



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Sede Amministrativa: Università degli Studi di Padova

Dipartimento di FISICA TECNICA

SCUOLA DI DOTTORATO DI RICERCA IN : INGEGNERIA INDUSTRIALE

INDIRIZZO: FISICA TECNICA

CICLO XXII

***METODI NUMERICI E SPERIMENTALI PER LA VALUTAZIONE DEL
FABBISOGNO ENERGETICO DI CLIMATIZZAZIONE NEGLI EDIFICI
NUOVI ED ESISTENTI***

Direttore della Scuola : Ch.mo Prof. Paolo F. Bariani

Coordinatore d'indirizzo: Ch.mo Prof.sa Luisa Rossetto

Supervisore : Ch.mo Prof. Roberto Zecchin

Dottorando : Paolo Baldassa

INDICE

INTRODUZIONE	1
CAPITOLO 1	3
Introduzione: la riduzione del fabbisogno di energia dell'edificio	3
CAPITOLO 2	15
La realtà fisica del sistema edificio-impianto	15
2.1 Il comportamento termico di un edificio in regime variabile	15
2.2 Modelli matematici del comportamento dinamico	19
2.3 Effetti del comportamento dinamico degli edifici	24
CAPITOLO 3	27
I modelli per il fabbisogno energetico di climatizzazione dell'edificio	27
3.1 Introduzione	27
3.2 Fabbisogno per Riscaldamento	28
3.3 Fabbisogno per Raffrescamento	30
3.4 Modelli Semplificati del Fabbisogno Energetico di Raffrescamento	32
3.5 Confronto tra Modello UNI/TS 11300 e Modello Dinamico	40
3.5.1. Analisi Parametrica	42
3.5.4. Modifiche (modello E) al Modello UNI TS 11300-1	47
3.5.5. Valutazione Finale	53
CAPITOLO 4	57
Il fabbisogno di energia primaria per riscaldamento e raffrescamento	57
4.1 Energia Primaria per Riscaldamento	58
4.2 Energia Primaria per Raffrescamento	60
4.3 Il Calcolo del SEER	61
4.4 La Norma UNI 11135	66
4.4.1. Metodo di Calcolo con Procedure Dinamiche	67
4.4.2. Metodo di Calcolo con Procedure Semplificate Stazionarie	67
4.4.3. Calcolo Finale del EER Medio Stagionale (EER_s)	68
4.4.4. Esempio di calcolo del coefficiente correttivo Y secondo UNI 10963	69
4.5 Calcolo del Coefficiente Y a Partire dai Dati della EN 14825	72
4.6 Conclusioni	85
BIBLIOGRAFIA	86
CAPITOLO 5	87
Audit energetico su edifici esistenti: dati climatici esterni e dati interni	87
5.1 Le proprietà termofisiche degli elementi dell'involucro edilizio	88
5.1.1 - I Componenti Opachi dell'involucro Edilizio	88
5.1.2. - I Componenti Vetrati dell'Involucro Edilizio	93
5.2. Le Portate d'Aria di Ventilazione	97

5.3	Gli apporti gratuiti di energia	99
5.4	I Dati Climatici	101
5.4.1.	Origine dei dati di temperatura e irraggiamento solare.....	101
5.4.2	Profilo orari della Temperatura a Partire dai Valori Giornalieri	106
5.4.3	Separazione della Componente Diretta e Diffusa nella Radiazione Solare	108
5.4.4	Profili Orari dell'Irraggiamento Solare a partire dai Valori Giornalieri..	109
5.4.5	Irraggiamento Medio Mensile sugli Orientamenti Principali.....	110
5.4.6	Costruzione dei dati climatici per simulazioni dinamiche coerenti con la norma UNI	114
5.5	Conoscenze Fisiche sui Cambiamenti Climatici.....	118
CAPITOLO 6		129
Esempi: Audit Energetico di edifici		129
6.1	Introduzione	129
6.2	Analisi Energetica Su Civile Abitazione	131
6.2.1.	l'edificio e l'impianto.....	131
6.2.2	Condizioni Ambientali	134
6.2.3	Rilievi e Misure	135
6.2.4.	I Modelli Fisici	141
6.2.5.	Elaborazione Dei Risultati.....	144
6.2.6	Conclusioni.....	148
6.3	Analisi Energetica Edifici Scolastici Universitari.....	149
6.3.1.	Dati Relativi ai Consumi	150
6.3.2.	Dati Strutturali	160
6.3.3.	Analisi delle Prestazioni energetiche	162
6.4	Analisi Energetica di Singoli Edifici Universitari.....	170
6.4.1.	Analisi energetica complesso "Liviano"	173
6.4.2.	Analisi energetica istituto di Fisica "Galilei"	190
6.4.3.	Analisi energetica facoltà di economia , edificio "C3"	201
CAPITOLO 7		213
Esempi: energy model nella certificazione LEED		213
7.1	I Protocolli di Valutazione Globale	214
7.2	Un Protocollo per la Realtà Edilizia Italiana.....	216
7.3	Attribuzione del punteggio nella categoria EA	218
7.4	Modellazione di edifici con EnergyPlus	222
Ringraziamenti		231

INTRODUZIONE

La corretta valutazione del fabbisogno energetico per riscaldamento e raffrescamento degli edifici è una necessità sia per adempiere agli obblighi di legge nel settore del risparmio energetico, sia per poter effettuare analisi su interventi per migliorare l'efficienza energetica di edifici esistenti.

Scopo di questa tesi è svolgere un'analisi critica dei modelli di calcolo del fabbisogno di energia primaria degli edifici, in cui sia presa in considerazione sia l'aspetto relativo all'involucro, sia quello relativo al sistema impiantistico di produzione, distribuzione, regolazione e emissione. In questo ambito due sono gli aspetti che presentano ancora delle problematiche: la definizione del fabbisogno estivo di raffrescamento per l'involucro ed il calcolo del fabbisogno di energia primaria con macchine frigorifere funzionanti sia in riscaldamento che in raffrescamento.

La modalità di calcolo del fabbisogno di raffrescamento, proposta in sede europea e recepita in Italia nella norma UNI/TS 11300-1, presenta delle problematiche di applicazione nei climi mediterranei, tendendo a sovrastimare il fabbisogno energetico. In questo lavoro ne vengono analizzati i limiti di applicazione, proponendo anche un metodo di calcolo più aderente alla situazione climatica italiana.

La determinazione del fabbisogno di energia primaria per raffrescamento, una volta noto il fabbisogno dell'edificio, richiede la conoscenza delle caratteristiche di prestazione della macchina frigorifera utilizzata. In questo lavoro è proposta una modalità di calcolo che, partendo dai dati con cui viene calcolato l'indice SEER di efficienza stagionale, permette di determinare l'efficienza in ogni condizione di carico parziale e temperatura del fluido al condensatore.

L'ultima parte del lavoro vuole illustrare con quali modalità e strumenti sia possibile realizzare un'analisi energetica su edifici esistenti. La metodologia indicata, nata dall'esperienza acquisita, può essere applicata anche in altri casi sia per edifici di civile abitazione sia per edifici di tipo scolastico o terziario in generale.

ABSTRACT

The correct evaluation of the energy requirement for heating and cooling buildings is a need both to meet its legal obligations in the field of energy saving and to perform analysis on interventions to improve the energy efficiency of existing buildings.

The purpose of this thesis is to develop a critical analysis of models for calculating the primary energy needs of buildings, which is taken into account the aspect relating to the envelope, related to the plant system of production, distribution, regulation and emission. In this area there are two aspects that are still problematic: the definition of energy use for space cooling and the calculation of primary energy needs with refrigeration equipment, efficient heating in cooling.

The procedure for calculating the cooling requirements, as proposed in the European Union and implemented in Italy in UNI / TS 11300-1, presents problems for the application in a Mediterranean climate, tending to overestimate the energy needs. In this work, it analyzes the limits of application, proposing a method of calculation closer to the Italian climate situation.

The determination of the primary energy demand for cooling, once it know the needs of the building requires knowledge of the performance characteristics of the refrigerating machine is used. This paper is proposed a method of calculation, starting from the data that is calculated by the seasonal efficiency index SEER, determines the efficiency in all conditions, partial load and temperature fluid from the condenser.

The last part of the work will illustrate how and tools that it can achieve an energy analysis on existing buildings. The methodology indicated, born from the experience gained can be applied in other cases, both for residential buildings and for buildings of tertiary type or education in general

CAPITOLO 1

Introduzione: la riduzione del fabbisogno di energia dell'edificio



PREMESSA: IL METODO

Prima di iniziare lo studio del fenomeno fisico occorre precisare qual è stato il metodo che è stato alla base di tutte le ricerche effettuate all'interno di questo lavoro.

Il punto di partenza è la realtà che continuamente ci provoca a conoscerla per comprenderne la sua complessità. Quindi senza un interesse per la sua comprensione nessuno studio è possibile; l'interesse implica quindi un coinvolgimento personale verso l'oggetto dello studio, cioè non si può conoscere ciò per cui non si prova interesse.

Il secondo aspetto è il metodo nel senso che esso è determinato dall'oggetto dello studio per cui la scelta con che modalità studiare un certo fenomeno o caso è determinata dalle caratteristiche e dal comportamento che esso ha. Potremmo dire che è il ricercatore che deve adeguarsi all'oggetto dello studio e non il contrario. Questo ha portato ad esempio a utilizzare delle particolari metodologie di misura per un

particolare fenomeno fisico che diversamente sarebbe rimasto impossibile da conoscere.

LA REALTA': CONSUMI ENERGETICI E CAMBIAMENTI CLIMATICI

Il punto di partenza è che noi non siamo i creatori della Terra e dell'universo; è un dono che ci è stato affidato. Noi siamo stato messi nelle condizioni di poterci vivere e di poterlo utilizzare. Dal riconoscimento di questo dato di fatto, da questa concezione può nascere un rapporto positivo e di rispetto verso la natura e di conseguenza verso il problema energetico. Senza rischiare di ritenere di essere i padroni indiscussi dell'ambiente che possediamo e quindi di avere o un atteggiamento di sfruttamento indiscriminato di tutte le risorse del pianeta o di pensare di essere in grado con la scienza di controllarlo e di dominarlo.

Lo studio riguarda il problema dei consumi energetici degli edifici ai fini della climatizzazione invernale ed estiva. Le condizioni di confort all'interno di un edificio sono sempre diverse dalle condizioni climatiche dell'ambiente esterno che in genere subisce continui cambiamenti nell'arco della giornata e della stagione; di conseguenza tra l'ambiente climatizzato e l'esterno vi sono scambi di calore che variano continuamente. E' necessario che vi sia un sistema che scambi con l'ambiente il calore necessario a mantenere un equilibrio dei flussi entranti e uscenti tale da mantenere costanti le condizioni ambientali interne. Tale sistema è costituito da un generatore che mantiene un fluido termovettore a temperatura più alta dell'ambiente climatizzato nel periodo invernale e più fredda nel periodo estivo. Oltre a questo è necessario un sistema di controllo che moduli con continuità il flusso di calore immesso nell'ambiente. La produzione di fluido a temperature diverse da quelle ambientali, con le attuali tecnologie, viene realizza o con l'utilizzo di combustibili (caldaie, gruppi ad assorbimento, motori a scoppio) o con macchine a compressione di gas mosse da motori elettrici (gruppi frigoriferi e pompe di calore).

Sia che venga utilizzato energia da un processo di combustione che energia elettrica; la fonte con cui questo viene prodotto è nella maggioranza dei casi combustibile fossile. La *Figura 1* seguente illustra le due modalità di produzione di energia nel caso del riscaldamento.

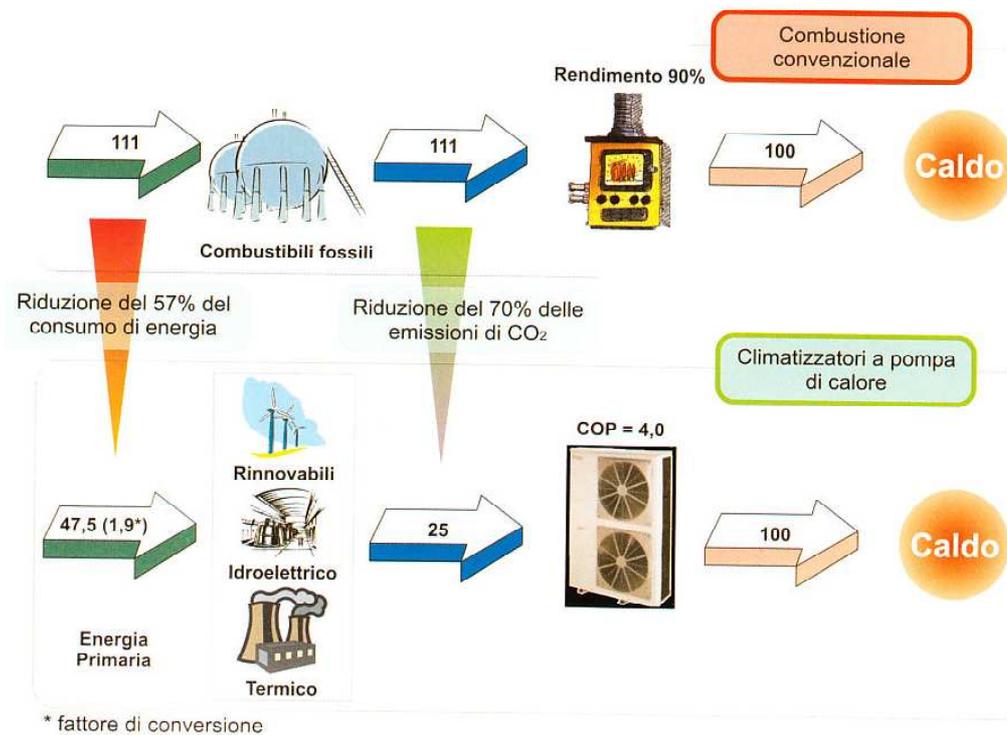


Figura 1–Energia primaria necessaria per la produzione di 100 unità di energia termica sia nel caso di generatori a combustione che nel caso di sistemi alimentati con energia elettrica

Si definisce primaria l'energia che non è stata soggetta a nessun processo di trasformazione e conversione. L'energia elettrica è prodotta da combustibili fossili, impianti idroelettrici e da energie rinnovabili; con un mix che dipende dal sistema produttivo di ogni singola nazione. Il fattore di conversione in energia primaria dell'energia elettrica per l'Italia vale 2,56 e tiene conto dell'energia primaria consumata per processi di: estrazione, lavorazione, deposito, trasporto, generazione, trasformazione, trasmissione, distribuzione, ed altre operazioni necessario per la consegna presso l'edificio dove viene consumata. Anche il gas naturale ed i derivati del petrolio hanno un fattore di conversione che vale 1,1 e che tiene conto di quanto detto sopra in particolare dell'energia consumata per il trasporto del combustibile fino al punto di utilizzazione. I fattori di conversione in energia primaria per tutte le tipologie di fonti energetiche sono riportati nella norma EN 15315 ma per l'Italia la società Terna ha definito il rendimento del sistema elettrico nazionale pari a 0,39. Per quanto riguarda i calcoli del fabbisogno di energia primaria secondo le norme UNI, una opportuna delibera ha definito il fattore di conversione da utilizzare (Delibera

EEN, 2008) L'immagine in *Figura 2* tratta dalla norma EN 15315 rappresenta il flusso dell'energia fornita all'edificio partendo dall'energia primaria fino ad arrivare alla dispersioni attraverso l'involucro.

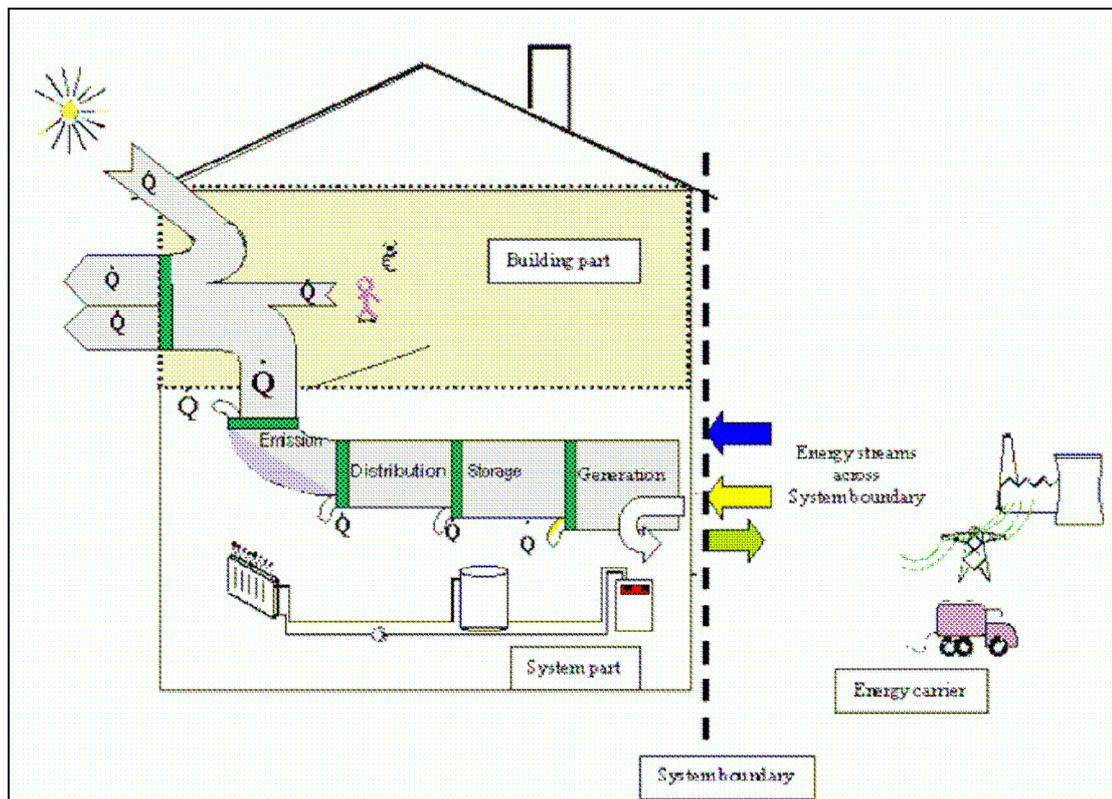


Figura 2–Flussi entranti e uscenti nell'edificio climatizzato (da EN 15315)

L'approvvigionamento di energia di origine fossile presenta problematiche di tipo economico e politico che fino dalla crisi petrolifera degli anni 70 hanno dimostrato di essere legate a fattori sia politici che economici esterni all'area geografica di utilizzazione. Infatti le maggiori riserve di combustibili fossili sono su stati che non ne sono i maggiori utilizzatori e che in alcuni casi presentano caratteristiche di instabilità politica. In *Figura 3* sono riportate le riserve mondiali di greggio da dati Eni.

RISERVE DI GREGGIO: I PRIMI 10 PAESI NEL MONDO												
<i>(MILIONI DI BARILI AL 1 GENNAIO)</i>	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Arabia Saudita	261.500	261.500	263.500	261.700	261.750	261.800	261.900	261.900	266.810	262.300	266.751	266.710
Iran	93.000	89.700	89.700	89.700	89.700	89.700	125.800	125.800	132.460	136.270	138.400	136.150
Iraq	112.500	112.500	112.500	112.500	112.500	112.500	115.000	115.000	115.000	115.000	115.000	115.000
Kuwait	96.500	96.500	96.500	96.500	96.500	96.500	99.000	101.500	104.000	101.500	104.000	104.000
Venezuela	71.700	72.600	72.600	76.862	77.685	77.800	77.800	77.226	79.729	80.012	87.035	99.377
Emirati Arabi Uniti	97.800	97.800	97.800	97.800	97.800	97.800	97.800	97.800	97.800	97.800	97.800	97.800
Russia	48.573	48.573	48.573	48.573	48.573	60.000	60.000	60.000	60.000	60.000	60.000	60.000
Libia	29.500	29.500	29.500	29.500	29.500	29.500	36.000	39.000	39.126	41.464	41.464	43.660
Nigeria	16.800	22.500	22.500	22.500	24.000	24.000	25.000	35.255	35.876	36.220	36.220	36.220
Kazakhstan	5.417	5.417	5.417	5.417	5.417	9.000	9.000	9.000	9.000	30.000	30.000	30.000
Primi 10 paesi	833.290	836.590	838.590	841.052	843.425	858.600	907.300	922.481	939.801	960.566	976.670	988.917
Resto del mondo	196.131	204.882	187.257	196.573	197.640	188.789	191.850	189.244	187.647	190.293	190.233	188.663
Mondo	1.029.421	1.041.472	1.025.847	1.037.625	1.041.065	1.047.389	1.099.150	1.111.725	1.127.448	1.150.859	1.166.903	1.177.580

Figura 3– Riserve di greggio: i primi 10 paesi nel mondo. Fonte: elaborazione dati Eni

Nelle successive Figura 4 e Figura 5 sono rappresentati la produzione ed il consumo dei principali paesi produttori dove si osserva la grande differenza tra quantità prodotte e quantità consumate internamente.

PRODUZIONE DI GREGGIO (MIGLIAIA DI BARILI/GIORNO)												
	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Norvegia	3.280	3.139	3.139	3.346	3.419	3.333	3.264	3.189	2.969	2.778	2.558	2.473
Nigeria	2.382	2.199	2.059	2.160	2.223	2.116	2.285	2.513	2.598	2.463	2.346	2.160
Kuwait	1.951	1.926	1.768	1.880	1.838	1.726	1.995	2.171	2.258	2.335	2.293	2.477
Qatar	705	751	764	860	881	869	1.005	1.131	1.157	1.218	1.259	1.412
Russia	6.115	6.122	6.086	6.517	7.048	7.726	8.575	9.365	9.627	9.843	10.078	9.993
Arabia Saudita	9.131	9.174	8.554	9.068	8.798	8.557	9.756	10.065	10.604	10.447	9.988	10.406
Emirati Arabi Uniti	2.644	2.668	2.431	2.622	2.575	2.406	2.733	2.842	2.995	3.147	3.055	3.113
Venezuela	3.473	3.405	3.094	3.220	3.142	2.907	2.599	2.888	3.011	2.835	2.614	2.582

Figura 4 – Produzione di greggio. Fonte: elaborazione dati Eni

CONSUMO DI GREGGIO (MIGLIAIA DI BARILI/GIORNO)												
	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Norvegia	220	222	222	212	218	216	228	214	214	229	225	217
Nigeria	186	181	212	221	254	278	261	246	295	252	254	257
Kuwait	178	209	234	225	229	238	294	325	359	308	320	335
Qatar	33	34	32	35	38	49	53	57	62	73	81	91
Russia	2.547	2.414	2.511	2.578	2.628	2.548	2.589	2.591	2.585	2.673	2.877	2.943
Arabia Saudita	1.434	1.518	1.554	1.577	1.653	1.724	1.764	1.908	1.998	2.092	2.203	2.427
Emirati Arabi Uniti	403	402	395	392	393	400	447	473	513	545	573	599
Venezuela	502	491	462	497	572	546	503	583	655	724	793	860

Figura 5 – Consumo di greggio. Fonte: elaborazione dati Eni

L'acquisto all'esterno del proprio paese della maggioranza del combustibile necessario per il funzionamento delle attività interne di una nazione comporta una spesa elevata nel bilancio di ogni singolo consumatore. Basti pensare a qual è la percentuale di costo per l'acquisto dell'energia che ogni azienda deve sostenere o ai costi per riscaldamento e condizionamento di ogni singola abitazione

I costi del petrolio nell'ultimo decenni hanno comportato un generale aumento con oscillazioni anche rilevanti nel breve periodo: Negli ultimi dieci anni si è verificato un aumento della richiesta di energia da parte dei paesi con economie in forte crescita che quindi ha comportato un aumento del costo del petrolio. In *Figura 7* è rappresentato l'andamento del costo del petrolio negli ultimi 40 anni. Quello che si osserva è che rispetto ad un periodo di circa 30 anni in cui il prezzo è rimasto sostanzialmente stabile, si è assistito negli ultimi 10 anni ad un aumento consistente del prezzo del barile di greggio.

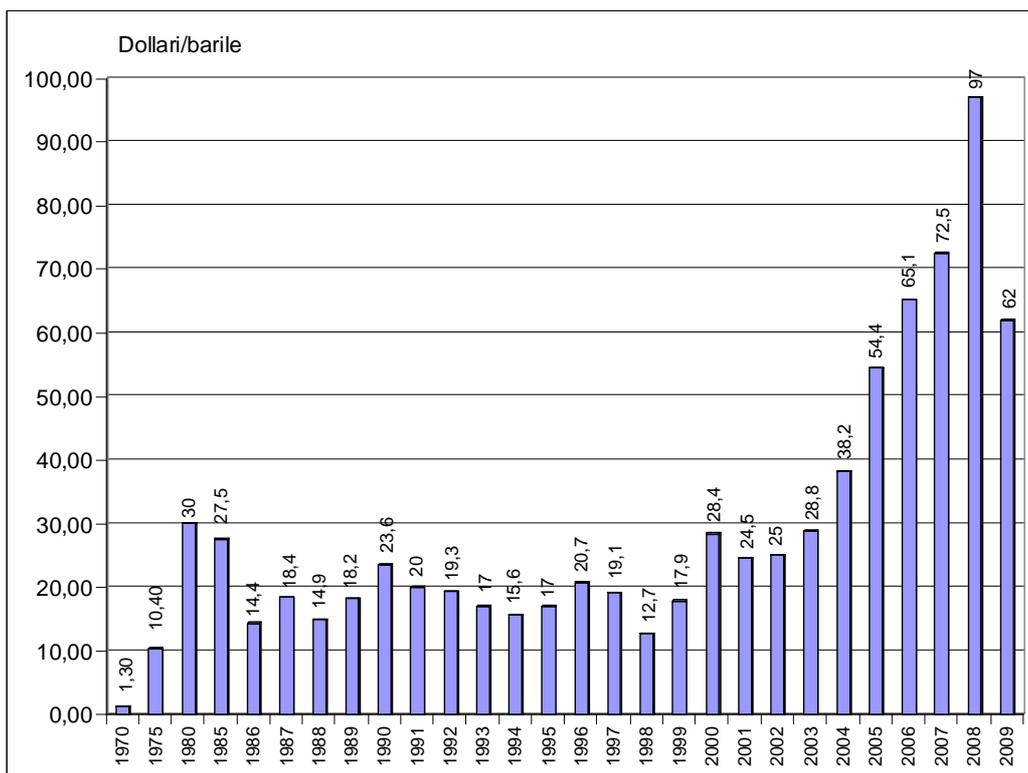


Figura 7 – Quotazione media del petrolio greggio. Fonte: IEA e PLATTS

Le prospettive nel futuro saranno sicuramente di un aumento ulteriore del costo poiché oltre all'aumento delle richieste dovute allo sviluppo economico si sommerà anche un aumento dei costi di estrazione dovuto al ridursi delle riserve disponibili e quindi al fatto di dover utilizzare giacimenti con maggiori difficoltà di estrazione.

Risulta quindi necessario ridurre i consumi di combustibili di origine fossile poiché il loro costo sarà in futuro sempre più elevato. Questo risultato si può ottenere con due modalità principali; la prima consiste nell'ottimizzare le prestazioni del sistema edificio impianto tramite misure di tipo tecnico costruttivo quali:

- 1 Aumento degli isolamenti delle strutture opache e trasparenti;
- 2 Schermatura dell'irraggiamento solare;
- 3 Utilizzo di sorgenti di illuminazione con maggiore efficienza;
- 4 Utilizzo di generatori di calore a combustione che sfruttino il calore di condensazione dei fumi;
- 5 Utilizzo di macchine frigorifere e pompe di calore con rese stagionali elevate

- 6 Adozione di sistemi di regolazione che modulino la potenza dei terminali in funzione delle condizioni climatiche esterne
- 7 Adozione di terminali che limitino la disomogeneità della temperatura in modo da ridurre le perdite di emissione.
- 8 Generazione combinata di energia elettrica e termica da macchine motrici (motori a combustione interna o turbine a gas o vapore)

La seconda modalità cerca di sostituire l'utilizzo di energia da combustibili fossili con l'utilizzo di fonti energetiche rinnovabili cioè energie la cui sorgente si possa considerare inesauribile quali ad esempio:

- 1 Solare termico e fotovoltaico;
- 2 Eolico;
- 3 Biomassa (legno e scarti di prodotti agricoli);

Questa soluzione a fronte di un costo molto basso se non nullo dell'energia presenta invece il problema dei costi elevati di impianti che a volte ne rende non conveniente l'utilizzo.

La prima soluzione è in parte adottata nell'attuale normativa italiana di recepimento della direttiva EPBD europea. La Direttiva 2002/91/EC relativa alle prestazioni energetiche degli edifici (Energy Performance of Buildings), e richiede varie misure per ottenere un uso razionale e moderato delle risorse energetiche oltre che ad una riduzione dell'impatto ambientale dell'energia utilizzata negli edifici. La direttiva prevede che ogni stato membro debba attuare quattro principali punti:

- 1 – la metodologia di calcolo;
- 2 - i requisiti di prestazione energetica minima;
- 3 - il certificato di prestazione energetica
- 4 - il controllo delle caldaie e dei sistemi di condizionamento dell'aria

La Direttiva è stata quasi completamente recepita a livello italiano tramite le seguenti Leggi e i seguenti Decreti:

- D.Lgs. 192 del 19/8/05 - Attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico in edilizia;
- D.Lgs. 311 del 29/12/06 - Disposizioni correttive e integrative del D.Lgs 311

- D.P.R. N.59 del 2/4/09 - Regolamento di attuazione art. 4 com. 1 let. a) e b) del D.Lgs 192/05;
- D.M.I. e T. del 26/6/2009 - Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici.

Dei quattro punti indicati nella Direttiva, tutti sono stati recepiti; mancherebbe solo un D.M. relativo alla definizione della figura del certificatore, anche se una precedente legge (DLgs n. 115 del 30 maggio 2008) chiarisce già quale sia questa figura. La legislazione nazionale (come anche specificato nella direttiva) richiede tutta una serie di norme di supporto per la realizzazione dei vari punti.

L'ottimizzazione del sistema edificio-impianto porta alla riduzione del fabbisogno energetico dell'edificio, il quale si può dividere nelle seguenti categorie:

- climatizzazione invernale;
- climatizzazione estiva;
- ventilazione;
- umidificazione e deumidificazione dell'aria;
- produzione di acqua calda sanitaria;
- illuminazione.

Di tutti i punti precedenti vengono trattati in questo lavoro in particolare i primi due cioè il fabbisogno di energia primari per la climatizzazione estiva ed invernale.

In particolare sono stati approfonditi gli aspetti relativi alle modalità di calcolo della prestazione energetica estiva e invernale sia rispetto all'edificio che rispetto all'impianto.

Lo studio è stato svolto sia per nuove costruzioni che su strutture esistenti, poiché i due casi hanno in genere problematiche diverse anche rispetto ai dati di ingresso del calcolo. Infatti mentre per un edificio di nuova progettazione è possibile eseguire solo un calcolo convenzionale del fabbisogno energetico: Asset Rating, per edifici esistenti è possibile ricostruire il comportamento nelle reali condizioni di utilizzo: Operational Rating

Un ulteriore aspetto relativo ai consumi energetici è quello relativo alle cause dei cambiamenti climatici provocate dalle emissioni da attività umana di gas ad

effetto serra (CO₂ e gas frigoriferi). Dato per acquisito il dato sul cambiamento climatico occorre capire se questo è provocato dall'aumento di emissione di anidride carbonica, da cause naturali o da una combinazione di entrambi i fattori. Volendo rimanere nel campo scientifico e lasciando quindi da parte tutti gli aspetti politici ed economici, si tratta di comprendere quanto delle emissioni di anidride carbonica prodotta dai processi di combustione contribuisca o abbia contribuito ai cambiamenti climatici degli ultimi 150 anni. Questo argomento verrà in parte approfondito nell'ultima sezione nel capitolo 5 .

BILIOGRAFIA

- Delibera EEN 3/08 Aggiornamento del fattore di conversione dei kWh in tonnellate equivalenti di petrolio connesso al meccanismo dei titoli di efficienza energetica. Marzo 2008.
- prEN 15315 Heating systems in buildings - Energy performance of buildings - Overall energy use, primary energy and CO2 emissions.

CAPITOLO 2

La realtà fisica del sistema edificio-impianto



2.1 Il comportamento termico di un edificio in regime variabile

Un edificio sia esso riscaldato che non riscaldato, soggetto a variazioni della temperatura esterna e ad apporti energetici dovuti alla radiazione solare o a carichi interni, ha un flusso di calore attraverso le pareti perimetrali che dipende sia dalla loro trasmittanza, sia dalla capacità della parete di accumulare calore. Il suo comportamento reale differisce molto dalla modalità di calcolo in regime permanente che fino ad ora è stata utilizzata per dimensionare la potenza dei terminali e dei generatori. Un'analisi più dettagliata della realtà fisica porta ad osservare che in realtà il comportamento di un edificio è qualcosa di molto dinamico. Come si può osservare dalle seguente Figura 8, ad una determinato andamento della temperatura esterna corrisponde un andamento molto differente delle temperature superficiali sia interne che esterne; questo fenomeno si può spiegare solo con un comportamento di tipo dinamico della parete e quindi dell'edificio assimilabile ad un sistema del primo ordine. Analogamente al settore dei circuiti elettrici dove sono sistemi del primo ordine i circuiti tipo resistenza condensatore, nel campo della fisica degli edifici esiste una resistenza termica ed una capacità termica responsabili entrambi dell'andamento

dei flussi energetici. Ecco che quindi anche per le pareti dell'edificio esiste una costante di tempo che caratterizza il comportamento dinamico della struttura.

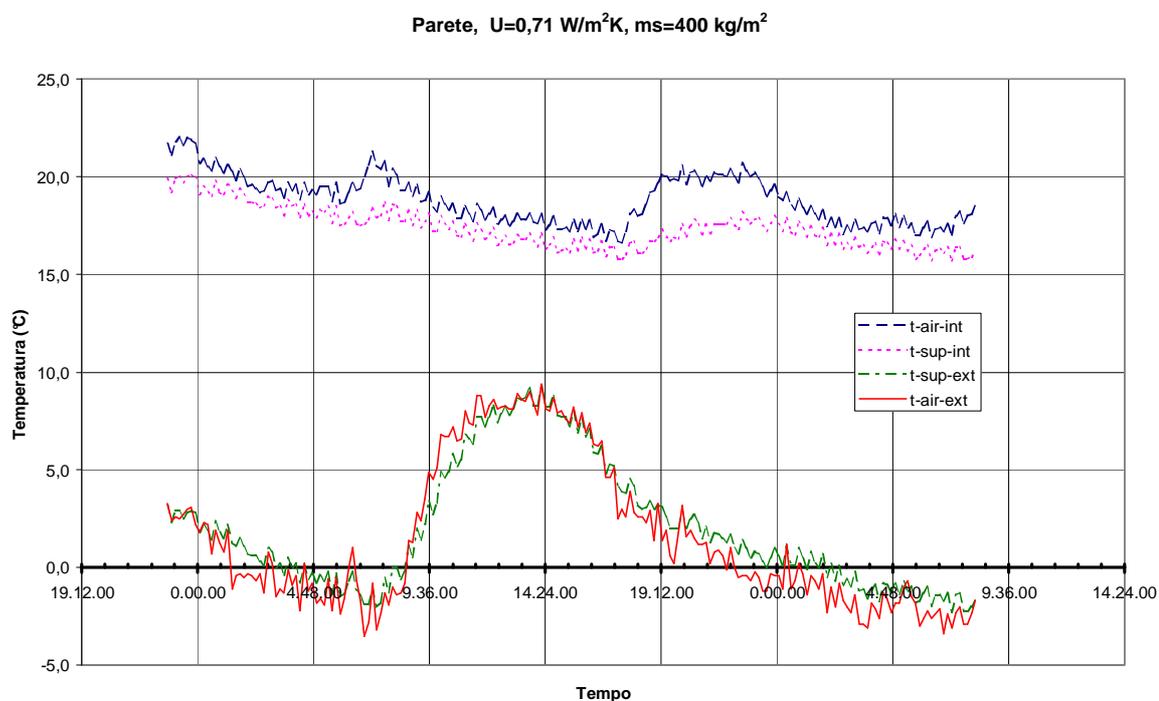


Figura 8 – Andamento delle temperature superficiali su parete esterna a Nord nel periodo invernale

Il comportamento reale di un edificio si può quindi rappresentare solo con modelli matematici che siano in grado di rappresentarne il comportamento dinamico nel tempo al variare delle sollecitazioni sia interne che esterne. Per comprendere come questo avviene, consideriamo per semplicità il locale di forma rettangolare di Figura 9 dotato di un terminale di erogazione dell'energia e di una serie sia di apporti interni di energia che di sollecitazioni termiche esterne.

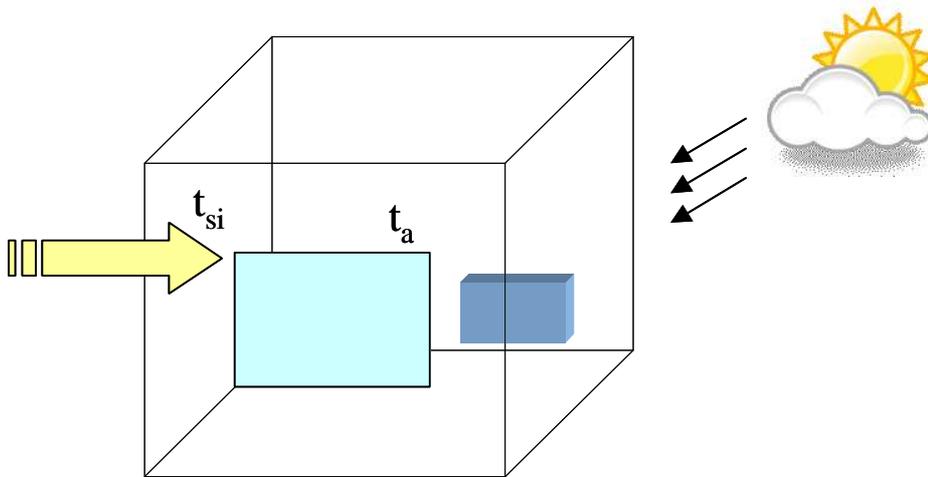


Figura 9 – Schematizzazione delle sollecitazioni a cui è sottoposto un edificio

Per questo sistema fisico è possibile scrivere le equazioni del bilancio energetico complessivo in cui si sommano i flussi scambiati con le 6 superfici e gli apporti interni:

$$\begin{cases}
 q_{c1} + q_{c2} + q_{c3} + q_{c4} + q_{c5} + q_{c6} + q_{ic} + q_g + q_p = 0 \\
 q_{c1} = \alpha_{ci,1} S_1 (t_{si,1} - t_a) \\
 q_{c2} = \alpha_{ci,2} S_2 (t_{si,2} - t_a) \\
 q_{c3} = \alpha_{ci,3} S_3 (t_{si,3} - t_a) \\
 q_{c4} = \alpha_{ci,4} S_4 (t_{si,4} - t_a) \\
 q_{c5} = \alpha_{ci,5} S_5 (t_{si,5} - t_a) \\
 q_{c6} = \alpha_{ci,6} S_6 (t_{si,6} - t_a)
 \end{cases} \quad (1)$$

dove:

q_{ci} : convezione con superfici interne;

q_{ic} : convezione da sorgenti interne;

q_g : calore sensibile delle portate d'aria;

q_p : calore sensibile erogato dai terminali.

In genere sono note le superfici, i coefficienti convettivi, gli apporti di calore interni mentre sono invece incognite le 6 temperature superficiali interne e quindi anche i relativi flussi di calore. Il sistema si può alla fine ridurre ad una sola equazione del tipo:

$$\begin{aligned} & \alpha_{ci,1} S_1 (t_{si,1} - t_a) + \alpha_{ci,2} S_2 (t_{si,2} - t_a) + \alpha_{ci,3} S_3 (t_{si,3} - t_a) + \dots \\ & \alpha_{ci,4} S_4 (t_{si,4} - t_a) + \alpha_{ci,5} S_5 (t_{si,5} - t_a) + \dots + q_{ic} + q_g + q_p = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

Occorre quindi definire una relazione che leghi le 6 temperature superficiali con il flusso di calore che passa attraverso la parete e a sua volta con le condizioni di temperatura e irraggiamento sulla parte esterna delle pareti.

L'equazione di bilancio termico sulla singola superficie è rappresentata in *Figura 10* e si può scrivere per la parete k-esima come:

$$\begin{aligned} q'_{w,k} &= q'_{c,k} + q'_{r,k} + q'_{l,k} \\ q'_{w,k} &= \alpha_{ci} (t_{si,k} - t_{ai}) + \sum_j 4\sigma T_m^3 F_{k-j} (t_{si,k} - t_{si,j}) + q'_{l,k} \end{aligned} \quad (3)$$

dove:

- $q'_{w,k}$: flusso termico scambiato per conduzione nella parete, W/m^2 ;
- $q'_{l,k}$: flusso termico ad alta frequenza dovuto a sorgenti interne ad alta temperatura o all'irraggiamento solare, W/m^2 ;
- $q'_{r,k}$: flusso termico scambiato per radiazione tra superfici interne, W/m^2 ;
- $q'_{c,k}$: flusso termico scambiato per convezione tra la parete e l'aria, W/m^2 ;
- $t_{si,k}$: temperatura superficiale parete k, °C;
- $t_{si,j}$: temperatura superficiale parete j, °C;
- F_{k-j} : fattore di forma tra parete k e parete j;
- t_{ai} : temperatura aria interna, °C.

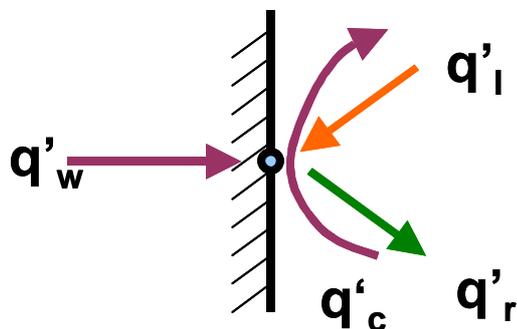


Figura 10- Flussi energetici sulla generica parete del locale

La relazione (2) assieme alle 6 relazioni della (3) formano un sistema di 7 equazioni in cui a seconda dei casi si procede nelle seguenti due modalità:

- imporre la temperatura interna e calcolare le 6 temperature superficiali e il carico termico dei terminali dell'impianto q_p ;
- imporre il valore del flusso termico dei terminali e calcolare le 6 temperature superficiali e la temperatura dell'aria.

Il flusso conduttivo q_w attraverso la parete dipende dalle condizioni della parete anche agli istanti precedenti poiché una parete soggetta a flusso non stazionario ha un comportamento dinamico che è funzione del tempo, come è stato già osservato in *Figura 8*; dipende inoltre anche dalle temperature dell'aria esterna, dal flusso per radiazione solare e dallo scambio della superficie con la volta celeste. Tutti questi valori inoltre sono anch'essi variabili nell'arco del tempo.

2.2 Modelli matematici del comportamento dinamico

I modelli di simulazione dinamica adottano il sistema delle funzioni di trasferimento, in cui il modello del sistema fisico parete è schematizzato con uno schema a blocchi come indicato in *Figura 11*, in cui la causa o grandezza entrante è la temperatura dell'aria esterna t_{sa} mentre l'effetto o grandezza uscente dal sistema è il flusso di calore q ; entrambi i termini sono funzione del tempo τ .

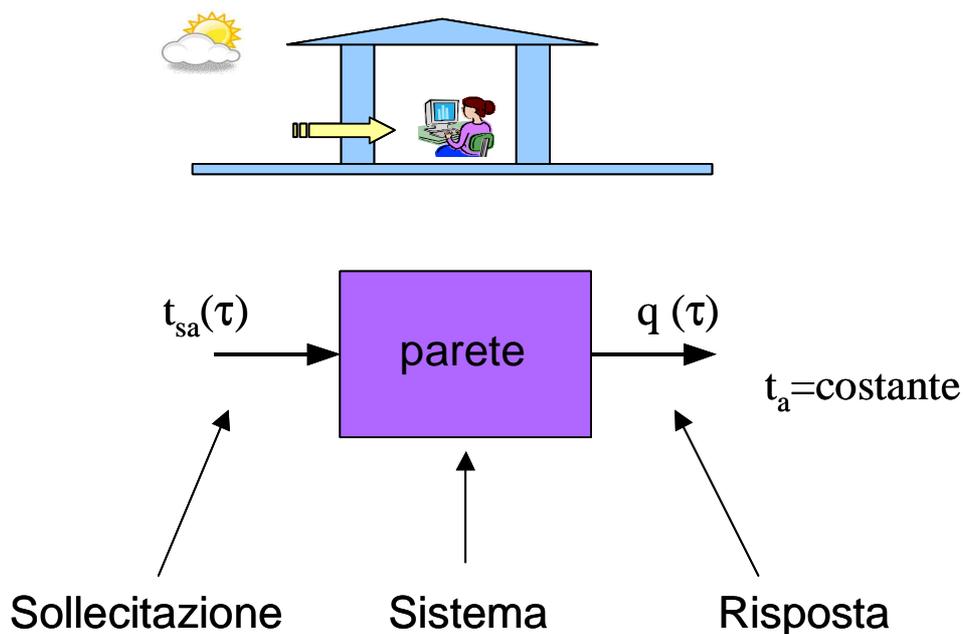


Figura 11- schema a blocchi del modello fisico della parete

Dalla teoria dei sistemi, la relazione che lega temperatura esterna e flusso di calore viene descritta come:

$$q(t)=D*t_{sa}(t) \quad (4)$$

dove D viene detta funzione di trasferimento (FDT) e dipende dalle caratteristiche termiche e di massa della struttura. La funzione D rappresenta la risposta del sistema ad una sollecitazione impulsiva unitaria; inoltre il simbolo “*” indica un operatore non una semplice moltiplicazione. Siccome sia t_{sa} che q sono funzioni continue nel tempo le posso pensare suddivise in impulsi elementari che vengono assunti di forma triangolare con base pari al doppio dell’intervallo di tempo scelto e altezza pari al valore della funzione, infatti con impulsi di forma triangolare di questo tipo, in ogni punto della sollecitazione la somma delle ordinate dei triangoli in quel punto definisce una linea spezzata che interpola la funzione della sollecitazione (Figura 12). Una volta definita la risposta del sistema ad un singolo impulso unitario, allora la risposta alla sollecitazione completa è data dalla somme delle risposte ai singoli impulsi come rappresentato in Figura 13; questo è possibile poiché si fa l’ipotesi che

il sistema fisico sia di tipo lineare e quindi valga il principio di sovrapposizione degli effetti.

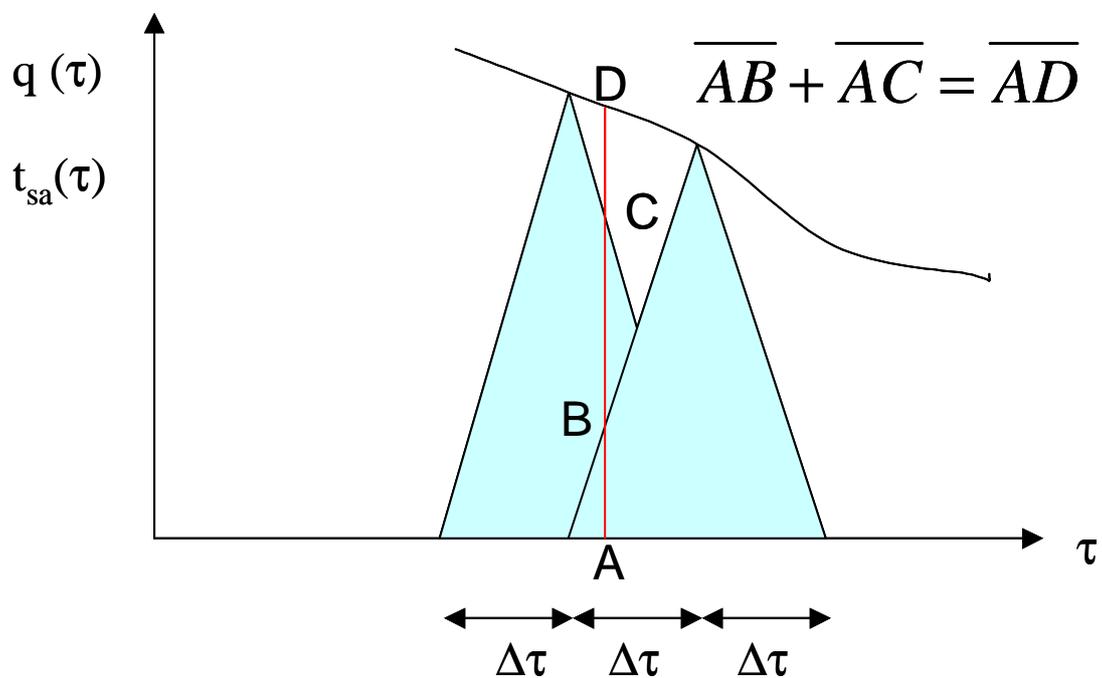


Figura 12- Ricostruzione dell'andamento della variabile dalla somma di coordinate di singoli impulsi triangolari

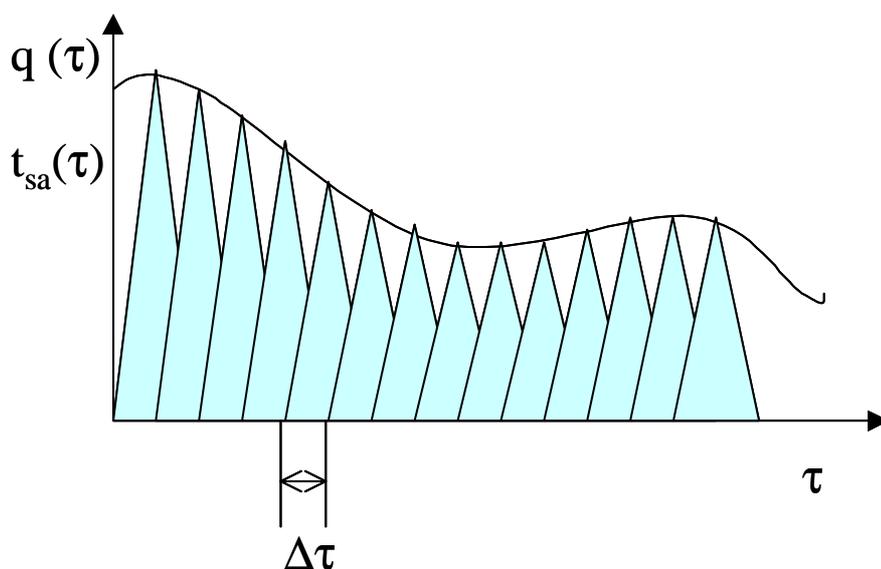


Figura 13- Discretizzazione delle variabili con impulsi triangolari di ampiezza pari al doppio dell'intervallo temporale

La risposta ad un singolo impulso elementare di temperatura esterna t_{ae} è data da una serie temporale che è infinita ma che comunque dopo un certo periodo produce dei contributi praticamente trascurabili. Sovrapponendo gli effetti di ciascun termine della sollecitazione t_{ae} ottengo la risposta q all'istante generico p . I fattori di risposta D_z dell'equazione (5) possono essere limitati ad un numero finito di termini N .

$$q_p(\tau) = \sum_{z=1..N} D_z \cdot t_{a,p-z+1}(\tau) \quad (5)$$

In particolare nella conduzione termica attraverso una parete le funzioni di trasferimento da considerare sono tre:

- X: risposta di flusso termico sulla superficie interna ad una sollecitazione unitaria di temperatura sulla stessa superficie;
- Y: risposta di flusso termico sulla superficie interna ad una sollecitazione unitaria di temperatura sulla superficie esterna;
- Z: risposta di flusso termico sulla superficie esterna ad una sollecitazione unitaria di temperatura sulla stessa superficie.

La modalità di calcolo dei fattori di risposta X e Y sono le seguenti:

- applico un impulso a gradino sulla superficie interna mantenendo quella esterna a 0;
- calcolo il flusso termico sulle due superfici consecutive distanti dx , tramite l'espressione di Fourier: $q_s = \lambda \cdot (t_i - t_{i-1}) / dx$ in W/m^2 , dove t_i e t_{i-1} sono le temperature sullo strato superficiale e su quello immediatamente adiacente;
- Il flusso è quindi pari al fattore di risposta essendo l'ampiezza dell'impulso (1T) unitaria:

$$X = q_{si} / 1T, \quad Y = q_{se} / 1T \quad (W/m^2K) \quad (6)$$

La determinazione dei coefficienti X, Y e Z delle funzioni di trasferimento con il metodo indicato in (6) può essere effettuata applicando l'equazione di Fourier della conduzione termica in regime transitorio ad un modello discretizzato della parete cioè suddiviso in intervalli elementari. Questa metodologia è nota come metodo delle differenze finite e la relazione utilizzata per il calcolo è rappresentata in (7)

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c\rho} \cdot \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \Rightarrow \frac{t_{i,j+1} - t_{i,j}}{\Delta \tau} = \frac{\lambda}{c\rho} \cdot \frac{\left(\frac{\partial t}{\partial x}\right)_{i+1,j} - \left(\frac{\partial t}{\partial x}\right)_{i,j}}{\Delta x} \quad (7)$$

Si riporta nella seguente *Figura 14* un esempio di funzioni di trasferimento ottenute per una parete omogenea.

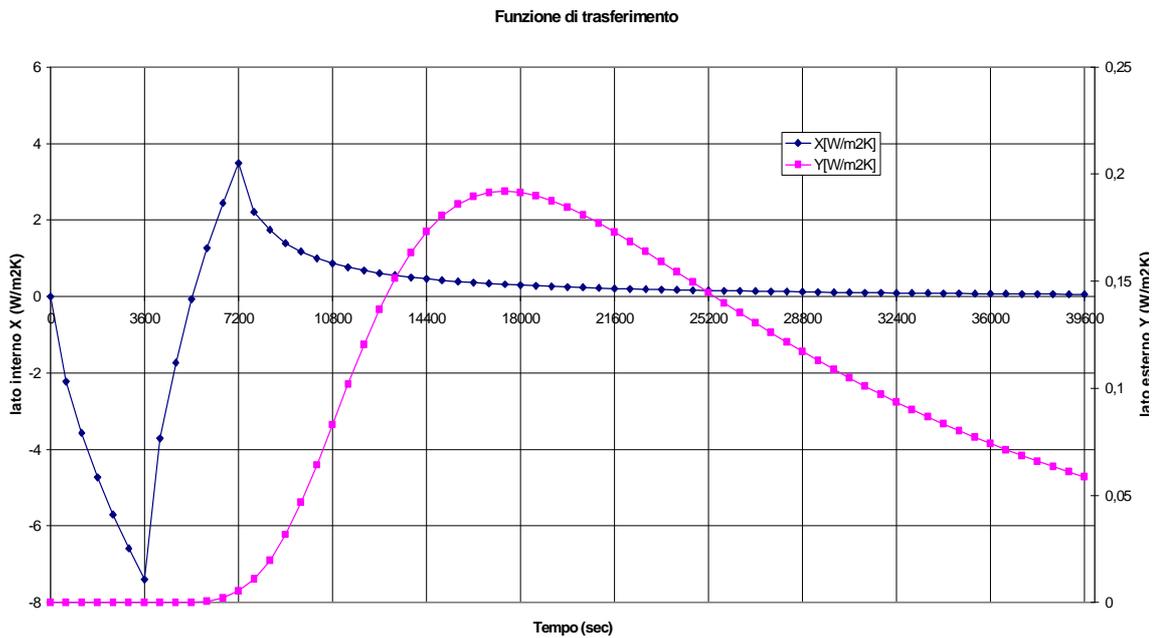


Figura 14– Valore dei fattori di risposta X e Y al passare del tempo

Le funzioni di trasferimento sono univoche una volta definite le caratteristiche termofisiche delle strutture costituendo l'edificio e quindi possono essere applicate in tutti gli intervalli di calcolo. In (8) è invece riportata la forma generale delle relazioni che permettono di determinare i flussi termici sulla superficie interna ed esterna della struttura una volta noti i coefficienti delle funzioni di trasferimento

Nell'equazione (8) i termini X, Y e Z sono i coefficienti delle funzioni di trasferimento per conduzione e dipendono dalla capacità termica e dalla trasmittanza della struttura.

$$\begin{aligned}
q_{wi,p}(\tau) &= \sum_{z=1..n} X_z \cdot t_{si,p-z+1}(\tau) + \sum_{z=1..n} Y_z \cdot t_{se,p-z+1}(\tau) \\
q_{we,p}(\tau) &= \sum_{z=1..n} Y_z \cdot t_{si,p-z+1}(\tau) + \sum_{z=1..n} Z_z \cdot t_{se,p-z+1}(\tau)
\end{aligned} \tag{8}$$

E' questo un modello che è in gradi di simulare con adeguata precisione il sistema edificio senza rendere troppo complesso l'inserimento dei dati, fornendo come risultato un file dati orario in cui sono calcolati i fabbisogni energetici o le temperature del locale.

2.3 Effetti del comportamento dinamico degli edifici

Nell'equazione (3) si osserva che oltre allo scambio convettivo con l'aria interna q_c esistono altri due termini, uno dovuto agli scambi per irraggiamento con le altre superfici del locale q_r ed un altro q_l dovuto al flusso ad alta frequenza ricevuto da sorgenti interne ad alta temperatura quali ad esempio corpi illuminanti e all'irraggiamento solare diretto. Quest'ultimo termine ha come effetto un aumento della temperatura superficiale della parete la quale produrrà un aumento dello scambio termico verso l'esterno soprattutto nelle ore notturne. Il fenomeno di accumulo di calore da parte delle strutture è dovuto alla componente radiativa dei carichi termici sia interni che esterni; mentre infatti gli apporti interni sensibili (convective heat gain) diventano istantaneamente carico frigorifero (cooling load), la quota di apporto interno trasmessa alle strutture per via radiativa (radiative heat gain), prima è accumulata e poi con uno sfasamento sia temporale che di ampiezza diventa carico frigorifero sensibile attraverso uno scambio convettivo. Il fenomeno è descritto sia nella metodologia Carrier (Handbook of air conditioning system design, 1965) sia nel manuale ASHRAE Fundamentals Handbook, 2001 al cap 29. Si riporta per chiarezza in Figura 15 uno schema tratto dal testo citato.

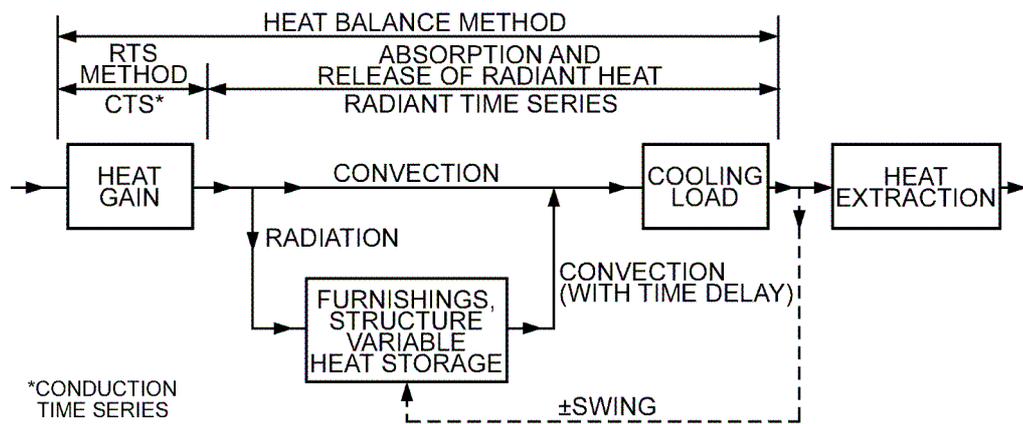


Figura 15– Origine delle differenze di ampiezza tra apporti istantanei e carico istantaneo di condizionamento (2001 ASHRAE Fundamentals Handbook – CHAPTER 29- Fig. 1)

BILIOGRAFIA

Handbook of air conditioning system design, Carrier Air Conditioning Company,
1965, McGraw-Hill (New York).

ASHRAE Fundamentals Handbook, 2001.

Bettanini E., Brunello P., "Lezioni di impianti tecnici", CLEUP, Padova, 1985-90.

CAPITOLO 3

I modelli per il fabbisogno energetico di climatizzazione dell'edificio



3.1 Introduzione

Il calcolo del fabbisogno energetico viene utilizzato sia nelle verifiche richieste dalla legislazione cogente che nell'ambito di analisi energetiche di edifici esistenti. Nel valutazioni per l'analisi energetica degli edifici occorre che il risultato trovato sia il più preciso possibile al valore realmente misurato in modo da prevedere in maniera attendibile i consumi ottenuti con interventi di miglioramento delle prestazioni energetiche. Le metodologie numeriche attualmente utilizzabili sono di due tipi: metodo dettagliato e metodo semplificato

Il primo è un metodo di tipo dinamico che calcola con intervalli orari il comportamento dell'edificio con un modello che considera gli effetti dinamici mediante tecniche alle differenze finite con funzioni di trasferimento o con sistemi a nodi concentrati (resistenze-capacità). In questo caso il progettista costruisce il proprio modello di calcolo oppure ricorre a programmi commerciali sempre più in uso presso i tecnici (TRNSYS, EnergyPlus, ESP-R, IDA, ecc)

Il secondo metodo detto anche metodo quasi-statico effettua il calcolo dei flussi termici in condizioni quasi stazionarie.

L'effetto dinamico introdotto dall'inerzia termica delle pareti e delle strutture interne rispetto ai flussi termici entranti e uscenti, viene preso in considerazione introducendo un fattore di utilizzazione degli apporti interni (in riscaldamento) o delle perdite di calore (in raffrescamento). Questa metodologia è stata adottata dal comitato CEN TC89 WG4 incaricato di definire una metodologia di calcolo sia estiva che invernale del fabbisogno energetico dell'edificio. Il risultato del lavoro è l'emanazione della norma EN 13790:2008 che rispetto alla precedente edizione del 2005 introduce anche il calcolo del fabbisogno energetico per il raffrescamento.

3.2 Fabbisogno per Riscaldamento

Per il calcolo del fabbisogno energetico invernale la metodologia di calcolo si può sostanzialmente riassumere nell'equazione (1):

$$Q_H = (Q_{tr} + Q_{ve}) - \eta_{H,g} (Q_{int} + Q_{sol}) \quad (1)$$

dove:

- Q_H fabbisogno energetico in regime di riscaldamento continuo, MJ;
- Q_{tr} perdite totali per trasmissione, MJ;
- Q_{ve} perdite totali per ventilazione, MJ;
- Q_{int} guadagni per carichi interni e carichi dovuti alla radiazione solare, MJ;
- Q_{sol} guadagni per carichi dovuti alla radiazione solare, MJ;

η_H fattore di utilizzazione degli apporti gratuiti (o dei guadagni) in riscaldamento.

Il fattore di utilizzazione viene calcolato con una relazione del tipo:

$$\eta = \frac{1 - \gamma^a}{1 - \gamma^{(a+1)}} \quad \text{per } \gamma \neq 1 \quad (2)$$

$$\eta = \frac{a}{a+1} \quad \text{per } \gamma = 1 \quad (3)$$

Il termine a rappresenta una costante dimensionale, funzione della costante di tempo dell'edificio τ ovvero del rapporto tra la costante di tempo effettiva e un valore fissato convenzionalmente τ_0 :

$$a = a_0 + \frac{\tau}{\tau_0} \quad (4)$$

Lo scopo del fattore di utilizzazione è di ridurre l'effetto degli apporti gratuiti che in determinati periodi della stagione di riscaldamento, non vengono utilizzati completamente poiché superano il valore delle perdite, determinando quindi sovratemperature all'interno del locale. Nel diagramma di Figura 16 si può notare l'andamento del carico per un giorno tipo mensile in cui si verifica questo fenomeno; ovviamente nei mesi in cui gli apporti interni rimangono sempre inferiori alle perdite il valore del fattore di utilizzazione risulta prossimo all'unità

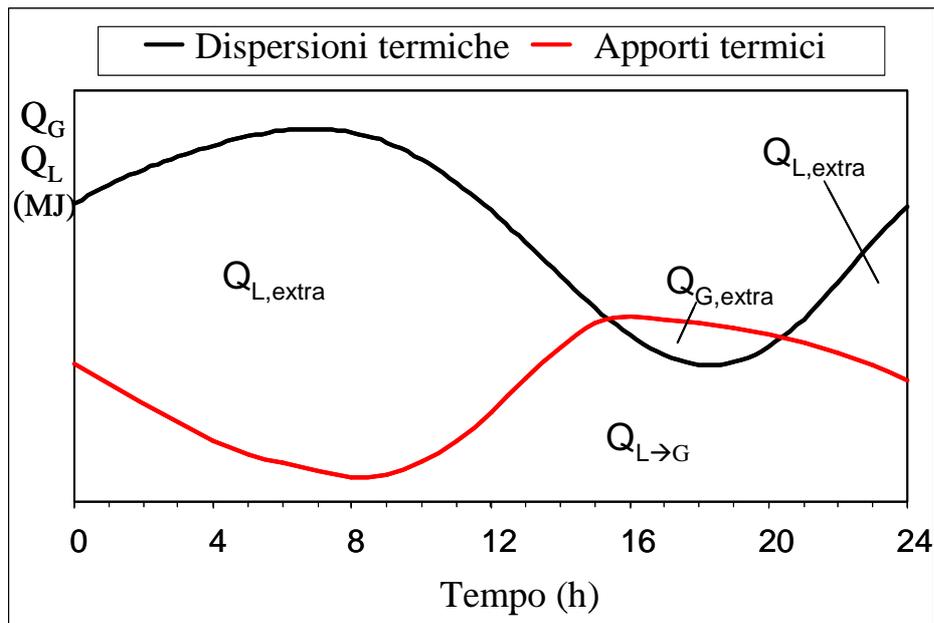


Figura 16 –Andamento dei flussi termici giornalieri nel periodo di riscaldamento

3.3 Fabbisogno per Raffrescamento

Per il calcolo del fabbisogno energetico estivo la commissione europea ha adottato una metodologia tratta dalla norma olandese NEN 2916:1994 (modello A) con un criterio speculare rispetto al metodo in riscaldamento, cioè applica un fattore di utilizzazione alle perdite anziché agli apporti utilizzando quindi una relazione del tipo:

$$Q_C = (Q_{int} + Q_{sol}) - \eta_{C,l} (Q_{tr} + Q_{ve}) \quad (5)$$

dove:

Q_C fabbisogno energetico in regime di riscaldamento continuo, MJ;

$\eta_{C,l}$ fattore di utilizzazione delle perdite di energia in raffrescamento.

