UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Sede Amministrativa: Università degli Studi di Padova
Sede Consorziata: Università Iuav di Venezia

Dipartimento di Fisica Tecnica

SCUOLA DI DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA INDUSTRIALE
INDIRIZZO: FISICA TECNICA
CICLO: XXV

IMPIANTI INNOVATIVI PER LA RIQUALIFICAZIONE DI EDIFICI STORICI

Direttore della Scuola: Ch.mo Prof. Paolo Colombo
Coordinatore d'indirizzo: Ch.mo Prof. Luisa Rossetto
Supervisore: Ch.mo Prof. Luigi Schibuola

Dottoranda: Chiara Tambani

INDICE

SOMMARIO **5**

ABSTRACT **9**

PARTE PRIMA: Introduzione e struttura della ricerca **13**
1.1. Il Contesto della ricerca 14
1.1.1. Il contesto del risparmio energetico nel riutilizzo di edifici esistenti 16
1.2. Attività di ricerca svolta 20
1.3. Impostazione metodologica della ricerca 22
1.4. L'attività sperimentale 23

PARTE SECONDA : I quadri normativi di riferimento **25**
2.1. Riferimento scientifico disciplinare della ricerca 26
2.2. Riferimento al quadro normativo internazionale 28
2.3. Riferimento al quadro normativo europeo 32
2.3.1. Politiche energetiche comunitarie 32
2.3.2. Riferimenti alle direttive europee 36
2.3.3. La direttiva 2002/91/CE 37
2.3.4. La Direttiva 2010/31/CE 38
2.3.5. L'EPBD e il recepimento nei paesi membri 39
2.3.6. Riassunto delle principali norme europee sulle fonti energetiche rinnovabili e sul risparmio energetico 43
2.4. Riferimento alle norme italiane per un piano energetico 45
2.4.1. L'efficienza energetica del costruito 46
2.4.2. Leggi e iniziative regionali e comunali 48
2.4.3. Riassunto delle principali norme nazionali sulle fonti energetiche rinnovabili e sul risparmio energetico 51
2.5. Il Codice dei Beni Culturali 53
2.6. Prospettive normative nell'efficienza energetica del patrimonio storico 55

PARTE TERZA: Analisi del comportamento edifici storici tramite simulazione **57**
3.1. Premesse allo studio 58
3.1.1. Simulazione dinamica o stazionaria 58
3.1.2. La simulazione dinamica 61
3.1.3. Indicatori relativi all'efficienza energetica 63
3.1.4. Il calcolo del carico termico dell'edificio: DesignBuilder 64
3.2. La simulazione del sistema edificio-impianto 72
3.2.1. L'indice ESEER 74
3.2.2. Limiti dell'indice ESEER 77
3.2.3. La norma UNI 11135 78

3.2.4. Metodo di calcolo con procedure dinamiche....78
3.2.5. Metodo di calcolo con procedure semplificate stazionarie....79
3.2.6. Calcolo finale del COP medio stagionale (COP_s)....79
3.2.7. Calcolo del coefficiente correttivo Y secondo UNI 10963....80
3.2.7. Calcolo del coefficiente Y partendo dai dati necessari per ESEER....84
3.2.8. Conclusioni....91

PARTE QUARTA: Analisi del comportamento degli edifici storici tramite monitoraggio....93
4.1. Premesse allo studio....94
4.2. Impianto metodologico per un monitoraggio....96
4.3. Parametri e modelli nel monitoraggio....98
4.4. Le fasi del monitoraggio....101
4.4.1. Il database....101
4.4.2. Reportistica....101
4.4.3. Individuazione di grandezze e di indicatori ambientali ed energetici....102
4.4.4. Diagnostica alla luce dei dati raccolti....102
4.5. Analisi della qualità dell'ambiente interno a partire dai dati di monitoraggio ambientali....103
4.5.1. Le condizioni di benessere dell'utenza....104

PARTE QUINTA: Casi studio: edifici storici a Venezia....109
5.1. Le ragioni delle scelte....110
5.2. Ambito di studio : l' ex Magazzino 6....112
5.2.1. Gli impianti interni....117
5.2.2. Le centrali tecnologiche....126
5.2.3. Il funzionamento dell'impianto di climatizzazione....131
5.2.4. La supervisione e il monitoraggio....133
5.2.5. L'Umidità relativa nel magazzino 6....137
5.2.6. La ventilazione controllata....144
5.3. Ambito di studio: ala Sud dell'ex convento dei Tolentini....157
5.3.1. Il sistema edificio-impianto....158
5.3.2. Il modello della pompa di calore....164
5.3.3. Il modello dello scambiatore a terreno....171
5.3.4. Risultati delle simulazioni....175
5.3.5. Confronto: un impianto geotermico e un impianto tradizionale....182
5.3.6. Conclusioni....184
5.4 Caso studio: ex convento dei crociferi....186
5.4.1. Il recupero del Convento dei Crociferi....186
5.4.2. Analisi dei risultati....191
5.4.3. Conclusioni....197

CONCLUSIONI E PROSPETTIVE DI RICERCA....199

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI....203

SOMMARIO

Raggiungere l'obiettivo di una drastica riduzione dei consumi energetici negli edifici in base alle attuali emergenze mondiali di conservazione delle risorse naturali e di salvaguardia dell'ambiente, costituisce oggi un'autentica sfida che impegna la ricerca applicata sia in ambito nazionale che internazionale.
Gli edifici storici, che appartengono al nostro patrimonio edilizio costituendo l'ossatura culturale dei nostri territori, innescano importanti problematiche irrisolte dal punto di vista della sostenibilità ambientale e del risparmio energetico, problematiche legate alla difficoltà di trovare una mediazione tra la necessità di conservare e l'esigenza di un adeguamento energetico, per giungere ad una trasformazione dell'esistente che sappia soddisfare i nuovi requisiti legati ad un loro riuso per funzioni moderne attraverso però una minima trasformazione della materia storica. L'attività di ricerca svolta trova il suo fondamento in questo contesto e prende l'avvio da un' analisi del percorso normativo che dal protocollo di Kyoto del 1997 si dirama tra le normative internazionali, nazionali e locali fino ai giorni nostri.
Normative che nascono come indicazioni generali sulla sostenibilità ambientale e si evolvono diventando guide prescrittive sul miglioramento dell'efficienza energetica indirizzandosi sempre più sul patrimonio edilizio.
Nel giustapporre la normativa sulla riduzione dei consumi allo studio dell'edificato esistente appare evidente la difficoltà di attuare un processo di innovazione, la ricerca vuole quindi essere strumento di propulsione per una metodologia che trova il suo oggetto di intervento nell'edificato storico.
In questo ambito la realtà veneziana ci porta necessariamente a considerare il problema della qualificazione energetica degli edifici soggetti a tutela monumentale, sono stati a tal fine analizzati tre edifici situati a Venezia e rispondenti a queste caratteristiche.
Si è trattato di orientare il campo di indagine al fine di individuare gli impianti innovativi più adatti e studiarne la reale possibilità di integrazione architettonica in questi contesti e quantificandone successivamente i le prestazioni ottenute mediante il monitoraggio degli edifici già recuperati.
La ricerca si è avvalsa quindi di due strumenti: la simulazione e il monitoraggio del sistema edificio-impianto.
Attraverso l'utilizzo di software di simulazione dinamica (Design Builder e Energy Plus) e tramite programmi realizzati con finalità specifiche è stato possibile analizzare strategie di progetto alternative, nonché valutare la conformità dei progetti agli standard legislativi e perseguendo in questo modo l'ottimizzazione energetica delle soluzioni proposte
Il monitoraggio energetico-ambientale è stato utilizzato come strumento essenziale per l'ottimizzazione del funzionamento di sistemi impiantistici in fase di esercizio e si è avvalso di un sistema di supervisione capillare divisa in sezioni.

Sono stati analizzati nel corso del primo anno di ricerca i dati riguardanti l'umidità relativa, le temperature massima e minima estiva e invernale, il tasso massimo di CO_2 che comanda la modulazione della ventilazione e l'apertura percentuale delle serrande. La successiva analisi dei dati raccolti ha consentito di valutare le modalità di intervento e di ottimizzazione del sistema edificio e dei sottosistemi impiantistici nelle condizioni reali di gestione e utilizzo .
Nel tempo la ricerca si è suddivisa nell'approfondimento e analisi di tre differenti casi studio:

1. La messa a punto del sistema di monitoraggio degli impianti di climatizzazione installati nell'ex magazzino 6 acquisito da IUAV, con conseguente individuazione di possibili interventi sui parametri di funzionamento, gestiti dalla supervisione installata al fine di raggiungere un netto miglioramento delle prestazioni energetiche e di comfort interno. La successiva elaborazione dei dati, forniti dal sistema di monitoraggio, ha permesso un'analisi relativa ai risparmi energetici ed economici ottenibili mediante una corretta gestione che ottimizzi il controllo dell' umidità interna e quello della ventilazione, assicurando comunque le condizioni interne di comfort. Dallo studio svolto si è rilevato che gli edifici scolastici sono particolarmente adatti a trarre beneficio da un uso flessibile del set-point di umidità relativa interna e da un tasso variabile di ventilazione gestito da un controllo automatico basto su sensori di CO_2.

2. Lo studio del progetto di restauro e adeguamento impiantistico dell'ex convento dei Tolentini, oggi sede principale dell'Università IUAV di Venezia, per la trasformazione delle vecchie aule presenti in biblioteca di ateneo e il rifacimento dell'aula magna. I nuovi impianti prevedono l'utilizzo di una pompa di calore invertibile con scambiatore geotermico con sonde verticali. Il progetto è di particolare interesse per la ricerca in quanto, in una città come Venezia, l'utilizzo di macchine per la produzione del caldo e del freddo trova spesso ostacoli legati sia al reperimento di aree in cui sia consentita l'installazione di macchine raffreddate ad aria o di torri evaporative, sia all'uso dell'acqua di laguna fattibile solo in prossimità ai canali maggiori. Lo studio svolto mediante simulazione del sistema edificio-impianto ha evidenziato coefficienti di prestazioni stagionali sempre decisamente superiori a quelli che si ottengono con la più frequente macchina aria-acqua.
   L'analisi di sensitività svolta ha indicato la possibilità di incrementare questi coefficienti prestazionali utilizzando sonde con maggiore superficie di scambio (doppia U) e macchine con regolazione modulante. L'aumento della lunghezza delle sonde dell'impianto fino a 70-100 m , valori consueti per impianti realizzati nella terraferma, permette di incrementare decisamente le prestazioni . In conclusione è la superficie di scambio il parametro su cui si deve puntare per ottenere un ulteriore miglioramento.

3. L’analisi del progetto di recupero del Convento dei Crociferi, un complesso storico in Venezia nel quale l’Università IUAV ha realizzato un campus di residenze universitarie. La disponibilità di acque superficiali ,con un'adeguata circolazione di rinnovo dovuta alla vicinanza dell'edificio con lo spazio lagunare aperto, ha premesso di prevedere livelli termici interessanti per la macchina. L’attività di ricerca ha riguardato lo studio preliminare mediante simulazione. Questa analisi è stata svolta per ottimizzare le scelte progettuali quantificando il risparmio energetico e lo sfruttamento di energie rinnovabili.
   Lo studio ha mostrato notevoli opportunità applicative per l’uso della pompa di calore invertibile abbinata all’acqua di laguna che permette di raggiungere efficienze stagionali molto interessanti: il risparmio energetico ottenibile è infatti oltre il 20% con riferimento a impianti tradizionali e nettamente superiore a quello ottenuto con la pompa di calore ad aria.

ABSTRACT

Joining the goal to building energy consumption drastic reduction, acting on today's natural resources preservation global emergency, is nowadays an authentic challenge which involves national and international applied research.
Historic buildings that belong to our heritage, representing our territory cultural structure, trigger lots of unsolved problems in the field of sustainability and energy consumption. The problem dwells on complexity to find a mediation between conservation needs and energetic update request, to join a satisfying compromise between new law requirements and ancient building reuse with modern functions and historical material minimum transformations.
The carried out research activity founds its groundwork in this context. It starts from the regulatory path analysis from the Kyoto protocol (1997) to todays' international, national and local laws.
These norms started to be simple and general indications on environmental sustainability and then they evolved becoming prescriptive guides on energy efficiency improvements redirecting furthermore to existing building heritage.
Comparing the energy consumption reduction regulation and the existing building heritage study, it's evident the complexity in actuating innovation process. This research wants to be a methodology stimulus for building heritage.
In this field Venetian reality leads us to consider the energy qualification of monumental safeguard buildings. Three examples in Venice have been analyzed that respond to these characteristics.
The research field was directed to find the most suitable innovative plants by studying the real possibility to join a valid architectonic integration, and to quantify future energetic performances obtained by monitoring the recuperated buildings.
The research used two different instruments: the simulation and the system plant monitoring.
By the use of dynamic simulation software (Design Builder and Energy Plus) and by the use of built-up software it has been possible to analyze alternative project strategies, to evaluate the project accordance with law standards, pursuing proposed solutions energy optimization.
Environmental and energetic monitoring has been used as essential instrument to optimize operating plant systems taking advantage of a capillary supervising system divided in sections.
During first research year data regarding relative humidity, the maximum and minimum winter and summer temperature, the maximum CO_2 level (which leads the ventilation modulation and the shutters opening percentage) have been analyzed
Next obtained data analysis has permit to evaluate building system and plant sub

systems intervention and optimization manners, in real management and using conditions.
In the course of time research has been subdivided in the in-depth analysis of three different study cases:

1. The making up of conditioning system plant monitoring installed at “ex Magazzino 6” acquired by University Iuav of Venice, with consequent individuation of possible interventions on working parameters, to reach a net improvement of energy performances and indoor comfort. The after data elaboration, system monitoring given, allowed an energy and economic savings analysis obtainable by a correct management, which optimize indoor humidity and ventilation control, ensuring in any case internal comfort. From this study has been proved that scholar buildings are particularly suitable to reach benefices from a flexible use of relative humidity set point and from a variable ventilation levels, managed from an automatic control based on CO_2 sensors.

2. The restoration and plant upgrade of Tolentini ex convent, todays’ University Iuav of Venice headquarter: old classrooms have been transformed to University Library and lecture hall has been renovated. New plants consider invertible heat pump use, with geothermal heat-exchanger with vertical boreholes. The project is quite interesting because in a city like Venice, using heating and cooling production machines, it finds obstructions linked to locate either installation permitted areas for cooled air machines or condensing towers, either using lagoon water, only possible near major canals. The study has been done by building/plant system simulation, which underlined seasonal performance levels always certainly higher than ones obtained by a normal air-water machine. The sensitivity analysis done, indicated possible increases of these performance levels using larger surface exchange boreholes (double U) and modular machines. Boreholes length increased until 70-100 m (normal depth for mainland realized plants) can reasonably augment performances. Concluding the perimeter is the exchange surface to which point to reach further improvements.

3. Reuse and restoration project analysis of Crociferi Convent, an historical complex in Venice in which University Iuav of Venice realized a campus and University residences. The surface water availability with an adequate renewal circulation due to open lagoon proximity, permitted to foresee interesting machine thermal levels.
   Research activity regarded the preliminary study by simulation. This analysis has been done to optimize project choices quantifying energy savings and renewable energy use. The study demonstrated suitable applicative opportunities for invertible heat pump use coupled with lagoon water, that

allows to join very interesting seasonal efficiencies: obtainable energetic saving is in fact more than 20% over than traditional plants and clearly higher than the air heat pump obtainable savings.

PARTE PRIMA: Introduzione e struttura della ricerca

INDICE CAPITOLO

1.1. Il Contesto della ricerca 14
1.1.1. Il contesto del risparmio energetico nel riutilizzo di edifici esistenti..... 16

1.2. Attività di ricerca svolta 20

1.3. Impostazione metodologica della ricerca 22

1.4. L'attività sperimentale 23

1.1. Il Contesto della ricerca

Già a partire dagli anni '80, il tema della sostenibilità relativamente alle costruzioni ha unito il tema della risposta energetica con quello del riuso e della riqualificazione.
Se ci si riferisce al concetto di risorsa nella sua accezione più ampia, e cioè come bene limitato, deperibile e non rinnovabile, e quindi estendibile al patrimonio edificato come irriproducibile documento di cultura materiale, risulta chiara l'esistenza di una stretta interdipendenza tra sostenibilità e conservazione, sia dei manufatti che dell'ambiente; cultura del recupero e cultura della sostenibilità hanno infatti radici comuni e in tempi recenti hanno conosciuto un'accelerazione nella convergenza di azioni, metodi e intenti: entrambe hanno come fine principale la conservazione, l'una del patrimonio architettonico, storico, archeologico e paesaggistico, l'altra delle risorse energetiche.
Più della metà del costruito italiano risale a prima della legge 373/76 e va a costituire un parco immobiliare fortemente energivoro.
Il 22% è in mediocre e pessimo stato di conservazione; il 70% è relativamente giovane, perché realizzato nel secondo dopoguerra, ma solo il 2% del totale può essere inserito in classi energetiche virtuose, cioè pari o superiori alla C[1].
All'interno di questo scenario, gli edifici di riconosciuto interesse storico o comunque tali da rappresentare una testimonianza della cultura dei luoghi, sono numericamente poco incidenti, ma possiedono un "peso specifico" assolutamente non trascurabile: nonostante la stessa direttiva europea ammetta alcune deroghe, è indubbio che le problematiche relative alla sostenibilità ambientale e al risparmio energetico interferiscano pesantemente con la gestione di tessuti urbani storici e di contesti paesaggistici sensibili, cioè di quel patrimonio storico architettonico di grande qualità che costituisce l'ossatura culturale dei nostri territori.
L'attivazione di interventi sistemici sui contenitori architettonici fortemente storicizzati è, però, una strada ancora concepita da pochi; il problema, in questo senso, deriva dall'assenza di soluzioni davvero capaci di una mediazione tra permanenza dei dati materiali ed adeguamento energetico, e tali da giungere ad un grado di trasformazione dell'esistente che sappia soddisfare i nuovi requisiti attraverso una perdita o alterazione minima della materia storica, in cui risiedono potenzialità evocative e testimoniali non più riproducibili.[2]

[1] Si veda il III Rapporto Saienergia realizzato dal Cresme e presentato al SAIE di Bologna il 7 ottobre 2011

[2] Fairclough G. *Cultural Landscape Sustainability and living with Change?* In "Managing Change : Sustainable Approaches to the conservation of the Built Enviroment " proceedings 4th Annual US/Icoms International Symposium (Philderphia 2001), Los Angeles, The Getty Conservation Institute , 2003

La questione energetica, in particolare il miglioramento dell'efficienza energetica del patrimonio storico compatibile con la sua tutela e con un suo recupero sostenibile, appare quindi come un nodo cruciale per il futuro della tutela, della conservazione e del restauro dell'edilizia storica.
All'interno del quadro delineato la ricerca ha preso l'avvio da questioni internazionali:

- nel 1997 il protocollo di Kyoto ha sancito la necessità di favorire e potenziare un'economia a basso consumo energetico;

- I principi di sviluppo sostenibile del territorio e di riduzione dei consumi sono stati introdotti dall'Unione Europea nelle politiche comunitarie;

- Nel 2002 l'introduzione della Direttiva Europea sull'efficienza energetica degli edifici (EPBD 2002/91/CE, Energy Performance Building Directive).

