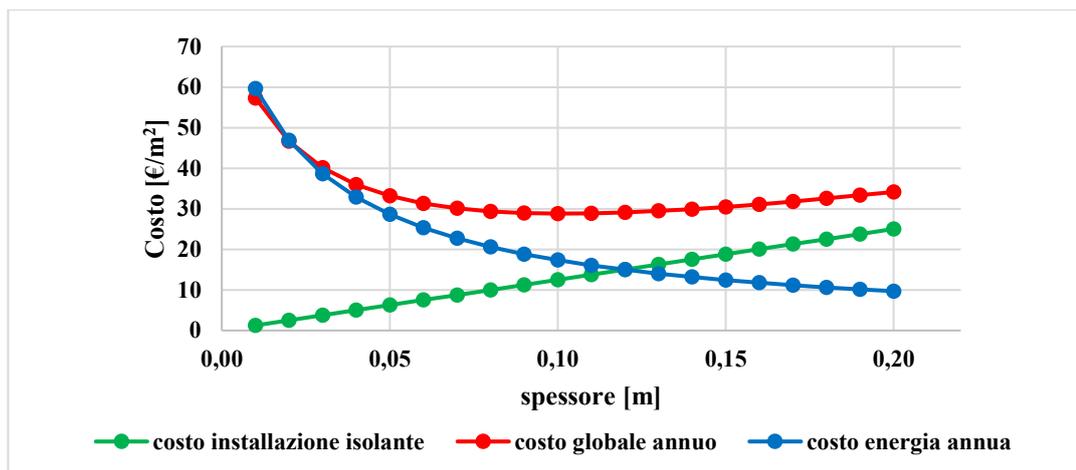


Figura 44: andamento dei costi in funzione dell'isolante per la copertura Italia-Torino

Pavimento

Italia-Torino			
Pavimento			
<i>Cis</i>		126 [€/m ³]	
Costi messa in opera, accessori ecc.		40 [€/m ²]	
<i>Ante operam</i>		<i>Post operam</i>	
		<i>Sottimo</i>	7 [cm]
U_{pavimento}	1,3 [W/m ² /K]	U_{pavimento}	0,36 [W/m ² /K]
E_{consumata}	49,6 [kWh/m ² /y]	E_{consumata}	13,8 [kWh/m ² /y]
Costo Energia	3,7 [€/m ² /y]	Costo Energia	1 [€/m ² /y]
		Costo Isolante	8,8 [€/m ²]

Tabella 19: pavimento Italia-Torino

Andamento dei costi in funzione dello spessore d'isolante per il pavimento

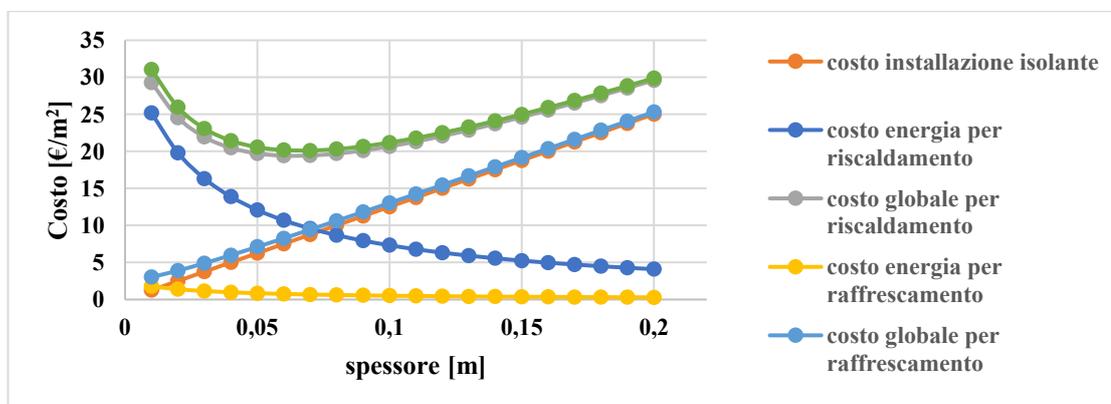


Figura 45: andamento dei costi per riscaldamento e raffrescamento in funzione dell'isolante per il pavimento Italia-Torino

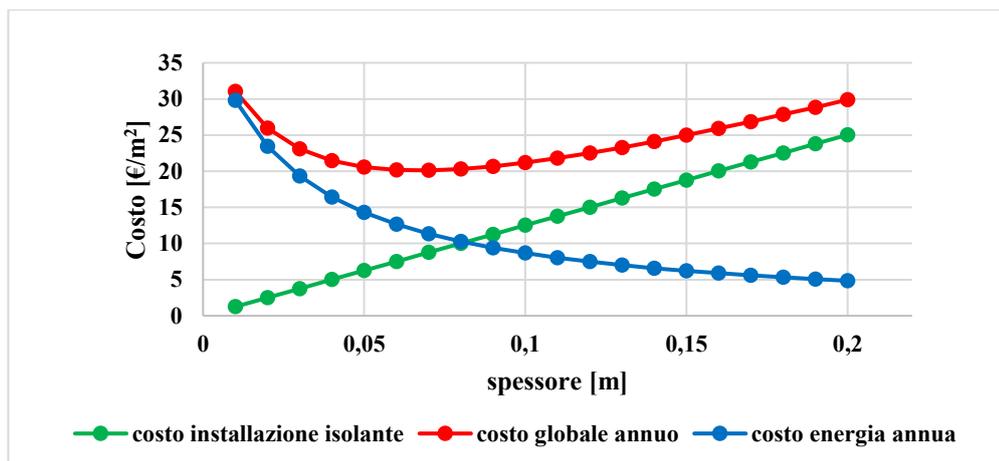


Figura 46: andamento dei costi in funzione dell'isolante per il pavimento Italia-Torino

Componente trasparente

L'indagine ha come oggetto quattro tipologie di vetrate con differenti valori di trasmittanza.

Italia-Torino

vetro	tipo	spessori [mm]	$U_f [W/(m^2K)]$	Costo vetro [€/m²]
semplice	monolitico non trattato	6÷8	5,7	20
doppio	vetro senza trattamento superficiale Aria	4 6 4	3,3	65
-	vetro con trattamento superficiale Krypton	4 20 4	1,2	120
triplo	vetro con trattamento superficiale Krypton	4 12 4 12 4	0,5	260

Tabella 20: vetrate considerate nell'analisi Italia-Torino

Il costo del vetro appare dipendente dal valore di trasmittanza secondo una legge piuttosto regolare. Dall'indagine è emerso, con buona approssimazione, che il costo del vetro assume un andamento riportato nel grafico:

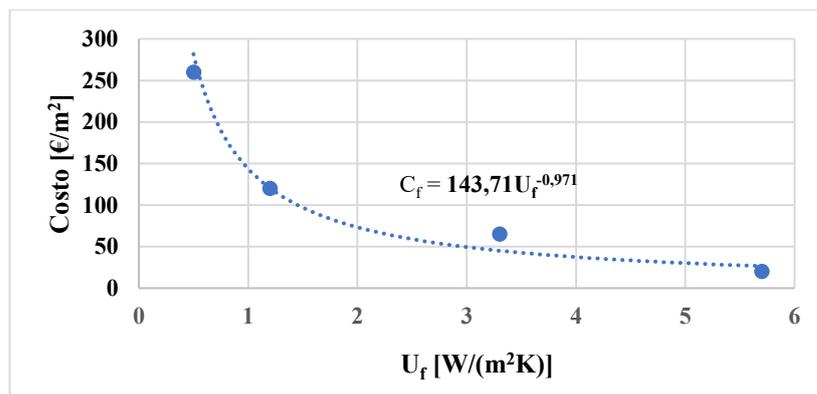


Figura 47: andamento del costo del vetro in funzione della sua trasmittanza termica Italia-Torino

Si riporta di seguito la tabella riassuntiva ante e post operam per quanto riguarda il componente vetrato.