Questa metodologia parte dall'ipotesi che nel periodo di condizionamento non tutte le perdite vanno a compensare gli apporti interni e solari, ma una parte di esse,

soprattutto nel periodo notturno, supera il valore degli apporti provocando l'arresto dell'impianto e quindi contribuisce a diminuire la temperatura interna. Questo ragionamento si può osservare rappresentato nel grafico di Figura 17 dove si nota anche come in alcune ore del giorno, in particolare quelle con temperatura più elevata, le perdite cambino di segno e contribuiscano ad aumentare il carico termico. Si osserva come un'ipotesi del genere sia rappresentativa dei climi in cui in estate si assiste ad un'escursione notevole nella temperatura diurna e notturna.

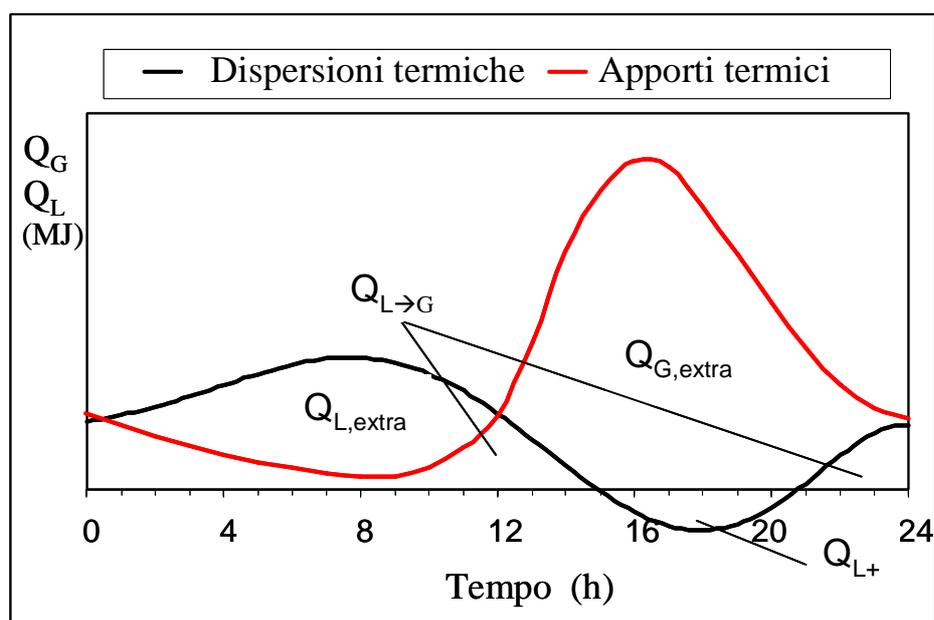


Figura 17 – Andamento dei flussi termici giornalieri nel periodo di condizionamento

Il processo fisico che interviene soprattutto nel periodo estivo è in realtà più complesso di come enunciato al paragrafo precedente; in particolare esiste un fenomeno di cui il metodo semplificato tiene conto modificando il fattore di utilizzo ed è conosciuto da tempo nei calcoli di potenza frigorifera; si tratta del fenomeno di accumulo di calore da parte delle strutture dovuto all'inerzia termica dell'edificio (o dalla costante di tempo), noto sia come metodo Carrier che come metodo ASHRAE

In Figura 18 sono illustrati gli andamenti del carico frigorifero e degli apporti sia interni che esterni durante un giorno tipico di periodo estivo. Come si osserva

l'integrale degli apporti termici sia interni (Q_i) che esterni (Q_{si}) è simile all'integrale del carico frigorifero (Q_c), ma questo è di ampiezza inferiore ed è in ritardo rispetto al valore massimo della somma degli apporti.

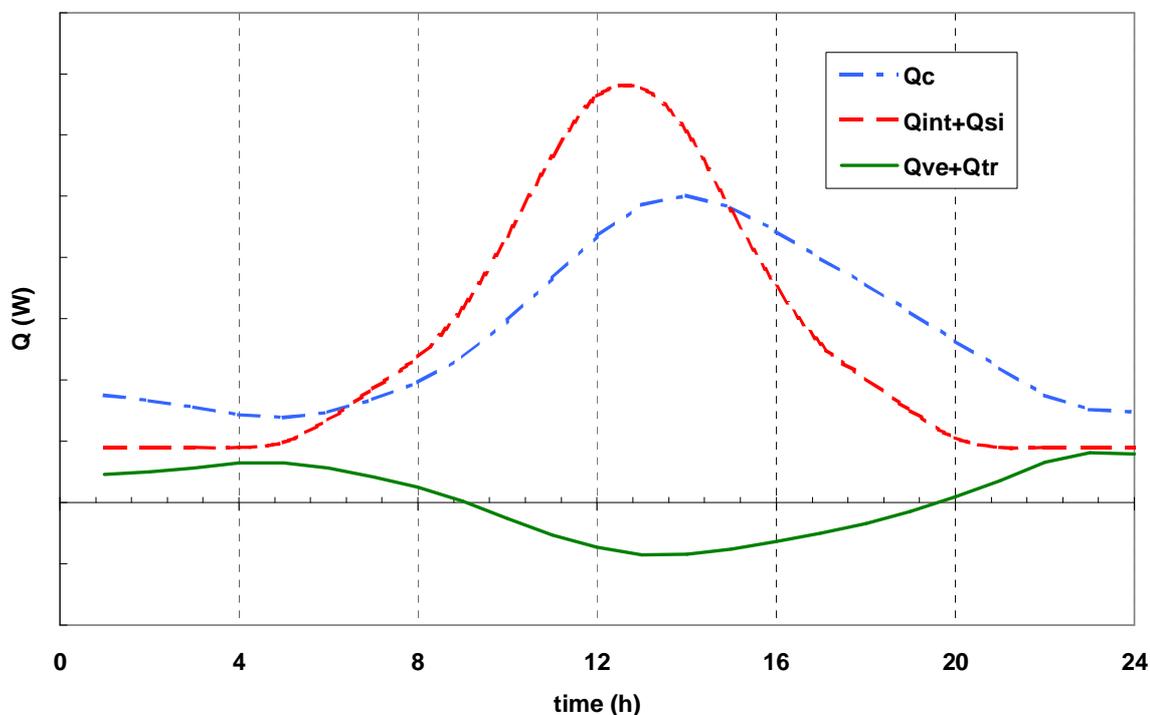


Figura 18 – Andamento degli apporti e del fabbisogno energetico Q_c nel periodo di raffrescamento

3.4 Modelli Semplificati del Fabbisogno Energetico di Raffrescamento

Il problema del calcolo del fabbisogno estivo è stato sviluppato a livello di pubblicazioni scientifiche già alla fine degli anni '90 (Schibuola, 1999). Riportiamo una breve sintesi dei vari modelli e studi realizzati.

MODELLO B - GASTALDELLO E SCHIBUOLA

Gastaldello e Schibuola, utilizzando il codice DOE (1994) e BLAST (1993) (oggi riuniti nell'unico codice EnergyPlus) (Crowley, 2001), analizzano la normativa Olandese mettendo in evidenza come i valori del fabbisogno energetico calcolati con il metodo semplificato siano molto più alti di quelli calcolati con metodi dinamici. Affinché i due valori di fabbisogno energetico risultino uguali è necessario che il

fattore di utilizzazione assuma valori maggiori dell'unità, talvolta anche pari a sette. Per il calcolo estivo gli autori propongono la seguente equazione in cui è applicato un coefficiente di riduzione degli apporti solari e interni, mentre per semplicità viene trascurato quello relativo alle perdite:

$$Q_C = \eta_u (Q_I + Q_{si}) - (Q_L - Q_{se}) \quad (6)$$

Dove:

Q_L perdite totali per trasmissione e ventilazione, MJ;

Q_{si} apporti solari entranti attraverso le superfici opache, MJ;

Q_{tse} apporti solari entranti attraverso le superfici trasparenti, MJ;

Q_I apporti interni, MJ;

$\eta_{C,I}$ fattore di utilizzazione dei flussi entranti

Il modello è sviluppato partendo dalla considerazione che non tutta la quota dei flussi entranti contribuisce al carico, ma una parte venga dispersa verso l'esterno. Il fattore di utilizzazione dei flussi entranti è calcolato in analogia al metodo invernale tramite relazioni simili a quelle riportate nelle equazioni (2), (3) e (4); definendo il parametro γ come:

$$\gamma = 1 - \frac{Q_L}{Q_I + Q_{si} + Q_{se}} \quad (7)$$

Le costanti della relazione (4) sono ricavate procedendo per via empirica cioè andando a variare alcune caratteristiche edili dell'edificio e cercando una correlazione tra la costante "a" e la costante di tempo dell'edificio "τ". Il risultato dell'analisi ha dato dei valori distinti tra edifici residenziali e uffici, dato che nei due casi i carichi interni risultano diversi. Si riportano nella Tabella I i valori indicati nella pubblicazione:

Tabella I- Costanti dell'equazione (4) ripartiti in Gastaldello et al. (2008)

	a_0	τ_0 (h)
Abitazioni	1	30
Uffici	0.4	7

Le conclusioni della pubblicazione riportano un confronto dell'andamento dei fabbisogni mensili calcolati con la nuova procedura e quelli calcolati con i metodi dinamici, osservando come il metodo semplificato differisca di poco da quelli dinamici. Purtroppo nella pubblicazione non sono indicate le caratteristiche della tipologia edilizia presa in considerazione per cui non è possibile definirne l'ambito di utilizzo o ripetere i calcoli.

MODELLO C - MAZZARELLA E MOTTA

In una pubblicazione del 2001 sviluppata da (Mazzarella, et al, 2001) viene effettuato sia un confronto tra il metodo nella normativa Olandese e quello proposto da Gastaldello e Schibuola, sia una proposta di un'altra metodologia basata sulla definizione di correlazioni diverse per edifici tipo (definiti archetipi nella pubblicazione). Gli stessi autori osservano la difficoltà di mantenere la correttezza dei risultati quando l'edificio si differenzia dagli archetipi per cui la correlazione è stata calcolata.

Nello studio gli autori hanno realizzato una serie di simulazioni con il software dinamico TRNSYS. Si è quindi potuto vedere l'applicazione dei metodi ad ulteriori casi oltre a quelli definiti prima [2,6]. Gli edifici presi in considerazione hanno diverse caratteristiche strutturali (leggere, medie e pesanti), presentano vetri diversi (normali e riflettenti) e prendendo in considerazione tre località italiane (Milano, Roma e Palermo). I risultati dello studio hanno evidenziato (come era già emerso precedentemente) che il metodo olandese sovrastima i risultati anche oltre il 50% del valore calcolato con metodo dinamico orario, mentre il metodo di Gastaldello e Schibuola pur avendo dei risultati meno dispersi per gli edifici in esame tende a sottostimare il fabbisogno estivo, si riportano per chiarezza in *Figura 19* i risultati indicati nell'articolo.

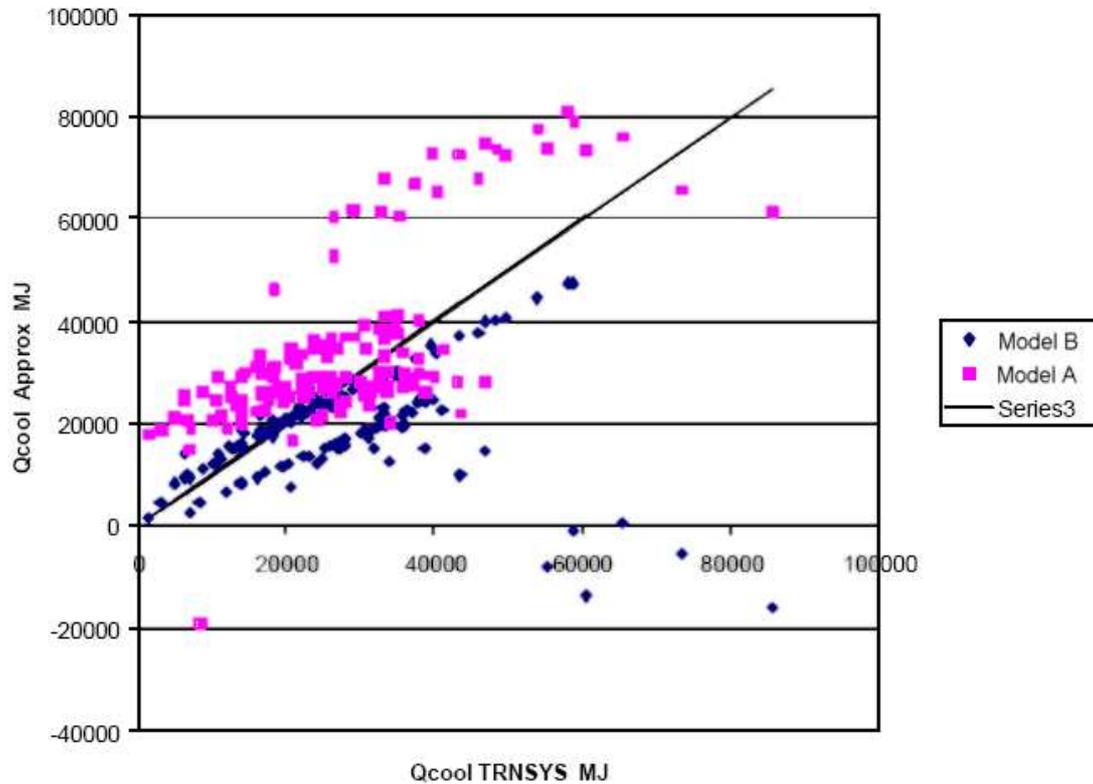


Figura 19 – Fabbisogno energetico estivo mensile: modello semplificato olandese (Model A) e Schibuola (Model B)

Nella seconda parte dell'articolo è presentata la metodologia con cui è stato sviluppato un nuovo modello semplificato utilizzando come modelli di edificio nove tipologie edilizie con tre diversi tipi di vetro per ogni tipologia, secondo le espressioni:

$$Q_C = Q_{sys} = (Q_L - Q_{I,conv}) - \eta_d (Q_{I,rad} + Q_{si} - Q_{se}) \quad (8)$$

$$Q_C = (Q_L - Q_I) - \eta_d (Q_{si} - Q_{se}) \quad (9)$$

dove η_d è un fattore di correlazione determinato con relazioni di regressione polinomiali ai minimi quadrati a seconda della tipologia di edificio. Delle due

relazioni quella che ha dato i risultati più precisi risulta la (9) e l'espressione del fattore di correlazione determinato dagli autori dello studio ha la forma seguente:

$$\eta_d = \sum_{i=0}^3 a_i (T_m)^i \quad (10)$$

La variabile T_m è la temperatura media giornaliera mensile o stagionale ed è stata individuata come il parametro di maggiore influenza nella relazione (9). La qualità del modello consiste nell'utilizzare la relazione di η_d più idonea all'edificio analizzato. Le tipologie di edifici e i relativi coefficienti ottenuti con dati stagionali nello studio sono riportati nella *Tabella IV*:

Nelle conclusioni dello studio viene riportato che la massima deviazione rispetto alla simulazione dinamica è inferiore al 9%.

Tabella IV - Coefficienti dell'equazione (10) nella pubblicazione (Mazzarella, et al. 2001)

TIPOLOGIE EDILIZIE	a₀	a₁	a₂	a₃
Torri con trasparenza totale	-2.09517	0.3931	-0.1736	2.6214E-04
Parallelepipedi di grossa cubatura con finestre isolate	-3.737	0.51803	-0.01636	1.3914E-04
Torri e grossi parallelepipedi. con trasparenza a nastro	-3.40561	0.58899	-0.02623	3.98299E-04
Uffici di medie e piccole dim. con trasparenza a blocchi	-3.42439	0.58209	-0.02508	3.6968E-04
Uffici di medie e piccole dim. con trasparenza a nastro	-2.12125	0.40123	-0.0175	2.6271E-04
Grossi parall. con trasparenza a blocchi	-7.56617	1.0418	-0.04039	4.9011E-04

MODELLO D - CORRADO E FABRIZIO

Nel 2003 in ambito europeo viene proposta una metodologia semplificata per il fabbisogno estivo adottando quella della norma olandese (*Van Dijk D, et al, 2003*) ; la procedura viene inserita nelle revisioni della norma EN 13790 e riporta una relazione di calcolo dello stesso tipo della (5).

Successivamente in ambito italiano (Corrado, et al. 2006) pubblicano un articolo in cui viene analizzata la revisione di norma europea e proposta una correzione in ambito italiano per rendere il modello più preciso cioè più corrispondente alle simulazioni dinamiche orarie. Lo studio viene realizzato confrontando i risultati del calcolo con Energy Plus e quelli ottenuti con il modello quasi-stazionario semplificato della proposta di norma EN 13790. Le tipologie edilizie prese in considerazione sono cinque con tre diverse pareti ciascuna, in tre località italiane (Torino, Roma e Palermo). Vengono riportati in *Tabella VII* le caratteristiche delle tipologie edilizie utilizzate nello studio:

Tabella VII - Caratteristiche delle tipologie edilizie utilizzate in (Corrado, et al, 2006)

CASO STUDIO	$A_f(m^2)$	$A_e(m^2)$	$A_w(m^2)$	A_w/A_f	τ (h)		
					22.6	39.5	33.8
Stanza di test CEN	19.8	91	7	0.353	22.6	39.5	33.8
Stanza test CEN modificata	19.8	91	3.5	0.177	31.9	53.5	48.2
Abitazione familiare singola	86.9	262	15.4	0.177	25.2	35.8	17.3
Condominio	1300	1370	177	0.136	47.4	58.0	40.3
Edificio uffici	4750	4020	1280	0.269	31.8	38.6	16.8

Scopo dello studio era determinare una funzione del fattore di utilizzazione delle perdite $\eta_{C,1}$ dell'equazione (5) adatta alla realtà climatica italiana. Il fattore di utilizzazione è stato calcolato con la metodologia dinamica oraria tramite la seguente relazione:

$$\eta_{C,I} = \frac{(Q_G - Q_C)}{Q_L} = \frac{Q_{L \leftrightarrow G} - Q_{L+}}{Q_{L \leftrightarrow G} + Q_{L,extra} - Q_{L+}} \quad (11)$$

Dove i termini sono quelli indicati graficamente nella successiva Figura 20, e rappresentano i termini del fabbisogno per raffreddamento per un generico giorno di calcolo.

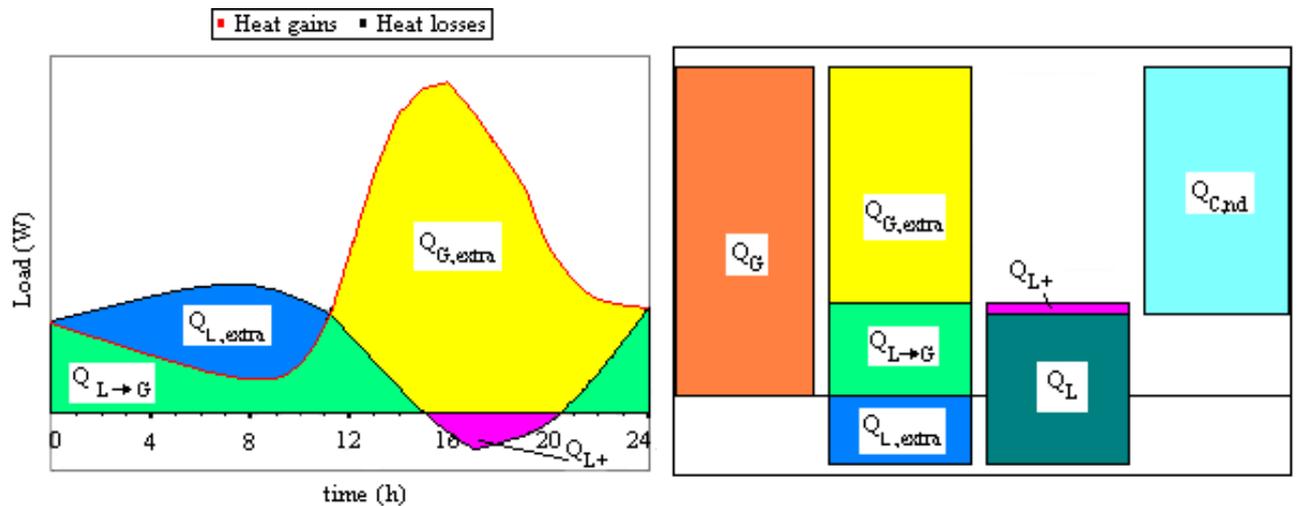


Figura 20 – Termini giornalieri del fabbisogno energetico per raffreddamento

Una volta determinato $\eta_{C,I}$ è stato verificato se i risultati della simulazione rispettano l'equazione (2), (3) e (5) del modello semplificato. Lo studio conclude che mentre l'andamento di a_C risulta simile all'equazione (4), i valori sono tutti traslati verso l'alto rispetto a quelli previsti dal modello CEN; per cui dopo un'analisi dei fattori che influenzano tale variazione, si è concluso che l'espressione vada corretta in funzione del rapporto A_w/A_f tra la superficie delle finestre e la superficie del pavimento, secondo l'equazione:

$$a = 8.1 + \frac{\tau}{17} - 13 \frac{A_w}{A_f} \quad (12)$$

La relazione (12) è stata adottata dalla norma italiana UNI TS 11300-1 che specifica le modalità di applicazione nazionale della norma EN ISO 13790:2008.

Lo studio, finalizzato a determinare un modello fisico-matematico che tenga conto della non corrispondenza temporale tra apporti termici e dispersioni, si differenzia dagli altri autori, in cui lo scopo è la validazione dei risultati del metodo semplificato confrontandoli con i risultati sullo stesso edificio ottenuti con un modello dinamico orario.

IL CONFRONTO TRA I MODELLI

I modelli dinamici orari per il calcolo del fabbisogno globale di energia di un edificio, hanno dimostrato di dare dei risultati sostanzialmente coincidenti tra di loro, come riportato in U.S. Department of Energy Energy (2008), sebbene in *Cecchinato, at al. (2002)* siano stati sottolineati alcuni problemi. I modelli semplificati quasi stazionari hanno mostrato buon riscontro con le simulazioni dinamiche in regime di riscaldamento (*Zecchin, at al, 2001*), ma per il raffrescamento non sono stati ancora pienamente validati e spesso commettono errori, come si è visto.

Una valutazione di confronto tra i modelli visti precedente è stata realizzata in *Venier, at al. 2006*). Gli autori hanno confrontato i modelli: MAZZARELLA E MOTTA (C) GASTALDELLO E SCHIBUOLA (B), e il modello Olandese ora UNI EN 13790:2008 (A); con i risultati del software di simulazione dinamica ESP-r sviluppato dal Department of Mechanical Engineering, University of Strathclyde in Glasgow. Gli edifici presi in considerazione nel confronto hanno tre forme diverse: compatta, allungata, a torre e sono composti da 27 zone ciascuna di dimensione 5x5x2.7 m, con un funzionamento continuo di 24 ore al giorno dal 1 giugno al 30 settembre. Lo studio è stato esteso a 18 località italiane con latitudine compresa tra 36.8° e 46.0°. Le strutture sono di tipo isolato e i componenti trasparenti sono di due tipologie: vetro singolo ($U=5.75 \text{ W/m}^2\text{K}$) e vetro doppio ($U=1.70 \text{ W/m}^2\text{K}$); il carico interno è di 4 W/m^2 con un ricambio d'aria di 0.50 volumi orari.

Il risultato delle simulazioni hanno mostrato che il modello A porta in ogni situazione ad una sovrastima dei consumi per di energia per raffrescamento sensibile; mentre i modelli B e C sono in generale più accurati. In particolare il modello B produce dei risultanti più sottostimati, che gli autori ipotizzano possa derivare dalla

modalità di calcolo semplificata della capacità termica dell'edificio. Sono riportate in Figura 21 alcuni risultati delle simulazioni.

Gli autori concludono la loro valutazione proponendo di prendere in considerazione delle forme di correlazione che correggano entrambi i termini del bilancio termico cioè sia gli apporti che le dispersioni.

Partendo da queste suggerimenti si è sviluppato il modello di seguito proposto.

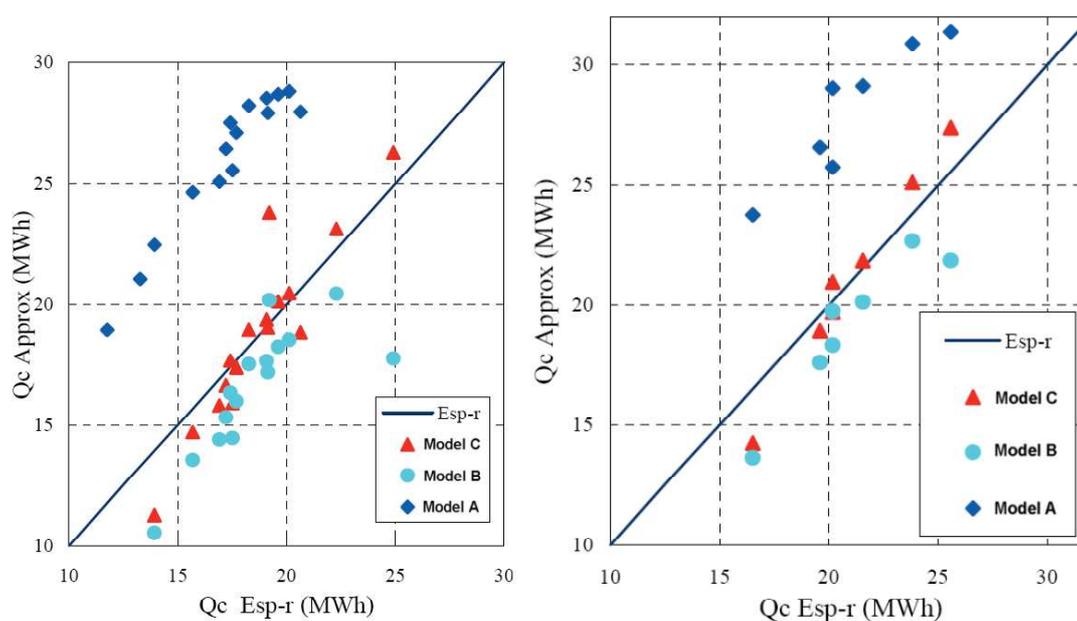


Figura 21 – fabbisogno energetico estivo determinato con modello semplificato: Mazzarella e Motta (C), Gastaldello e Schibuola (B) e norma olandese (A); per edifici di tipo compatto con vetro singolo (a sinistra) e vetro doppio (a destra).

3.5 Confronto tra Modello UNI/TS 11300 e Modello Dinamico

I DATI CLIMATICI E IL MODELLO EDILIZIO UTILIZZATO PER IL CONFRONTO

L'analisi è stata svolta con ENERGYPLUS. Sebbene si siano comunque effettuate alcune simulazioni di verifica dei risultati con TRNSYS per verificare che non vi fossero errori nel modello. I dati di input del modello dinamico sono relativi alla località di Treviso S. Angelo (Mazzarella, 1997).

Al fine di rendere omogenei i dati climatici di input, le variabili climatiche sono state elaborate secondo la norma UNI 8477-1 (1993); i risultati sono riportati in *Tabella X*.

Tabella X - Valori della temperatura media mensile, della radiazione diretta e diffusa media giornaliera mensile sul piano orizzontale e secondo le varie orientazioni, da file dati orario di Treviso.

PERIODO	Temp.	Radiazione solare H [MJ/m ²]						
		media mensile [°C]	H _d (diffuso)	H _b (diretto)	H (SUD)	H (NORD)	H (SE-SO)	H (E-O)
GENNAIO	4,0203	2,4943	1,9549	7,55	1,69	5,97	3,53	1,83
FEBBRAIO	4,7427	2,3117	4,3890	10,50	1,83	8,62	5,47	2,48
MARZO	7,4925	5,9395	5,7866	10,88	4,14	10,30	8,39	5,54
APRILE	12,0331	7,2146	9,2846	10,88	5,67	11,99	11,32	8,30
MAGGIO	16,1250	8,7945	12,8454	10,92	8,50	13,29	14,26	11,57
GIUGNO	19,1035	9,0893	14,3005	10,44	9,97	13,21	15,13	12,87
LUGLIO	22,6355	9,0706	15,5172	11,45	9,88	14,41	16,10	13,30
AGOSTO	22,1093	8,2488	12,4689	12,15	7,24	14,09	14,04	10,62
SETTEMBRE	18,6925	6,7561	8,7170	12,82	4,95	12,90	11,02	7,34
OTTOBRE	12,2476	4,2241	5,8627	12,93	3,12	11,12	7,79	4,18
NOVEMBRE	8,2553	2,4731	2,1791	7,55	1,70	6,03	3,68	1,90
DICEMBRE	3,3238	2,0911	1,7151	7,24	1,43	5,61	3,11	1,51

L'ambiente oggetto di analisi è un locale di dimensioni esterne pari a 10 m x 10 m e altezza lorda di 6 m avente tutte le pareti esterne, compresa la copertura confinanti con l'ambiente esterno e della stessa tipologia; il pavimento è adiacente al terreno. Si è considerata inoltre una temperatura interna operante pari a 26°C uguale per tutti i casi analizzati. Le caratteristiche dell'involucro sono riportate in *Tabella XIII*; tali valori sono stati mantenuti costanti nelle simulazioni. L'impianto di condizionamento è attivo durante tutta la giornata dal 1 maggio al 30 settembre. In *Figura 22* sono riportate a titolo di esempio alcune rappresentazioni grafiche della struttura con alcuni serramenti esterni utilizzati nelle simulazioni.

Tabella XIII- Caratteristiche dell'involucro edilizio.

Ricambi per infiltrazione	ACH	0.3	h^{-1}
Superficie singola finestra	A_{wi}	2.0	m^2
Trasmittanza finestra	U_w	1.9	$W m^{-2} K^{-1}$
Fattore solare (SHGF)	g		%
Trasmittanza pavimento	U_g	0.39	$W m^{-2} K^{-1}$
Trasmittanza pareti opache	U_{op}	0.34	$W m^{-2} K^{-1}$
Capacità termica per unità di area utilizzata nel caso di variazione finestre	C	432	$kJ m^{-2} kg^{-1}$

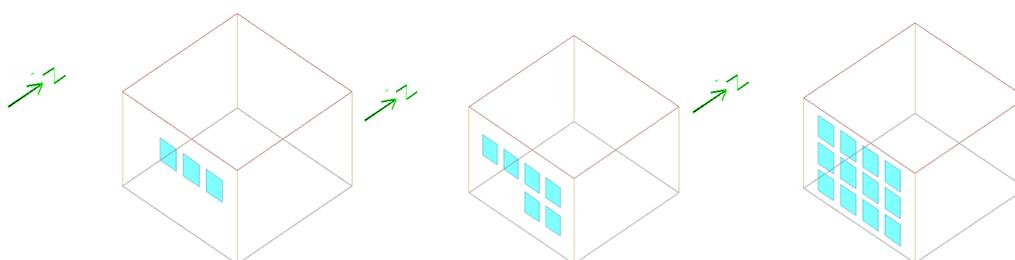


Figura 22 – Esempi di alcune tipologie di serramenti utilizzati nell'analisi.

Le simulazioni di confronto sono suddivise nelle seguenti tipologie:

- a) variazione del numero di superficie trasparente a SUD;
 - i) carico interno di $1.36 W/m^2$ (8 casi);
 - ii) carico interno di $2.33 W/m^2$ (8 casi);
 - iii) carico interno di $5.83 W/m^2$ (8 casi);
 - iv) carico interno di $29.15 W/m^2$ (8 casi);
- b) variazione dello spessore della muratura (variazione della costante di tempo) (15 casi);
- c) variazione del carico interno (10 casi);

3.5.1. Analisi Parametrica

E' stato valutato il fabbisogno per climatizzazione sia con la simulazione dinamica oraria sia con il metodo semplificato quasi stazionario adottato dalla UNI TS 11300-1.

La prima considerazione che si può trarre è che lo spessore della muratura non influenza il carico per condizionamento (*Figura 23*), mentre il carico interno produce una variazione quasi proporzionale sul carico frigorifero per cui la loro reciproca relazione può essere ritenuta con buona approssimazione lineare (*Figura 24*). Diverso è il caso della superficie trasparente, in cui si nota come la sua variazione influenzi il carico frigorifero con una modalità che è comunque da stabilire (*Figura 25*).

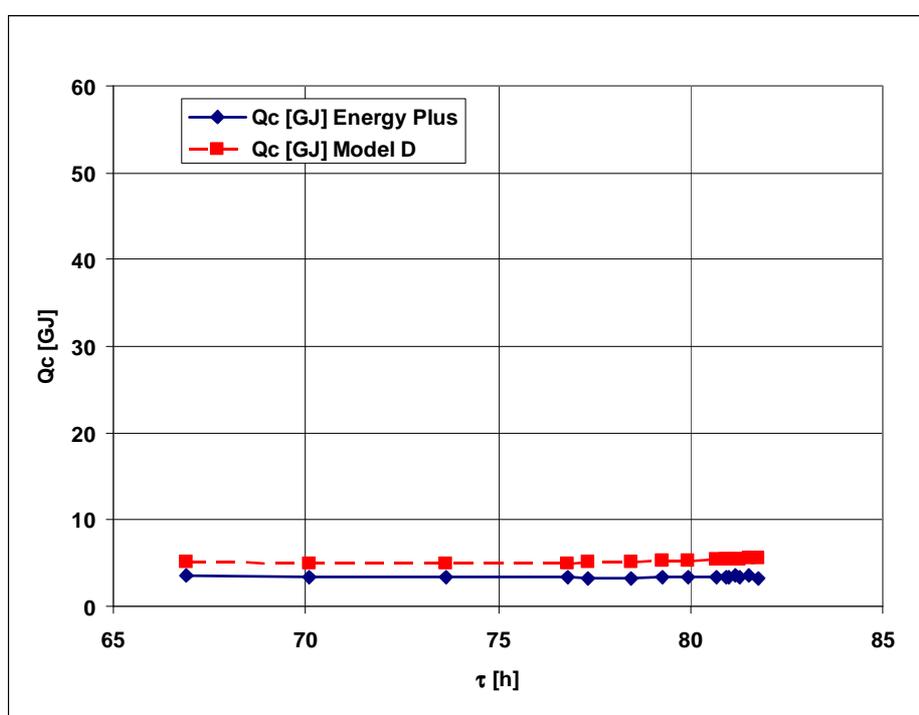


Figura 23 – Andamento del fabbisogno di raffrescamento nel caso variazione dello spessore della muratura con la simulazione dinamica

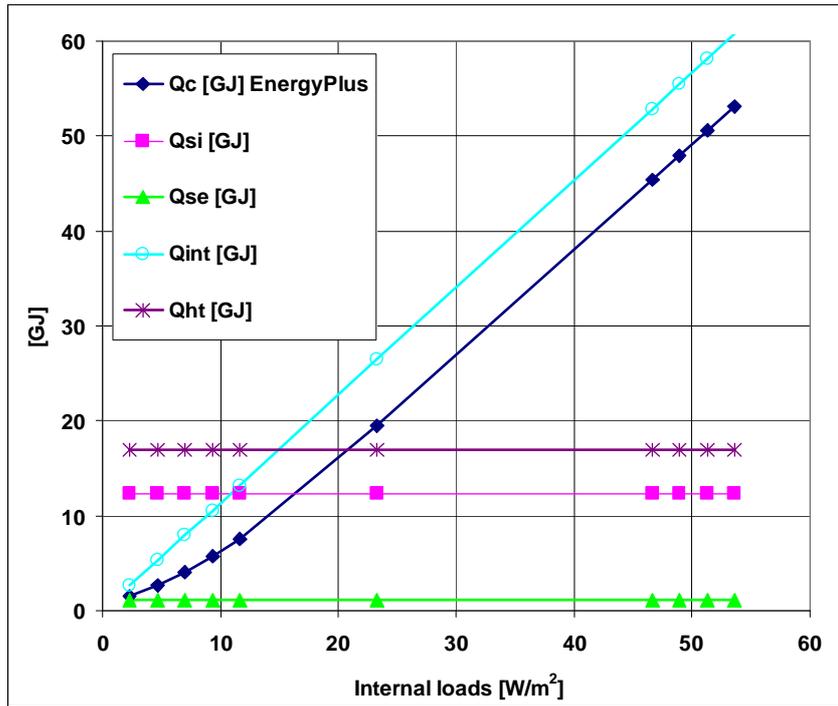


Figura 24– Andamento del fabbisogno di raffreddamento Q_c in funzione del carico interno, calcolato da simulazione dinamica

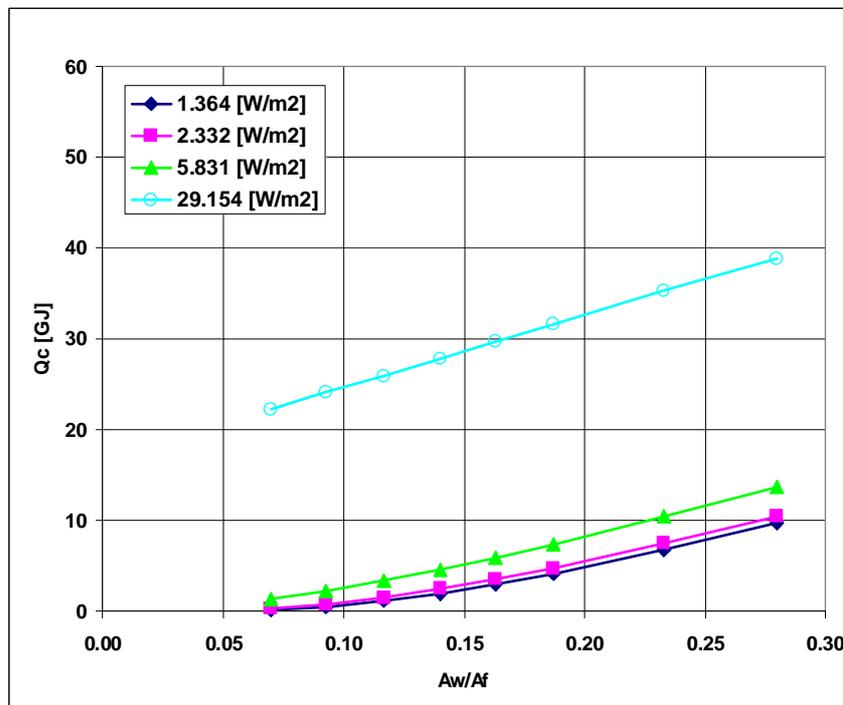


Figura 25 – Andamenti del fabbisogno di raffreddamento al variare dei carichi interni da simulazione dinamica in funzione di A_w/A_f

Il successivo confronto dei risultati tra le simulazioni dinamiche e il modello della UNI TS 11300-1 ha poi mostrato la significativa differenza dei risultati come si osserva in *Figura 26*, *Figura 27* e *Figura 28*; in particolare si nota come il modello semplificato sovrastimi sempre il carico frigorifero in funzione anche del carico interno.

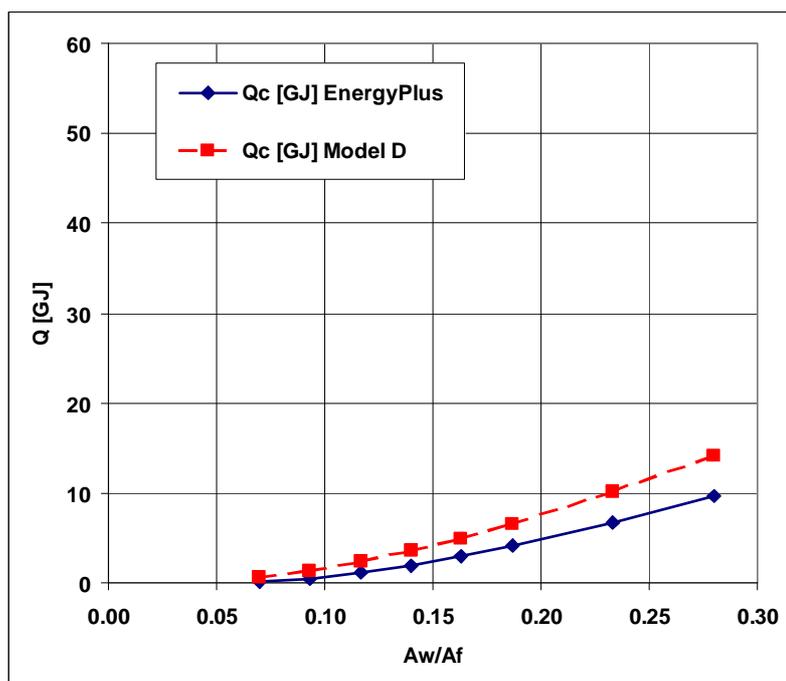


Figura 26 – Confronto dei risultati delle simulazioni dinamica e quasi statica per il caso variazione finestre con $q_i=1,36 \text{ W/m}^2$

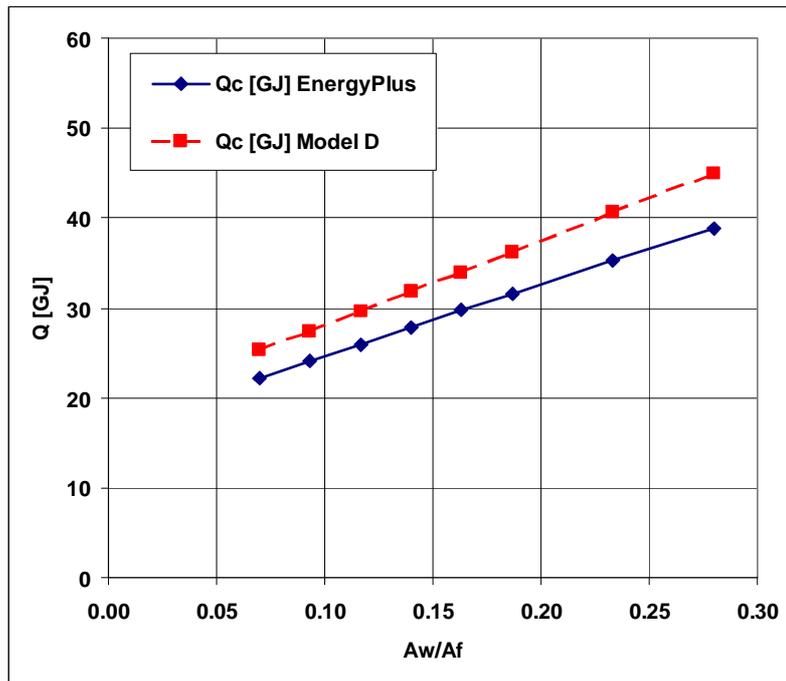


Figura 27 – Confronto dei risultati delle simulazioni dinamica e quasi statica per il caso variazione finestre con $q_i = 29,15 \text{ W/m}^2$

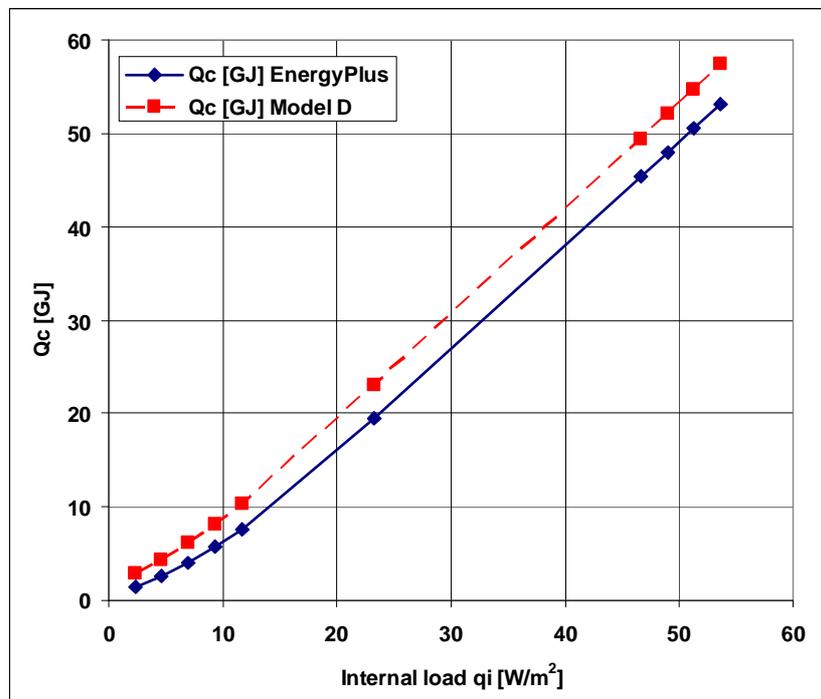


Figura 28 – Confronto dei risultati delle simulazioni dinamica e quasi statica per il caso variazione carico interno con $Aw/A_f = 0,117$

3.5.4. Modifiche (modello E) al Modello UNI TS 11300-1

Si è quindi valutato un nuovo modello semplificato per correggere le differenze riscontrate tra le due metodologie di calcolo. Per la creazione del modello semplificato si sono confrontati gli andamenti del fabbisogno di raffrescamento Q_C dei vari casi ottenuti con la simulazione dinamica con quelli trovati attraverso la normativa UNI/TS 11300-1. Partendo dalla soluzione proposta in [6], si è ricercata un'equazione del modello semplificato che rappresentasse nel miglior modo possibile i risultati della simulazione dinamica.

Si è ipotizzato di introdurre nell'equazione del bilancio energetico mensile un coefficiente C_2 di riduzione degli apporti solari:

$$Q_C = \eta_C(Q_{se} - Q_{ht}) + C_2 Q_{si} + Q_i \quad (13)$$

E' stato inoltre valutato di non applicare un coefficiente di riduzione al carico interno dato che l'andamento di Q_C , ottenuto con la simulazione dinamica nel caso di variazione di questo parametro, è molto simile a quello ottenuto con la normativa UNI/TS 11300-1 e risulta solamente traslato di una quantità pressoché costante (come si può osservare in *Figura 28*).

Il coefficiente η_C è stato ricavato dal calcolo secondo la UNI/TS 11300-1, mentre il coefficiente C_2 viene determinato direttamente dall'equazione (13) in cui Q_C rappresenta il fabbisogno di raffrescamento ottenuto dalla simulazione dinamica, mentre i termini Q_{si} , Q_{se} , Q_i , Q_{ht} e η_C vengono ricavati direttamente con il metodo mensile quasi-statico della normativa UNI/TS 11300-1:

$$C_2 = \frac{Q_C - Q_i + \eta_C(Q_{ht} - Q_{se})}{Q_{si}} \quad (14)$$

Andando a rappresentare in un diagramma l'andamento del coefficiente C_2 (*Figura 29*) in funzione del rapporto Q_{si}/Q_{ht} è stato determinata una relazione che descriva l'andamento del coefficiente.

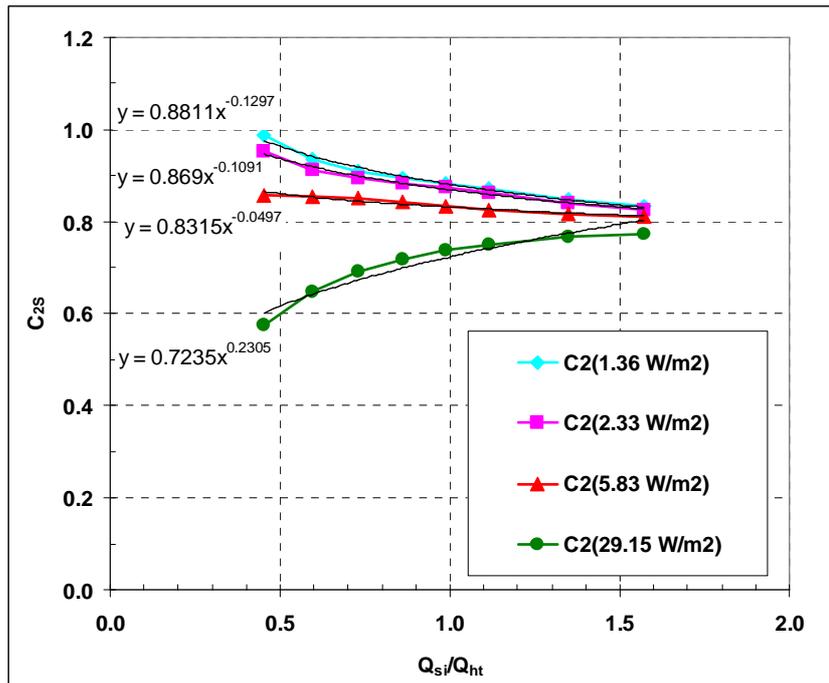


Figura 29– Andamento del coefficiente C_2 in funzione del rapporto Q_{si}/Q_{ht} e del carico interno e relative equazioni di interpolazione

Il coefficiente oltre a dipendere dal rapporto Q_{si}/Q_{ht} è anche funzione del carico interno, per cui la relazione scelta è stata del tipo:

$$C_2 = K_1 \left(\frac{Q_{si}}{Q_{ht}} \right)^{K_2} \quad (15)$$

dove K_1 e K_2 sono determinati in funzione del carico interno tramite un'interpolazione lineare (Figura 30).

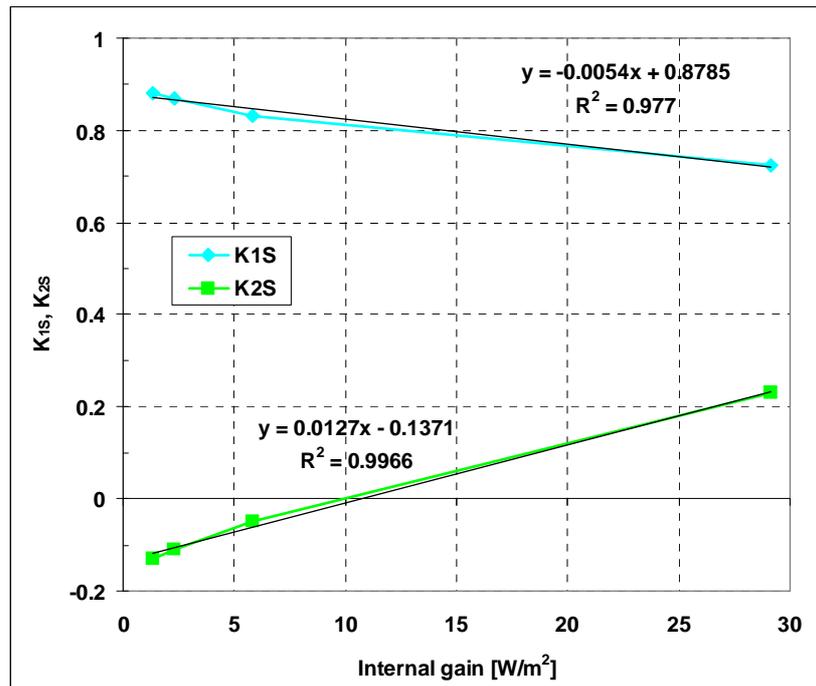


Figura 30– Andamenti dei coefficienti K1 e K2 al variare del carico interno e relative equazioni di interpolazione lineare

L'equazione finale di C2 ha la seguente forma:

$$C_{2(SUD)} = [-0,0054(q_i) + 0,8785] \left(\frac{Q_{si}}{Q_{ht}} \right)^{[0,0127(q_i) - 0,1371]} \quad (16)$$

Con questa espressione sono stati calcolati tramite (13) i nuovi Qc MJ e rappresentati per confronto con i precedenti risultati in *Figura 31*. Si è osservato come in questo caso lo scostamento non supera il 15% dei valori calcolati con il metodo dinamico.

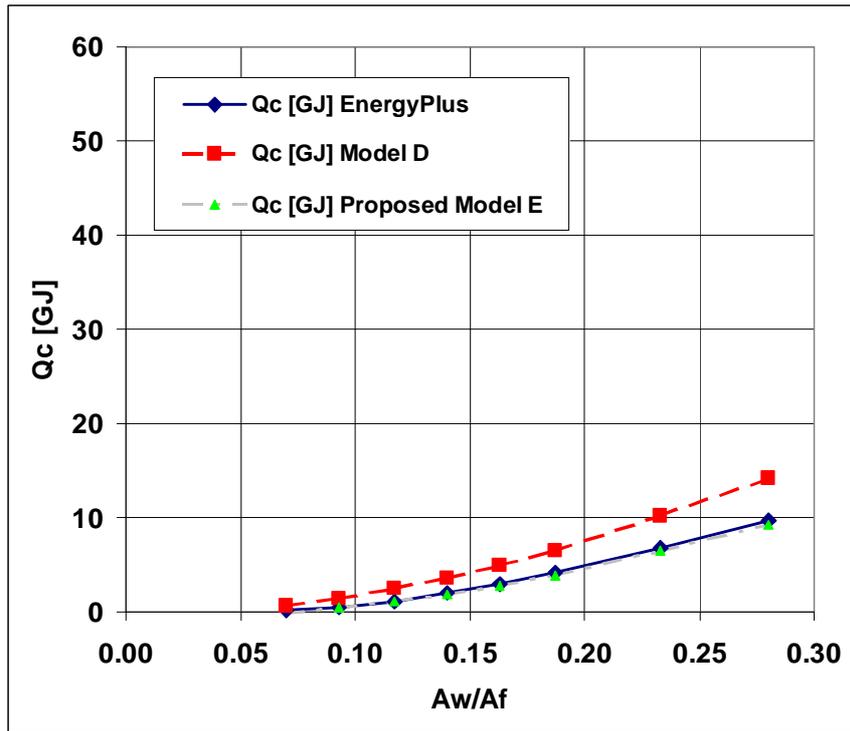


Figura 31- Confronto dell'andamento di Q_c trovato con la simulazione dinamica, quasi-statica e con il metodo proposto, nel caso di variazione del numero delle finestre e con carico interno pari a $1,364 \text{ W/m}^2$ in funzione del rapporto Q_{si}/Q_{ht}

Ulteriori verifiche sono state effettuate al fine di verificare la validità del modello. E' stato modificato l'orientamento delle finestre ponendole sia a Nord che a Ovest; in questo caso si è osservato che i risultati mostrano scostamenti rispetto ai risultati della simulazione dinamica superiori al 30% per cui la sola variabile Q_{si}/Q_{ht} non descrive le problematiche dell'orientamento in quanto finestre su orientamenti diversi determinano risultati diversi a parità del valore di Q_{si}/Q_{ht} (Figura 32).

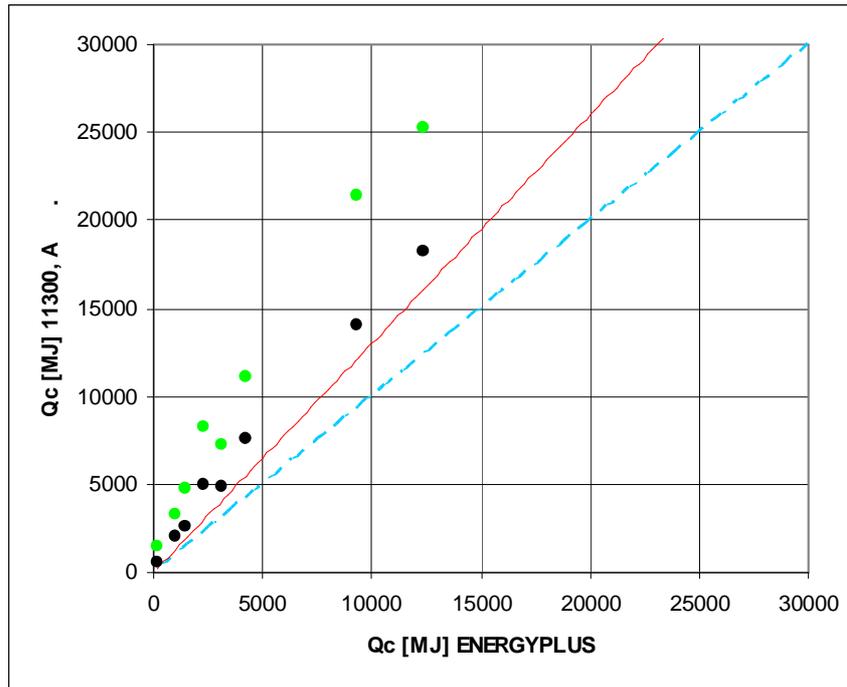


Figura 32- Confronto fabbisogno di raffrescamento ottenuto con la simulazione dinamica e stazionaria con il metodo di calcolo da UNITS 11300 (punti verdi) e metodo proposto (punti neri) per orientamento Nord e Ovest

E' stato quindi calcolata un'equazione diversa per C2 a seconda dell'orientazione delle finestre, seguendo lo stesso procedimento assunto precedentemente, ma considerando separatamente i coefficienti per i contributi solari delle finestre poste sulle pareti a Ovest e a Nord si è giunti a due equazioni diverse a seconda dell'orientamento:

$$C_{2(OVEST)} = [-0,0083(q_i) + 0,7766] \left(\frac{Q_{si}}{Q_{ht}} \right)^{[0,0168(q_i) - 0,2446]} \quad (17)$$

$$C_{2(NORD)} = [-0,0052(q_i) + 0,7359] \left(\frac{Q_{si}}{Q_{ht}} \right)^{[0,0327(q_i) - 0,3359]} \quad (18)$$

In Figura 33 sono riportati i fabbisogni calcolati con i nuovi coefficienti assunti in funzione dell'orientazione (equazioni 17 e 18). Si può notare il buon accordo con le simulazioni dinamiche.

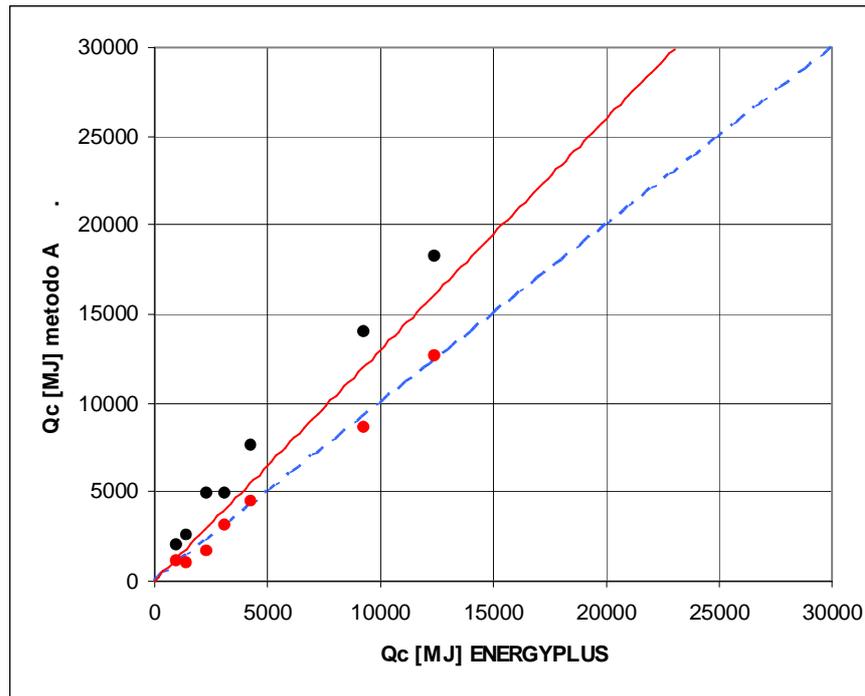


Figura 33– Confronto del fabbisogno di raffrescamento ottenuti con la simulazione dinamica e con il metodo proposto.

Il problema è più complesso quando siano presenti contemporaneamente superfici finestrate su più esposizioni; in questo caso è stato verificato che il coefficiente correttivo C2 più idoneo è quello relativo all'esposizione a Nord; è stata ipotizzata questa soluzione poiché le superfici trasparenti orientate a Nord ricevono una radiazione solare principalmente di tipo diffuso che meglio rappresenta l'andamento della radiazione solare media sulle altre esposizioni dell'edificio durante tutto l'arco della giornata. L'equazione generale del nuovo modello semplificato diventa:

$$Q_C = \eta_c (Q_{se} - Q_{ht}) + C_{2(NORD)} Q_{si} + Q_i \quad (19)$$

Andando a rappresentare i valori ottenuti con questo ultimo modello su 4 casi in cui le superfici trasparenti siano suddivise su più orientazioni si ottiene una correlazione con il modello dinamico entro un 30% di scostamento percentuale come rappresentato in *Figura 34*:

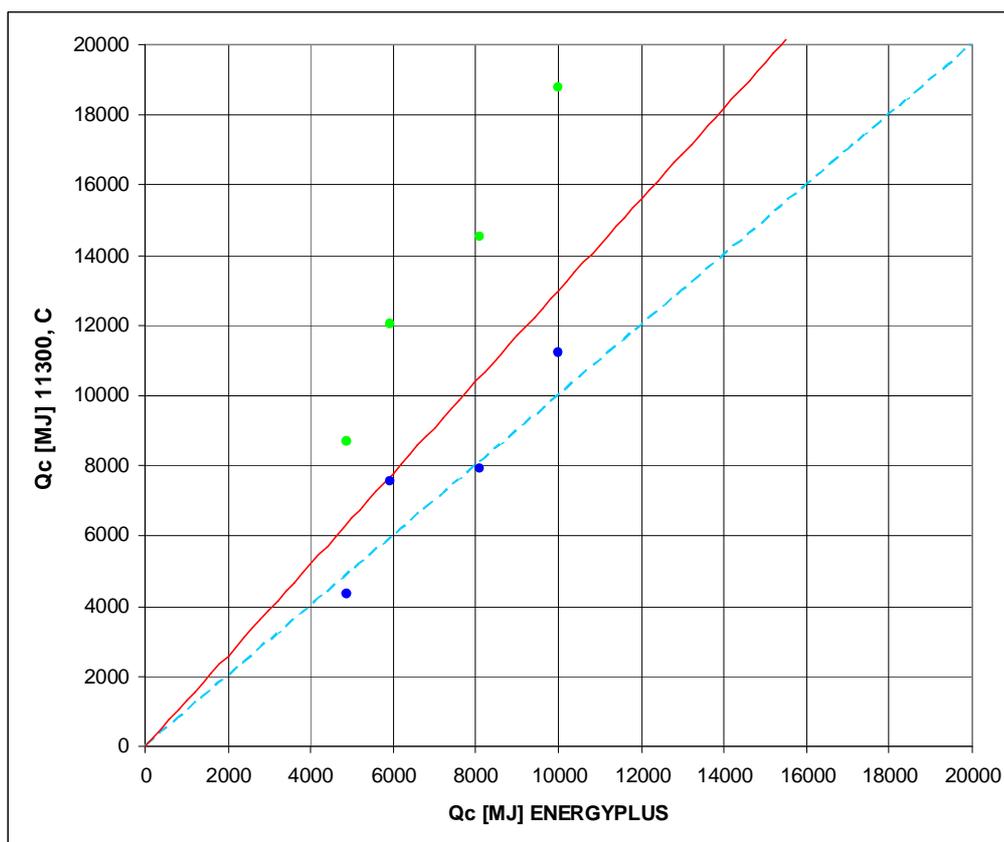


Figura 34- Confronto dei risultati riassunti del fabbisogno di raffrescamento ottenuto con la simulazione dinamica e dalla simulazione quasi-stazionaria con il metodo UNI/TS 11300-1 (punti verdi) e metodo E (punti blu)

3.5.5. Valutazione Finale

Il modello proposto ha evidenziato la difficoltà di descrivere il comportamento in regime estivo di un edificio. Questo è sicuramente dovuto all'effetto non facilmente rappresentabile in maniera semplificata degli apporti dell'irraggiamento solare attraverso le superfici finestrate. Al fine di ottenere risultati accettabili è stato necessario modificare la filosofia di calcolo del metodo quasi-statico; introducendo un'espressione più complessa.

Un ostacolo incontrato nello svolgimento del lavoro si è dimostrato riuscire a determinare da quali parametri potesse dipendere il coefficiente correttivo da adottare al modello. Individuato nell'apporto solare attraverso le superfici trasparenti.

Un'ulteriore difficoltà è stata la determinazione di una funzione che ne rappresentasse l'andamento anche in funzione dell'orientamento dei serramenti. Si è voluto evitare un approccio puramente empirico, cercando di individuare in base alle conoscenze sul processo fisico, quali variabili potessero influenzare maggiormente il fabbisogno energetico

L'analisi effettuata ha portato a determinare l'equazione (13) come la più idonea al calcolo quasi-stazionario, nella quale il coefficiente C_2 deve essere valutato con l'espressione (16), nel caso di orientamento a Sud, (17) nel caso di orientamento a Ovest o Est, (18) nel caso di orientamento a Nord o nel caso di edificio con finestre disposte in diverse orientazioni.