Nel giustapporre la normativa sulla riduzione dei consumi allo studio dell'edificato esistente appare evidente la difficoltà di attuazione di un processo di innovazione, che trova la sua naturale realizzazione negli edifici di nuova costruzione, ma che fino ad oggi stenta a definire metodologie e mezzi adeguati al mondo della conservazione, nonostante come evidenziato appaia oggi ineluttabile la condizione di dover lavorare, sempre e comunque, in stretto rapporto con il costruito. Gli interventi normativi europei e nazionali che hanno fatto seguito alle direttive si sono posti come obiettivo principale la definizione di criteri e requisiti adatti alle nuove costruzioni, con indicazioni puntuali e spesso settoriali, che riguardo all'edilizia esistente spesso hanno determinato un grande impatto sull'edificato.
Si presentano quindi nuove problematiche relative all'utilizzo dell'edificio storico per funzioni diverse da quelle per le quali era stato progettato e con condizioni ambientali diverse da quelle in cui è stato utilizzato nei secoli fino ai giorni nostri.
Risulta necessario adottare strategie di gestione appropriate, che coniughino le esigenze attuali di incremento di efficienza energetica con i vincoli storico-architettonici degli edifici storici.
Ponendo l'attenzione alle metodologie che dovranno condurre all'adeguamento dell'edificato si evince come la ricerca debba occuparsi :

- del rapporto tra conservazione e sostenibilità;
- dell'efficienza energetica nell'ambito della tutela del patrimonio storico edificato.

E' in questa nuova ottica che il termine sostenibile acquisisce maggior significato integrando sia la progettazione degli interventi per la riduzione del consumo energetico, sia impedendo che si intervenga su un patrimonio storico con logiche estranee a quelle che ne hanno stratificato la materia e ne hanno accresciuto il valore.

Tale progettazione dovrà trovare il suo fondamento su logiche nuove :

- tenderà al miglioramento anziché all' adattamento;
- si porrà obiettivi energetici adeguati e adeguabili alle strutture esistenti ;
- studierà campi di intervento, strategie progettuali e tecnologie proprie e funzionali agli edifici in oggetto , attingendo dal campo delle nuove costruzioni, ma riconoscendo all'edilizia esistente e all'edilizia soggetta a tutela monumentale un suo proprio individuale settore di studio e di azione.

1.1.1. Il contesto del risparmio energetico nel riutilizzo di edifici esistenti

La conservazione e il riutilizzo di edifici esistenti svolge un ruolo fondamentale nello sviluppo sostenibile del territorio alla luce della consapevolezza che una significativa riduzione delle emissioni inquinanti, obiettivo irrinunciabile per ogni politica di sviluppo, si può ottenere soltanto attraverso l'adeguamento del patrimonio edilizio costruito in gran parte energeticamente obsoleto .
Il riuso e la riqualificazione rappresentano quindi un tema centrale per il settore delle costruzioni, considerando anche che nel nostro paese tre quinti del mondo dell'edilizia sono assorbiti dal recupero.
E' anche noto che gli elevati costi, associati quasi sempre agli interventi di recupero, risultano giustificati se l'intervento è richiesto non da uno, ma da più motivi di adeguamento delle prestazioni strutturali se sono richiesti anche adeguamenti relativi ai caratteri tipologici costruttivi, adeguamenti di aspetto e adeguamenti energetici e impiantistici, allora l'intervento di recupero può essere ben motivato e perseguito. Spesso la demolizione sembra quindi essere l'unica opzione , tuttavia, la sostituzione di un edificio esistente con uno nuovo richiede un notevole investimento di energia incorporata .
Raymond J. Cole e David Rosseau[3] ,dell'Environmental Research Group di Vancouver, definiscono l'energia incorporata (embodied energy) come l'energia usata per produrre , trasportare e mettere in opera un materiale o prodotto o componente edilizio.
E' opportuno ricordare che quando un edificio viene demolito, la sua energia grigia si perde; dagli studi effettuati da Jackson[4] appare evidente che effettuando la sostituzione di un vecchio edificio con uno nuovo, ad alta efficienza energetica, sono necessari decenni prima che il risparmio del' energia impiegata nel funzionamento possa superare l'energia incorporata del vecchio edificio; mentre se effettuiamo un

[3] School of Architecture , University of British Columbia, Vancouver-Canada, 1992

[4] *"Embodied Energy and Historic Preservation: a Needed Reassessment"*, apt Bulletin, 36:4 (2005) Mike Jackson,

recupero della struttura e nell'involucro di un edificio molta della sua energia grigia viene conservata. (Figura 1)

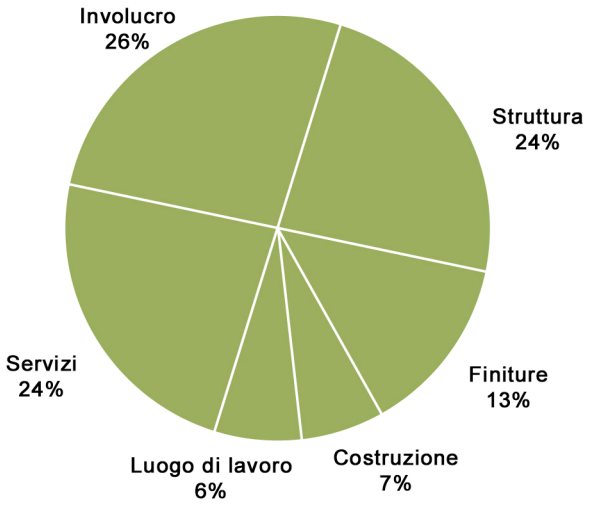


Figura 1. Ripartizione dell'energia incorporate nelle fasi di costruzione iniziali di un edificio.

Nella letteratura scientifica il tema dell'estensione del bilancio energetico dell'edificio all'intero ciclo di vita di un edificio è già affrontato da tempo con notevole varietà di approcci , definizioni e procedure di valutazione.
L'energia utilizzata per la costruzione di un fabbricato, ossia quella utilizzata per il trasporto finale (dallo stabilimento al cantiere) e per l'installazione e assemblaggio dei componenti in opera, è una piccola porzione dell'energia incorporata; si stima infatti che essa abbia un incidenza del 7%-10% sul valore complessivo dell'energia totale. La quota maggiore di energia incorporata deriva dall'energia consumata nella produzione dei materiali e dei trasporti associati ai vari processi produttivi.

Dunque l'energia incorporata , o energia inglobata, comprendere:

- l'energia per estrarre, approvvigionarsi e trasportare le materie prime;
- l'energia consumata nei processi di produzione primaria e per i trasporti delle successive lavorazioni;
- l'energia consumata per le lavorazioni secondarie;
- l'energia consumata per il trasporto dallo stabilimento al cantiere;
- l'energia consumata per assemblare e mettere in opera i componenti.

L'energia incorporata è energia spesa, che non può essere recuperata o compensata . L'energia incorporata periodica negli edifici rappresenta invece l'energia non rinnovabile usata per mantenere, riparare , restaurare, sostituire materiali, componenti o sistemi durante la vita dell'edificio.
Occorre sottolineare che i valori relativi ai consumi di energia primaria e relative emissioni per il riscaldamento degli edifici contemplate dalla certificazione energetica conteggiano solo i consumi e le emissioni relative all'energia nella fase di esercizio, mentre viene omesso il conteggio dell'energia indiretta dovuta all'estrazione , produzione e trasporto dei combustibili fino all'edificio.
Quando l'edificio diventa più efficiente energicamente, il rapporto tra energia incorporata e il consumo globale (del ciclo di vita) aumenta.
Data l'aspirazione a realizzare edifici a consumo quasi zero, l'energia usata nella costruzione e nella dismissione finale assumono nuovo significato.
L'analisi della Figura 1 ci permette di rilevare che l'involucro dell'edificio, la struttura e i servizi contribuiscono quasi equamente al consumo energetico e costituiscono circa i tre quarti dell'energia incorporata iniziale totale. Le finiture, che rappresentano solo il 13% dell'energia incorporata iniziale, solitamente sono responsabili del più alto aumento nell'energia incorporata periodica.
Il principio di conservazione e recupero deve anche tener conto del problema dell'energia in esercizio; molti vecchi edifici risultano infatti fortemente inefficienti proprio per quanto attiene l' energia utilizzata per la climatizzazione estiva e invernale, la ventilazione e l' illuminazione.
Nonostante questo, un'ampia rassegna della letteratura scientifica sul riuso degli edifici esistenti dal 1970 in poi dimostra che la forza trainante dietro il riutilizzo di questi edifici è stata per molto tempo di natura economica, tecnica e strutturale, mentre poco rilievo veniva dato al loro miglioramento in termini di consumo energetico.
Attualmente le strutture pubbliche facenti parte del patrimonio storico vengono rivalorizzate per usi diversi da quelli iniziali, questi edifici sono comunemente a bassa efficienza energetica , se chiaro è il ventaglio di interventi atti a rendere tecnologicamente sostenibili gli edifici indirizzati a uso abitativo più incerta e impervia la scelta delle strategie per edifici pubblici indirizzati a nuove funzioni .
Questo è dovuto al fatto che le tecnologie per l'efficienza energetica e le applicazioni innovative sviluppate possono essere divise tra la fase di progettazione e la fase operativa. Nella fase di progettazione le tecnologie disponibili per l'efficientamento energetico sono numerose , meno numerose ma tuttavia utili le misure che possono essere adottate negli edifici in fase di rinnovo edilizio .
Anche se non tutti gli edifici con valore architettonico possono raggiungere gli standard di efficienza energetica di una nuova costruzione a causa dei vincoli posti dalle norme per la conservazione dei beni culturali è tuttavia possibile raggiungere buoni livelli di risparmio energetico tramite soluzioni impiantistiche innovative.

Particolarmente articolato è lo studio degli interventi di recupero su grandi edifici come la riconversione di chiese, magazzini o manufatti industriali dove il raggiungimento di buone prestazioni energetiche comporta un approccio molto complesso all'uso di tecnologie che considerino tutti i vincoli , finanziari, giuridici e i fattori di influenza ambientale.
Appare comunque chiaro che un uso più efficiente dell'energia negli edifici esistenti sia una delle risorse più sfruttabili per un piano di edilizia sostenibile
Un orientamento operativo, supportato da un indirizzo normativa del riuso e recupero, che sostituisca quello della dismissione e ricostruzione, deve essere basato sulla ricerca del risparmio dell'energia anche per gli edifici oggi esclusi dagli obblighi normativi di adeguamento prestazionale a cui sono soggetti i fabbricati di nuova costruzione .

1.2. Attività di ricerca svolta

L'analisi del contesto ha orientato la ricerca sulla raccolta e rielaborazione di dati utili allo sviluppo delle strategie di efficientamento energetico per l'edilizia storica.
In questo ambito la realtà veneziana ci porta necessariamente a considerare il problema della qualificazione energetica degli edifici soggetti a tutela monumentale.
Attualmente la politica di sostenibilità applicata negli interventi di recupero agisce essenzialmente sull'involucro degli edifici in modo da regolare e controllare i flussi di aria, di luce, di energia che si scambiano dall'esterno all'interno e viceversa. Ma proprio perché sull'involucro degli edifici esistenti e sulla conservazione di questo si concentrano limitazioni e vincoli di varia natura, ci si trova spesso nella condizione di non poter affrontare la progettazione dell'intervento di recupero in termini sostenibili, dovendosi attestare solamente sulla conservazione e sul consolidamento di ciò che esiste. I vincoli presenti, infatti, impediscono cambiamenti significativi al fine di migliorare le caratteristiche termo-igrometriche dell'involucro edilizio. In queste condizioni il recupero di questi immobili ai fini di una diversa destinazione d'uso (scuole, alberghi, residenze, musei) rischia di trasformarsi in un pessimo risultato dal punto di vista del consumo e del costo di esercizio.
Frequentemente quindi le strategie sostenibili sono più facilmente adottabili su edifici di scarso valore e più facilmente modificabili, piuttosto che in interventi su edifici di alto valore storico, specialmente in questo caso occorre puntare soprattutto sull'efficienza degli impianti e sulla corretta gestione del sistema edificio-impianto.
La ricerca svolta ha orientato il campo di indagine al fine di individuare gli impianti innovativi più adatti e studiarne la reale possibilità di integrazione architettonica in questi contesti quantificando i risultati ottenuti mediante il monitoraggio degli edifici già recuperati per ottimizzare la resa del sistema edificio - impianto, riducendo gli sprechi ed elevando il livello di qualità dell'intero settore.
Con l'obiettivo di ridurre il più possibile lo iato tra esigenze di tutela monumentale e l'inalienabile bisogno di efficienza energetica, il progetto di lavoro ha previsto annualmente di estendere a più edifici l'attività di analisi delle prestazioni energetiche e delle condizioni di comfort interno.
Lo spettro della ricerca sono state le problematiche relative al risparmio energetico degli edifici, sia sul fronte della certificazione energetica, sia su quello del contenimento dell'utilizzo della risorsa energia per la climatizzazione invernale ed estiva dei manufatti storici nell'ottica della riduzione degli inquinanti emessi in atmosfera.

Attraverso il monitoraggio si è posta particolare attenzione al miglioramento della qualità della vita all'interno degli ambienti considerando caratteristiche termiche, termo-igrometriche e di purezza dell'aria in essi contenuta e si è approfondita la conoscenza delle interazioni tra i diversi parametri microclimatici e l'uomo, che di tale microclima deve fruire nella maniera migliore possibile, compatibilmente con le attività che esso esplica.

Figura 2. Relazione tra i consumi, la qualità ambientale e riqualificazione energetica

1.3. Impostazione metodologica della ricerca

La fase iniziale dello studio, è stata incentrata su di un lavoro prevalentemente di ricerca che ha previsto una ricognizione: sullo stato dell'arte in tema di efficienza energetica, attraverso un'ampia documentazione sugli standard internazionali e sulle pratiche connesse al contenimento dei consumi nell'edilizia, a questa fase di carattere analitico – conoscitiva del problema, è stata affiancata una fase di sperimentazione diretta delle prassi operative. In questa logica si sono approfonditi studi di progetti su edifici soggetti a tutela monumentale.
L'obiettivo della ricerca svolta è stato l'individuazione di soluzioni tecnologiche per l'integrazione in edifici di pregio storico-architettonico e di sistemi e soluzioni orientate all'efficienza energetica e allo sfruttamento di fonti rinnovabili.
Al fine di comprendere il metodo di studio utilizzato per rispondere agli obiettivi della ricerca, è possibile articolare lo studio in tre sotto-categorie:

1. ricognizione riorganizzazione del quadro conoscitivo normativo e storico oggi in uso riferito al miglioramento dell'efficienza energetica e sullo stato dell'arte svolto attraverso un'ampia documentazione sugli standard internazionali, sulle pratiche e sulla normativa connesse al contenimento dei consumi nell'edilizia;
2. individuazione delle metodologie di analisi del comportamento dei sistemi edificio-impianto sia in fase progettuale, per ottimizzare le prestazioni dei sistemi tramite l'utilizzo della simulazione , sia in fase di esercizio per migliorare la gestione degli stessi, attraverso il monitoraggio;
3. analisi tre diversi casi studio, (Monitoraggio degli impianti dell'ex Magazzino 6 – Studio del progetto di restauro dell'ex convento dei Tolentini - Studio del progetto di restauro dell'ex convento dei Crociferi) caratterizzati da tre differenti problematiche.

E' risultato infatti chiaro che rispetto all'ampia casistica delle soluzioni ipotizzate ai fini del miglioramento dell'efficienza energetica dell'edificio, una fonte di possibile limitazione alle scelte sia per l'appunto l'edificio stesso, soprattutto se di elevato valore storico-architettonico. Il ventaglio delle possibili soluzioni inoltre su un edificio esistente è risultata sempre differente proprio in relazione alle caratteristiche costitutive, costruttive, morfologiche dell'edificio e del suo contenuto, in termini di qualità dei materiali e delle finiture in esso presenti.
L'obiettivo primario della ricerca, in questa fase, si è quindi concentrato sull' individuazione di metodi di approccio e di possibili strategie di intervento, piuttosto che non su un abaco esaustivo di possibili soluzioni specifiche.

1.4. L'attività sperimentale

L'attività sperimentale ha riguardato:

1. La messa a punto del sistema di monitoraggio degli impianti di climatizzazione installati nell'ex magazzino 6 recentemente acquisito da IUAV, con conseguente individuazione di possibili interventi sui parametri di funzionamento, gestiti dalla supervisione installata ai fini di un netto miglioramento delle prestazioni energetiche e di comfort interno. La successiva elaborazione dei dati forniti dal sistema di monitoraggio ha permesso un'analisi relativa ai risparmi energetici ed economici ottenibili mediante una corretta gestione che ottimizzi il controllo dell' umidità interna e quello della ventilazione, assicurando comunque le condizioni interne di comfort. La quantificazione dei consumi energetici connessi con la ventilazione e la regolazione dell'umidità sono oggi due dei temi maggiormente dibattuti nell'ambito dello sviluppo della certificazione energetica specie quella in regime estivo.

2. Lo studio del progetto di restauro e adeguamento impiantistico dell'ex convento dei Tolentini oggi sede principale dell'Università IUAV. Per un'ala di tale complesso di edifici è stato elaborato un progetto esecutivo, ora in fase di realizzazione, per la trasformazione delle vecchie aule presenti in biblioteca di ateneo e il rifacimento dell'aula magna. I nuovi impianti prevedono l'utilizzo di una pompa di calore invertibile con scambiatore geotermico. Sono state studiate le prestazioni annuali previste in questo caso mediante la simulazione dinamica del sistema edificio-impianto avvalendosi di adeguati modelli appositamente elaborati per lo scambiatore a terreno e la pompa di calore. Il progetto è di particolare interesse in quanto in una città come Venezia l'installazione di macchine per la produzione del caldo e del freddo necessari per la climatizzazione trova spesso notevoli difficoltà. Data la concentrazione di edifici soggetti a tutela monumentale difficile è il reperimento di aree in cui sia possibile e consentita l'installazione di macchine raffreddate ad aria o di torri evaporative. L'utilizzo dell'acqua di laguna è d'altronde fattibile solo in prossimità ai canali maggiori mentre il prelievo di acqua di falda è qui normalmente vietato. Sono stati perciò utilizzati sistemi geotermici basati sull'impiego di scambiatori a circuito chiuso che utilizzano le meno ingombranti sonde verticali. E' stato quindi affrontato il tema della loro applicabilità nella realtà Veneziana con particolare riguardo all'installazione a servizio di edifici storici.

3. L’analisi del progetto di recupero del Convento dei Crociferi, un complesso storico in Venezia soggetto a tutela monumentale . L’Università IUAV di Venezia ha deciso di realizzare un campus di residenze universitarie dotato di tutti i servizi che oggi si richiedono per queste strutture. La disponibilità di acque superficiali con un'adeguata circolazione di rinnovo dovuta alla vicinanza dell'edificio con lo spazio lagunare aperto permette di prevedere livelli termici interessanti per la macchina. A Venezia l'uso delle acque di falda normalmente non è permesso a causa del pericolo della subsidenza e l'installazione di una pompa di calore con scambiatore a terreno non è qui possibile a causa della significativa potenza della macchina prevista che richiede per la costruzione dello scambiatore a terreno una vasta area indisponibile in questo caso. L’attività di ricerca ha riguardato lo studio preliminare mediante simulazione. Questa analisi è stata svolta per ottimizzare le scelte progettuali quantificando il risparmio energetico e lo sfruttamento di energie rinnovabili.