Italia-Torino			
Componente finestrato			
$C_{inv,vetro}$	$143,71U_f^{-0,971}$ [€/m ²]		
Costo infisso.	140 [€/m ²]		
Costo montaggio	60 [€/m ²]		
Ante operam		Post operam	
$U_{finestra}$	4,8 [W/m ² /K]	$U_{finestra}$	1,5 [W/m ² /K]
$E_{consumata}$	366,3 [kWh/m ² /y]	$E_{consumata}$	144,7 [kWh/m ² /y]
Costo Energia	27,2 [€/m ² /y]	Costo Energia	8,5 [€/m ² /y]

Tabella 21: componente finestrato Italia-Torino

Come per gli altri componenti si riportano gli andamenti dei costi in questo caso in funzione della trasmittanza.

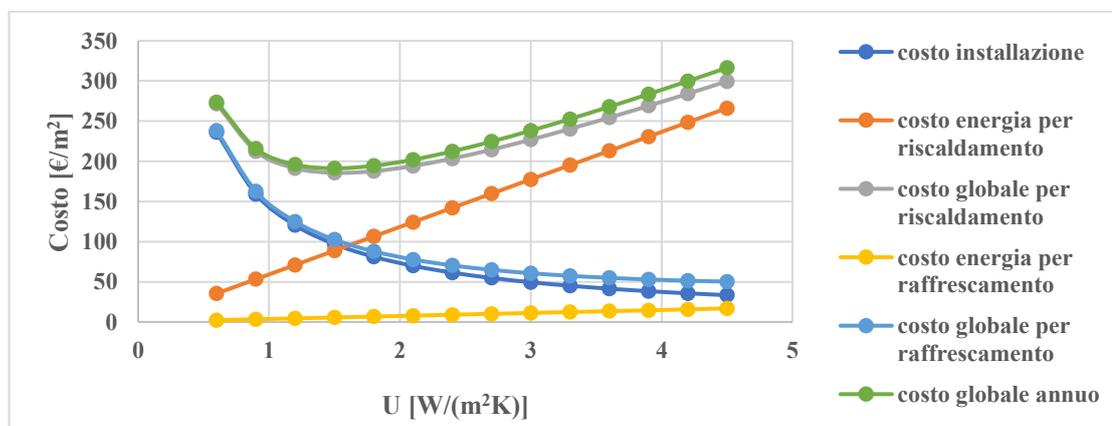


Figura 48: andamento dei costi per riscaldamento e raffreddamento in funzione dell'isolante per il componente finestrato Italia-Torino

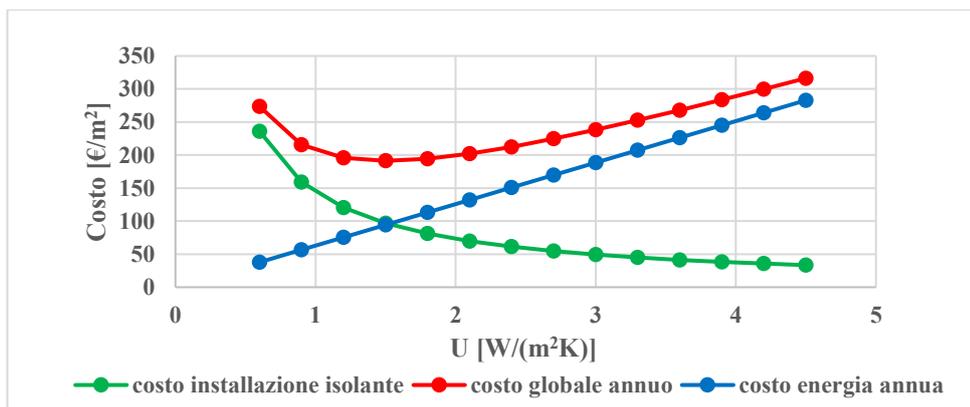


Figura 49: andamento dei costi in funzione della trasmittanza per il componente finestrato Italia-Torino

Analisi d'insieme sull'involucro edilizio

Dall'analisi effettuata componente per componente, è opportuno osservare i valori ottenuti in un quadro più generale. Per l'analisi degli interventi di coibentazione ed il confronto tra diverse tecnologie, si sfruttano gli incentivi, conosciuti come ECOBONUS, per la detrazione IRPEF⁵⁷

Le trasmittanze ottimali della copertura e del pavimento elaborate dal metodo di calcolo non rispettano per poco i limiti di legge imposti dal decreto del 26 gennaio 2010:

Zona climatica	Strutture opache verticali	Strutture opache orizzontali o inclinate		Chiusure apribili e assimilabili (**)
		Coperture	Pavimenti (*)	
A	0,54	0,32	0,60	3,7
B	0,41	0,32	0,46	2,4
C	0,34	0,32	0,40	2,1
D	0,29	0,26	0,34	2,0
E	0,27	0,24	0,30	1,8
F	0,26	0,23	0,28	1,6

Figura 50: limiti di trasmittanza decreto 26 gennaio 2010

È possibile, sempre sfruttando il metodo implementato, risalire allo spessore di isolante che permetta di ottenere l'incentivo dell'ECOBONUS. Torino si trova in fascia climatica E.

⁵⁷ IRPEF: Imposta sul Reddito delle Persone Fisiche

Per ottenere le nuove trasmittanze di copertura e pavimento a norma di legge, si devono aggiungere rispettivamente 1 e 2 [cm]; lo spessore per la copertura diventa di 12 [cm] e quello per il pavimento di 9 [cm].

Il costo totale di investimento per la coibentazione è pari a 22315 [€]; gli incentivi conseguibili tramite ECOBONUS per gli interventi sull'involucro edilizio sono pari: al 50 % per il cambio degli infissi e al 65 % per la coibentazione delle superfici opache. In tal caso si può usufruire di una detrazione IRPEF di 10645 [€], i quali vengono suddivisi in 10 rate annuali di uguale importo.

I risparmi all'anno sono di circa 1840 [€], dati dalla differenza tra costi in bolletta ante (2180 [€] per il riscaldamento e 450 [€] per il raffrescamento) e post operam (490 € per il riscaldamento e 305 € per il raffrescamento).

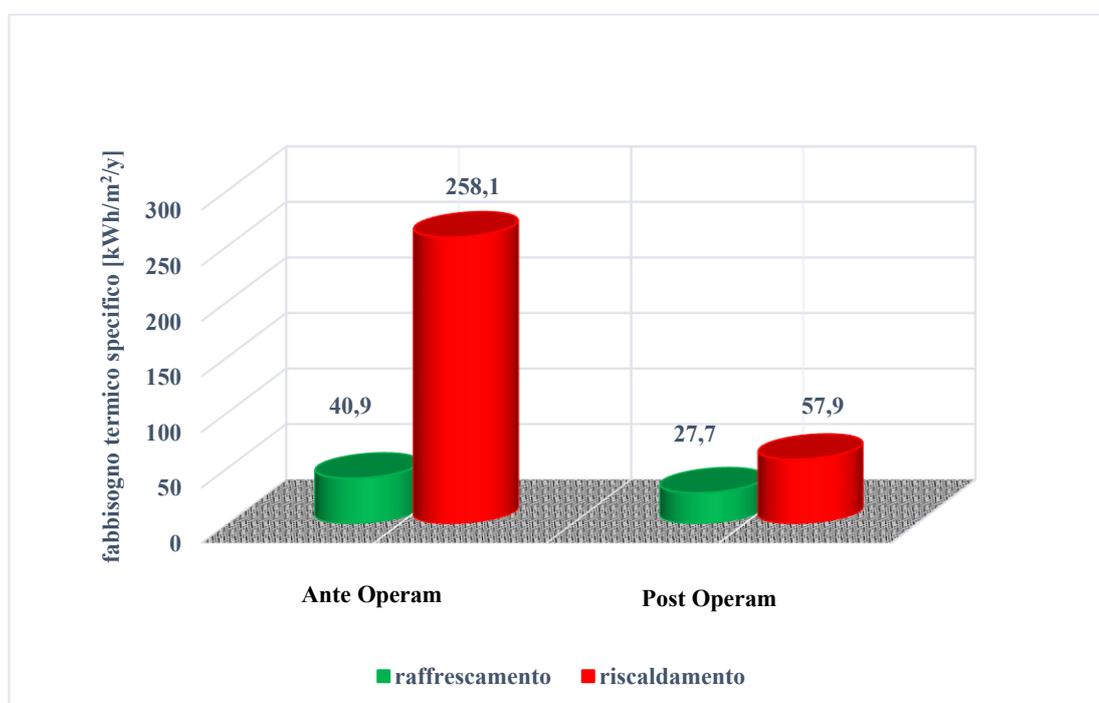


Figura 51: consumo specifico per il riscaldamento raffrescamento ante e post operam Italia-Torino

Edificio di riferimento e comparazione tra diverse tecnologie impiantistiche

I requisiti minimi per gli incentivi dell'ECOBONUS per l'involucro edilizio sono raggiunti e con essi sono ricavati i nuovi fabbisogni energetici dell'edificio.