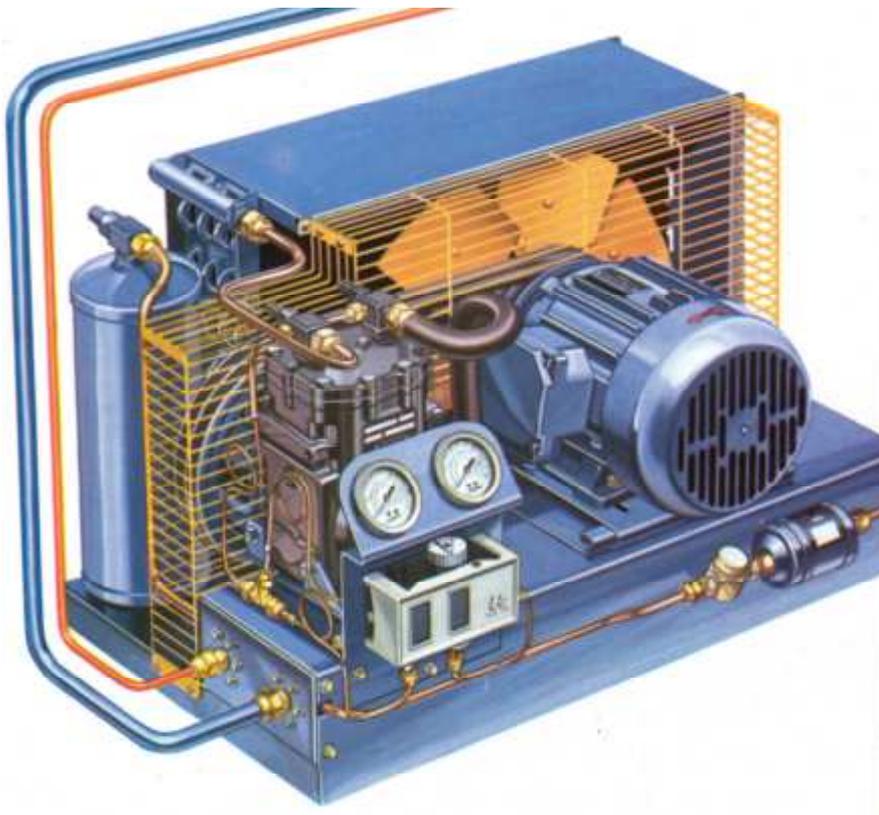
BIBLIOGRAFIA

- L. Mazzarella, M. Motta, “Procedura semplificata per il calcolo del fabbisogno di energia per raffrescamento estivo”, 56° Congresso Nazionale ATI, Napoli 10-14 settembre 2001.
- L. Schibuola, “Valutazione semplificata del fabbisogno energetico estivo degli edifici”, CDA n.2, febbraio 1999.
- G. A. Venier°, O. Saro, Metodi semplificati per il calcolo del fabbisogno energetico estivo, 61° Congresso Nazionale ATI, Perugia 12-15 settembre 2006.
- ASHRAE, Non residential cooling and heating load calculation procedures , in: ASHRAE Handbook, Fundamentals, 2001, Atlanta, 2001 (Chapter 29).
- NEN 2916:1994 “Energy performance of nonresidential buildings – Determination method”, Nederlands normalisatie Instituut, Delft, The Netherlands, 1994.
- Gastaldello, A., Schibuola, L. Considerazioni sul calcolo semplificato del fabbisogno estivo degli edifici nell'ambito della certificazione energetica. 46° Congresso Internazionale AICARR, 2008, Milano.
- BLAST, 1993, The building loads analysis and system thermodynamics program, Department of Mechanical and Industrial Engineering, University of Illinois at Urbana Champaign.
- DOE 1994. Department of Energy program, Simulation Research Group, Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, California.
- Crawley, B. D., Lawrie, K. L., Winkelmann, F. C., Pedersen C. O., 2001, *EnergyPlus: new capabilities in a whole- building energy simulation program*, 7th International IBPSA Conference, Rio de Janeiro Brazil.
- Van Dijk D., Spiekman M.E., Monthly method to calculate coolingdemand of EP regulations, CEN/TC89 N870, Brussels, 17 June 2003
- Corrado, V., Fabrizio, E., 2006. Assessment of building cooling energy need through a quasi-steady state model: Simplified correlation for gain-loss mismatch. *Energy and Buildings*, 39 (2007), pp. 569–579.
- U.S. Department of Energy Energy, Efficiency and Renewable Energy Office of Building Technologies, EnergyPlus Testing with Building Thermal Envelope and Fabric Load Tests from ANSI/ASHRAE Standard 140-2007, Washington, D.C., December 2008

- L. Cecchinato, R. Del Bianco, L. Schibuola, Tecniche di simulazione del comportamento termico degli edifici: confronto tra diverse metodologie di calcolo, 57° Congresso Nazionale ATI, Pisa 17-20 settembre 2002
- R. Zecchin, M. Colombari, S. Rossetti. Energy Consumption of a Building: Comparison between Values Estimated by Algorithms from Energy Conservation Standard and by a Transient Simulation Model. Clima 2000. Napoli 2001 World Congress. Napoli (I), 15-18 Settembre 2001
- Mazzarella L., Dati climatici G. De Giorgio, Proc. of Giornata di Studio Giovanni De Giorgio, Politecnico di Milano, 18 Novembre 1997. Milano
- UNI 8477-1:1983 Energia solare. Calcolo degli apporti per applicazioni in edilizia. Valutazione dell' energia raggiante ricevuta.
- EN ISO 13790:2008, Energy performance of buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling.
- UNI/TS 11300-1:2008, Prestazioni energetiche degli edifici – Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale.

CAPITOLO 4

Il fabbisogno di energia primaria per riscaldamento e raffrescamento

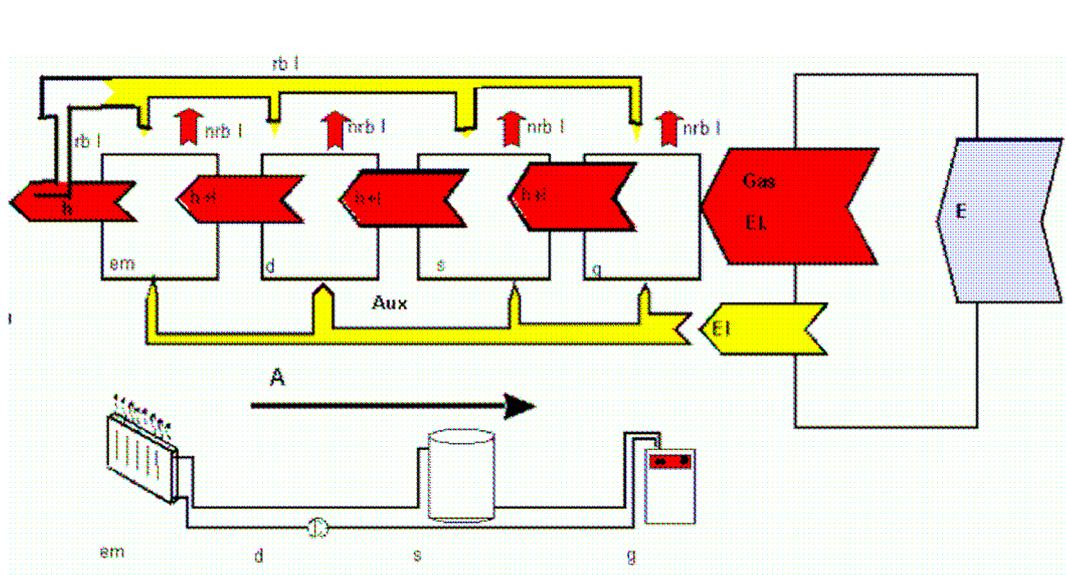


NOMENCLATURA

$T_{w,ev}$	temperatura dell'acqua in uscita dall'evaporatore, °C;
$T_{w,cond}$	temperatura dell'acqua in ingresso al condensatore, °C;
$T_{a,cond}$	temperatura dell'aria in ingresso al condensatore, °C;
P_{ca}	potenza frigorifera a pieno carico, kW;
P_{ea}	potenza elettrica assorbita a pieno carico, kW;
P_{cr}	potenza frigorifera a carico ridotto, kW;
P_{er}	potenza elettrica assorbita a carico ridotto, kW;
X	frazione del carico;
$EER-fl$	efficienza a pieno carico;
$EER-pl$	efficienza a carico parziale.

4.1 Energia Primaria per Riscaldamento

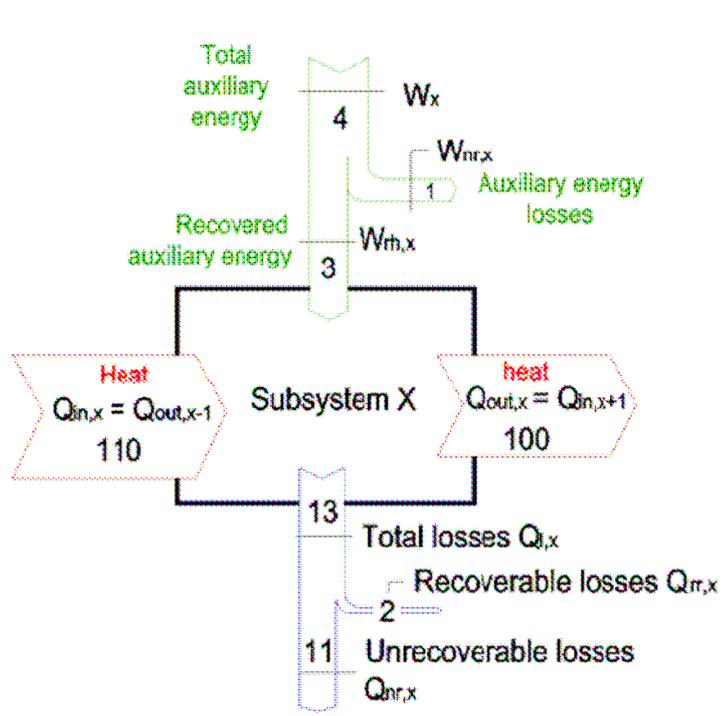
Il fabbisogno di energia primaria per riscaldamento è determinato a partire dal fabbisogno di riscaldamento del solo involucro a cui si aggiungono tutte le perdite dei sottosistemi di emissione, regolazione, distribuzione, accumulo e produzione secondo il diagramma di flusso indicato nella figura seguente tratto dalla norma EN 15316-1.



dove:

rb l	perdite recuperate per riscaldamento involucro
nr b l	perdite non recuperate
h	riscaldamento
l	perdite di energia
aux	ausiliari
gas	combustibile
el	elettricità
E	energia primaria
A	direzione di calcolo
em	emissione
d	distribuzione
s	accumulo.
g	generazione

Per ogn'una di questa tipologie di perdite, le norme della serie EN 15316-X, definiscono una metodologia di calcolo delle perdite e dell'energia recuperata secondo il seguente diagramma di flusso:



Dove i simboli hanno il seguente significato:

dati di input necessari:	$Q_{out,x}$	energia utile da fornire in uscita;
dati in output:	$Q_{in,x}$	fabbisogno energetico in ingresso;
	$Q_{rh,x}$	perdite recuperate;
	$Q_{l,x}$	perdite del sottosistema;
	$W_{rh,x}$	energia elettrica recuperata.

La direzione di calcolo procede in direzione contraria al flusso energetico, nel senso che scopo del calcolo è determinare l'energia in ingresso al sottosistema tramite la relazione seguente

$$Q_{in,x} = Q_{out,x} + (Q_{l,x} - Q_{rh,x}) - W_{nr,x}$$

Il procedimento di calcolo deve quindi determinare le perdite non recuperabili del sottosistema e l'energia elettrica recuperata. Nel sottosistema di generazione, ad esempio, le perdite non recuperabili dipendono dalle perdite a pieno carico e da quelle a carico parziale del generatore, che a loro volta sono funzione delle perdite al camino e delle perdite al mantello. Questi dati sono forniti direttamente dai costruttori dei generatori oppure ricavate da tabelle.

4.2 Energia Primaria per Raffrescamento

Le prestazioni delle macchine per il condizionamento dipendono non solo dai livelli termici operativi, ma anche dall'andamento del fabbisogno dell'edificio che comporta di norma frequenti parzializzazioni della potenza resa. Infatti le macchine sono normalmente dimensionate per il carico di picco e quindi durante la stagione esse funzionano quasi sempre a potenza ridotta. Attualmente è cresciuta la consapevolezza dell'importanza del funzionamento a carico parziale e della sua influenza sull'efficienza stagionale della macchina. Conseguente è l'introduzione o la modifica di norme di prova delle macchine ai fini di poter meglio comprendere e quantificare questa influenza. Occorre quindi conoscere sia come si comporta la macchina operante a potenza ridotta e sia anche come varia durante la stagione questa potenza ridotta fornita, cioè quindi il fabbisogno dell'edificio soddisfatto da tale macchina.

La capacità di prevedere le prestazioni energetiche stagionali di un'unità di condizionamento a servizio di un determinato edificio offre indubbiamente uno strumento formidabile a chi opera nell'ambito della climatizzazione ambientale. Al progettista permette infatti di verificare la validità delle proprie scelte confrontando le prestazioni ottenibili con diverse possibili opzioni progettuali in termini di tipologia della macchina frigorifera e dell'impianto, del loro dimensionamento e regolazione. Per un impianto esistente offre la possibilità di quantificare all'utente i risparmi di gestione conseguibili con interventi migliorativi. Risulta infine indispensabile per poter procedere ad una certificazione energetica del sistema edificio-impianto basata su indici effettivamente rappresentativi del comportamento stagionale nel caso di impianti con pompa di calore o previsti anche per il condizionamento estivo.

Allo stato attuale, il governo italiano ha emanato una serie di decreti per completare totalmente l'applicazione del D.Lgs. 192/05 e una serie di norme per la metodologia di calcolo.

La procedura di calcolo è sviluppata dalla norma UNI TS 11300 (CTI, 2008). La prima parte di tale norma riporta le indicazioni nazionali per la corretta applicazione

della EN ISO 13790, con riferimento al metodo mensile per il calcolo della domanda di energia per il riscaldamento e per il raffrescamento di un edificio. Il metodo di calcolo proposto all'interno della norma è su base mensile. La terza ed ultima parte (CTI, 2007) ha invece lo scopo di determinare l'energia primaria necessaria per la climatizzazione estiva. Essa ha per titolo: "Determinazione dei rendimenti e dei fabbisogni di energia primaria per la climatizzazione estiva". In questo caso la metodologia attualmente proposta prende spunto da altre già esistenti da tempo nell'ambito della caratterizzazione delle prestazioni delle macchine frigorifere. Viene infatti ripreso l'indice IPLV introdotto da ARI negli anni 80 (1989) per caratterizzare le prestazioni delle macchine. Si vuole ora usarlo come stima del rendimento stagionale chiamandolo SEER (Seasonal Energy Efficiency Ratio) in conformità a quanto previsto nella Pr EN 14825 (CEN, 2008) D'altronde in Italia esistono già due norme: la UNI 11135 (2004) e la UNI 10963 (2001) appositamente introdotte rispettivamente per la valutazione del rendimento stagionale e per stabilire le prove necessarie per valutare il comportamento della macchina a carico parziale. Tali norme sono attualmente disattese richiedendo appunto l'esecuzione di prove a carico parziale. Con questo lavoro si propone allora di utilizzare proprio i dati già necessari per calcolare SEER al fine di rendere operativa la UNI 11135 che è in grado di fornire una valutazione del rendimento stagionale decisamente più corretta.

4.3 Il Calcolo del SEER

La procedura di calcolo del SEER ripresa dalla proposta UNI TS 11300 terza parte si riferisce direttamente al progetto di norma europea (prEN 14825, 2008) che definisce le modalità di determinazione sperimentale di un indice di prestazione stagionale delle macchine frigorifere. Lo scopo di questo indice normalizzato detto appunto SEER è quello di confrontare tra di loro prestazioni ai carichi parziali di pompe di calore e refrigeratori d'acqua funzionanti a ciclo inverso e azionati da compressore elettrico. Il valore di SEER non rappresenta assolutamente l'efficienza stagionale di una macchina installata in un certo edificio, perché è calcolato con un ciclo di carico e temperature operative di riferimento prefissati. Nella realtà il ciclo di carico non sarà lo stesso e nemmeno le temperature. Con questo indice però è

possibile avere un indicatore comparativo migliore della semplice efficienza a pieno carico, poiché è possibile evidenziare le macchine che hanno comportamenti migliori ai carichi ridotti.

Il termine dell'efficienza stagionale è calcolato secondo la seguente relazione:

$$SEER = A \cdot EER_A + B \cdot EER_B + C \cdot EER_C + D \cdot EER_D \quad (1)$$

dove:

- $EER_A, EER_B, EER_C, EER_D$ sono i coefficienti di prestazione (Energy Efficiency Ratio) ai quattro regimi di carico parziale successivamente definiti;
- A, B, C, D sono i fattori di pesatura dei valori di EER a carico parziale.

Le condizioni di prova per la determinazione dei coefficienti di prestazione a carico parziale indicati in (1) sono determinate dalla norma in funzione della tipologia di macchina frigorifera ed anche della tipologia di impianto di climatizzazione installato. Una sintesi parziale delle condizioni di prova sono indicate nella seguente tabella:

Tabella XVI - Condizioni di prova a carico parziale secondo prEN 14825

Tipologia:		aria- aria		acqua- aria	
prova	Carico parziale	t-in aria esterna	t-in aria interna	t-in acqua torre/falda	t-in aria interna
A	100%	35	27	30/15	27
B	75%	30	27	26/15	27
C	50%	25	27	22/15	27
D	25%	20	27	18/15	27

Tipologia:		aria- acqua		acqua- acqua	
prova	Carico parziale	t-in aria esterna	tout acqua fan-coil/pannelli	t-in acqua torre/falda	tout acqua fan-coil/pannelli
A	100%	35	7/18	30/15	7/18
B	75%	30	7/18	26/15	7/18
C	50%	25	7/18	22/15	7/18
D	25%	20	7/18	18/15	7/18

Nella *Tabella XVI* le temperature dell'aria per le varie tipologie di impianti sono indicate con l'indicazione "in" per ingresso nello scambiatore (evaporatore o condensatore). Con tout acqua si intende la temperatura dell'acqua in uscita dall'evaporatore. Ad esempio per gruppi aria-acqua alla condizione di prova "A", la temperatura di entrata dell'aria al condensatore è di 35° e la temperatura di uscita

dall'evaporatore è di 7° negli impianti con ventilconvettori (fan-coil), 12°C con pannelli radianti. I salti termici negli scambiatori sono indicati in dettaglio nella norma per ogni tipologia di prova

I fattori di pesatura *A,B,C,D* sono anch'essi funzione della tipologia di macchina, in particolare sono previste due serie di valori leggermente diverse a seconda che l'evaporatore scambi con aria o acqua.

Tabella XIX - Fattori di pesatura a carico parziale secondo prEN 14825

prova	Carico parziale	Tipologia:			
		aria-aria	acqua-aria	aria-acqua	acqua-acqua
A	100%	4%	4%	3%	3%
B	75%	26%	26%	33%	33%
C	50%	40%	40%	41%	41%
D	25%	30%	30%	23%	23%

La norma specifica varie procedure di calcolo a seconda della tipologia di macchina e prevede inoltre a volte la possibilità di ricavare gli EER a carico parziale anche con modalità alternative.

Per le macchine aria-aria o acqua aria, nel caso di unità con potenzialità costante i calori della prestazione a carico parziale sono calcolati utilizzando la seguente relazione:

$$EER_{pl} = EER_{fl} \cdot Cd1 \cdot Cd2 \quad (2)$$

dove:

EER_{pl} : EER alle relative condizioni carico parziale e di temperatura

EER_{fl} : EER a pieno carico ma alle condizioni di temperatura relative al carico parziale corrispondente

$Cd1$: fattore di degrado per effetto dello stato di "termostato off"

$Cd2$: fattore di degrado per effetto dell'equalizzazione della pressione.

Per le macchine aria-acqua o acqua-acqua con potenzialità fissa (senza intervalli di parzializzazione e senza modulazione) è possibile determinare gli EER a carico parziale con una delle seguenti modalità:

1 Effettuare le prove a carico parziale alle 4 temperature di prova indicate nella Tabella XVI

2 Effettuare le prove a pieno carico alle 4 temperature di Tabella XVI ed applicare ai valori ottenuti la seguente relazione:

$$EER_{pl} = EER_{fl} \cdot \frac{Load}{Cc \cdot Load + (1 - Cc)} \quad (3)$$

dove

$$Load = \frac{Pc_{fl,A} \cdot X}{Pc_{fl,x}} \quad (4)$$

dove:

EER_{pl} : EER alle relative condizioni carico parziale e di temperatura

EER_{fl} : EER a pieno carico ma alle condizioni di temperatura relative al carico parziale corrispondente

$Pc_{fl,A}$: potenza a pieno carico alle condizioni "A" di test

$Pc_{fl,x}$: potenza a pieno carico alle condizioni "X" di test (A,B,C,D)

X: frazione di carico parziale

Cc: fattore di degrado determinato dalla norma che di default assume il valore di 0,9.

L'introduzione della formula (3) è dovuta al contributo della rappresentanza italiana nel WG7 del CEN TC113 ed è conseguenza della norma UNI 10963 come mostrato dalla (10) nel paragrafo 4.4.4.

Per le macchine con gradini di parzializzazione la norma dà invece le seguenti indicazioni:

a) Determinare la potenza a carico parziale e l'EER per ogni gradino di controllo della macchina.

b) Se il passo di controllo non rientra nell'intervallo del $\pm 3\%$ della frazione di carico parziale si deve determinare la capacità e la resa EER alle condizioni di temperatura su entrambi i lati dei gradini di controllo e successivamente ottenere la potenzialità e la resa alla frazione di carico richiesta effettuando una interpolazione lineare tra i valori ottenuti.

c) Se il più piccolo gradino di controllo della macchina è più grande della frazione di carico richiesta, l'efficienza EER a carico parziale deve essere calcolata tramite l'equazione (3) come per le macchine a potenza fissa.

Per le macchine con modulazione continua della potenzialità si specifica che se l'elettronica di controllo non è in grado di raggiungere la frequenza necessaria per una determinata frazione di carico ridotto si determina la prestazione con lo stesso metodo utilizzato al punto b) e c) per le macchine a gradini di parzializzazione.

Si può quindi concludere che non sempre gli EER_x si determinano necessariamente con prove di funzionamento a carico parziale. In alcuni casi si desumono con misure fatte su prove a pieno carico, da cui poi si ricava la resa a carico parziale.

Il SEER è stato introdotto come indice prestazionale di una macchina. Nel caso ad esempio delle macchine raffreddate ad aria, il suo calcolo si basa sull'assunzione che il carico frigorifero sia una funzione lineare della sola temperatura esterna mentre in realtà negli edifici dipende, in modo spesso ancor più determinante, anche da carichi interni, carico latente, regime di funzionamento e radiazione solare. Di conseguenza si stimano coefficienti di pesatura e EER ai carichi parziali nello stesso modo per tutti gli edifici e climi. E' evidente che assumere il SEER come rendimento stagionale di una macchina installata in un determinato edificio è del tutto arbitrario.

Siamo di fronte ad un uso distorto del SEER che in realtà non ha nulla a che vedere con ciò che ci serve perché la correlazione tra temperatura esterna e quota del carico è arbitraria e non può essere generalizzata e quindi valida per ciascun particolare edificio. Si parte poi con l'ipotesi che ci sia sempre un corretto dimensionamento delle macchine frigorifere. Sappiamo invece che uno dei vizi purtroppo più diffusi tra i progettisti è quello di installare macchine sovradimensionate rispetto alla domanda dell'edificio. Occorre quindi una norma che combatta questo problema analogamente a quanto si fa nel riscaldamento in cui la procedura di calcolo riduce il rendimento di produzione nel caso di sovradimensionamento delle caldaie. D'altronde sappiamo che senza questa ipotesi cade tutta la teoria del SEER che parte da una domanda dell'edificio sempre esattamente uguale al 100% della potenza della macchina quando la temperatura esterna è di 35°C.

L'odierna maggiore attenzione alle prestazioni a carico parziale sta spingendo l'innovazione a realizzare macchine poco penalizzate o che addirittura funzionano meglio a carico ridotto. Proprio per questo è necessaria una valutazione corretta che premi le macchine innovative rispetto alle altre che sono penalizzate. Ciò non avviene usando direttamente i quattro $EER_A..EER_D$ in cui alla penalizzazione (o aumento a seconda della macchina) dovuto alla parzializzazione si sovrappone sistematicamente un aumento dovuto a migliori temperature operative. In realtà, come ormai detto più volte, questa correlazione tra temperatura e fattore di carico è del tutto arbitraria e fuorviante

4.4 La Norma UNI 11135

Lo scopo del metodo normato è la determinazione dell'efficienza stagionale delle macchine a ciclo inverso a compressione di vapore quali condizionatori, gruppi refrigeratori e pompe di calore ad azionamento elettrico o con motore a combustione interna. E' prevista un'applicazione del metodo nelle procedure di simulazione dinamica del sistema edificio-impianto che probabilmente rappresentano il prossimo futuro anche nel campo della certificazione energetica. Esse infatti sono ormai implementate in codici di calcolo disponibili e utilizzabili anche per applicazioni professionali. Il metodo proposto è però adattabile anche a procedure più semplificate basate sull'analisi in regime dinamico di un giorno medio mensile o ad approcci stazionari quale appunto quello già previsto dalla normativa vigente, attualmente solo per il riscaldamento, ma prossimamente esteso anche al raffrescamento. Per evitare equivoci occorre tener ben presente che attualmente in questa norma si indica con COP (coefficient of performance) il coefficiente di prestazione cioè il rapporto tra la potenza ottenuta e la potenza fornita (di solito elettrica). Quindi il COP della UNI 11135 coincide con EER della PrEN 14825. Invece, come vedremo, l'efficienza media stagionale viene qui indicata come EERs e risulta calcolata in modo diverso dal SEER precedentemente visto in PrEN 14825.

4.4.1. Metodo di Calcolo con Procedure Dinamiche

Nelle procedure di simulazione dinamica del sistema edificio-impianto al calcolo con metodo dinamico del carico termico dell'edificio si accompagna usualmente una valutazione della prestazione media del comportamento dell'impianto in regime stabilizzato in un intervallo di tempo pari al passo di calcolo della simulazione (di solito un'ora). In questo caso si procede allora calcolando:

1- La condizione operativa in base alle temperature medie della macchina, di solito le temperature dei fluidi con cui essa scambia calore al condensatore e all'evaporatore. In presenza di punti caratteristici con stesse temperature, ma diverse umidità dell'aria, si terrà anche conto dell'umidità media.

2- Interpolando linearmente tra i due punti caratteristici più prossimi alla condizione operativa si valuta il *EER* a pieno carico e la potenza termica massima che può essere fornita.

3- Un fattore di carico medio viene calcolato come rapporto tra il fabbisogno dell'edificio effettivamente fornito dalla macchina e l'energia massima che può essere fornita in un funzionamento permanentemente a piena potenza nello stesso intervallo di tempo.

4- L'*EER* effettivo medio nell'intervallo di tempo considerato (EER_i) si ottiene moltiplicando l'*EER* a pieno carico per un coefficiente correttivo *Y* calcolato secondo quanto previsto dalla norma UNI 10963 in funzione del fattore di carico medio.

4.4.2. Metodo di Calcolo con Procedure Semplificate Stazionarie

E' possibile un calcolo su base mensile quando sia già noto il fabbisogno termico. In effetti utilizzando procedure semplificate in regime stazionario si può arrivare direttamente ad una stima del fabbisogno termico dell'edificio in ciascun mese. E' quanto avviene ad esempio applicando l'attuale normativa per il calcolo del fabbisogno di riscaldamento stagionale di un edificio. In questo caso è possibile riferirsi a condizioni operative medie durante le ore di funzionamento nel mese per valutare un *EER* medio mensile a pieno carico e la potenza termica massima media mensile con lo stesso metodo previsto ai punti 1 e 2 del paragrafo 4.4.1.

Per il condizionamento il fattore di carico medio mensile viene calcolato come rapporto di energie e cioè come rapporto tra il fabbisogno dell'edificio effettivamente

fornito nel mese e l'energia massima che poteva essere fornita. Quest'ultima è ottenuta moltiplicando la potenza massima media per il tempo di accensione previsto nel mese.

Il *EER* effettivo medio mensile (EER_i) si ottiene moltiplicando il *EER* a pieno carico medio mensile per un coefficiente correttivo Y calcolato secondo quanto previsto dalla norma UNI 10963 in funzione del fattore di carico medio mensile.

4.4.3. Calcolo Finale del *EER* Medio Stagionale (EER_s)

In ciascun intervallo di tempo considerato, singolo passo di calcolo nella simulazione dinamica o un mese con una procedura semplificata, si calcola l'energia assorbita dalla macchina dividendo il fabbisogno termico dell'edificio fornito dalla macchina per il *EER* appena calcolato entrambi relativi allo stesso intervallo. Sommando nell'ambito dell'intera stagione tutte le energie consumate così calcolate si ottiene l'energia totale consumata nella stagione Q_s :

$$Q_s = \sum_{i=1}^n Q_i = \sum_{i=1}^n \frac{Q_{u,i}}{EER_i} \quad (5)$$

dove n è il numero di intervalli di simulazione in cui si divide la stagione di riscaldamento o di condizionamento estivo con la procedura dinamica. Con la procedura semplificata è invece il numero di mesi compresi nella stagione.

In modo analogo si ottiene il fabbisogno totale dell'edificio fornito dalla macchina nella stagione $Q_{u,s}$:

$$Q_{u,s} = \sum_{i=1}^n Q_{u,i} \quad (6)$$

L'*EER* medio stagionale (EER_s) è pari al rapporto tra il fabbisogno totale dell'edificio fornito e la totale energia consumata entrambi relativi all'intera stagione.

$$EER_s = \frac{Q_{u,s}}{Q_s} \quad (7)$$

L' EER_s non risulta quindi pari alla semplice media aritmetica dei EER_i valutati secondo il paragrafo 5 o 6, bensì è la loro media pesata in base ai corrispondenti consumi della macchina conseguenti ai fabbisogni dell'edificio effettivamente forniti nei relativi intervalli di tempo. Infatti l' EER_s può anche essere espresso come:

$$EER_s = \frac{Q_{u,s}}{Q_s} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{u,i}}{\sum_{i=1}^n Q_i} = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i \cdot EER_i)}{\sum_{i=1}^n Q_i} \quad (8)$$

Ancora una volta si sottolinea la necessità di una corretta stima del fabbisogno termico dello specifico edificio servito dalla macchina.

4.4.4. Esempio di calcolo del coefficiente correttivo Y secondo UNI 10963

A titolo esemplificativo vediamo ora il modello matematico proposto per le macchine monostadio. Per ottenere tale algoritmo, in grado di evidenziare l'influenza del solo funzionamento a carico parziale in modo indipendente dal resto, si utilizzano prove svolte nelle stesse condizioni operative di temperatura: quella a piena potenza (prova ausiliaria) ed altre a potenza ridotta. In questo caso quindi risulta $Y = EER_r / EER_a$ dove EER_r è il coefficiente di prestazione a potenza termica ridotta e EER_a è il coefficiente di prestazione a piena potenza nelle stesse condizioni di temperatura. Analogamente $X = P_{cr} / P_{ca}$ dove P_{cr} è la potenza termica ridotta e P_{ca} è la potenza termica piena. Si introduce anche il parametro Z definito come rapporto tra la potenza elettrica assorbita dalla macchina (Per) a potenza ridotta e quella assorbita a piena potenza nella condizione ausiliaria (Pea).

In *Figura 35* sono riportati alcuni valori sperimentali ottenuti per i parametri Y e Z in funzione di X per un condizionatore aria-aria di tipo split di piccola taglia (potenza

nominale 6 kW in condizionamento, 7 kW in riscaldamento). Tutte le prove svolte suggeriscono una correlazione lineare tra Z ed X e questo fatto permette di elaborare un semplice modello matematico per Y in funzione di X come segue:

$$EERr = \frac{Pcr}{Per} \quad EERa = \frac{Pca}{Pea} \quad Z = a \cdot X + b \quad (9)$$

pertanto:

$$Y = \frac{EERr}{EERa} = \frac{Pcr}{Per} \cdot \frac{Pea}{Pca} = \frac{X}{\frac{Per}{Pea}} = \frac{X}{Z} = \frac{X}{a \cdot X + b} \quad (10)$$

La fondamentale conclusione è che una sola prova a potenza ridotta oltre a quella ausiliaria è sufficiente per calcolare la correlazione lineare tra Z ed X e conseguentemente l'algoritmo di Y in funzione di X . Questi modelli sono pure riportati in *Figura 35*.

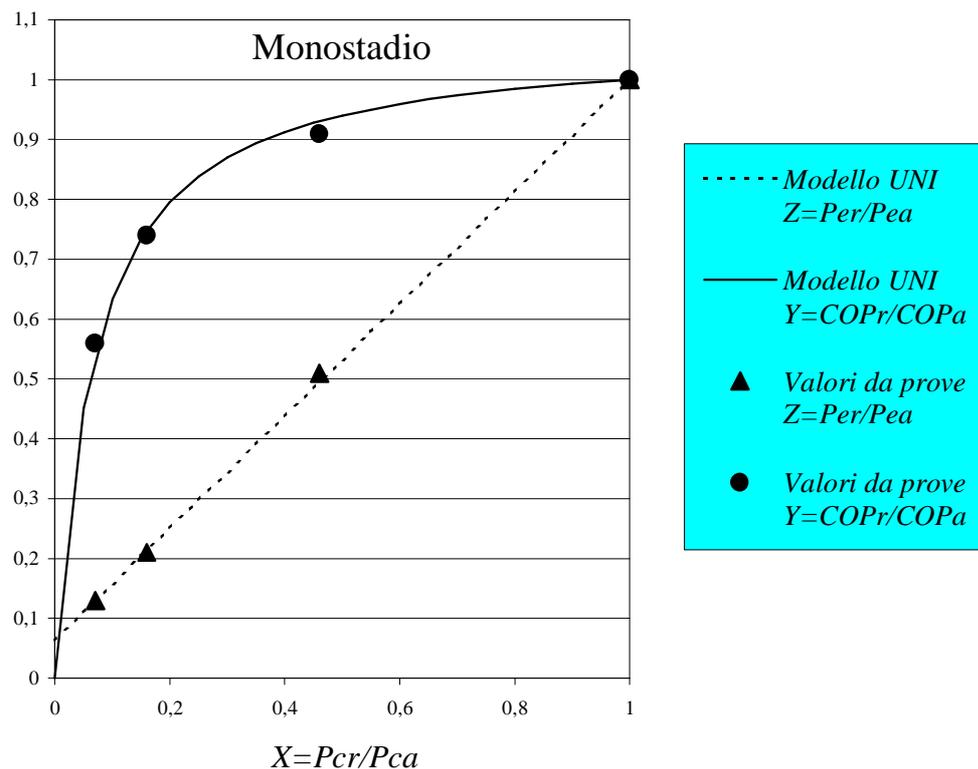


Figura 35- Modelli UNI dei parametri Z e Y in funzione di X ed alcuni valori sperimentali ricavati in laboratorio per una macchina aria-aria monostadio.

Vediamo ora una macchina con regolazione modulante. La modulazione avviene cambiando la velocità di rotazione del motore elettrico mediante la variazione della frequenza della corrente elettrica di alimentazione (tramite inverter) tra la frequenza nominale massima (f_{max}) ed un valore minimo (f_{min}). Raggiunta la f_{min} un'ulteriore riduzione della potenza può essere ottenuta nuovamente agendo con gli attacca-stacca come nel monostadio.

In *Figura 36* sono riportati alcuni valori sperimentali della coppia X e Y ottenuti nella condizione ausiliaria sempre per un condizionatore aria-aria di tipo split di potenza nominale pari al precedente.

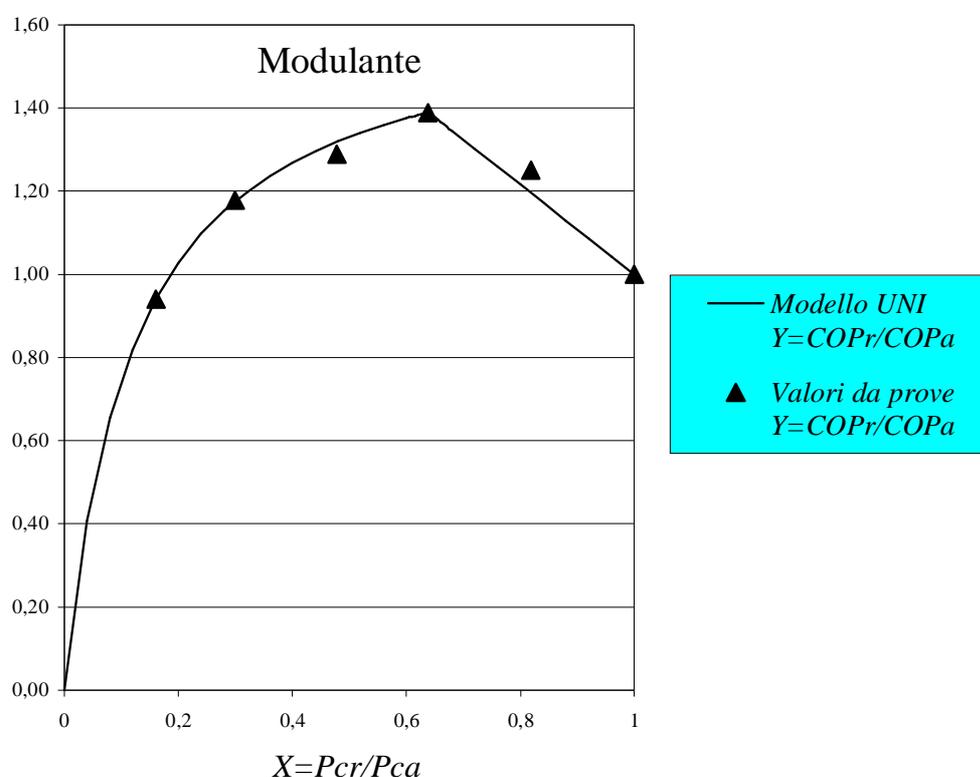


Figura 36 - Modello UNI del parametro Y in funzione di X ed alcuni valori sperimentali ricavati per una macchina modulante.

Per l'algoritmo di Y la norma suggerisce una semplice correlazione lineare tra il punto a frequenza nominale e il punto a frequenza minima cioè per il campo dell'effettiva modulazione. Per X inferiori si può elaborare ancora il modello già visto per il monostadio. E' importante notare come la curva globale risultante di Y in funzione di X sia ottenuta utilizzando solo tre punti di prova: la prova a pieno carico

alla frequenza massima ($X=1$), quella a pieno carico a frequenza minima (in questo caso con $X=0,64$), una prova in attacca-stacca a frequenza minima (in questo caso $X=0,3$).

Si osservi poi come la riduzione del numero di giri comporti un forte aumento di Y sopra all'unità cioè un forte incremento del EER le cui benefiche conseguenze si mantengono anche nel primo intervallo di funzionamento in attacca-stacca. Infatti una minore portata di refrigerante trattata dal compressore per effetto di una riduzione del numero di giri comporta una riduzione dei flussi termici scambiati ad evaporatore e condensatore con l'esterno e quindi minori salti termici. Di conseguenza si riduce il salto di pressione del compressore con vantaggio dell' EER .

4.5 Calcolo del Coefficiente Y a Partire dai Dati della EN 14825

A titolo esemplificativo consideriamo qui il caso frequente delle macchine frigorifere raffreddate ad aria (aria-aria o aria-acqua). Abbiamo visto come a parità di temperatura del freddo prodotto, il coefficiente di prestazione EER (o COP) varia in funzione della temperatura dell'aria esterna e del livello di parzializzazione.

Le prove svolte nell'ambito della UNI 10963 evidenziano una dipendenza del tipo rappresentato in *Figura 37* con curve parametriche in funzione della temperatura esterna molto simili.

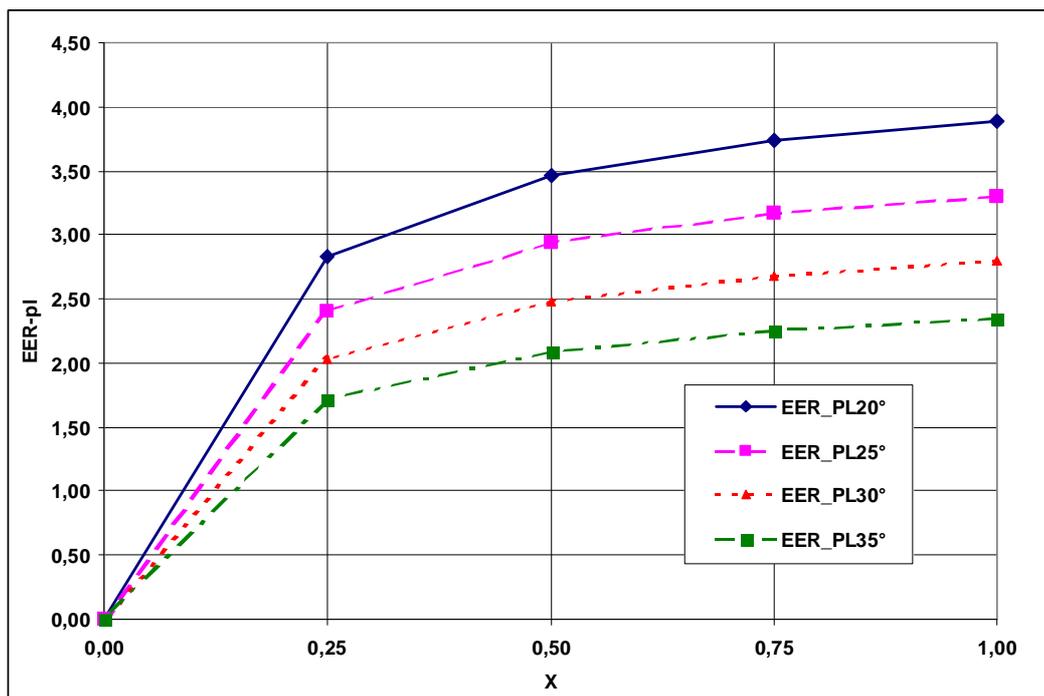


Figura 37 - Curve di prestazione a carico parziale per varie temperature esterne.

La conseguenza, fondamentale per la riduzione del numero delle prove, è che la curva di Y (cioè del rapporto tra EER a carico parziale ed EER a pieno carico a parità di temperatura) in funzione di X è praticamente la stessa al variare della temperatura esterna. E' quindi giustificato l'uso di un'unica curva Y per tutte le temperature operative. I valori di Y utilizzati per costruire tale curva possono a questo punto essere ottenuti con temperature diverse. Questa conclusione ci permette di utilizzare i valori di EER_A, \dots, EER_D già ottenuti per il calcolo del SEER anche per calcolare ben quattro valori di Y più che sufficienti per stimarne l'andamento in funzione di X . Precisamente si ha:

$$Y_r = \frac{EER_{pl,r}}{EER_{fl}} \quad (11)$$

dove:

$EER_{pl,r}$ coefficiente di prestazione a potenza termica ridotta disponibile come abbiamo visto dai dati richiesti dalla Pr EN 14825 (con $r=A,B,C,D$);

EER_{fl} coefficiente di prestazione a piena potenza alla stessa temperatura di EER_R . Tale valore è normalmente ricavabile dalle tabelle relative alle prestazioni a

pieno carico al variare della temperatura presenti nella documentazione tecnica che normalmente accompagna una qualunque macchina sul mercato.

Si osservi che questo coefficiente di degrado Y evidenzia correttamente l'effetto del solo carico parziale senza sovrapporlo con quello legato alla variazione di temperatura.

I quattro valori di Y_r con $r=A,B,C,D$ corrispondono rispettivamente ad $X=1-0,75-0,50-0,25$. Da questi quattro valori e per semplice interpolazione posso ottenere il valore del coefficiente di degrado per qualunque fattore di carico della macchina.

Vediamo ora alcune applicazioni della procedura a tipiche macchine commerciali. Per il significato delle simbologie si rimanda alla nomenclatura all'inizio del capitolo.

Per ogni macchina si evidenzia la procedura seguita con i dati riportati in tabelle da cui alla fine si ricavano le quattro coppie di valori X - Y .

1 Gruppo frigorifero acqua-acqua con un compressore scroll su un circuito frigorifero.

Condizioni di prova a pieno carico (ricavabili dai cataloghi del produttore):

Tw,ev (°C)	Tw,cond (°C)	Pc (kW)	Pe (kW)	EER-fl
7	30	13,10	3,17	4,13
7	26	13,71	2,85	4,81
7	22	14,01	2,70	5,19
7	18	14,22	2,60	5,47

Condizioni di prova a carico ridotto secondo Eurovent/CEN:

	X (%)	Tw,ev (°C)	Tw,cond (°C)	Pc,r (kW)	Pe,r (kW)	EER-pl
A	100	7	30	13,10	3,17	4,13
B	75	7	26	10,28	2,22	4,63
C	50	7	22	7,01	1,50	4,66
D	25	7	18	3,56	0,87	4,10

Effettuando il rapporto tra l'efficienza a carico parziale (EER-pl) e l'efficienza a pieno carico (EER-fl) si ottiene il valore di Y , per cui è possibile ottenere una tabella dei due parametri X e Y .

X	0,00	0,25	0,50	0,75	1,00
Y	0,00	0,75	0,90	0,96	1,00

2 Gruppo frigorifero aria-acqua con un compressore scroll su un circuito frigorifero.

Condizioni di prova a pieno carico (ricavabili dai cataloghi del produttore):

Tw,ev (°C)	Ta,cond (°C)	Pc (kW)	Pe (kW)	EER-fl
7	35	10,40	4,43	2,35
7	30	11,08	3,97	2,79
7	25	11,69	3,54	3,30
7	20	12,28	3,16	3,89

Condizioni di prova a carico ridotto secondo Eurovent/CEN:

	X (%)	Tw,ev (°C)	Ta,cond (°C)	Pc,r (kW)	Pe,r (kW)	EER-pl
A	100	7	35	10,40	4,43	2,35
B	75	7	30	8,31	3,10	2,68
C	50	7	25	5,85	1,99	2,94
D	25	7	20	3,07	1,08	2,83

Da osservare che generalmente la resa a pieno carico a 20°C non è sempre presente nei cataloghi dei produttori; si può quindi procedere per estrapolazione poiché le variazioni delle potenze frigorifere ed elettriche assorbite hanno un andamento lineare come si può osservare in *Figura 38* per questa macchina:

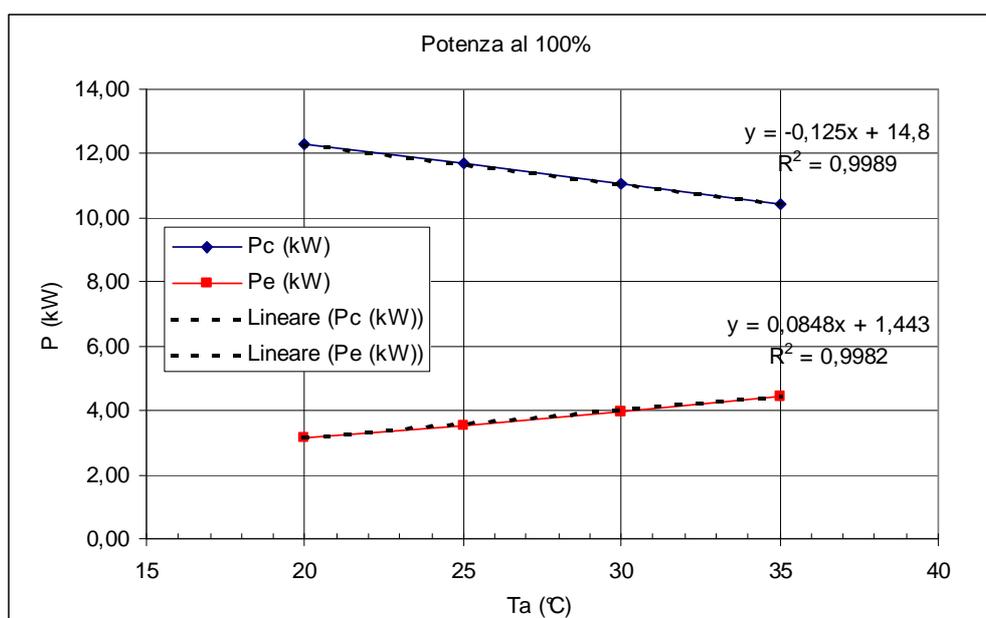


Figura 38 – Potenze resa Pc e assorbita Pe al variare della temperatura dell'aria esterna per la macchina 2.

Si noti che il coefficiente di correlazione R è prossimo all'unità per entrambe le relazioni.

Analogamente al caso precedente si può ricavare il termine Y , per cui è possibile ottenere una tabella dei due parametri (X e Y). E' stato inoltre inserita la rappresentazione del parametro Z (rapporto tra le potenze elettriche a carico parziale Per e la potenza elettrica a pieno carico Pea). Figura 39 è inoltre raffigurato il grafico della tabella qui sotto rappresentata:

X	0,00	0,25	0,50	0,75	1,00
Y	0,00	0,73	0,89	0,96	1,00
Z		0,34	0,56	0,78	1,00

Si osservi che, come indicato nella norma UNI 10963, il parametro Z ha un andamento perfettamente lineare; così non è invece per le macchine a gradini o modulanti, come si è già visto per la macchina split con inverter. Il valore in corrispondenza dell'intercetta con l'asse delle ordinate Z è stato ricavato per estrapolazione lineare dai dati della tabella. Questo valore indicato con b , viene appunto utilizzato nella norma Pr EN 14825, solo per questa tipologia di macchine, per ricavare il valore di Y tramite una relazione algebrica:

$$Y = \frac{X}{(1-b)X + b} \quad (12)$$

si può verificare facilmente come questa relazione conferma i valori di Y ottenuti per via sperimentale e indicati nella tabella precedente.

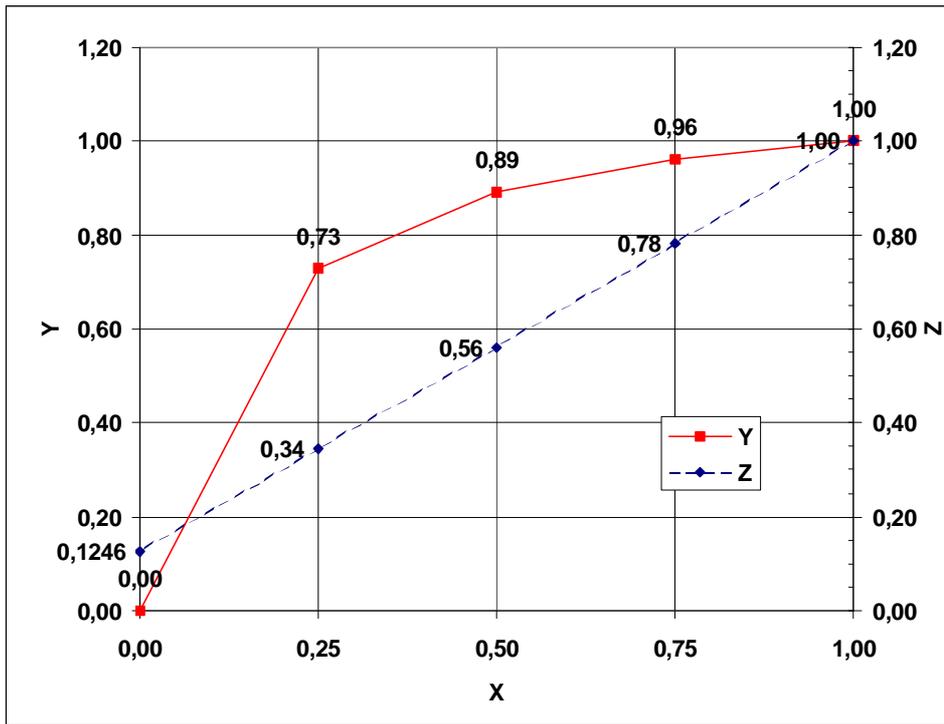


Figura 39– Andamenti dei parametri Y e Z in funzione di X per la macchina 2.

3 Gruppo frigorifero aria-acqua con 4 compressori scroll su due circuiti frigoriferi.

Condizioni di prova a pieno carico (ricavabili dai cataloghi del produttore):

$T_{w,ev}$ (°C)	$T_{a,cond}$ (°C)	P_c (kW)	P_e (kW)	EER-fl
7	35	261,30	95,70	2,73
7	30	277,00	88,30	3,14
7	25	292,20	81,50	3,59
7	20	307,70	74,30	4,14

Condizioni di prova a carico ridotto secondo Eurovent/CEN:

	X (%)	$T_{w,ev}$ (°C)	$T_{a,cond}$ (°C)	$P_{c,r}$ (kW)	$P_{e,r}$ (kW)	EER-pl
A	100	7	35	261,30	95,70	2,73
B	75	7	30	207,75	57,07	3,64
C	50	7	25	146,10	31,97	4,57
D	25	7	20	76,93	14,19	5,42

Si ricava quindi il termine Y effettuando il rapporto tra l'efficienza a carico parziale (EER-pl) e l'efficienza a pieno carico (EER-fl), ottenendo la tabella dei parametri (X e Y):

X	0,00	0,25	0,50	0,75	1,00
Y	0,00	1,31	1,27	1,16	1,00

e la rispettiva rappresentazione grafica in Figura 40.

Anche in questo caso nella figura è stata inserita la rappresentazione del parametro Z (rapporto tra le potenze elettriche a carico parziale P_{er} e a la potenza elettrica a pieno carico P_{ea}), che diversamente al caso delle macchine con un solo compressore presenta in questa conformazione un andamento non lineare rispetto a X .

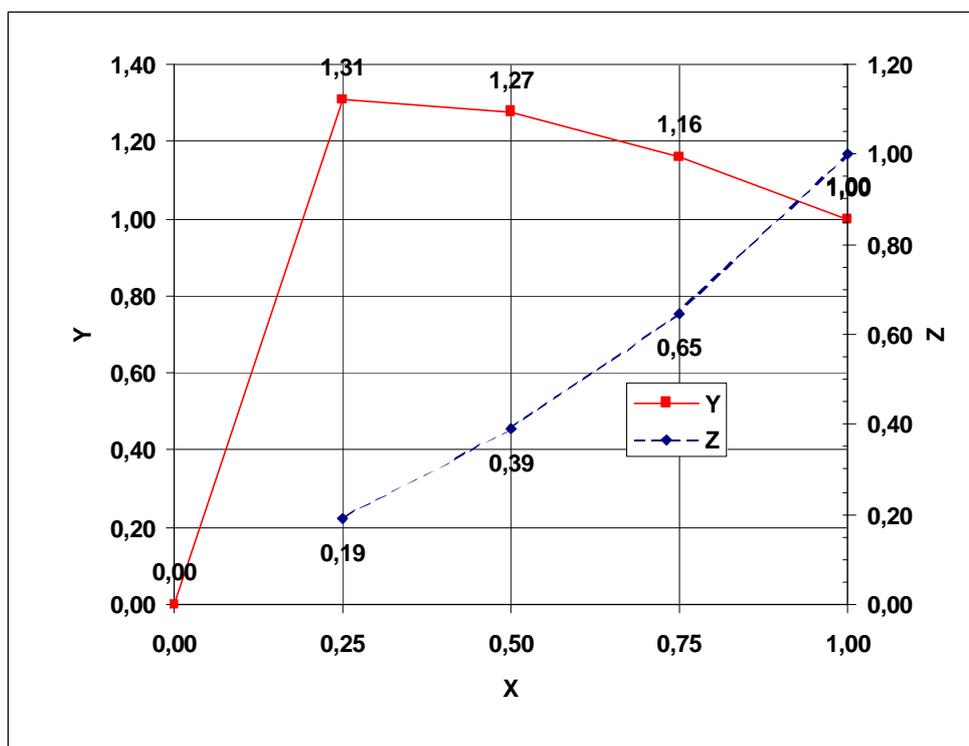


Figura 40 – Andamenti dei parametri Y e Z in funzione di X per la macchina 3.

4 Gruppo frigorifero aria-acqua con 2 compressori bi-vite su due circuiti frigoriferi.

Condizioni di prova a pieno carico (ricavabili dai cataloghi del produttore):

Tw,ev (°C)	Ta,cond (°C)	Pc (kW)	Pe (kW)	EER-fl
7	35	474,50	163,00	2,91
7	30	501,60	151,60	3,31
7	25	527,00	141,60	3,72
7	20	555,50	130,70	4,25

Condizioni di prova a carico ridotto secondo Eurovent/CEN:

	X (%)	Tw,ev (°C)	Ta,cond (°C)	Pc,r (kW)	Pe,r (kW)	EER-pl
A	100	7	35	474,50	163,00	2,91
B	75	7	30	376,20	106,27	3,54
C	50	7	25	263,50	64,11	4,11
D	25	7	20	138,88	29,42	4,72

Si riporta quindi anche in quest'ultimo caso la tabella dei parametri (X e Y).

X	0,00	0,25	0,50	0,75	1,00
Y	0,00	1,11	1,10	1,07	1,00

Si ricorda nuovamente che questa tabella permette per interpolazione di valutare la variazione della resa dovuta al funzionamento a carico parziale della macchina per qualunque valore di X.

Per macchine multistadio o con modulazione continua della velocità del compressore è possibile realizzare le stesse curve. Come esempio riportiamo i seguenti quattro casi:

- Unità aria-acqua con 4 gradini di potenza, potenza nominale 201 kW
- Unità aria-acqua con 6 gradini di potenza, potenza nominale 410 kW
- Unità aria-acqua con 8 gradini di potenza, potenza nominale 809 kW
- Unità aria-acqua monocompressore azionata con inverter, potenza nominale 43 kW

Per queste 4 macchine tramite prove sperimentali sono stati ricavati dei polinomi che permettono di determinare tutte le condizioni di funzionamento in funzione delle temperature dei fluidi all'ingresso del condensatore e dell'evaporatore, della portata di acqua nell'evaporatore:

$$P_{c,i} = a_1 \cdot T_w + a_2 \cdot T_a + a_3 \cdot \dot{m}_{dot} + a_4,$$

$$P_{e,i} = b_1 \cdot T_w + b_2 \cdot T_a + b_3 \cdot \dot{m}_{dot} + b_4,$$

e per le macchine azionate con inverter, anche della frequenza del motore elettrico:

$$\begin{aligned} P_{c,i} &= a_1 \cdot T_a + a_2 \cdot T_w + a_3 \cdot f + a_4 \cdot f^2 + a_5 \cdot \dot{m}_{dot} + a_6, \\ P_{e,i} &= b_1 \cdot T_a + b_2 \cdot T_w + b_3 \cdot f + b_4 \cdot f^2 + b_5 \cdot \dot{m}_{dot} + b_6, \end{aligned}$$

dove:

$P_{c,i}$: potenza frigorifera ai vari gradini o frequenze di funzionamento, kW;

$P_{e,i}$: potenza elettrica assorbita ai gradini o frequenze di funzionamento, kW;

T_a : temperatura dell'aria entrante al condensatore esterno, °C;

T_w : temperatura dell'acqua entrante nell'evaporatore interno, °C;

\dot{m}_{dot} : portata d'acqua nell'evaporatore interno, l/h o m³/h;

f : frequenza di alimentazione del motore elettrico del compressore, Hz.

Per ogni unità sono state ricavate le potenze frigorifere ed elettriche alle 4 temperature di prova indicate dalla norma EN 14825:2008 cioè: 35°C, 30°C, 25°C e 20°C. Da queste si è poi ricavato l'efficienza EER in corrispondenza dei vari gradini o frequenze di funzionamento. Nella seguente *Figura 41* è rappresentato il risultato per un a macchina a 4 gradini e in *Figura 42* per la macchina alimentata ad inverter:

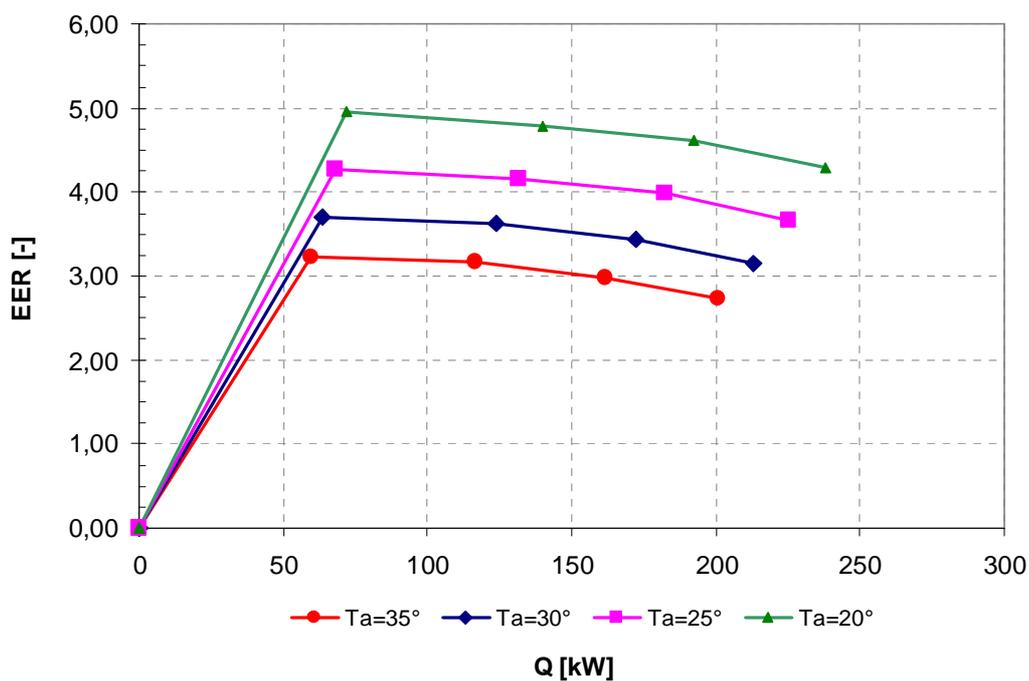


Figura 41 – Andamenti dell'efficienza al variare della potenza frigorifera per macchina a 4 gradini di funzionamento.

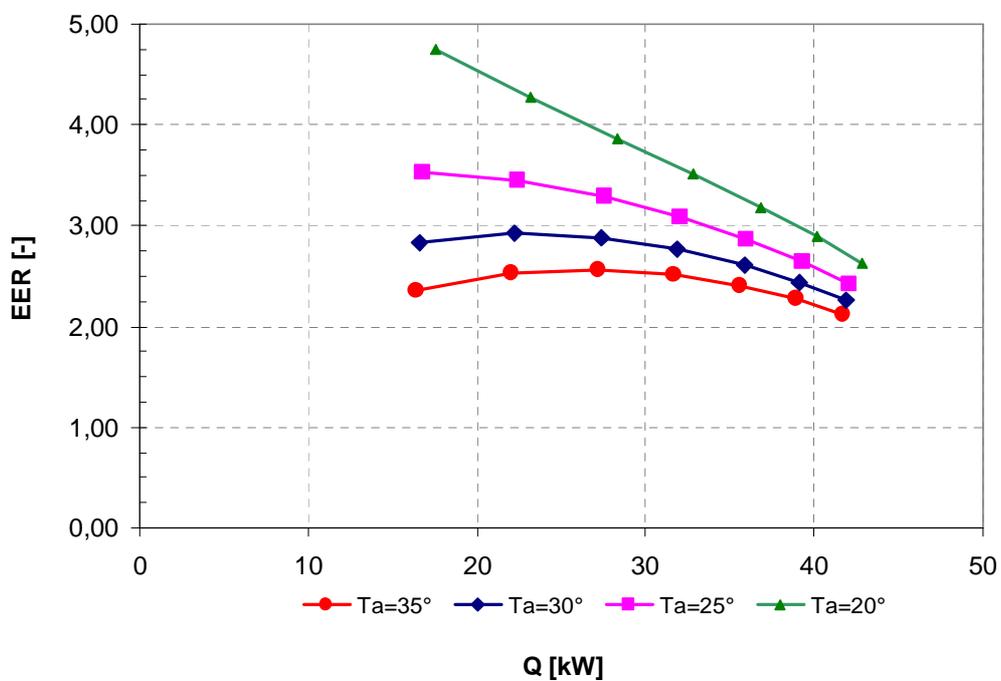


Figura 42 – Andamenti dell'efficienza al variare della potenza frigorifera per macchina azionata a frequenza variabile da 30 a 90 Hz.

Da questa serie di valori è possibile individuare i 4 punti relativi al calcolo del SEER ed effettuare il grafico del fattore di carico X in funzione del fattore Y. Nei 4 grafici seguenti delle *Figura 43*, *Figura 44*, *Figura 45* e *Figura 46*, oltre ai 4 punti per il calcolo del SEER sono indicati anche i valori ai vari stadi di funzionamento per ogn'una delle quattro temperature di prova.