PARTE SECONDA : I quadri normativi di riferimento

INDICE CAPITOLO

2.1. Riferimento scientifico disciplinare della ricerca 26

2.2. Riferimento al quadro normativo internazionale 28

2.3. Riferimento al quadro normativo europeo 32
2.3.1. Politiche energetiche comunitarie 32
2.3.2. Riferimenti alle direttive europee 36
2.3.3. La direttiva 2002/91/CE 37
2.3.4. La Direttiva 2010/31/CE 38
2.3.5. L'EPBD e il recepimento nei paesi membri 39
2.3.6. Riassunto delle principali norme europee sulle fonti energetiche rinnovabili e sul risparmio energetico 43

2.4. Riferimento alle norme italiane per un piano energetico 45
2.4.1. L'efficienza energetica del costruito 46
2.4.2. Leggi e iniziative regionali e comunali 48
2.4.3. Riassunto delle principali norme nazionali sulle fonti energetiche rinnovabili e sul risparmio energetico 51

2.5. Il Codice dei Beni Culturali 53

2.6. Prospettive normative nell'efficienza energetica del patrimonio storico 55

2.1. Riferimento scientifico disciplinare della ricerca

A dicembre 2008 l'Unione Europea ha approvato il pacchetto clima-energia contenete gli obiettivi fissati per il 2020: ridurre del 20% le emissioni di gas a effetto serra rispetto al 1990, portare al 20% il risparmio energetico e aumentare al 20% il consumo di fonti rinnovabili.
In Europa l'edilizia è il settore che consuma la più alta percentuale di energia (circa il 40% del totale) e quello che contribuisce maggiormente a produrre emissioni di gas serra (con un 36% circa delle emissioni totali di CO2 nella UE) .
Si stima , inoltre, che il tasso annuo di aumento del numero di nuove costruzioni che si sommano al patrimonio edificato esistente si aggiri intorno al 1-1,5% degli edifici esistenti , ciò significa che l'80% del patrimonio edificato che esisterà nel 2030 è già costruito.
Tra questi gli edifici residenziali rappresentano il 60% del totale costruito e che il 30% è costituito da edifici storici. [1]

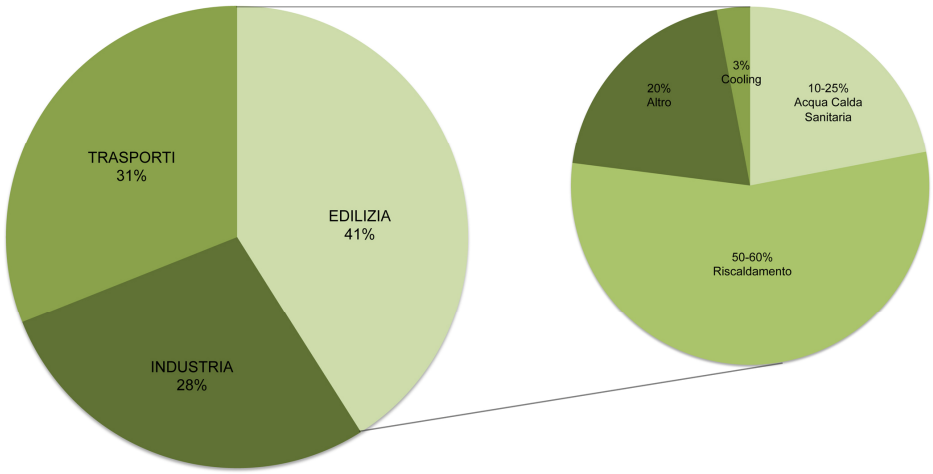


Figura 3. Fabbisogno energetico dell'Unione Europea per settori e usi finali, 2009

Appare quindi ineluttabile che l'Europa per influenzare la riduzione nell'uso di energia e di emissioni di CO2 dovrà intervenire sulle costruzioni che rivestono un ruolo significativo nel consumo energetico mondiale e sulle relative emissioni di gas nocivi.

[1] Fonte ENEA , 2009

A questo proposito va tenuto presente che in Europa spesso sono posti gravosi vincoli sugli edifici storici a fronte dei quali è difficile intervenire sull'involucro edilizio per contenere il consumo energetico.
In applicazione delle direttive emanate dalla comunità europea, le legislazioni nazionali ammettono la possibilità , in questi casi di lavorare in deroga .
Il recepimento, infatti, della direttiva secondo lo specifico orientamento nazionale, ha fatto si che siano esclusi dall'applicazione del decreto *"casi in cui il rispetto delle prescrizioni implicherebbe una alterazione inaccettabile del loro carattere o aspetto con particolare riferimento ai caratteri storici o artistici"* (D.Lgs. 311/2006).

Lo scenario intorno al quale si inserisce la presente ricerca discende da una precisa e nel contempo complessa problematica relativa alla definizione di soluzioni consapevoli e rispettose dell'esistente ai fini di un necessario controllo dell'efficienza energetica degli edifici di elevato valore storico, artistico e culturale.
Se da un lato infatti la problematica del controllo energetico risulta di primaria importanza non solo nel contesto del dibattito per lo sfruttamento consapevole dell'ambiente, ma anche ai fini di una reale sostenibilità economica e ambientale dei processi di gestione di tali manufatti, dall'altro la complessa stratificazione storica e architettonica di cui sono testimoni deve essere salvaguardata, rispettata e valorizzata al fini di non snaturare la natura della fabbrica. Riuso, conservazione e valorizzazione del patrimonio storico devono progressivamente essere integrati con l'esigenza di una sempre più efficiente gestione energetica, che deve essere sviluppata secondo approcci e metodi ovviamente compatibili con le stesse esigenze di conservazione e tutela.
Questa esigenza è chiaramente manifestata anche nel comma 5 dell'articolo 29 del Codice dei beni culturali e del paesaggio (Decreto Legislativo 22 gennaio 2004, n. 42): "*Il Ministero definisce, anche con il concorso delle regioni e con la collaborazione delle università e degli istituti di ricerca competenti, linee di indirizzo, norme tecniche, criteri e modelli di intervento in materia di conservazione dei beni culturali",* la presente ricerca si pone quindi l'obiettivo di analizzare le criticità che derivano dal rapporto tra efficienza energetica e patrimonio storico .

Partendo dallo studio delle norme che a livello europeo e nazionale governano il tema del risparmio delle risorse, e ponendo l'attenzione alla realtà Veneziana, tramite lo studio di tre diversi edifici soggetti a tutela, la ricerca indaga le criticità che permeano la materia dell'efficienza energetica quando coniugata in rapporto con l'antico. Si è cercato di trovare risposta a un quesito emergente: come superare un'impostazione normativa pensata per il nuovo che risulta essere fortemente impattante sul patrimonio edificato?

2.2. Riferimento al quadro normativo internazionale

Nel 1987 attraverso il lavoro della *Commissione mondiale sull'ambiente e lo sviluppo* (WCED) viene, nel rapporto Brundtland[2], definito per la prima volta il concetto di Sviluppo sostenibile: *"lo sviluppo che deve rispondere alle necessità del presente senza compromettere la capacità delle generazioni future di soddisfare le proprie"* [3].

Tale studio dà l'avvio a un dibattito che nella conferenza mondiale sull'ambiente e lo sviluppo , tenutasi a Rio De Janeiro nel 1992 chiamatasi *"Vertice della Terra"* (UNCED)[4], troverà il suo culmine.

La Conferenza di Rio ha grande importanza in quanto ha permesso alla Comunità internazionale di concordare strategie ambiziose, per raccogliere le sfide ambientali attraverso una cooperazione mondiale volta alla sostenibilità.

Alla Conferenza di Rio vengo affrontati vari temi:

- la crescita demografica
- l'approvvigionamento alimentare
- l'esaurimento delle fonti energetiche
- gli impatti dello sviluppo industriale
- la crescita urbana.

Cinque le Convenzioni Globali ufficiali definite e prive di obblighi giuridici:

- *"Dichiarazione di Rio sull'Ambiente e lo Sviluppo"* definisce in 27 punti diritti e responsabilità delle nazioni nei riguardi dello sviluppo sostenibile.
- *"Agenda 21"* di applicazione della Dichiarazione di Rio, pone lo sviluppo sostenibile come una prospettiva da perseguire per tutti i popoli del mondo.

[2] *"Our Common Future"* , 1987 , Commissione mondiale sull'Ambiente e lo Sviluppo. Noto come rapporto Brundtland. Il nome viene dato dalla coordinatrice Gro Harlem Brundtland che in quell'anno era presidente del WCED ed aveva commissionato il rapporto.

[3] Il rapporto Brundtland è preceduto pero da due importanti momenti :

- nel 1972 Conferenza di Stoccolma "*Sull'ambiente umano"* stabilisce l'importanza della protezione delle risorse naturali che devo essere preservate e opportunamente razionalizzate per il beneficio delle generazioni future e introduce il principio della conservazione della natura e la sua importanza all'interno dei processi legislativi e economici degli stati;
- -nel 1980 nella definizione della "Strategia Mondiale per la Conservazione" (WCS) viene indicata per la prima volta l'importanza dell'"utilizzo *"sostenibile" delle specie e degli ecosistemi".*

[4] *"Summit della Terra"* (UNCED), Rio de Janeiro (Brasile) 1992, meglio nota come *"Vertice della terra"* richiama il 20° anniversario della Prima Conferenza Internazionale "*Sull'ambiente umano"* di Stoccolma (1972).

- *"Dichiarazione dei principi sulle foreste"* sancisce il diritto degli Stati a utilizzare le foreste secondo le proprie necessità, senza ledere i principi di conservazione e di sviluppo delle stesse.
- *"Convenzione quadro sui cambiamenti climatici*"- cui seguirà la Convenzione sulla Desertificazione - pone obblighi di carattere generale miranti a contenere e stabilizzare la produzione di gas che contribuiscono all'effetto serra.
- *"Convenzione sulla diversità biologica"* con l'obiettivo di tutelare le specie nei loro habitat naturali e riabilitare quelle in via di estinzione.

Il raggiungimento degli obiettivi inerenti ai vari temi proposti ha incontrato molti ostacoli economici e politici, infatti cinque anni dopo Rio de Janeiro, nella diciannovesima sessione speciale dell'Assemblea Generale delle Nazioni Unite[5], tenutasi a New York, i governi hanno esaminato i progressi effettuati nell'attuazione degli impegni definiti al Vertice di Rio definendoli insufficienti, ma tale evento ha avuto comunque il merito di aver diffuso a livello mondiale concetti legati allo sviluppo fino a quel momento limitati a pochi addetti ai lavori.
Il lavoro della commissione ha posto comunque le basi per la preparazione dell'Agenda 21 , molto importante perché rappresenta il piano d'azione per il XXI secolo per lo sviluppo sostenibile, e per il protocollo di Kyoto sulla riduzione del consumo energetico.
Il piano proposto dall'Agenda 21 contiene indicazioni specifiche per tutti i settori coinvolti nel consumo di energie non rinnovabili. I principali obiettivi che l'Agenda 21 si prefigge sono tre:

- creare una terminologia e delle direttive di riferimento generale utili ad accomunare e guidare tutte le Agende per iniziative riguardo alla sostenibilità;
- coordinare più efficacemente le attività di studio, ricerca, e scambio informativo nel campo della sostenibilità edilizia;
- fornire una guida per nuove attività di ricerca e sviluppo.

Di grande importanza anche il trattato ambientale internazionale *"Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici"*[6] che è entrato in vigore il 21 Marzo del 1994 e il cui obiettivo dichiarato era *"raggiungere la stabilizzazione delle concentrazioni dei gas serra in atmosfera a un livello abbastanza basso per prevenire interferenze antropogeniche dannose per il sistema climatico*".
Il trattato, come stipulato originariamente, non poneva limiti obbligatori per le emissioni di gas serra alle nazioni individuali; era quindi legalmente non vincolante.

[5] **"***Rio+5"*, New York, 1997

[6] "United Nations Framework Convention on Climate Change" , da cui l'acronimo UNFCCC o FCCC

Invece, esso includeva previsioni di aggiornamenti (denominati "protocolli") che avrebbero posto i limiti obbligatori di emissioni, il principale di questi è il protocollo di Kyoto.
Contestualmente in Europa è stato introdotto un sistema di tassazione sulle emissioni nocive (Carbon Tal)[7] mentre negli Stati Uniti è stato adottato il sistema del valore del tetto massimo per le emissioni cumulate. Tale valore crea crediti di emissione nocive che vengono poi commercializzati in borsa.
Tali azioni hanno condotto alla sottoscrizione, da più di 160 paesi, del protocollo di Kyoto nel Dicembre del 1997[8].
Il trattato prevedeva l'obbligo in capo ai Paesi industrializzati di operare una riduzione delle emissioni di elementi inquinanti, in una misura non inferiore al 5% rispetto alle emissioni registrate nel 1990, nel periodo 2008-2012.
A questo fa seguito nel 1998 il recepimento da parte dell'Italia del protocollo di Kyoto attraverso le delibere del CIPE con le quali sono state approvate le *" Linee Guida per le politiche e misure nazionali per la riduzione delle emissioni dei gas serra"*
Nello stesso anno un documento presentato durante *il Word Building Congress* dal CIB[9], riconoscendo per la prima volta l'importanza delle interrelazioni tra ambiente, uomo e edilizia, ha illustrato gli obiettivi prioritari del campo di azione per quanto riguarda le costruzioni. Il documento si configurava come un programma di unione tra l'agenda generale (Habitat) e le necessarie agende nazionali/ regionali per la programmazione sostenibile del costruito, definendo i collegamenti tra concetto globale di sviluppo sostenibile e il settore delle costruzioni.
Nel documento venivano inoltre esemplificati alcuni punti fondamentali:

1. concetti generali sulle costruzioni sostenibili;
2. cambiamenti nel settore delle costruzioni;
3. strategie ed azioni.

[7] La Finlandia è stato il primo paese al mondo a inserirla nel 1990 seguita da Svezia, Norvegia e Danimarca. In Italia la carbon tax è stata introdotta con l'art. 8 della legge n. 448 del 23 dicembre 1998, secondo le conclusioni della Conferenza di Kyoto svoltasi dall'1 all'11 dicembre 1997. Il 16 aprile 2012, il Consiglio dei Ministri ha approvato il disegno di legge sulla delega fiscale, diviso in 3 diversi settori di cui uno dedicato al riordino della tassazione ambientale al fine di promuovere la crescita e l'internalizzazione dei costi ambientali nelle spese di produzione. Tra le intenzioni del Ministero dell'Ambiente vi è quella di destinare il gettito fiscale conseguente l'introduzione della Carbon Tax al sistema di finanziamento delle fonti rinnovabili.

[8] I trattato è entrato in vigore il 16 febbraio 2005, dopo la ratifica anche da parte della Russia. Perché il trattato potesse entrare in vigore, si richiedeva che fosse ratificato da non meno di 55 nazioni firmatarie e che le nazioni che lo avessero ratificato producessero almeno il 55% delle emissioni inquinanti; quest'ultima condizione è stata raggiunta solo nel novembre del 2004, quando anche la Russia ha perfezionato la sua adesione, considerata importante poiché questo paese produce da solo il 17,6% delle emissioni.

[9] "*The International Council for Research and Innovation in Building and Construction*" -www.cibworld.nl - è la più importante organizzazione internazionale di studio e ricerca nel settore edilizio e delle costruzioni

"L'Agenda 21 per le costruzioni" [10] è stata poi pubblicata nel luglio del 1999 e la sua struttura concettuale mirava alla definizione dei legami tra il generale concetto di "sviluppo sostenibile" e la realtà del settore delle costruzioni.
L' agenda si prefiggeva tre obiettivi principali:

- creare una terminologia e delle direttive di riferimento generali utili ad accomunare e guidare tutte le Agende per iniziative riguardo alla sostenibilità;
- coordinare più efficacemente le attività di studio, ricerca e scambio informativo nel campo della sostenibilità edilizia;
- fornire una guida per nuove attività di ricerca e di sviluppo.

Già in questo documento troviamo un primo approccio all'importanza della riqualificazioni di edifici esistenti. Veniva infatti per la prima volta indicato il problema del crescente divario tra le prestazioni energetiche degli edifici vecchi e nuovi e la conseguente importanza delle seguente misure:

- aumentare le prestazioni degli edifici esistenti;
- sviluppare strumenti diagnostici non distruttivi per la valutazione degli edifici;
- sviluppare modelli per la previsione del comportamento degli edifici lungo l'intero ciclo di vita;
- sviluppare nuovi sistemi e tecnologie per il rinnovamento e il recupero.

[10] "Agenda 21 on Sustainable Construction", CIB Report Pubblication 237, 1999.

2.3. Riferimento al quadro normativo europeo

Alla luce delle analisi effettuate, sul consumo energetico e sulla responsabilità del settore delle costruzioni nelle emissioni climalteranti[11], l'Unione Europea, al fine di raggiungere gli obiettivi promossi dal protocollo di Kyoto e quelli del conseguente *"pacchetto clima - energia"*[12] ha più volte sottolineato che occorre intervenire nel settore edilizio, sia incrementando le prestazioni dei nuovi edifici, sia risanando quelli esistenti, dato che la riduzione dei consumi e il ricorso a fonti rinnovabili per la produzione di energia sono lo strumento principale per raggiungere la sostenibilità ambientale.
All'interno di questo scenario di riferimento il Consiglio europeo ha rilevato la necessità di aumentare l'efficienza energetica nell'Unione affinché venga data rapida e piena attuazione alle priorità definite dalla comunità internazionale.
Con l'obiettivo di rendere vincolante il raggiungimento dei target previsti, sono state promosse diverse risoluzioni che investono il settore delle costruzioni ritenuto di un'importanza cruciale
Si tratta di misure di ampio respiro, che necessariamente richiedono l'implementazione delle direttive Europee, attraverso norme nazionali e/o regionali che tengano conto:

- delle condizioni climatiche e geografiche specifiche;
- dell'ambiente termico interno;
- delle caratteristiche proprie delle costruzioni;
- dell'efficacia sotto il profilo dei costi.

2.3.1. Politiche energetiche comunitarie

L'Unione Europea ha sempre dimostrato grande attenzione alle problematiche ambientali e svolge da anni una funzione di definizione delle linee guida e delle relative strategie in termini di efficienza energetica. Già negli anni 70 le preoccupazioni per l'ambiente avevano risonanza nella Comunità europea e suscitarono le prime iniziative in campo ambientale.
Nel 1972 nel vertice di Parigi fu decisa l'adozione del primo programma d'azione

[11] Eurostat pocket book , "Energy Transport and Enviromental indicator" 2009 . In Europa il settore delle costruzioni è responsabile del consumo di più del 40% del totale di energia prodotta e della produzione del 50% delle emissioni atmosferiche inquinanti.

[12] Il 12 Dicembre 2008 viene approvato il pacchetto clima energia che rappresenta il contributo dell'Unione Europea alla lotta contro il cambiamento climatico e alle nuove politiche energetiche. La Commissione Europea si dota di nuovi strumenti per conseguire gli obbiettivi fissati per il 2020 : ridurre del 20% le emissioni di gas effetto serra, portare al 20% il risparmio energetico e aumentare al 20% il consumo di fonti rinnovabili.

per l'ambiente[13] , che si sviluppò poi dal 1973 al 1976. Infatti nella dichiarazione rilasciata dei capi di Stato e di governo riuniti si legge: "*che l'espansione economica, che non è un fine a sé stante, deve con precedenza consentire di attenuare la disparità delle condizioni di vita. Essa deve essere perseguita con la partecipazione di tutte le parti sociali e deve tradursi in un miglioramento della qualità come del tenore di vita. Conformemente al genio europeo, si dedicherà un'attenzione particolare ai valori e beni non materiali e alla protezione dell'ambiente naturale, onde porre il progresso al servizio dell'uomo»*.
Nel 1987 , proclamato *"Anno europeo dell'ambiente"* , la riforma determinante per l'ambiente che fu costituita dall'entrata in vigore dell' *Atto unico europeo*, che inserisce un nuovo Titolo VII dedicato all' *"Ambiente* " costituito da tre articoli: 130R,130S,130T. Di particolare rilevanza l'art. 130 R che assegnava al diritto comunitario il compito *"di preservare, proteggere e migliorare la qualità dell'ambiente",* contribuendo alla protezione della salute delle persone e assicurando un impiego prudente e razionale delle risorse naturali e prevedeva che la *politica ambientale* dovesse essere integrata con le altre politiche comunitarie, come quella industriale, agricola ed energetica. Con l'attuazione dell'Atto Unico Europeo si stabilirono tre principi che ancora oggi sanciscono le politiche comunitarie europee in campo ambientale: il principio dell'azione preventiva, della riparazione dei danni alla fonte e dell'inquinatore-pagatore. Da allora i programmi di azione sono rimasti lo strumento privilegiato per definire le politiche ambientali dell'Europa a medio termine, a cui si ispirano le scelte legislative e i programmi di ricerca scientifica dell'Unione e dei suoi membri.