Sono dimensionati i nuovi impianti per il periodo invernale e per quello estivo; nel primo caso, ovvero nel periodo di riscaldamento l'impianto è di circa 5 kW, mentre nel secondo caso (raffrescamento) è di 7,5 kW.

Le tecnologie di impianti considerate per il clima "mite" sono:

- caldaia a pellet,
 - caldaia a condensazione,
 - pompa di calore geotermica,
 - pompa di calore aria-aria.
- caldaia a pellet Vitoligno 300-C per il riscaldamento e pompa di calore PEDZ-P71JAL canalizzata per il raffrescamento:

CALDAIA A PELLETT

potenza [kW]	costo specifico [€/kW]	costo [€]	costo montaggio [€]	η [-]	Hi [kWh/kg]	sacco pellet [€/sacco]	peso sacco pellet [kg]	costo pellet [€/y]
2,4 a 8 kW	1290	10322	500	0,9	4,6	6	15	560

Tabella 22: dati caldaia a pellet Italia-Torino

POMPA DI CALORE ARIA-ARIA

potenza [kW]	costo specifico [€/kW]	costo [€]	costo montaggio [€]	EER [-]	consumo elettrico [kWh]	calore prelevato dall'aria [kWh]	costo specifico energia elettrica [€/kWh]	costo in bolletta [€]
0,9/8,1 in raffreddamento	239	1700	500	3,2	866	1905	0,22	190,5

Tabella 23: dati pompa di calore aria-aria Italia-Torino

- caldaia a condensazione Vitodens 200-W e pompa di calore PEDZ-P71JAL canalizzata per il raffrescamento:

CALDAIA A CONDENSAZIONE

potenza [kW]	costo specifico [€/kW]	costo [€]	costo montaggio [€]	η [-]	Hi [kWh/kg]	costo specifico metano [€/kWh]	costo in bolletta [€]
1,9 a 13 kW	197	2560	500	0,94	10,4	0,07	411

Tabella 24: dati caldaia a condensazione Italia-Torino

POMPA DI CALORE ARIA-ARIA

potenza [kW]	costo specifico [€/kW]	costo [€]	costo montaggio [€]	EER [-]	consumo elettrico [kWh]	calore prelevato dall'aria [kWh]	costo specifico energia elettrica [€/kWh]	costo in bolletta [€]
0,9/8,1 in raffreddamento	239	1700	500	3,2	866	1905	0,22	190,5

Tabella 25: dati pompa di calore aria-aria Italia-Torino

- pompa di calore geotermica Vitocal 200-G e pompa di calore PEDZ-P71JAL canalizzata per il raffrescamento:

La pompa di calore geotermica è dimensionata per il periodo di riscaldamento per evitare sovradimensionamenti. Dai dati di targa in assetto estivo la pompa di calore geotermica è in grado di fornire 4,3 [kW], si è ipotizzato che il fabbisogno di raffrescamento sia soddisfatto per il 60 % da quest'ultima ed il restante 40 % dalla pompa di calore aria-aria canalizzata, la quale ha una taglia di 4,6 [kW] in raffrescamento.

POMPA DI CALORE GEOTERMICA

potenza [kW]	costo specifico [€/kW]	costo [€]	costo montaggio [€]	costo specifico sonde [€/m]	scambio termico sonde [W/m]	COP/EER [-]
5,6	1592	8914	700	40	50	4,6/3,6
consumo elettrico annuo [kWh]	calore prelevato dal terreno riscaldamento [kWh]	potenza max sottratta al terreno [kW]	lunghezza sonde [m]	costo sonde impianto geotermico [€]	costo specifico energia elettrica [€/kWh]	costo in bolletta [€]
1721	4534	4,4	88	3520	0,22	379

Tabella 26: dati pompa di calore geotermica Italia-Torino

POMPA DI CALORE ARIA-ARIA

potenza [kW]	costo specifico [€/kW]	costo [€]	costo montaggio [€]	EER [-]	consumo elettrico [kWh]	calore prelevato dall'aria [kWh]	costo specifico energia elettrica [€/kWh]	costo in bolletta [€]
0,9/5 in raffreddamento	239	1500	500	3,2	346	762	0,22	76,1

Tabella 27: dati pompa di calore aria-aria Italia-Torino

Infine, è calcolato il VAN per effettuare un confronto sulle diverse tecnologie in abbinamento alla coibentazione totale dell'edificio.

Gli incentivi ECOBONUS per le detrazioni IRPEF sulla sostituzione di un impianto di climatizzazione esistente ammontano al 50 % per caldaie a condensazione (se di classe A) e per caldaie a biomasse (come il pellet), salgono al 65 % per le pompe di calore.

Si riportano i grafici dei costi preventivati ed il valore del VAN a venti anni:

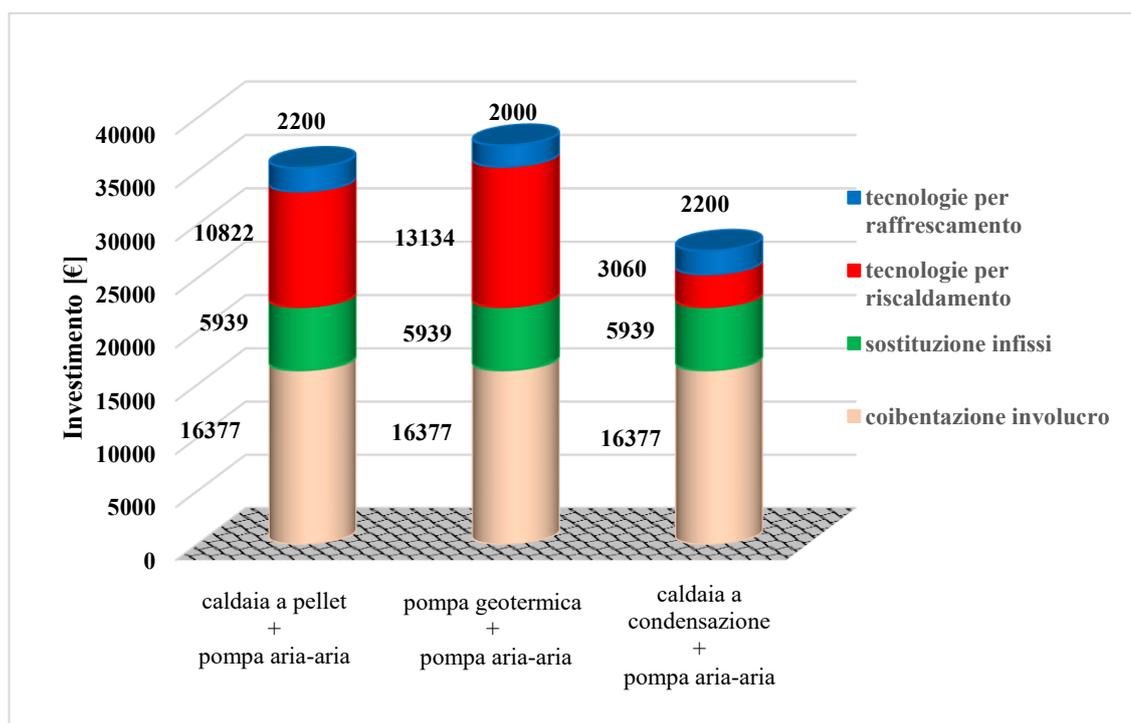


Figura 52: costi tecnologie a confronto per Italia-Torino

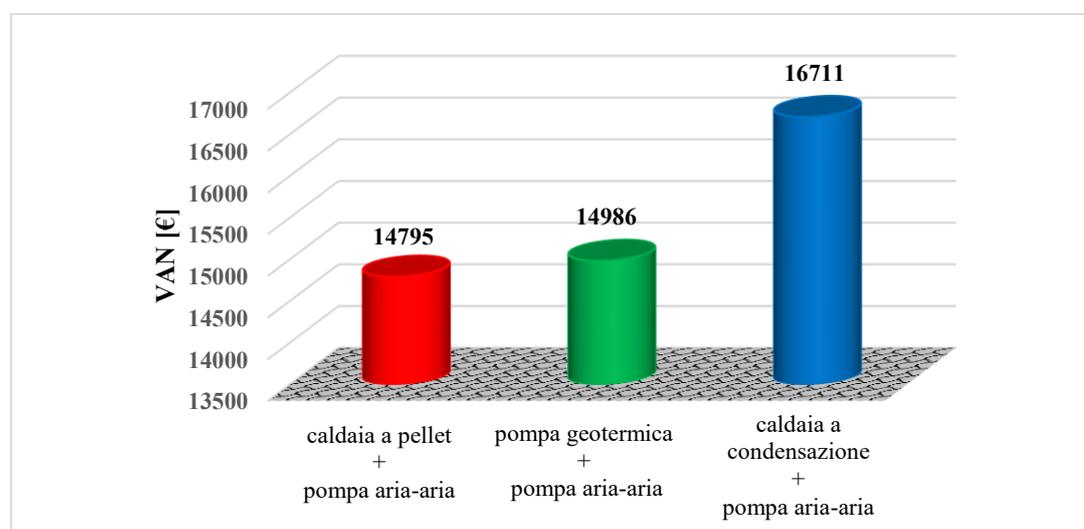


Figura 53: VAN a vent'anni per le tecnologie a confronto per Italia-Torino

Dal primo grafico si evincono i possibili costi per la realizzazione di edifici a basso consumo energetico per quanto concerne l'Italia. Tali costi senza la detrazione IRPEF sarebbero insostenibili e privi di ogni logica in quanto i tempi di ritorno dell'investimento non si ripagherebbero durante la vita utile delle tecnologie analizzate.

Dal secondo grafico tramite l'utilizzo degli incentivi, l'investimento dato dalla coibentazione più le tecnologie impiantistiche si ripaga per i tre differenti casi in meno di 10 anni; il VAN a 20 anni ci suggerisce che la soluzione coibentazione, caldaia a condensazione più pompa di calore aria-aria sia la più proficua; mentre le altre due soluzioni, pur ottenendo un VAN positivo di circa 14500 [€], risultano meno convenienti a causa degli elevati costi di partenza.

Fascia climatica “calda”: Camerun-Garoua

Dati climatici, parametri economici e dati di involucro-impianto

Si riportano di seguito le tabelle con i dati utilizzati in ingresso, ovvero dati climatici, parametri economici e dati di involucro-impianto.

Camerun-Garoua

Gradi Giorno Raffrescamento [°C-giorno]	
<i>Annuale</i>	1370

Tabella 28: dati climatici Camerun-Garoua

Camerun-Garoua

<i>definizione</i>	<i>simbolo</i>	<i>valore</i>	<i>u.m.</i>
<i>Tasso di interesse del committente</i>	i	5%	[%]
<i>Tasso di inflazione</i>	d	3%	[%]
<i>Periodo di analisi</i>	n	15	[anni]
<i>Costo energia elettrica</i>	c _{el}	0,16	[€/kWh]
<i>Tasso di interesse effettivo</i>	i'	2%	[%]
<i>Valore presente/attualizzato</i>	FVA	12,9	[-]

Tabella 29: parametri economici Camerun-Garoua

I parametri involucro-impianto scelti per l'analisi sono quelli di un edificio residenziale tipico del parco edilizio camerunese:

Camerun-Garoua

<i>definizione</i>	<i>simbolo</i>	<i>valore</i>	<i>u.m.</i>
<i>Mura perimetrali</i>	U _{parete}	1,6	[W/m ² /K]
<i>Copertura</i>	U _{copertura}	1,7	[W/m ² /K]
<i>Pavimento</i>	U _{pavimento}	1,7	[W/m ² /K]
<i>Componente trasparente</i>	U _{finestra}	5	[W/m ² /K]
<i>EER</i>	EER	2	[-]

Tabella 30: dati involucro-impianto Camerun-Garoua

Mura perimetrali

Tabella riassuntiva, relativa ai costi di intervento e alla situazione ante e post operam:

Camerun-Garoua			
Mura perimetrali			
C_{is}			140 [€/m ³]
Costi messa in opera, accessori ecc.			45 [€/m ²]
Ante operam		Post operam	
		<i>Sottimo</i>	7 [cm]
U_{parete}	1,6 [W/m ² /K]	U_{parete}	0,38 [W/m ² /K]
$E_{consumata}$	26,3 [kWh/m ² /y]	$E_{consumata}$	6,3 [kWh/m ² /y]
Costo Energia	4,2 [€/m ² /y]	Costo Energia	1 [€/m ² /y]
		Costo Isolante	9,4 [€/m ²]

Tabella 31: mura perimetrali Camerun-Garoua

A supporto di ciò, si riporta il grafico degli andamenti per i differenti costi in funzione dello spessore di isolante.

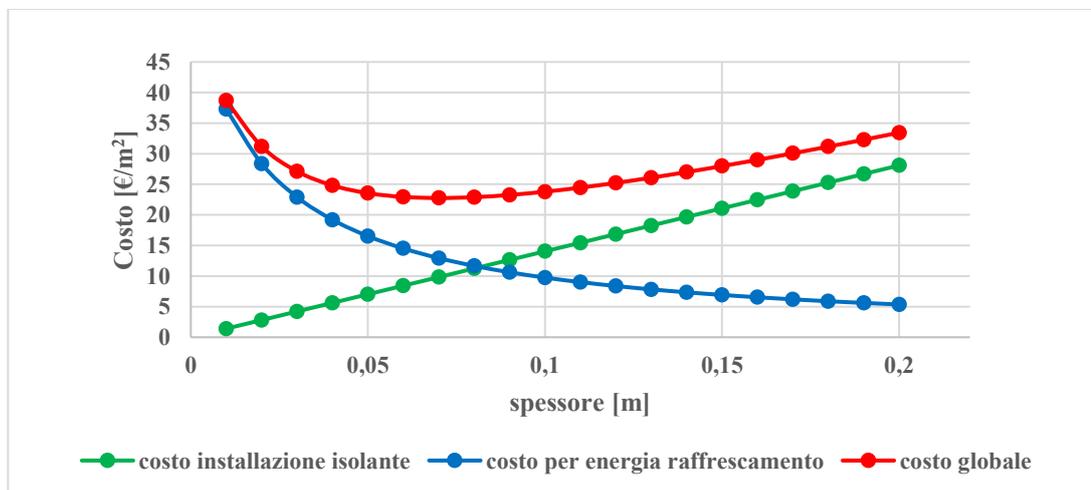


Figura 54: andamento dei costi in funzione dell'isolante per le mura perimetrali Camerun-Garoua

Copertura

Camerun-Garoua			
Copertura			
c_{is}			160 [€/m ³]
Costi messa in opera, accessori ecc.			50 [€/m ²]
Ante operam		Post operam	
		Sottimo	7 [cm]
$U_{copertura}$	1,7 [W/m ² /K]	$U_{copertura}$	0,39 [W/m ² /K]
$E_{consumata}$	27,9 [kWh/m ² /y]	$E_{consumata}$	6,4 [kWh/m ² /y]
Costo Energia	4,5 [€/m ² /y]	Costo Energia	1,9 [€/m ² /y]
		Costo Isolante	11,2 [€/m ²]

Tabella 32: copertura Camerun-Garoua

Andamento dei costi in funzione dello spessore di isolante per la copertura:

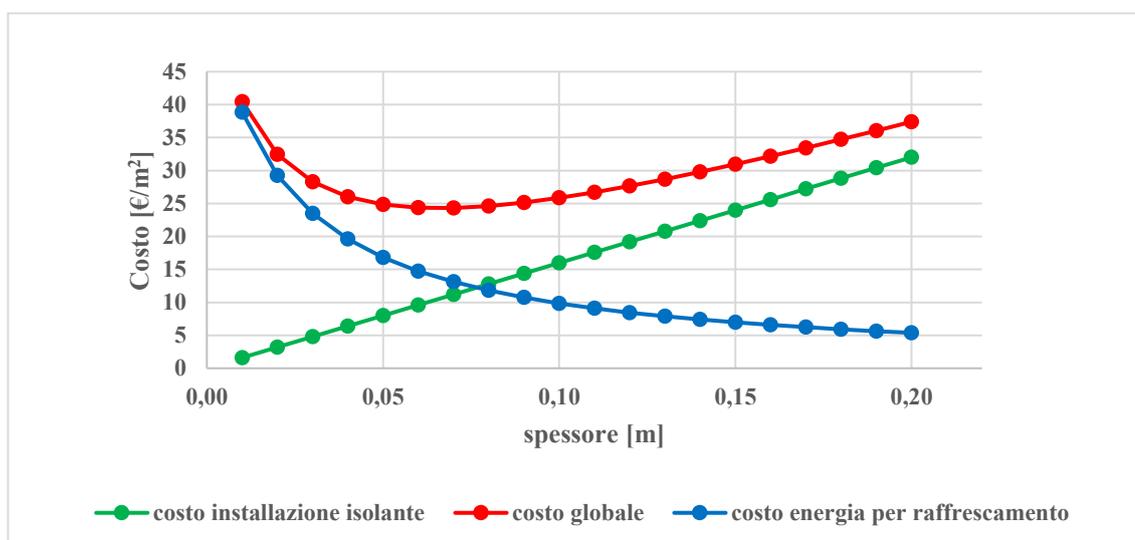


Figura 55: andamento dei costi in funzione dell'isolante per la copertura Camerun-Garoua

Pavimento

Camerun-Garoua			
Pavimento			
c_{is}			160 [€/m ³]
Costi messa in opera, accessori ecc.			40 [€/m ²]
Ante operam		Post operam	
		Sottimo	4 [cm]
$U_{pavimento}$	1,7 [W/m ² /K]	$U_{pavimento}$	0,58 [W/m ² /K]

<i>Econsumata</i>	14,0 [kWh/m ² /y]	<i>Econsumata</i>	4,7 [kWh/m ² /y]
<i>Costo Energia</i>	2,2 [€/m ² /y]	<i>Costo Energia</i>	0,8 [€/m ² /y]
		<i>Costo Isolante</i>	6,4[€/m ²]

Tabella 33: pavimento Camerun-Garoua

Andamento dei costi in funzione dello spessore d'isolante per il pavimento:

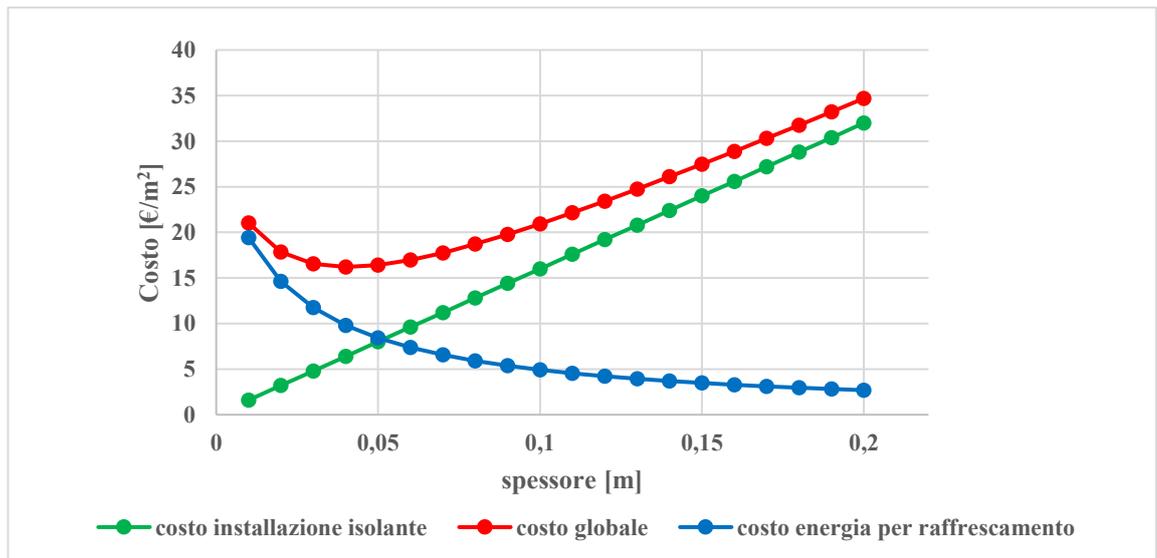


Figura 56: andamento dei costi in funzione dell'isolante per il pavimento Camerun-Garoua

Componente trasparente

L'indagine ha come oggetto quattro tipologie di vetrate con differenti valori di trasmittanza.

<i>Camerun-Garoua</i>				
<i>vetro</i>	<i>tipo</i>	<i>spessori [mm]</i>	<i>U_f [W/(m²K)]</i>	<i>Costo vetro [€/m²]</i>
semplice	monolitico non trattato	6÷8	5,7	24
doppio	vetro senza trattamento superficiale Aria	4 6 4	3,3	78
-	vetro con trattamento superficiale Krypton	4 20 4	1,2	144
triplo	vetro con trattamento superficiale Krypton	4 12 4 12 4	0,5	312

Tabella 34: vetrate considerate nell'analisi Camerun-Garoua

Il costo del vetro appare dipendente dal valore di trasmittanza secondo una legge piuttosto regolare. Dall'indagine è emerso, con buona approssimazione, che il costo del vetro assume un andamento così come si evince dal grafico:

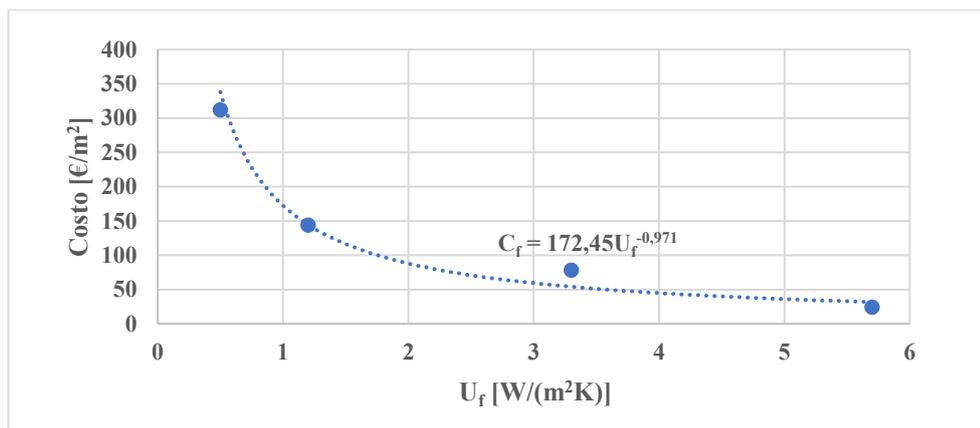


Figura 57: andamento del costo del vetro in funzione della sua trasmittanza termica Camerun-Garoua

Come per il componente opaco, è opportuno conoscere i seguenti costi:

- costo fisso 160 [€/m²]
- costo montaggio 80 [€/m²]

Tabella riassuntiva ante e post operam per quanto riguarda il componente vetrato.

Camerun-Garoua			
Componente finestrato			
$C_{inv,vetro}$	$172,45U_f^{-0,971}$ [€/m²]		
Costo fisso.	160 [€/m²]		
Costo montaggio	80 [€/m²]		
Ante operam		Post operam	
$U_{finestra}$	5 [W/m²/K]	$U_{finestra}$	2,1 [W/m²/K]
$E_{consumata}$	82,2 [kWh/m²/y]	$E_{consumata}$	34,5 [kWh/m²/y]
Costo Energia	13,2 [€/m²/y]	Costo Energia	5,5 [€/m²/y]

Tabella 35: componente finestrato Camerun-Garoua

Gli andamenti dei costi in funzione della trasmittanza.