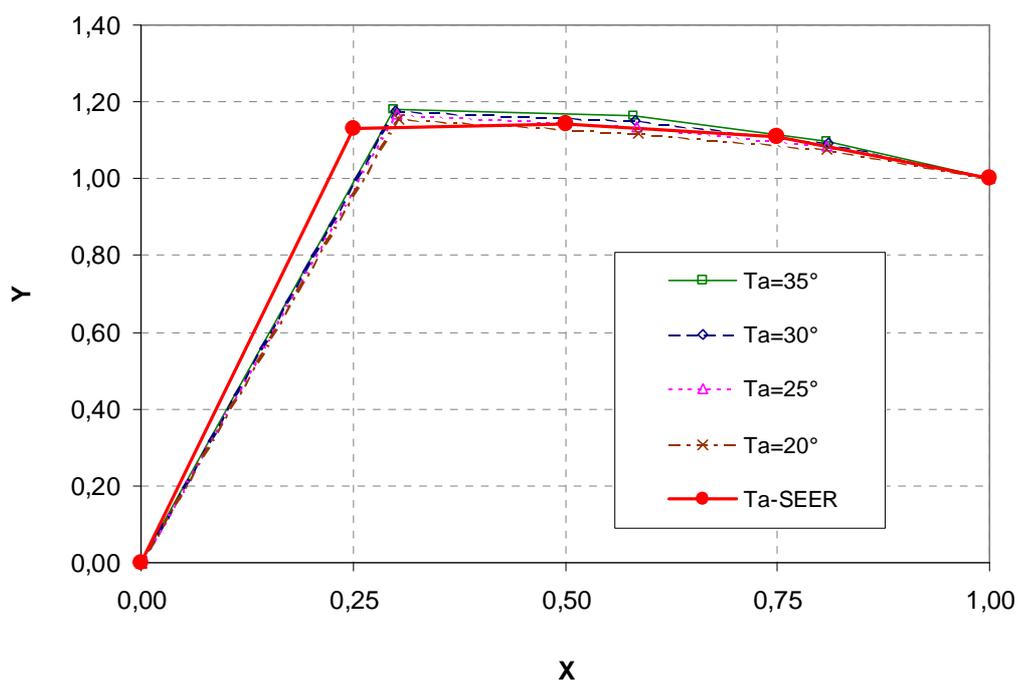


Figura 43 – Andamenti del rapporto Y al variare del fattore di carico X per macchina a 4 gradini di funzionamento.

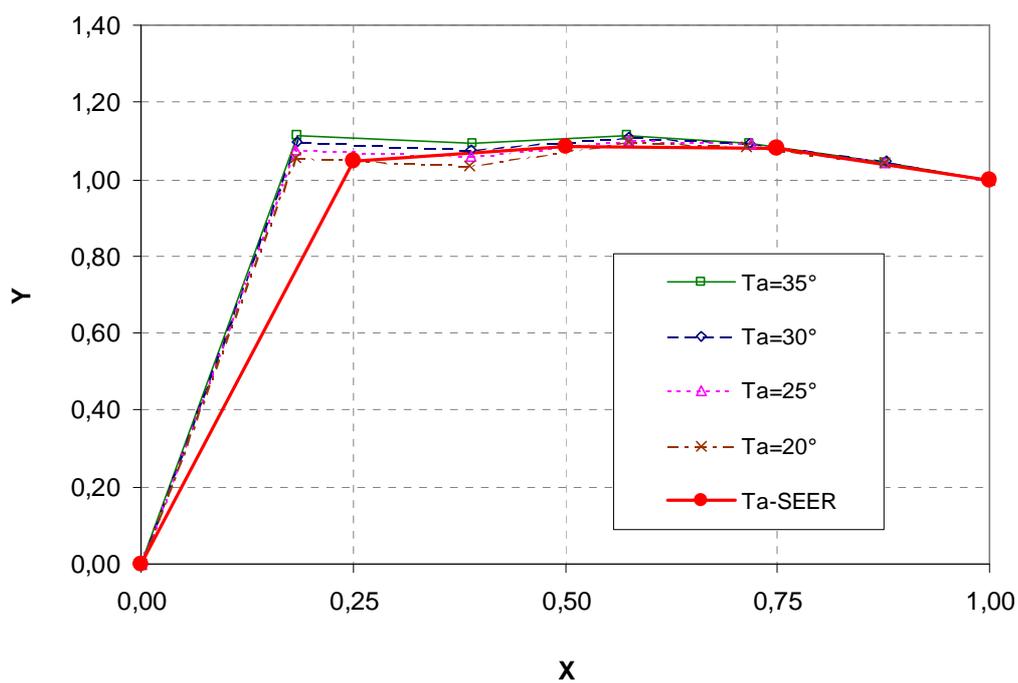


Figura 44 – Andamenti del rapporto Y al variare del fattore di carico X per macchina a 6 gradini di funzionamento.

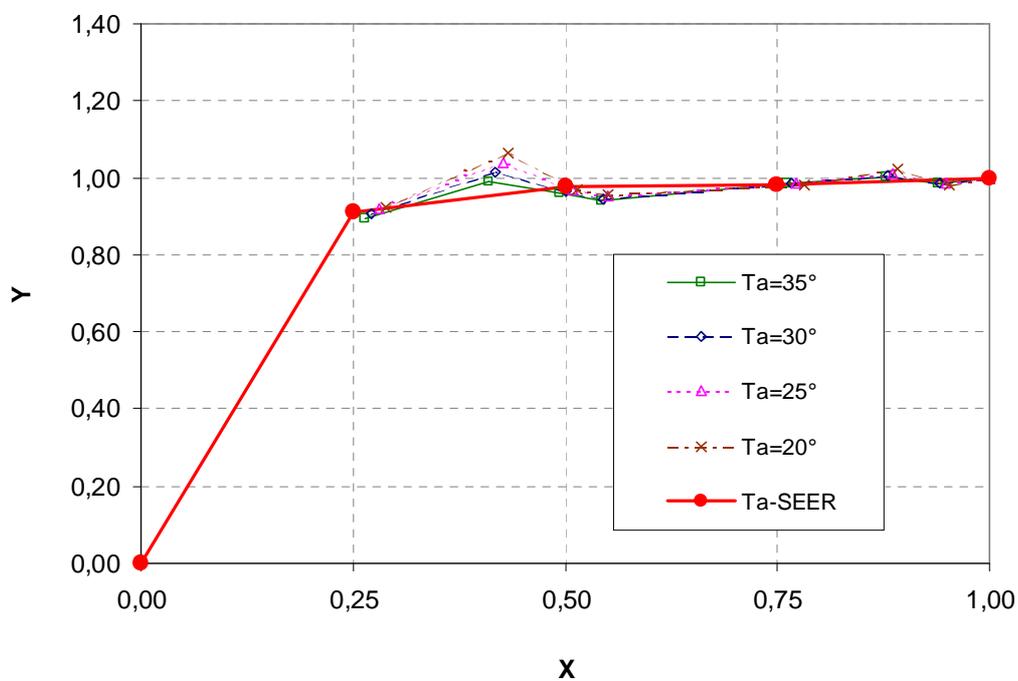


Figura 45 – Andamenti del rapporto Y al variare del fattore di carico X per macchina a 8 gradini di funzionamento.

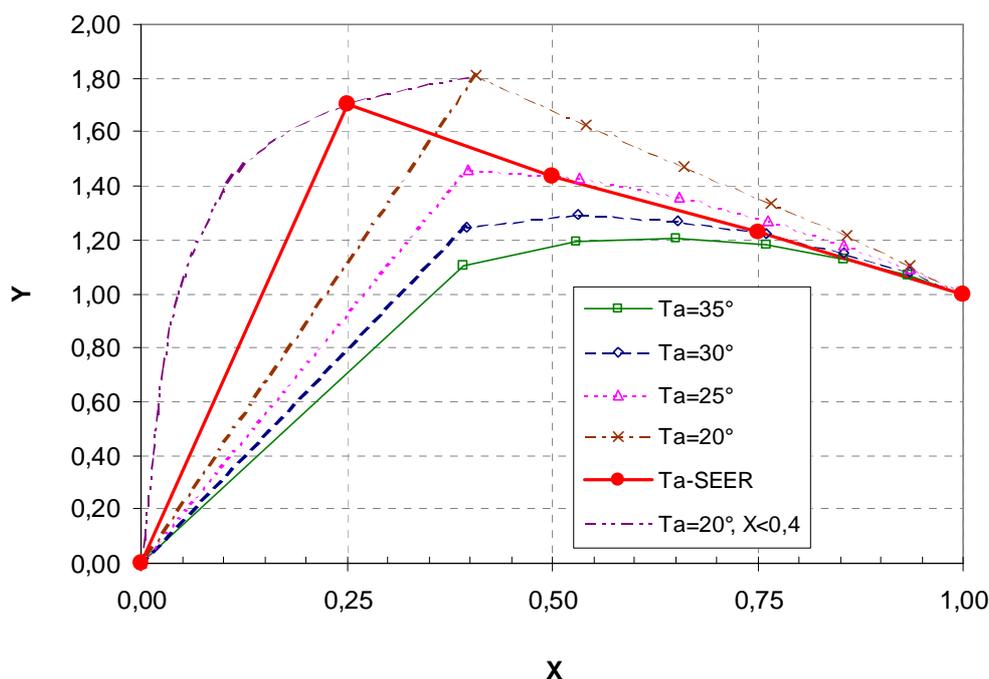


Figura 46 – Andamenti del rapporto Y al variare del fattore di carico X per macchina azionata a frequenza variabile da 30 a 90 Hz.

Nei casi di *Figura 43* e *Figura 46* dove il gradino più basso di funzionamento è superiore al fattore di carico più basso (condizione D di prova), si è proceduto secondo le indicazioni del paragrafo 4.3.1. e 4.3.2 della norma EN 14825 utilizzando la relazione (3) e (4) delle macchina monostadio. Nella *Figura 46* è inoltre rappresentata a titolo di esempio, l'andamento dell'equazione (3) per il funzionamento alla temperatura di 20°C.

Come si può osservare confrontando il grafico di *Figura 46* con quelli precedenti, la macchina alimentata a frequenza variabile ha le curve di resa molto diverse per le varie temperature di prova a differenza dei altri tre casi dove si osserva come le curve $Y-X$ alle varie temperature sono molto prossime. Sarebbe quindi necessario correggere il termine Y con un fattore che tenga conto delle diverse temperature dell'aria esterna nel caso di macchine a velocità variabile del compressore

4.6 Conclusioni

Partendo dai quattro valori di EER già disponibili, perché necessari per il calcolo del SEER, è possibile ricavare facilmente quattro valori del coefficiente di degrado per le quattro percentuali di carico (25, 50, 75, 100%). In questo modo senza ulteriori prove è possibile applicare la norma UNI 11135 per il calcolo del rendimento stagionale da utilizzare per valutare il fabbisogno di energia primaria per il condizionamento nell'ambito della certificazione energetica del sistema edificio-impianto. La procedura è così assolutamente analoga a quella attualmente prevista per il riscaldamento invernale.

In questo modo si evita di sottovalutare il costo di produzione del freddo per la climatizzazione come invece avviene con un uso generalizzato del SEER specie con le macchine più penalizzate dalla parzializzazione (monostadio on-off).

Nell'ambito di una normativa per il risparmio energetico questa penalizzazione è infatti inaccettabile. Il freddo costa moltissimo in termini energetici ed economici ed una normativa energetica deve stimolare progettisti, costruttori ed utenti ad attuare nei loro ambiti tutte le misure per ridurre questo consumo. Deve cioè anche permettere una corretta valutazione economico-finanziaria delle spese per interventi atti a ridurre il fabbisogno per la climatizzazione e riguardanti sia l'edificio che l'impianto.

BIBLIOGRAFIA

- UNI TS 11300-1. Prestazioni energetiche degli edifici, Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale, maggio 2008.
- CTI, Prestazioni energetiche degli edifici, Parte 3: Energia primaria per la climatizzazione estiva, UNI TS 11300-3, maggio 2009.
- ARI, Air Conditioning & Refrigeration Institute, Unitary air-conditioning and air-source heat pump equipment, standard 210/240, Arlington Virginia, 1989.
- CEN TC113 WG7, Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps, with electrically driver compressors. for space heating and cooling – Testing and rating at part load conditions, Pr EN 14825, rev. February 2008.
- UNI 11135, Condizionatori d'aria, refrigeratori d'acqua e pompe di calore. Calcolo dell'efficienza stagionale, UNI 2004.
- UNI 10963, Condizionatori d'aria, refrigeratori d'acqua e pompe di calore. Determinazione delle prestazioni a potenza ridotta, UNI 2001.

CAPITOLO 5

Audit energetico su edifici esistenti: dati climatici esterni e dati interni



La validità e la confrontabilità delle valutazioni dei fabbisogni termici degli edifici non dipende soltanto dalla correttezza degli algoritmi e della loro implementazione nei codici di calcolo, ma è fortemente legata alle scelte dei dati legati alla descrizione geometrica e funzionale dell'edificio. Tra essi particolare importanza assumono le scelte delle proprietà termofisiche degli elementi costituenti l'involucro, le portate d'aria di ventilazione, i carichi termici interni e i dati climatici.

5.1 Le proprietà termofisiche degli elementi dell'involucro edilizio

Per lo svolgimento dei calcoli delle dispersioni termiche e per le analisi energetiche degli edifici è molto importante identificare correttamente i valori delle proprietà termofisiche dei materiali da costruzione e dei manufatti, correntemente riportati in manuali, pubblicazioni tecniche, banche dati dei codici di calcolo. Frequentemente tali valori non sono sufficientemente attendibili o univocamente associabili ai prodotti esistenti sul mercato.

5.1.1 - I Componenti Opachi dell'involucro Edilizio

Si presentano sostanzialmente due diverse situazioni, per quanto riguarda le caratteristiche termoigrometriche degli elementi opachi costituenti l'involucro edilizio: utilizzo di materiali omogenei, ed in questo caso il problema è la scelta appropriata del valore di conduttività termica, ed impiego di strutture complesse, per le quali si parla di resistenza termica dell'elemento. A questo punto si può osservare che la normativa tecnica di settore si manifesta su due fronti differenti proponendo, per lo stesso tema, norme diverse che in parte si sovrappongono e in parte si differenziano. Sono infatti attualmente disponibili sei norme, accoppiate a due a due, che trattano i seguenti temi:

- caratteristiche dei materiali da costruzione: UNI 10351 ed UNI EN ISO 10456;
- murature e solai: UNI 10355 ed UNI EN 1745;
- ponti termici in edilizia: UNI EN ISO 10211 e UNI EN ISO 14683.

Al momento sono pertanto contemporaneamente vigenti norme nazionali e norme europee, le seconde delle quali più recenti. Tuttavia le norme nazionali non sono state ritirate e in un caso specifico, quello della UNI 10351, è stato attivato un lavoro di revisione che dovrà tener conto della più recente normativa comunitaria.. La *Tabella XXII* sottostante riepiloga i titoli delle norme sopraccitate.

Tabella XXII: Elenco delle norme riguardanti le proprietà termofisiche dei materiali

UNI 10351 :1994	Materiali da costruzione. Conduttività termica e permeabilità al vapore.
UNI EN ISO 10456 :2008	Materiali e prodotti per edilizia - Proprietà igrometriche - Valori tabulati di progetto e procedimenti per la determinazione dei valori termici dichiarati e di progetto
UNI 10355 :1994	Murature e solai. Valori della resistenza termica e metodo di calcolo.
UNI EN 1745 :2005	Muratura e prodotti per muratura - Metodi per determinare i valori termici di progetto
UNI EN ISO 10211 :2008	Ponti termici in edilizia - Flussi termici e temperature superficiali - Calcoli dettagliati
UNI EN ISO 14683 :2008	Ponti termici in edilizia - Coefficiente di trasmissione termica lineica - Metodi semplificati e valori di riferimento

. Da un confronto immediato tra le due norme in oggetto (EN 1745 e UNI 10355) alcuni autori (Emmi *et al.* 2008) hanno concluso che la EN 1745 proponendo metodologie più dettagliate e articolate (valori tabellari, valori misurati, metodi di calcolo) consente una maggior affidabilità ai fini del calcolo.

Il tema della corretta valutazione delle proprietà termoigrometriche dei materiali e dei manufatti è di grande importanza: valori non appropriati possono portare a rilevanti errori nei calcoli progettuali, con possibili evidenti conseguenze.

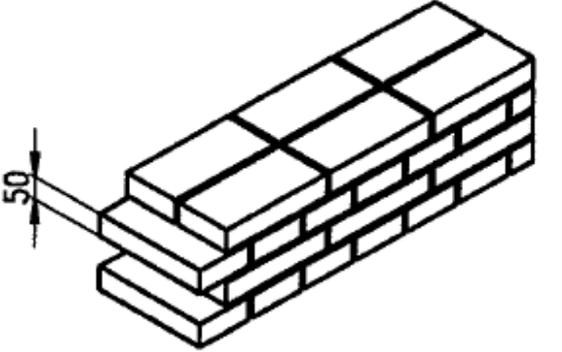
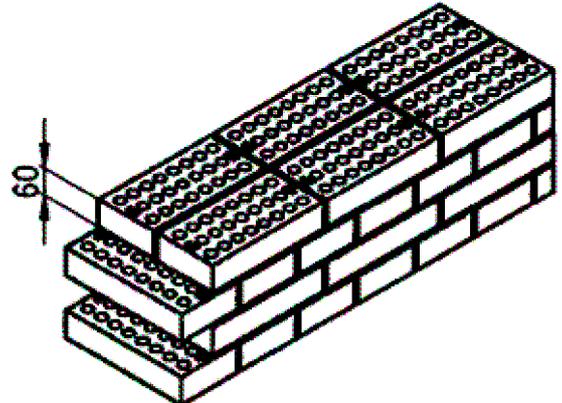
Per le valutazioni energetiche su edifici esistenti, la determinazione del valore corretto di trasmittanza della struttura si effettua a seconda del tipo di informazioni che si hanno a disposizione; in particolare si possono presentare due situazioni.

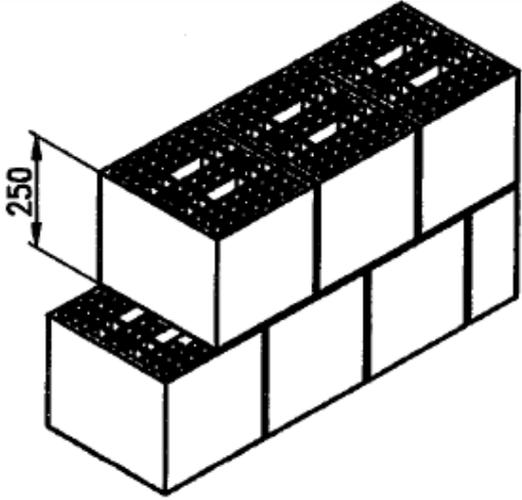
La prima situazione è quella in cui la stratigrafia della struttura sia nota e prevede di utilizzare i valori tabella conduttività o resistenza dei materiali tratti dalle norme di *Tabella XXII* o dalle relazioni di calcolo delle leggi vigenti al momento della costruzione della struttura. Il calcolo è quindi svolto utilizzando la norma UNI EN ISO 6946

La seconda situazione è invece quella in cui non si abbiano informazioni sulla stratigrafia, in questo caso si può procedere secondo due modalità:

- in base alle dimensioni della parete misurata ottenute con misure o sondaggi ed in base al periodo di costruzione della muratura si può stimare la conduttività dei singoli materiali. Infatti la tipologia di materiali da costruzione ha subito variazioni durante la seconda metà del XX secolo, mediamente secondo quanto riportato in Tabella XXV. Il calcolo della trasmittanza sarà poi svolto tramite la norma UNI EN ISO 6946.

Tabella XXV: Evoluzione della tecnologia costruttiva delle pareti perimetrali esterne nelle abitazioni del nord italia

Periodo di costruzione	Tecnologia adottata per le pareti esterne	Immagine
Fino agli anni '50	Mattone pieno	
Dagli anni '60 fino alla fine degli anni '70	Binattone semipieno	

Dagli anni 80 fino 9/10/2005 (D. Lgs 192/05)	Bimattone semipieno o blocchi, con isolamento interno o esterno	
--	---	--

- effettuando misure in opera della trasmittanza della parete tramite l'utilizzo di un termoflussimetro

La misura termoflussimetrica ha lo scopo di determinare la conduttanza dell'intera struttura anche senza conoscerne nel dettaglio le caratteristiche dei vari strati che la compongono.

Il termoflussimetro è uno strumento composto da due serie di sonde per la misura della temperatura interna ed esterna e da una piastra termoflussimetrica che misura il flusso di calore unitario attraverso la parete. Tramite una serie di misurazioni che devono durare almeno 72-96 ore si può calcolare la conduttività dalla media progressiva di ogni singola misurazione. Infatti poiché come indicato al precedente paragrafo 2.1, il flusso di calore e le temperature sono grandezze tra di loro legate dal comportamento dinamico del sistema e quindi non è possibile applicare alle misure istantanee l'equazioni della conduzione in regime stazionario. L'errore di misura è mediamente dell'8% ed è tanto più grande quanto più bassa è la resistenza termica della parete e quanto più alte sono le resistenze di contatto delle sonde. Le modalità con cui la misura è effettuata sono le seguenti:

- scegliere un periodo della stagione di riscaldamento dove la differenza di temperatura tra interno ed esterno sia la maggiore possibile;
- scegliere una parete che non sia investita dalla radiazione solare diretta;
- posizionare la sonda del termoflussimetro sul lato interno della parete in un punto in cui non siano presenti situazioni di disomogeneità strutturale;

- posizionare due sonde di temperatura sul lato interno e due sul lato esterno in modo da ridurre gli errori di disomogeneità della struttura;
- effettuare le misurazioni per almeno 72 ore;
- calcolare la media progressiva della conduttanza tramite la seguente relazione:

$$C = \frac{\int_0^t \varphi(t) \cdot dt}{\int_0^t (T_{si}(t) - T_{se}(t)) \cdot dt} ;$$

- determinare la trasmittanza aggiungendo l'effetto delle resistenze superficiali secondo la seguente relazione:

$$U = \frac{1}{R_{si} + C + R_{se}} .$$

Nella seguente *Figura 47* sono riportati le immagini ed i risultati delle misure per una parete.

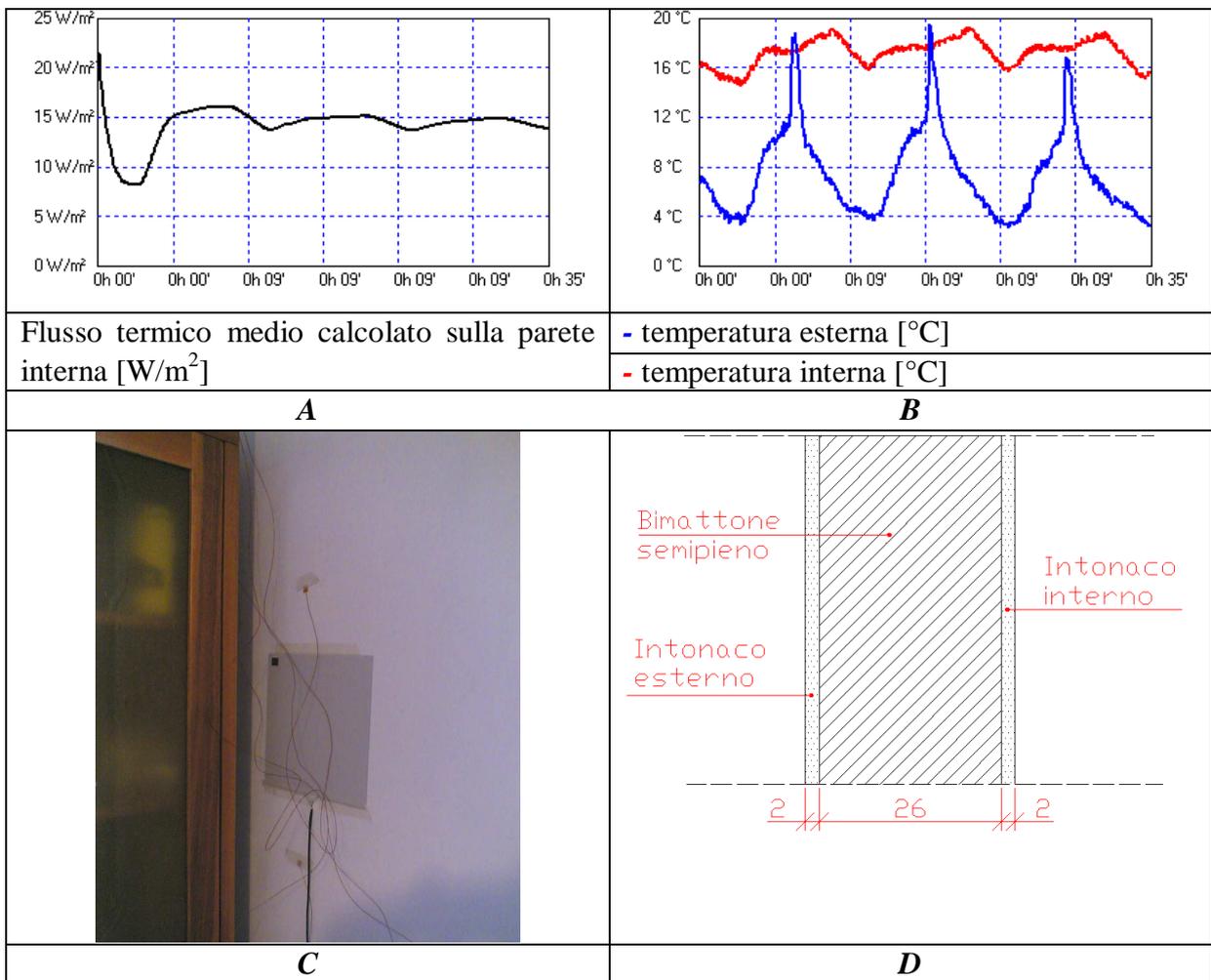


Figura 47 – Flusso termico misurato dalla media progressiva (A), temperature misurate (B), foto della misurazione (C), stratigrafia parete (D).

5.1.2. - I Componenti Vetrati dell’Involucro Edilizio

Il comportamento energetico dei componenti vetrati dell’involucro edilizio dipende dalle caratteristiche di trasmissione termica e solare della vetrata e del telaio.

Il calcolo delle proprietà termica di una vetrata deve essere effettuato secondo normativa ed i valori dichiarati sono riferiti a particolari condizioni al contorno normalizzate riportate in Figura 48. La norma di riferimento è la UNI EN 673:2005 che specifica i metodi di calcolo per determinare la trasmittanza termica delle vetrate.

Come nel caso delle murature, molto spesso le condizioni di effettivo utilizzo di questi componenti si discostano da quelle a cui fanno riferimento i valori dichiarati. Nei calcoli energetici, per ottenere una maggiore accuratezza dei risultati, è quindi necessario far uso dei cosiddetti “valori di progetto”. Nel caso delle vetrate il valore di progetto si ottiene adottando valori di conduttanza delle intercapedini e coefficienti di scambio termico interno ed esterno adatti allo specifico caso ed alle particolari condizioni ambientali. A tal proposito la norma fornisce le relazioni da utilizzare per il calcolo delle conduttanze delle intercapedini ed in appendice C riporta i valori dei coefficienti di scambio termico interni ed esterni per superfici non verticali.

r	resistività termica del vetro sodo-calcico	1,0 m · K/W
ϵ	emissività corretta del vetro sodo-calcico e del vetro borosilicato senza depositi superficiali	0,837
ΔT	differenza di temperatura tra le superfici di vetro esterne	15 K
T_m	temperatura media dell'intercapedine	283 K
σ	costante di Stefan-Boltzmann	$5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$
h_e	coefficiente di scambio termico esterno di superfici di vetro sodo-calcico senza depositi superficiali	23 W/(m ² · K)
h_i	coefficiente di scambio termico interno di superfici di vetro sodo-calcico senza depositi superficiali	8 W/(m ² · K)
A	costante	0,035
n	esponente	0,38

Figura 48 – Condizioni di riferimento per la determinazione della trasmittanza termica delle vetrate (da UNI EN 673:2005)

Il calcolo della trasmittanza del serramento completo viene effettuato mediante le indicazioni riportate all'interno della UNI EN ISO 10077-1:2007 che riporta le relazioni generali da utilizzare, noto il valore della trasmittanza da attribuire al telaio. Ai fini del calcolo è necessario conoscere le proprietà di vetro, telaio e giunti. All'interno della norma vengono forniti anche dei valori di trasmittanza termica dei telai da adottare nei calcoli nel caso in cui il telaio in esame sia assimilabile a quello proposto dalla norma.

La norma sopra citata è completata da una seconda parte che descrive i metodi numerici per il calcolo della trasmittanza dei telai. Tali metodi vengono applicati alle sezioni effettive dei telai consentendo, tramite l'analisi delle linee di flusso e isoterme, di individuare eventuali punti critici dal punto di vista termico presenti nella

sezione del telaio. Da queste analisi si determinano i valori di trasmittanza da associare alla particolare geometria di telaio esaminata, che dipenderà naturalmente dalla conduttività del materiale utilizzato.

Per il calcolo delle proprietà di trasmissione solare e luminosa dell'elemento vetrato la norma da utilizzare è la UNI EN 410:2000. I valori numerici che esprimono tali proprietà vengono utilizzati come base per calcoli di illuminazione, riscaldamento e raffrescamento. La norma porge indicazioni per il calcolo di diversi fattori di trasmissione, ma generalmente, per caratterizzare un elemento ai fini delle analisi energetiche e luminose, è sufficiente la conoscenza di soli due fattori: il “fattore di trasmissione dell'energia solare totale”, chiamato anche “fattore solare” g o *SHGC* (Solar Heat Gain Coefficient), utilizzato nelle analisi energetiche e il “fattore di trasmissione luminosa” (indicato con τ_v). In Tabella XXVIII sono riepilogate le principali norme relative ai componenti vetrati.

Nel caso sia necessario determinare la trasmittanza di una struttura vetrata di cui siano note le tipologie di vetri installati è possibile utilizzare strumenti di calcolo che utilizzando la metodologia della norma UNI EN 410.

Uno di questi è WINDOW5 basato su piattaforma Microsoft Windows e sviluppato dal Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL); esso permette tramite un esteso archivio di componenti di base quali vetrate, gas per intercapedine e tipologie di telai, di calcolare la trasmittanza della vetrata o del serramento. In *Figura 49* è rappresentata una schermata di calcolo della trasmittanza di una vetrata

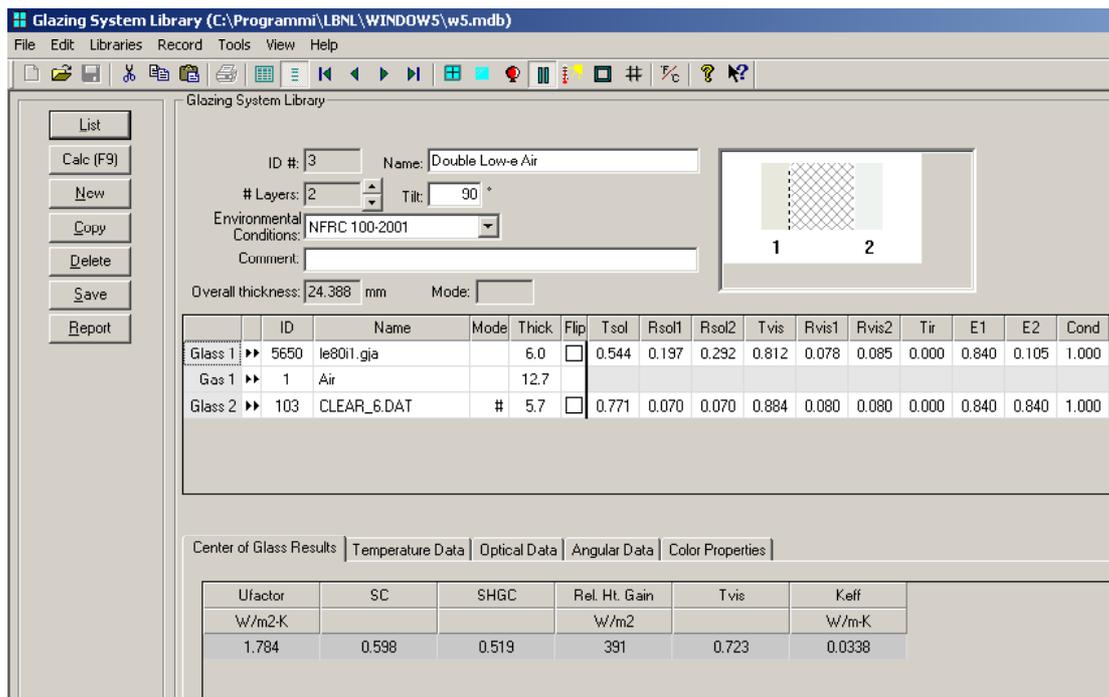


Figura 49 – Schermata di calcolo di WINDOW5 per una vetrata basso emissiva

Tabella XXVIII – Elenco delle norme relative alle proprietà dei componenti vetrati

UNI EN 673:2005	Vetro per edilizia - Determinazione della trasmittanza termica (valore U) - Metodo di calcolo
UNI EN ISO 10077-1:2007	Prestazione termica di finestre, porte e chiusure oscuranti - Calcolo della trasmittanza termica - Parte 1: Generalità
UNI EN ISO 10077-2:2004	Prestazione termica di finestre, porte e chiusure - Calcolo della trasmittanza termica - Metodo numerico per i telai
UNI EN 410:2000	Vetro per edilizia - Determinazione delle caratteristiche luminose e solari delle vetrate
UNI EN 13363-1:2008	Dispositivi di protezione solare in combinazione con vetrate - Calcolo della trasmittanza solare e luminosa - Parte 1: Metodo semplificato
UNI EN 13363-2:2008	Dispositivi di protezione solare in combinazione con vetrate - Calcolo della trasmittanza solare e luminosa - Parte 2: Metodo di calcolo dettagliato

5.2. Le Portate d'Aria di Ventilazione

Anche nel caso dell'individuazione del tasso di rinnovo dell'aria nell'edilizia residenziale vi sono non poche contraddizioni. In ambito normativo è possibile identificare alcuni documenti specifici che illustrano metodi dettagliati ai fini del calcolo delle portate di rinnovo a seconda del tipo di ventilazione adottato come la UNI EN 15241 e la UNI EN 15242, mentre altri che definiscono valori "convenzionali", come la UNI EN 15251, la UNI EN ISO 12831, la UNI TS 11300-1:2008 e le ritirate UNI EN 832:2001 e UNI EN ISO 13790:2005. E'interessante notare che i valori "convenzionali" proposti, variano da norma a norma come rappresentato in *Tabella XXXI*.

Tabella XXXI: Evoluzione normativa dei tassi di ricambio d'aria orari

	UNI TS 11300	R 03/3	EN 832	13790:2005
Abitazione	0,3	0,3	0,5	0,3
Uffici	UNI 10339	UNI 10339	#	15 m3/h persona
Attività commerciali	UNI 10339	UNI 10339	#	15 m3/h persona
Scuole	UNI 10339	UNI 10339	#	15 m3/h persona

La *Tabella XXXIV* riporta i titoli delle norma sopra citate. Come è possibile notare, alcune di esse riguardano strettamente l'ambito della ventilazione degli edifici, mentre altre trattano argomenti più generali oppure differenti.

Tabella XXXIV: Norme contenenti dati sulle portate di rinnovo negli edifici

UNI EN 15241 :2008	Ventilazione degli edifici - Metodi di calcolo delle perdite di energia dovute alla ventilazione e alle infiltrazioni in edifici commerciali
UNI EN 15242 :2008	Ventilazione degli edifici - Metodi di calcolo per la determinazione delle portate d'aria negli edifici, comprese le infiltrazioni
UNI EN ISO 15251 :2008	Criteri per la progettazione dell'ambiente interno e per la valutazione della prestazione energetica degli edifici, in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica
UNI EN ISO 12831 :2006	Impianti di riscaldamento negli edifici - Metodo di calcolo del carico termico di progetto

E' molto importante, come sottolineato in altro lavoro relativi all'argomento (Piterà *et al.*, 2008), fare una distinzione tra valori "convenzionali" e valori stimabili mediante un calcolo appropriato. Nella maggior parte dei casi, infatti, se le norme presentano valori definiti per l'appunto "convenzionali", esse precisano anche che i ricambi d'aria sono necessari per ragioni legate alla tutela della salute negli ambienti interni. La tendenza attuale è quella di considerare i valori di ventilazione "convenzionali" come assicurati indipendentemente dalla tecnica di ricambio dell'aria adottata. In realtà, i fabbisogni (e quindi conseguentemente i consumi) variano sensibilmente, ragionando in termini di pari qualità dell'aria ottenibile, a seconda che si utilizzi l'aerazione, la ventilazione naturale, quella ibrida o quella forzata. E' importante, quindi, non confondere tra i due tipi di informazione forniti dalle norme e sapere utilizzare i metodi di calcolo proposti da quelle vigenti.

Se per esigenze di analisi energetica è necessario stimare i tassi di ricambio d'aria di un edificio occorre suddividere il caso della ventilazione naturale da quella forzata.

Nella ventilazione naturale di edifici sia nuovi che esistenti non esistono misure sperimentali che siano in grado di definire l'effettivo tasso di ricambio. Anche il Blower Door Test che definisce un tasso di ventilazione corrispondente ad una pressurizzazione interna del locale di 50 Pa, può dare un'indicazione solo approssimativa del tasso effettivo di ventilazione. Una valutazione si può ottenere dividendo il valore misurato per una costante che approssimativamente vale 20 (Sherman, M.H. 1987).

Nel caso in cui sia invece presente un sistema di ventilazione forzata è possibile ottenere direttamente la portata d'aria o dalle caratteristiche di targa del ventilatore o da misure di portata realizzate con appositi strumenti quali ad esempio anemometri a filo caldo o a ventola. Se il sistema di ventilazione è dotato di un recuperatore, occorrerà tener conto di questo nel calcolo dell'energia recuperata. I rendimenti dei recuperatori sono in genere forniti dai costruttori e possono variare dal 50-60% per i recuperatori a flusso incrociato fino all'80-90% per i recuperatori in controcorrente

5.3 Gli apporti gratuiti di energia

I carichi termici interni utilizzati, sia nei metodi quasi stazionari che in quelli dinamici, hanno un peso molto importante nella determinazione del fabbisogno energetico dell'edificio poiché, sommati ai carichi solari, contribuiscono a compensare le dispersioni per trasmissione e ventilazione. Le norme che si sono susseguite, dalla comparsa negli anni '80 dei metodi quasi stazionari, hanno modificato i valori assunti per le varie categorie di edifici. E' importante tenere presente questo per capire le eventuali differenze che si possono notare quando, con strumenti informatici diversi, si analizza lo stesso edificio poiché, a seconda della modalità di assegnazione dei carichi interni, si possono osservare cambiamenti particolari all'aumentare, per esempio, delle dimensioni dell'edificio o al cambio di località.

Dopo la UNI EN 832 del 2001, che forniva un'indicazione di 5 W/m^2 in mancanza di dati più precisi, la raccomandazione CTI R 03/3 indicava la seguente relazione per i carichi interni nelle abitazioni, in funzione della superficie.

$$q_i = 6.25 - 0.02S \quad (\text{W/m}^2) \quad \text{fino a } 200 \text{ m}^2$$

$$Q_i = 450 \quad (\text{W}) \quad \text{oltre i } 200 \text{ m}^2.$$

Un'ulteriore differente indicazione, pari a 4 W/m^2 era contenuta nella UNI EN 13790:2005.

Nel 2008 è stata pubblicata la norma UNI TS 11300 che sostituisce le raccomandazioni CTI e fornisce una nuova relazione di calcolo, di seguito espressa.

$$Q_i = 5,294 \cdot S - 0,01557 \cdot S^2 \quad (\text{W}) \quad \text{fino a } 170 \text{ m}^2$$

$$Q_i = 450 \quad (\text{W}) \quad \text{oltre i } 170 \text{ m}^2.$$

Nel grafico in *Figura 50* è rappresentato un confronto fra le varie metodologie di calcolo che si sono susseguite nelle norme di questi ultimi anni. Come si può notare le

raccomandazioni CTI e le UNI TS, per edifici di superficie maggiore di 300 m², danno lo stesso valore di apporto interno, ma non vi è univocità nel considerare superficie utile e superficie lorda come riferimento per gli apporti energetici.

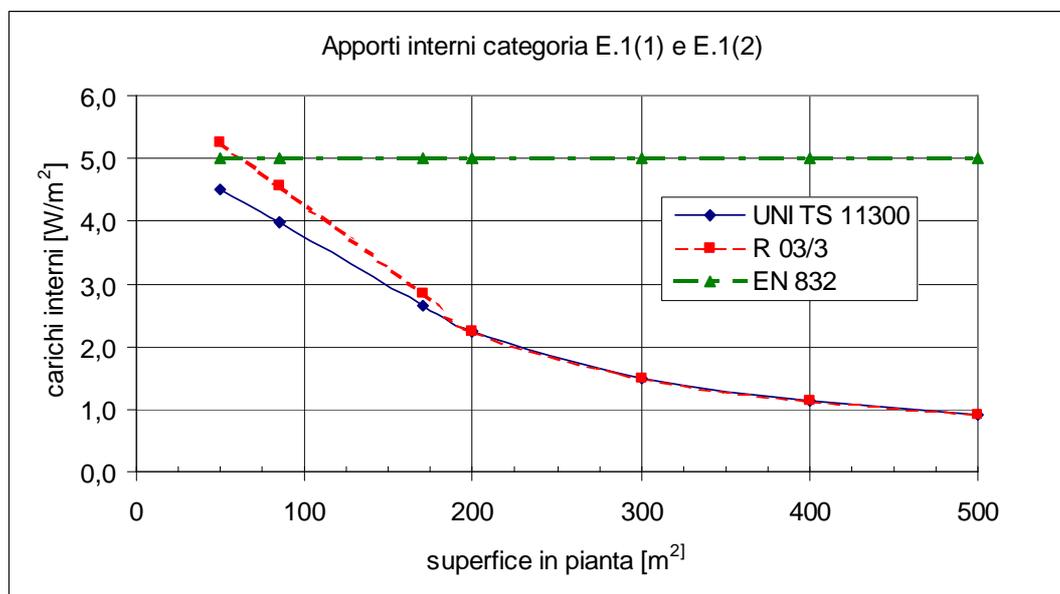


Figura 50–Confronto tra varie modalità di calcolo dei carichi termici per abitazioni

Note: 1) Riferito alla superficie netta

2) Riferito alla superficie lorda

E' importante rendersi conto delle modalità con cui vengono determinati i valori attribuiti a questo parametro, in modo da poter valutare correttamente i risultati prodotti dalle varie procedure di calcolo, In particolare quando di eseguono analisi energetiche su edifici esistenti in cui spesso i dati reali possono essere molto diversi da quelli di norma (vedi ad esempio paragrafo 6.4.2.).

5.4 I Dati Climatici

I dati ambientali necessari per calcolare i consumi pregressi degli edifici sia con modelli dinamici che con modelli quasi-statici, sono le temperature dell'aria esterna e l'irraggiamento diretto e diffuso sulla superficie orizzontale. Nel metodo dinamico generalmente questi dati devono avere un intervallo orario mentre nel metodo quasi-statico hanno un intervallo mensile o in alcuni casi stagionale. Per ottenere questa informazione si possono adottare due metodi: utilizzare i rilievi orari di una stazione meteo prossima all'edificio da studiare la quale sia dotata anche del sensore di radiazione solare, oppure utilizzare i rilievi giornalieri raccolti da qualche ente (rete agrometeorologica nazionale o agenzia regionale per la protezione ambiente, Arpa). Ad esempio Arpa Veneto fornisce gratuitamente per le località monitorate uno storico dei due mesi precedenti alla data di rilevazione. Nel caso in cui si disponga dei valori giornalieri di temperatura, umidità e irraggiamento solare globale sono necessarie due diverse procedure di elaborazione a seconda della procedura di calcolo utilizzata, o come riportato schematicamente in *Tabella XXXVII*.

Tabella XXXVII - Principali elaborazioni necessarie per tipologia di calcolo, partendo da dati medi giornalieri

Metodo	Temperatura	Irraggiamento globale
Dinamico	Ricostruzione profilo orario	Scomposizione componente diretta e diffusa e ricostruzione profilo orario
Quasi-statico	Media mensile	Scomposizione componente diretta e diffusa, calcolo media mensile e calcolo per i principali orientamenti

5.4.1. Origine dei dati di temperatura e irraggiamento solare

I dati climatici disponibili a livello nazionale derivano da rilievi risalenti ai decenni che vanno dal 1951 al 1970. Da questi dati sono stati ricavati "anni tipo" composti da "mesi tipo"; i mesi tipo sono stati individuati all'interno della serie di dati come quelli che hanno un valore medio che più si avvicina alla media

dell'intera serie per quel mese. Questi dati comprendono i valori di temperatura, umidità e di irraggiamento solare totale sul piano orizzontale, a sua volta scomposto su base oraria nella sua componente diretta e diffusa tramite gli algoritmi di Liu-Jordan (1960) e di Collares-Pereira e Rabl (1979). Questa serie di dati, nota come "Dati climatici G. De Giorgio", è quella che attualmente viene utilizzata per le simulazioni dinamiche nel territorio italiano.

A seguito della pubblicazione della legge 10/91 sono state emanate alcune norme tra cui la UNI 10349 che riporta i valori medi mensili di temperatura e irraggiamento. Confrontando le temperature medie mensili ricavate dalla norma UNI 10349 e quelle che è possibile ricavare dalle serie climatiche orarie dell'anno tipo si può osservare che i valori non sono coincidenti.

Al solo fine di dare un'informazione sulla variabilità recente delle condizioni climatiche si riportiamo come esempio le temperature medie mensili degli anni 2005, 2006 e 2007 per Padova, confrontate con i valori medi per la stessa località indicati nella norma UNI 10349:1994 (vedi *Figura 51*). Si osserva come le medie mensili invernali sono più alte mentre quelle estive sono abbastanza simili.

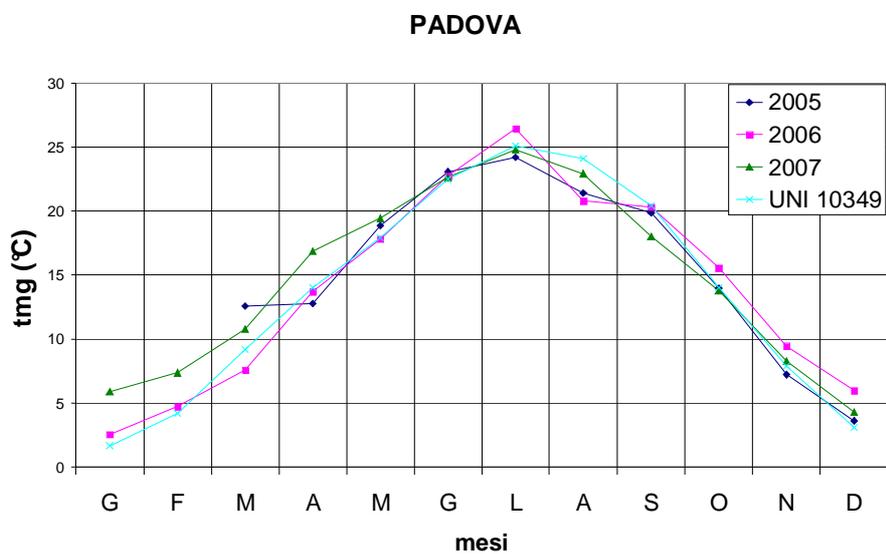


Figura 51 – Confronto tra le temperature medie mensili di Padova riferite agli anni 2005, 2006, 2007, e le temperature medie mensili della UNI 10349

Attualmente è stato attivato, all'interno dell'UNI, un Comitato Tecnico per l'aggiornamento delle normative sui dati climatici da utilizzare nel calcolo del fabbisogno energetico e di progetto (Gruppo di Lavoro 09 del Gruppo Consultivo 102) in modo da fornire per ogni località dei valori di riferimento definiti a livello orario idonei per essere utilizzati anche in programmi di simulazione di tipo dinamico.

Affinché i calcoli ottenuti con il metodo dinamico siano confrontabili con gli analoghi del metodo quasi stazionario occorre che i dati climatici utilizzati siano coerenti. Se i dati climatici messi a disposizione dalla normativa fossero definiti con intervallo orario, il confronto tra i due metodi sarebbe semplice: sarebbe infatti sufficiente ricavare le medie mensili per le temperature e l'irraggiamento solare diretto e diffuso e utilizzare questi dati nel metodo semi-statico mensile.

Poiché attualmente l'utilizzo di metodi dinamici si sta sempre più diffondendo nelle applicazioni professionali, anche per il maggiore numero di software disponibili sia commerciali che freeware (TRNSYS, EnergyPlus, ecc), appare utile fornire indicazioni per ricavare, partendo dai dati climatici della normativa, adeguate sequenze di valori per l'applicazione dei metodi dinamici.

Confrontando i valori medi delle temperature e dell'irradiazione media giornaliera sul piano orizzontale ricavati dalla serie "De Giorgio" con quelli indicati dalla norma UNI 10349 si notano delle differenze, come è possibile osservare dai grafici riportati in *Figura 52*: si può osservare che in genere la temperatura indicata nei dati UNI è sempre maggiore rispetto alla media mensile dei valori orari. Le differenze di temperatura vanno da 0,5 a 1 °C all'interno del periodo di riscaldamento invernale, mentre sono più rilevanti nel periodo estivo.

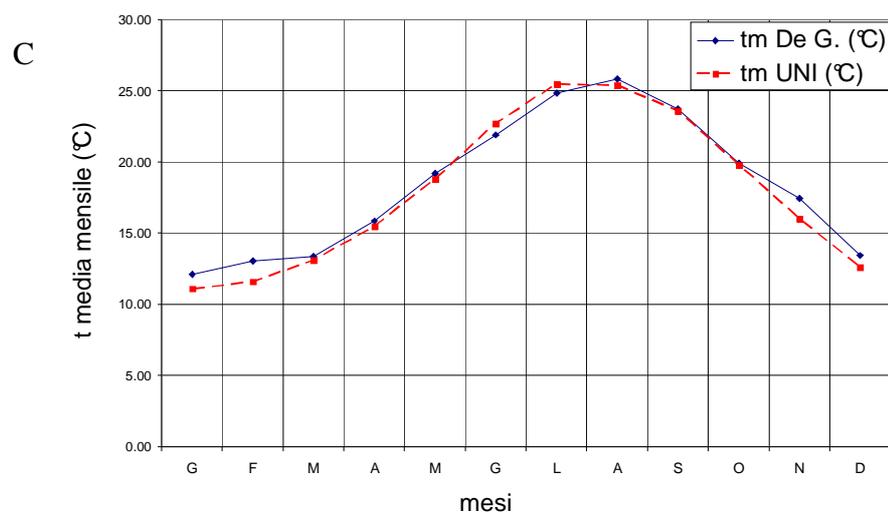
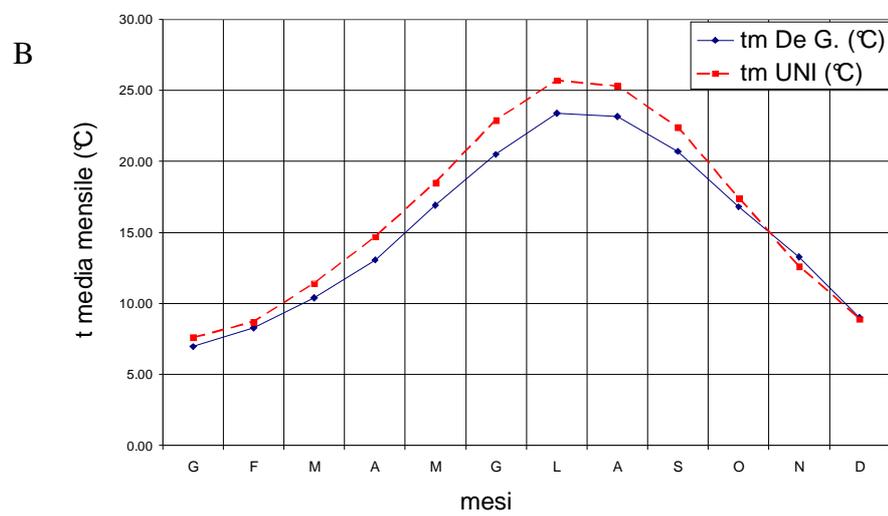
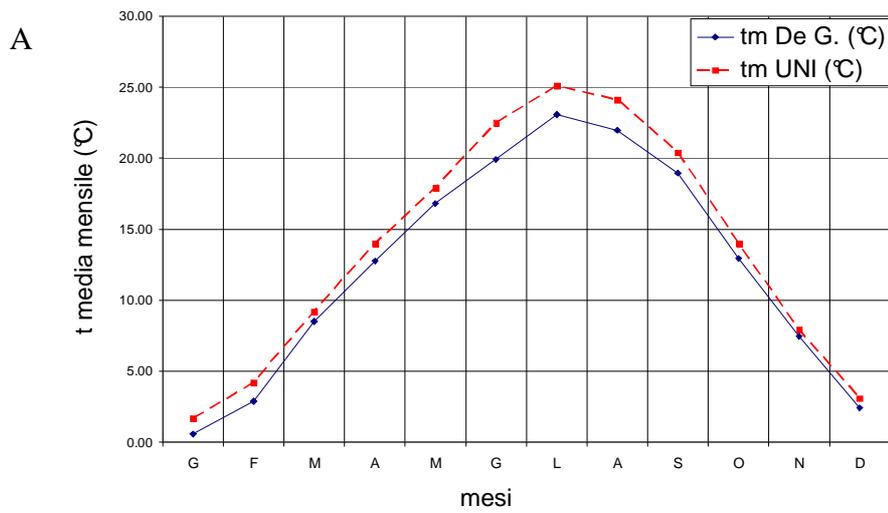
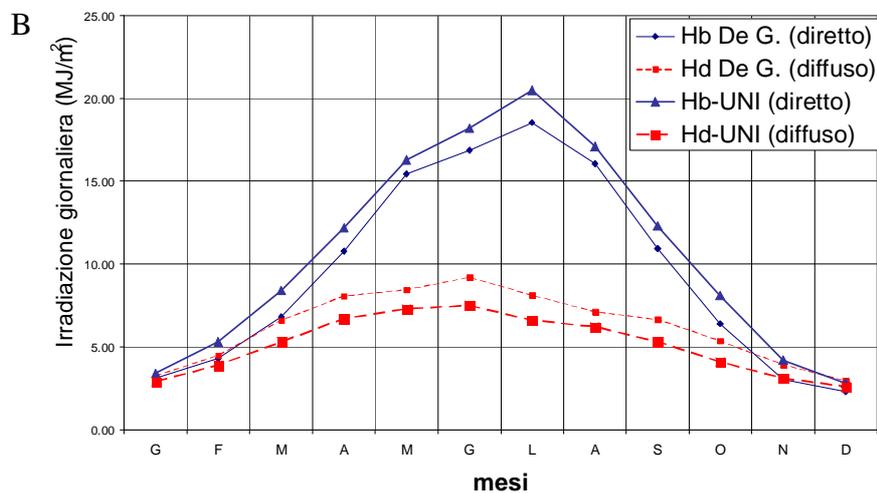
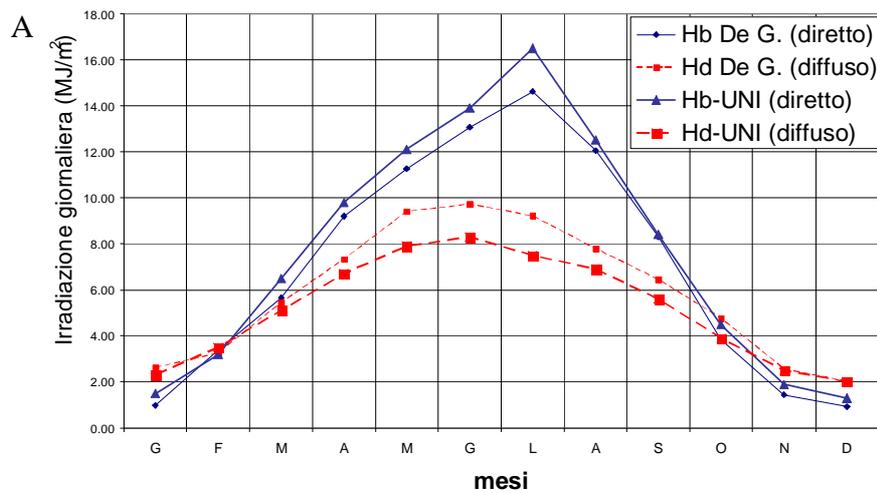


Figura 52– Confronto tra le temperature medie mensili dei dati “De Giorgio” e i rispettivi valori della norma UNI 10349 A: Milano - B: Roma - C: Palermo

Relativamente invece ai valori dell'irraggiamento, pur essendo i valori globali dell'irradiazione giornaliera sul piano orizzontale quasi identici su base annuale, i valori per i singoli mesi dei dati UNI e "De Giorgio" differiscono tra loro. Si osserva che nelle norme UNI l'irradiazione diretta è maggiore, mentre l'irradiazione diffusa è minore rispetto ai dati "De Giorgio". Sono di seguito riportati (vedi *Figura 53*) i grafici di confronto per Milano, Roma e Palermo, che evidenziano questa differenza.



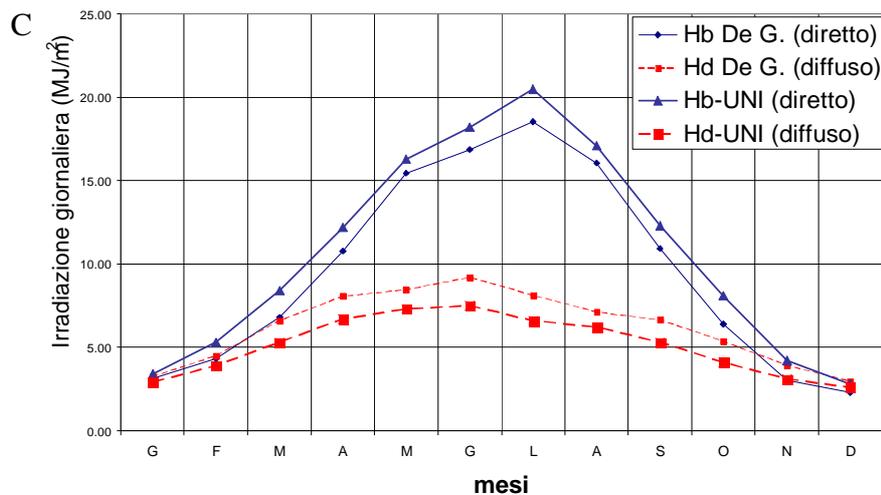


Figura 53 – Confronto irradiazione da UNI 10349 e da dati “De Giorgio” per diverse località italiane. A: Milano - B: Roma - C: Palermo

5.4.2 Profilo orari della Temperatura a Partire dai Valori Giornalieri

I dati di partenza consistono nella rilevazione delle temperature minima, media e massima giornaliera della località che ospita l’edificio. Dalla conoscenza di tali dati si possono ricostruire dei profili di temperatura realistici per ciascun giorno tali da mantenere i valori di temperatura minima, media e massima. Mediante tale assunzione la differenza tra la temperatura esterna reale e la temperatura esterna ricostruita diventa trascurabile rispetto alla differenza di temperatura tra interno ed esterno, che costituisce la forzante principale del sistema edificio-impianto. Tale approssimazione potrebbe dare origine a significativi errori se la differenza tra temperatura esterna e temperatura interna fosse esigua. Tale condizione non rappresenta un problema, dal momento che in tali situazioni il sistema è tenuto a intervenire assai di rado nell’arco della giornata, pertanto anche il conseguente scostamento nella valutazione energetica risulta trascurabile.

Nel seguito si descrive brevemente l’elaborazione del profilo giornaliero della temperatura. In breve, esso deriva dalla definizione di una funzione periodica che determina il profilo termico esterno con cadenza oraria. Inoltre, si è assunto che l’integrale della prima semionda relativa ai valori sotto la media coincida con

l'integrale della semionda contenente valori superiori alla temperatura media giornaliera. In tal modo, posti

$$A_1 = \theta_{\text{Ext,Max}} - \theta_{\text{Ext,Av}} \quad A_2 = \theta_{\text{Ext,Av}} - \theta_{\text{Ext,Min}} \quad (1)$$

è possibile calcolare i periodi delle due semionde:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\omega_i = \frac{2\pi}{T_i} \right)_{i=1,2} \\ T_1/2 + T_2/2 = 24 \\ \int_0^{T_1/2} A_1 \sin \omega_1 t = \int_0^{T_2/2} A_2 \sin \omega_2 t \Rightarrow -A_1 \cos(\omega_1 t) \frac{1}{\omega_1} \Big|_0^{T_1/2} = -A_2 \cos(\omega_2 t) \frac{1}{\omega_2} \Big|_0^{T_2/2} \Rightarrow \\ \Rightarrow \frac{A_1}{\omega_1} = \frac{A_2}{\omega_2} \Rightarrow A_1 \cdot T_1 = A_2 \cdot T_2 \Rightarrow \left(T_i = 48 \cdot \frac{A_j}{A_j \cdot A_i} \right)_{\substack{j=1,2 \\ j=3-(-1)^i}} \end{array} \right. \quad (2)$$

La temperatura massima viene imposta alle ore 16:00, mentre l'ora del giorno in cui si verifica la temperatura minima è funzione dei valori minimi, medi e massimi della temperatura.

Dunque, l'algoritmo risultante assegna i seguenti valori di temperatura a ciascuna ora del giorno:

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta_{\text{Ext},i} = \theta_{\text{Ext,Av}} + A_1 \cdot \sin \left(\frac{2 \cdot \pi}{T_1} \cdot \left(t_i - \left(16 - \frac{T_1}{4} \right) \right) \right) \text{ per } 16 - T_1/4 < t_i < 16 + T_1/4 \\ \theta_{\text{Ext},i} = \theta_{\text{Ext,Av}} + A_2 \cdot \sin \left(\frac{2 \cdot \pi}{T_2} \cdot \left(t_i - \left(16 - \frac{T_2}{4} \right) \right) \right) \text{ per } t_i < 16 - T_1/4 \text{ o } t_i > 16 + T_1/4 \end{array} \right. \quad (3)$$

Ne consegue un profilo di temperatura simile a quello rappresentato in *Figura 54*.

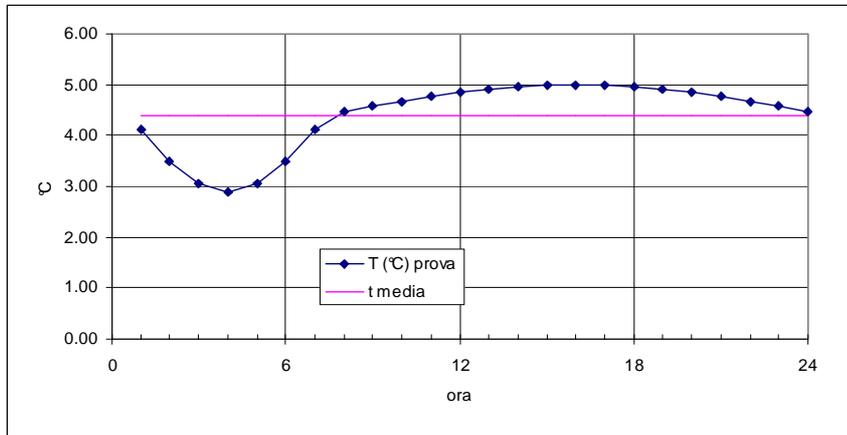


Figura 54 - Esempio di ricostruzione del profilo di temperatura oraria partendo dai valori minimi, massimi e medi giornalieri

5.4.3 Separazione della Componente Diretta e Diffusa nella Radiazione Solare

Nei periodi in cui è disponibile il rilievo orario o giornaliero dell'irradiazione globale giornaliera sul piano orizzontale è possibile eseguire la scomposizione della componente diffusa della radiazione solare dal valore globale utilizzando la relazione (6) di Liu-Jordan (1960):

$$H_{h0} = \left(\frac{24 \cdot 3600 \cdot 10^{-6}}{\pi} \right) G_0 \left(1 + 0,0334 \cos \left(\frac{\omega_s 2\pi}{365,25} - 0,048869 \right) \right) \left(\sin \delta \cdot \sin \varphi \cdot \frac{2\pi\omega_s}{360} + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \sin \omega_s \right) \quad (4)$$

$$H_d = \left(0,881 - 0,972 \frac{H}{H_{h0}} \right) H \quad (5)$$

$$r_d = \frac{I_{d,h}}{H_d} = \frac{\pi}{24} \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \omega_s \cos \omega_s} \quad (6)$$

dove:

- G_0 costante solare;
 H irradiazione globale giornaliera sul piano orizzontale;
 H_{h0} irradiazione extraterrestre sul piano orizzontale
 $I_{d,h}$ irradiazione solare oraria diffusa sul piano orizzontale;
 H_d irradiazione diffusa giornaliera sul piano orizzontale;
 ω_s l'angolo in radianti del tramonto solare;
 ω l'angolo che rappresenta la posizione del sole alle varie ore del giorno (nullo a mezzogiorno, positivo al mattino e negativo al pomeriggio).