Nel Marzo 2000 l'Unione Europea ha stabilito un programma di riforme economiche definite come "Strategia di Lisbona" [14]. L'obiettivo espressamente dichiarato è quello di fare dell'Unione: "*l'economia della conoscenza più competitiva e più dinamica del mondo entro il 2010, capace di una crescita economica sostenibile, accompagnata da un miglioramento quantitativo e qualitativo dell'occupazione e da una maggiore coesione sociale*".
Nel programma viene individuata una politica attiva in materia di efficienza energetica per contribuire in modo significativo a migliorare la competitività e l'occupazione nell'Unione Europea , obiettivi centrali dell'Agenda di Lisbona.
Nel 2005 il *Libro Verde dell'efficienza energetica – fare più con meno*[15]*,* ha definito in maniera dettagliata l'ambito di interesse della politica energetica dell'Unione Europea. Attraverso questo documento vengono definiti i principali strumenti di pro

[13] Piano d'Azione Ambientale", PAA, Parigi , 1972

[14] Consiglio europeo ,Lisbona 23/24 Marzo 2000.

[15]"Green Paper on Energy Efficiency or Doing More With Less", Brussels, 22 Giugno 2005, COM(2005) 265

mozione dell'efficienza energetica a tutti i livelli della società europea con particolare riferimento alla necessità di incentivare il mercato e lo sviluppo dei servizi energetici attraverso maggiori informazioni e idonei meccanismi di finanziamento. Le prospettive strategiche delineate nel Libro Verde sono coerenti con le indicazioni che la Commissione Europea ha promosso nel rilancio della strategia di Lisbona, nella quale gli aspetti legati all'intensificazione della promozione di tecnologie rispettose dell'ambiente, sono interpretati come strumenti che possono consentire all'UE di realizzare i cambiamenti strutturali indispensabili per una sostenibilità a lungo termine, di soddisfare la domanda di mercati mondiali in crescente espansione e di offrire sinergie economiche, ambientali ed occupazionali

Il Libro Verde ha inoltre consentito di raccogliere gli spunti, le opinioni e le analisi necessarie per varare nel 2006 il "*Piano d'azione per l'efficienza energetica: Concretizzare le potenzialità"* [16] contenente proposte solide, pratiche e realmente applicabili per un reale progresso nel campo dell'efficienza energetica. Viene individuato il settore delle costruzioni come l'ambito dove intervenire per avere consistenti risparmi di energia, in particolar modo si fa riferimento agli edifici residenziali e commerciali, (terziario) con un potenziale di riduzione stimato rispettivamente del 27% e al 30%.

Nel marzo del 2006 la Commissione Europea ha pubblicato il "*Libro Verde - Una strategia europea per un'energia sostenibile, competitiva e sicura"*[17]*,* che rappresenta il testo analitico propedeutico con cui la Commissione ha invitato il Consiglio Europeo di primavera ed il Parlamento europeo ad avviare un dibattito pubblico di grande respiro, a cui far seguire le proposte di azione che rappresentano l'impianto principale della nuova politica energetica varata per il periodo 2007-2012. Le indicazioni del Libro Verde del 2006 hanno trovato seguito, infatti, nel "*Piano d'Azione del Consiglio Europeo 2007-2009"* varato il 10 Gennaio 2007 dalla commissione Politica energetica per l'Europa che nella sostanza ricalca le linee strategiche già delineate introducendo però la novità del "Principio del 20 - 20 - 20"; con cui l'Unione si impegna, entro il 2020, a ridurre le proprie emissioni di gas serra del 20%, aumentare l'efficienza energetica del 20% e contare su un mix energetico proveniente per il 20% da fonti rinnovabili.

La Commissione ha elaborato numerose proposte di attuazione di questi obiettivi, la maggior parte delle quali sono contenute nel *"Pacchetto Energetico-Climatico"* del 23 gennaio 2008. Il triplice obiettivo summenzionato non è stato rimesso in discussione, ma si è assistito al tentativo di ridurre la portata delle proposte della Commissione per venire incontro alle richieste del settore industriale, preoccupato dei costi delle misure previste anche alla luce della crisi economica in corso.

[16], *"Piano d'azione per l'efficienza energetica: concretizzare le potenzialità*", Comunicazione della Commissione, del 19 ottobre 2006, COM(2006)545

[17] *"Una strategia europea per un'energia sostenibile, competitiva e sicura"* , Libro verde della Commissione, dell'8 marzo 2006, [COM(2006) 105 def. - Non pubblicato sulla Gazzetta ufficiale].

Nello stesso anno la Commissione ha inoltre reso pubblica una *Second Strategic Energy Review*, che pone l'accento soprattutto sulle questioni di sicurezza energetica, integrando così le proposte relative al '20-20-20 entro il 2020: *"L'energia costituisce un elemento fondamentale per il funzionamento dell'Europa. Purtroppo i giorni dell'energia a buon mercato sembrano essere finiti. Tutti i membri dell'Unione europea devono adesso affrontare le sfide poste dai cambiamenti climatici, dalla crescente dipendenza dalle importazioni e dai prezzi più elevati dell'energia. Inoltre l'interdipendenza degli stati comunitari, in materia di energia come in numerosi altri settori, non fa che aumentare: un'interruzione dell'approvvigionamento di energia in un paese ha immediate conseguenze in altri paesi."* [18]

Per garantire la sicurezza degli approvvigionamenti, l'UE si è mossa su due diversi piani, uno interno (politiche di domanda e offerta) e uno esterno (relazioni con i paesi produttori)

Sul piano interno, le istituzioni europee perseguono due obiettivi:

- il contenimento della domanda di energia degli stati membri concentrandosi soprattutto sull'efficienza e il risparmio energetico;
- la promozione dell'autosufficienza energetica, soprattutto un'enfasi speciale è posta sulle energie rinnovabili, che sono un'alternativa fondamentale ai combustibili fossili che l'UE importa in grandi quantità. Lo sviluppo delle energie rinnovabili viene infatti considerato fondamentale perché contribuirebbe sia a ridurre le emissioni di gas serra sia a mitigare la dipendenza dall'estero dell'Unione. Dal 1997 a oggi, il contributo delle energie rinnovabili al consumo di energia dell'UE è più che raddoppiato, specialmente grazie a fonti quali il vento, le biomasse e l'energia solare. Malgrado ciò, le energie rinnovabili costituiscono attualmente solo circa il 7% del consumo interno di energia dell'Ue. La Commissione europea ha proposto che ogni stato membro aumenti la produzione di energia da fonti rinnovabili di una percentuale fissa del 5,5% a cui poi si aggiunge una quota nazionale calcolata in base al Pil. L'Italia, per esempio, nel 2020 dovrebbe produrre il 17% della propria energia da fonti rinnovabili.

Il fatto che la Commissione europea, all'interno del documento *Europa 2020* contenente le strategie per rimediare agli effetti della crisi finanziaria che ha colpito l'economia europea nel 2008, abbia individuato l'efficienza e la competitività energetica come uno dei tre motori di crescita per il prossimo decennio, rafforza la posizione comunitaria sull'impellente necessità di mettere in moto azioni concrete a livello europeo e nazionale per una crescita intelligente, sostenibile e inclusiva.

Nonostante ciò, nel Gennaio 2008 il Parlamento Europeo, attraverso una risolu

[18] Una politica energetica per l'Europa, Comunicazione della Commissione al Consiglio Europeo e al Parlamento Europeo - {SEC(2007) 12} /* COM/2007/0001 def. */

zione in merito *al Piano d'Azione 2007-2009*[19], sottolineava come né a livello decisionale e politico della Commissione, né a livello nazionale, ci fossero stati degli effettivi passi in avanti nel raggiungimento degli obiettivi di mitigazione e non fosse stata data priorità alla trasposizione rapida ed integrale della legislazione in materia di efficienza energetica, ed indicava la necessità che si attuassero delle strategie realmente fattive perché l'Europa potesse raccogliere la sfida di un'energia sicura, sostenibile e competitiva e fare dell'economia europea un modello di sviluppo sostenibile nel XXI secolo.
Il *Piano efficienza energetica 2011* della Commissione europea, sostenuto dalla considerazione che con il trend delle misure finora adottate si potrà conseguire un risparmio energetico di risorse di circa il 10% contro il 20% proposto, ha previsto l'adozione di misure rigide contro governi e aziende che omettono di lavorare in favore di una politica energetica condivisa, aumentando il ruolo di controllo e coordinamento riservato all'Unione; ad ogni singolo Paese e ai vari livelli territoriali viene infatti lasciato il compito di confrontarsi con l'obiettivo del 20-20-20, di esaminarne le criticità, valutarne i costi e le possibili risorse al fine di definire i singoli programmi nazionali di efficienza energetica. Gli obiettivi in essi contenuti saranno esaminati dalla Commissione per valutare la probabilità di conseguire l'obiettivo generale dell'UE e la misura in cui i singoli sforzi rispondono all'obiettivo comune. Dopo il 2013, se il riesame indicherà scarse probabilità di realizzazione dell'obiettivo generale dell'UE, la Commissione avvierà una seconda fase di revisione, proponendo obiettivi nazionali giuridicamente vincolanti per il 2020.

2.3.2. Riferimenti alle direttive europee

L'Unione Europea ha emanato, nell'ambito della propria politica energetica e ambientale, una serie di direttive finalizzate a promuovere le fonti energetiche rinnovabili e l'efficienza negli usi finali, tra queste possiamo ricordare:

- Direttiva 96/61 CE
- Direttiva 2001/77 CE (recepita con decreto legislativo 29/12/2003 n.3087)
- Direttiva 2004/8/CE 11
- Direttiva 2005/32/CE
- Direttiva 2006/32/CE

Alle direttive che si propongono la difesa dell'ambiente fa seguito la direttiva 2002/91 CE e la sua riedizione nel 2010, che focalizzano l'attenzione al rendimento energetico nell'edilizia

[19] Risoluzione del Parlamento europeo del 31 gennaio 2008 su un Piano d'azione per l'efficienza energetica: concretizzare le potenzialità (2007/2106(INI))

2.3.3. La direttiva 2002/91/CE

La direttiva in oggetto è preceduta dalla Direttiva 85/377/EEC "Environmental *Impact Assessment",* che regola la valutazione dell'impatto su tutte le componenti di progetti pubblici e privati che potrebbero avere conseguenze ambientali importanti, e dalla Direttiva 93/76/EEC "Limit *carbon dioxide emissions"* [20]*,* che contiene in forma embrionale alcuni concetti quali la certificazione energetica, l'isolamento termico, il controllo delle caldaie e la programmazione locale.
La Direttiva 2002/91/CE[21] del Parlamento Europeo sulle prestazioni energetiche degli edifici (Energy Performance of buildings Directive, EPBD), pubblicata sulla Gazzetta Ufficiale il 4 Gennaio 2003, si propone di ridurre l'uso di energia impiegata nel settore edilizio, richiedendo la definizione di metodologie di stima dei consumi energetici degli edifici differenziate Stato per Stato, ma comunque armonizzate all'interno di un quadro comune di linee guida.
La Direttiva 2002/91/CE da indicazioni sul quadro generale di una metodologia per il calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici, l'applicazione di requisiti minimi in materia di prestazione energetica di edifici di nuova costruzione ed esistenti, la certificazione energetica degli edifici, l'ispezione periodica delle caldaie e dei sistemi di condizionamento dell'aria, nonché una perizia del complesso degli impianti termici le cui caldaie abbiano più di quindici anni.
La Direttiva europea, ponte l'attenzione al settore edilizio con riferimento agli edifici esistenti; in particolare agli edifici esistenti di grande metratura[22].
L'articolo 6 infatti precisa: *"Gli Stati membri provvedono affinché, allorché edifici di metratura totale superiore a 1000 m^2 subiscono ristrutturazioni importanti, il loro rendimento energetico sia migliorato al fine di soddisfare i requisiti minimi per quanto tecnicamente, funzionalmente ed economicamente fattibile. Gli Stati membri ricavano i requisiti minimi di rendimento energetico sulla base dei requisiti di rendimento energetico fissati per gli edifici a norma dell'articolo 4. I requisiti possono essere fissati per gli edifici ristrutturati nel loro insieme o per i sistemi o i componenti ristrutturati, allorché questi rientrano in una ristrutturazione da attuare in tempi ristretti, con l'obiettivo succitato di migliorare il rendimento energetico globale dell'edificio"* .

---

[20] *Council Directive 93/76/EEC* of 13 September 1993 to limit carbon dioxide emissions by improving energy efficiency (SAVE)

[21] "Directive 2002/91/EC of the European parliament and th council of 16 December 2002 on the energy performance of buildings", European Council, Official Journal of the Communities, 2002

[22]Per ristrutturazioni importati si intende un intervento per cui " il costo totale della ristrutturazione connesso con le murature esterne e/o gli impianti energetici (…) è superiore al 25% del valore dell'edificio (…) o quando una quota superiore al 25% delle murature esterne dell'edificio viene ristrutturata " (punto 13 della premessa alla EPBD)

In deroga a quanto precedentemente affermato la direttiva per gli stati membri prevede la possibilità di non applicare i requisiti per alcune categorie di fabbricati tra cui i monumenti protetti: *" Gli Stati membri possono decidere di non istituire o di non applicare i requisiti di cui al paragrafo 1 per le seguenti categorie di fabbricati: — edifici e monumenti ufficialmente protetti come patrimonio designato o in virtù del loro speciale valore architettonico o storico, nei casi in cui il rispetto delle prescrizioni implicherebbe un'alterazione inaccettabile del loro carattere o aspetto*,"(art. 4 comma3).

2.3.4. La Direttiva 2010/31/CE

La direttiva del 2002/91/CE viene abrogata dalla direttiva del Maggio 2010 2010/31/CE (la data ufficiale di abrogazione è fissata al 1°febbraio 2012).
La nuova direttiva entra in vigore il 9 Luglio del 2010 confermando alcune indicazioni della precedente direttiva EPBD , di cui mantiene e rafforza gli obiettivi e i principi fondamentali e lascia inalterato il ruolo degli Stati membri, che sono chiamati a stabilire requisiti concreti.
La revisione chiarisce, consolida e amplia il campo di applicazione della precedente direttiva, prevedendo non solo il rafforzamento del ruolo delle certificazioni,
ma richiedendo anche che tutti gli edifici sottoposti a ristrutturazioni importanti, abrogando in questo modo quanto precedentemente affermato nell'articolo 6 sopracitato, rispondano ,per quanto tecnicamente, funzionalmente ed economicamente possibile, ai requisiti previsti[23].
Le nuove disposizioni prevedono ulteriori miglioramenti negli obiettivi generali di performance energetica, pertanto le costruzioni realizzate dopo il 31 dicembre 2020 dovranno garantire l'autosufficienza energetica e l' approvvigionamento da fonti rinnovabili.
Sono previste indicazioni anche per gli edifici pubblici a cui si richiede di raggiungere il target di "edifici a zero energia" (Nearly Energy Zero Building**)** entro il 31 dicembre 2018.
Vengono anche in questa nuova sede confermate le precedenti distinzioni tra edifici nuovi ed esistenti, riaffermando che possono considerarsi esclusi dall'adeguamento gli edifici religiosi ed i palazzi storici tutelati, nel caso in cui gli

[23] Viene quindi abrogato parte del precedente articolo 6 secondo il quale *"gli Stati membri provvedono affinché, allorché edifici di metratura totale superiore a 1000 m2 subiscono ristrutturazioni importanti (quando il costo totale della ristrutturazione connesso con le murature esterne e/o gli impianti energetici quali il riscaldamento, la produzione di acqua calda, il condizionamento d'aria, la ventilazione e l'illuminazione è superiore al 25 % del valore dell'edificio, escluso il valore del terreno sul quale questo è situato, o quando una quota superiore al 25 % delle murature esterne dell'edificio viene ristrutturato), il loro rendimento energetico sia migliorato al fine di soddisfare i requisiti minimi per quanto tecnicamente, funzionalmente ed economicamente fattibile...I requisiti possono essere fissati per gli edifici ristrutturati nel loro insieme o per i sistemi o i componenti ristrutturati, allorché questi rientrano in una ristrutturazione da attuare in tempi ristretti, con l'obiettivo succitato di migliorare il rendimento energetico globale dell'edificio"*

interventi possano arrecare danno al loro carattere o aspetto.
La direttiva risulta complessivamente limitata nelle indicazioni relative alla salvaguardia dell'edilizia esistente dato che vengono esclusi:

- fondi e finanziamenti per adeguare energeticamente gli edifici storici sia soggetti che non soggetti a tutela monumentale,
- la creazione di commissioni per l'analisi dell'impatto visivo causato dall'introduzione di impianti innovativi per la produzione di energia e per la valutazione delle possibilità di isolamento dei fabbricati storici.

L'obbligo di recepimento della nuova direttiva EPBD è stato fissato entro e non oltre il 9 luglio 2012.

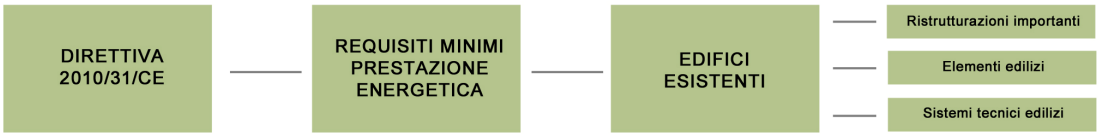


Figura 4. Schema delle novità introdotte dalla direttiva 2010/31/CE per gli edifici esistenti.

2.3.5. L'EPBD e il recepimento nei paesi membri

Ponendo l'attenzione sull'importanza di predisporre riferimenti certi e comparabili la commissione europea ha ritenuto indispensabile la predisposizione di un pacchetto di norme tecniche a supporto della EPBD che facesse da base per le procedure nazionali, e con mandato M/343/2004 ha incaricato il CEN (Euopean Committee for standardization) di predisporre delle procedure di calcolo che potessero fungere da riferimento sovralocale [24] mettendo in pratica ciò che l' EPBD aveva richiesto agli Stati membri e dando indicazioni affinché si individui una metodologia per il calcolo della performance energetica degli edifici all'interno di un quadro di riferimento condiviso. Le procedure di calcolo dell'energia per gli edifici, i suoi sistemi tecnologici e tutte le indicazioni prescrittive prestazionali, sono sfociate in una serie di norme a supporto della direttiva EPBD non facilmente raccordabili tra loro per impostazione, terminologia e per la mancanza di documenti normativi.

[24] Nel Dicembre del 2010 la Commissione Europea ha incaricato il CEN di creare norme tecniche contenenti una metodologia di per il calcolo integrato della prestazione energetica degli edifici e la stima dell'impatto ambientale , in conformità della direttiva . 31 Standard EN sono stati pubblicati per indirizzare gli stati membri nella creazione della propria regolamentazione dei requisisti di efficienza energetica in particolare riguardanti : le metodologie di calcolo della prestazione energetica e la definizione dei requisiti minimi di 'prestazione energetica per gli edifici e relativa cerificazione.