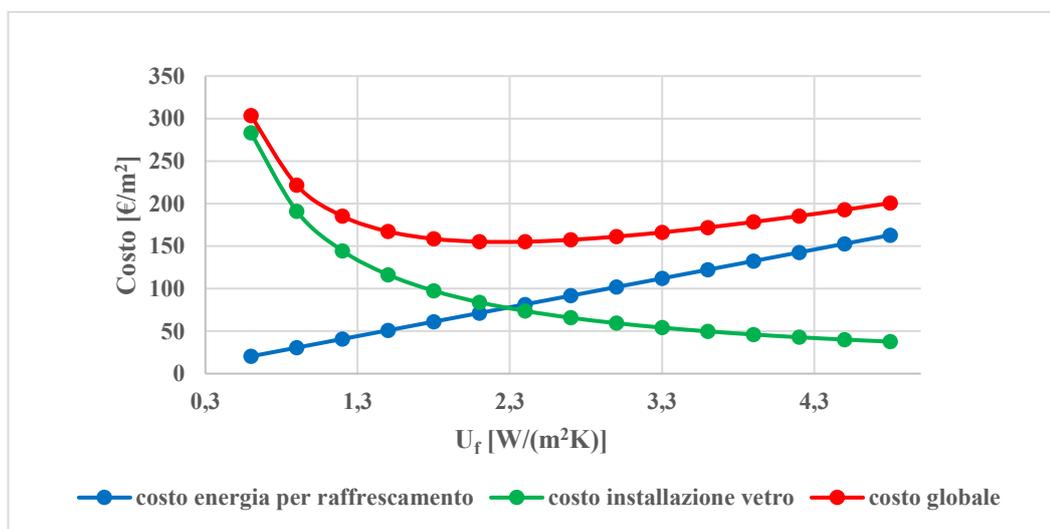


Figura 58: andamento dei costi in funzione della trasmittanza per il componente finestrato Camerun-Garoua

Analisi d'insieme sull'involucro edilizio dell'edificio di riferimento

Dall'analisi effettuata componente per componente, è opportuno osservare i valori ottenuti in un quadro più generale.

Dagli interventi singoli si valutano i consumi e i costi di energia ante e post operam sull'edificio di riferimento.

Il grafico seguente mostra la riduzione del consumo specifico di raffreddamento:

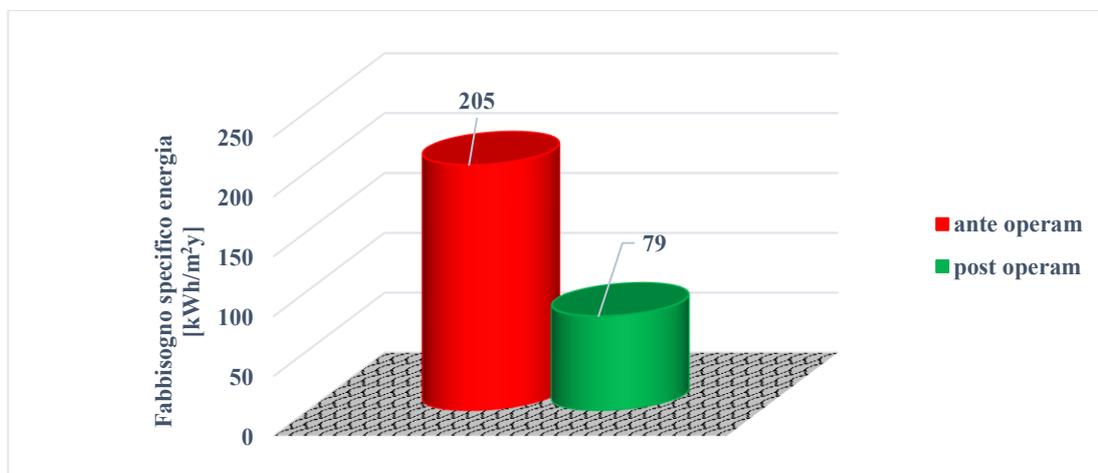


Figura 59: consumo specifico per il raffreddamento ante e post operam Camerun-Garoua

Il costo totale di investimento per la coibentazione dell'edificio di riferimento risulta pari a 22720 [€]. I risparmi all'anno sono di circa 1000 €, dati dalla differenza tra costi in bolletta ante (1643 [€]) e post operam (633 [€]).

Comparazione tra diverse tecnologie impiantistiche

Diversamente dalle altre due località considerate per il Camerun l'analisi della coibentazione totale non ha senso di esistere in quanto i tempi di ritorno dell'investimento sono superiori ai 20 anni.

Si valutano diversi interventi possibili sull'involucro edilizio e vengono confrontate due tecnologie impiantistiche:

- pompa di calore geotermica;
- pompa di calore aria-aria.

Gli interventi analizzati sono:

- coibentazione mura perimetrali e sostituzione corpi finestrati
- coibentazione copertura e sostituzione corpi finestrati;
- sostituzione corpi finestrati.

coibentazione mura perimetrali e sostituzione corpi finestrati

La coibentazione delle mura perimetrali e la sostituzione degli infissi permettono di ottenere con un costo di 11960 [€] un fabbisogno specifico di 142,7 [kWh/m²].

La taglia dell'impianto, con un K di 28, risulta di 8,5 kW:

- pompa di calore geotermica Vitocal 200-G:

POMPA DI CALORE GEOTERMICA

potenza [kW]	costo specifico [€/kW]	costo [€]	costo montaggio [€]	costo specifico sonde [€/m]	scambio termico sonde [W/m]	EER [-]
8,5	1200	10200	700	40	50	3,6
consumo Elettrico [kWh]	calore prelevato dal terreno [kWh]	potenza max sottratta al terreno [kW]	lunghezza sonde [m]	costo sonde impianto geotermico [€]	costo specifico energia elettrica [€/kWh]	costo in bolletta [€]
3965	10309	6,1	2 da 85	6800	0,16	634,4

Tabella 36: dati pompa di calore geotermica Camerun-Garoua

- pompa di calore PEDZ-P71JAL canalizzata per il raffrescamento

POMPA DI CALORE ARIA-ARIA

potenza [kW]	costo specifico [€/kW]	costo [€]	costo montaggio [€]	EER [-]	consumo elettrico [kWh]	calore prelevato dall'aria [kWh]	costo specifico energia elettrica [€/kWh]	costo in bolletta [€]
0,9/8,5 in raffreddamento	239	2040	500	3,2	4461	9813	0,16	714

Tabella 37: dati pompa di calore aria-aria Camerun-Garoua

coibentazione copertura e sostituzione corpi finestrati

La coibentazione della copertura e la sostituzione degli infissi permettono di ottenere con un costo di 12600 [€] un fabbisogno specifico di 139,5 [kWh/m²].

La taglia dell'impianto, con un K di 28, risulta di 8,5 kW:

- pompa di calore geotermica Vitocal 200-G:

POMPA DI CALORE GEOTERMICA

potenza [kW]	costo specifico [€/kW]	costo [€]	costo montaggio [€]	costo specifico sonde [€/m]	scambio termico sonde [W/m]	EER [-]
8,5	1200	10200	700	40	50	3,6
consumo Elettrico [kWh]	calore prelevato dal terreno [kWh]	potenza max sottratta al terreno [kW]	lunghezza sonde [m]	costo sonde impianto geotermico [€]	costo specifico energia elettrica [€/kWh]	costo in bolletta [€]
3876	10080	6,1	2 da 85	6800	0,16	620

Tabella 38: dati pompa di calore geotermica Camerun-Garoua

- pompa di calore PEDZ-P71JAL canalizzata per il raffrescamento

POMPA DI CALORE ARIA-ARIA

potenza [kW]	costo specifico [€/kW]	costo [€]	costo montaggio [€]	EER [-]	consumo elettrico [kWh]	calore prelevato dall'aria [kWh]	costo specifico energia elettrica [€/kWh]	costo in bolletta [€]
0,9/8,5 in raffreddamento	239	2040	500	3,2	4361	9594	0,16	698

Tabella 39: dati pompa di calore aria-aria Camerun-Garoua

sostituzione corpi finestrati

La sostituzione degli infissi permette di ottenere con un costo di 6500 [€] un fabbisogno specifico di 184 [kWh/m²/K].