5.4.4 Profili Orari dell'Irraggiamento Solare a partire dai Valori Giornalieri

I valori orari della radiazione solare devono essere stimati a partire da dati giornalieri. La procedura utilizzata si basa sull'algoritmo di Collares-Pereira e Rab; in esso la radiazione solare totale giornaliera incidente sul piano orizzontale viene distribuita lungo l'arco della giornata mediante 2 coefficienti:

- il rapporto tra radiazione diffusa oraria e radiazione diffusa giornaliera calcolato con la relazione (6)
- il rapporto tra la radiazione totale oraria e radiazione totale giornaliera:

$$r_g = (a + b \cdot \cos(\omega)) \cdot r_d \quad (7)$$

con

$$a = 0.409 + 0.5016 \cdot \sin\left(\omega_s - \frac{\pi}{3}\right) \quad (8)$$

$$b = 0.6609 - 0.4767 \cdot \sin\left(\omega_s - \frac{\pi}{3}\right) \quad (9)$$

A sua volta l'angolo al tramonto si determina con la relazione sotto riportata:

$$\omega_s = ar \cos(-\tan \phi \tan \delta) \quad (10).$$

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{\pi 360(284 + ng)}{180 \cdot 365} \right]$$

dove:

- ng numero di giorno progressivo dell'anno
- δ declinazione angolare (angolo tra il raggio solare e il piano equatoriale);
- ϕ latitudine della località.

In questo modo risulta possibile ottenere le componenti diretta e diffusa orarie sul piano orizzontale:

$$H_{d,h,Pd} = r_d \cdot H_{d,g,Pd} \quad (11)$$

$$H_{h,Pd} = r_g \cdot H_{g,Pd} \quad (12)$$

$$H_{b,h,,Pd} = H_{g,Pd} - H_{d,g,Pd} \quad (13)$$

5.4.5 Irraggiamento Medio Mensile sugli Orientamenti Principali

Per la procedura quasi statica è necessario calcolare il valore dell'irraggiamento giornaliero medio mensile sugli orientamenti principali: nord, sud, est e ovest, sud-est e sud-ovest, nord-est e nord-ovest: Per eseguire questa operazione si può utilizzare la procedura descritta nella norma UNI 8477-1:1983.

Dal Prospetto I della norma si ricava la declinazione media mensile del sole δ , in funzione della latitudine, l'angolo orario medio mensile del tramonto astronomico ω_s e il valore medio mensile dell'irraggiamento solare orizzontale extra atmosferico H_{ho} . Da questi si può calcolare il valore della componenti diretta e diffusa che saranno uguali per tutte le orientazioni.

Per ottenere la componente su una superficie con orientamento γ , occorre calcolare le seguenti funzioni intermedie:

$$T = \cos \delta (\sin \varphi \cos \beta - \cos \varphi \sin \beta \cos \gamma) \quad (14)$$

$$U = \cos \delta (\cos \varphi \cos \beta + \sin \varphi \sin \beta \cos \gamma) \quad (15)$$

$$V = \cos \delta (\sin \beta \sin \gamma) \quad (16)$$

$$T_h = \sin \delta \sin \varphi \quad (17)$$

$$U_h = \cos \delta \cos \varphi \quad (18)$$

Grazie a queste si ottengono gli angoli orari dell'apparire e scomparire del sole ω' e ω'' , corrispondenti sul piano orizzontale agli angoli $-\omega_s$ e ω_s , angoli orari del sorgere e tramonto astronomico.

Definiti ω_1 e ω_2 gli angoli orari delle due intersezioni della radiazione solare con il piano della superficie in questione, essi si calcolano tramite:

$$\operatorname{tg} \frac{\omega}{2} = \frac{-V \pm \sqrt{U^2 + V^2 - T^2}}{T - U} \quad (19)$$

Dove ω_1 il valore corrispondente al comparire del sole, deve risultare:

$$V \cos \omega_1 > U \sin \omega_2$$

Nel caso la (19) abbia radici complesse, ovvero: $U^2 + V^2 - T^2 \leq 0$ si possono presentare 2 casi:

- $T + U > 0$, ovvero la superficie è esposta su tutto l'arco del percorso del sole e quindi:

$$\omega' = -\omega_s$$

$$\omega'' = \omega_s$$

- $T + U < 0$, in questo caso la superficie non è mai esposta su tutto l'arco del percorso del sole.

Nel caso invece in cui la (19) abbia radici reali, ovvero: $U^2 + V^2 - T^2 \geq 0$, allora ω' sarà uguale al minore in modulo tra ω_1 e $-\omega_s$ e ω'' sarà uguale al minore tra ω_2 e ω_s . In *Figura 55* è riportata un sintesi tratta dalla norma di tutti i casi che si possono presentare

E' possibile a questo punto trovare il valore lungo l'orientazione voluta della componente diretta:

$$H_b = G_0 \left[T \frac{\pi}{180} (\omega'' - \omega') + U (\sin \omega'' - \sin \omega') - V (\cos \omega'' - \cos \omega') \right] \quad (20)$$

E il valore H_{bh} sul piano orizzontale senza ostruzioni:

$$H_{bh} = \left(T_h \frac{\pi}{180} \omega_s + U_h \sin \omega_s \right) \quad (21)$$

Da cui:

$$R_b = H_b / H_{bh} \quad (22)$$

Sapendo che $R = H / H_h$ può essere approssimato con la seguente:

$$R = \left(1 - \frac{H_d}{H_h} \right) R_b + \frac{H_d}{H_h} \frac{1 + \cos \beta}{2} + \rho \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (23)$$

Si ottiene la componente H dell'irraggiamento sulla superficie voluta.

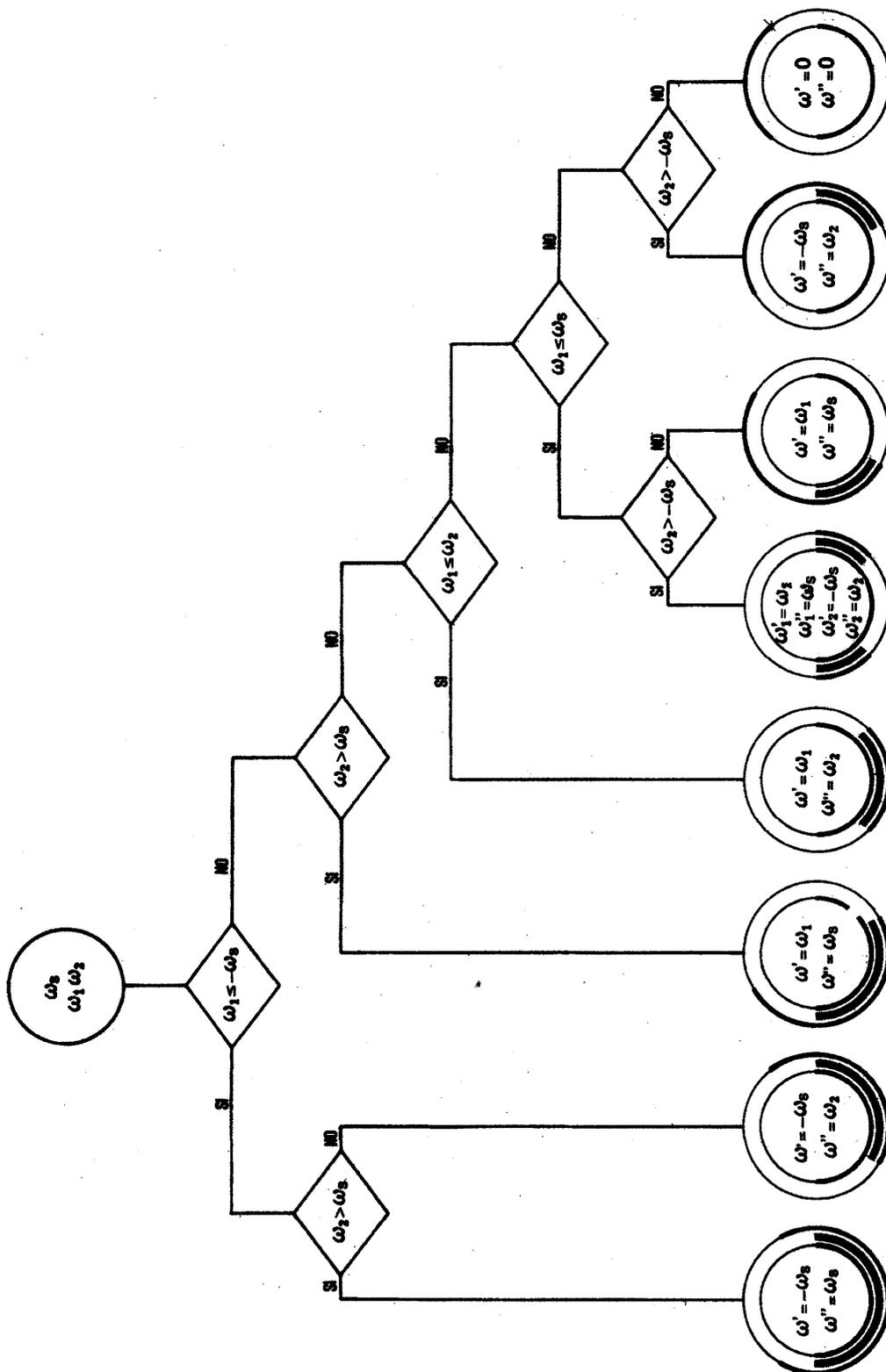


Figura 55 – Diagramma di flusso per il calcolo dell'irraggiamento su vari orientamenti (da UNI 8477-1:1983).

5.4.6 Costruzione dei dati climatici per simulazioni dinamiche coerenti con la norma UNI

Dovendo confrontare tra loro calcoli del fabbisogno energetico realizzati sia con metodi di simulazione oraria che con metodi semi-stazionari mensili, è necessario avere dati climatici di ingresso coerenti. Le analisi su base oraria e su base mensile devono avere gli stessi valori medi mensili di temperatura e la stessa irradiazione media giornaliera. Tutti i programmi per il calcolo del fabbisogno energetico di riscaldamento secondo le prescrizioni di legge, utilizzano il metodo di calcolo quasi stazionario con intervallo di calcolo mensile, mentre i metodi di maggior precisione sono di tipo dinamico con intervallo di calcolo orario. I valori medi mensili di temperatura e irradiazione dei file climatici orari non coincidono con i corrispondenti valori della norma UNI; per cui, visto che i dati delle località inseriti negli strumenti informatici molto spesso non sono modificabili, si rende necessario costruire un file di dati climatici che mantenga l'uguaglianza dei valori medi mensili rispetto alla norma. Per realizzare questo si possono utilizzare metodi diversi.

Una prima metodologia consiste nel ricostruire, tramite i valori medi mensili di temperatura, l'andamento orario della stessa durante tutti i giorni del mese ipotizzando un andamento sinusoidale con un valore minimo fissato ad una determinata ora della giornata. La temperatura media giornaliera viene fatta variare linearmente da un mese all'altro attribuendo la temperatura media mensile al giorno a metà del mese. La temperatura impostata a metà mese viene corretta in modo tale da mantenere il valore medio mensile pari a quello della norma. L'escursione giornaliera, in prima approssimazione, viene mantenuta costante per tutti i giorni dell'anno.

L'andamento orario dell'irraggiamento diretto e diffuso durante le ore del giorno viene ricostruito dal valore medio giornaliero per ogni mese, utilizzando gli algoritmi di Collares-Pereira e Rabl (1979) per la radiazione globale:

Si riporta in *Figura 56* un esempio di andamento della temperatura oraria e media per l'intero anno ricostruita secondo la modalità sopra esposta.

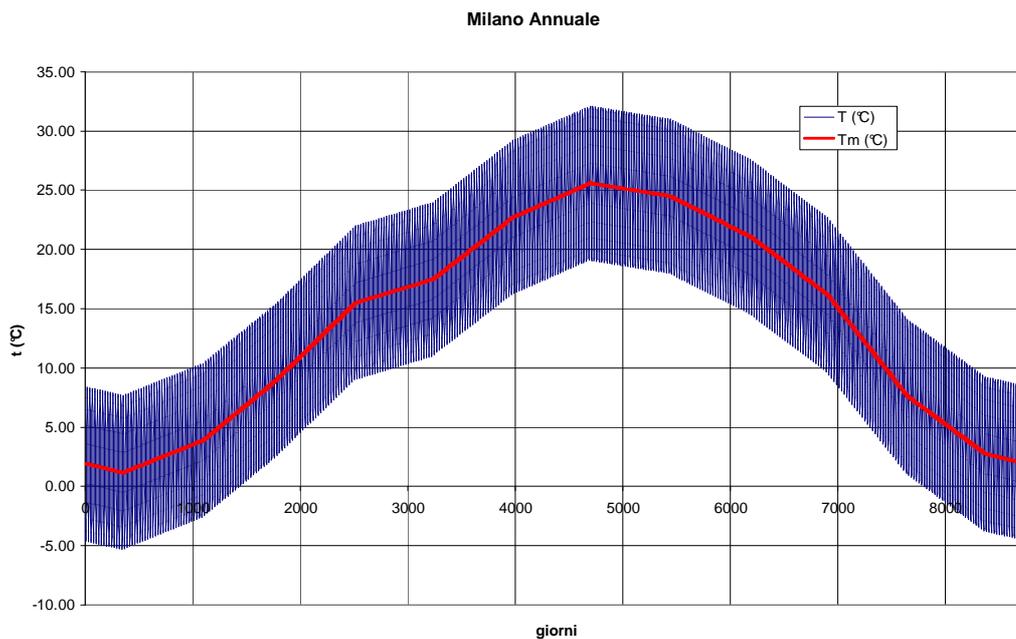


Figura 56 – Andamento medio giornaliero e istantaneo della temperatura per Milano

Il valore dell'irradiazione giornaliera è mantenuto costante all'interno del mese e pari a quello della norma, per cui tra il primo e l'ultimo giorno variano solo i valori dell'angolo orario al sorgere e tramontare del sole. Nella successiva Figura 57 è riportata la ricostruzione dell'irradiazione per un giorno tipo dell'anno.

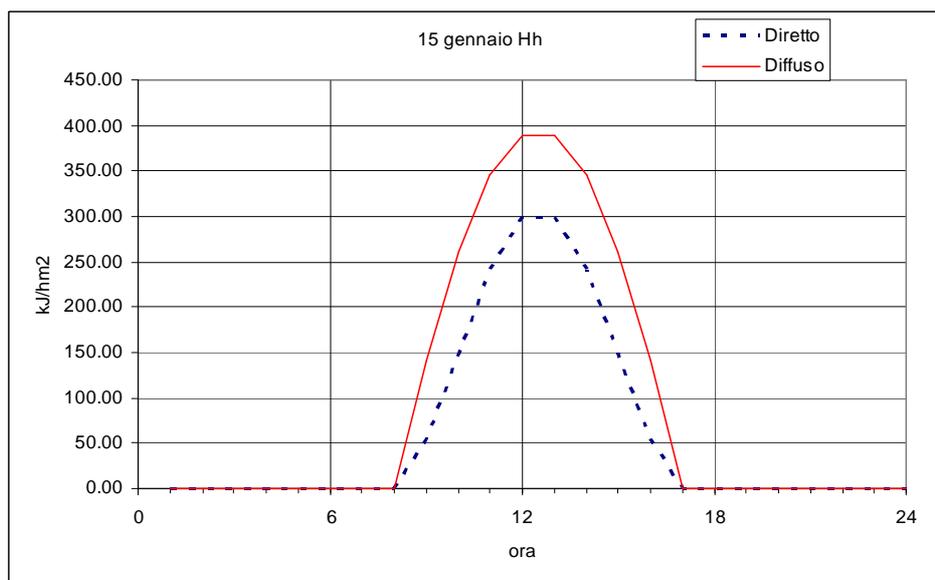


Figura 57 – Ricostruzione dell'andamento istantaneo dell'irradiazione su superficie orizzontale

La seconda modalità di ricostruzione consiste semplicemente nel modificare il valori dei dati climatici “De Giorgio” in modo tale che i valori medi di temperatura e irradiazione coincidano con quelli mensili della norma. Calcolata quindi la media mensile per la località scelta e confrontata con quella della norma UNI, è stata determinata la differenza di temperatura da sommare ad ogni valore orario della serie. Poiché in questo caso la simulazione verrà realizzata su una località con periodo di riscaldamento che inizia e finisce il giorno 15 del mese; è stata introdotta nella procedura una condizione per cui nei mesi di inizio e fine della stagione di riscaldamento, sono normalizzati rispetto ai valori medi della norma UNI solo i giorni interessati al periodo. Per l’irradiazione è stato calcolato il rapporto tra l’irradiazione giornaliera media mensile calcolata dai dati orari e quella della norma; il rapporto ottenuto diventa un coefficiente moltiplicativo per tutti i valori orari del mese. A titolo di esempio, in *Figura 58* si riporta l’andamento della temperatura oraria originaria e normalizzata per il mese di gennaio per la località di Milano.

Con le due sequenze di dati climatici così ottenute sono state effettuate simulazioni mediante il software TRNSYS sull’edificio campione predisposto da AiCARR ai fini del confronto dei codici di calcolo relativi alla Legge 10/91. Le due simulazioni differivano solo per il file dei dati climatici mentre tutti gli altri dati erano uguali.

Il risultato è riportato in *Tabella XL*. Non è stato analizzato in questa sede il comportamento estivo, che probabilmente mostrerà maggiori differenze nei risultati.

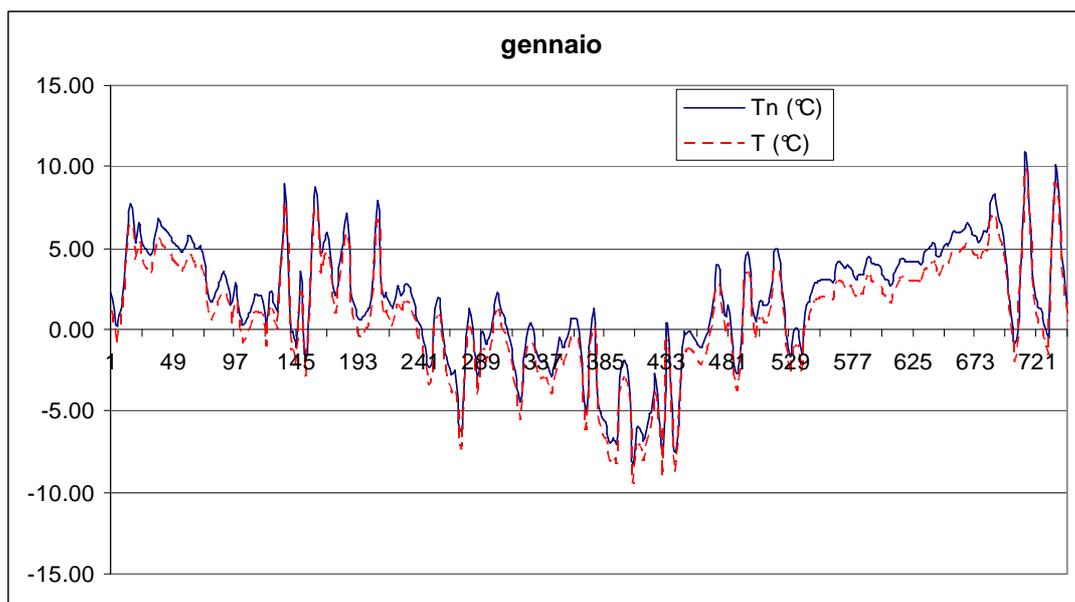


Figura 58 – Confronto tra le temperature oraria prima e dopo la normalizzazione per la località di Milano

Tabella XL - Confronto tra le sequenze di dati climatici orari

N	File clima	F.E. invernale (kJ/anno)	E.P.i (kWh/m² y)
1	Sinusoidale da UNI 10349	16,846,047	72.1
2	"De Giorgio" normalizzato"	18,027,611	77.2

Come si può notare, la stessa simulazione fatta con i due file climatici, con determinate condizioni al contorno non rilevanti in questa sede di confronto, ha portato ad una differenza nei risultati di circa 5 kWh/(m²a), pari a circa 7%.

5.5 Conoscenze Fisiche sui Cambiamenti Climatici

Allo studio del clima non si può applicare il metodo sperimentale nel senso che non si può prendere un pianeta, buttargli dentro CO₂ e H₂O e vedere cosa succede. E' possibile solo osservare quanto succede e trarne delle considerazioni. La prima considerazione è che il clima sta cambiando, ma per capire chi faccia cambiare il clima e se l'uomo ne sia una delle cause bisogna capire come funziona il sistema climatico senza l'uomo. Poiché i dati climatici misurati con il termometro risalgono al massimo a 150 anni fa e quindi in un periodo in cui c'era già l'effetto dell'uomo sul sistema climatico, occorre avere informazioni in periodi precedenti.

In base a rilievi di dendrocronologia o su isotopi contenuti nei resti di organismi nei fondali marini si è potuto ricostruire l'andamento della temperatura degli ultimi 2000-3000 anni. Nel periodo medioevale c'è stato quello che viene chiamato periodo caldo medioevale, in questo periodo le temperature sono state piuttosto elevate, poi sono discese verso quella che viene chiamata la piccola età glaciale, un periodo dove il raffreddamento nel nostro pianeta è stato quasi globale, tanto che tutti i ghiacciai alpini e quelli di quasi tutto il pianeta sono avanzati fino a raddoppiare il volume attuale. Da questo punto in poi è iniziato il riscaldamento che prosegue fino ai nostri giorni come si può osservare in *Figura 59*.

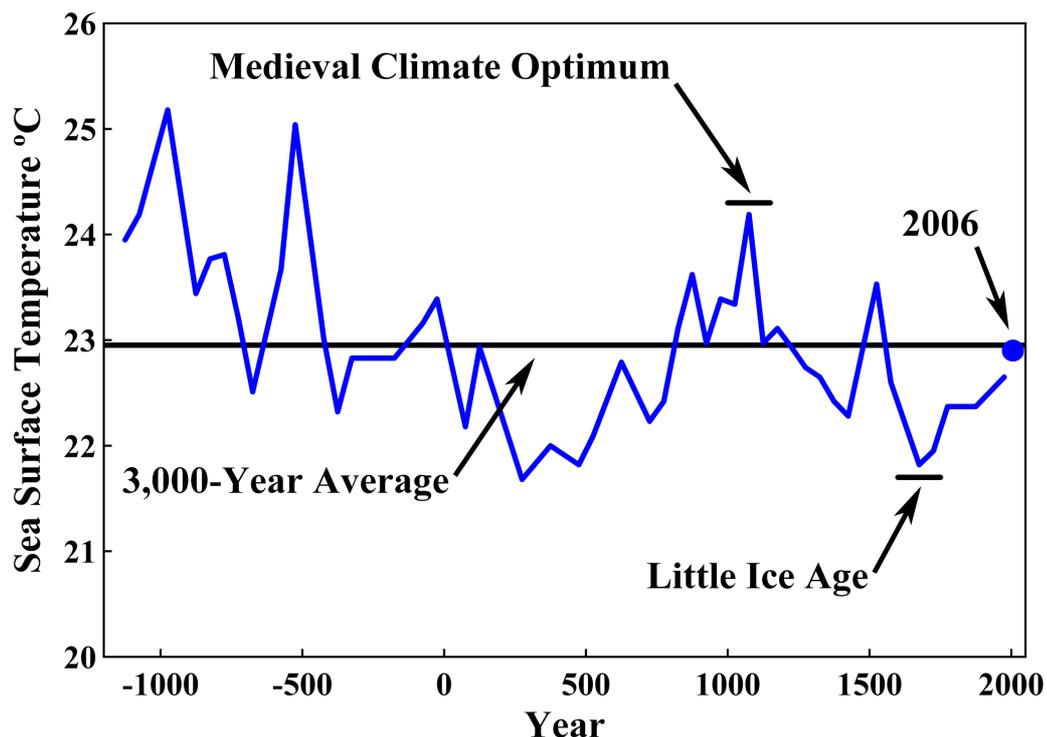


Figura 59: Temperature superficiali nel Mar dei Sargassi, una regione di 2 milioni di miglia quadrati dell'Oceano Atlantico, con una risoluzione di tempo da 50 a 100 anni e fino al 1975, come determinato da isotopi radioattivi di organismi marini rimasti nei sedimenti sul fondo del mare. La linea orizzontale è la temperatura media di questo periodo di 3.000 anni. La “piccola era glaciale” e “Optimum Medioevale” erano naturalmente presenti come intervalli estesi di scostamenti dalla media climatica. Un valore di 0,25 ° C, che è il cambiamento di temperatura del Mar dei Sargassi tra il 1975 e il 2006, è stato aggiunto ai dati del 1975, al fine di fornire un valore di temperatura 2006 (Robinson et al. 2007)

Negli ultimi 100 anni circa abbiamo avuto un aumento intorno ai 0,7 gradi della temperatura media globale dell’atmosfera al livello del mare, mentre nell’area centrale mediterranea l’aumento è stato di 4°C negli ultimi 100-150 anni. In *Figura 60* sono riportati le valutazioni di vari autori come rappresentate all’intermo del documento “Climate Change 2007” redatto dall’IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Si osserva come evidenziato anche da altri autori, dall’inizio del 1800 è iniziato un lento aumento delle temperature in tutto il pianeta.

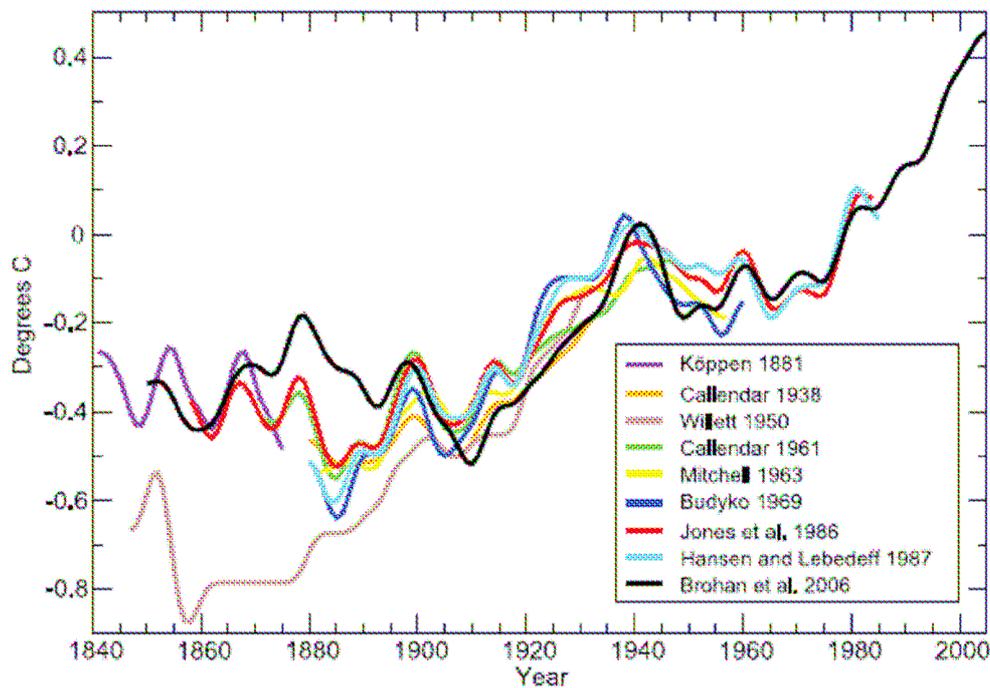


Figura 60 RegISTRAZIONI pubblicate sui cambiamento di temperatura superficiale su vaste regioni. Köppen (1881) tropici e latitudini temperate con temperatura dell'aria a terra. Callendar (1938) utilizzando stazioni a terra a livello mondiale. Willett (1950) utilizzando stazioni a terra a livello mondiale. Callendar (1961) da 60° N a 60 °S con stazioni a terra. Mitchell (1963) utilizzando stazioni a terra a livello mondiale . Budyko (1969) Emisfero Nord con stazioni a terra e le registrazioni da nave. Jones et al. (1986a, b) utilizzando stazioni a terra a livello mondiale. Hansen e Lebedeff (1987) utilizzando stazioni a terra a livello mondiale. Brohan et al. (2006) globale utilizzando temperatura dell'aria sulla superficie terrestre e dati di temperatura del mare, è la più lunga delle serie temporali di temperatura attualmente aggiornato (punto 3.2). Tutte le serie temporali sono state livellate con un filtro 13 punti. Le serie temporali Brohan et al. (2006) sono anomale rispetto alla media del periodo 1961-1990 (° C). Ogni serie di altri periodi è stata presentata inizialmente come anomalie della temperatura media di un specifiche e differenti periodo di riferimento. Per renderli comparabili, la serie di altri periodi sono stati adeguati per avere la media dei loro ultimi 30 anni, identica a quello dello stesso periodo nella serie temporale di Brohan et al. (2006). Da "Climate Change 2007: Cap.1 Historical Overview of Climate Change Science

Oltre alle variazioni di temperatura sono state rilevate modificazioni su una serie di variabili tutte in parte o totalmente legate alle variazioni climatiche, queste variabili sono:

- Aumento della concentrazione di CO₂ e altri gas serra (Figura 61)
- Riduzione dell'estensioni dei ghiacciai (Figura 62)

- Aumento del livello del mare (*Figura 63*)
- Riduzione dei ghiacciai artici mentre quelli antartici sono in lieve aumento (*Figura 64*).

Altre variabili che potrebbero essere collegate agli stessi cambiamenti climatici non hanno presentato variazioni ed il numero di dati statistici disponibili non permette una valutazione accurata, queste altre variabili sono:

- Numero di eventi atmosferici estremi quali gli uragani (*Figura 65*)
- Precipitazioni annuali (*Figura 66*)

Nelle figure seguenti sono rappresentate le variazioni delle variabili sopra riportate, sin nota comunque che la variazione in quasi tutti i casi è iniziata agli inizi del 1800, cioè quando è iniziato l'aumento delle temperature medie globali, mentre il grosso aumento di CO₂ e altri gas serra nell'atmosfera è iniziato da metà del 1900. E' quindi probabile una correlazione tra aumento di CO₂ e aumento della temperatura ma sicuramente non è certa e comunque tutta da dimostrare.

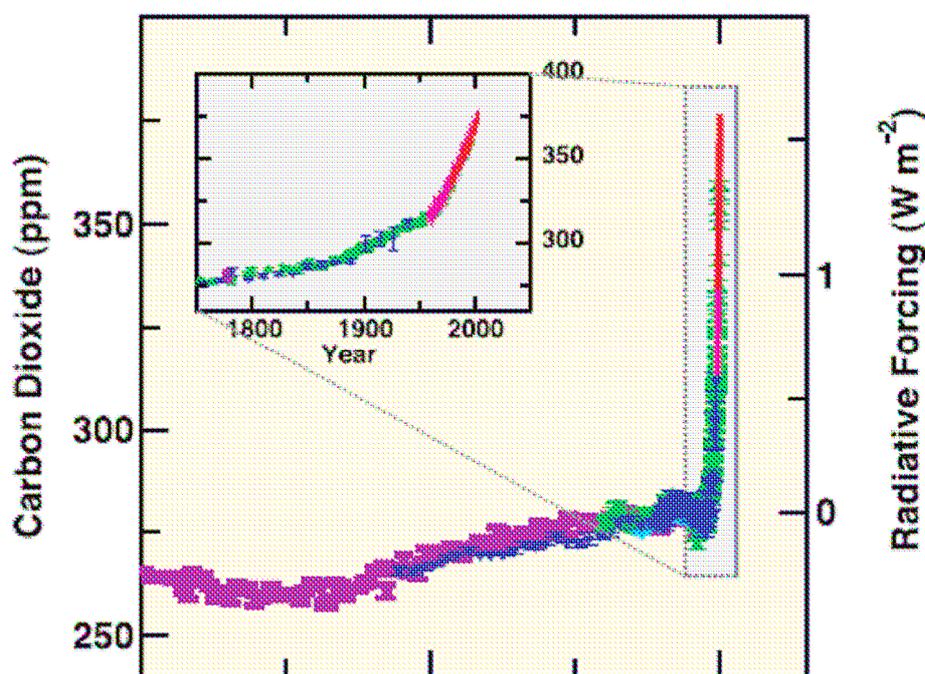


Figura 61. Concentrazioni atmosferiche di anidride carbonica, nel corso degli ultimi 10.000 anni (riquadro di grandi dimensioni) e dal 1750 (riquadro interno). Le misurazioni sono ottenute da carote di ghiaccio (i simboli con colori diversi per i diversi studi) e di campioni atmosferici (linee rosse). Le forzanti radiative corrispondenti vengono visualizzati nella parte destra degli assi del riquadro di grandi. Da *Cliamte Change 2007 Figure SPM.1*

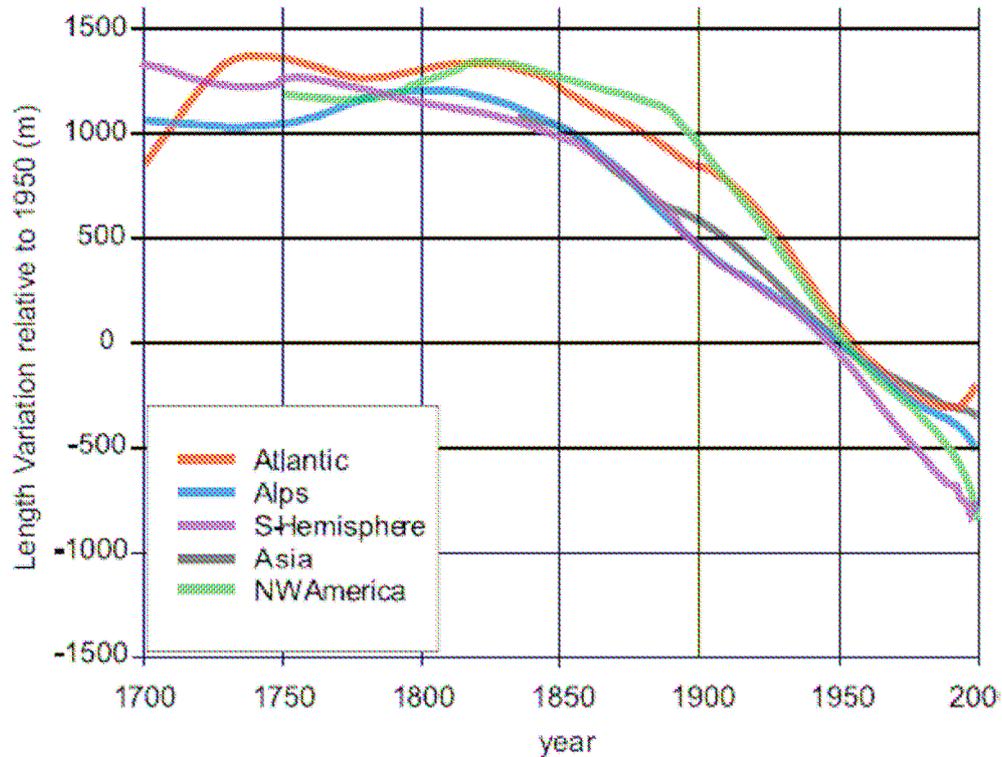


Figura 62. Variazioni della lunghezza media delle lingue glaciali su scala regionale (Oerlemans, 2005). I dati grezzi sono tutti costretti a passare da zero nel 1950. Le curve mostrate sono attenuate con il metodo Stineman (1980) e approssimate. I ghiacciai sono raggruppati nelle seguenti classi regionale: SH (tropici, Nuova Zelanda, Patagonia), nord-ovest del Nord America (principalmente Canadian Rockies), Atlantic (South Groenlandia, Islanda, Jan Mayen, Svalbard, Scandinavia), nella regione alpina europea e l'Asia (Caucaso e Asia centrale). Da Climate Change 2007 figure 4.13

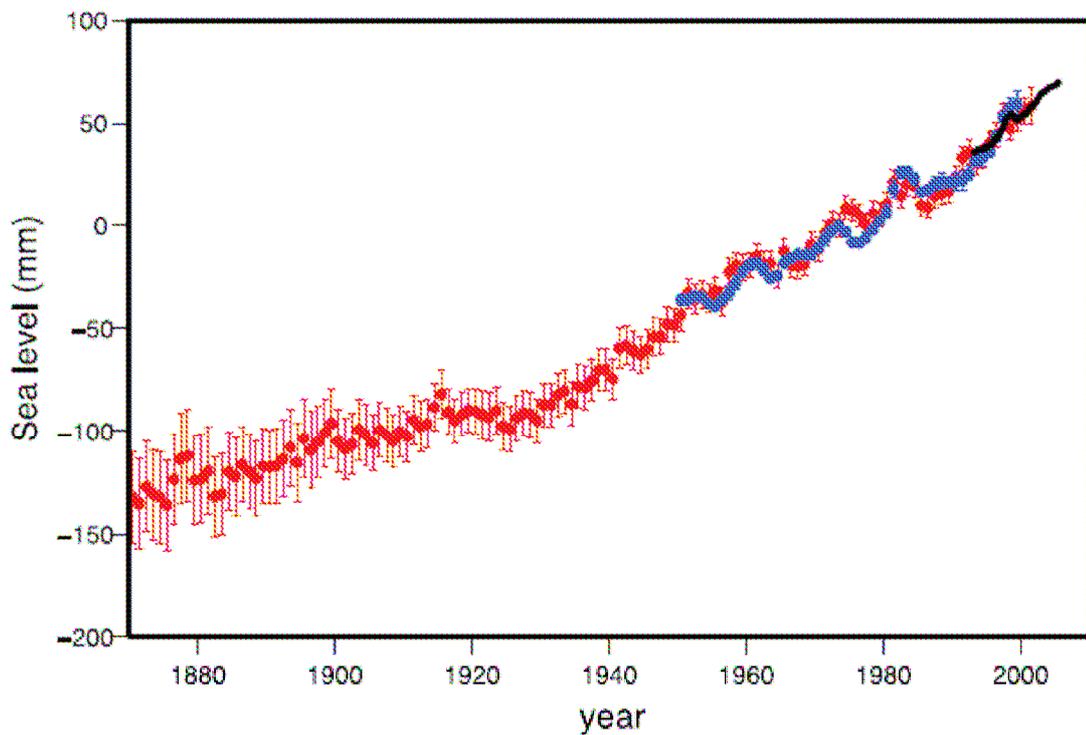


Figura 63: Medie annuali del livello globale medio del mare (mm). La curva rossa mostra la ricostruzione del livello fin dal 1870 (aggiornato dalla Chiesa e White, 2006), la curva blu mostra misurazioni di marea costruite a partire dal 1950 (da Holgate e Woodworth, 2004) e la curva nera è basata su altimetria satellitare (Leuliette et al., 2004). Le curve rosse e blu hanno deviazioni dalle loro medie per il 1961 al 1990, e la curva nera ha deviazione dalla media della curva rossa per il periodo dal 1993 al 2001. Le barre di errore mostra il 90% di intervalli di confidenza. Da Climate Change 2007 figure 5.13

Arctic and Antarctic Standardized Anomalies and Trends Jan 1979 - Dec 2007

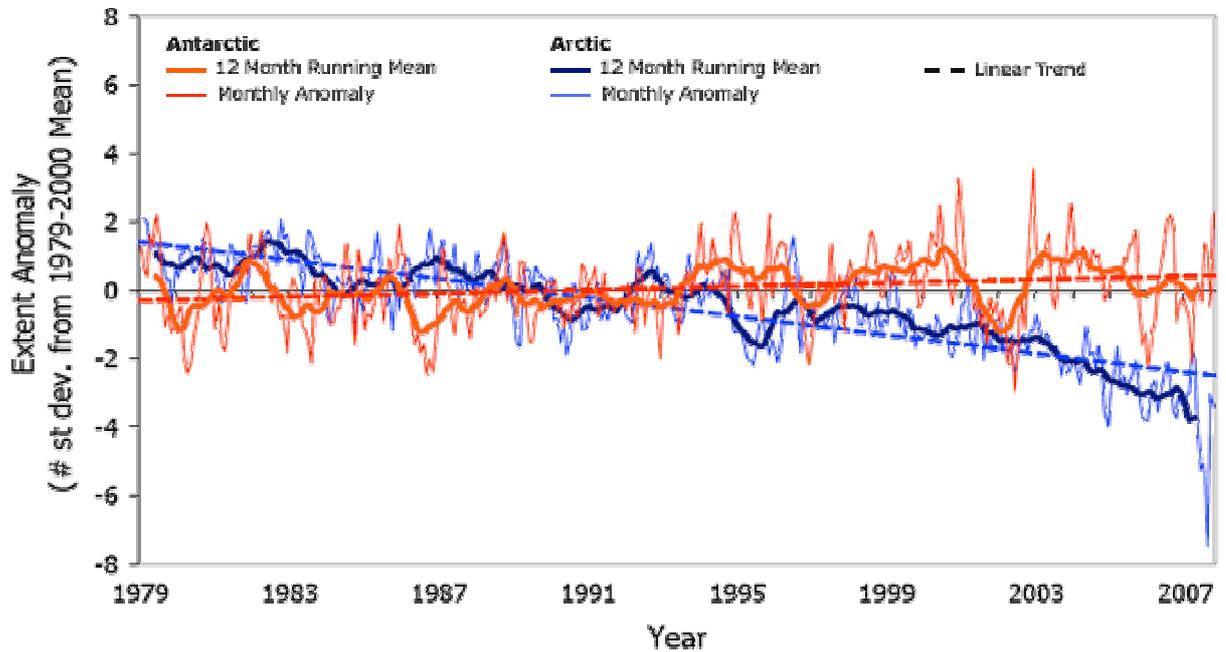


Figura 64: Estensione del mare ghiacciato Artico e Antartico, 1979-2007: Anche se la misura del mare ghiaccio artico ha subito un forte calo dal 1979-2007, i ghiacci marini antartici hanno subito un lieve incremento. Gli aumenti di misura dei ghiacci antartici sono più piccoli rispetto alla grandezza aumenta dell' Artico, e alcune regioni dell'Antartide registrato una forte tendenza di calo delle misure del ghiaccio del mare. Immagine fornita da National Snow and Ice Data Center, University of Colorado, Boulder. Da The National Snow and Ice Data Center

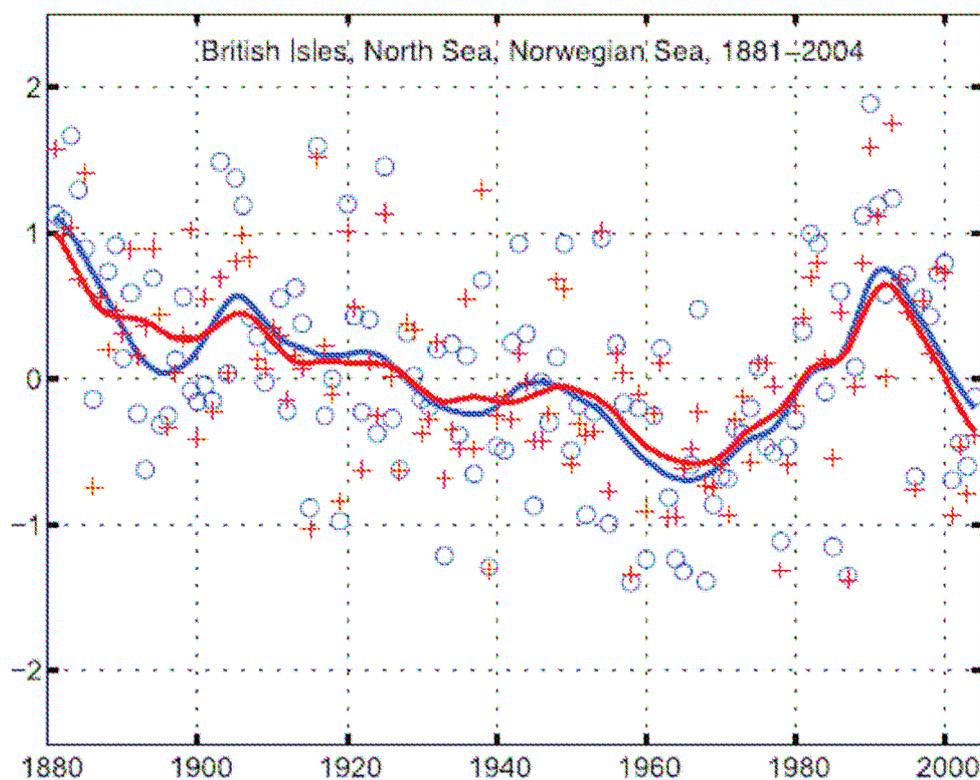


Figura 65. Indice delle tempeste per le Isole Britanniche, il Mare del Nord e Mar di Norvegia, dal 1881 al 2004. Cerchi blu sono 95° percentile e croci rosse 99° percentili di standardizzati della media dei venti geostrofico di oltre 10 serie di triangoli delle stazioni. Le curve smussate sono un filtro decennale (aggiornato da Alexandersson et al., 2000). Da *Cliamte Change 2007 figure 3.41*

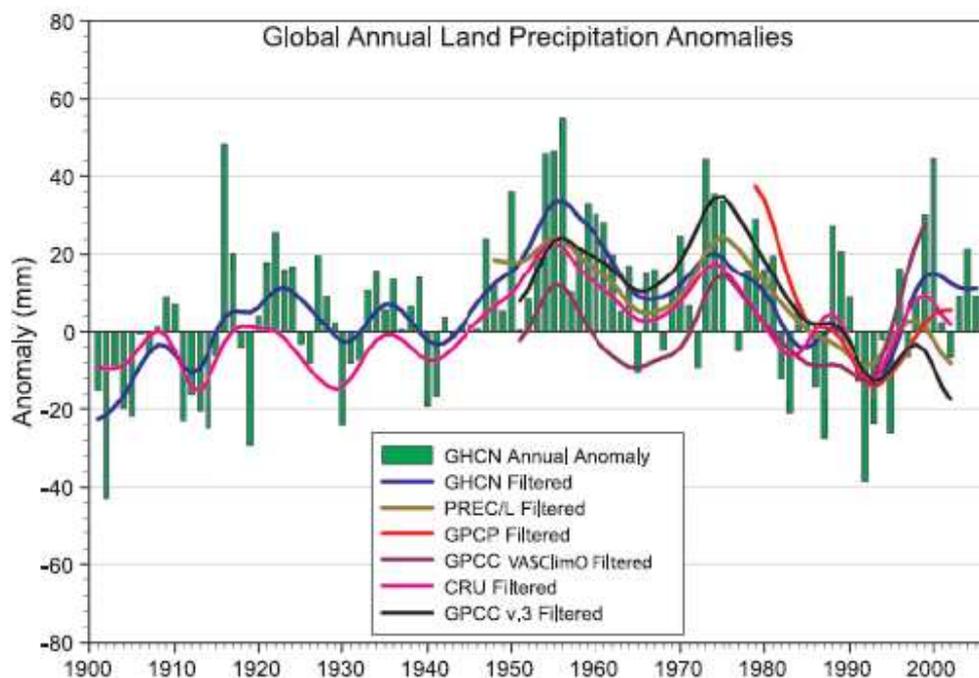


Figura 66. Serie temporale per il 1900-2005 di anomalie delle precipitazioni annue globali (mm) da GHCN rispetto al periodo 1981-2000 base. Le curve sinuose mostrano variazioni decennali (vedi Appendice 3.A) per la GHCN (Peterson e Vose, 1997), PREC / L (Chen et al., 2002), GPCP (Adler et al., 2003), GPCC (Rudolf et al., 1994) e CRU (Mitchell e Jones, 2005) insieme di dati. Da Cliamte Change 2007 figure 3.12

BIBLIOGRAFIA

Emmi G., Raisa V., Zecchin R., “Le proprietà di materiali e manufatti edilizi per i calcoli termici ed energetici. Parte prima: caratteristiche termofisiche dei materiali da costruzione”, in Murature Oggi, 2008

Intergovernmental Panel on Climate Change - Climate Change 2007

Piterà L., Raisa V., Zecchin R., “Ventilazione e software di calcolo” in atti del convegno Aicarr “Certificazione energetica: normative e modelli di calcolo per il sistema edificio-impianto posto a confronto”, Bologna 16 ottobre 2008”

Robinson A. B., Robinson N. E., S. And Soon W..Environmental Effects of Increased Atmospheric Carbon Dioxide - Journal of American Physicians and Surgeons (2007) 12, 79-90.

Sherman, M.H. 1987. Estimation of infiltration from leakage and climate indications. Energy and Buildings 10(1):81.

The National Snow and Ice Data Center – State of the Cryosphere, November 2008

CAPITOLO 6

Esempi: Audit Energetico di edifici



6.1 Introduzione

“Audit” dal latino “audio” (ascoltare) significa verifica, originariamente e prevalentemente in senso contabile. L'audit energetico consiste nell'analisi dei consumi e dei fabbisogni energetici del sistema considerato, per determinare i potenziali interventi di risparmio e di efficienza.

La valutazione dei consumi dell'edificio reale può essere realizzata secondo due modalità: la prima è l'asset rating e consiste in una stima qualitativa o standardizzata basata sull'uso di energia calcolato in condizioni di occupazione standard; la seconda è l'operational rating e consiste in una stima operativa basata sull'energia misurata. L'operational rating è la misura della prestazione energetica dell'edificio in esercizio cioè con le condizioni ambientali e di occupazione effettive; è quindi importante ai fini di certificare la prestazione effettiva o verificare l'effetto di interventi realizzati.

Nel seguito di questo documento è evidenziare quali operazioni siano necessarie per realizzare un'analisi energetica sui consumi di un edificio e valutare la precisione degli strumenti informatici disponibili. Partendo dalle informazioni geometriche e costruttive reperibili sia nel progetto architettonico che dai rilievi in loco è necessaria tutta una serie di ulteriori dati relativi ai consumi energetici ed alle modalità di utilizzo della struttura da parte degli occupanti. Essi richiedono sia l'acquisizione di informazioni sui consumi elettrici e di combustibile sia la realizzazione di misure sulle grandezze fisiche che influenzano maggiormente il consumo energetico. La scelta di quali grandezze misurare va fatta in funzione della tipologia impiantistica, in modo da ottimizzare i tempi di rilievo ed evitare di misurare grandezze poco rilevanti. Un aspetto fondamentale è costituito dalla raccolta ed elaborazione dei dati climatici dell'ambiente esterno; a seconda del tipo e della precisione delle informazioni disponibili, sono necessari diversi tipi di elaborazioni poiché difficilmente la stazione di misura meteorologica rileva contemporaneamente tutte le grandezze necessarie al calcolo.

6.2 Analisi Energetica Su Civile Abitazione

6.2.1. l'edificio e l'impianto

L'edificio preso in considerazione è un'abitazione civile oggetto di recente ristrutturazione edilizia e impiantistica avente superficie calpestabile complessiva di 259,6 m². Il corpo dell'edificio si articola su tre piani fuori terra ed un piano interrato tutti riscaldati e climatizzati con sistema radiante. Gli interventi realizzati hanno riguardato la ristrutturazione completa di pavimentazioni, serramenti e impianti. La struttura è situata all'interno del centro storico di Castelfranco Veneto ed è quindi soggetta a vincoli architettonici i quali non hanno permesso di realizzare interventi di isolamento esterno della muratura perimetrale. La scelta della proprietà al fine di non ridurre gli spazi disponibili e limitare i costi di intervento è stata di non realizzare alcun isolamento sulle pareti perimetrali dell'edificio.

La struttura perimetrale verticale è realizzata in mattoni pieni intonacati su entrambi i lati di spessore variabile a seconda delle pareti da 50 a 35 cm. La trasmittanza degli elementi è stata valutata in base ai valori riportati dalle UNI 10355; in particolare si sono utilizzate le strutture codificate come 1.1.01 e 1.1.02 assumendo una conduttività della muratura compresa tra 0,80 e 0,92 W/(m K) a seconda dello spessore della parete. La struttura portante del tetto è in travi di legno con copertura in tavelle di laterizio ed è rivestita esternamente con coppi in laterizio. Su questa struttura è stato realizzato un isolamento con fibra minerale ed inoltre è stato inserita al di sopra delle tavelle un pannello radiante con tubazioni del tipo a capillare con diametro interno di 2,7 mm annegata in uno strato di 2 cm di calcestruzzo. La trasmittanza complessiva del tetto calcolata secondo UNI EN ISO 6946 è di 0.25 W/(m²K). Questa soluzione ha permesso di realizzare un impianto di climatizzazione radiante a soffitto, mantenendo la finitura estetica delle tavelle in cotto e senza intervenire sul pavimento esistente. Si riporta *Figura 67* la sezione del tetto e la stratigrafia della struttura.

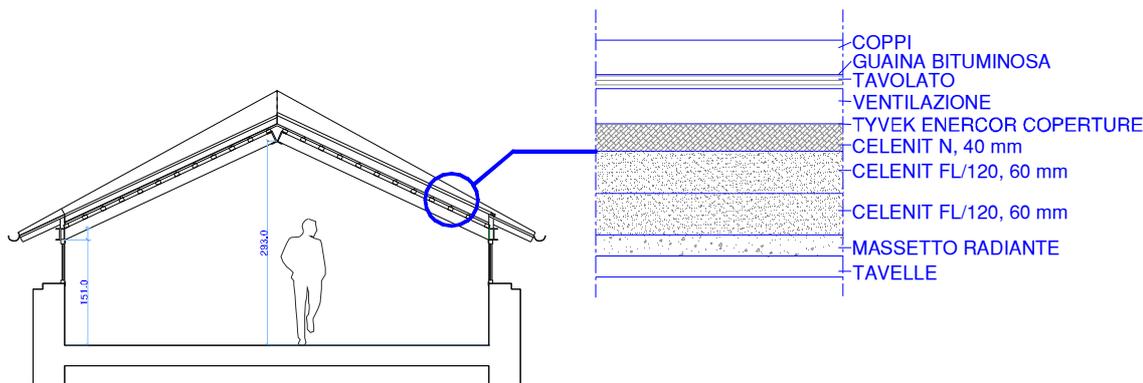


Figura 67 – Sezione del tetto e stratigrafia della struttura

Il primo piano è stato climatizzato con una soluzione a soffitto radiante montato su pannello di cartongesso, permettendo di mantenere il pavimento esistente e riducendo gli interventi di opere murarie. Al piano terra al fine di isolare il pavimento in parte contro terra e in parte verso il piano interrato si è rimosso il pavimento esistente installando un impianto di climatizzazione radiante a pavimento. Nel piano interrato, che presentava problemi di infiltrazioni di umidità, è stato rifatto il pavimento realizzando un getto impermeabilizzante ed un successivo impianto radiante a pavimento come al piano terra.

Il sistema di climatizzazione prevede sistemi radianti, accoppiati, nel periodo estivo, a deumidificatori adiabatici installati ad ogni piano dell'edificio.

Il sistema distributivo (*Figura 68*) è composto da quattro circuiti separati per poter controllare in maniera indipendente le quattro zone termiche dell'edificio. Ad ogni zona corrisponde una valvola miscelatrice per controllare, tramite sistema di termoregolazione, la temperatura di ogni piano.

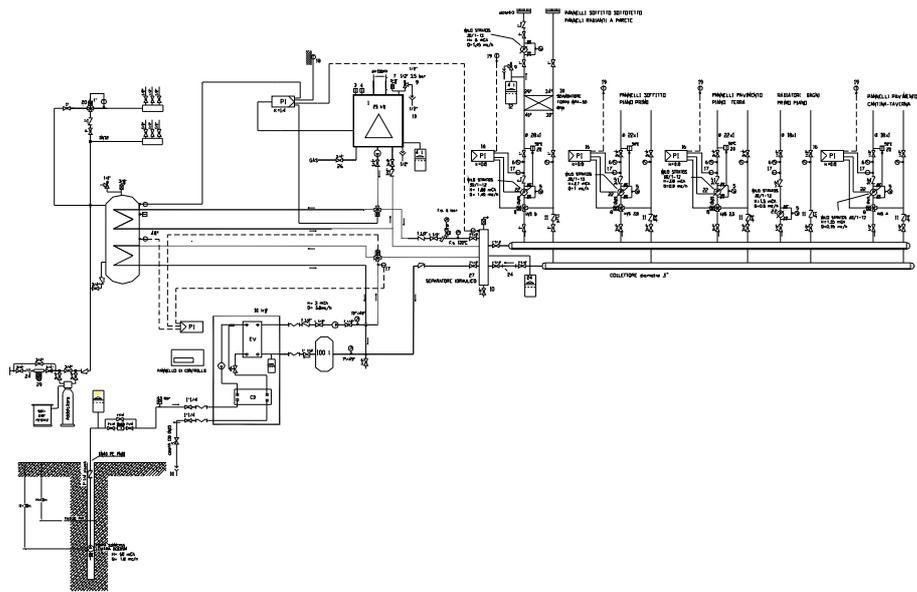


Figura 68 – Schema dell' impianto

Vista la possibilità di installare un gruppo di refrigerazione ad acqua per il raffrescamento; si è ritenuto di utilizzare la stessa macchina funzionante in pompa di calore, come integrazione della caldaia a gas nel periodo invernale. La soluzione si dimostra conveniente dal punto di vista economico poiché il gruppo frigo funziona ad acqua di pozzo e quindi con COP più elevati rispetto ad una macchina condensata ad aria infatti dai rilievi delle fatture di gas metano ed energia elettrica risulta un costo per la produzione di energia termica pari a 0,073 €/kWh per la caldaia e di 0,077 €/kWh per la pompa di calore (valutando un COP medio stagionale pari a 4). Si riportano in *Tabella XLIII* e in *Tabella XLVII* le caratteristiche della caldaia e della pompa di calore installate.

Tabella XLIII - Caratteristiche della caldaia a condensazione

		Condizioni
Potenza termica nominale	22,5 kW	Riferita a P.c.i. in riscaldamento
Rendimento a pieno carico	97,5	EN 677 su P.c.i.- tm/tr=80/60 °C
Rendimento a carico parziale	109,7	EN 677 su P.c.i.- tm/tr=36/30 °C
Intervallo di modulazione	20-100 %	

Temperatura fumi a pieno carico	68°C	tm/tr=80/60 °C
Temperatura fumi a carico ridotto	31°C	tm/tr=50/30 °C

Tabella XLVI - Caratteristiche della pompa di calore

		Condizioni
Resa nominale riscaldamento	10,7 kW	Ingresso evaporatore 10°C Ingresso condensatore 35°C Uscita condensatore 40°C
Potenza Assorbita compressore	2,6 kW	
COP	4,11	
Compressore	1	scroll
Resa nominale riscaldamento	12,6 kW	Ingresso evaporatore 15°C Ingresso condensatore 35°C Uscita condensatore 40°C
Potenza Assorbita compressore	2,5 kW	
COP	5,04	

6.2.2 Condizioni Ambientali

Si riportano in *Tabella XLIX* i valori calcolati per i mesi di cui si hanno a disposizione i dati climatici; di questi, quelli utili per la simulazione sono solo: gennaio, febbraio, marzo e aprile.

Tabella XLIX - Valori medi mensili dei dati climatici per la località di Castelfranco Veneto (TV) rilevati da stazione meteo

MESE	tmg (°C)	UR %	Hb (diretto)	Hd (diffuso)	H (totale)
GENNAIO	3.19	82.29	1.61	2.14	3.75
FEBBRAIO	4.96	72.12	2.30	5.32	7.62
MARZO	8.40	71.58	3.57	8.13	11.70
APRILE	15.05	73.21	5.57	8.40	13.97
MAGGIO	20.98	63.45	7.06	13.89	20.95
GIUGNO	22.06	66.73	8.12	13.16	21.28

Nella tabella precedente è evidenziato il mese di marzo poiché durante questo periodo i rilievi orari non erano disponibili e quindi si è provveduto a ricostruire il profilo orario di temperatura e irraggiamento solare adottando la procedura descritta precedentemente e utilizzando le Equazioni da (4) a (13) del capitolo 5.

I dati climatici orari sono stati gentilmente messi a disposizione dall'Istituto Tecnico Industriale "E. Barsanti" di Castelfranco Veneto.

6.2.3 Rilievi e Misure

I due generatori di calore per il funzionamento invernale hanno un collegamento idraulico che permette il collegamento in serie: la pompa di calore (PdC) funziona prioritariamente e riscalda l'acqua fino ad una temperatura massima di 45°C, in serie la caldaia riscalda ulteriormente l'acqua in caso di fermata della pompa o per richieste di temperatura maggiore. Per valutare il fabbisogno energetico è necessario rilevare il consumo di energia elettrica della PdC ed il consumo di gas metano della caldaia.

La PdC è di tipo monofase ed ha una corrente massima assorbita di 21 A ed una corrente nominale di circa 12 A. Il consumo di energia elettrica della PdC va separato dal consumo complessivo dell'abitazione per cui è necessario misurare l'effettivo consumo della macchina al fine poi di calcolare l'energia termica prodotta. A questo fine è stato utilizzato un contatore di energia elettrica con uscita ad impulsi associato ad una data-logger per la registrazione temporale. Come si può vedere *Figura 69* il contatore è di tipo trifase, per cui dei tre trasformatori amperometrici e delle tre sonde di tensione se ne utilizzano solo due. Dai dati del costruttore risulta che la precisione di misura dell'1% è garantita dal 10 al 100% del campo di misura. Poiché le sonde di corrente hanno una corrente massima e minima di 800A e 80° rispettivamente, ne consegue che occorre aumentare la corrente che circola nella sonda avvolgendo per 10 volte i conduttori della linea elettrica di alimentazione; l'effettiva energia elettrica si otterrà da quella misurata, moltiplicandola per un fattore 0,1. In *Figura 70* è rappresentata la modalità di collegamento tra il trasduttore di energia ed il data logger.

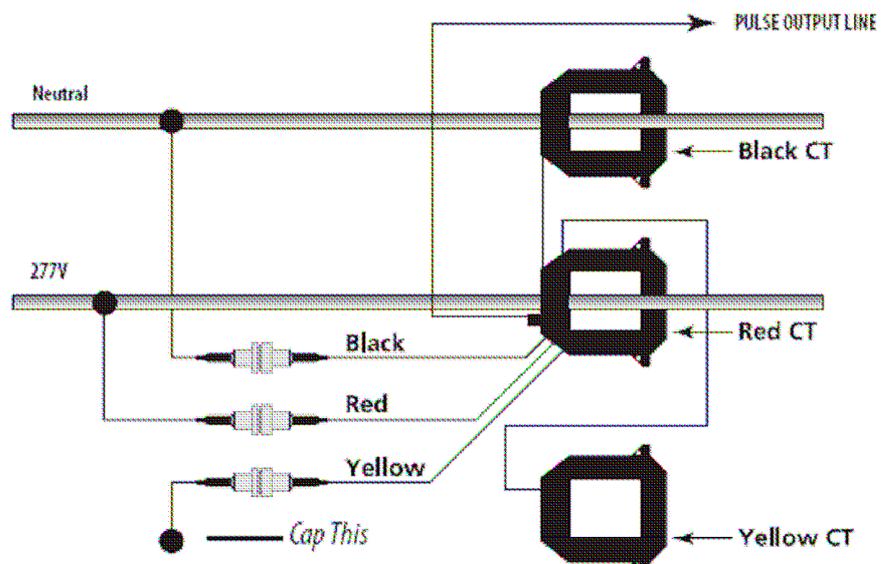


Figura 69 – Schema di inserzione del contatore di energia ad impulsi (Veris Industries)

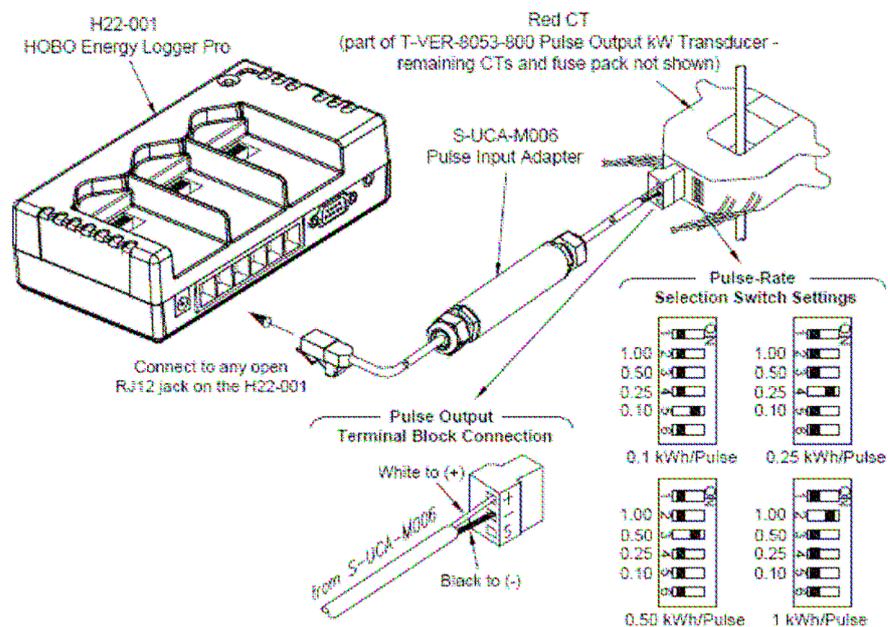


Figura 70 – Collegamento trasduttore data logger per sistema monofase 230 V (Onset Computer Corporation)

Si riportano nella *Figura 71* i consumi incrementali misurati durante il periodo di funzionamento dell'impianto. Come si può notare ci sono diversi periodi di inattività della macchina causati a problemi di drenaggio del sistema di scarico dell'acqua.