Nasce quindi da questa premessa la necessità da parte della commissione europea di attivare specifiche Azioni Concertate (Concerted Action, C.A.) al fine di favorire un recepimento il più possibile omogeneo della direttiva 2002/91/CE.
Al momento i paesi membri dell' Unione Europea hanno aderito alle richieste della direttiva EPBD operando interventi legislativi all'interno dei singoli stati.
In generale la promozione nell'uso delle fonti energetiche rinnovabili (RES) richieste dalla revisione della Direttiva nel 2010 ha comportato l'esigenza da parte dei paesi membri di incrementare la quota di RES rispetto all'energia totale consumata dagli edifici.
I 27 stati dell'unione hanno nella maggioranza dei casi recepito la direttiva rendendola omogenea per l'intero territorio nazionale. L'Italia ha invece deciso di normare gli interventi con provvedimenti stato/regione emanando pertanto leggi con efficacia nazionale ma delegando nell'attuazione ad organi regionali.
Nel 2011 con il decreto legislativo 28/11[25] è stato stabilito il raggiungimento degli obiettivi promossi dalla normativa mediante il ricorso alle energie rinnovabili per coprire una quota considerevole e crescente nel tempo del fabbisogno energetico degli edifici. Fino ad ora si era sempre ragionato più in termini di risparmi economici che risparmi energetici, nel senso che i secondi erano presi in considerazione solamente se si ottenevano i primi. Il D.Lgs. 28/11, invece, ha imposto rispetto di percentuali ben precise di fonti energetiche rinnovabili. Dal 2016 sarà obbligatorio produrre il 35% di tutta l'energia da fonti energetiche rinnovabili, sommando tra di loro i consumi dell'impianto di climatizzazione (riscaldamento invernale e condizionamento estivo) e la produzione di acqua calda sanitaria, dal 2017 questa quota dovrà salire al 50%.
Il D.Lgs. 28/11 ha rappresentato per l'Italia un importante cambiamento delle logiche di progettazione degli impianti e in particolare ha cambiato il modo di percepire i risparmi energetici ottenibili.
L'articolo 2 del decreto definisce infatti come energia da fonti rinnovabili quella proveniente da *"fonti rinnovabili non fossili, vale a dire energia eolica, solare, aerotermica, geotermica, idrotermica e oceanica, idraulica, biomassa, gas di discarica, gas residuati dai processi di depurazione e biogas"*.
All'interno di questo scenario le pompe di calore, che sfruttano l'energia aerotermica, geotermica e idrotermica sono particolarmente premiate in termini di percentuale dell'energia rinnovabile sfruttata.
L'ammontare dell'energia annuale rinnovabile prodotta da una pompa di calore elettrica viene calcolata come descritto nell'allegato VII della direttiva EPDB:

$$E_{RES} = Q_{usable} * (1 - 1/SPF) \qquad (1)$$

[25] DLgs 28/11, 3 marzo 2011, n. 28. Decreto di attuazione della direttiva 2009/28/CE sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili, recante modifica e successiva abrogazione delle direttive 2001/77/CE e 2003/30/CE.

Dove:

- Q_{usable} è il calore totale stimato prodotto da pompe di calore per il riscaldamento e la produzione di acqua calda sanitaria.
- SPF è il fattore di rendimento stagionale medio stimato per tali pompe di calore durante il periodo di funzionamento.

Tuttavia solo le pompe di calore che raggiungono il 115% dell'efficienze basata sul consumo di energia primaria potranno rientrare nel conteggio della quota E_{RES}.
Ciò significa che SPF deve essere:

$$SPF > 1.15 * 1/\eta \qquad (2)$$

dove η è il rapporto tra la produzione totale lorda di elettricità e il consumo di energia primaria per la produzione di energia e sarà calcolato come media a livello UE sulla base dei dati EUROSTAT; attualmente questo valore è pari a 0,40 e conseguentemente il valore SPF limite è pari a 2,875.

Nonostante le numerose forme di controllo attuate sui consumi in campo edilizio o modalità dedicate per la certificazione energetica e l' affinamento delle procedure e delle norme di riferimento ed un incremento nei parametri performanti, la situazione è ancora lontana dal raggiungimento di un pieno livello di attuazione.
Tutti i paesi membri dell'unione hanno però condiviso come determinante per l'impulso di miglioramento la necessità di una forte accelerazione del processo di efficientamento energetico anche del patrimonio edilizio esistente, compreso quello di carattere storico, indipendentemente dal regime di tutela cui è sottoposto.
I numerosi interventi legislativi e gli sforzi attuati nel campo dell'edilizia esistente non hanno prodotto soluzioni in grado di soddisfare le esigenze dell'edificato e l'adeguamento energetico. Non avendo individuato percorsi di trasformazione che possano minimizzare le perdite di potenzialità testimoniali si sono create due situazioni differenti:

- le indiscriminate forme di adeguamento prestazionale negli edifici esistenti;
- la totale immobilità nel caso degli edifici storici soggetti a tutela.

Le norme Europee nazionali risultano ancora inadeguate rispetto alle applicazioni sul costruito storico, anche se il comma 4 dell'articolo 151 della Trattato che istituisce la Comunità Europea[26] impone l'inserimento degli aspetti culturali in tutte le

[26] Trattato che istituisce la comunità europea,Titolo XII-Cultura , Articolo 151 , Comma 4. *"La Comunità tiene conto degli aspetti culturali nell'azione che svolge a norma di altre disposizioni del presente trattato, in particolare ai fini di rispettare e promuovere la diversità delle sue culture."*

politiche comunitarie e chiama l'Unione Europea a definire misure non restrittive su tale materia , in diverse occasioni le linee di sviluppo indicate dalla Commissione Europea sono state in qualche modo conflittuali con la possibilità di salvaguardia dei beni negli stati. Lo dimostra il richiamo del Parlamento europeo alla Commissione Europea nel 2006 perché si prestasse maggiore attenzione all'edificato storico, in virtù della sua importanza dal punto di vista identitario, richiedendo che venissero considerate in modo più approfondito le conseguenze della legislazione europea sulla cultura e sul patrimonio , e che si bloccassero finanziamenti comunitari a quei progetti che avevano ricadute dannose sui beni culturali[27].

[27] Nypan TM *" Effects of European legislation on the built cultural Heritage"* consultabile al sito http://www.riksantikvaren.no/filestore/EffectsofEULeg_v01DS.pdf

2.3.6. Riassunto delle principali norme europee sulle fonti energetiche rinnovabili e sul risparmio energetico

Direttiva 96/61/CE (modificata da 2003/87/CE)	Protezione ambiente, efficienza energetica
Libro bianco 1999 Delibera CIPE n.126 del 06/08/1999	
Direttiva 2001/77/CE 27 settembre 2001	Promozione dell'energia elettrica prodotta da fonti energetiche rinnovabili nel mercato interno dell'elettricità
Direttiva 2002/91/CE 16 dicembre 2002	Rendimento energetico nell'edilizia
Direttiva 2003/87/CE [D.Lgs. 04/04/2006 n.216]	Scambio quote CO_2
Direttiva 2004/8/CE 11 febbraio 2004	Promozione della cogenerazione basata su una domanda di calore utile nel mercato interno dell'energia e che modifica la direttiva 92/42/CEE
Direttiva 2004/101/CE (Modifica 2003/87/CE) [D.Lgs. 04/04/2006 n. 216] [Direttiva 2007/74/CE]	Scambio quote CO_2
Direttiva 2005/32/CE 6 luglio 2005	Relativa all'istituzione di un quadro per l'elaborazione di specifiche per la progettazione ecocompatibile dei prodotti che consumano energia e recante modifica della direttiva 92/42/CEE del Consiglio e delle direttive 96/57/CE e 2000/55/CE del Parlamento europeo e del Consiglio

COM(2005) 265	Libro verde sull'efficienza energetica
Direttiva 2006/32/CE 5 aprile 2006	L'efficienza degli usi finali dell'energia e i servizi energetici e recante abrogazione della direttiva 93/76/CEE del Consiglio
COM(2006) 545	Efficienza energetica
COM(2006) 848 del 10/01/2007	Tabella di marcia per le energie rinnovabili nel 21° secolo (definizione obiettivi 20-20-20)
COM(2007) 1 del 10/01/2007	Una politica energetica per l'Europa
***Direttiva 2008/50/CE* del 21/05/200**	Relativa alla qualità dell'aria ambiente e per un'aria più pulita in Europa
Direttiva 2010/31/CE 19 maggio 2010	Relativa alla prestazione energetica nell'edilizia

2.4. Riferimento alle norme italiane per un piano energetico

Parallelamente al quadro di riferimento normativo internazionale si colloca la normativa nazionale e regionale

Possiamo individuare come principale documento di politica energetica nazionale il *Primo Piano Energetico Nazionale (PEN)* risalente al 1975 , in esso vengono definiti gli obiettivi e le priorità delle politica energetica italiana. "..*e tanto in questo quanto nelle edizioni e negli aggiornamenti successivi, le previsioni (in termini di consumo e pertanto di fabbisogno) erano molto superiori alla realtà…. Bisognerà aspettare il PEN del 1981 perché i dati siano più aderenti alla realtà e con questo documento si inaugura per l'Italia un filone di piani energetici sempre più completi perché documenti di programmazione in linea con la politica energetica nazionale. A partire da quel momento ci si renderà sempre più conto che una politica energetica perché sia efficace non potrà prescindere da quello che sarà chiamato 'decentramento energetico'. Il che vuol dire che il piano energetico nazionale deve essere il risultato delle esigenze di realtà locali diverse".* [28]

Il successivo PEN risale al 1988, ed è a seguito di questo che, con alcuni interventi legislativi tra cui la legge 10/91, vengono amplificate le competenze in campo energetico per le regioni.

Come analizzato nel capitolo precedente, al fine di individuare una politica energetica e di creare un mercato interno dell'energia, la Commissione Europea ha promosso l'utilizzo delle energie rinnovabili e la realizzazione di un sistema di reti energetiche integrate. L'Italia recepisce la Direttiva Europea con un decreto legislativo del 16 Marzo 99 n. 79 e un decreto legislativo 23 Maggio 2000 n.164.

La politica europea, ha inoltre posto l'attenzione alla sicurezza degli approvvigionamenti e si è posta come obiettivo il raggiungimento di uno sviluppo sostenibile attraverso la riduzione dei gas serra tra il 2008 e il 2012.

Contestualmente in Italia una serie di interventi normativi hanno cambiato il coinvolgimento e il ruolo delle regione e degli enti locali in campo energetico tra cui la ripartizione delle competenze finalizzate al riordino del settore dell'energia.

Nell'Ottobre del 2012 l'Italia ha elaborato un nuova *Strategia Energetico Nazionale*[29] (SEN).

Le azioni proposte nella strategia energetica ,che guarda al 2020 come principale orizzonte di riferimento, puntano al raggiungimento degli obiettivi europei 20-20-20. Oltre al raggiungimento e superamento di target europei in materia ambientale, la *Strategia* mira a ridurre i costi energetici e a rendere più sicuro l'approvvigionamento e lo sviluppo industriale del settore.

[28] Kuhtz S., "Energia e sviluppo sostenibile. Politiche e tecnologie", Rubettino editore, 2005,p-55

[29] "*Strategia energetica nazionale : per un energia più competitiva e sostenibile*",16 Ottobre 2012

Sette le priorità indicate dal documento come indispensabili per supportare il processo:

1. efficienza energetica;
2. sviluppo di un mercato competitivo del gas;
3. sviluppo sostenibile delle energie rinnovabili;
4. sviluppo delle infrastrutture e del mercato elettrico;
5. ristrutturazione del settore della raffinazione e della rete di distribuzione dei carburanti;
6. sviluppo sostenibile della produzione nazionale di idrocarburi;
7. modernizzazione della governance del settore.

2.4.1. L'efficienza energetica del costruito

Utile ai fini di un analisi generale è la valutazione dell'evoluzione della legislazione italiana in materia di efficienza energetica del costruito, che trova il suo primo documento programmatico nella legge del 30 Aprile 1976 n. 373: "*Norme per il contenimento del consumo energetico per usi termici negli edifici*" che per la prima volta afferma il principio del risparmio energetico quando all'articolo 1 impone esplicitamente che "*Al fine di contenere il consumo energetico per fini termici negli edifici, sono regolate dalla presente legge le caratteristiche di prestazione dei componenti, l'installazione l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici per il riscaldamento degli ambienti e per la produzione di acqua calda per usi igienici e sanitari, alimentati da combustibili solidi, liquidi o gassosi"* inserendo concetti moderni in tema di progettazione degli impianti ed isolamento termico degli edifici, ma lasciando ampio margine di azione per quanto riguardava l'intervento sul costruito, specificando che "*nel caso di ristrutturazioni di edifici esistenti, il sindaco può disporre che siano osservate le norme sulle caratteristiche di isolamento termico, quando la commissione edilizia comunale abbia accertato la sussistenza delle condizioni tecniche per la loro applicazione*" (art.15).
Alcuni concetti introdotti da questa legge sono fondamentali per le normative successive come fattore di forma S/V, i gradi-giorno e la classificazione degli edifici.
La successiva legge del 9 Gennaio 1991, n. 10 "*Norme per l'attuazione del Piano Energetico Nazionale in materia di uso razionale dell'energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia*" proponeva contenuti innovativi affermando che il risparmio energetico deve attuarsi sia nel miglioramento dell'isolamento termico d'involucro, sia attraverso la riduzione dei consumi e l'utilizzo di fonti rinnovabili di energia.
Per la prima volta si incentrava l'attenzione sulla necessità di considerare non solo la dispersione dell'edificio, ma anche le caratteristiche di rendimento degli impianti, si individuavano nuove metodologie di calcolo, e si introduceva il concetto di certificazione energetica.

La strumentazione attuativa della Legge n. 10/1991 si esplicava attraverso una normativa di natura prescrittiva, avente forma di decreto ministeriale, ed una di natura tecnica, costituita dalle norme UNI, per la definizione dei metodi di calcolo da applicare. Per la prima volta, perciò, i progettisti avevano l'obbligo di verificare, per mezzo di appositi strumenti normativi, l'efficacia del loro progetto dal punto di vista energetico.
L'art. 30 prevedeva la certificazione energetica rimandando però a un decreto successivo la sua applicazione, quel decreto non è mai stato emanato.
Nel 2005 per recepire le indicazioni comunitarie della direttiva 2002/91/CE sul rendimento energetico nell'edilizia è stato emanato in Italia il decreto legislativo 192/2005, che attuava le disposizioni comunitarie nell'ottica di "*migliorare le prestazioni energetiche degli edifici al fine di favorire lo sviluppo, la valorizzazione e l'integrazione delle fonti rinnovabili e la diversificazione energetica, contribuire a conseguire gli obiettivi nazionali di limitazione delle emissioni di gas a effetto serra posti dal protocollo di Kyoto, promuovere la competitività dei comparti più avanzati attraverso lo sviluppo tecnologico"*(art.1) [30].
Il decreto conteneva indicazioni per l'integrazione di impianti solari termici e fotovoltaici sulle coperture degli edifici e per l'allaccio alle reti di teleriscaldamento.
Per gli edifici esistenti oggetto di ristrutturazione, il legislatore prevedeva applicazioni diverse del decreto (applicazione integrale, parziale o limitata a specifici parametri) ed in funzione del tipo di intervento (ristrutturazione totale o parziale, ampliamenti e manutenzione straordinaria).
I beni sottoposti a vincolo, invece, erano esclusi dal decreto.
Nel decreto la certificazione energetica obbligatoria era prevista ma le regole tecniche necessarie per l'attuazione venivano demandate a successivi decreti.
L'anno seguente è stato emanato il decreto legislativo 311/2006[31] che correggeva alcuni errori e colmava alcune lacune, attuando indirizzi politici di maggiore severità in campo energetico.E' stato introdotto:

- l'uso obbligatorio delle fonti rinnovabili per la produzione di energia termica; in particolare, nel caso di edifici esistenti [32]. La soglia limite fissata è del 50% del fabbisogno annuo di energia primaria richiesta per la produzione di acqua calda sanitaria, questo limite si abbassa al 20% nel caso di edifici storici.

[30] "Attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico in edilizia", Pubblicato nella Gazzetta Ufficiale n.222 del 23 Settembre 2005

[31] Disposizioni correttive ed integrative a decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, recante attuazione della direttiva 2002/91/CE, relativa al rendimento energetico nell'edilizia";

[32] Allegato I, comma 12, si legge: "in occasione di nuova installazione di impianti termici o di ristrutturazione di impianti termici esistenti, l'impianto di produzione di energia termica deve essere progettato e realizzato in modo da coprire almeno il 50% del fabbisogno annuo di energia primaria richiesta per la produzione di acqua calda sanitaria con l'utilizzo delle predette fonti di energia. Tale limite è ridotto al 20% per gli edifici situati nei centri storici"

- l'obbligatorietà di installazione di impianti fotovoltaici per la produzione di energia elettrica sia nel caso di edifici di nuova costruzione sia nel caso di ristrutturazione di quelli esistenti (pubblici e privati), senza però fornire specifiche prestazionali.[33]

- certificazione energetica obbligatoria degli edifici esistenti (se pubblici in occasione di nuovi o rinnovati contratti di gestione degli impianti di climatizzazione, sennò in occasione di vendita o locazione), benché il suo esito non sia vincolante per un intervento di riqualificazione energetica di quegli immobili che risultassero particolarmente energivori.

Il decreto ricalcava il testo della normativa europea senza prendere specifiche posizioni in merito agli edifici storici escludendoli dall'applicazione "*nel caso in cui il rispetto delle prescrizioni implicherebbe una alterazione inaccettabile del loro carattere o aspetto con particolare riferimento ai caratteri storici o artistici*" (art.3 comma 3).
I decreti attuativi previsti dal D.Lgs. 192/2005, e dal D.Lgs. 311/2006, relativamente alle metodologie di calcolo, ai requisiti minimi per la prestazione energetica di edifici ed impianti e alle linee guida nazionali di certificazione energetica, sono stati solo parzialmente emanati.
La legge finanziaria del 2007 ha individuato gli incentivi offerti dal governo per gli edifici che siano certificati, ma il legislatore consapevole dell'assenza di regole per la certificazione introduce provvisoriamente uno strumento sostitutivo: la qualificazione energetica.
Questo strumento è rimasto in vigore fino al 2009 quando il DM 26/06/2009 introducono l'obbligatorietà della redazione di un Attestato di Certificazione Energetica su tutto il territorio nazionale Le indicazioni da esso contenute sono state confermate dal D.Lgs. 18 del 2011 entrato in vigore il 29 Marzo 2001.

2.4.2. Leggi e iniziative regionali e comunali

Il settore dell'energia e il comparto delle rinnovabili è uno di quelli per cui è stato più intenso il processo di trasferimento di funzioni dallo stato verso il basso alle regioni e alle provincie e verso l'alto all'unione europea .

[33] Allegato I Art.13 si legge: *Le modalità applicative degli obblighi di cui al comma precedente, le prescrizioni minime, le caratteristiche tecniche e costruttive degli impianti di produzione di energia termica ed elettrica con l'utilizzo di fonti rinnovabili, sono definite, in relazione alle dimensioni e alle destinazioni d'uso degli edifici, con i decreti di cui all'articolo 4, comma 1. Le valutazioni concernenti il dimensionamento ottimale, o l'eventuale impossibilità tecnica di rispettare le presenti disposizioni, devono essere dettagliatamente illustrate nella relazione tecnica di cui al comma 15. In mancanza di tali elementi conoscitivi, la relazione è dichiarata irricevibile. Nel caso di edifici di nuova costruzione, pubblici e privati, o di ristrutturazione degli stessi conformemente all'articolo 3, comma 2, lettera a), è obbligatoria l'installazione di impianti fotovoltaici per la produzione di energia elettrica.*

Mi è parso quindi corretto illustrare il processo di riforma nel nostro paese facendo anche riferimento alla ripartizione dei compiti istituzionale in materia energetica degli enti locali. Tale decentramento di deleghe ha avuto il suo avvio con la legge 59/97 (Bassanini), con essa si è modificato il coinvolgimento e il ruolo delle regioni e degli enti locali in campo energetico: gli enti locali e territoriali hanno acquisito un importanza mai avuta prima in virtù del principio della sussidiarietà.
La riforma del titolo V della Costituzione del 2001 ha ulteriormente ridisegnato le competenze ,i procedimenti e ruoli nel campo della regolazione energetica , sottolineando come il potere legislativo spetti alle regioni che dovranno legifera nei rispetto dei principi fondamentali fissati dallo stato.
Le regioni incidono profondamente sulle scelte della politica energetica nazionale dotandosi di strumenti legislativi specifici per perseguire gli obiettivi di politica energetica.
Il D.Lgs. 192/2005 ha delegato l'attuazione degli indirizzi generali in essa espressi alle Regioni e alle Province.
Ogni Regione ha un diverso stato di applicazione della normativa in tema di certificazione energetica: alcune hanno elaborato schemi di applicazione, altre hanno individuato regole proprie recependo le linee guida nazionali quando emanate, altre ancora non hanno legiferato accettando tacitamente la normativa statale.
Le Regioni e le Province autonome che alla data della pubblicazione del DM 26/06/2009 avevano già provveduto al recepimento della direttiva 2002/91/CE avrebbero dovuto, secondo l'art.5, adottare delle misure atte a favorire un graduale ravvicinamento dei propri strumenti regionali di certificazione energetica degli edifici alle *Linee guida nazionali*.
Sebbene l'applicazione del principio di sussidiarietà abbia permesso alle diverse singole Regioni di adattare le strategie nazionali alle specificità dei propri territori,
la conseguente distinzione negli strumenti di certificazione e di modellazione energetica ha creato una complessità tale da rendere pressoché impossibile operare dei confronti tra edifici analoghi per dimensione, tecnologie ed epoche costruttive posti in aree geografiche diverse.
Solo quattro regioni, Lombardia; Emilia Romagna, Piemonte e Valle d'Aosta, hanno un sistema informativo (catasto energetico) per l'archiviazione dei dati contenuti negli attestati di certificazione e questo aumenta il problema della dispersione delle informazioni.
A fronte di questa criticità, sembra evidente una grande sensibilità da parte dei comuni al tema della sostenibilità energetica. Molti comuni, tra i primi ricordiamo Bolzano, hanno incentivato la riqualificazioni energetica attraverso la premiazione degli interventi migliori dal punto di vista ambientale. Tra le categorie riconosciute con il premio Casaclima nel 2006 è stata aggiunta anche quella del risanamento, che si rivolge anche agli edifici di carattere storico e sottoposti ai vincoli della Sovraintendenza. In questa categoria nel 2008 è stata premiata casa Glauber palazzo situato nel centro storico di Bolzano e sottoposto a forti vincoli monumentali.