La taglia dell'impianto, con un K di 28, risulta di 8,5 kW:

- pompa di calore geotermica Vitocal 200-G:

POMPA DI CALORE GEOTERMICA

potenza [kW]	costo specifico [€/kW]	costo [€]	costo montaggio [€]	costo specifico sonde [€/m]	scambio termico sonde [W/m]	EER [-]
8,5	1200	10200	700	40	50	3,6
consumo Elettrico [kWh]	calore prelevato dal terreno [kWh]	potenza max sottratta al terreno [kW]	lunghezza sonde [m]	costo sonde impianto geotermico [€]	costo specifico energia elettrica [€/kWh]	costo in bolletta [€]
5107	13300	6,1	2 da 85	6800	0,16	818

Tabella 40: dati pompa di calore geotermica Camerun-Garoua

- pompa di calore PEDZ-P71JAL canalizzata per il raffrescamento

POMPA DI CALORE ARIA-ARIA

potenza [kW]	costo specifico [€/kW]	costo [€]	costo montaggio [€]	EER [-]	consumo elettrico [kWh]	calore prelevato dall'aria [kWh]	costo specifico energia elettrica [€/kWh]	costo in bolletta [€]
0,9/8,5 in raffreddamento	239	2040	500	3,2	5745	12640	0,16	919

Tabella 41: dati pompa di calore aria-aria Camerun-Garoua

Infine, è calcolato il VAN per effettuare un confronto sulle diverse soluzioni dell'involucro edilizio in abbinamento alle due pompe di calore considerate.

Si riportano i grafici dei costi preventivati ed il valore del VAN a venti anni:

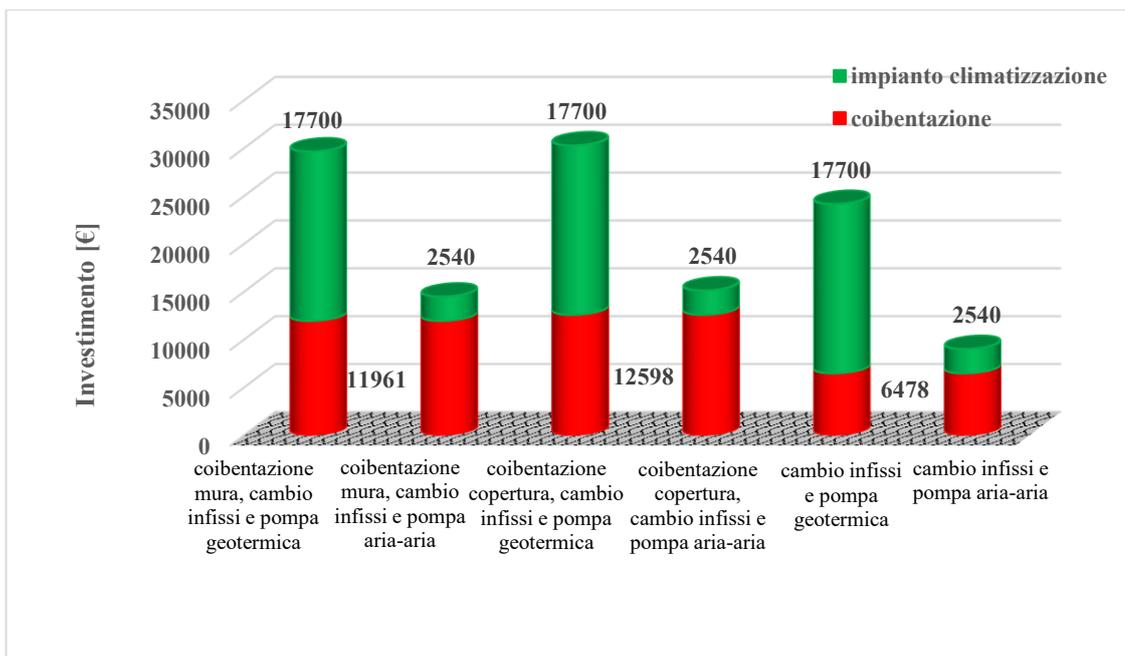


Figura 60: costi tecnologie a confronto per Camerun-Garoua

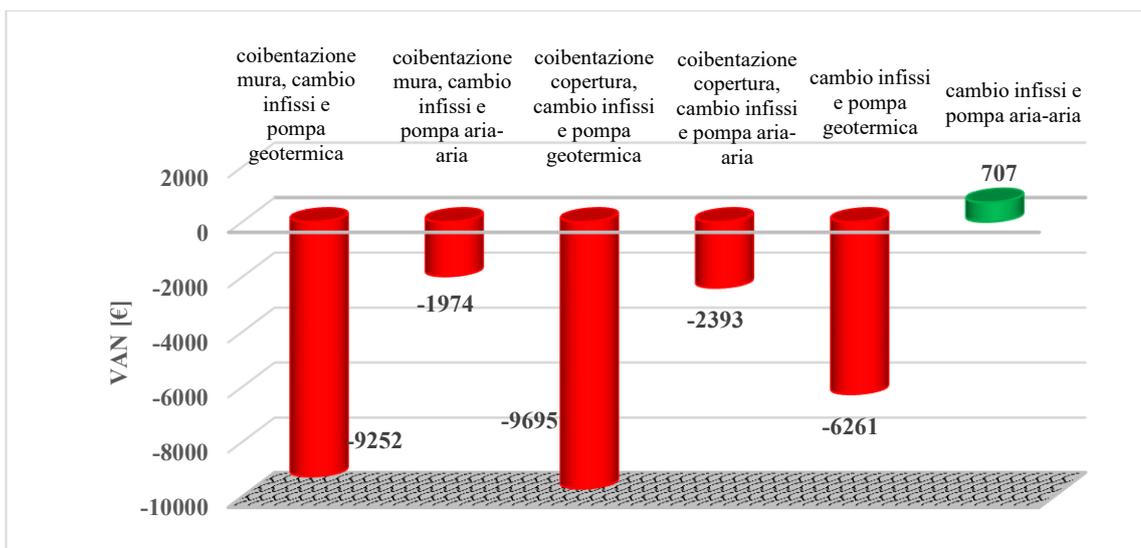


Figura 61: VAN a vent'anni per le tecnologie a confronto per Camerun-Garoua

Dal primo grafico si possono evincere i costi per i diversi interventi analizzati, il costo d'investimento minore risulta essere quello dato dalla sostituzione degli infissi più la sostituzione dell'impianto di climatizzazione con una pompa di calore aria-aria; tuttavia il fabbisogno specifico risulta essere ancora elevato. Dal secondo si nota che il minor costo d'investimento è l'unico che presenta un valore positivo del VAN a vent'anni.

Per concludere l'analisi sul Camerun è opportuno soffermarsi sulla difficoltà del rientro di un investimento indirizzato all'efficientamento energetico di un edificio, in

quanto gli interventi presentano dei costi e dei benefici non adeguati dal punto di vista economico.

Conclusione

L'elaborato ha lo scopo di dare una panoramica sull'analisi delle prestazioni energetiche degli edifici abitativi in differenti paesi e condizioni climatiche, mettendo in luce da un lato una metodologia di calcolo semplificata e spendibile all'inizio dell'analisi. Sviluppando tale concetto, è possibile riuscire ad avere un ordine di grandezza su costi d'investimento, risparmi conseguiti e tempi di ritorno; dall'altro lato l'intento è quello di far notare che il problema dei consumi domestici elevati non riguarda soltanto il nostro paese Italia, ma è un problema a livello mondiale.

Il risparmio energetico e la riduzione del fabbisogno sono e saranno tematiche di grande importanza per cercare di ovviare alla riduzione delle dispersioni termiche e di conseguenza ad un utilizzo più accurato delle fonti fossili, le quali hanno durata limitata e un elevato impatto ambientale.

Negli ultimi anni, l'interesse verso la riqualificazione degli edifici è diventato sempre maggiore, soprattutto in rapporto alla questione del consumo energetico: in virtù di questo il legislatore ha previsto che ogni atto di compravendita o di locazione debba essere accompagnato dall'*Attestato di Certificazione Energetica* (un documento nel quale è riportata la classe di consumo per tutte le unità immobiliari).

L'efficienza energetica di una casa dipende da molte variabili: uno dei fattori che incide maggiormente è sicuramente quello relativo alle perdite di calore.