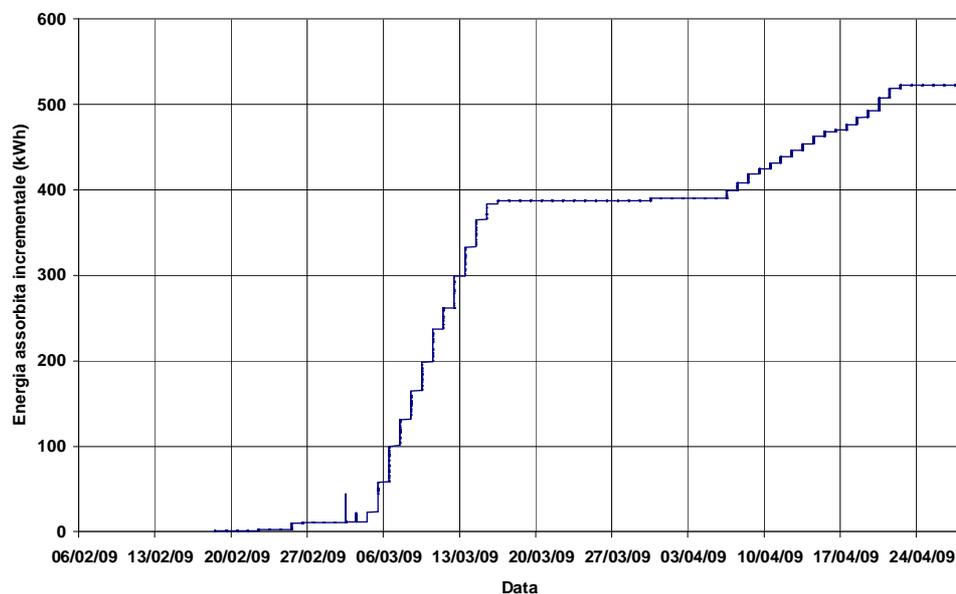


Figura 71 – Assorbimento elettrico della pompa di calore rilevato dal sistema di misura

Contemporaneamente al rilievo dei consumi sono state acquisite le temperature lato sorgente (pozzo) e lato impianto al fine di verificare le reali condizioni di funzionamento della pompa di calore. Il sistema di misura è composto da un data logger che acquisisce la temperatura di quattro termocoppie tipo K di classe 1 ($\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ o $\pm 0,4\%$ del valore misurato) inserite a contatto della tubazioni di ingresso alla PdC. Questo sistema permette di rilevare la temperatura dell'acqua prelevata, la temperatura all'uscita dalla macchina e salti termici medi lato sorgente e lato impianto. In *Figura 72* si riporta il risultato dei rilievi e si osserva come i periodi di non funzionamento coincidano con gli analoghi periodi nella misura dei consumi.

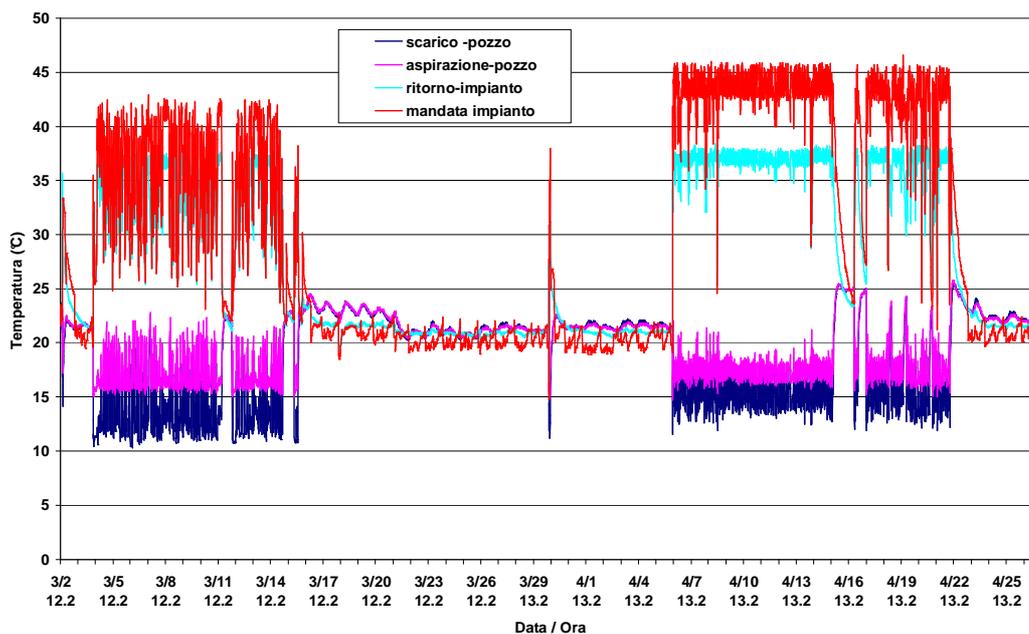


Figura 72 – Andamento delle temperature misurate all’ingresso della pompa di calore

Il consumo della caldaia a condensazione si può rilevare dalle letture del contatore di gas metano della società distributrice. I rilievi sono stati eseguiti non ad intervalli regolari, ma comunque sufficienti a coprire buona parte del periodo di riscaldamento. Allo scopo di determinare la quota di energia che la caldaia ha utilizzato per il riscaldamento ambientale separandola da quella prodotta per il riscaldamento dell’acqua calda sanitaria e la cottura cibi, i rilievi sono proseguiti oltre il periodo di riscaldamento. In assenza della produzione di energia per riscaldamento, tutta l’energia prodotta dalla combustione del gas è utilizzata o per l’acqua calda sanitaria o per la cottura cibi. Ipotizzando che questa quota rimanga circa la stessa anche nel periodo invernale si può determinare il consumo di gas per il solo riscaldamento. Nel diagramma di *Figura 73* è rappresentato il valore incrementale dei consumi totali di gas e relativi al solo riscaldamento; come si può osservare, dopo la fine del periodo di riscaldamento la quantità consumata di gas per questo scopo rimane costante non essendoci ulteriori consumi.

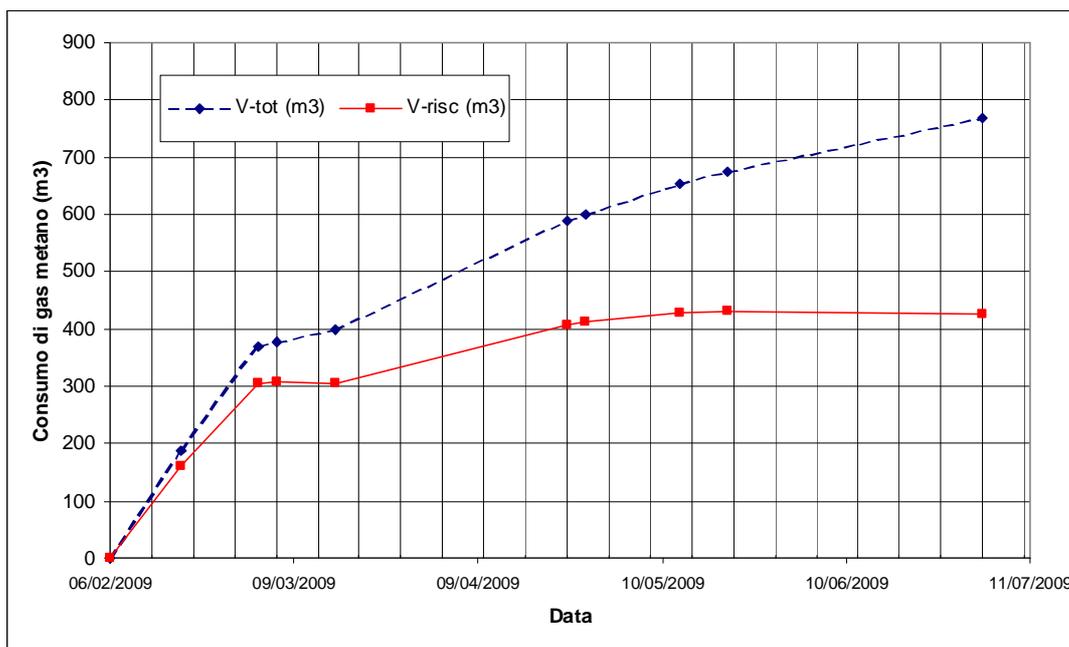


Figura 73 – Consumi incrementali di gas metano totali (V-tot) e per solo riscaldamento (V-risc)

L'energia prodotta dalla combustione del gas utilizzato per la produzione di acqua calda sanitaria e cottura cibi, in parte diventa carico interno e v`a quindi a ridurre il fabbisogno per riscaldamento. Dal grafico di *Figura 73* si `e stimato che il consumo medio per cottura cibi e acqua calda sanitaria ammonta a 2,34 Nm³/giorno, che tradotto in energia corrisponde a 22,4 kWh/giorno ipotizzando un rendimento unitario rispetto al potere calorifico inferiore. Verosimilmente solo una parte di questa energia diviene carico interno, poich`e una parte del calore dell'acqua calda sanitaria finisce nella rete di scarico ed il calore prodotto dai fornelli viene in parte espulso all'esterno dalla cappa di aspirazione: si `e assunto quindi che la quota di questo contributo energetico sia solo di 10 kWh/giorno. Ad essa si sommano i carichi interni dovuti a persone, illuminazione ed apparecchiature. Per valutare correttamente l'ammontare dei carichi interni per illuminazione ed apparecchiature `e necessario conoscere i consumi di energia elettrica globali dell'edificio. Da questi occorre per`o sottrarre l'assorbimento di energia per la pompa di calore. Questa operazione porta a determinare un consumo medio giornaliero di energia, il quale nei modelli di simulazione dinamica viene suddiviso tra le varie apparecchiature interne in funzione dei dati sui tempi di utilizzo. In *Tabella LII* `e riportato il calcolo che permette di

estrapolare dai consumi generali quelli relativi agli utilizzatori interni all'abitazione. Per la simulazione dinamica si è assunto un consumo elettrico medio giornaliero per apparecchiature e illuminazione di 27,3 kWh.

Tabella LII - Consumi elettrici globali e specifici dell'abitazione

	Ee (kWh)	ΔE (kWh)	E-PdC (kWh)	giorni	kWh-tot/gg	kWh-abit/gg	Note
22/02/2009	0			0			
31/03/2009	1282	1282	388,5	38	33,7	23,5	PdC accesa
21/04/2009	1990	708	128,36	59	33,7	27,6	PdC accesa

In base alle informazioni fornite dai proprietari dell'immobile sono stati definiti tutti i carichi interni nelle ore del giorno come mostrato in *Tabella LV*.

Tabella LV - carichi interni sensibili giornalieri e loro durata

	PERSONE (W)			ILLUMINAZIONE (W)			Apparecchi elettrici (W)	GAS CUCINA (W)	Acqua calda (W)
	TERRA	PRIMO	MANSARDA	TERRA	PRIMO	MANSARDA	TERRA	TERRA	PRIMO
1.00.00	0	355	0	0	797.8	565.2	0	0	0
2.00.00	0	355	0	0	797.8	565.2	0	0	0
3.00.00	0	355	0	0	797.8	565.2	0	0	0
4.00.00	0	355	0	0	797.8	565.2	0	0	0
5.00.00	0	355	0	0	797.8	565.2	0	0	0
6.00.00	0	355	0	0	797.8	565.2	0	0	0
7.00.00	0	355	0	0	797.8	565.2	0	0	0
8.00.00	322	340	176	683	797.8	565.2	720	1000	1000
9.00.00	172	0	90	342	0	0	0	0	0
10.00.00	177	0	89	342	0	0	0	0	0
11.00.00	177	0	88	342	0	0	0	0	0
12.00.00	177	0	89	342	0	0	0	0	0
13.00.00	327	0	176	683	0	0	720	1000	1000
14.00.00	319	0	176	683	0	0	720	1000	1000
15.00.00	261	0	133	512	0	0	0	0	0
16.00.00	265	0	133	512	0	0	0	0	0
17.00.00	266	0	133	512	0	0	0	0	0
18.00.00	266	0	133	512	0	0	0	0	0
19.00.00	266	0	133	512	0	0	0	0	0
20.00.00	328	0	177	683	0	0	720	1000	1000
21.00.00	321	336	173	683	797.8	565.16	720	1000	1000
22.00.00	0	353	0	0	797.8	565.16	0	0	0
23.00.00	0	355	0	0	797.8	565.16	0	0	0
0.00.00	0	355	0	0	797.8	565.16	0	0	0
TOTALI (kWh)	3.64	4.22	1.90	7.34	9.57	6.78	3.60	5.00	5.00

TOTALE:
47.07 kWh

Il valore del carico interno totale giornaliero è lo stesso sia nel calcolo dinamico che in quello quasi-statico.

6.2.4. I Modelli Fisici

Le simulazioni dettagliate del sistema edificio-impianto sono state svolte con il software EnergyPlus, che si sta velocemente imponendo tra i software di riferimento nel campo dell'energetica degli edifici. EnergyPlus si propone in realtà come un motore di calcolo, che può elaborare file di input preparati da altri programmi, dotati di migliori interfacce utente. Esso è comunque dotato di una propria interfaccia, assai elementare, che però consente uno stretto controllo su tutti i parametri e le caratteristiche del software, nonché l'implementazione di qualsiasi tecnologia e impianto concepita in seno al programma. Proprio attraverso tale interfaccia sono state inserite i seguenti componenti di impianto:

Pompa di circolazione

Elementi radianti locali

La macchina per la produzione dell'energia termica e la macchina per la produzione dell'energia frigorifera non fanno parte del schema poiché il confronto tra i risultati e le misure viene fatto sul lato fluido primario dell'impianto

L'implementazione di tali elementi e di quelli necessari alla costruzione dell'intero impianto ha portato alla definizione della successione di elementi illustrata nella seguente *Figura 74*. Questa schematizzazione permette di determinare l'energia fornita all'impianto dal fluido primario e comprende quindi i rendimenti di regolazione ed emissione.

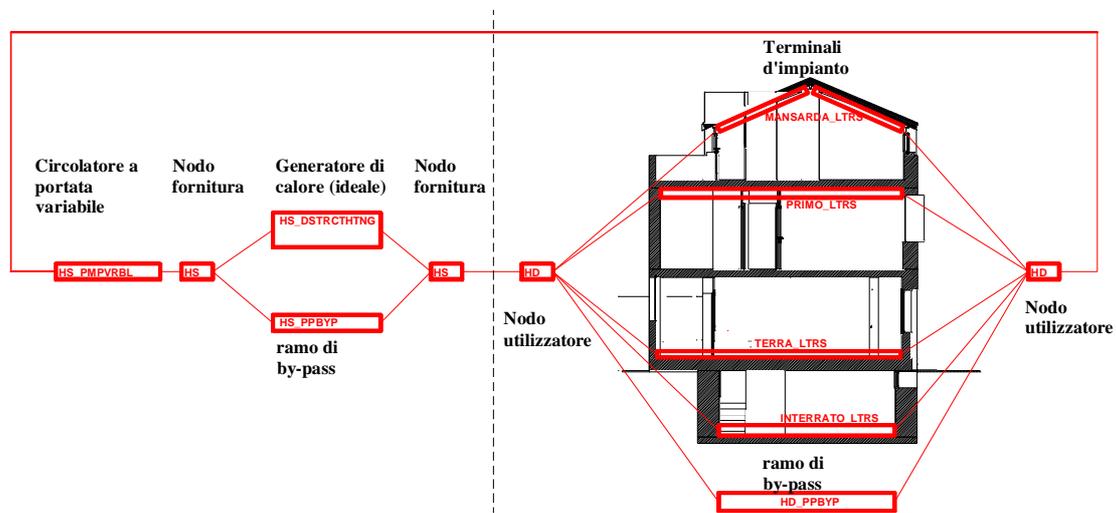


Figura 74 – Schematizzazione dell'impianto secondo EnergyPlus

Il sistema implementato in EnergyPlus può comunque utilizzare macchine per la produzione dell'energia termica e frigorifera semplificate. I risultati di fabbisogno termico/frigorifero ottenuti attraverso le simulazioni con EnergyPlus sono infatti stati rielaborate in modalità post-processing per tenere conto dell'effettivo rendimento delle macchine nelle condizioni climatiche e di funzionamento contingenti. Alla fase di post-processing dei risultati è dunque demandata la valutazione dei rendimenti di distribuzione e di produzione dell'energia termica, mentre i rendimenti di immissione e regolazione sono direttamente considerati nell'elaborazione svolta da EnergyPlus.

A tal proposito, la regolazione implementata in EnergyPlus è stata resa aderente alla realtà applicativa allo studio è stato, di conseguenza imposta una regolazione basata sulla temperatura dell'aria interna, con un intervallo di modulazione (banda proporzionale) di 1 K attorno alla temperatura di setpoint dell'ambiente da climatizzare.

Anche l'involucro è stato descritto in modo conforme: sono state infatti rispettate non solo la geometria e le stratigrafie proprie dell'edificio, ma ne è stato descritto

anche l'ambiente circostante, in modo da considerare l'ombreggiamento e la radiazione riflessa indotti.

Al fine di facilitare l'input geometrico dei dati si è utilizzato un modulo aggiuntivo (plugins) per EnergyPlus del software di disegno tridimensionale Google SketchUp: questo ha permesso di evitare l'input tabellare di tutti i vertici della schematizzazione geometrica dell'edificio e delle schermature esterne. Il modulo, ancora in fase iniziale di sviluppo presenta delle imprecisioni e richiede delle successive correzioni all'interno dell'editor testuale di EnergyPlus. Si riporta in *Figura 75* l'immagine del modello prodotta da SketchUp in cui si possono notare sia le schermature esterne che i quattro piani della costruzione.

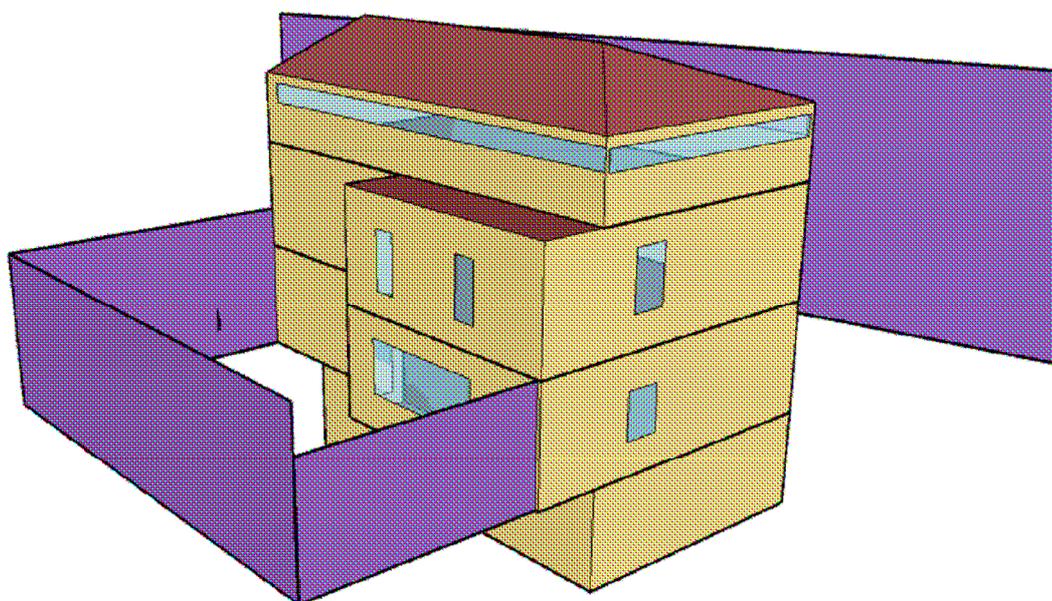


Figura 75 – Modello realizzato con SketscUp dell'edificio, in cui si nota il piano interrato visibile, non essendo rappresentato il terreno.

La simulazione del sistema edificio impianto realizzata con Eplus è stata ripetuta con due metodologie di tipo quasi-statico: la prima basata sul metodo dettagliato dell'edificio come indicato nella norma UNI TS 11300 parte 1 e 2 ed la seconda che utilizza una versione semplificata dello stesso modello adatta a realizzare analisi energetiche su un elevato numero di edifici (Marchiori 2009).

6.2.5. Elaborazione Dei Risultati

Il fabbisogno energetico lato fluido vettore ottenuto con i modelli di simulazione dinamico o quasi-statico deve essere confrontato con i valori misurati al fine di verificare se il modello realizzato dell'edificio corrisponde al reale comportamento. Per fare questo i consumi di energia termica ed elettrica misurati devono essere trasformati in energia fornita all'acqua (fluido vettore); occorre quindi prendere in considerazione il rendimento dei due generatori e trasformare i consumi in energia termica.

Per la pompa di calore questa operazione può essere eseguita applicando al funzionamento invernale la procedura proposta nella norma UNI 10963 per le macchine monostadio. La norma permette di calcolare un coefficiente adimensionale Y che moltiplicato per il $COPa$ a pieno carico ed alle condizioni di effettivo utilizzo permette di determinare il $COPr$ a carico parziale. Il parametro Y è funzione del fattore di carico $X=Pcr/Pca$ dove Pcr è la potenza termica ridotta e Pca è la potenza termica a pieno carico. Si introduce anche il parametro Z definito come rapporto tra la potenza elettrica assorbita dalla macchina (Per) a potenza ridotta e quella assorbita a piena potenza nella condizione ausiliaria (Pea). Il parametro Z si dimostra nella norma avere andamento lineare per macchine monostadio ed è rappresentato dall'equazione:

$$Z = (1 - b) \cdot X + b \quad (1)$$

La relazione (1) assume valore unitario per $X=1$, e valore pari a b per $X=0$; dove b rappresenta la potenza assorbita a vuoto dalla PdC. E quindi possibile determinare in prima approssimazione il parametro b misurando l'energia consumata a vuoto dalla PdC. Effettuata questa misura e disponendo dei dati di efficienza a pieno carico (come riportato in Tabella XLVI) è possibile determinare la funzione del parametro Y . La grandezza Y assume, con il significato dei simboli decritti precedentemente, la seguente espressione tratta dalla UNI 10963:

$$Y = \frac{COPr}{COPa} = \frac{Pcr}{Per} \cdot \frac{Pea}{Pca} = \frac{X}{\frac{Per}{Pea}} = \frac{X}{Z} = \frac{X}{(1-b) \cdot X + b} \quad (2)$$

Il parametro b della relazione (16) assume nel caso specifico il valore di 0,0716; questo permette per ogni intervallo di funzionamento di determinare il parametro Y noto che sia il fattore di carico X . Il termine X viene determinato come rapporto tra la potenza misurata nell'intervallo di misura e l'analoga potenza che la PdC potrebbe erogare se nel medesimo intervallo avesse funzionato a piena potenza. Poiché la temperatura della sorgente non subisce grandi variazioni durante la stagione di riscaldamento, si può ritenere la potenza massima della macchina costante e pari a quella indicata in Tabella XLVI alle condizioni di 15°C dell'acqua in ingresso dalla sorgente esterna. Nella *Figura 76* è invece rappresentata la funzione Y per la PdC installata; si può osservare come il fattore Y decresca molto rapidamente per valori del fattore di carico X minori di 0,25.

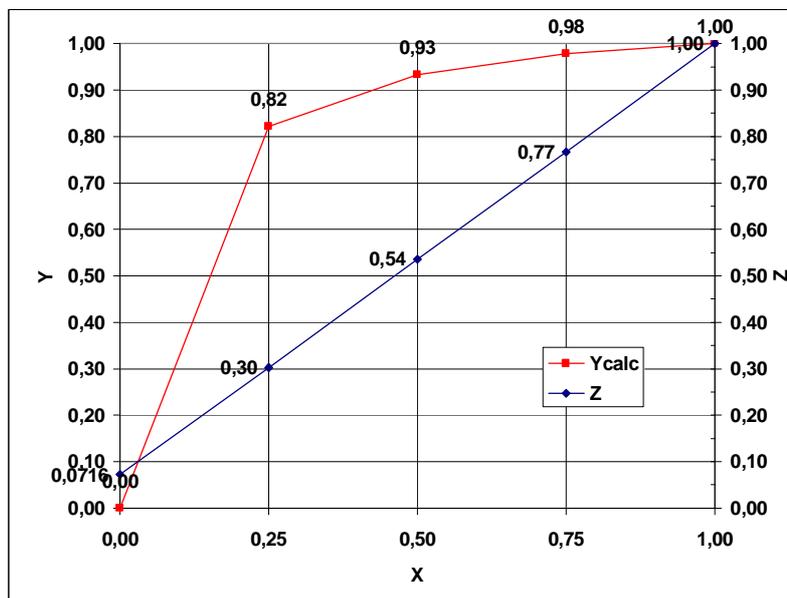


Figura 76 – Curva di funzionamento a carico parziale delle pompa di calore

A questo punto è possibile calcolare l'energia termica E_t che la PdC produce per ogni intervallo di misura utilizzando la seguente relazione:

$$E_t = Y \cdot COP_a \cdot E_e \quad (3)$$

I risultati delle elaborazioni con la relazione (3) sono riportati nei grafici di *Figura 77*. Come si può notare, il COP medio misurato della pompa di calore è pari a 4. A tale valore andrebbe aggiunta l'energia persa per la pompa del pozzo che in base alle misure effettuate ha una potenza in regime di funzionamento di circa 500 W pari ad un consumo stimato di 62 kWh. Tuttavia in questa sede non è stata effettuata questa analisi.

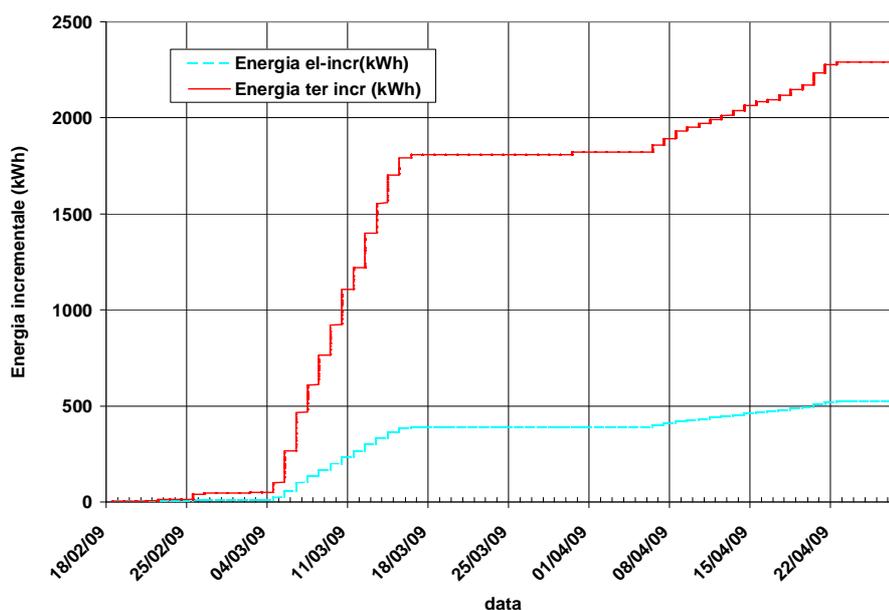


Figura 77 – Energia termica incrementale prodotta dalla PdC

La caldaia a condensazione ha anch'essa un rendimento che dipende dal fattore di carico e dalle perdite: tramite la procedura indicata nella norma UNI TS 11300-2 è possibile calcolare le perdite di generazione e quindi determinare l'energia fornita al fluido dalla caldaia. Il calcolo effettuato in base ai valori di Tabella XLIII ha dato

come risultato delle perdite molto basse se riferite al potere calorifico inferiore, per cui cautelativamente si assume un rendimento di produzione unitario riferito al potere calorifico inferiore.

Viene riportato in *Figura 78* il confronto tra i consumi reali tradotti in energia fornita all'acqua e i valori ottenuti dalla simulazione dinamica dell'edificio.

Nella successiva *Tabella LVIII* è invece evidenziata la differenza tra valori misurati e calcolati.

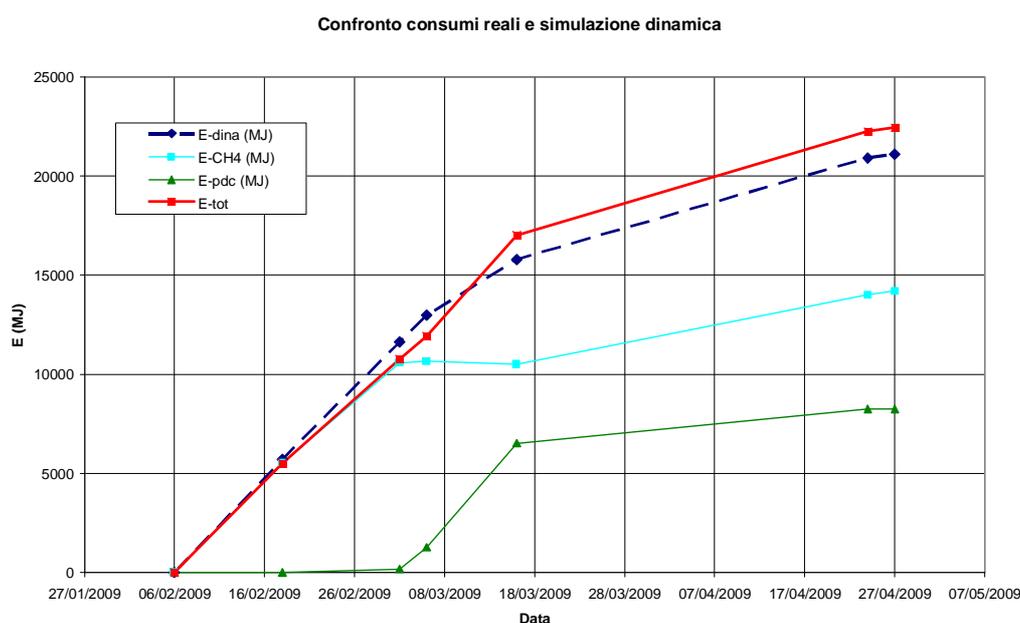


Figura 78 – Confronto tra energia incrementale misurata e quella derivata dalla simulazione

Tabella LVIII - Confronto tra misure e simulazione dinamica

			Misurato	Dinamico	
da	a	giorni	E-tot (MJ)	E-dina (MJ)	Scostamento
6/2/09	18/2/09	12	5513	5465	0,9%
18/2/09	3/3/09	15	5237	5743	-9,7%
3/3/09	6/3/09	3	1164	1299	-11,6%
6/3/09	16/3/09	10	5101	2688	47,3%
16/3/09	24/4/09	38	5235	4830	7,7%
24/4/09	27/4/09	3	192	206	-7,0%
TOTALE		81	22444	20231	9,9%

Il confronto tra valori misurati di energia e valori ottenuti con metodi quasi-statici non risulta realizzabile poiché i valori misurati e calcolati sono relativi a periodi diversi. Per fare questo tipo di confronto è necessario disporre dei consumi di gas suddivisi per ogni mese della stagione di riscaldamento. Il confronto fra il modello dinamico e quello quasi statico è invece rappresentato nella *Tabella LXI*, in cui sono riportati i valori calcolati con le tre metodologie.

Tabella LXI - Confronto tra modelli di simulazione

Mese	Dinamico	Quasi-statico 11300		Quasi-statico semp.	
	[MWh]	[MWh]	Scostamento	[MWh]	Scostamento
GENNAIO	18075	23376	29%	24800	37%
FEBBRAIO	12951	17877	38%	20278	56%
MARZO	7983	13478	69%	15671	97%
APRILE (15 gg)	1322	916	-31%	1458	10%
TOTALE	40331	55646	38%	62207	54%

6.2.6 Conclusioni

Si osserva come il modello di simulazione dinamico, a fronte di una maggiore definizione del modello dell'edificio, permette di rappresentare con maggiore correttezza il comportamento reale dell'edificio. Il metodo quasi-statico ha il vantaggio di un input dei dati più semplificato e la definizione dell'impianto viene realizzata solamente con l'assegnazione del rendimento di distribuzione ed emissione. A questa maggiore semplicità, nel caso esaminato, non ha corrisposto una precisione adeguata. Spesso, come è stato evidenziato in altre pubblicazioni, i modelli semi-stazionari tendono a sovrastimare i consumi finali rispetto a quelli reali. L'esperienza ha anche permesso di determinare una metodologia per la realizzazione di un'analisi energetica dettagliata di un edificio tramite l'utilizzo di adeguata strumentazione e la lettura delle fatture di consumo energetico.

6.3 Analisi Energetica Edifici Scolastici Universitari

Lo scopo di questo lavoro è individuare una metodologia corretta dal punto di vista tecnico-scientifico e di tempistica contenuta, che possa fungere da base per l'analisi energetica dell'intero patrimonio edilizio dell'Università di Padova.

E' stata analizzata dapprima la situazione generale di alcuni edifici di proprietà dell'Università al fine di disegnare un quadro dei consumi esistenti e successivamente è stata eseguita un'analisi dettagliata di tre edifici particolarmente significativi comparando i consumi reali con quelli ottenuti dall'utilizzo di due diverse metodologie: il foglio di calcolo Ecodomus basato sulla metodologia semi-stazionaria e il software dinamico Trnsys.

Per ogn'uno degli edifici sono state inoltre formulate delle ipotesi d'intervento al fine di migliorare la prestazione energetica, tramite una valutazione di tipo economico in grado di stimare il tempo di ritorno ai costi preventivati

La procedura di audit energetico è composta da due parti:

PROCEDURA GENERALE: per una valutazione energetica di massima, applicabile al parco edilizio dell'università di Padova, avente lo scopo di individuare quali possono essere le variabili principali a cui i consumi sono collegati

- **PROCEDURA PARTICOLARE:** con lo scopo di effettuare un'analisi approfondita delle prestazioni energetiche di tre edifici:
 - complesso "Liviano";
 - istituto di Fisica "Galilei"
 - facoltà di economia , edificio "C3".

Il lavoro è stato svolto in collaborazione con il servizio Manutenzione, per cercare di individuare le linee guida del lavoro, in modo che risultasse utile sia dal punto di vista accademico, sia dal punto di vista di chi gestisce gli edifici.

L'analisi si è sviluppata nella raccolta di due tipologie fondamentali di dati

1. Dati relativi ai consumi: relativi alle informazioni sull'energia effettivamente utilizzata per la totalità delle attività dell'edificio;
2. Dati strutturali: relativi alle singole strutture singolarmente analizzate, nelle sue componenti architettoniche e costruttive; questi sono fondamentali per

identificare la tipologia e la qualità dell'involucro e sono una componente importante per il calcolo delle dispersioni.

La raccolta dei dati è differenziabile, inoltre, anche in base alle due diverse tipologie di analisi fatte in questo elaborato:

- Raccolta dati per l'analisi globale degli edifici dell'ateneo: basata principalmente sulla ricerca dei dati strutturali e dei consumi mediante analisi di documenti, bollette e dati informatici raccolti dall'ufficio manutenzione in un software di propria realizzazione chiamato Geotec
- Raccolta dati per lo studio dettagliato dei 3 edifici presi in esame: i dati caratteristici delle tre strutture derivano da diretti rilevamenti e misure sul campo.

6.3.1. Dati Relativi ai Consumi

E' stato individuato un parametro che potesse essere rappresentativo dei consumi delle strutture e che garantisca un corretto confronto tra di esse.

Tale parametro è il **kWh/m²anno**, ossia l'energia richiesta dalla struttura (kWh) in un anno per unità di superficie.

Alla determinazione dell'energia di cui necessita ogni edificio o complesso concorrono due fondamentali grandezze:

- i consumi dovuti al riscaldamento e alla produzione di acqua calda sanitaria della struttura;
- l'energia elettrica di cui l'edificio necessita per l'illuminazione e la forza motrice e la climatizzazione.

Il parco edilizio dell'Università di Padova è caratterizzato da un'estrema eterogeneità per quanto riguarda le dimensioni, il periodo di costruzione, il pregio della struttura e la destinazione d'uso, passando dalla più rurale stalla di Agripolis allo splendore storico e culturale del Palazzo Bo e della Sala dei Giganti presente al Liviano.

Quantificando queste prime considerazioni, nella sola provincia di Padova (esistono infatti delle proprietà in altre province, come ad esempio Bressanone) si possono contare circa 230 edifici, per un totale di circa 3 milioni di metri cubi (considerando sia edifici di proprietà che affittanze), destinati come già accennato alle attività più diverse: aule, uffici, mense, segreterie, aule studio, alloggi, appartamenti etc...

Da questo vastissimo elenco, si è selezionata un insieme più ristretto in base a:

- strutture di proprietà: le costruzioni analizzate sono solo quelle di proprietà dell'ateneo, eccezion fatta per il Palazzo Borgherini (edificio dato in affitto al dipartimento di Lingue e letterature) in quanto rappresentativo di una particolare tipologia costruttiva;
- edifici nella città di Padova: si è scelto di escludere gli edifici fuori dalla città di Padova, per avere strutture almeno territorialmente omogenee;
- importanza degli edifici: ci si è soffermati naturalmente sugli edifici di maggiore importanza per l'università (grandi poli didattici e edifici storici), trascurando i numerosi ma piccoli lasciti fatti all'ateneo da privati, tutti gli appartamenti dati in affitto e le strutture dell'ospedale policlinico;
- disponibilità di dati: per la completezza dell'analisi, la valutazione anche soltanto globale del fabbisogno energetico degli edifici presuppone la conoscenza dei consumi elettrici e termici (intesi come litri o metri cubi di combustibile usati annualmente per il riscaldamento e la produzione di acqua calda sanitaria); in molti casi i dati reperiti mancavano di una o di entrambe le voci, rendendo così impossibile la ricostruzione nel complesso. E' il caso, per esempio, degli edifici in *appalto calore*, ossia una tipologia di contratto che prevede il pagamento di una quota annuale fissa che l'università versa ad una società di servizi, la quale in cambio si occupa dell'utilizzo e della manutenzione delle centrali termiche, garantendo nell'arco dell'intero anno condizioni termiche predefinite e l'adeguata produzione di acqua calda sanitaria.

Inoltre la presenza di centrali termiche che forniscono energia a più strutture, hanno fatto sì che alcuni edifici che avrebbero meritato un'analisi più approfondita (es. il complesso di biologia Vallisneri) venissero studiati insieme agli altri del circuito, dal momento che non è stato possibile scindere il consumo globale nelle singole unità.

Nella seguente tabella viene riportato l'elenco degli edifici che costituiscono il campione di questo studio; naturalmente per le considerazioni fatte il numero è sensibilmente ridotto, ma è da ritenersi assolutamente rappresentativo della realtà globale del patrimonio edilizio dell'Università.

Tabella LXIV – Elenco edifici analizzati

<i>Nome Edificio</i>	<i>Comune</i>	<i>Codice edificio</i>	<i>Indirizzo</i>
CENTRALE TERMICA NORD PIOVEGO	PADOVA	00310	VIALE G. COLOMBO, 3 (GIA' VIA TRIESTE, 75)
CENTRO INTERCHIMICO	PADOVA	00210	VIA MARZOLO 1
CENTRO LINGUISTICO DI ATENEO	PADOVA	01130	VICOLO DEI CONTI, 12
COMPLESSO DI ELETTROTECNICA ED ELETTRONICA	PADOVA	00280	VIA G. GRADENIGO, 6/A
COMPLESSO DIDATTICO PIOVEGO	PADOVA	00300	VIA U. BASSI, 1
COMPLESSO INGEGNERIA	PADOVA	00130	VIA F. MARZOLO, 9
COMPLESSO INGEGNERIA MECCANICA	PADOVA	00140	VIA VENEZIA, 1
COMPLESSO ISTITUTI ANATOMICI	PADOVA	00120	VIA G. FALLOPPIO, 50
COMPLESSO LIVIANO	PADOVA	00050	PIAZZA CAPITANIATO, 7
COMPLESSO NUOVO DI AGRARIA	PADOVA	00275	VIA G. GRADENIGO, 6
COMPLESSO PLURIDIPARTIMENTALE "A. VALLISNERI"	PADOVA	00480	VIALE GIUSEPPE COLOMBO, 3 (EX VIA TRIESTE, 75)
COMPLESSO S. CATERINA	PADOVA	01300	VIA C. BATTISTI 241 - 243
EDIFICIO "G. GALILEI" – FISICA	PADOVA	00180	VIA F. MARZOLO, 8
EDIFICIO DENOMINATO C3	PADOVA	00305	VIA U. BASSI 1
EDIFICIO DI FARMACOLOGIA	PADOVA	00200	LARGO E. MENEGHETTI, 2
EDIFICIO DI FISIOLOGIA E CHIMICA ORGANICA	PADOVA	00170	VIA MARZOLO, 3
EDIFICIO DI SCIENZE FARMACEUTICHE EDIFICIO VECCHIO	PADOVA	00190	VIA F. MARZOLO, 5
EDIFICIO EX FISICA TECNICA	PADOVA	00135	VIA F. MARZOLO, 9
EDIFICIO FISICA - POLO DIDATTICO	PADOVA	00230	VIA L. LOREDAN, 10
EDIFICIO PAOLOTTI	PADOVA	00260A	VIA G. B. BELZONI, 7
EDIFICIO SCIENZE FARMACEUTICHE (EX PAT. GEN.)	PADOVA	00240	VIA L. LOREDAN, 16
PALAZZO BELDOMANDI	PADOVA	00225	VIA BELDOMANDI, 1
EX COSTRUZIONI MARITTIME-geotecnica	PADOVA	00150	VIA OGNISSANTI, 39 - 41
ISTITUTI CHIMICI	PADOVA	00215	VIA LOREDAN 2/4
MENSA NORD PIOVEGO (ESU)	PADOVA	00890	VIALE GIUSEPPE COLOMBO, 1 (EX VIA TRIESTE, 75)
PALAZZETTO (C.U.G.A.S.)	PADOVA	00510	VIA G. JAPPELLI 1/A
PALAZZETTO EX DISEGNO	PADOVA	00160	VIA G. JAPPELLI, 1
PALAZZO BORGHERINI	PADOVA	00220	VIA BEATO PELLEGRINO, 26
PALAZZO CA' BORIN	PADOVA	00090	VIA DEL SANTO, 22

PALAZZO CENTRALE BO	PADOVA	00020	VIA VIII FEBBRAIO, 2
PALAZZO DEL CAPITANIO	PADOVA	00040	PIAZZA CAPITANIATO, 3
PALAZZO DOTTORI	PADOVA	00070	VIA DEL SANTO 28
PALAZZO EX RIZZATO- dip.Astronomia	PADOVA	00115	VICOLO DELL'OSSERVATORIO
PALAZZO LEVI-CASES-dip.Scienze Economiche	PADOVA	00037	VIA DEL SANTO, 33
PALAZZO LUZZATO DINA IN BUZZACCARINI	PADOVA	00113	VIA VESCOVADO
PALAZZO SALA	PADOVA	00030	VIA SAN FRANCESCO, 11
PALAZZO STORIONE "A"	PADOVA	00025A	RIVIERA TITO LIVIO, 6
PALAZZO WOLLEMBORG	PADOVA	00080	VIA DEL SANTO 26
PSICOLOGIA 1	PADOVA	01200	VIA VENEZIA, 8
PSICOLOGIA 2	PADOVA	01210	VIA VENEZIA, 12

Ogni struttura è codificata con un codice a 5 cifre, seguito eventualmente da una lettera nel caso si tratti di un edificio che appartiene ad un complesso.

La somma dei volumi (globali, cioè compreso l'interrato) degli edifici analizzati rappresenta il 63,5% rispetto al totale dei volumi degli edifici di proprietà ed il 74,9% del totale degli edifici a Padova. Perciò si può quindi ritenere che il campione sia rappresentativo della totalità del parco edilizio.

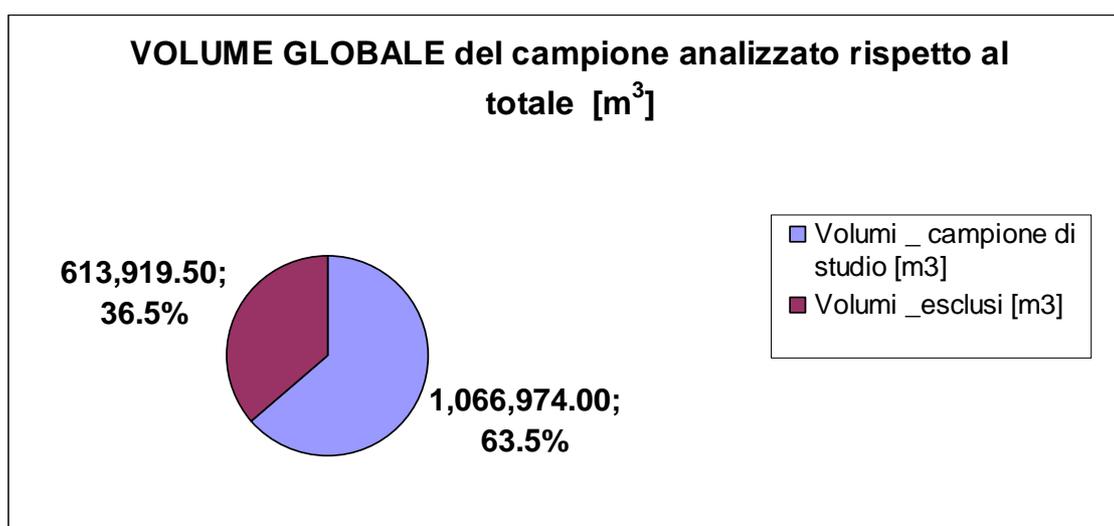


Figura 79 – Rapporto edifici analizzati rispetto alla totalità

6.3.1.1 CONSUMI TERMICI

Il periodo di interesse della raccolta dati è l'anno 2007, per la procedura generale di audit energetico globale e, nei limiti del possibile, compreso tra il 15 ottobre 2006 e il 15 aprile 2007 per la procedura particolare relativa all'analisi dei consumi di riscaldamento delle analisi dettagliate.

I combustibili rilevati per la produzione di energia sono stati:

1. **Gasolio e Biodiesel:** l'impianto di questa categoria è strutturato in maniera tale che il gruppo termico venga alimentato da una cisterna rifornita periodicamente. Il dato di riferimento quindi per il calcolo del fabbisogno energetico termico è il numero di cariche effettuate. Questa pratica non consente di determinare con certezza l'effettiva quantità di combustibile utilizzata in una stagione di riscaldamento: i consumi sono riferiti alle cariche effettuate senza riportare la giacenza residua in cisterna, rendendo impossibile un conteggio preciso dei litri consumati in un anno. Fortunatamente i dati forniti si estendono dalla stagione 2004/2005 fino alla stagione 2007/2008 ed è stata quindi possibile ricavare una carica media stagionale complessiva, semplicemente la media aritmetica di tali consumi.
2. **Gas metano:** la ricostruzione di questa parte di consumi è avvenuta mediante lettura diretta nelle singole bollette mensili dei metri cubi fatturati dalla società fornitrice. In questo caso sono stati sommati i consumi dei periodi interessati dall'analisi.

Per quanto riguarda l'acquisto di combustibili per il riscaldamento, risultano molteplici i fornitori.

Complessivamente ci sono 4 tipi di lotti, ovvero di tipi di fornitura:

1. Lotto **A** Appalto Calore APS
2. Lotto **B1** Fornitura gasolio
3. Lotto **B2** Fornitura Gas
4. Lotto **D** Appalto Calore THUGA

Il lotto **B2** si riferisce all'acquisto di gas metano da società esterne, per un totale di circa 60 utenze. Per 48 di esse è stata resa disponibile, sia per il 2006 che per il 2007, una bolletta cumulativa mese per mese.

Per un certo numero di strutture è l'Università stessa che acquista, periodicamente a seconda delle esigenze, il gasolio ed il biodiesel da fornitori esterni. In tal modo è possibile conoscere l'acquisto annuale, ma non propriamente il consumo reale, per via delle rimanenze in cisterna non sempre registrate dell'anno prima. Si tratta del lotto **B1**.

Per una serie di edifici e importanti complessi (come il Sud Piovego), da anni ormai l'Università si affida ad una società esterna, l'APS. La formula usata è quella dei cosiddetti "contatti appalto calore", attraverso i quali la società vincitrice della gara d'appalto, garantisce una temperatura interna costante all'interno dell'edificio, indipendentemente dai consumi reali.

Questo tipo di fornitura (lotto **A**) riguarda 17 edifici, alcuni con caldaia a gas ed altri con caldaia a gasolio.

Un secondo tipo di "appalto calore" interessa la zona di Legnaro, dove è la società THUGA a garantire il riscaldamento. Non è stato possibile risalire a nessun dato sui consumi annuali degli edifici interessati dal lotto **D**.

Tabella LXVIII – Consumi per ogni lotto, dati secondo questo studio

FORNITURA	Quantità 2007	Kwh 2007
GAS- Università	926.084 m ³	9.903.954
Gasolio, biodiesel –Università ▪	973.504 litri	11.108.431
Gas appalto APS*	350.634 m ³	3.749.830
Gasolio, APS*	741.734 litri	8.674.161

inserito il valore medio dei litri acquistati nelle 4 stagioni di riscaldamento dal 2005-2008; il rispettivo importo è stato calcolato in base al costo medio Euro/litro nelle stagioni dal 2006 al 2008, ossia 0,94996 Euro/l Iva esclusa

* valore medio dalle stagioni 2006/2007 e 2007/2008

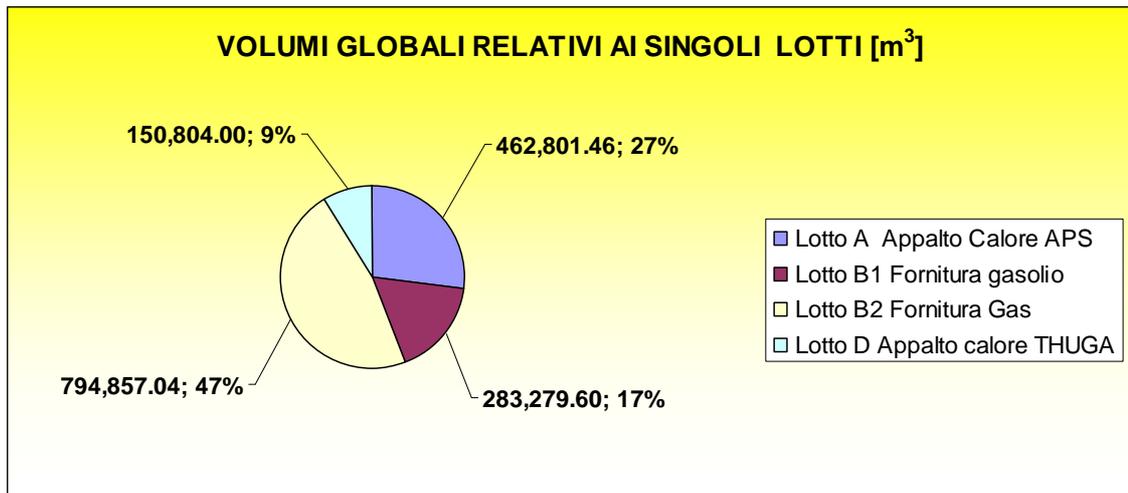


Figura 80 – Volumi globali dei singoli lotti

Nel dettaglio, delle 26 strutture e complessi analizzati si individuano:

- 11 con caldaia a metano- gestione all'Università
- 5 con caldaia a gasolio, biodiesel- gestione all'Università
- 2 con consumi sia di metano che gasolio - gestione all'APS
- 2 con caldaia a metano - gestione all'APS
- 6 con caldaia a gasolio - gestione APS

Il dato finale ottenuto in questa prima sezione è l'energia necessaria per il riscaldamento e la produzione dell'acqua calda sanitaria espressa in kWh_{termico}/m²; ottenuto negli edifici in esame per combustione in caldaia di metano, gasolio e biodiesel.

Il dato è ricavabile dalle bollette in cui sono riportati i valori dei metri cubi o dei litri di combustibile utilizzati mensilmente.

Il valore dell'energia E_h è stato quindi ottenuto dalla seguente relazione:

$$E_h(kWh) = (P_{cich_4} \cdot m + P_{coil} \cdot l_{oil} \cdot \rho_{oil} + P_{cibd} \cdot l_{bd} \cdot \rho_{bd}) / 3.6$$

dove:

P_{cich₄}: potere calorifico inferiore del gas metano, MJ/Nm³;

P_{coil}: potere calorifico inferiore del gasolio, MJ/kg;

Pcibd: potere calorifico inferiore del biodiesel, MJ/kg;

m: volume di metano, m³;

L_oil: litri di gasolio utilizzati;

ρ_oil: densità del gasolio, kg/l;

L_bd: litri di biodiesel utilizzati;

ρ_bd: densità del biodiesel, kg/l;

3,6: fattore di conversione tra J e kWh.

I poteri calorifici utilizzati sono riportati nella seguente tabella:

Tabella LXXI - Poteri calorifici

		MJ		kWh	
Potere calorifico inferiore Metano	Pcich4	38.5	MJ/Nm ³	10.694	kWh/Nm ³
Potere calorifico inferiore gasolio	Pcioil	42.1	MJ/kg	11.694	kWh/kg
Potere calorifico inferiore biodiesel	Pcibd	37.5	MJ/kg	10.417	kWh/kg

Poiché il potere calorifico di gasolio e biodiesel è espresso in MJ/kg, si è dovuta considerare, per essi, la densità. Si è adottato 0,82 kg/ m³ per il gasolio e 0,88 kg/ m³ per il biodiesel (valore ottenuto da analisi di laboratorio per conto dell'Università).

Nella seguente **Figura 81** sono rappresentati i consumi specifici per unità di superficie e volume relativi agli edifici presi in considerazione. Come si può osservare la maggioranza degli edifici hanno consumi specifici abbastanza simili cioè prossimi la valore medio che si attesta intorno ai 120 kWh/m².

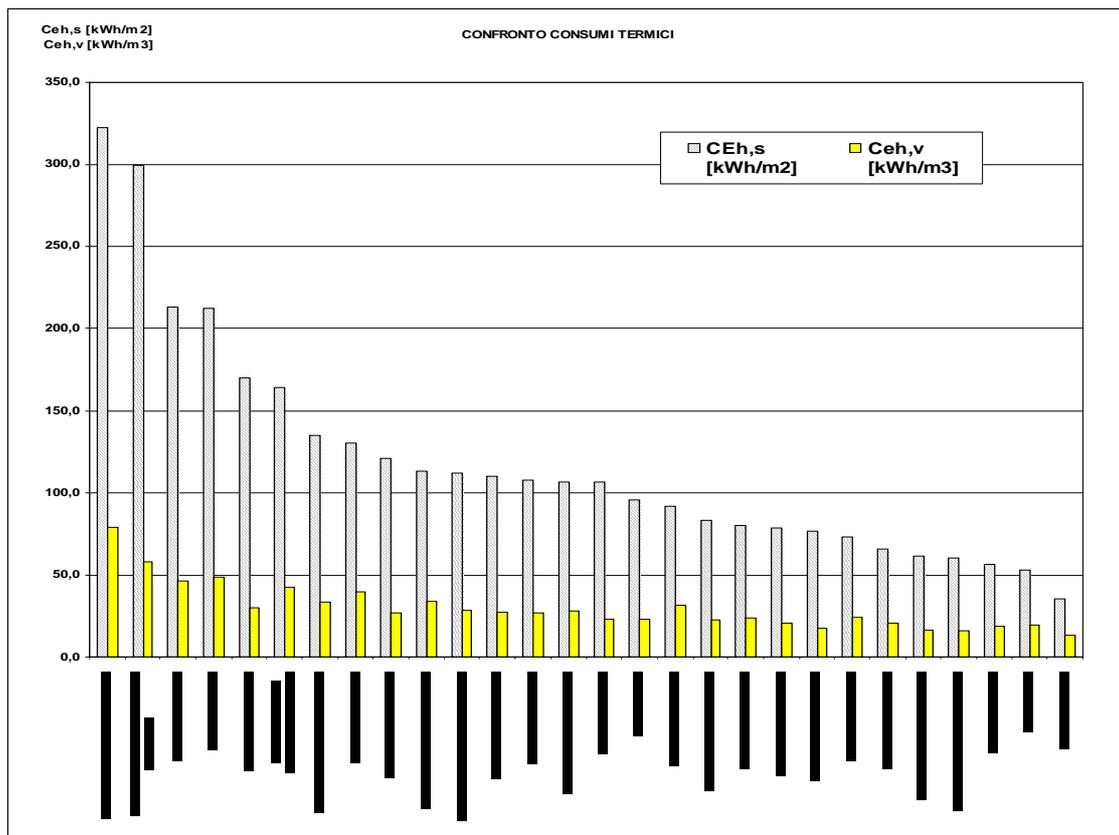


Figura 81 - Consumi termici rapportati alla superficie calpestabile ed la volume, per ogni edificio o gruppo di edifici, anno 2007

6.3.1.2 CONSUMI ELETTRICI

Per quanto riguarda l'acquisto dell'elettricità, l'Università ha forniture da parte dell' ENEL, per alcune utenze in MT e per la maggior parte delle piccole utenze in BT (circa 58), e ad una società vincitrice di una gara d'appalto, ENIPower negli anni più recenti. Le bollette arrivano pertanto, diversificate in base al fornitore e al voltaggio. Alcune sono a cadenza mensile, altre, tra le utenze piccole, a cadenza bimestrale o trimestrale. Per questo motivo si è deciso di trascurare le utenze in BT dell'Enel, assai numerose e disomogenee nei pagamenti.

Sono stati tralasciati gli edifici con fornitura elettrica in bassa tensione e ci si è concentrati esclusivamente su quelli forniti in media e alta tensione. Questa mancanza tuttavia non intacca la validità generale dell'analisi, dal momento che queste utenze rappresentano solo una piccola parte del consumo globale di energia elettrica (circa il

5%), pertanto questa piccola influenza non avrebbe minimamente compensato lo sforzo richiesto nell'analisi di bollette bimestrali di circa 85 utenze.

I dati si riferiscono al periodo dal 1 gennaio al 31 dicembre 2007.

Tabella LXXIV – Riepilogo consumi elettrici relativi al campione, anno 2007

TIPO DI UTENZA	kWh 2007	Importo EURO
Enel MT	1.440.872	253.447
Enipower MT	22.772.221	3.247.751
Enipower BT	4.997.579	837.402
Totale	29.210.672	4.338.600,3

All'interno della valutazione dei consumi elettrici per i tre edifici presi in considerazione, si è cercata una stima del consumo elettrico destinato all'illuminazione, sia perché questa informazione risulta di estrema importanza nelle simulazioni per la valutazione degli apporti interni di calore, sia perché un valore troppo elevato di questo parametro può suggerire immediatamente un primo possibile intervento di riduzione di energia richiesta, ossia la sostituzione delle lampade con una tipologia ad alta efficienza.

Si è proceduto in questo caso a rilevare direttamente sul luogo il numero e la tipologia di lampade per ogni tipologia di locale (ufficio, corridoio, aula, servizi igienici od officine), in modo da ricavare un consumo energetico unitario per ogni edificio.

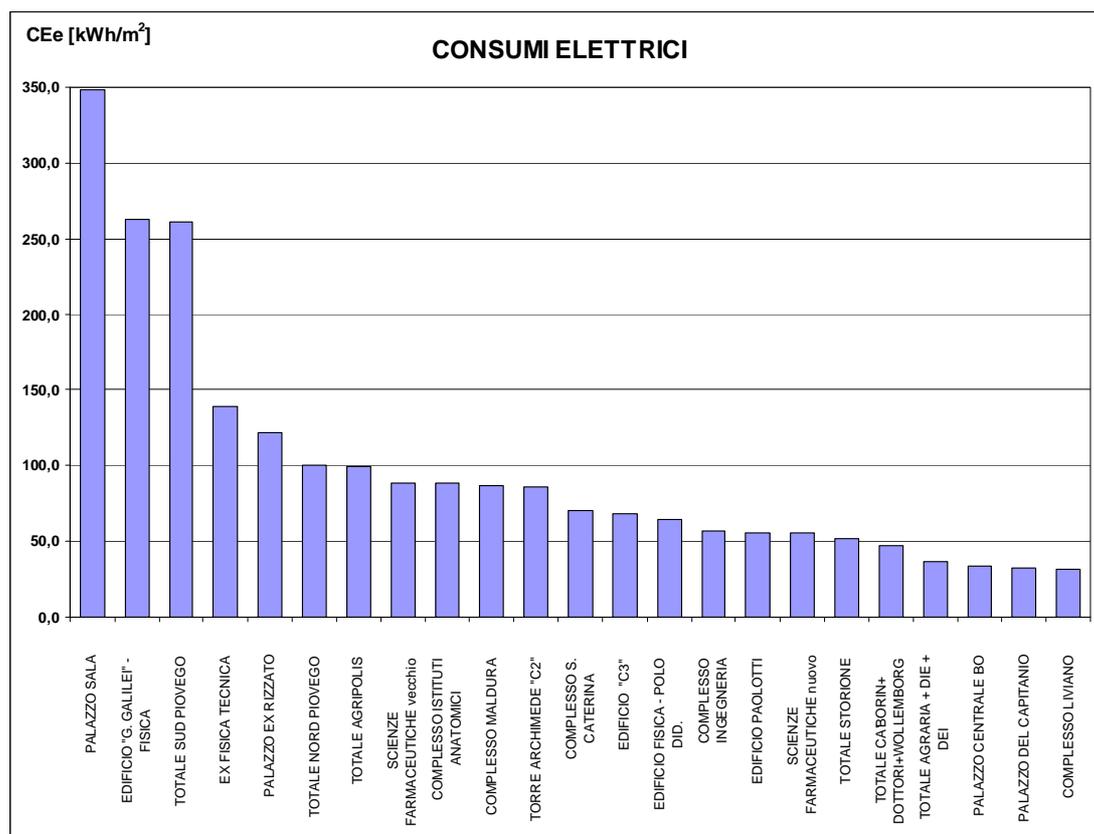


Figura 82 - Consumi elettrici rapportati alla Superficie calpestabile, anno 2007

6.3.2. Dati Strutturali

Le caratteristiche strutturali sono state acquisite

- in parte per *via elettronica* sottoforma di file Autocad, Archicad e Geotec (software di gestione degli edifici interno all'ufficio tecnico)
- in parte *mediante sopralluoghi* nei tre edifici analizzati nel dettaglio (Liviano, istituto di Fisica Galilei, edificio C3).

Durante queste visite si è provveduto alla misurazione diretta di alcuni parametri fondamentali dell'edificio (usati in parte come verifica di quelli ricavati da documenti e progetti) al fine di determinare le caratteristiche termo-fisiche dell'involucro e dell'impianto di produzione e distribuzione dell'energia.