La Legge finanziaria 2007 e quella di stabilità del 2011, sempre nel tema della premialità coniugato però in termini economici, ha individuato , la possibilità di una detrazione del 55% sulle spese sostenute per interventi finalizzati all'incremento della performance energetica degli immobili o all'introduzione di sistemi di generazione alimentati da fonti rinnovabili.
Tutto questo ha fortemente condizionato il mercato del retrofit energetico.
Negativo nel processo di incentivazione è risultata la mancanza di una regolamentazione efficace e dei necessari correttivi, che sta creando estese e acritiche sostituzioni di componenti dell'edificio determinando spesso un danno per gli edifici esistenti e non soggetti a tutela monumentale.
La relazione dell'Osservatorio Nazionale Regolamenti Edilizi in materia di Risparmio Energetico [34], mostra che a fine 2012 erano 705 i comuni che hanno modificato i propri Regolamenti Edilizi per introdurre obiettivi di sostenibilità.
E' evidente l'assunzione di responsabilità da parte dei governi locali che hanno recepito la necessità di intervenire con azioni normative anche se sono ancora poche le strategie di intervento attuate capaci di dialogare in modo efficace con l'edificato storico.

[34] *"L'innovazione energetica in edilizia".* Rapporto ONRE 2010 sui regolamenti edilizi comunali a cura di CRESME RICERCA SPA e LEGAMBIENTE e con la partecipazione di SAIENERGIA e DELTA GRUPPO.

2.4.3. Riassunto delle principali norme nazionali sulle fonti energetiche rinnovabili e sul risparmio energetico

Legge 9 gennaio 1991, n. 9	Norme per l'attuazione del nuovo Piano energetico nazionale: aspetti istituzionali, centrali idroelettriche ed elettrodotti, idrocarburi e geotermia, autoproduzione e disposizioni fiscali
Legge 9 gennaio 1991, n. 10	Norme per l'attuazione del Piano energetico nazionale in materia di uso razionale dell'energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia
D.M. Attività Produttive 20 luglio 2004 D.Lgs. 164/2000	Risparmio energetico e sviluppo delle fonti rinnovabili - Obiettivi nazionali - Testo consolidato
D.Lgs. 19 agosto 2005, n. 192 Attuazione della direttiva 2002/91/Ce	Testo consolidato
D.M. 22 dicembre 2006	Approvazione del programma di misure ed interventi su utenze energetiche pubbliche, ai sensi dell'articolo 13 del decreto del Ministro delle attività produttive, di concerto con il Ministro dell'ambiente e della tutela del territorio 20 luglio 2004
Legge 27 dicembre 2006, n. 296	Legge Finanziaria 2007. Efficienza energetica
D.Lgs. n.311 del 29 dicembre 2006	Disposizioni correttive ed integrative al decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, recante attuazione della direttiva 2002/91/ce, relativa al rendimento energetico nell'edilizia
D.M. Economia 19 febbraio 2007	Disposizioni in materia di detrazioni per le spese di riqualificazione energetica del patrimonio edilizio esistente - Articolo 1, comma 349, legge Finanziaria 2007

Legge 24 dicembre 2007, n. 244 - Legge Finanziaria 2008	Energie rinnovabili e efficienza energetica
D.M. Sviluppo Economico 11 marzo 2008	Valori limite di fabbisogno di energia primaria annuo e di trasmittanza termica - Articolo 1, comma 24, lettera a), della legge 24 dicembre 2007, n. 244
D.M. Economia 7 aprile 2008	Disposizioni in materia di detrazione per le spese di riqualificazione energetica del patrimonio edilizio esistente - Modifiche al D.M. 19 febbraio 2007
D.Lgs. 30 maggio 2008, n.115	Attuazione della direttiva 2006/32/CE relativa all'efficienza degli usi finali dell'energia e i servizi energetici e abrogazione della direttiva 93/76/CEE
D.M. Ambiente 25 novembre 2008	Fondo rotativo per Kyoto - Modalità di erogazione dei finanziamenti a tasso agevolato
D.L. 29 novembre 2008, n.185	Misure urgenti per il sostegno a famiglie, lavoro, occupazione e impresa e per ridisegnare in funzione anti-crisi il quadro strategico nazionale
D.P.R. 2 aprile 2009, n.59	Rendimento energetico in edilizia - Regolamento di attuazione dell'articolo 4, comma 1, lettere a) e b), del D.Lgs. 192/2005;
D.M. Sviluppo economico 26 giugno 2009	Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici
Legge 23 luglio 2009, n.99	Disposizioni per lo sviluppo e 'internazionalizzazione delle imprese, nonché in materia di energia - Stralcio

2.5. Il Codice dei Beni Culturali

Relativamente alla valorizzazione del patrimonio monumentale Stato, Regioni e altri enti territoriali "*perseguono il coordinamento, l'armonizzazione e l'integrazione delle attività di valorizzazione dei beni pubblici*" [35].
In generale, quando ci si riferisce a Beni culturali, si intendono "*le cose immobili e mobili [..] che presentano interesse artistico, storico, archeologico o etnoantropologico"* (art. 10) appartenenti ad enti pubblici, a persone giuridiche private senza fine di lucro, o di proprietà privata, nel caso sia intervenuta la dichiarazione di interesse culturale purché realizzati da almeno settant'anni e opera di autore non più vivente.
Con l'apposizione del vincolo il bene passa da un regime ordinario ad uno speciale, in base al quale il proprietario non può godere liberamente del bene tutelato ma deve necessariamente sottostare a regole specifiche relative al tasso di trasformazione consentito o auspicato per il bene stesso. Questo significa che "*l'esecuzione di opere e lavori di qualunque genere su beni culturali è subordinata ad autorizzazione del soprintendente*"(art. 21, comma 4). Invece, relativamente agli edifici che ricadono sotto il vincolo di tutela indiretta, "*il Ministero ha facoltà di prescrivere le distanze, le misure e le altre norme dirette ad evitare che sia messa in pericolo l'integrità dei beni culturali immobili, ne sia danneggiata la prospettiva o la luce o ne siano alterate le condizioni di ambiente e di decoro*".
Il ruolo della soprintendenza diventava determinante nell'esito degli iter autorizzatori relativi sia ai beni culturali; e questo era valido tanto per interventi "canonici" di restauro che per eventuali interventi di riqualificazione energetica. Sebbene la già citata legge 311/2006 escludeva dall'applicazione gli immobili "*ricadenti nell'ambito della disciplina della parte seconda e dell'articolo 136, comma 1, lett. b) e c) del decreto legislativo 22 gennaio 2004, n.42, recante il codice dei beni culturali e del paesaggio nel caso in cui il rispetto delle prescrizioni implicherebbe una alterazione inaccettabile del loro carattere o aspetto con particolare riferimento ai caratteri storici o artistici"* (art.3 comma 3), la legge italiana prevedeva una possibilità di dialogo con le soprintendenze al fine di individuare quali possano essere gli interventi ammissibili in termini di efficientamento energetico e quindi definire quali siano i gradi di compatibilità accettabili.
Anche se i contesti tutelati vengano tenuti fuori dai ragionamenti legati alla

[35] Il Codice dei beni culturali e del paesaggio; è il principale riferimento normativo italiano che attribuisce al Ministero per i Beni e le Attività Culturali il compito di tutelare, conservare e valorizzare il patrimonio culturale dell'Italia. Il codice dei beni culturali e del paesaggio invita alla stesura di piani paesaggistici meglio definiti come "*piani urbanistico territoriali con specifica attenzione ai valori paesaggistici"*.È stato emanato con decreto legislativo del 22 gennaio 2004, n. 42, e modificato poi dal d. lgs. 24 marzo 2006, n. 156, dal d. lgs. 24 marzo 2006, n. 157, dal d. lgs. 26 marzo 2008, n. 62, e dal d. lgs. 26 marzo 2008, n. 63

sostenibilità, già nel 2000 veniva firmato un Protocollo d'intesa tra Ministero dell'Ambiente e Ministero per i Beni e le Attività Culturali che introduceva l'argomento e si esprimeva così in merito: "*Fra le diverse tecnologie energetiche, le fonti rinnovabili – e tra esse, in particolare, l'eolico e il solare fotovoltaico, per la produzione di elettricità e il solare termico per la produzione di acqua calda – possono rappresentare le opzioni più idonee a fornire energia nel rispetto delle esigenze di salvaguardia dell'ambiente, dei beni culturali e del paesaggio, fatta salva, per quest'ultimo ambito, l'adozione di tecnologie atte a minimizzare l'impatto delle medesime sui contesti tutelati*". A seguito di quel protocollo di intesa, con decreto del 10 settembre 2010, il Ministero dello sviluppo economico, di concerto con il Ministero dell'ambiente e con il Ministero per i beni e le attività culturali, ha emanato le linee-guida per l'autorizzazione degli impianti alimentati da fonti rinnovabili, che consistono in un complesso normativo volto a semplificare le procedure autorizzative ma anche a codificare la terminologia e ad individuare i criteri per l'inserimento degli impianti nel paesaggio e nel territorio.
La possibilità di controllo della compatibilità di intervento per azioni di riqualificazione energetica effettuate all'interno degli edifici (inserimento cappotto, rifacimento impianti, smantellamento orizzontamenti, ecc.) viene demanda agli strumenti locali di governo del territorio; è quindi con i regolamenti edilizi comunali che si gioca una partita importante, dato che al loro interno dovrebbero confluire sia le norme in materia di risparmio energetico che le indicazioni legate alle tutela (cfr. § 3.4). La questione sta proprio nel modo in cui i termini di quell'equazione vengono messi a sistema: se da un lato, l'esclusione a priori degli edifici sottoposti a tutela garantisce la conservazione dei beni ma fallisce negli obiettivi generali di una trasformazione necessaria, dall'altro la mancanza di strumenti che possano guidare i tecnici e sensibilizzare gli operatori del settore rischia di amplificare gli stravolgimenti sull'edilizia storica.

2.6. Prospettive normative nell'efficienza energetica del patrimonio storico

La disamina del panorama legislativo di riferimento e delle conseguenze che l'applicazione delle norme può determinare, ha messo in luce alcuni aspetti problematici con cui è necessario interfacciarsi.
Per prima cosa appare evidente che, nonostante le norme prevedano alcune attenzioni specifiche per il costruito, esse siano state pensate unicamente in funzione di nuove costruzioni. Al loro interno, infatti, si trovano requisiti sempre più restrittivi e richieste di prestazioni così performanti da non avere possibilità di dialogo con l'edilizia esistente, fatto salvo un intervento altamente impattante sulle strutture e stravolgente per la sua identità.
La scelta di intervento porta solitamente verso la sostituzione di singoli elementi per ottimizzarne la prestazione, senza considerare un approccio sistematico, che tenga conto del rapporto tra edificio- ambiente -prestazioni ed uso.
La criticità più evidente sta infatti nel considerare il progetto di adeguamento, come la somma di azioni singolarmente effettuate su nodi tecnologici considerati obsoleti in modi totalmente slegati tra loro (infissi, coperture, involucro, ecc.).
Considerare invece il funzionamento dell'intero edificio dal punto di vista della risposta energetica significa anche misurare alcuni parametri sensibili, attraverso prove e indagini, per comprendere la reale prestazione dell'edificio.
Bisognerebbe quindi giungere a normative diversificate, a regolamenti edilizi differenti per ciò che riguarda l'edilizia di nuova costruzione e per quella esistente, con particolare riferimento all'edificato storico, come peraltro è stato già realizzato, seppur in maniera embrionale, in altri paesi europei, ad esempio in Francia e in Inghilterra.
Un ulteriore aspetto rilevante sta nel fatto che le norme oggi vigenti prevedono un impianto di stampo prescrittivo, che obbliga al raggiungimento dei requisiti richiesti, senza la possibilità di determinare una "estensione" della loro applicazione, che più si accorderebbe con le specificità del costruito.
Poiché molte volte le trasformazioni da realizzare sull'edificio derivano più da stringenti richieste normative che dalle reale necessità del caso, sarebbe bene guidare il ragionamento verso il concetto di miglioramento anziché di adeguamento: assecondare le prestazioni che il bene in oggetto è in grado di offrire, piuttosto che stravolgerne la struttura per farlo lavorare in modo improprio, significa poter coinvolgere anche l'edificato storico nel processo di miglioramento energetico dello stock edilizio.

PARTE TERZA: Analisi del comportamento edifici storici tramite simulazione

INDICE CAPITOLO

3.1. Premesse allo studio 58
3.1.1. Simulazione dinamica o stazionaria 58
3.1.2. La simulazione dinamica 61
3.1.3. Indicatori relativi all'efficienza energetica 63
3.1.4. Il calcolo del carico termico dell'edificio: DesignBuilder 64

3.2. La simulazione del sistema edificio-impianto 72
3.2.1. L'indice ESEER 74
3.2.2. Limiti dell'indice ESEER 77
3.2.3. La norma UNI 11135 78
3.2.4. Metodo di calcolo con procedure dinamiche 78
3.2.5. Metodo di calcolo con procedure semplificate stazionarie 79
3.2.6. Calcolo finale del COP medio stagionale (COP_s) 79
3.2.7. Calcolo del coefficiente correttivo Y secondo UNI 10963 80
3.2.7. Calcolo del coefficiente Y partendo dai dati necessari per ESEER 84
3.2.8. Conclusioni 91

3.1. Premesse allo studio

Fondamentali nel recupero di un edificio soggetto a tutela monumentale sul cui involucro non si può intervenire e non è possibile l'introduzione di nuovi elementi che, in qualche misura, rischiano di scontrarsi con i principi propri della conservazione, sono le modifiche del sistema edificio impianto.
Già a monte dell'intervento la questione cruciale sta nella duplice comprensione di quali siano i livelli di performance ancora offerti dagli edifici storici e quali quelli che, definendo i possibili margini di miglioramento, si possano ottenere attraverso azioni di retrofit.
Intervenire in termini di riqualificazione delle prestazioni energetiche, richiede, quindi, un preliminare approfondimento circa il reale comportamento degli edifici antichi, così da individuare delle strategie d'azione che si discostino dalle prassi operative oggi attuate e considerino in modo sistemico l'intero ciclo di vita dei materiali: risparmiare energia è importante, ma lo è altrettanto perseguire quello stesso obiettivo senza causare danni conservativi agli edifici.
L'utilizzo di software di calcolo rappresenta una risorsa preziosa sia in fase di progettazione che in fase di verifica, perché permette un confronto incrociato tra due o più soluzioni impiantistiche al fine di analizzare quale soluzione sia più performante in termini di abbattimento dei consumi energetici, di raggiungimento della quota di energia rinnovabile richiesta dalla normativa e di ottenimento dei requisiti di comfort necessari alla nuova destinazione d'uso.
Attraverso la simulazione è possibile analizzare strategie di progetto alternative, nonché valutare la conformità dei progetti agli standard legislativi e perseguire l'ottimizzazione economica attraverso tecniche di analisi energetica basate su simulazioni dettagliate. L'utilizzo di questi programmi consente sia l'applicazione di migliori criteri di progettazione alle nuove costruzioni, ispirati ai principi dell'ottimizzazione energetica, sia interventi di retrofit mirati al contenimento dei consumi nel patrimonio edilizio esistente, con l'obiettivo di ricavarne benefici economici ed energetico-ambientali.

3.1.1. Simulazione dinamica o stazionaria

La simulazione di un edificio è una rappresentazione matematica del comportamento fisico di ogni suo comportamento. Tuttavia, essa non può replicare precisamente una costruzione reale in quanto tutte le simulazioni sono basate su una serie di ipotesi fondamentali che ne pregiudicano l'accuratezza. Ammesso che la simulazione abbia una rappresentazione teoricamente perfetta del funzionamento di un edificio, essa non può replicare perfettamente le reali dinamiche che regolano il comportamento energetico.

Ad esempio, il clima può variare rispetto ai dati meteorologici di riferimento, le curve di funzionamento a carico parziale non rappresentano con assoluta precisione il funzionamento degli impianti, i dati prestazionali degli impianti possono essere influenzati dalla vetustà e dal grado dall'efficienza di funzionamento ottenuta con la manutenzione
Importante è anche l'interpretazione dei risultati, in quanto costituisce una rappresentazione di come funziona, o può funzionare, un sistema edificio-impianto.
Un software di simulazione degli edifici è quindi una risorsa preziosa se interpretata correttamente .
La simulazione consente:

- di operare scelte correttamente orientate. Quando l'analisi tecnica di un edificato introduce alla formulazione di più soluzioni impiantistiche o architettoniche, il confronto tramite simulazione delle soluzioni possibili risulta molto significativo;
- di comprendere, analizzando dati simulati, il consumo energetico di un edificato in un determinato periodo oggetto di esame; .
- di valutare in modo flessibile gli effetti delle scelte progettuali in termini energetici e ambientali;
- un orientamento del progetto verso l'ottimizzazione delle diverse e spesso contrastanti necessità.

I software di simulazione energetica esistono dal 1973 tuttavia solo dopo la crisi energetica, sia nel settore pubblico che in quello privato, se ne è incentivato lo studio e lo sviluppo.
I primi programmi (o software) nascono per rispondere all'esigenza del dimensionamento impiantistico, dall'implementazione di procedure di tipo manualistico caratterizzate da uno schema semplificato operante in regime stazionario e forniscono quindi dei risultati solamente indicativi. Successivamente si sono introdotti dei modelli che tengono conto parzialmente delle dinamiche energetiche che hanno luogo negli edifici.
Nonostante negli ultimi vent'anni l'Unione Europea abbia promosso vari programmi di ricerca per la valutazione e simulazione delle condizioni termoigrometriche degli edifici, è solo a seguito dell'emanazione della Direttiva Europea 91/2002 e dell'introduzione del concetto di certificazione energetica, che si è dato un nuovo impulso allo sviluppo di modelli di calcolo, soprattutto di tipo semplificato, per la valutazione delle prestazioni del sistema edificio-impianto.
Le nuove normative in materia di risparmio energetico, infatti, impongono procedure di calcolo sempre più complesse per la verifica dei requisiti di legge, che rendono inevitabile il ricorso all'elaboratore elettronico, nonostante l'emanazione – contemporanea alla promulgazione di quelle stesse leggi – di norme UNI o ISO per la definizione, passo per passo, delle metodologie di calcolo richieste.