Un edificio con un buon isolamento termico offre numerosi vantaggi: fra questi possiamo ricordare la riduzione delle perdite di calore nei periodi più freddi, la riduzione in entrata del flusso di calore nelle stagioni più calde e la riduzione dei ponti termici. Ne conseguono la riduzione delle varie spese energetiche nelle stagioni più fredde (minori spese di riscaldamento) sia in quelle più calde (minore necessità di utilizzare condizionatori o ventilatori) e una temperatura confortevole in tutte le stanze. La ricerca di un comfort termico ottimale che oltrepassa determinati valori può altresì condurre verso costi che vanificano in parte o totalmente il risparmio economico da esso derivante.

In conclusione, è necessario sottolineare quanto sia importante la fase di scelta dell'isolante e dei serramenti per ottenere una trasmittanza ottimale, e dell'impianto

di climatizzazione al fine di ottenere risultati sempre migliori e vantaggiosi sia per le necessità dell'uomo, sia per il miglioramento dei consumi in bolletta.

Bibliografia

- [1] D. M. R. Rodelli Giavardini, «Consumi energetici ed edilizia in Italia tra risanamento, ecologia e incentivi,» *Il sole 24 ore*, 2 11 2004.
- [2] M. Merli, «I fabbisogni di energia primaria negli edifici: la UNI/TS 11300-3,» *U&C*, n. 9, 11.
- [3] D. Cavallo, *Analisi delle prestazioni energetiche in regime estivo di un impianto di climatizzazione ad uso terziario*, tesi di laurea, 2008-2009.
- [4] P. e. e. d. consiglio, *Direttiva 2002/91/CE*.
- [5] M. G. G. S. G. Dall'o', «Manuale della certificazione energetica degli edifici,» *Edizione Ambiente*, 2008.
- [6] F. Soma, «Evoluzione normativa e calcolo del fabbisogno energetico,» *Progetto 2000*, n. 27, dicembre 2004.
- [7] *Legge n.10*, 9 gennaio 1991.
- [8] F. Buttera, «qualeenergia,» dicembre 2006. [Online]. Available: <http://www.qualeenergia.it>. [Consultato il giorno 14 9 2018].
- [9] *DPR. 26 gennaio 1993 n.412*.
- [10] G. Roche, *Prontuario operativo per la certificazione energetica. L'edificio nuovo*, Maggioli Editore, 2009.
- [11] *D.Lgs. 19 agosto 2005, n.192*.
- [12] *DPR n.59, aprile 2009*.
- [13] «I contenuti del DPR 59/2009 e i requisiti nazionali,» [Online]. Available: <http://www.edilio.it>.
- [14] «Linee guida nazionali in materia di certificazione energetica,» 26 luglio 2009.
- [15] «Le specifiche tecniche,» *Progetto 2000*, n. 37, dicembre 2009.
- [16] M. Mourshed, «Climatic parameters for building energy applications: A temporal geospatial assessment of temperature indicators,» *Renewable Energy*, n. 94, pp. 55-71, 2016.
- [17] A. STANDARD, *Energy Standard for Building Except Low-Rise Residential Buildings*, 2010.
- [18] *Elementi di architettura bioclimatica*.
- [19] *D2.1a - Survey on the energy needs and architectural features of the EU building stock*, iNSPiRe.
- [20] M. C. G. d. Silva, *Buildings: Energy, Environment and Health*, università di Coimbra , 2015-2016.
- [21] I. S. Bartocci, *Benessere Termoisgrometrico*, Università di Roma Tor Vergata.
- [22] A. A. Carbonari, *Comfort Termico*, 2009-2010.
- [23] P. G. V. Fracastoro, *Thermal Comfort*, 2015-2016.
- [24] «wikipedia,» [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Povl_Ole_Fanger.
- [25] [Online]. Available: <http://www.mygreenbuildings.org/2009/12/29/indici-di-comfort-termico-fanger-pmv-modello-adattivo-e-diagramma-bioclimatico-digivoni.html>.

- [26] F. Peron, *Clima e Comfort: diagrammi bioclimatici*.
- [27] «bottegaenergia,» [Online]. Available: <http://www.bottegaenergia.com/comfort-termoigrometrico.html>.
- [28] F. d. G. R. G. Alfano, «Disagio e stress termico: effetti, normative, valutazione e controllo».
- [29] P. V. C. Ilaria Ballarini, «Prestazione Energetica Di Edifici In Condizioni Estive: L'effetto dell'Isolamento Termico,» 2011.
- [30] L. F. Costanzo Di Perna, «La casa NZEB: una proposta per il clima mediterraneo».
- [31] «zephir,» [Online]. Available: <http://www.zephir.ph>.
- [32] V. P. Eva Raggi, *Ottimizzazione energetica degli involucri edilizi mediante algoritmi generici: due casi studio*.
- [33] «innovazionesostenibile,» [Online]. Available: <http://www.innovazionesostenibile.eu>.
- [34] I. C. Zini, *Fonti Rinnovabili: stato dell'arte e prospettive tecnologiche*, Villa Griffone (Pontecchio Marconi).
- [35] «enea,» [Online]. Available: <http://www.enea.it/it/seguici/le-parole-dellenergia/solare-termico/solar-cooling>.
- [36] «climatizzazioneconfontirinnovabili,» [Online]. Available: <http://www.climatizzazioneconfontirinnovabili.enea.it/index.php/home/43/114>.
- [37] Ervet, *Caldai ad alto rendimento energetico*.
- [38] S. M. R. F. B. Suresh B. Sadineni, «Passive building energy savings: A review of building envelope components,» *Renewable Energy*, n. 15, pp. 3617-3631, 2011.
- [39] P. G.V.Fracastoro, *Comunicazione privata*.
- [40] P. R. S. R. A. Y. Modeste Kameni Nematchoua, «A comparative study on optimum insulation thickness of walls and energy savings in equatorial and tropical climate,» *International Journal of Sustainable Built Environment*, 2017.
- [41] Z. H. H. B. A. Naouel Daouas, «Analytical periodic solution for the study of thermal performance and optimum insulation thickness of building walls in Tunisia,» *Applied Thermal Engineering*, 2010.
- [42] «repubblica,» [Online]. Available: <http://dizionari.repubblica.it/Italiano/O/omeotermia.php>.
- [43] «garzantilinguistica,» [Online]. Available: <http://www.garzantilinguistica.it/ricerca/?q=metabolismo>.
- [44] «wikitecnica,» [Online]. Available: <http://www.wikitecnica.com/temperatura-media-radiante/>.

Ringraziamenti

Vorrei prima di tutto ringraziare il Professor Marco Carlo Masoero che con la sua costante disponibilità e professionalità mi ha permesso di portare a termine questo lavoro. Grazie anche all'Ing. Laura Rietto per avermi dedicato il suo tempo e la sua esperienza.

Ringrazio l'Ing. Pier Luigi Marongiu per avermi permesso di svolgere il lavoro finale della mia carriera accademica presso la SARTEC Srl. ed entrare in contatto con la realtà aziendale, dedicandomi tempo e risorse per lo sviluppo di tale lavoro. Inoltre, ringrazio l'Ing. Debora Deiana, l'Ing. Luigi Cifelli e l'Ing. Chiara Corrà per gli ottimi consigli durante lo svolgimento della tesi.

Visto che siamo in tema di ringraziamenti, dovrei ringraziare papà e mamma ?!....solo perché hanno finanziato??? Ovviamente scherzo!!! È incredibile come mi abbiano lasciato fare tutto, senza pretendere né pressare, ma solo concedendo. GRAZIE DI CUORE.

I miei fratelli Nicola e Carola che con semplici gesti o parole hanno sempre fatto il tifo per me.

I miei nonni che ogni volta hanno dimostrato il loro interesse e con parole di incoraggiamento mi hanno fatto capire quanto fossero orgogliosi e fieri.

Vorrei ringraziare inoltre gli amici di sempre: Josè, Emanuele, Marco, Alessandro e Francesco, quelli di Torino (sono troppi, non posso elencarli tutti, ma è come se l'avessi fatto) e i coinquilini-amici: Nicola, Alberto e Davide (in particolar modo Davide, che mi ha sopportato e aiutato nella rilettura e correzione giornaliera dei diversi capitoli) che in questi anni sono stati la mia famiglia, hanno condiviso con me momenti unici, ma soprattutto si sono dimostrate persone sulle quali ho sempre potuto contare.