La strumentazione usata è stata elementare (metro, calibro e misuratore laser), idonea per misurare:

- spessori dei muri

- dimensioni delle componenti vetrate
- spessori delle vetrocamere
- dimensione delle superfici calpestabili
- altezze di locali
- materiali usati nei vari componenti

Nella seguente *Tabella LXXVII* sono riportati i dati strutturali contenuti nel database degli edifici Universitari

Tabella LXXVII – Dati strutturali da GEOTEC

codice	Nome edificio	Volume fuori_T [m ³]	Volume interrato [m ³]	calpestabile [m ²]	piani_tuori_terra	altezza_fuori_terra [m]	Piani interrati	altri piani
00020	PALAZZO CENTRALE BO	94,078.4	7,579.3	16,712.6	4.0	23.0	1.0	1.0
00030	PALAZZO SALA	8,969.2	221.8	2,146.6	3.0	14.7	1.0	1.0
00037	PALAZZO LEVI-CASES- dip.Sienze Economiche	7,863.0	141.8	1,956.6	3.0	12.0	1.0	0.0
00040	PALAZZO DEL CAPITANIO	20,145.3	0.0	4,408.8	5.0	17.8	0.0	0.0
00050	COMPLESSO LIVIANO	33,424.0	3,077.7	7,500.0	4.0	15.8	1.0	0.0
0069	00090 PALAZZO CA' BORIN	8,905.9	121.7	1,948.7	3.0	13.0	1.0	0.0
0069	E1 (00070 PALAZZO DOTTORI, 00080 PALAZZO WOLLEMBORG)	24,794.6	2,144.8	6,798.6	3.0	14.3	1.0	1.0
0069	TOTALE STORICI v. del Santo	33,700.5	2,266.5	8,747.4				
00113	PALAZZO LUZZATO DINA IN BUZZACCARINI	15,632.2	0.0	4,149.0	3.0	15.1	0.0	2.0
00115	PALAZZO EX RIZZATO	7,078.9	0.0	2,359.6	4.0	12.0	0.0	0.0
00120	COMPLESSO ISTITUTI ANATOMICI	52,724.2	0.0	12,959.7	3.0	17.0	0.0	2.0
00130	COMPLESSO INGEGNERIA	83,716.0	1,623.0	20,609.2	3.0	15.5	1.0	1.0
00135	EDIFICIO EX FISICA TECNICA	14,343.7	763.5	3,150.3	3.0	16.0	1.0	2.0
00150	EX COSTRUZIONI MARITTIME- geotecnica	12,061.3	0.0	3,281.8	2.0	8.5	0.0	1.0
00180	EDIFICIO "G. GALILEI" - FISICA	40,835.9	0.0	10,797.3	4.0	15.5	0.0	4.0
00190	EDIFICIO DI SCIENZE FARMACEUTICHE	26,799.8	4,169.0	6,978.3	3.0	15.2	1.0	1.0
00220	PALAZZO BORGHERINI	5,081.1	358.9	1,758.9	3.0	11.0	1.0	1.0
00225	PALAZZO BELDOMANDI	4,430.0	0.0	1,410.0	4.0	12.5	0.0	0.0
00230	EDIFICIO FISICA - POLO DIDATTICO	16,953.9	0.0	4,347.7	3.0	16.5	0.0	1.0
00240	EDIFICIO SCIENZE FARMACEUTICHE vecchio edif	12,442.6	0.0	3,052.9	4.0	14.6	0.0	0.0

00275	00275 COMPLESSO NUOVO DI AGRARIA	19,499.5	0.0	5,573.1	4.0	13.5	0.0	1.0
00280	00280 COMPLESSO DI ELETTROTECHNICA ED ELETTRONICA	52,507.9	1,151.8	13,311.9	5.0	18.0	1.0	0.0
	TOTALE DEI+DIE	72,007.4	1,151.8	18,885.0				
00305	EDIFICIO DENOMINATO "C3"	11,838.0	2,317.0	4,304.0	6.0	19.5	1.0	1.0
01130	CENTRO LINGUISTICO DI ATENEIO	1,016.3	0.0	305.4	2.0	6.8	0.0	0.0
01300	COMPLESSO S. CATERINA	23,400.0	0.0	5,420.0				
8888	00170 EDIFICIO DI FISILOGIA E CHIMICA ORGANICA	21,034.2	0.0	5,231.1	4.0	10.0	0.0	0.0
8888	00200 EDIFICIO DI FARMACOLOGIA	10,092.2	0.0	2,562.0	4.0	14.4	0.0	0.0
8888	A1	8,627.0	0.0	2,132.7	3.0	9.0	0.0	0.0
8888	B1	73,972.7		24,657.0	9.0	0.0	1.0	0.0
	TOTALE A1+B1	82,599.7		26,789.7				
8888	TOTALE SUD PIOVEGO	113,726.1	0.0	34,582.8				
9999	0 00310 CENTRALE TERMICA NORD PIOVEGO	6,209.0	0.0	887.0				
9999	00140 COMPLESSO INGEGNERIA MECCANICA	69,413.0	0.0	15,435.8	8.0	26.8	0.0	0.0
9999	00300 COMPLESSO DIDATTICO PIOVEGO	10,782.0	0.0	3,037.2	4.0	11.8	0.0	1.0
9999	00480 COMPLESSO "A. VALLISNERI"	101,595.0	17,780.0	33,006.0	9.0	30.0	1.0	1.0
9999	00890 MENSA NORD PIOVEGO (ESU)	12,958.0	0.0	3,454.6	2.0	6.4	1.0	0.0
9999	01200 PSICOLOGIA 1	16,547.0	8,238.0	7,137.0	7.0	22.5	1.0	1.0
9999	01210 PSICOLOGIA 2	24,255.3	3,561.7	7,679.5	7.0	23.0	2.0	1.0
9999	TOTALE NORD PIOVEGO	241,759.3	29,579.7	70,637.1				
0025A	PALAZZO STORIONE "A"	21,209.4	8,615.6	8,136.9	6.0	23.5	1.0	1.0
0260A	EDIFICIO PAOLOTTI	25,722.1	4,150.4	8,604.3	4.0	15.0	1.0	0.0

6.3.3. Analisi delle Prestazioni energetiche

Il confronto dei fabbisogni energetici per unità di superficie per riscaldamento è stato svolto eseguendo una classificazione basata su valori di riferimento ricavati a partire dai campioni analizzati. Il valore di riferimento interno è stato il consumo medio CE_h del campione di edifici riferito alle condizioni climatiche reali, senza nessuna normalizzazione né rispetto ai gradi giorno, né rispetto al periodo di riscaldamento. Analogamente si è calcolata la media del fabbisogno E_h complessivo

di energia del campione di edifici. Utilizzando la metodologia illustrata in Filippi, 2008. Si sono individuate 4 classi legate alla priorità di interventi:

- I – edifici con priorità di intervento maggiore;
- II e III – edifici situazioni intermedie;
- IV - edifici con priorità di intervento minore.

In *Figura 83* sono rappresentati i consumi totali di energia primaria E_h in funzione dei consumi specifici $CE_{h,s}$ per unità di superficie. Nel quadrante I si possono quindi individuare gli edifici che hanno le situazioni peggiori perché si trovano in una situazione di elevato consumo di energia totale e specifica contemporaneamente.

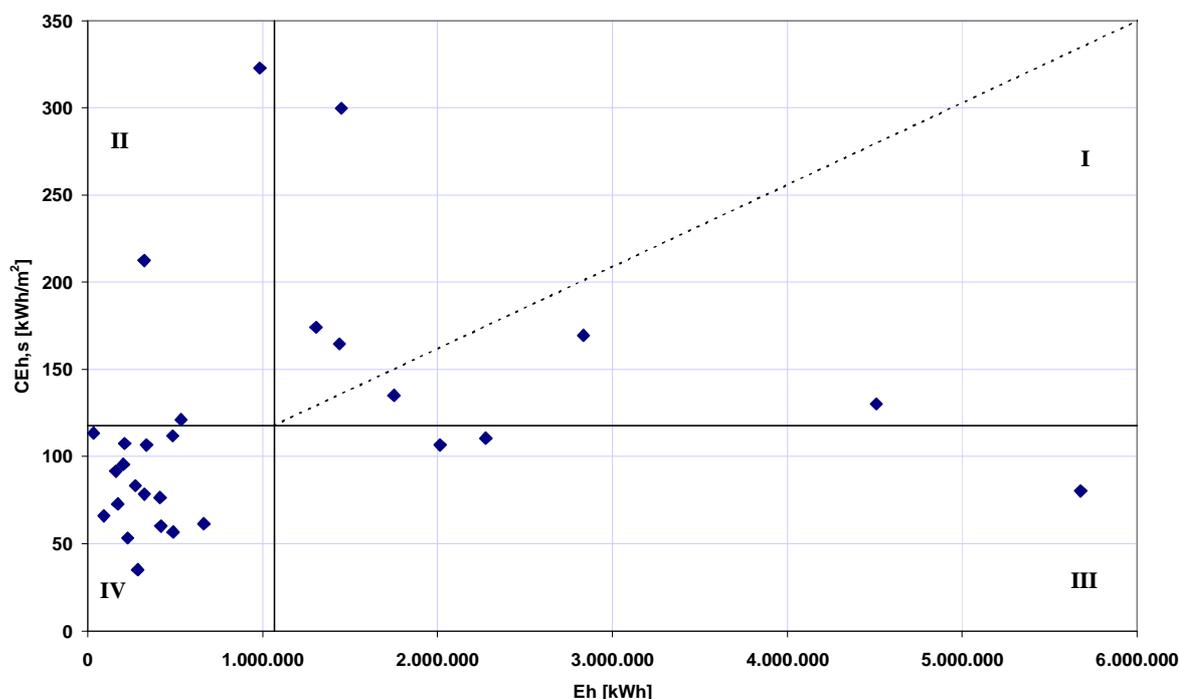


Figura 83 – Rappresentazione dei consumi energetici del campione di edifici

Al fine di migliorare l'analisi delle singole strutture è possibile approfondire lo studio andando a considerare ulteriori parametri che possano essere significativi.

Ecco, quindi, la necessità di trovare dei criteri per dividere il campione in analisi in gruppi omogenei, valutando i consumi medi per ogni gruppo.

I parametri che si sono individuati sono:

a) *periodo di costruzione*

b) *destinazione d'uso (aule, uffici, tipo di laboratori presenti)*

A seconda del tipo di valutazione si sono presi oltre ai consumi termici specifici su m² di superficie calpestabile, anche quelli elettrici.

E' stata proposta, infine, una classificazione degli edifici del campione, in base alle similitudini dei comportamenti energetici.

a) *Il periodo di costruzione*

Si sono individuati 5 periodi:

- prima del 1925
- dal 1925 al 1945 (comprende gli anni del Fascismo)
- dal 1945 al 1980
- dopo il 1980 fino ad oggi

In certi casi l'edificio è il risultato di più lavori di espansione (per esempio il Complesso del Liviano ha una parte antica del 1600, una più recente del 1937 e l'ultima degli anni 1960). Si cerca, allora, di considerare la data di costruzione della porzione che occupa il volume maggiore, quindi la più significativa.

Un altro problema è che il campione è costituito in prevalenza da edifici storici, mentre è povero di edifici recenti. Ecco che il numero di unità per gruppo varia da otto (precedenti il 1925) a uno (dopo il 1980).

Per ogni gruppo si sono calcolati i valori medi di consumi termici come kWh/m² e kWh/m³.

La tendenza è quella di una diminuzione dei consumi con il passare del tempo, giustificata dall'evoluzione delle tecnologie costruttive e, in tempi recenti, dall'introduzione di norme per il risparmio energetico.

Si osservi a tale proposito la *Figura 84*.

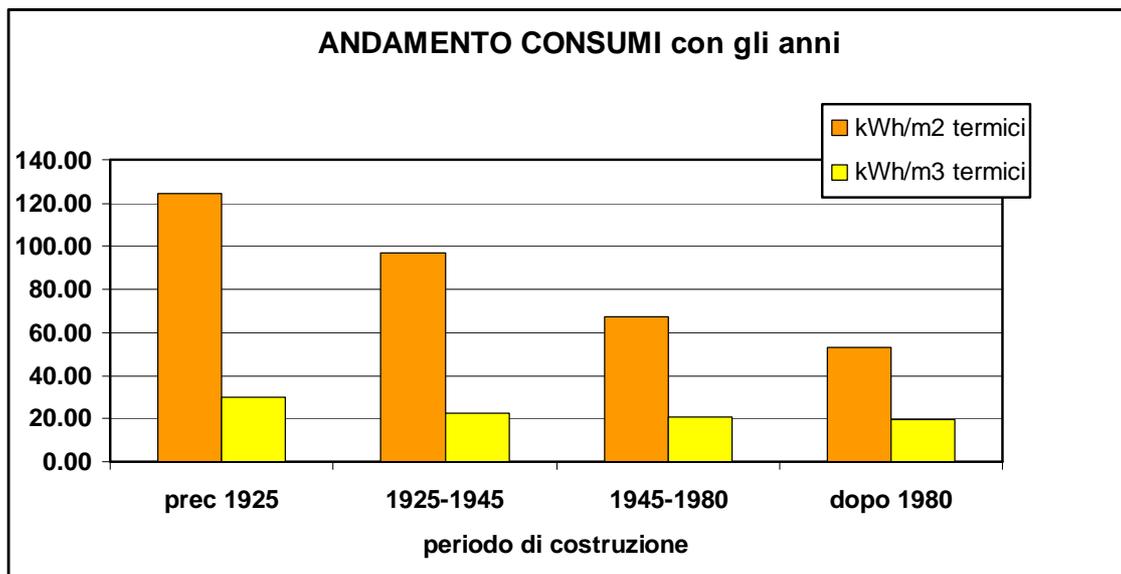


Figura 84- Andamento dei consumi per il riscaldamento in funzione del periodo di costruzione dell'edificio

b) La destinazione d'uso

A seconda del tipo di utilizzo dell'edificio, e, quindi, del tipo di strutture che si trovano in esso, si possono fare delle considerazioni interessanti riguardo i consumi per il riscaldamento. Sono state individuate le seguenti strutture:

- Aule, sia adibite a scopi didattici, sia aule studio. Sono stanze più o meno grandi, con discreta illuminazione, alcuni computers (fissi o portati dallo studente) e con guadagni termici variabili durante l'arco della giornata e del periodo accademico.
- Uffici, sia per il personale docente, sia per il personale dell'amministrazione e della segreteria; sono stanze dotate di un numero di Pc variabile solitamente da 1 a 4 , buona illuminazione e guadagni termici costanti durante l'orario lavorativo (dalle 8-alle18).
- Laboratori del tipo 1: sono quelli che necessitano i grandi ricambi d'aria mediante cappe aspiranti o semplicemente finestre aperte; appartengono all'area medica, farmacologica e chimica. Si presume per essi un consumo notevole per il riscaldamento, soprattutto se non si predispongono di efficienti recuperatori di calore che interessino il sistema di ventilazione.

- Laboratori del tipo 2. sono laboratori misti, appartenenti a varie facoltà, ma accomunati dal fatto di richiedere attrezzature e computers ad alti consumi elettrici. Si tratta dei laboratori di Fisica, Ingegneria, Astronomia e del Centro di calcolo dell'Ateneo. Si presume per essi un guadagno termico notevole, a causa dell'effetto Joule provocato dalle attrezzature ad alto consumo elettrico.

Classificazione

Tenendo conto sia dell'altezza media per piano, sia della destinazione d'uso, si sono classificati gli edifici del campione in 7 categorie.

L'obbiettivo è quello di abbinare gli effetti strutturali, rappresentati dall'altezza_media_piano, agli effetti dei guadagni termici e della ventilazione caratterizzanti l'edificio.

Per quanto riguarda **l'altezza_media_per_piano** si sono divisi gli edifici in 3 gruppi:

- Altezza variabile, perché l'edificio in esame è eterogeneo e complesso, con altezze per piano diverse, magari con parti distinte costruite in tempi differenti. Ci si sta riferendo al complesso del Liviano, al palazzo del Bo e all'insieme degli edifici storici in via del Santo.
- Altezza maggiore o uguale a 4 m; si ipotizza che un simile valore comporti finestre ampie, così come si presentano gli edifici del secolo scorso. Inoltre, altezze_medie_per_piano elevate comportano superfici calpestabili inferiori rispetto ad edifici equivalenti per il volume ma con minori altezze_medie_per_piano. Questo significa che a parità di kWh consumati, i kWh/m² sono maggiori.
- Altezze minori a 4 m; si presuppone che le finestre, fattore di notevole dispersione, siano più piccole rispetto al gruppo precedente. Appartengono a questo gruppo gli edifici più recenti.

Si sono, poi, considerate **le destinazioni d'uso**, individuando 3 gruppi:

- Edifici con aule ed Uffici
- Edifici con Laboratori del tipo 1
- Edifici con Laboratori del tipo 2

Per una questione di dati disponibili, la categoria con altezza media per piano variabile è presente solo con la destinazione d'uso Aule ed Uffici

Tabella LXXX - Criteri di classificazione degli edifici

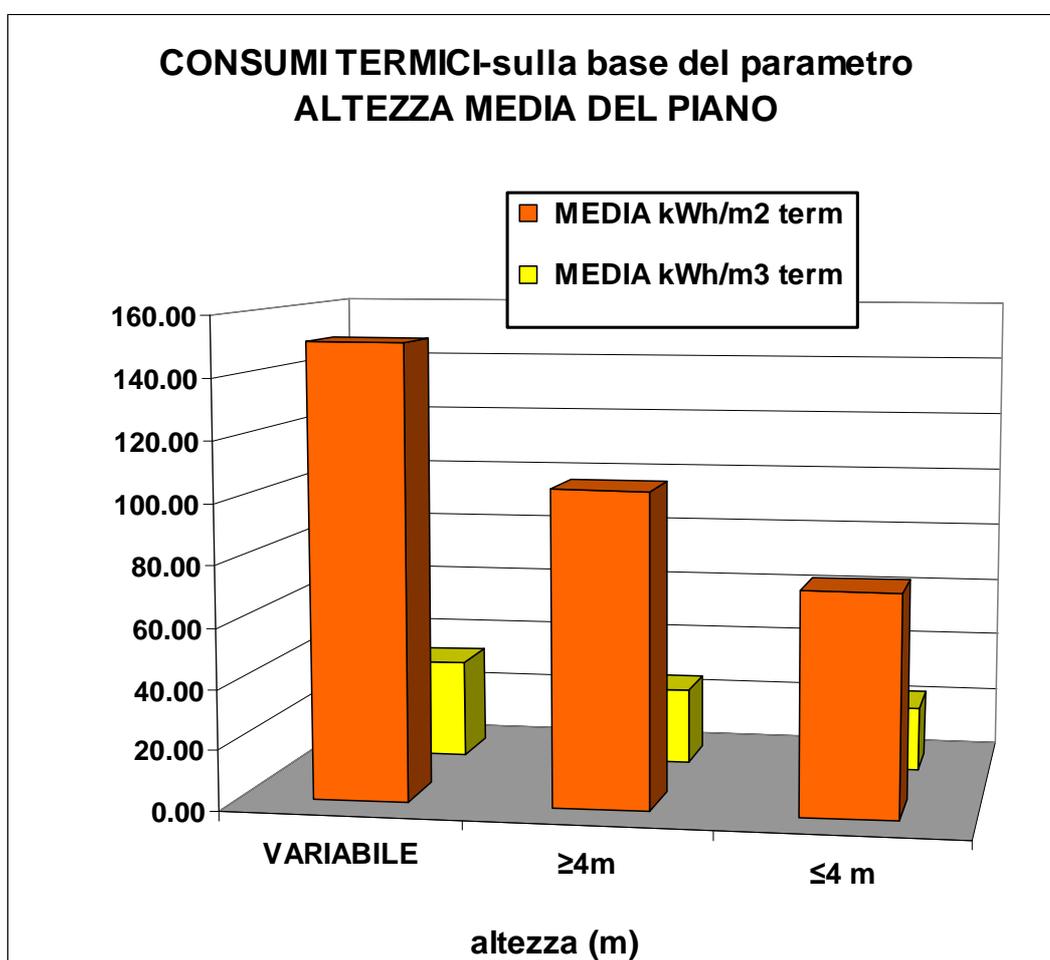
TIPOLOGIA DI STRUTTURA	
TIPO	DESCRIZIONE
1	edifici eterogenei di età e altezze per piano molto variabili- uffici/aule
2	edifici con altezze piano elevate, ≥ 4 m , ampie finestre- uffici/ aule
3	edifici con altezze piano elevate, ≥ 4 m , ampie finestre- con Lab1
4	edifici con altezze piano elevate, ≥ 4 m , ampie finestre- con Lab 2
5	edifici con finestre medie o piccole, altezze piano < 4 m -uffici /aule
6	edifici con finestre medie o piccole, altezze piano < 4 m - con Lab1
7	edifici con finestre medie o piccole, altezze piano < 4 m - conLab 2

Analizzando i risultati di *Figura 85* e *Figura 86* si possono fare le seguenti considerazioni:

1. Gli edifici appartenenti alla categoria 1, cioè quelli con altezza_media_piano variabile, presentano consumi per il riscaldamento notevoli, sia rapportati alla superficie, sia rapportati al volume. I consumi elettrici, trattandosi solo di aule e uffici, sono piuttosto bassi.
2. Indipendentemente dalla destinazione d'uso, i consumi diminuiscono passando da un valore di altezza_media_piano superiore a 4 m ad valore inferiore a 4 m. Questo è visibile dal diagramma di *Figura 85*.
3. Gli edifici con aule ed uffici e gli edifici con un certo tipo di laboratori aumentano i consumi termici con l'aumento del parametro dell'altezza media per piano. Quanto detto è visibile dalla *Figura 86*, confrontando la categoria 2, 3 e 4 rispettivamente con 5, 6 e 7.
4. Nel caso degli edifici con laboratori del tipo 1 (categorie 3 e 6) , ipotizzando che i guadagni termici (illuminazione, occupanti e strumentazione) siano insufficienti a bilanciare le dispersioni per ventilazione e trasmissione verso l'esterno, si nota come l'aumento dell'altezza media piano comporti una maggiore spesa energetica. Infatti non aumenta solo il parametro kWh/m² ma

anche il kWh/m^3 , che fornisce informazioni sulla qualità dell'involucro edilizio.

5. Il tipo di laboratorio influenza i carichi termici e, quindi, i consumi per il riscaldamento, sia che si esprima rispetto alla superficie o rispetto al volume. I gruppi 3 e 6, quelli con laboratori del tipo 1, consumano assai più dei gruppi 4 e 7, con laboratori ad alto consumo elettrico del tipo 2.
6. I consumi elettrici dipendono esclusivamente dalla destinazione d'uso; sono maggiori se presenti laboratori del tipo 2, cioè quelli misti.



*Figura 85 - Consumi termici medi degli edifici con simili valori del parametro
altezza_media_piano*

Tabella LXXXIII - Valori fabbisogni energetici per riscaldamento ed elettrici, medi degli edifici appartenenti alla stessa tipologia

tipologia struttura	MEDIA kWh/m ² term per tipologia	MEDIA kWh/m ³ term per tipologia	MEDIA kWh/m ² elettr per tipologia
1	150.66	33.19	37.27
2	79.7	20.8	47.6
3	187.74	46.09	88.05
4	86.67	20.28	86.73
5	72.0	21.8	47.1
6	87.40	26.58	74.80
7	71.60	21.36	161.45

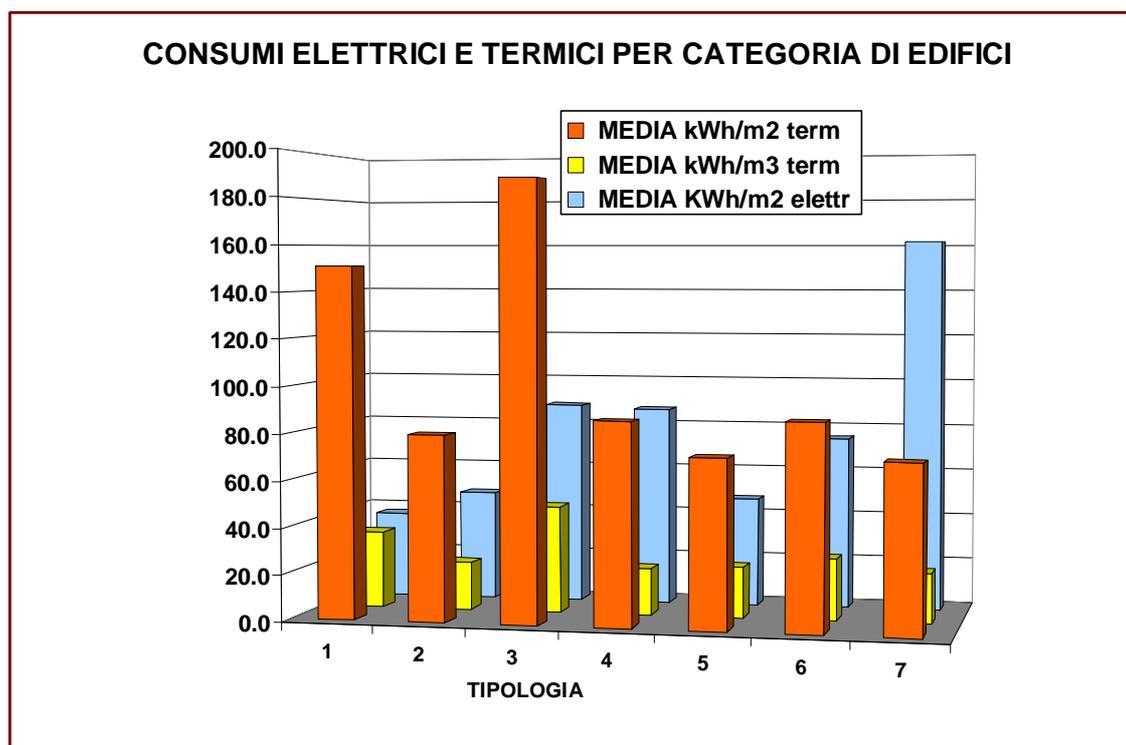


Figura 86 - Consumi termici medi degli edifici appartenenti alla stessa tipologia

6.4 Analisi Energetica di Singoli Edifici Universitari

Vediamo ora nel dettaglio le analisi realizzate per 3 edifici:

- 1 complesso “Liviano;
- 2 istituto di Fisica “Galilei”
- 3 facoltà di economia , edificio “C3”.

Per ogni edificio lo studio è presentato nella seguente sequenza:

- Dati generali
- Trasmittanza strutture opache e vetrate
- Superfici disperdenti
- Carichi interni
- Tipologia impiantistica
- Confronto calcoli in situazioni convenzionali
- Confronto calcoli in situazioni reali
- Analisi economica interventi migliorativi

Gli strumenti di calcolo per le simulazioni sono stati, per le simulazioni quasi statiche, Ecodomus sviluppato dalla società Vi.energia della Provincia di Vicenza, mentre per le simulazioni dinamiche si è utilizzato il software TRNSYS. Ecodomus implementa il modello di calcolo della norma UNI EN 13790:2008 come illustrata nel paragrafo 3.2 mentre TRNSYS utilizza la metodologia dinamica illustrata nel paragrafo 2.2.

Le simulazioni sono state eseguite secondo due fasi:

La prima fase tendente a tarare il modello di calcolo, si è basata su valori convenzionali standard definite dalla normativa. Lo scopo delle simulazioni è quello di confrontare il modello fisico dell’edificio con le stesse condizioni al contorno: dati climatici, apporti interni, ventilazione, in modo da verificare se il modello semplificato dava dei risultati corretti. In tutta questa prima serie di simulazioni i dati di riferimento sono stati i seguenti:

Parametro	valore	Fonte
Apporti interni uffici	6 W/m ²	Raccomandazioni CTI R03/3
Temperatura terreno	12°C	

Nella seconda fase, una volta appurato che il modello è corretto dal punto di vista di definizione della struttura, la simulazione ha avuto lo scopo di confrontare la simulazione dinamica con i consumi reali andando a ritoccare gli apporti interni in modo da rendere confrontabili i valori. Infatti l'unica vera grande incognita in questa tipologia di calcolo è l'ammontare degli apporti gratuiti interni dovuti a persone o apparecchiature

Come ultimo si osserva che il software di simulazione dinamica, valuta lo scambio attraverso il terreno impostando un temperatura costante o variabile dello stesso; mentre nei metodi semi statici si utilizza il procedimento della norma UNI EN ISO 13370:2001, la quale considera lo scambio termico come un flusso di calore che va dall'interno verso l'esterno passando attraverso il terreno e ha come temperatura esterna di riferimento la temperatura media mensile dell'aria anche nell'ipotesi che il calcolo venga fatto con periodi più brevi.

Relativamente ai dati climatici reali, questi sono stati ottenuti con le procedure indicate al paragrafo 5.4, in base a rilievi giornalieri della stazione ARPAV installata presso l'Orto Botanico di Padova

Per la valutazione economica degli investimenti si sono calcolati i seguenti parametri:

VAN – Valore attuale netto dell'investimento calcolato come

$$VAN = P_0 * Q * [\sum_{j=1}^n \frac{1}{(1+i)^j}] - I_0 \quad (4)$$

IP – Indice di profitto

$$IP = \frac{VAN + I_0}{I_0} \quad (5)$$

TR – Tempo di recupero, pari all'investimento diviso il flusso di cassa lordo medio

$$TR = \frac{I_0}{\sum_j \frac{FCL_j}{n}}, \quad (6)$$

dove:

- I_0 è l'investimento iniziale, €;
- P_0 è il prezzo attuale dell'unità di energia risparmiata, €/kWh;
- Q è l'energia risparmiata annualmente mediante l'intervento, kWh;
- i è il tasso di sconto effettivo (posto uguale a r);
- $\frac{1}{(1+i)^j}$ è il fattore di attualizzazione al tasso i e all'anno j .

6.4.1. Analisi energetica complesso “Liviano”

Il complesso del Liviano rappresenta uno degli edifici più importanti e rappresentativi dell'Università di Padova. Sorge in zona centralissima, a pochi metri da Piazza dei Signori e dal Duomo, precisamente in piazza Capitaniato e lungo via Accademia. E' la sede storica della facoltà di Lettere e Filosofia, del Dipartimento di Scienze del Mondo Antico (Archeologia) e di Storia delle Arti Visive e Della Musica. L'edificio così come lo si vede oggi è stato costruito attorno un fabbricato antico, ospitante la famosa Sala Dei Giganti, interamente affrescata con i “grandi” personaggi della Storia Antica (a cominciare dai Re di Roma). Costruita nel XIII secolo, poi distrutta da un incendio nel XVI secolo, fu completamente rinnovata dal Capitano Gerolamo Corner nel 1540; danneggiata durante la prima guerra mondiale, assunse la struttura attuale nel 1939. Vista la piacevole cornice che offre, la Sala è periodicamente sede di concerti e conferenze, finalità leggermente staccate da quelle Accademiche del resto dell'edificio.

L'ampliamento del complesso è avvenuto in due fasi:

- la prima, a partire dagli anni 1937, su progetto dell'architetto Gio Ponti; sono anni caratterizzati da uno stile austero fascista; l'ampia parete dell'atrio è affrescata da un'opera di propaganda delle idee del regime. Rientra nel progetto anche il bellissimo museo al terzo piano, che sfrutta i lucernari del tetto a terrazza per interessanti giochi di luce.
- la seconda, tra gli anni 1955 e 1960, e riguarda la parte in Via Accademia. Sono facilmente distinguibili 3 parti, caratterizzate da altezze e finestre diverse. La parte centrale comprende un portico per il passaggio al cortile interno.

Globalmente, quindi, si trovano, nel medesimo edificio, tre tipologie di strutture assai diverse, appartenenti a epoche diverse; è facile, quindi, per realizzare un'analisi dettagliata della struttura, è inevitabile incontrare qualche complicazione. Il Liviano, proprio perché si è esteso prima lungo la Piazza e in un secondo tempo lungo Via Accademia, è un edificio un po' insolito per la forma in pianta a “L” che lo caratterizza; il classico edificio storico in centro città è, infatti, a pianta rettangolare con eventuali cortili centrali. Il cortile c'è, in realtà, anche per il Liviano; ma è di proprietà di una scuola che si affaccia su di esso.

Si riportano nella tabella seguente i dati generali dell'edificio.

Volume fuori terra	33424 m ³
Volume interrato	3077,7 m ³
Superficie calpestabile lorda	7500 m ²
Superficie calpestabile al netto dei muri	5908,41 m ²
Numero piani	3 o 4
Numero piani interrati	1
Altezza media	16,6 m

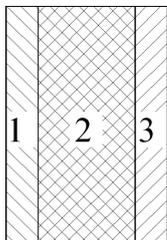
Dai rilievi del consumo di combustibile risultano i seguenti consumi stagionali di riscaldamento per il periodo 2006/2007:

Consumo di combustibile	Gasolio		litri
Consumo energia primaria riscaldamento	Ep,h	1115464	KWh/anno
Superficie	S	5010	m ²
Consumo specifico riscaldamento	CE,h	222,60	kWh/m ² anno

- TRASMITTANZA STRUTTURE OPACHE E VETRATE

Le strutture portanti sono tutte costituite in mattoni pieni di spessore variabile per cui sono presenti una serie di diversi tipi di pareti perimetrali come indicato in Tabella LXXXVI

Tabella LXXXVI– Trasmittanza strutture opache Liviano



N.	Descrizione	Spessore (m)	U (W/m ² K)	M (kg/m ²)
1	Parete esterna 80	0,80	0,87	
2	Parete esterna 58	0,58	1,12	
3	Parete esterna 51	0,51	1,26	
4	Parete esterna 44	0,44	1,39	
5	Parete esterna 33	0,33	1,73	
6	Copertura in legno	0,50	1,00	
7	Copertura solaio e coppi	0,50	1,83	
8	Terrazza	0,43	1,50	
9	pavimento esterno	0,15	2,44	

Tabella LXXXVIII – Trasmittanza strutture trasparenti Liviano

Tipo	Aree		Perimetro	Trasmittanza		Giunti e distanziatori	Altri fattori		
	Vetro	Telaio	Perimetro vetro	Vetro	Telaio	Vetro	Ombreggiamento	Tendaggi	Trasmittanza solare totale
	Ag	Af	lg	Ug	Uf	Ψg	Fsh	Fc	g
1 FF1 - VETRO SINGOLO-LEGNO	2,64	0,80	14,58	5,9	1,8	0,04	0,9	1	0,85
2 FF2- VETRO DOPPIO-LEGNO	4,20	0,65	12,6	2,08	1,8	0,04	1	1	0,75
3 FF3- VETRO SING- NON RISCALDATO	10,06	1,08	21,21	5,9	1,8	0,04	0,92	1	0,85

- SUPERFICI DISPERSENTI

Nel seguente elenco di elementi disperdenti sono rappresentate due serie di dati per tabella. Questo è dovuto al fatto che la simulazione quasi stazionaria ha dovuto essere realizzata su due calcoli separati poiché il foglio di calcolo gestiva solo un ambiente non riscaldato.

Pareti opache Liviano

		Da ambienti riscaldati verso l'esterno						Solaio inferiore
		N	NO-NE	E-O	SO-SE	S	Copertura superiore	
Vista del cielo (Fs)	Colore (α)	Compl.	Compl.	Compl.	Compl.	Compl.	Compl.	
		Chiaro	Chiaro	Chiaro	Chiaro	Chiaro	Scuro	
Parete 1	superficie m ²							
Parete 2	superficie m ²	172,8		450				
Parete 4	superficie m ²			459		154		
Parete 5	superficie m ²			339				
Parete 7	superficie m ²						684	

Parete 1	superficie m ²	398,3		276,7		309,8		
Parete 2	superficie m ²	519,5		214,6		325,8		
Parete 3	superficie m ²							
Parete 4	superficie m ²					59,7		
Parete 5	superficie m ²			87,4				
Parete 6	superficie m ²							
Parete 7	superficie m ²						48,3	
Parete 8	superficie m ²						698	

Pareti trasparenti Liviano

		Da ambienti riscaldati verso l'esterno					
		N	NO-NE	E-O	SO-SE	S	Orizzontale
Vetrata 1	numero	38		24		21	
Vetrata 2	numero					3	

Vetrata 1	numero			86			
Vetrata 2	numero			55			

- CARICHI INTERNI

I carichi interni per questo tipo di struttura sono stati valutati considerando il contributo effettivo sia dell'illuminazione che delle apparecchiature installate..

Persone

Pur considerando che il calcolo esatto delle persone all'interno dello stabile è molto difficile, si è stimato, dall'osservazione della pianta e alla visita al complesso, un valore di circa di 910 persone; ciò a seguito delle seguenti ipotesi:

- 100 persone nelle aule didattiche
- 1 persona per ogni studio dei docenti
- 3 persone in ogni ufficio del personale amministrativo/di segreteria
- 4 /5 persone in ogni biblioteca
- 60 persone all'interno di ogni aula studio
- 60 persone nei corridoi

Occorre specificare che questo parametro avrà importanza solo per il calcolo dinamico della struttura (TRNSYS), mentre per Ecodomus avrebbe significato solo se si ammettesse la disponibilità di acqua calda sanitaria per tutti gli occupanti, eventualità al momento non prevista per il Liviano.

Computers

Si è stimato che nel momento di massima attività, il numero di Pc accesi all'interno della struttura sia pari a 150. Come per la stima delle persone, si è effettuato una registrazione del tipo e del numero di stanze e si sono formulate delle ipotesi:

- 1 Pc all'interno di ogni aula didattica
- 1 Pc per ogni ufficio del personale docente
- 3 Pc per ogni ufficio del personale amministrativo/di segreteria
- 30 Pc portatili di studenti in totale

Illuminazione

Il metodo che segue è stato adottato per il calcolo del carico della potenza complessiva dell'illuminazione. Al fine di determinare la potenza complessiva di illuminazione dell'edificio, si è fatto un sopralluogo per determinare in più locali possibili il numero e la tipologia delle lampadine usate. I base alle planimetrie disponibili, comprensive per ogni locale dei metri quadrati e destinazione d'uso è

stato possibile, quindi, trovare il livello di potenza elettrica in Watt su metro quadro, per ogni tipologia di locale. Si è ottenuto 11 W/m² per un totale di 4831.3 m² illuminati, ovvero 189,956 kWh_anno

Conoscendo l'energia elettrica consumata nel 2007 dal Liviano, pari a 228140 kWh ed avendo ipotizzato 12 ore al giorno di accensione delle apparecchiature elettriche e dell'illuminazione per 264 giorni all'anno (escludendo i giorni festivi), si è potuto valutare, per differenza con l'illuminazione, il contributo delle apparecchiature elettriche come i computers e le utenze di condizionamento, che è pari al 34,3% sul totale.

Tabella XC - Consumi elettrici da bolletta, stimati per l'illuminazione e stimati per computers e utenze di condizionamento (altro)

	Totali	illuminazione	utenze
W	72.014	47,311	24.72
W/m2	16	11	5
kWh	228,140	149,882	78,258

Il calcolo in condizioni reali è stato realizzato con i seguenti carichi interni complessivi:

Apporto	Unità di misura	Valore unitario	Totale
Persone: studenti e docenti	910	(da ISO 7730)	
Computer	150	140 W	21000 W
Illuminazione	4831,3 m2	11 W/m2	53143 W

Gli apporti relativi alle persone hanno inoltre la seguente schedulazione oraria:

Dalle	Alle	Valore
00:00	07:00	0,00
08:00	09:00	0,30
09:00	14:00	1,00
14:00	19:00	0,50
19:00	00:00	0,00

- IMPIANTO

L'edificio è riscaldato da due caldaie a gasolio e biodiesel le cui specifiche vengono riportate in *Tabella XCII*, queste alimentano dei terminali di immissione costituiti da radiatori.

Tabella XCII – Specifiche centrale termica Liviano

	Costruttore	Modello	Anno	Fluido termovettore	focolare (kW)
1	ARCA	PRK520S	2006	Acqua calda	571
G2	ARCA	PRK420S	2005	Acqua calda	458

Per quanto riguarda il sistema di regolazione, è utilizzata una valvola di miscelazione a 3 vie con sonda climatica esterna, ad eccezione del museo, per il quale si cerca di garantire una temperatura costante di 20,7 °C indipendentemente dal mese o dall'ora del giorno. Il motivo è quello di impedire il danneggiamento degli oggetti ospitati (in particolare delle statue in gesso).

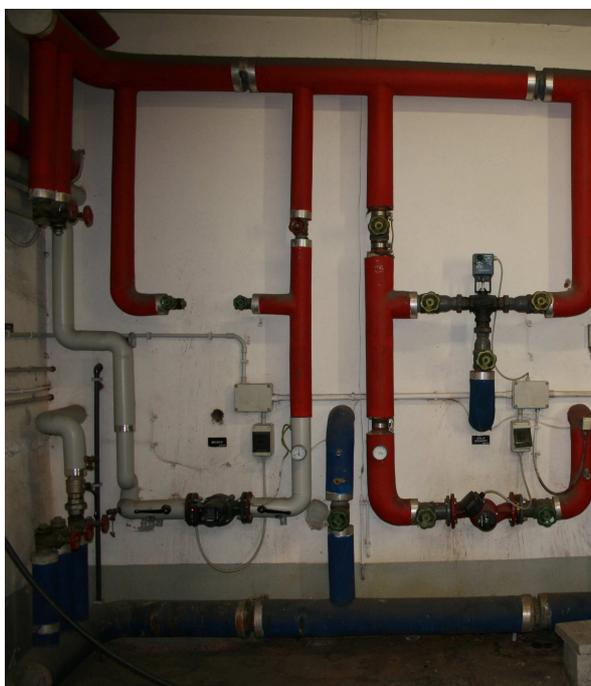


Figura 87- *Particolare del locale caldaia*

Tabella XCIV - Terminali di impianto da rilievo

LOCALE	TERMINALI
Uffici	radiatori
Corridoi, atrio, scale	radiatori
Aule studio	radiatori
Museo	ventilconvettori
Interrato-Archivio	ventilconvettori
Aule didattiche p.terra	Ventilconvettori
Sala riunioni p.terra	Ventilconvettori

I terminali di impianto sono radiatori in quasi la totalità dello stabile con l'eccezione di:

1. Museo: presenti ventilconvettori
2. Due Aule e una Sala riunioni al piano terra: presenti ventilconvettori
3. Interrato, archivio sotto parte in piazza Capitaniato: dal momento che la temperatura e l'umidità sono garantite costanti, si suppone per essi un sistema con ventilconvettori.

In prima analisi si può ipotizzare la presenza di 2 zone non riscaldate:

1. Circa metà del piano interrato, lungo via Accademia, quella che ospita i magazzini di deposito ad uso dei dipartimenti.
2. la Sala dei Giganti, anche se, per il calcolo del fabbisogno reale (con il software Trnsys) si ipotizza che sia riscaldata una volta a settimana in occasione di concerti o conferenze.



Figura 88- Radiatore un ufficio inserito in una nicchia

- CONFRONTO CALCOLI IN CONDIZIONI CONVENZIONALI (asset rating)
 - Il confronto dei modelli con valori convenzionali di input ha dato come risultato i valori riportati nella tabella successiva, in cui si sono confrontati i fabbisogni energetici dell’edificio senza prendere in considerazione l’aspetto impiantistico. Non si tratta quindi di energia primaria ma di fabbisogno che bisogna fornire all’edificio per compensare perdite ed apporti.

Edifici: Complesso “Liviano”		
Modalità di calcolo	Qh/S [kWh/m2]	Variazione %
Dinamica con dati convenzionali	125,4	-----
Quasi statica convenzionale	112,5	-10,3

Come si osserva i valori ottenuti con le due simulazioni sono abbastanza simili il che conferma la correttezza della schematizzazione adottata per l’edificio

- **CONFRONTO CALCOLI IN CONDIZIONI REALI (operational rating)**

Da osservare che poiché il calcolo eseguito con il modello dinamico non considera il fabbisogno di energia primaria ma solo il fabbisogno dell'edificio, si sono riportati tutti i risultati a questo stesso parametro. Si sono quindi stimati i rendimenti di emissione, regolazione, distribuzione e produzione in base alla UNI/TS11300-2:

- Rendimento di emissione 0,96;
- Rendimento di regolazione 0,815;
- Rendimento di distribuzione: 0,87;
- Rendimento di produzione medio stagionale: 0,92
- Rendimento Globale medio stagionale 0,627.

Edifici: Complesso "Liviano"		
Modalità di calcolo	Qh/S [kWh/m2]	Variazione %
Consumi reali	139,6	-----
Dinamico con dati reali	126,2	9,5

Come si osserva la differenza tra consumo reale e simulazione dinamica si può ritenere accettabile

- **ANALISI ECONOMICA INTERVENTI MIGLIORATIVI**

Soluzione 1 – sostituzione vetri finestre

Ad eccezione delle grandi vetrate antiche presenti nella Sala dei Giganti, un simile intervento comporterebbe solo la sostituzione dei vetri, che rimarrebbero comunque in legno. L'area interessata da questo intervento è pari a 451,6 m², pari allo 75,4% del totale Area finestre (66,4m² sono relativi alla Sala dei Giganti e 125,8 m² sono già a vetro doppio). Si prevede, comunque, una sostituzione totale delle finestre con l'eccezione di quella all'interno della Sala dei Giganti.

INTERVENTO	U esistente (W/m²K)	U con intervento (W/m²K)
Sostituzione vetri	5,8	2,7

Soluzione 2 – Isolamento delle coperture

Ad eccezione del tetto a falda di legno che copre la Sala dei Giganti. Si propone l'isolamento della terrazza con pannelli di polistirolo estruso direttamente sul manto di impermeabilizzazione e l'isolamento del sottotetto non praticabile dell'ala a ovest (tetto con coppi) mediante strati di lana minerale in rotoli. In tal modo viene garantito per la terrazza il rispetto dei requisiti di prestazione energetica del D.Lgs.192/195 fissato al $0,30 \text{ W/m}^2\text{K}$ (dal 1 gennaio 2010 per la classe E) e ci si avvicina al valore limite per quanto riguarda il tetto dell'ala ovest.

INTERVENTO	U esistente ($\text{W/m}^2\text{K}$)	U con intervento ($\text{W/m}^2\text{K}$)
Isolamento terrazzo	1,528	0,292
Isolamento sottotetto falda	1,835	0,321

Soluzione 3 – Sostituzione vetri e isolamento delle coperture

Soluzione 4 – Installazione valvole termostatiche

Si prevede di installare in ogni radiatore della struttura valvole termostatiche a cui si può assegnare un rendimento di regolazione pari a 0,95

Confronto soluzioni

Riportiamo nella sottostante Tabella il riepilogo dei risparmi ottenuti con ciascun tipo di intervento, calcolato tramite simulazione dinamica in cui si è ipotizzato un ricambio d'aria pari a 0,7 vol/h.

Tabella XCVI - Riepilogo dei parametri kWh/m^2 calcolati sull'intero anno 2007 con gli interventi 1,2 3 , per due valori di infiltrazione esterna.

		risparmio% rispetto al reale
da analisi reale	140,0	
Soluzione 1- sostituzione vetri doppi	127,13	10,58%
Soluzione 2- isolamento del tetto	118,52	18,61%
Soluzione 3- vetri doppi +isolamento tetto	104,82	34,12%

Si riportano per concludere le analisi di investimento per le quattro proposte in esame, al fine di valutare quale degli investimenti sia economicamente conveniente.

Per i calcoli si è assunto un tasso di sconto reale r del 5% (prezzi relativi all'energia considerati costanti rispetto all'aumento generale dei prezzi) ed un tempo di vita dell'investimento pari a 25 anni, assumendo come prezzo dell'energia 0,13 euro /kWh, corrispondenti al prezzo del gasolio acquistato per il Liviano in Aprile 2008 comprensivo di IVA, si sono valutati i seguenti parametri: VAN, IP, TR.

Proposta 1- sostituzione di tutti i vetri singoli con vetri doppi e sostituzione dei serramenti in legno

Tabella XCVIII – Risultati valutazione economica, proposta 1

Investimento	Prezzo energia Pj	Energia risparmiata Qj	Flusso lordo annuo	VAN	IP	TR
€	€/kWh	kWh	€			
116.810,5	0.13	117.553	15.281,9	98.571	1.84	7.64

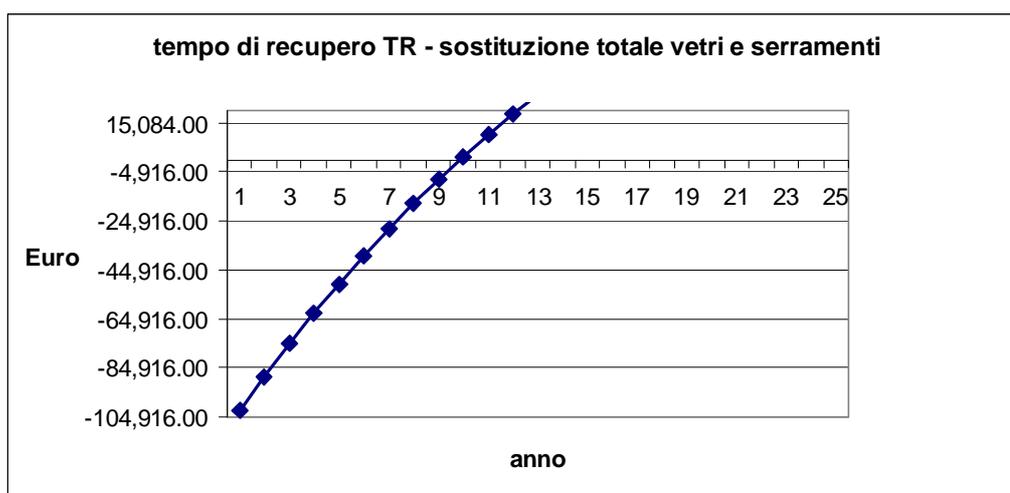


Figura 89 – Tempo di recupero attualizzato con $r = 0.05$, proposta 1.

Proposta 2 –Isolamento del tetto

Tabella C – Risultati valutazione economica, proposta 2

Investimento	Prezzo energia Pj	Energia risparmiata Qj	Flusso lordo annuo	VAN	IP	TR
€	€/kWh	kWh	€			
27.387,8	0.13	192.805	25.064,6	325.871,97	12,90	1,09

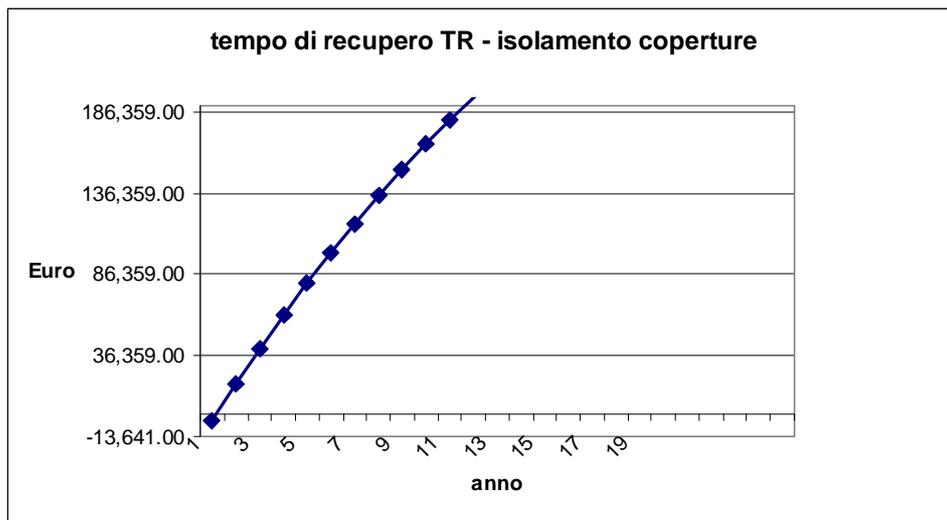


Figura 90– Tempo di recupero attualizzato con $r = 0.05$, proposta 2..

Proposta 3 – Isolamento del tetto e sostituzione delle finestre (vetri doppi e serramenti)

Tabella CII – Risultati valutazione economica, proposta 3

Investimento	Prezzo energia Pj	Energia risparmiata Qj	Flusso lordo annuo	VAN	IP	TR
€	€/kWh	kWh	€			

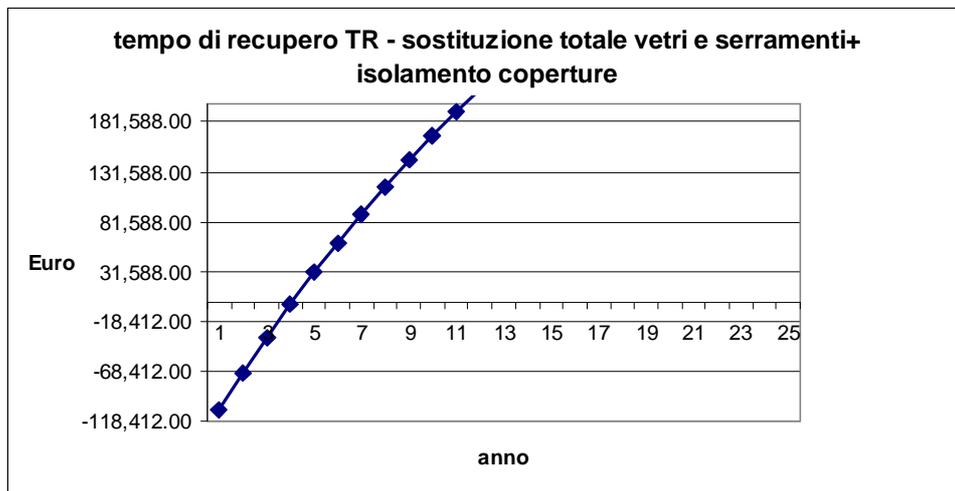


Figura 91 – Tempo di recupero attualizzato con $r = 0.05$, proposta 3.

Proposta 4- Introduzione di valvole termostatiche per la totalità dei radiatori

Tabella CIV – Risultati valutazione economica, proposta 4

Investimento	Prezzo energia Pj	Energia risparmiata Qj	Flusso lordo annuo	VAN	IP	TR
€	€/kWh	kWh	€			
20,000	0.13	155.627	20.231,5	265.142,7	14,26	0,99

Figura 92– Tempo di recupero attualizzato con $r = 0.05$, proposta 4.

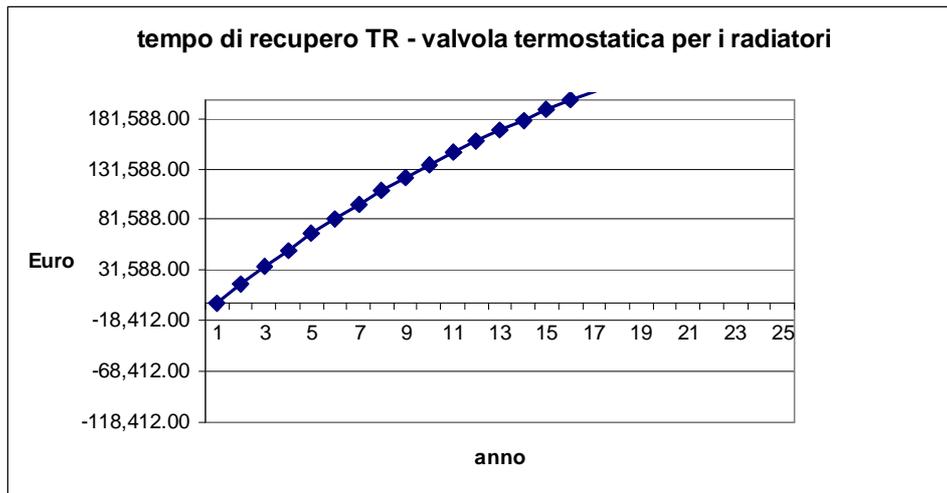


Figura 93– Tempo di recupero attualizzato con $r = 0.05$, proposta 4.

Figura 94 – Confronto economico degli investimenti proposti per il Liviano

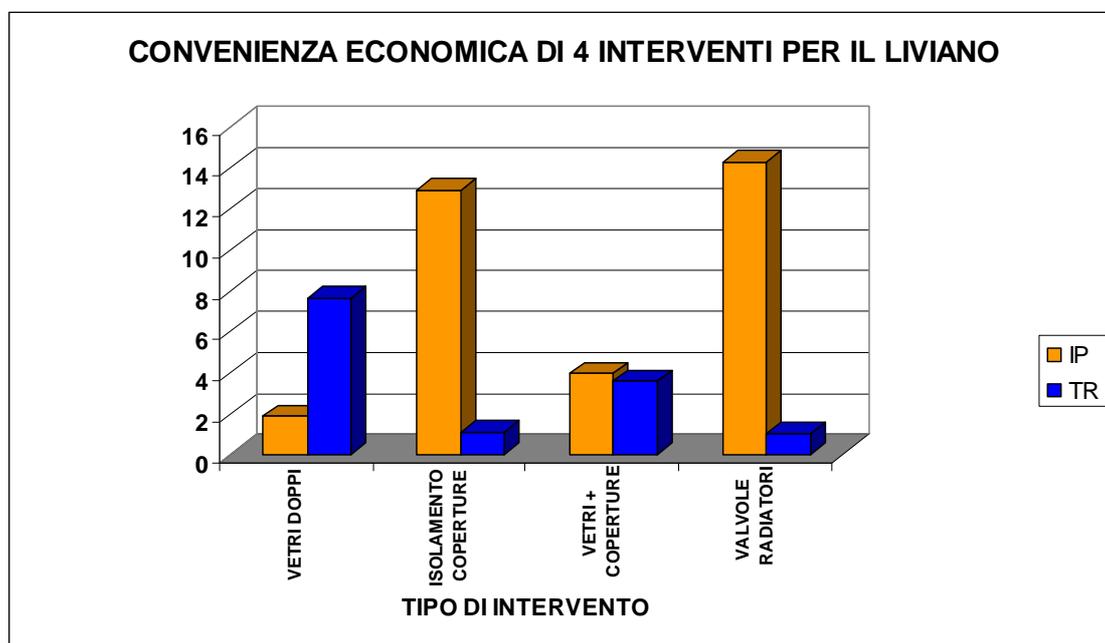


Figura 95 – Confronto economico degli investimenti proposti per il Liviano

Confrontando i parametri IP e TR calcolati per i 4 interventi ipotizzati, si possono fare alcune considerazioni di natura economica. Appare evidente la convenienza di isolare il sottotetto e le terrazze, visto che i costi d'investimento, risultano contenuti in rapporto ad elevati risparmi di energia dispersa per trasmissione.

Lo stesso dicasi per l'introduzione di valvole termostatiche per il miglioramento della regolazione, che comporta un tempo TR pari a 0,99 e l'IP massimo tra quelli calcolati.

6.4.2. Analisi energetica istituto di Fisica “Galilei”

L’istituto di Fisica “G. Galilei” è un edificio costruito negli anni ’30 e attualmente adibito ad aule, laboratori di ricerca e uffici. Si riportano nella tabella seguente i dati generali dell’edificio

Comune	Padova
Nome Edificio	GALILEO GALILEI
Destinazione d'uso	Aule e Laboratori
Superficie netta m²	10,797.3
Superficie lorda m²	10,944.0
Altezza per piano	3.8
Numero piani	3.0
Volume netto riscaldato m³	40,835.9
Numero occupanti	1000
Temperatura media interna dell'aria	21

Dai rilievi del consumo di combustibile risultano i seguenti consumi stagionali di riscaldamento per il periodo 2006/2007:

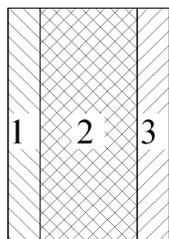
Consumo di combustibile	Metano	56579	Nm ³
Consumo energia primaria riscaldamento	Ep,h	605081	KWh/anno
Superficie	S	10797	m ²
Consumo specifico riscaldamento	CE,h	56,0	kWh/m ² anno

- TRASMITTANZA STRUTTURE OPACHE E VETRATE

La costruzione dell’edificio in esame, come detto sopra, si è svolta in due tempi, con l’aggiunta dell’ala centrale negli anni settanta. La conseguenza di ciò è una disomogeneità della struttura non solo all’aumentare della quota ma anche relativamente alla zona considerata, che porta ad una differenza da elemento a elemento degli spessori, delle trasmittanze e quindi al calore trasmesso.

Le strutture portanti sono tutte costituite in mattoni pieni di spessore variabile per cui sono presenti una serie di diversi tipi di pareti perimetrali come indicato in Tabella CVI

Tabella CVI – Trasmittanza strutture opache



N.	Descrizione	Spessore (m)	U (W/m ² K)	M (kg/m ²)
1	Parete esterna elemento 1	0,60	1,07	
2	Parete esterna elemento 2	0,50	1,24	
3	Parete esterna elemento 3	0,44	1,39	
4	Parete esterna elemento 4	0,42	1,45	
5	Parete esterna elemento 5	0,28	1,91	
6	Parete esterna elemento 6	1,2	0,59	
7	Tetto elemento 7	0,34	1,76	
8	Tetto elemento 8	1,51	0,84	
9	Tetto elemento 9	0,10	4,3	

Tabella CIX – Trasmittanza strutture trasparenti

N	Tipo	Aree		Trasmittanza		Giunti e distanziatori	Altri fattori		
		Vetro	Telaio	Vetro	Telaio	Vetro	Ombreggiamento	Tendaggi	Trasmittanza solare normale
		Ag	Af	Ug	Uf	Ψg	Fsh	Fc	g
1	1 vetr; Al	1,85	0,74	5,8	6		1	1	0,83
2	1 vetr; Legno	1,70	0,75	5,8	2,3		0,584523	1	0,83
3	0,006 Legno	2,11	1,13	3,2	2,3	0,006	0,480033	1	0,71
4	0,012 Al	3,94	2,82	2,9	6	0,012	1	1	0,71
5	0,015 Al	1,72	0,76	2,7	6	0,015	0,968994	1	0,72
6	0,015 Legno	1,56	0,69	2,7	2,3	0,015	0,55	1	0,72
7	bussola Al	3,47	2,30	2,7	6	0,015	1	1	0,72
8	lucernari	37,00	5,00	5,8	6		1	1	0,83

- SUPERFICI DISPERSENTI

Tabella CXII- Pareti opache

		Da ambienti riscaldati verso l'esterno					Copertura superiore	Solai verso terra
		N	NO-NE	E-O	SO-SE	S		
Vista del cielo (Fs)		Compl.	Compl.	Parz.	Compl.	Compl.	Compl. Medio	
Colore (α)		Chiaro	Chiaro	Chiaro	Chiaro	Chiaro		
Parete 1	superficie m ²	187		819		123		
Parete 2	superficie m ²	363		410		100		
Parete 3	superficie m ²	301		880		415		
Parete 4	superficie m ²	46		455		371		
Parete 5	superficie m ²	62		50				
Parete 6	superficie m ²					233		
Parete 7	superficie m ²						772	
Parete 8	superficie m ²						714	
Parete 9	superficie m ²						184	
Parete 10	superficie m ²						1314	
Pavimento	superficie m ²						2950	

Tabella CXV - Pareti trasparenti

		Da ambienti riscaldati verso l'esterno					Orizzontale
		N	NO-NE	E-O	SO-SE	S	
Vetrata 1	numero	24,9446787	0	19,8001474	0	20,7551739	
Vetrata 2	numero	0,91511684	0	112,397701	0	31,187182	
Vetrata 3	numero	0	0	6	0	0	
Vetrata 4	numero	0	0	0	0	6	
Vetrata 5	numero	57,9065991	0	76,3074637	0	1,78593716	
Vetrata 6	numero	0	0	8	0	2	
Vetrata 7	numero	0	0	0	0	0	
Vetrata 8	numero	0	0	0	0	0	2

- CARICHI INTERNI

I carichi interni per questo tipo di struttura sono stati valutati considerando il contributo effettivo sia dell'illuminazione che delle apparecchiature installate.

Illuminazione

Al fine di determinare la potenza complessiva di illuminazione dell'edificio, si è fatto un sopralluogo per determinare in più locali possibili il numero e la tipologia delle lampadine usate. In base alle planimetrie disponibili, comprensive per ogni locale dei metri quadrati e destinazione d'uso è stato possibile, quindi, trovare il livello di potenza elettrica in Watt su metro quadro, per ogni tipologia di locale (Tabella CXVIII).

Tabella CXVIII – W/m² medi per destinazione d'uso relativi al piano terra

Destinazione d'uso	[m ²]	Lampade da 2x58 W	Lampade da 1x58 W	Lampade da 4x18 W	[W]	W/m ²
Corridoio	152.03			10	720	4.74
Corridoio	58.22		4		232	3.98
Ufficio	14.26	4			464	32.54
Corridoio	65.62		6		348	5.30
Ufficio	22.04	4			464	21.05
Ufficio	31.98	4			464	14.51
Corridoio	78.54		7		406	5.17
Officina	29.88	6	8		1160	38.82
Deposito	30.07	1	6		464	15.43
Officina	31.13	6	1		754	24.22
Officina	129.45	48			5568	43.01
Officina	49.54	18			2088	42.15
Ufficio	15.02	2			232	15.45
Ufficio	31.05	4			464	14.94
Ufficio	36.32	4			464	12.78
Corridoio	102.24	3	3		522	5.11
Ufficio	14.6	1			116	7.95
Ufficio	17.43	1			116	6.66
Ufficio	29.16	2			232	7.96
Ufficio	61.5	4			464	7.54
Ufficio	14.58	1	1		174	11.93

Destinazione d'uso	Consumo medio [W/m ²]
Ufficio	13.94
Corridoio	4.86
Officina	37.05
Deposito	15.431

In base ai valori medi ottenuti dal rilievo della quantità e tipo di apparecchi di illuminazione installati, è stato possibile ottenere, per ogni piano, la potenza per illuminazione che l'intero edificio assorbe e la densità di potenza valutata sulla superficie complessiva, pari a 10,8 W/m² su una superficie complessiva di 10797 m². Conoscendo l'energia elettrica consumata nel 2007 dal Galileo Galilei si è potuto inoltre trovare la differenza tra i consumi totali e l'energia consumata dall'illuminazione. Quest'ultima infatti risulta essere il 12% dell'energia elettrica consumata (*Tabella CXXI*).

Tabella CXXI

	totali	illuminazione	computers	utenze
W	955439	116470	46900	792070
W/m ²	88	11	4	73
kWh	2831922	345216	139012	2347694
%		12	5	83

Computers – uffici

L'edificio presenta, oltre che laboratori, anche numerosi uffici, con computer. Data l'impossibilità del conteggio locale per locale si è proceduto calcolando il totale dei metri quadrati ad uso ufficio ed assegnando un occupante ogni 30 m². Si è giunti alle conclusioni riportate in *Tabella CXXIV*.

Tabella CXXIV - numero occupanti/computer equivalenti degli uffici

N DI OCCUPANTI E COMPUTER DEGLI UFFICI		
Tot. m ² uffici	n. uffici eq.	n. occup. eq.
3350	112	335

Il calcolo in condizioni reali è stato realizzato con i seguenti carichi interni complessivi:

Apporto	Unità di misura	Valore unitario	Totale
Persone: studenti e docenti	1000	(da ISO 7730)	
Computer	335	140 W	46900 W
Illuminazione	10797 m2	10 W/m2	107970 W

Gli apporti relativi alle persone hanno inoltre la seguente schedulazione oraria:

Dalle	Alle	Valore
00:00	07:00	0,00
07:00	12:00	1,00
12:00	19:00	0,35
19:00	00:00	0,00

IMPIANTO

L'edificio è riscaldato da due caldaie a gas metano le cui specifiche vengono riportate in *Tabella CXXVII*, queste alimentano dei terminali di immissione costituiti da radiatori.

Tabella CXXVII – Specifiche impianto

	Costruttore	Modello	Matricola bruciatore abbinato	Fluido termovettore	focolare (kW)
G1	ARCA	PRK700	0505019	Acqua calda	661
G2	ARCA	PRK700	0505026	Acqua calda	652

- CONFRONTO CALCOLI IN CONDIZIONI CONVENZIONALI (asset rating)
 - Il confronto dei modelli con valori convenzionali di input ha dato come risultato i valori riportati nella tabella successiva, in cui si sono confrontati i fabbisogni energetici dell'edificio senza prendere in considerazione l'aspetto

impiantistico. Non si tratta quindi di energia primaria ma di fabbisogno che bisogna fornire all'edificio per compensare perdite ed apporti.