PRIMA GENERAZIONE	- Approccio da manuale - Semplificato - Utilizzo limitato a specifici campi	- Risultati indicativi - Applicazioni limitate - Difficoltà d'uso
SECONDA GENERAZIONE	- Dinamica più importante - Meno semplificato - Ancora di utilizzo limitato	
TERZA GENERAZIONE (ATTUALE)	- Soluzione a seconda del tipo di problema (generalità d'impiego di un unico software) - Utilizzo di metodi numerici - Visione integrata dei sottosstemi energetici - Vengono considerati i flussi termici e massici - Interfaccia con l'utilizzazione migliorata - Integrazione parziale delle funzioni CABD	
GENERAZIONE FUTURA	- Totale integrazione delle funzioni CABD - Metodi numerici avanzati - Basato su una conoscenza intelligente (autoapprendimento) - Sofware ingegneristici avanzati	- Predittivo - Generalizzato - Facile da usare

Figura 5. Evoluzione dei Software (Clarke, 2001)

Oggi esistono in commercio innumerevoli software per l'analisi delle condizioni termoigrometriche degli ambienti e delle prestazioni termiche degli involucri, con diversi livelli di accuratezza e con diverse finalità dell'indagine: si differenziano per la sofisticazione degli algoritmi di calcolo, per l'utenza a cui si rivolgono, per la modalità di introduzione dei dati e per la tipologia di output e per la possibilità di simulare specifiche condizioni architettoniche.
In generale gli strumenti di simulazione, che possono essere più o meno complessi, si dividono in dinamici e stazionari.
Alla 1^ e alla 2^ generazione corrispondono i cosiddetti metodi semplificati in quanto le formulazioni matematiche implementate sono molto scarne e caratterizzate da molte ipotesi semplificative di fondo (es. regime stazionario), ai software di 3^ e 4^ generazione si associa solitamente il nome di simulazioni o metodi dinamici.
I software di simulazione dinamica permettono di prendere in considerazione anche la capacità di accumulo di calore nella massa dell'involucro e di valutare gli apporti associati alla ventilazione naturale, i software che lavorano in regime stazionario consentono di indagare solo parzialmente le reali prestazioni di un edificio, perché partono dall'assunto che la variazione periodica delle temperature, gli accumuli di calore e il contributo della radiazione solare possano essere sostituiti da una semplificazione nelle procedure che utilizza dati climatici medi, mensili o stagionali.
Benché i sistemi di modellazione in regime dinamico presentino vantaggi da un punto di vista dell'attendibilità dei dati di output, pagano la loro complessità di elaborazione con una modalità di imputazione dei dati più dettagliata e meno immediata da parte di un utente medio; per questa ragione, i sistemi di modellazione attualmente impiegati per la certificazione energetica sono prevalentemente costruiti

in funzione di un regime stazionario, volendo essere strumenti ad ampia diffusione e di facile utilizzo; ne sono esempi il programma DOCET, predisposto da CNR ed ENEA e il programma MASTERCLIMA elaborato dall'azienda Aermec in applicazione a quanto stabilito nelle Linee Guida Nazionali per la Certificazione Energetica degli Edifici, CENED elaborato da Regione Lombardia, l' Xclima sviluppato dall'Agenzia Casaclima di Bolzano.
Tutti gli strumenti sopra elencati assumono le indicazioni previste dalle UNI TS 11300 e che quindi si trovano, in declinazioni diverse, ma con algoritmi di calcolo comuni, in tutti i Paesi Europei; essi permettono di valutare i fabbisogni mensili di calore che l'impianto termico installato in un edificio deve fornire, calcolando gli apporti negativi dati dalle dispersioni termiche per trasmissione o ventilazione e i guadagni gratuiti dovuti dal metabolismo degli occupanti e dall'irraggiamento solare, in relazione delle caratteristiche di involucro dell'edificio stesso.

3.1.2. La simulazione dinamica

La simulazione utilizzata nei casi studio è la simulazione dinamica che permette maggiore variabilità dei dati di input e attendibilità dei dati di output.
L'analisi dei flussi di energia attraverso l'involucro è stato il primo passo per iniziare ad effettuare l'analisi del comportamento termico degli edifici storici.
I parametri considerati sono:

- condizioni climatiche esterne (temperatura, irraggiamento solare, velocità del vento, ecc.) ;
- caratteristiche termo-fisiche e radiative delle superfici trasparenti e opache che costituiscono l'involucro;
- caratteristiche dell'ambiente interno.

I flussi termici che attraversano una superficie esterna vetrata sono di tipo conduttivo e radiativo. Attraverso tali superfici, gli apporti di origine solare influenzano notevolmente le condizioni termiche all'interno dell'edifico e si traducono istantaneamente in guadagni termici.
Le componenti opache della struttura (muri, pavimenti) sono in grado invece di accumulare energia termica e di rilasciarla in periodi di tempo successivi modificando l'andamento della temperatura all'interno dell'edificio in modo graduale.
A questo proposito va sottolineato che per simulare correttamente un edificio sono necessari tutti i dati riguardanti le componenti verticali opache e trasparenti e quelle orizzontali, ma nel parlare di fabbricati storici appare critica la definizione delle prestazioni termiche delle murature tradizionali, con grandi spessori ed elevata inerzia termica, se infatti, in caso di progettazione ex novo i dati di conducibilità, permeabilità al vapore, o trasmittanza dei singoli materiali sono dichiarati per legge dai produttori, quando ci si confronta con un edificio esistente, soprattutto se

antico, queste informazioni non si possiedono né si conoscono.
Per superare il problema, , le strade percorribili sono due:

1. Calcolare, per via indiretta, le proprietà dei materiali storici, ricorrendo a tabelle e abachi costruiti ed implementati nel tempo; si tratta di raccolte documentali che forniscono valori standard di prestazione, tendenzialmente ricavati in funzione dello spessore di materiali omogenei o della tecnica costruttiva di diversi pacchetti tecnologici che è possibile trovare in opera. Tali strumenti, però, restituiscono una lettura incompleta e imprecisa della realtà: le prestazioni energetiche di un sistema antico non sono ricavabili per semplice somma di spessori giustapposti o per combinazione di tecnologie (che comunque una lista tabellata non potrà mai enumerare in modo esaustivo), ma dipendono anche dalla qualità della posa in opera dei materiali, dalla reale stratigrafia dei pacchetti e dall'umidità presente.

2. La seconda strada, invece, prevede di ricorrere a rilevamento diretto delle proprietà dei materiali tramite campagne diagnostiche in sito, la misura della conduttanza in opera può essere uno strumento utile per valutare il reale fabbisogno energetico. La misura della conduttanza in opera prevede , infatti, la registrazione di serie di dati di temperatura superficiale interna ed esterna del componente e di flusso termico interno e successivamente una fase di post-processing. Questa diagnostica strumentale costituisce un valido supporto per formulare delle ipotesi riguardo alle dispersioni termiche in pavimentazioni, coperture, involucri, o in tutti quei nodi che, per progetto o per le modifiche avvenute nel tempo, possono costituire punti critici. Le zone interessate da ponti termici, ad esempio, oltre che peggiorare le effettive prestazioni energetiche della fabbrica, costituiscono punti di vulnerabilità nel sistema edificio, perché, essendo zone non omogenee termicamente, favoriscono gli scambi termoigrometrici tra strutture, materiali di finitura e ambiente, e amplificano i fattori di rischio per la conservazione delle superfici. Se è vero che integrando analisi termografiche all'infrarosso con misure di termoflussimetria e di monitoraggio ambientale, si possono ricavare dati sperimentali circa le caratteristiche termiche delle strutture e le effettive prestazioni energetiche degli elementi analizzati, all'interno di un contesto microclimatico definito e parametrato, è altrettanto vero che simili indagini richiedono tempi molto lunghi, costi elevati e necessitano di competenze e strumentazioni specialistiche . Inoltre possono riscontrare qualche criticità se le aree indagate non sono davvero rappresentative della totalità dell'edificio.

La simulazione termica di ambienti confinati può essere affrontata mediante modelli che risolvono il bilancio termico sull'ambiente, utilizzando una formulazione

numerica che permette di legare l'istante di tempo in cui un contributo termico appare all'istante di tempo in cui lo stesso contributo agisce come carico sull'aria dell'ambiente esaminato. Il sistema studiato viene diviso in zone termiche: ogni zona termica è caratterizzata da una determinata condizione termoigrometrica che vuole essere mantenuta e da un certo profilo di apporti endogeni (luci, apparecchi, persone).
Esistono diversi software commerciali in grado di seguire nel tempo con passi orari l'evoluzione del comportamento energetico di un edificio e tra gli altri si possono ricordare: EnergyPlus, IES, esp-r, TRNSYS e PLEAIDAS + COMFIE, ecc.. In essi vengono introdotti come dati di input per il modello i dati climatici della località considerata, la geometria del sistema, le proprietà termofisiche delle strutture e gli apporti interni. I risultati della simulazione effettuata sul sistema esaminato sono i profili orari di temperatura e umidità relativa nelle varie zone, i flussi di energia e i consumi sempre con passo orario.
Le finalità di questi codici, così come quello di altri programmi simili, è quello di offrire all'operatore la possibilità di studiare qualsiasi sistema fisico reale, descrivendone il comportamento dei singoli componenti del sistema attraverso un modello matematico.

3.1.3. Indicatori relativi all'efficienza energetica

Attraverso il processo di simulazione introdotto precedentemente è possibile identificare alcuni indicatori prestazionali relativi alle prestazioni energetiche di edifici storici.
Le principali categorie di indicatori riguardano:

1. un indice dell'efficienza energetica degli edifici è il fabbisogno energetico per metro quadrato e anno (kWh/m^2a) necessario per il riscaldamento, per la produzione di acqua calda e per il raffrescamento estivo;
2. un indice che rappresenta il livello migliorativo, in termini di fabbisogni energetici, che si ottiene andando a modificare alcuni parametri strutturali e/o ambientali (infissi, impianti, condizioni climatiche interne) dell'edificio storico.

L'adozione di una tale classificazione nel caso di edifici storici rappresenta senza dubbio un'approssimazione molto forte a causa dei vincoli storico-architettonici e di modalità d'uso tipicamente presenti in questi contesti. Tali vincoli, molto spesso, impediscono l'attivazione di misure utili all'incremento dell'efficienza energetica.
Si dovrebbe quindi pensare di porre le basi per una nuova classificazione energetica focalizzata su edifici storici che, oltre ai parametri normalmente adottati al fine di una classificazione tradizionale (infissi, dimensioni pareti, ecc.) prenda in considerazione anche i vincoli tipicamente presenti in un edificio storico (conformazione architettonica, modalità d'uso, ecc.).

Questi vincoli sono rappresentati per esempio dall'impossibilità di installare impianti o infissi in grado di migliorare l'efficienza energetica dell'edificio. Tipico esempio di vincolo può essere l'impossibilità di installare finestre altamente coibentanti all'interno di un edificio storico oppure di posizionare un impianto di riscaldamento a pavimento, la cui installazione causerebbe il danneggiamento della pavimentazione storica presente.

3.1.4. Il calcolo del carico termico dell'edificio: DesignBuilder

Il programma di simulazione dinamica utilizzato per l'analisi dei casi studio è Design Builder[1]. DesignBuilder è un'interfaccia grafica sviluppata per creare un ambiente CAD di semplice elaborazione virtuale che permette di progettare agevolmente, e con diverso grado di dettaglio, edifici di differente complessità, e caratterizzarne subito le prestazioni energetiche e termoigrometriche tramite la simulazione dinamica del sistema edificio-impianto. Il motore di calcolo per la simulazione dinamica è costituito dal codice di calcolo EnergyPlus[2]. Si tratta di un programma per la simulazione dinamica del sistema edificio-impianto basato sulle prestazioni e le capacità di calcolo dei programmi BLAST[3] e DOE-2 [4] precedentemente esistenti. Il suo sviluppo è stato promosso dal Dipartimento dell'Energia americano e attualmente può essere considerato uno dei più affidabili strumenti di calcolo per la simulazione del comportamento energetico degli edifici[5] . Per la modellazione del comportamento termico delle singole zone dell'edificio riprende il metodo del bilancio globale già presente nel programma BLAST. In questo modo è possibile una valutazione molto precisa della domanda termica e frigorifera dell'edificio.

[1] DesignBuilder 2012,versione 2.5, DesignBuilder Software (DBS) Ltd, Stroud Gloucestershire, UK. http://www.designbuilder.co.uk

[2] Crawley, B. D., Lawrie, K. L., Winkelmann, F. C., Pedersen C. O., 2001, EnergyPlus: new capabilities in whole-building energy simulation program, 7th International IBPSA Conference, Rio de Janeiro Brazil.

[3] Building Loads Analysis and System Thermodynamics, BLAST 1993. *The building loads analysis and system thermodynamics program*. Department of Mechanical and Industrial Engineering, University of Illinois at Urbana Champaign

[4] Programa realizzato dal DoE (*Dipartimento Energetico degli Stati Uniti*) DOE 1994. *Department of Energy program*, Simulation Research Group, Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, California.

[5] EnergyPlus fu sviluppato a partire dal 1996 da un team che comprendeva: U.S. Army Constructio Engineering Research Laboratories (CERL), University of Illinois (UI), Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), Oklahoma State University (OSU), GARD Analytics e DOE. Questo programma di simulazione si basa sui punti di forza dei programmi BLAST e DOE-2, entrambi sviluppati e rilasciati negli anni '70 e usati anch'essi come strumenti per simulazioni energetiche. BLAST (Building Loads Analysis and System Thermodynamics) e DOE-2, entrambi scritti in una vecchia versione di Fortran, hanno strutture, codici e caratteristiche che nel tempo si sono rivelate obsolete per i nuovi compilatori. Per questo motivo é stato sviluppato il software EnergyPlus, scritto in Fortran 90 con un codice modulare strutturato, facile da mantenere, aggiornare, estendere e collegare ad altri programmi.

Per quanto riguarda la simulazione oraria delle prestazioni degli impianti di condizionamento e delle macchine per la produzione del caldo e del freddo nonché per l'analisi illuminotecnica si fa riferimento invece a quanto era già presente nel programma DOE-2. Anche la raffinata valutazione delle prestazioni termiche ed ottiche delle superfici vetrate proviene da DOE-2. Queste caratteristiche rendono EnergyPlus e di conseguenza anche DesignBuilder particolarmente indicati quando sono richieste analisi molto precise delle prestazioni termiche e quindi dei consumi energetici dei progetti esaminati. Questa è senza dubbio la migliore proprietà del programma. Le sue principali funzionalità e possibilità di utilizzo sono:

- calcolo dei consumi energetici dell'edificio;
- progettazione delle facciate in relazione alle problematiche di guadagno solare invernale, surriscaldamento estivo, ombreggiamento;
- simulazione termica di edifici con sistemi di ventilazione naturale;
- illuminazione naturale: simulazione dei sistemi di controllo dell'illuminazione e calcolo dei risparmi energetici sull'illuminazione artificiale;
- visualizzazione tridimensionale del sito con visualizzazione degli ombreggiamenti;
- calcolo dei fabbisogni di climatizzazione e dimensionamento degli impianti di condizionamento;
- strumento di valutazione della qualità energetica dell'edificio.

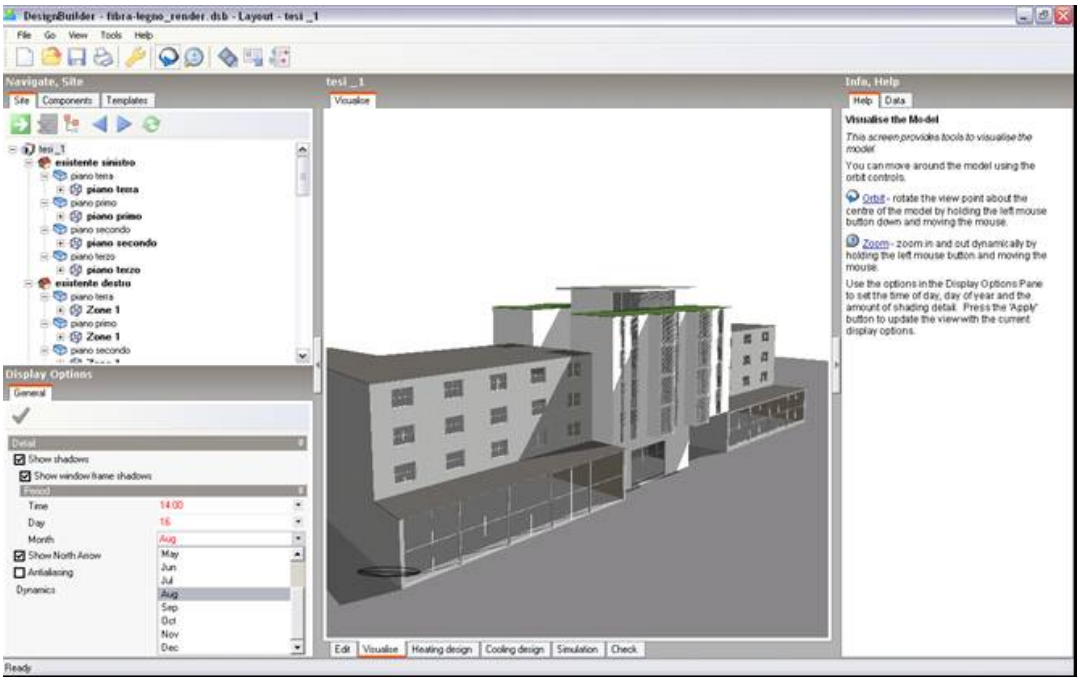


Figura 6. Visualizzazione edificio ombreggiato con DesignBuilder

Basandosi sulla descrizione dell'edificio, sia dal punto di vista dell'involucro edilizio che degli impianti, fornita dall'utente tramite l'ambiente di sviluppo virtuale, EnergyPlus calcola i carichi termici e frigoriferi necessari a mantenere le condizioni termoigrometriche di riferimento ed il consumo dei sistemi di produzione dell'energia. Il motore di calcolo fornisce contemporaneamente numerosi altri dati necessari alla verifica della congruenza della simulazione o di utilità per l'utente come, ad esempio, le condizioni termoigrometriche interne agli ambienti, l'entità degli apporti solari, le dispersioni attraverso le singole superfici dell'edificio, le perdite per ventilazione, i consumi suddivisi in funzione del combustibile utilizzato per la produzione dell'energia e le emissioni di anidride carbonica.
Tutti i risultati possono essere visualizzati all'interno dell'ambiente di DesignBuilder in forma grafica, tabellare o numerica a livello sub-orario, orario, giornaliero, mensile od annuale.