Edifici: Istituto di Fisica "G. Galilei"		
Modalità di calcolo	Qh/S [kWh/m²]	Variazione %
Dinamica con dati convenzionali	66,3	-----
Quasi statica convenzionale	66,4	1,5

Come si osserva i valori ottenuti con le due simulazioni sono molto simili il che conferma la correttezza della schematizzazione adottata per l'edificio

- **CONFRONTO CALCOLI IN CONDIZIONI REALI (operational rating)**

Da osservare che poiché il calcolo eseguito con il modello dinamico non considera il fabbisogno di energia primaria ma solo il fabbisogno dell'edificio, si sono riportati tutti i risultati a questo stesso parametro. Si sono quindi stimati i rendimenti di emissione, regolazione, distribuzione e produzione in base alla UNI/TS11300-2:

- Rendimento di emissione 0,94;
- Rendimento di regolazione 0,94;
- Rendimento di distribuzione: 0,91;
- Rendimento di produzione 0,86.

Edifici: Istituto di Fisica "G. Galilei"		
Modalità di calcolo	Qh/S [kWh/m²]	Variazione %
Consumi reali	40,1	-----
Dinamico con dati reali	58,4	45,6
Dinamico con dati reali + 4 W/m ²	38,1	5,0

Consumo reale di combustibile corrisponde a quello calcolato solo ipotizzando di aumentare i carichi interni di 4 W/m²; questo aumento si può giustificare solo con la presenza all'interno della struttura di molte apparecchiature elettriche per attività di ricerca.

- ANALISI ECONOMICA INTERVENTI MIGLIORATIVI

Soluzione A – sostituzione vetri finestre

Un'intervento che si è valutato è stato la sostituzione dei serramenti con nuovi vetri aventi le seguenti caratteristiche:

Uw	Ug	Uf	g	f/w	spessori	vetro	telaio
2.289	1.784	3.97	0.445	0.15	3/19.5/3	3mm low-e air	Al flush

Dai calcoli eseguiti con i software di simulazione risulta che il risparmio medio per questo tipo di intervento è del 15%. Si è quindi provveduto a determinare il tempo di ritorno dell'investimento. Nella Tabella e nella Figura 96 seguente sono riportati i risultati del calcolo e l'andamento del flusso di cassa.

potere calorifero metano	38.5	Mj/Nm ³
costo/m ³ metano	0.6	euro
superficie calpestabile	10797.0	m ² _c
Rendimento impianto	0.7	
Consumi preintervento	411715.4	kWh/ a
Consumi post intervento	311077.8	kWh/ a
Risparmio	100637.6	kWh/ a
risparmio annuo a m ² calpestabile di energia	9.3	(kWh/m ² _c a)
Risparmio annuo contando rendimento impianto	13.5	(kWh/m ² _c a)
risparmio annuo totale di euro	8183	euro
superficie finestrata	957	m ² _f
costo serramento m2	200	euro
costo investimento	-191400	euro
tasso	5.0%	

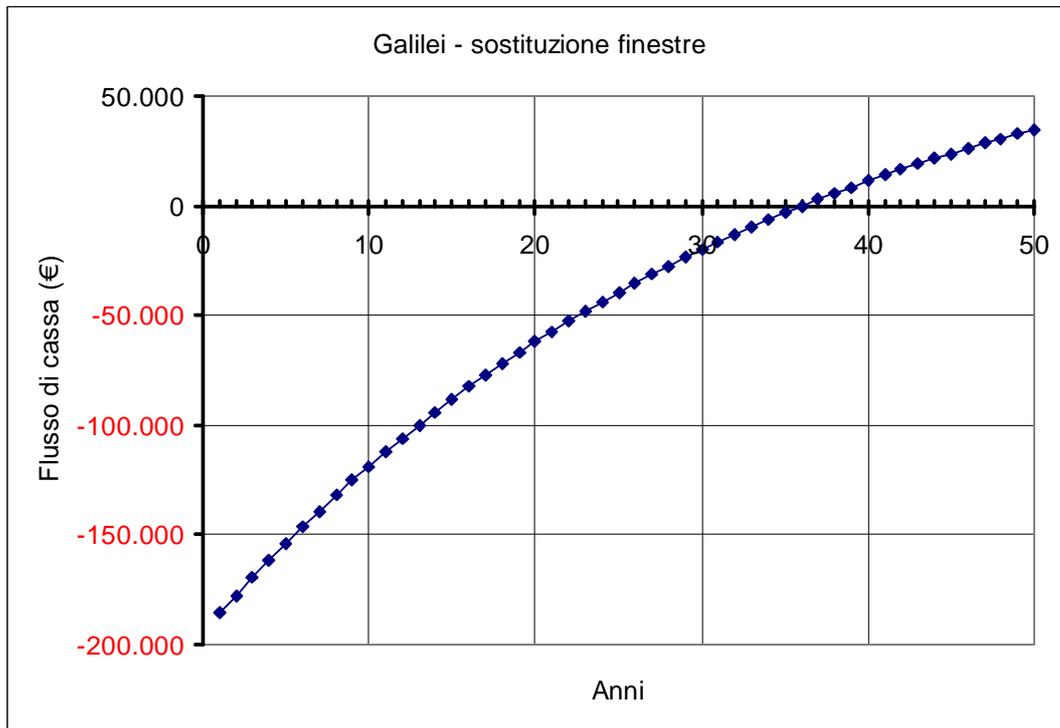


Figura 96 - Flusso di cassa per intervento di sostituzione finestre

L'investimento ha un tempo di recupero di circa 36 anni per cui molto elevato.

Soluzione B – isolamento pareti esterno pareti perimetrali

In questa seconda ipotesi si considera l'isolamento di tutte le pareti esterne disperdenti trami sistema a cappotto applicato per l'intera superficie delle pareti e coperture, usando come materiale isolante il polistirene espanso in lastre con le seguenti caratteristiche:

spessore [m]	densità [kg/m ³]	λ [W/mK]	c. spec. [kJ/(kg K)]
0.09	25	0.041	1.3

Dai calcoli eseguiti con i software di simulazione risulta che il risparmio medio per questo tipo di intervento è del 69%. Si è quindi provveduto a determinare il tempo di ritorno dell'investimento. Nella *Tabella CXXX* e nella *Figura 97* seguente sono riportati i risultati del calcolo e l'andamento del flusso di cassa.

Tabella CXXX

potere calorifero metano	38.5	Mj/Nm3
costo/m ³ metano	0.6	euro
superficie calpestabile	10797.0	m ² _c
Rendimento impianto	0.7	
Consumi preintervento	411715.4	kWh/ a
Consumi post intervento	128205.8	kWh/ a
Risparmio	283509.6	kWh/ a
risparmio annuo a m ² calpestabile di energia	26.3	(kWh/m ² _c a)
Risparmio annuo contando rendimento impianto	38.1	(kWh/m ² _c a)
risparmio annuo totale di euro	23052	euro

superficie tetto	2984	m ²
costo ps espanso al m2	25	euro
superficie pareti	4816	m ²
costo ps espanso al m2	45	euro
superficie totale	7800	m ²

costo investimento	-291320	euro
--------------------	---------	------

tasso	5.0%
-------	------

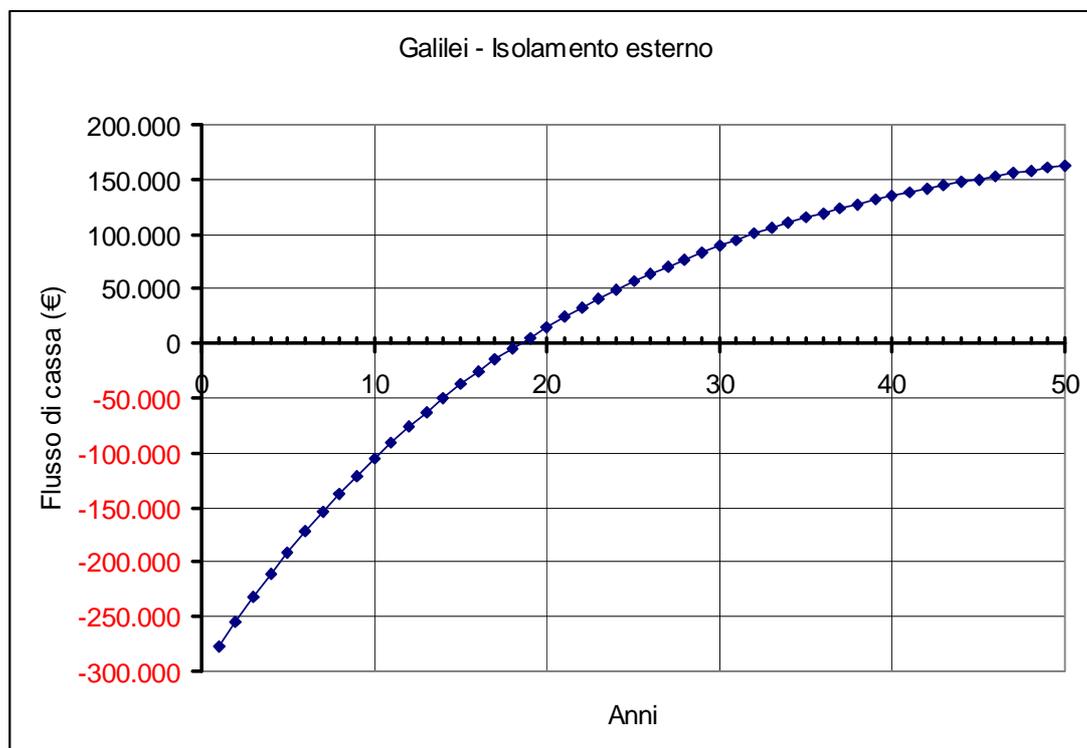


Figura 97- Flusso di cassa per intervento di isolamento delle pareti esterne

L'investimento ha un tempo di recupero di circa 18 anni per cui risulta più conveniente del precedente e adeguato alla durata dell'edificio.

6.4.3. Analisi energetica facoltà di economia , edificio “C3”

All'interno di questo edificio acquistato nel 2003, si trovano oltre che uffici amministrativi, aule per la didattica della facoltà di economia, il servizio formazione post-lauream e uffici di presidenza (quinto piano).

Il complesso è costituito da sei piani fuori terra, da un piano interrato, in comunicazione con un ampio garage privato e da una copertura dedicata unicamente a tutti i locali tecnologici quali la centrale termica, il locale pompe e le centrali di trattamento dell'aria.

Superficie lorda singolo piano	600 m ²
Superficie netta singolo piano	553m ²
Superficie totale lorda fuori terra	3600 m ²
Altezza piani fuori terra	2,8 m
Altezza piano interrato	3 m
Volume totale fuori terra	11880 m ³
Volume interrato	2490 m ³
Volume totale	14370 m ³
Superficie esterna	4250 m ³

Dai rilievi del consumo di combustibile risultano i seguenti consumi stagionali di riscaldamento per il periodo 2006/2007:

Consumo di combustibile	Metano	19150,5	Nm ³
Consumo energia primaria riscaldamento	Ep,h	204795	KWh/anno
Superficie	S	3330	m ²
Consumo specifico riscaldamento	CE,h	61,5	kWh/m ² anno

- TRASMITTANZA STRUTTURE OPACHE E VETRATE

La struttura è realizzata in telaio di calcestruzzo con pannelli di tamponamento in calcestruzzo isolato e controparte interna. Si riporta in *Tabella CVI* l'elenco delle strutture

Tabella CXXXII – Trasmittanza strutture opache

N.	Descrizione	Spessore (m)	U (W/m ² K)	M (kg/m ²)
1	Parete esterna	0,36	1,441	
2	Parete corridoi esterno	0,05	1,054	
3	Parete aule esterne	0,29	0,614	
4	Parete contro garage	0,30	2,029	
5	Pareti verso scale emergenza	0,27	1,078	
6	Parete ambiente-esterno	0,25	2,277	
7	Parete ambiente-scale interrato	0,22	1,281	
8	Solaio tra piani	0,40	0,908	
9	Solaio piano terra-interrato	0,40	0,861	
10	Tetto	0,43	0,493	

Tabella CXXXIV – Trasmittanza strutture trasparenti

	Tipo	Vetro Telaio		Perimetro vetro	Vetro Telaio		Vetro	Ombreggiamento	Tendaggi	Trasmittanza solare normale
		Ag	Af		lg	Ug				
1	Porta finestra entrata SE 300x260	6,63	1,17	16,34	1,3	3,5	0,05	1	1	0,7
2	Finestra 140x145	1,73	0,30	5,368	1,3	3,5	0,05	1	1	0,7
3	Finesra 140x130	1,54	0,28	4,9686	1,3	3,5	0,05	1	1	0,7
4	Porta finestra entrata NE 1 anta 131x225	2,03	0,91	8,083	1,3	3,5	0,05	1	1	0,7
5	Finestra 141x136	1,605	0,312	5,14	1,3	3,5	0,05	1	1	0,7
6	Finestra 95x150	1,305	0,12	4,7	1,3	3,5	0,05	1	1	0,7

- SUPERFICI DISPERSENTI

Tabella CXXXVI- Pareti opache

		Da ambienti riscaldati verso l'esterno					Copertura superiore	Interne	Verso ambienti non riscaldati
		N	NO-NE	E-O	SO-SE	S			
Vista del cielo (Fs)		Compl.	Compl.	Compl.	Compl.	Compl.	Compl.		
Colore (α)		Chiaro	Chiaro	Chiaro	Chiaro	Chiaro	Chiaro		
Parete 1	superficie m ²		138,5		279,7				
Parete 2	superficie m ²		126,3		238,6				
Parete 3	superficie m ²		392		493,9				
Parete 4	superficie m ²								
Parete 5	superficie m ²		184						
Parete 6	superficie m ²		113,7						
Parete 7	superficie m ²		130,9						
Parete 8	superficie m ²						2775		
Parete 9	superficie m ²							555	
Parete 10	superficie m ²					555			

Tabella CXXXVIII - Pareti trasparenti

		Da ambienti riscaldati verso l'esterno					
		N	NO-NE	E-O	SO-SE	S	Orizzontale
Vetrata 1	numero				1		
Vetrata 2	numero		48		56		
Vetrata 3	numero		30				
Vetrata 4	numero		6				
Vetrata 5	numero				45		
Vetrata 6	numero				20		

- CARICHI INTERNI

I carichi interni per questo tipo di struttura sono stati valutati considerando il contributo effettivo sia dell'illuminazione che delle apparecchiature installate.

Illuminazione

Al fine di determinare la potenza complessiva di illuminazione dell'edificio, si è fatto un sopralluogo per determinare in più locali possibili il numero e la tipologia delle lampadine usate. In base alle planimetrie disponibili, comprensive per ogni locale dei metri quadrati e destinazione d'uso è stato possibile, quindi, trovare il livello di potenza elettrica in Watt su metro quadro, per ogni tipologia di locale

In base ai valori medi ottenuti dal rilievo della quantità e tipo di apparecchi di illuminazione installati, è stato possibile ottenere, per ogni piano, la potenza per illuminazione che l'intero edificio assorbe e la densità di potenza valutata sulla superficie complessiva, pari a $10,0 \text{ W/m}^2$ su una superficie complessiva di 4193 m^2 . Conoscendo l'energia elettrica consumata nel 2007 dal Galileo Galilei si è potuto inoltre trovare la differenza tra i consumi totali e l'energia consumata dall'illuminazione (*Tabella CXXI*).

Tabella CXL Riassunto potenza per illuminazione edificio C3

SUPERFICIE	POTENZA COMPLESSIVA	W/m²
4189,3 m ²	41880 W	10

Risulta interessante calcolare l'influenza del consumo elettrico per illuminazione sul totale fabbisogno elettrico.

Le ipotesi fatte a tale proposito sono:

- funzionamento giornaliero continuativo per 12 ore
- 247 giorni di apertura del complesso (sono state esclusi i giorni festivi e i sabati)

A fronte di queste considerazioni l'energia richiesta annualmente dall'edificio risulta pari a

$$\text{kWh/m}^2\text{anno}_{\text{illuminazione}}=247*12*10/1000= \mathbf{29,64}$$

Ricordando che

$$\text{kWh/m}^2\text{anno}_{\text{elettrico}}=\mathbf{68,83}$$

ne consegue che

$$\text{kWh/m}^2\text{anno}_{\text{illuminazione}}/ \text{kWh/m}^2\text{anno}_{\text{elettrico}}=\mathbf{43,06\%}$$

Il calcolo in condizioni reali è stato realizzato con i seguenti carichi interni complessivi:

Apporto	Unità di misura	Valore unitario	Totale
Persone: studenti e docenti	200	(da ISO 7730)	
Computer	100	140 W	14000 W
Illuminazione	3330 m2	10 W/m2	33300 W

Gli apporti relativi alle persone, computer e illuminazione hanno inoltre la seguente schedulazione oraria:

Dalle	Alle	Valore
00:00	08:00	0,00
08:00	12:00	1,00
12:00	14:30	0,20
14:30	18:00	0,50
18:00	24:00	0,00

- IMPIANTO

L'edificio è riscaldato da due caldaie a gas metano le cui specifiche vengono riportate in *Tabella CXXVII*, queste alimentano dei terminali di immissione costituiti da fan coil e da una unità di trattamento dell'aria primaria.

Tabella CXLII – Specifiche generatori C3

	Costruttore	Modello	Rendimento termico 100%	Rendimento termico 30%	focolare (kW)
G1	ECOFLAM	Ultramax 185	99 %	99,9 %	194
G1	ECOFLAM	Ultramax 185	99 %	99,9 %	194

Le centrali di trattamento aria

In questo edificio sono state previste due centrali di trattamento aria, della stessa tipologia, dimensione e con parametri di funzionamento del tutto analoghi.

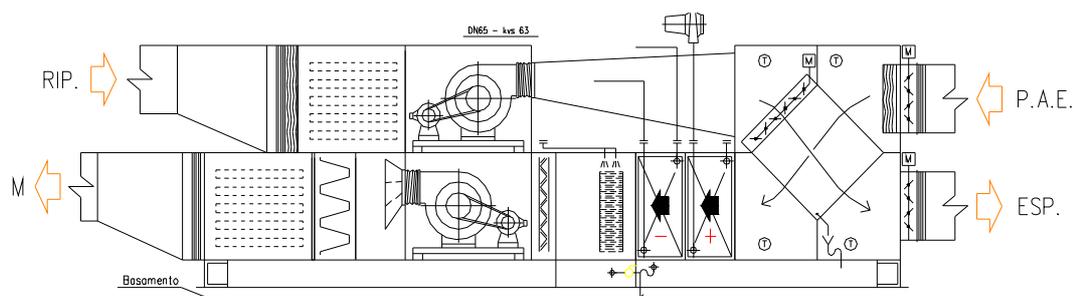


Figura 98– Schema Cta

Come si può osservare dallo schema di una CTA è presente un recuperatore di calore statico (viene recuperato solo calore sensibile e non la componente latente) con efficienza nominale pari al 50%; tale valore è stato calcolato sperimentalmente tramite un sistema di misura delle 4 temperature dell'aria, come illustrato in Figura.



Figura 99 – Sistema di misura delle temperature nel recuperatore UTA C3

La portata d'aria elaborata dalla centrale è somma di una quota proveniente direttamente dall'esterno e di una quota di ricircolo prelevata dall'ambiente stesso; inoltre grazie all'inverter del motore dei ventilatori è possibile modulare la portata da immettere nell'edificio, semplicemente agendo sulla frequenza del motore.

Nella seguente tabella vengono riportati i dati tecnici delle CTA:

Tabella CXLIV – Dati di targa CTA

MODELLO	KLIMATEC KTA020
PORTATA D'ARIA	14150 m ³ /h
PRESSIONE STATICA UTILE	220 Pa
POTENZA INSTALLATA	5,5 kW
TIPOLOGIA DEL RECUPERATORE DI CALORE	STATICO A FLUSSI INCROCIATI
RENDIMENTO RECUPERATORE DI CALORE NOMINALE	55%

Chiller

L'impianto di raffrescamento necessario nella stagione estiva è costituito da una macchina con le seguenti caratteristiche:

Tabella CXLVI – Dati di targa gruppo frigorifero

MODELLO	CARRIER 30 GK-130--0094-PEE-
ANNO	2003
NUMERO DI GRUPPI	2
CARICA CIRCUITO 1	51 kg
CARICA CIRCUITO 2	41 kg
FLUIDO IMPIEGATO	407C
FREQUENZA	50 Hz
POTENZA ELETTRICA ASSORBITA	193 kW

I terminali d'impianto

I terminali d'impianto scelti per questo edificio sono:

- *Radiatori ad elementi in ghisa*: tutti radiatori sono dotati di valvola di regolazione termostatica.
- *Mobiletti ventilconvettori*: tutti gli elementi sono corredati di termostato ambiente a due posizioni agenti sul ventilatore

In entrambi i casi la potenza termica nominale varia a seconda del terminale e dell'ambiente in cui è inserito.

- CONFRONTO CALCOLI IN CONDIZIONI CONVENZIONALI (asset rating)
 - Il confronto dei modelli con valori convenzionali di input ha dato come risultato i valori riportati nella tabella successiva, in cui si sono confrontati i fabbisogni energetici dell'edificio senza prendere in considerazione l'aspetto impiantistico. Non si tratta quindi di energia primaria ma di fabbisogno che bisogna fornire all'edificio per compensare perdite ed apporti.

Edificio: C3		
Modalità di calcolo	Qh/S [kWh/m2]	Variazione %
Dinamica con dati convenzionali	50,2	-----
Quasi statica convenzionale	41,7	17,0

Come si osserva i valori ottenuti con le due simulazioni sono abbastanza simili il che conferma la correttezza della schematizzazione adottata per l'edificio

- **CONFRONTO CALCOLI IN CONDIZIONI REALI (operational rating)**

Da osservare che poiché il calcolo eseguito con il modello dinamico non considera il fabbisogno di energia primaria ma solo il fabbisogno dell'edificio, si sono riportati tutti i risultati a questo stesso parametro. Si sono quindi stimati i rendimenti di emissione, regolazione, distribuzione e produzione in base alla UNI/TS11300-2:

- Rendimento di emissione 0,94;
- Rendimento di regolazione 0,97;
- Rendimento di distribuzione: 0,98;
- Rendimento di produzione 0,95.

Edificio: C3		
Modalità di calcolo	Qh/S [kWh/m2]	Variazione %
Consumi reali	52,2	-----
Dinamico con dati reali	52,21	0,0

Il calcolo è stato eseguito ipotizzando 1,3 vol/h di ricambio d'aria che corrispondono ad una portata di circa 12.000 m³/h. Questo valore è stato ottenuto da misure di portata d'aria su una delle centrali in condizioni di funzionamento ordinario

- **ANALISI ECONOMICA INTERVENTI MIGLIORATIVI**

Soluzione A – sostituzione vetri finestre

Data l'importanza delle perdite di ventilazione che è emersa nelle precedenti analisi e l'impossibilità di effettuare modifiche strutturali vista la recente costruzione dell'edificio, la proposta d'intervento riguarda la realizzazione di un sistema che renda possibile una ventilazione distinte nella varie zone dell'edificio. Tale idea nasce dall'osservazione di una netta distinzione della destinazione d'uso di alcuni piani; nello specifico il primo e il terzo piano sono adibiti esclusivamente all'attività scolastica, a differenza dei restanti locali utilizzati invece come uffici. L'orario di utilizzo delle aule accademiche è notevolmente inferiore a quello di occupazione

degli uffici e pertanto risulta un evidente spreco energetico uniformare la ventilazione di questi spazi. Questo intervento è apparso subito di facile realizzazione in seguito alla presenza nei condotti di areazione di serrande per la modulazione del flusso. Il costo dell'intervento è determinato quindi dall'acquisto di regolatori per fan-coli, di motori per il controllo di tali serrande, centraline e cavi elettrici e quadri di controllo. I punti da motorizzare sono dieci: due serrande per ogni piano, per un totale di cinque piani. I costi stimati costi d'investimento dell'operazione sono di circa 7500 €:

Si riporta in *Figura 100* l'analisi dell'investimento da cui si osserva il buon tempo di ritorno (8 anni).

potere calorifero metano	38,5	Mj/Nm ³
costo/m ³ metano	0,6	euro
superficie calpestabile	3330,0	m ² _c
risparmio annuo a m ² calpestabile di energia	7,1	(kWh/m ² _c a)
risparmio annuo totale di energia	23643	kWh
risparmio annuo totale di m ³	2211	m ³
risparmio annuo totale di euro	1326	euro

costo investimento	-7500	euro
--------------------	-------	------

tasso	5,0%
-------	------

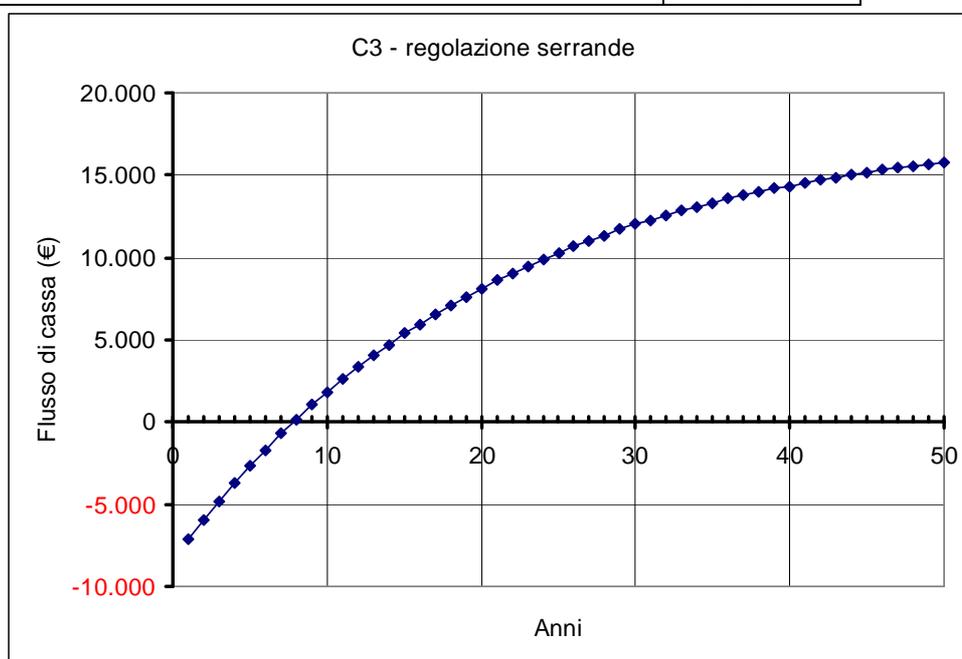


Figura 100- Flusso di cassa per intervento inserimento serrande di regolazione di piano

BIBLIOGRAFIA

- Baldassa P., Gastaldello A., Schibuola L., Zecchin R. 2008. A partire dai dati sperimentali usati per SEER valutazione delle prestazioni stagionali delle macchine frigorifere ai fini della certificazione energetica degli edifici. Congresso ATI Palermo.
- Collares-Pereira, M. e A. rabl, Solar Energy, 22, 175 (1979). The Average Distribution of Solar radiation- Colletion Between Diffuse and Hemispherical and between Daily and Hourly Insolation Value.
- Collares-Pereira, M. e A. rabl, Solar Energy, 22, 175 (1979). The Average Distribution of Solar radiation- Colletion Between Diffuse and Hemispherical and between Daily and Hourly Insolation Value.
- Filippi M., Corgnati S. P., Cerutti A. A. Allegato energetico-ambientale al Regolamento edilizio e Censimento energetico: due strumenti di certificazione energetica per gli enti locali. Il caso Piemonte. Bologna 2008. Convegno AICARR
- Liu B.Y.H., e R. C. Jordan, Solar Energy,4 (3),1 (1960). The Interrelationship and Characteristic Distribution o Direct, Diffuse and Total Solar Radiation.
- Liu, B.Y.H. e R. C. Jordan, Solar Energy,4 (3),1 (1960). The Interrelationship and Characteristic Distribution o Direct, Diffuse and Total Solar Radiation.
- Marchiori M. (2009). Modello semplificato per la diagnosi energetica di edifici su scala provinciale. Tesi di laurea in Ingegneria Meccanica. Università degli Studi di Padova.
- UNI EN ISO 6946 Componenti e elementi per edilizia - Resistenza termica e trasmittanza termica - Metodo di calcolo.
- UNI 8477-1:1983 Energia solare. Calcolo degli apporti per applicazioni in edilizia. Valutazione dell' energia raggiante ricevuta.
- UNI 10963:2001 Condizionatori d'aria, refrigeratori d'acqua e pompe di calore. Determinazione delle prestazioni a potenza ridotta.
- UNI 10355-1994, Murature e solai. Valori della resistenza termica e metodo di calcolo.
- UNI/TS 11300-1:2008, Prestazioni energetiche degli edifici – Parte 1:

Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale.

UNI/TS 11300-2:2008, Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 2: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria

UNI EN ISO 13370:2001 Prestazione termica degli edifici - Trasferimento di calore attraverso il terreno - Metodi di calcolo

UNI EN ISO 13790:2008 Prestazione energetica degli edifici - Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento e il raffrescamento

CAPITOLO 7

Esempi: energy model nella certificazione LEED



Se si parte dal presupposto che il miglioramento della qualità degli edifici corrisponda alla realizzazione di edifici con un basso impatto ambientale detti anche “green buildings”, allora la sola certificazione energetica, per quanto estesa a varie tipologie di fabbisogni energetici, da sola non è in grado di descrivere e qualificare questa tipologia di costruzioni.

La costruzione di edifici “verdi” comincia ormai ad interessare tutti i componenti del settore delle costruzioni. Esiste però il problema di definire la qualità di un edificio a basso impatto ambientale; poiché la tecnica interessa molti aspetti delle

modalità costruttive e di gestione dell'edificio. Questo problema esiste per il committente, per il progettista, per il costruttore, per l'utente finale e riguarda, più in generale, l'impatto sull'ambiente di tutto il processo costruttivo.

Se non esistono criteri chiari ed una istituzione pubblica (intendendo come pubblica la sua funzione rispetto alla società e non la sua gestione, realizzabile anche da una libera associazione di soggetti del settore quali professionisti, imprese, enti formatori ecc.), che ne garantisca il livello qualitativo di fronte alla società, chiunque abbia costruito o progettato con criteri di sostenibilità non è in grado di dimostrare il livello qualitativo raggiunto dall'edificio e quindi diventa più difficile anche darne una stima economica. Il valore economico di questa tipo di edifici non è dato dal maggior costo iniziale, che in genere non supera di più del 10% quello di edifici costruiti secondo lo standard attuale: oltre al costo di gestione esistono altri fattori che sono non quantificabili immediatamente in termini economici ma che danno luogo a futuri costi per l'ambiente in cui si trovano.

7.1 I Protocolli di Valutazione Globale

Il consumo energetico di un edificio non è solo quello per la climatizzazione o l'illuminazione, ma riguarda anche l'energia necessaria per produrre e trasportare i materiali utilizzati nelle costruzioni o l'energia necessaria per i trasportarvi le persone e le merci o l'energia necessaria per rimediare alle modificazioni dell'ambiente prodotte dall'opera di costruzione o, ancora, l'energia per lo smaltimento dei materiali e dei rifiuti prodotti.

E' stato utilizzato il termine "energia" ma la frase poteva essere scritta sostituendo ad essa il termine "costo economico" ed avrebbe avuto lo stesso significato poiché ogni forma di energia equivale ad un costo economico.

La costruzione di una struttura ha sempre un impatto sull'ambiente in cui si inserisce, sia esso naturale che artificiale. L'edificio viene costruito per il bene dell'uomo che deve utilizzarlo e produce una trasformazione dell'ambiente circostante, che non sarà mai più lo stesso. Se si vogliono evitare posizioni ideologiche che considerino l'ambiente più importante dell'uomo dobbiamo tenere ben presente questo aspetto e ricordare che prima viene l'uomo e poi l'ambiente. Non è possibile costruire edifici ad impatto ambientale nullo se non evitando di

costruirli: serve quindi un equilibrio tra le modificazioni che l'edificio produce nell'ambiente ed il suo costo di costruzione.

Per affrontare in modo razionale questi problemi sono stati messi a punto dei "protocolli di valutazione globale" delle costruzioni edilizie; essi, in genere, prendono in considerazione i seguenti aspetti:

- energia;
- bio-compatibilità dei materiali;
- qualità globale dell'ambiente interno;
- impatto ambientale esterno dell'edificio;
- utilizzo delle risorse idriche;
- produzione di rifiuti;
- recupero e riciclo dei materiali.

La valutazione quantitativa dei punti precedenti può seguire due vie:

- 1 - tramite la valutazione dell'energia consumata da un prodotto o servizio durante l'intero ciclo di vita; includendo in questo ciclo i processi o attività comprendenti l'estrazione e il trattamento delle materie prime, la fabbricazione, il trasporto, la distribuzione, l'uso, il riuso, il riciclo e lo smaltimento finale; si seguono le norme della serie UNI ISO 14040; il metodo è definito "life cycle assessment" abbreviato comunemente come LCA; la metodologia è generalmente piuttosto complessa e richiede assunzioni di parametri che per essere applicabili a tutte le situazioni rischiano di essere generici;
- 2 - Attribuendo un punteggio ai diversi aspetti delle scelte metodologiche, costruttive e di esercizio dell'edificio; questa metodologia ha il vantaggio di evitare complicati bilanci di tutti gli elementi del ciclo di vita dal processo di edificazione a quello di demolizione e risulta più facile da applicare anche se la valutazione del processo è meno rigorosa.

La seconda metodologia è attualmente quella applicata in tutti i protocolli di certificazione ambientale sviluppati; anche se potenziali sviluppi futuri di alcuni di essi prevedono l'introduzione di elementi di valutazione del ciclo di vita (LCA).

Le istituzioni che hanno sviluppato protocolli di certificazione ambientale a livello internazionale attualmente sono tre: Building Research Establishment, Green Building Challenge e U. S. Green Building Council.

L'U.S. Green Building Council (USGBC) è un'associazione no profit nata volontariamente nel 1993 e formata da professionisti quali ingegneri, architetti e produttori di materiale edile. L'associazione ha sviluppato dal 2002 il protocollo LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) per la misurazione dello standard degli edifici a basso impatto ambientale. Il protocollo, su base volontaria, si può avvalere di un professionista accreditato Leed detto anche LEED AP (Accredited Professional). Il processo di certificazione avviene completamente on-line: tutta la documentazione viene inviata da chi gestisce il procedo di certificazione e l'USBGC si occupa di verificarne la congruità ed eventualmente chiederne l'integrazione. Attualmente alcuni enti pubblici americani richiedono la valutazione LEED per i nuovi edifici. Il protocollo LEED si sta anche estendendo ad altri stati sia europei che asiatici ed a questo fine è nata l'associazione WGBC (World Green Building Council).

7.2 Un Protocollo per la Realtà Edilizia Italiana

Attualmente in Italia esiste un protocollo di valutazione energetica ambientale basato sul progetto del Green Building Challenge e adattato alla realtà italiana denominato protocollo ITACA e sviluppato dall'Istituto per l'Innovazione e Trasparenza degli Appalti e la Compatibilità Ambientale (ITACA).

A gennaio 2008 è stata costituita l'associazione GBC Italia, di cui l'AICARR è uno dei soci fondatori, con lo scopo di adattare e recepire in Italia il protocollo LEED; GBC Italia è in rapporto con USGBC e deve rispettare alcune prescrizioni sia di struttura organizzativa che di procedure interne per poter utilizzare il marchio LEED nel futuro protocollo italiano. I soci del GBC stanno lavorando per tradurre e adattare alla tecnica costruttiva e alle normative vigenti in Italia il protocollo americano.

Esiste, nella metodologia LEED, una guida di riferimento per le diverse tipologie di edifici: nuove costruzioni, edifici esistenti, commerciali, abitazioni, scuole, ecc. Per ogni tipologia esistono sei aree fondamentali a cui corrispondono altrettanti gruppi di schede a cui viene attribuito un punteggio:

Tabella III - Categorie di valutazione nel protocollo LEED

Simbolo	Area	<i>Punteggio massimo</i>
SS	Sostenibilità del sito	26
WE	Uso efficiente dell'acqua potabile e sanitaria	10
EA	Energia e atmosfera	35
MR	Materiali utilizzati	14
IE	Qualità dell'ambiente interno	15
ID	Innovazione nella progettazione	6
RP	Priorità regionali	4

Ognuno di queste aree si divide in requisiti, che sommati formano il punteggio finale; alcune presentano in aggiunta dei pre-requisiti che non danno punteggio ma sono obbligatori per ottenere il punteggio dei requisiti.

Il massimo punteggio ottenibile per le nuove costruzioni è 110 e la classificazione, nel modello americano, viene data con questa scala:

- 1 CERTIFIED (40-49 punti);
- 2 SILVER (50-59 punti);
- 3 GOLD (60-79 punti);
- 4 PLATINUM (80-110 punti).

Per ottenere attualmente la certificazione LEED tramite USGBC i passi sono:

- 1 registrare il progetto presso USGBC (www.usgbc.org) pagando la quota richiesta in funzione di destinazione d'uso e cubatura;
- 2 accedere a LEED-on line e inviare i dati richiesti tramite schede da compilare;
- 3 USGBC verifica la corretta applicazione del metodo e richiede ulteriori chiarimenti laddove necessario;
- 4 USGBC valuta l'eventuale raggiungimento degli standards LEED e l'eventuale livello raggiunto;
- 5 L'edificio riceve il CERTIFICATO LEED-NC.

7.3 *Attribuzione del punteggio nella categoria EA*

La categoria Energia e Atmosfera ha i seguenti scopi:

1. riduzione dei consumi energetici globali dell'edificio;
2. registrazione delle prestazioni energetiche tramite procedure di progettazione, prescrizioni tecniche e collaudo (commissioning) e monitoraggio;
3. gestione dei fluidi refrigeranti allo scopo di eliminare i CFC;
4. utilizzare energie rinnovabili.

Questi scopi sono attuati praticamente nei Prerequisiti (obbligatori) e nei punteggi per i singoli crediti. La categoria ha la seguente articolazione dei crediti:

CREDITO	TITOLO	NC	SCUOLE	CS
EA Prerequisito 1	Commissioning fondamentale del sistema energetico dell'edificio	Richiesto	Richiesto	Richiesto
EA Prerequisito 2	Prestazioni energetiche minime	Richiesto	Richiesto	Richiesto
EA Prerequisito 3	Gestione dei refrigeranti	Richiesto	Richiesto	Richiesto
EA Credito 1	Ottimizzazione delle prestazioni energetiche	1-19	1-19	3-21
EA Credito 2	Energia rinnovabile in sito	1-7	1-7	4
EA Credito 3	Miglioramento del Commissioning	2	2	2
EA Credito 4	Miglioramento gestione refrigeranti	2	1	2
EA Credito 5	Misure e Verifiche	3	2	NO
EA Credito 5.1	M&V: edificio di base	NO	NO	3
EA Credito 5.2	M&V: indagine tramite gli occupanti	NO	NO	3
EA Credito 6	Energia verde	NO	NO	2

Il prerequisito 2 ed il credito 1 riguardano le prestazioni energetiche degli edifici. Per prestazioni energetiche vengono considerati tutti i consumi sia termici che elettrici. Quindi una loro valutazione deve prendere in considerazione tutti questi aspetti.

La modalità con cui vengono attribuiti i punteggi sono per il Prerequisito 1 le seguenti:

Opzione 1	Simulazione energetica dell'intero edificio	Dimostrare un miglioramento delle prestazioni energetiche del 10% (5% edifici esistenti) dell'edificio considerato rispetto all'edificio di base
Opzione 2	Percorso di conformità prescrittiva	Utilizzare le prescrizioni della Guida ASHRAE "Advance Energy Design. Per edifici con superficie inferiore a 20000 ft ² (1858 m ²) o 50000 ft ² (4645 m ²)
Opzione 3	Percorso di conformità prescrittiva	Utilizzare la guida "Advance Buldings Core Performance. Per edifici di superficie inferiore a 100000 ft ² (9290 m ²)

Per il Credito 1, l'attribuzione del punteggio avviene anche in questo caso seguendo 3 opzioni:

- Opzione 1, simulazione energetica dell'intero edificio con valutazione del miglioramento delle prestazioni energetiche rispetto all'edificio di base ed attribuzione del punteggio (da 1 a 19) utilizzando la Tabella CXLIX:
- Opzione 2, percorso di conformità prescrittivi utilizzando la Guida ASHRAE "Advance Energy Design (1 punto). Per edifici con superficie inferiore a 20000 ft² (1858 m²) o 50000 ft² (4645 m²).
- Opzione 3, percorso di conformità prescrittivi utilizzando la Guida "Advance Buldings Core Performance (da 1 a 3 punti). Per edifici di superficie inferiore a 100000 ft² (9290 m²)

Come si può osservare per ottenere un punteggio elevato occorre necessariamente utilizzare l'opzione 1 e quindi effettuare una simulazione energetica completa dell'edificio adottando la metodologia Building Performance Rating Method, riportato nell'appendice G della norma ASHRAE/IESNA 90.1-2004.

Tabella CXLIX – Criterio di assegnazione dei punti del credito 1 su LEED 2009

New Buildings	Existing Building Renovations	Points (NC & Schools)	Points (CS)
12%	8%	1	3
14%	10%	2	4
16%	12%	3	5
18%	14%	4	6
20%	16%	5	7
22%	18%	6	8
24%	20%	7	9
26%	22%	8	10
28%	24%	9	11
30%	26%	10	12
32%	28%	11	13
34%	30%	12	14
36%	32%	13	15
38%	34%	14	16
40%	36%	15	17
42%	38%	16	18
44%	40%	17	19
46%	42%	18	20
48%	44%	19	21

Il Performance Rating Method è uno strumento atto a dimostrare l'incremento di prestazione rispetto alle prescrizioni ASHRAE/IESNA 90.1-2004 attraverso un modello interattivo che permetta la comparazione dei consumi di energia primaria del progetto proposto rispetto a quelli del progetto di riferimento. Per eseguire l'analisi in maniera rigorosa, il metodo impone una serie di vincoli sul processo di modellazione, quali ad esempio l'utilizzo di dati climatici semplificati e il fatto di includere l'impianto meccanico e i carichi di processo. La metodologia utilizzata nella norma è di tipo prescrittivo cioè per ogni componente dell'edificio sia esso edilizio che impiantistico esistono delle prescrizioni minime da rispettare. Mentre, a differenza della metodologia europea, non esiste un limite del fabbisogno specifico per l'edificio. Le prescrizioni sono indicate nei capitoli della norma riportati in Tabella CL.

Tabella CL: Sezioni della ASHRAE 90.1-2004 e argomenti trattati.

Sezioni ASHRAE/IESNA 90.1-2004	
Sezione 5	Involucro edilizio
Sezione 6	Riscaldamento, ventilazione e aria condizionata (inclusa la ventilazione per le autorimesse, le protezioni dal gelo, il recupero dell'energia dall'aria di ricambio, e il calore recuperato mediante la condensazione negli impianti di riscaldamento dell'acqua)
Sezione 7	Impianti di riscaldamento dell'acqua (incluse le piscine)
Sezione 8	Energia elettrica (compresi tutti gli impianti di distribuzione dell'energia elettrica)
Sezione 9	Illuminazione (comprese le luci dei segnali d'uscita di sicurezza, le luci per la parte esterna dell'edificio e per le autorimesse)
Sezione 10	Altri impianti (inclusi i motori elettrici permanentemente allacciati)

I modelli dell'edificio considerato e dell'edificio di base hanno delle differenze che sono sintetizzate nella tabella seguente:

EDIFICIO DI BASE	EDIFICIO PROPOSTO
Orario di funzionamento e di applicazione dei carichi	
Gli stessi dell'edificio proposto	Quelle di progetto
Orientazione edificio	
4 simulazioni per altrettante orientazioni con il SHGC pari a quello minimo prescritto da Tabelle ASHRAE	Effettiva
Involucro edilizio	
Valori minimi della trasmittanza come prescritto da norma, Tabelle da 5.5.1 a 5.5.8	Componenti come da progetto
Sistema di illuminazione	
Densità di potenza (W/m^2) come da Tabelle 9.5.1 o 9.5.2	Corpi illuminanti di progetto
Impianti HVAC	
In generale con efficienze pari a quelle minime di norma e sovradimensionate rispetto alla richiesta dell'edificio base del 15% in condizionamento e 25% in riscaldamento	Se presente pari a quello di progetto

7.4 Modellazione di edifici con EnergyPlus

Un volta definita la modalità di definizione delle caratteristiche dell'edificio occorre utilizzare un strumento di simulazione dinamica oraria come ad esempio DOE-2, EnergyPlus, Trane TraceTM700 o Carrier HAP-E20 II. Vediamo ora brevemente come sia possibile effettuare l'inserimento delle informazioni per la simulazione nel software EnergyPlus.

Questo software specificato anche al capitolo 3.4, sviluppato dal Dipartimento dell'Energia americano (DOE), è un programma di libero utilizzo che però presenta il limite di avere una metodologia di input di tipo tabellare e senza sistemi di facilitazione quali elenchi a discesa o selezione da tabelle. Il programma possiede un semplice applicativo per la compilazione del file dati di estensione "idf" detto EP-Launch (Figura 101).

EP-Launch serve sostanzialmente a lanciare le simulazioni, a organizzarle nel caso di più simulazioni in serie, consente inoltre di vedere i risultati finali (output) e di accedere alle procedure di input dei dati, le quali possono essere inserite e compilate o come file testo oppure tramite l'IDF Editor. Nell'IDF Editor si definiscono i valori delle variabili di input sia per quanto riguarda l'edificio che per quanto riguarda l'impianto, vengono inoltre definite le principali caratteristiche della simulazione come ad esempio gli output in uscita, le caratteristiche climatiche mensili dell'ambiente esterno come per esempio la temperatura del terreno nonché il clima per i giorni di progetto. Il file dei dati meteo è contenuto in file testo con estensione "epw" e viene selezionato all'interno della finestra Weather File che compare all'interno di EP-Launch

Il Weather File viene selezionato qualora si abbia una simulazione su file meteo e contiene i valori orari per un anno di: temperatura, umidità, velocità del vento e irraggiamento solare diretto e diffuso.

Il risultato della simulazione è contenuto in un file di testo con estensione "csv" (comma separation value) contenente i valori delle variabili di output selezionate e con intervalli di tempo pari ad un'ora.

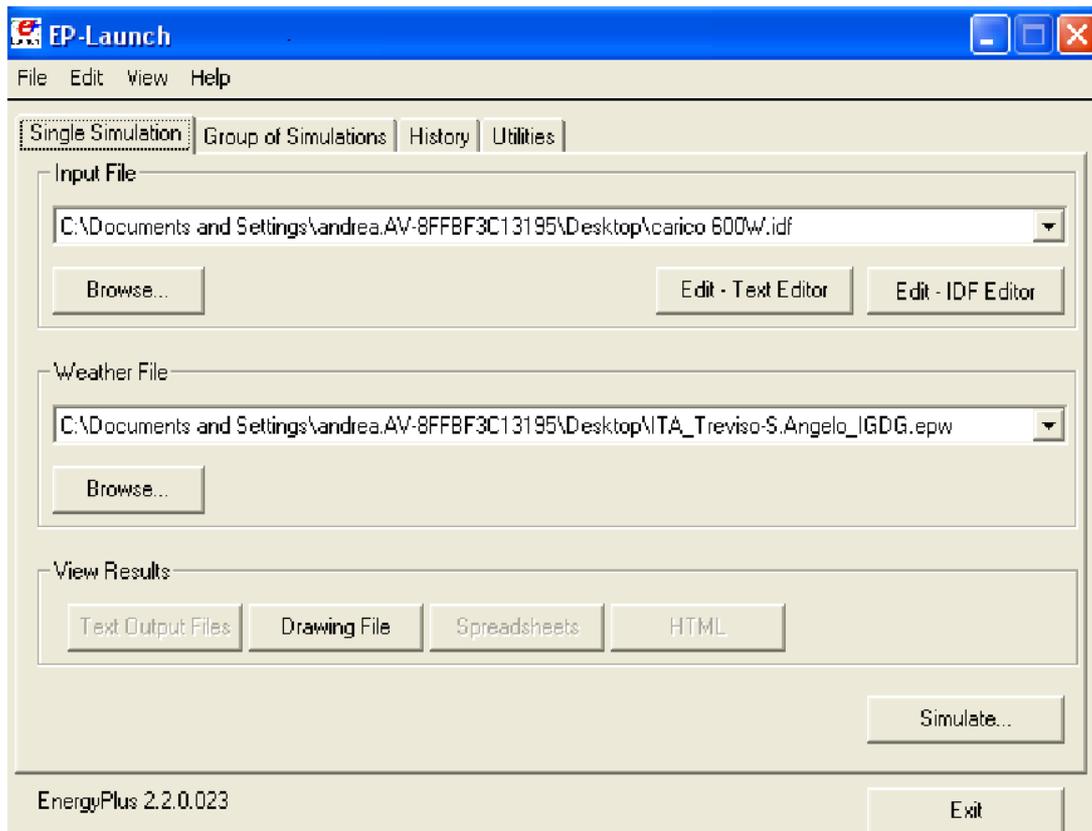


Figura 101 – Immagine della finestra di EP-Launch

Vediamo ora brevemente i campi che bisogna compilare per una simulazione completa dell’edificio

- Building- Nord Axis: direzione dell’asse nord dell’edificio rispetto al sistema di coordinate in cui è stato inserito (il nord è considerato lungo l’asse Y)
- Site Location: nome del sito, la latitudine, la longitudine, il fuso orario e l’altitudine
- SizingPeriod:DesignDay: definisce le caratteristiche di un giorno di progetto su cui eseguire la simulazione; occorre inserire il nome del giorno, ad esempio “summer_day” in estate e “winter_day” in inverno; per ognuno dei DesignDay viene poi inserita in successione la temperatura a bulbo umido, il delta di temperatura nell’arco della giornata, l’umidità specifica, la pressione, la velocità del vento e una serie di coefficienti riferiti al cielo, pioggia e neve.

- Run Period: viene specificato il periodo di calcolo e se si utilizza un file climatico (Weather File) o si utilizza un giorno tipico di progetto.
- Site:GroundTemperature: temperature del terreno durante l'arco dell'anno con passo mensile
- Schedale:Compact: è la maniera più breve per definire la variazione temporale di molte variabili quali: orari di funzionamento dell'impianto, variazione del set point, orari di variazione degli apporti interni quali luci, persone e apparecchiature. La sintassi è esemplificata nella Figura 102.

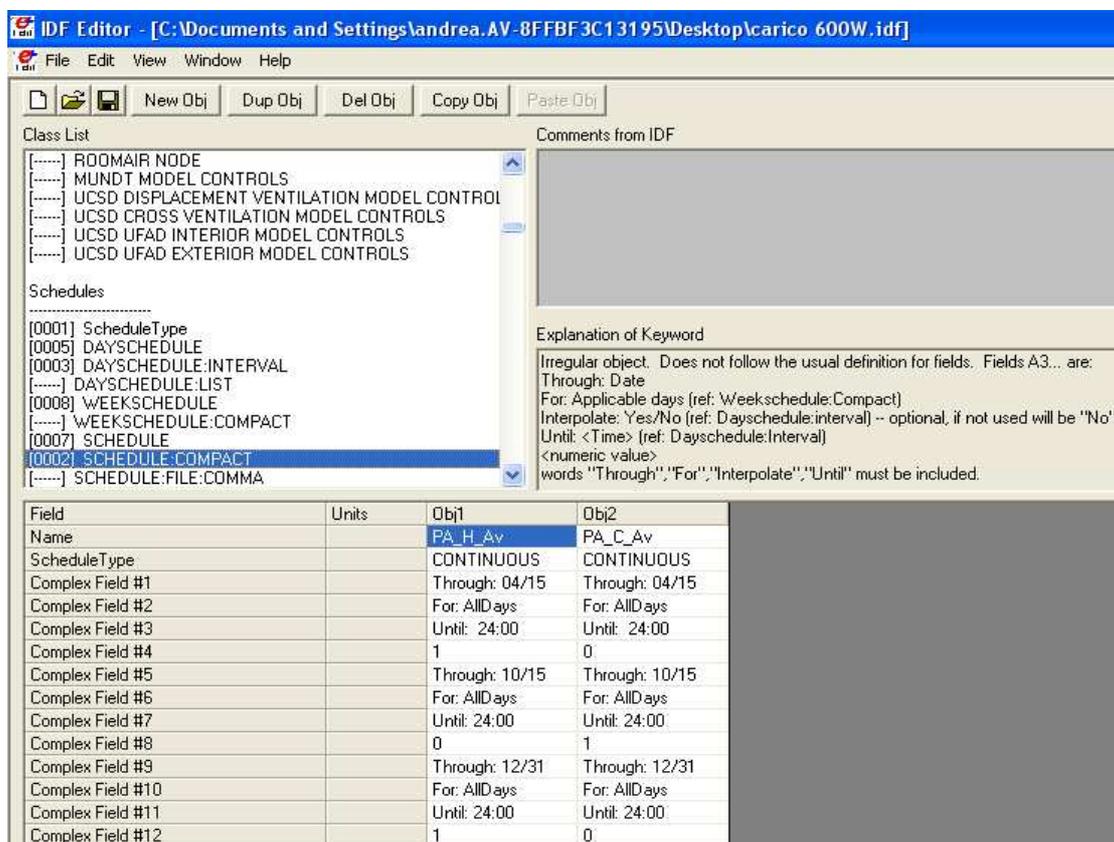


Figura 102 – Immagine del campo SCHEDULE:COMPACT

- Material: si inseriscono tanti Obj (colonne) quanti sono i materiali che sono necessari per la stratigrafia delle strutture; per ognuno di questi materiali vengono inseriti il nome, lo spessore dello strato, la conducibilità, la densità, il calore specifico e infine i tre coefficienti di assorbimento della radiazione solare (termica, solare e visibile)

- **WindowsMaterial:Glazing:** viene definito il materiale di composizione delle vetrate, spessore, conduttività e infine una serie di coefficienti di trasmissione, riflessione ed emissività (definiti all'interno del software WINDOW5)
- **WindowsMaterial:Gas:** tipo di gas dell'intercapedine della vetrata
- **Costruction:** stratigrafia di tutte le pareti solai e finestre, sia interne che esterne, da notare che per le pareti che separano due zone occorre definirle due volte a seconda del lato da dove la si considera.
- **GlobalGeometryRules:** definisce la modalità con cui sono definiti i vertici delle pareti, in genere la numerazione inizia dall'angolo in alto a sinistra guardando la parete dall'esterno e prosegue in senso antiorario come rappresentato in Figura 103
- **Zone:** coordinate dell'origine della varie zone rispetto all'origine (se nel campo "GlobalGeometryRules" ho definito il sistema di coordinate assoluto, diversamente posso indicare tutti zero); le zone termiche sono caratterizzate da avere la stessa tipologia impiantistica e gli stessi carichi interni
- **BuildingSurface:Detailed:** dettaglio delle superfici disperdenti in cui si specifica:
 - Name
 - Surface Type: Floor, Wall, Ceiling, Roof
 - Construction Name: nome della struttura definita precedentemente
 - Zone Name: nome della zona prima definita
 - Outside Boundary Condition: condizioni esterne della superficie
 - Sun Exposure: se in ombra indicare NoSun
 - WindExposure: se protetta dal vento indicare NoWin
 - Numero di vertici
 - Coordinate dei vertici come definito precedentemente
- **FenestrationSurface:Detailed:**
 - Name
 - Surface Type: Windows, Door, GlassDoor, ecc
 - Construction Name: come definito nel campo Costruction

- Building Surface Name: nome della superficie su cui la finestra è inserita
- Number of Vertices
- Coordinate: coordinate dei vertici definite come in Figura 103

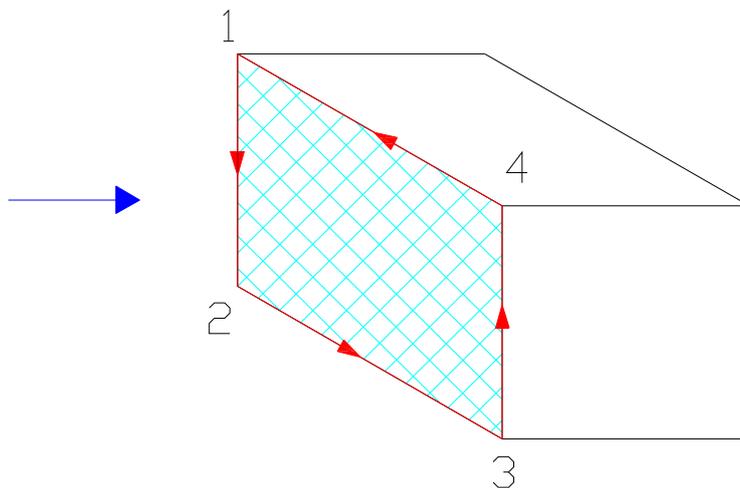


Figura 103 – Procedura per la numerazione dei vertici

- Windows Property: Frame and Divider. Caratteristiche dei divisori del serramento
- People: nome, zona, nome schedule, tipo di calcolo.
 - Persone totali
 - Persone/area
 - Area/persone
- Light: nome, zona, schedule name, Calculation Method:
 - Lighting level
 - Watt/area
 - Watt/persone
- Electric Equipment: nome, zona, schedule name, Calculation Method:
 - Equipment level
 - Watt/area
 - Watt/persona

- Zone Infiltration: Design Flow Rate: nome, zona, nome schedale, calculation method:
 - AirChange/Hour
 - Flow/Zone
 - Flow/Area
- Zone Control: Thermostat: nome, zona; schedule name, tipo di termostato, nome del termostato
- ThermostatSetpoint: DualSetpoint: nome (indicato nel campo precedente), nome schedule per riscaldamento e condizionamento
- Zone HVAC: IdealLoadAirSystem::
 - Nome
 - Nodo
 - Temperatura di immissione in riscaldamento
 - Temperatura di immissione in raffrescamento
 - Umidità in riscaldamento
 - Umidità in raffrescamento
 - Heating Limit: NoLimit
 - HeatingAvailabilityScheduleName: nome schedale di funzionamento impianto ad aria
- ZoneHVAC: EquipmentList: nome, nome oggetto (voce precedente), Zone EquipmentName (nome del nodo aria)
- ZoneHVAC: EquipmentConnection: nome zona, EquipmentListName (voce precedente), Air Inlet Node (nome del nodo di ingresso aria), Air Node Name (nome nodo aria)

Il passo finale è stabilire quali risultati avere in uscita ovvero quali sono gli output che si desiderano avere dalla simulazione, per fare questo si utilizza il campo: “Output:Variable” dove vengono inserite tante colonne quanti sono le variabili che si vogliono ottenere in uscita. Esempio di variabili in uscita:

1. Zone Mean Air Temperature (temperature media dell’aria);
2. Zone Mean Radiant Temperature (temperature media radiante);
3. Wind direction (direzione del vento);
4. Zone/Sys Sensible Heating Rate (potenza di riscaldamento per zona);

5. Zone/Sys Sensible Cooling Rate (potenza di raffrescamento per zona);
6. Zone Operative Temperature (temperatura operante);
7. Outdoor Dry Bulb (temperatura bulbo secco);
8. Zone Total Internal Total Heat Gain (calore totale guadagnato);
9. Window Transmitted Solar (trasmissione solare attraverso le finestre);
10. Surface Ext Solar Incident (incidenza solare sulla superficie esterna);
11. Window Heat Gain (calore guadagnato attraverso le finestre);
12. Opaque Surface Inside Face Conduction (conduzione attraverso le superfici opache);
13. Zone Infiltration Sensible Heat Gain (guadagno di calore sensibile attraverso le infiltrazioni);
14. Zone Infiltration Sensible Heat Loss (calore sensibile perso attraverso le infiltrazioni);

Nel campo “Output:Report” vanno inseriti almeno due Object: “VariableDictionary” e “Surfaces” dove viene specificato di creare un file di output tipo DXF Wireframe in cui è rappresentata il disegno geometrico della struttura inserita in modo da verificare se le coordinate inserite nella geometria sono corrette. In Figura 104 è rappresentato un esempio di output.

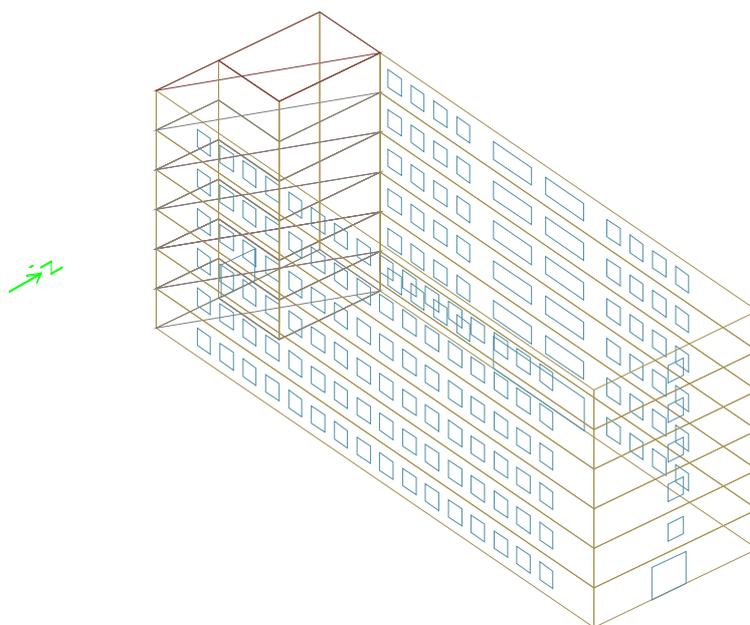


Figura 104 – Esempio di file DXF ottenuto da EnergyPlus

Il programma oltre a quanto illustrato permette la definizione particolareggiata di tutti i componenti di impianto nelle relative sezioni. Per la definizione dettagliata si rimanda alla guida del software Input Output Reference (2009)

L'input geometrico della struttura può essere realizzato tramite vari applicativi sia di libero utilizzo che commerciali. Tra quelli di libero utilizzo esiste OpenStudio un PlugIn per il programma di modellazione solida Google SketchUp. L'applicativo permette la creazione della parte relativa alla definizione del modello geometrico di un progetto di EnergyPlus scrivendo i dati direttamente nel file "idf". E' possibile definire le zone, le strutture opache e quelle trasparenti. Non sono invece gestite le tipologie di strutture che devono essere imputate direttamente ad esempio usando IDF Editor.

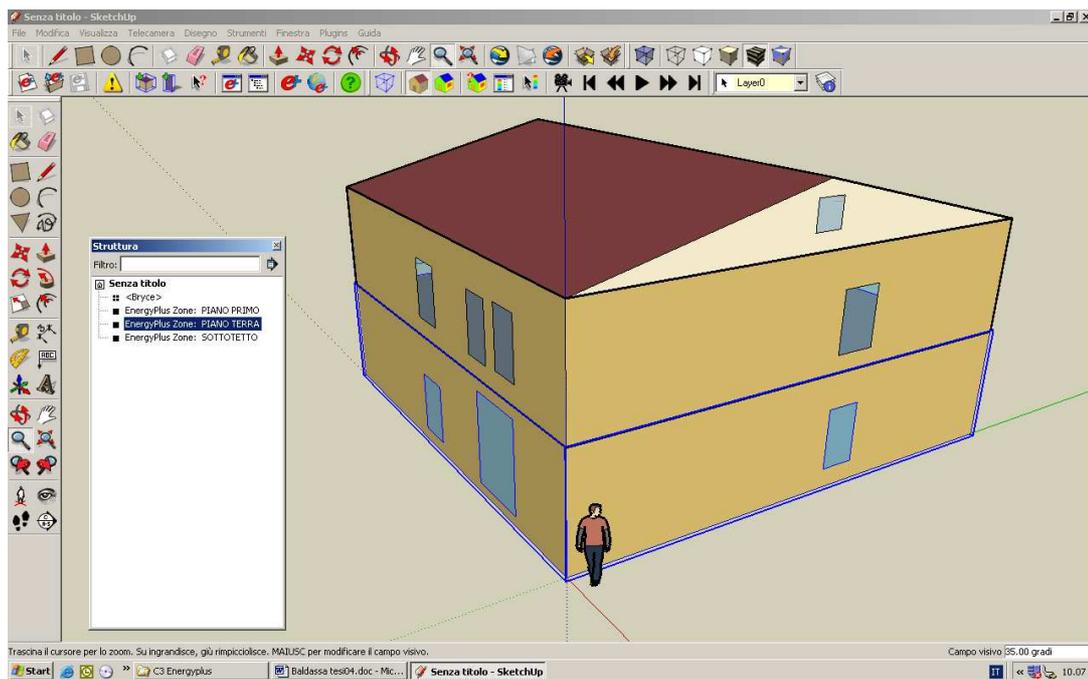


Figura 105– Schermata di inserimento SketchUp con PlugIn OpenStudio

BIBLIOGRAFIA

ASHRAEE Standard 90.1-2004 - Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings.

ENERGYPLUS™ Input Output Reference - The Encyclopedic Reference to EnergyPlus Input and Output. DEPARTMENT OF ENERGY, April 7, 2009.

LEED Reference Guide for Green Building Design and Construction, USGBC 2009.

Ringraziamenti

Ringrazio

tutto il personale del Dipartimento di Fisica Tecnica per la disponibilità ricevuta in questi anni;

tutti i dottorandi che hanno condiviso con mè questa avventura, per le cose che da loro ho imparato sia professionali che umane;

il prof. Roberto Zecchin e il prof. Michele De Carli per le tante cose che mi hanno insegnato e per la grande umanità che mettono nel loro ruolo;

mia Moglie per il sostegno ricevuto oltre che per l'aiuto nella stesura di questo lavoro;

i miei Figli per la pazienza che hanno portato in questi anni quando dovevo completare qualche articolo.

Chi soprattutto mi ha permesso di fare questa esperienza arrivata come un Miracolo nella mia vita.