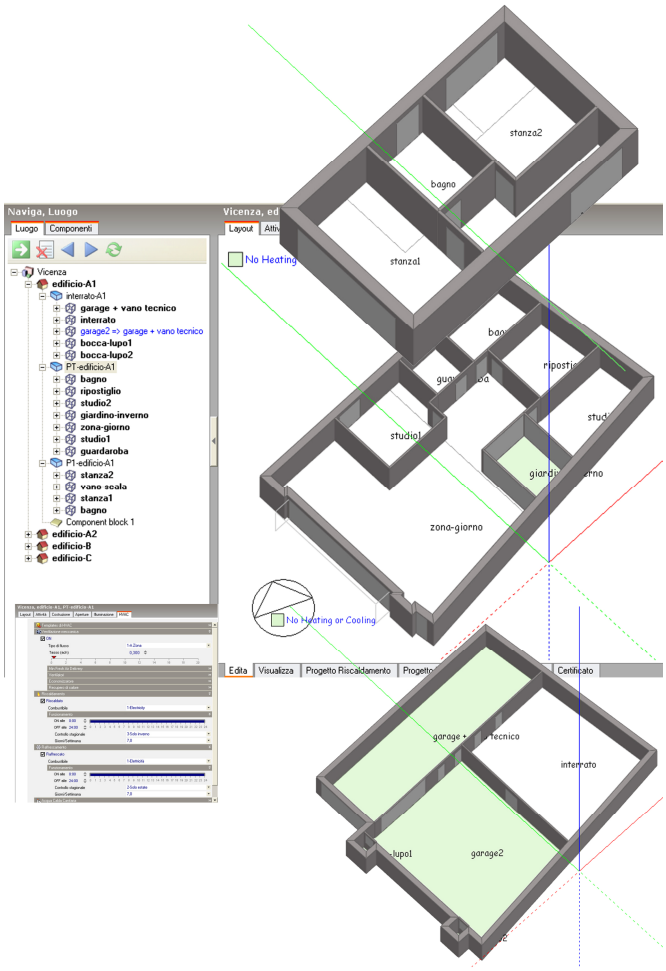


Figura 7. Visualizzazione edificio ombreggiato con DesignBuilder

Le principali funzionalità dell'ambiente di progettazione virtuale sono conseguenti la facilità del disegno reso più agevole dalla possibilità di importare elaborati grafici già definiti in ambiente CAD. Questa fase è il cuore dell'ambiente di sviluppo virtuale e permette di definire la geometria, i dati e le opzioni di calcolo dell'intero modello.
Per ciò che attiene alla costruzione geometrica del modello, si distinguono tre entità principali: l'edificio, il blocco e la zona. I blocchi sono le forme geometriche di base che si utilizzano per costruire i modelli di DesignBuilder. Il concetto alla base del blocco è quello di fornire oggetti relativamente semplici che si possano spostare in un ambiente tridimensionale per costruire aggregati più complessi. Un edificio non ha, dunque, una caratterizzazione geometrica ma è solamente una struttura di livello superiore definita come aggregato di blocchi. I blocchi sono creati disegnando perimetri bidimensionali su di un piano verticale od orizzontale ed estrudendoli per ottenere forme tridimensionali.
I blocchi sono oggetti versatili, ed una volta creati possono essere facilmente modificati spostandoli, estrudendoli ulteriormente lungo delle superfici o addirittura tagliandoli lungo piani arbitrari.
Tipicamente si utilizza un blocco per rappresentare un intero piano di un edificio ma è anche possibile usare un solo blocco per un intero edificio o, a partire da un solo blocco, tagliandolo ottenere i diversi piani dell'edificio.
Una volta che l'intera geometria del modello sia stata definita tramite blocchi, è possibile, in fase avanzata di progettazione o per caratterizzare zone termiche diverse o zone non riscaldate, ripartire i singoli blocchi in zone termiche (o stanze) utilizzando delle partizioni interne.
Nella finestra di modellazione si definiscono anche tutti i dati riguardanti ciascun edificio, ed in particolare quelli relativi ad attività, strutture, aperture, illuminazione e sistemi impiantistici.
Prima di scendere maggiormente nel dettaglio è utile sottolineare un'importante caratteristica di DesignBuilder ovvero la struttura gerarchica che procede dal sito edilizio, all'edificio, al blocco, alla zona, alla superficie fino all'apertura. Ciascun livello gerarchico eredita automaticamente i dati che lo riguardano dal livello superiore della gerarchia. Se, ad esempio, si è impostata la "parete A" come parete esterna a livello di edificio, tutti i blocchi dell'edificio erediteranno automaticamente la stessa parete esterna a meno che non si intervenga manualmente definendo esplicitamente in un blocco la "parete B". Tutte le zone di tale blocco erediteranno ora come parete esterna la "parete B".
Se sfruttato in modo efficiente, riducendo al minimo necessario le immissioni di dati personalizzati nei livelli gerarchici inferiori, il meccanismo descritto permette di modificare velocemente tutti i dati di un modello.
Una seconda importante caratteristica che facilita l'immissione dei dati è la possibilità di caricare degli insiemi di dati predefiniti dall'utente che permettono di utilizzarli in modelli diversi.

Tali insiemi sono degli archivi generali che riguardano: attività, strutture, superfici vetrate, facciate, impianti di condizionamento, località geografiche, attività metaboliche, infiltrazioni, normative energetiche nazionali, destinazioni d'uso e profili di utilizzo.
I dati richiesti all'utente, che possono essere definiti a diversi livelli all'interno della struttura gerarchica, sono suddivisi nelle seguenti categorie:

- Attività: permettono di definire l'attività ovvero l'utilizzo di un edificio e includono informazioni concernenti il tipo di zona termica, l'affollamento, l'attività metabolica, il consumo di acqua calda sanitaria, gli apporti interni di calore diversamente declinati e le strategie di controllo ambientale. Queste ultime riguardano i valori di set-point in riscaldamento e raffrescamento, le temperature di soglia per l'attivazione degli eventuali sistemi di ventilazione naturale e di free-cooling meccanico, l'entità dell'aria di rinnovo per persona ed il valore minimo di illuminamento richiesto.

- Strutture: permettono di definire le proprietà termofisiche delle strutture ed i materiali utilizzati nel modello per simulare correttamente i flussi termici conduttivi attraverso le strutture opache dell'involucro edilizio; nonché caratterizzare la permeabilità dell'involucro.

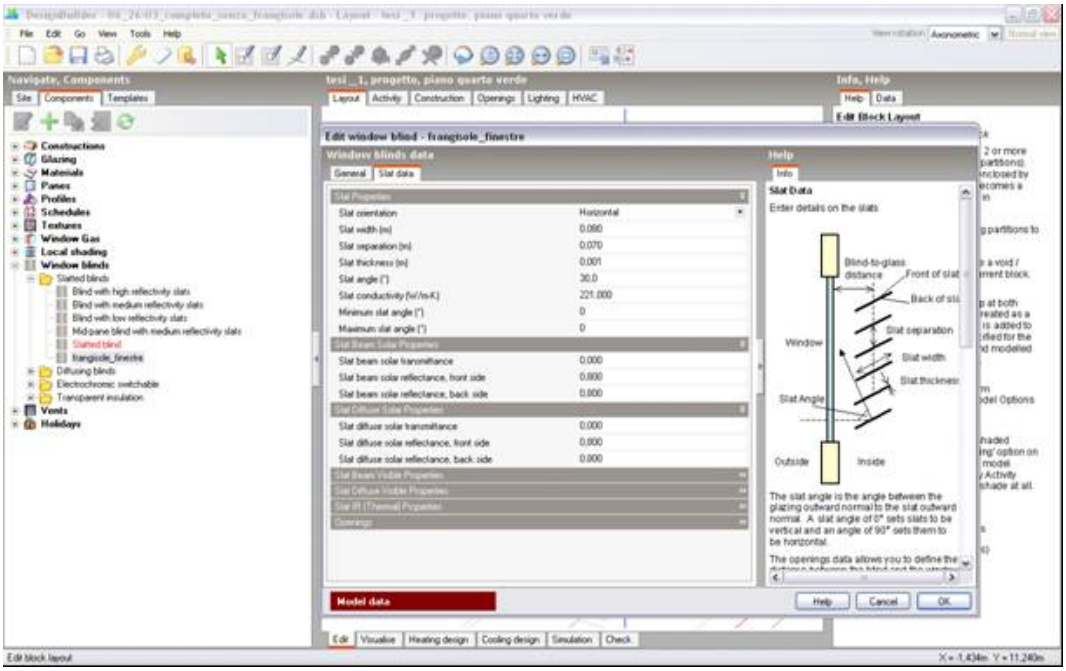


Figura 8. Dimensionamento di uno schermo solare con DesignBuilder

- Aperture: il termine “apertura” contraddistingue ogni tipologia di apertura dell’involucro edilizio che viene caratterizzata come singolarità della superficie in cui è inserita; si possono definire superfici finestrate, fori, porte e griglie di ventilazione, per ciascuna si definiscono disposizione, tipologia e modalità operativa qualora sia attivo un sistema di ventilazione naturale.
  L’ambiente di sviluppo è particolarmente versatile per ciò che attiene alla definizione della vetratura esterna e consente rapidi e proficui studi parametrici delle facciate degli edifici permettendo di modificare rapidamente la forma e l’estensione delle superfici trasparenti, le caratteristiche dei vetri e dei telai ed i sistemi fissi o mobili di ombreggiamento e schermatura .

- Illuminazione: i dati riguardanti i sistemi di illuminazione sono distinti in luci generali e luci da tavolo; è possibile anche attivare un controllo dell’illuminazione artificiale in funzione dei valori di illuminamento naturale calcolati dal motore di simulazione per poterne determinare i possibili risparmi energetici.

- Sistemi HVAC: permettono di definire i dati riguardanti i sistemi di climatizzazione ed in particolare i sistemi di ventilazione meccanica e naturale, di riscaldamento, di raffrescamento e di produzione dell’acqua calda sanitaria. In particolare, il sistema di ventilazione meccanica può essere del tipo a portata costante o a portata variabile con possibilità di gestire sistemi con post-riscaldamento di zona, free-cooling e recuperatori calore. I sistemi di produzione dell’energia possono essere alimentati con combustibile fossile oppure essere di tipo elettrico e sono caratterizzati da rendimenti costanti lungo l’arco della stagione. Data la complessità e la varietà degli impianti si tratta della sezione del programma attualmente più soggetta ad ulteriori miglioramenti ed ampliamenti e che stanno motivando l’emissione di nuove versioni sempre più aggiornate e complete del programma.
  Nonostante il codice sia stato pensato, come ho ormai più volte ribadito, per permetterne un uso immediato ed interattivo anche da parte del progettista dell’edificio, le analisi rese possibili dal programma sono organizzate secondo la tradizionale sequenza dei calcoli normalmente sviluppati dal termotecnico e qui di seguito elencati:

    - Progetto riscaldamento: i calcoli di progetto invernali permettono di determinare semplicemente le dimensioni del sistema di climatizzazione invernale e dei sistemi di emissione necessari a sopperire al carico nelle condizioni di progettazione invernali definite nei dati climatici. Nella normativa italiana ed europea, tali calcoli sono eseguiti in condizioni stazionarie. DesignBuilder permette quindi il calcolo così come previsto dalle norme.

Quindi in regime di funzionamento continuo dell'impianto, con temperatura dell'aria esterna costante al valore di progetto e senza apporti solari o interni. In alternativa l'utente può decidere di utilizzare DesignBuilder per effettuarli più correttamente tramite la simulazione dinamica di EnergyPlus.

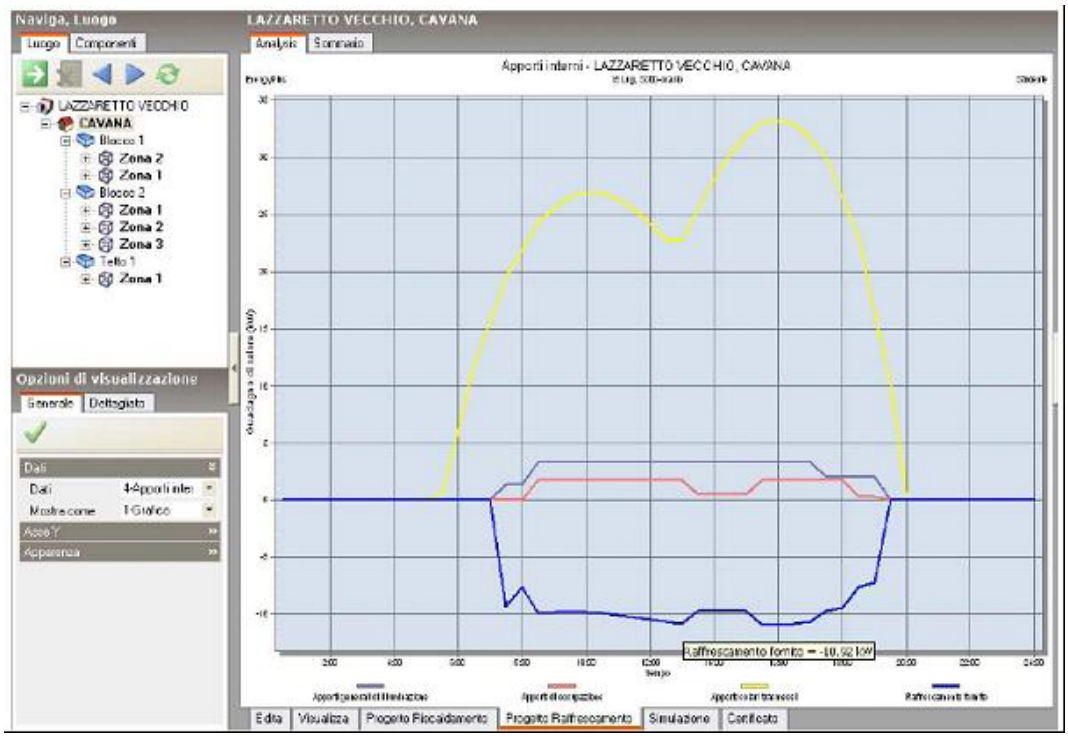


Figura 9. Risultati calcolo di progetto raffrescamento con DesignBuilder

- Progetto raffrescamento: anche in questo caso i calcoli di progetto estivi sono anzitutto finalizzati al dimensionamento del sistema di climatizzazione estiva nelle condizioni estreme di progettazione definite nei dati climatici. In ambito professionale, tali calcoli sono eseguiti tradizionalmente tramite metodi semplificati semi-stazionari oppure dinamici semplificati ma l'utente può utilizzare DesignBuilder per effettuarli con efficacia assai maggiore tramite la simulazione dinamica di EnergyPlus. Il motore di calcolo esegue la simulazione ipotizzando un andamento giornaliero sinusoidale della temperatura esterna esteso tra i valori minimi e massimi definiti nei dati di progetto. Anche in questo caso l'utente può invece decidere di riferirsi in alternativa ai carichi di picco risultanti dalla simulazione a lungo termine.

- Simulazione a lungo termine: come è stato già accennato, impiegando il motore di simulazione dinamica di EnergyPlus si possono caratterizzare con accuratezza le prestazioni energetiche a lungo termine del sistema edificio-impianto usando dati climatici reali.

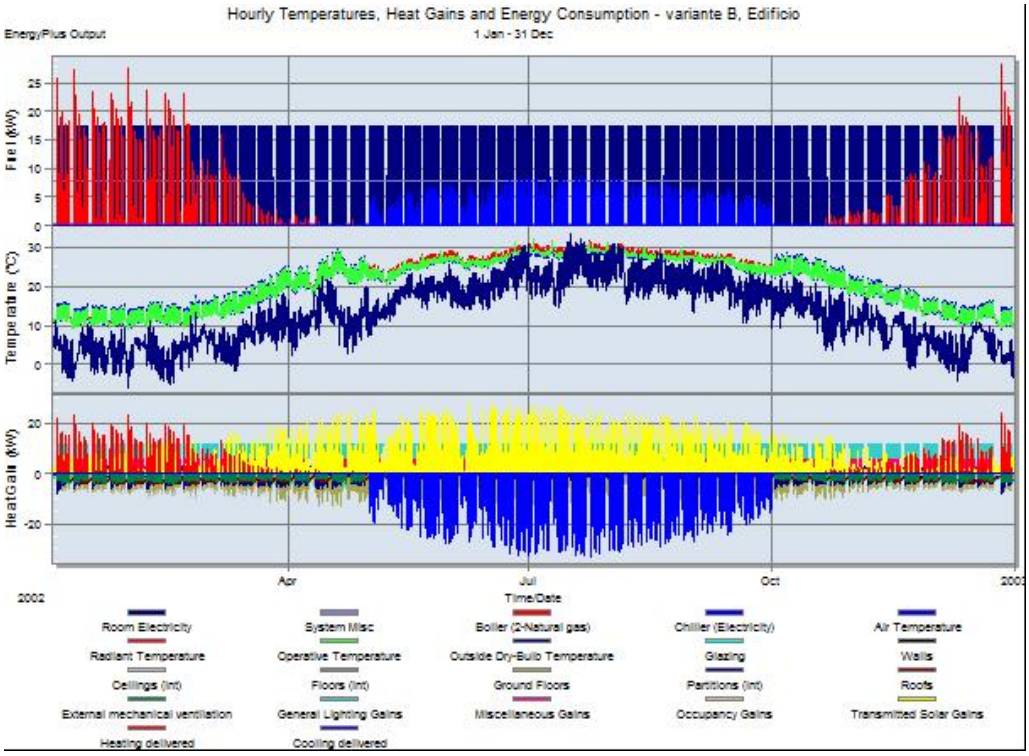


Figura 10. Valutazione fabbisogni annuali con DesignBuilder

Le simulazioni a lungo termine che impiegano EnergyPlus prevedono anche la modellazione dei fenomeni di conduzione e convezione tra zone a differente temperatura, la simulazione dei sistemi impiantistici. E' anche prevista la simulazione di una serie di giornate di "pre-climatizzazione" per assicurare un corretto profilo delle temperature delle strutture edilizie al principio del periodo oggetto di simulazione.
Si può infine utilizzare DesignBuilder per generare delle relazioni che includano descrizioni dei modelli, immagini grafiche del modello e dei risultati.
La funzione di visualizzazione permette di ottenere una completa resa tridimensionale del progetto, da cui è poi possibile esportare direttamente le immagini in tre dimensioni o generare filmati. E' possibile poi esportare i risultati dalle schermate della simulazione o dei calcoli di progetto in formato grafico o tabellare su foglio elettronico e quindi già pronti per ulteriori elaborazioni all'esterno del programma di origine.

3.2. La simulazione del sistema edificio-impianto

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 questi ultimi anni è cresciuta la consapevolezza dell'importanza del funzionamento a carico parziale e della sua influenza sull'efficienza stagionale delle macchine frigorifere installate per il condizionamento degli edifici. Infatti i refrigeratori sono normalmente dimensionati per il carico di picco e quindi durante la stagione essi funzionano quasi sempre a potenza ridotta.
Per una corretta valutazione di questo comportamento occorre 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.
Con i metodi di calcolo a regime dinamico, introdotti nei precedenti capitoli e utilizzati nella ricerca, ad ogni passo di simulazione è possibile valutare l'efficienza delle macchine frigorifere in funzione non solo dei loro livelli termici operativi, ma anche in base alla potenza richiesta che determina il livello di parzializzazione della macchina. A tale scopo è però necessario implementare un algoritmo in grado di quantificare l'influenza del fattore di carico sull'efficienza.
A questo si aggiunge quanto già affermato nella prima parte di questa trattazione, ovvero che su impulso della direttiva europea EPBD, l'Italia sta procedendo a completare l'impianto delle norme tecniche necessarie per la certificazione energetica degli edifici.
Lo sviluppo attuale riguarda in particolare l'introduzione della valutazione dei fabbisogni energetici per il condizionamento estivo da aggiungere alla valutazione invernale da tempo ormai operativa. In questo caso l'uso di metodi semplificati è ancora diffuso e raccomandato. Anzi per il condizionamento estivo è attualmente previsto l'impiego di una procedura in regime stazionario simile a quella già adottata per il calcolo invernale e basata sul metodo del fattore di utilizzo.
Anche in questo caso, per poter procedere ad una certificazione energetica del sistema edificio-impianto, risulta indispensabile basarsi su indici effettivamente rappresentativi del comportamento stagionale delle macchine frigorifere.
E' importante ricordare che le norme tecniche più recenti in corso di introduzione in Italia per la certificazione energetica sono denominate UNI TS 11300.
La prima parte di tale normativa 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 [6].
La terza ed ultima parte ha invece lo scopo di determinare l'energia primaria necessaria per la climatizzazione estiva[7]. 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 per caratterizzare le prestazioni delle macchine [8].
Si vuole ora usarlo come stima del rendimento stagionale chiamandolo SEER (Seasonal Energy Efficiency Ratio) in conformità a quanto previsto nella Pr EN 14825[9] .
D'altronde in Italia esistono già due norme: la UNI 11135[10] e la UNI 10963 [11]appositamente introdotte rispettivamente per la stima del rendimento stagionale e per stabilire le prove necessarie per ricavare il comportamento della macchina a carico parziale.
Tali norme sono attualmente disattese richiedendo appunto l'esecuzione di prove a carico parziale.
Viene allora qui mostrato come, proprio partendo dai dati già elaborati per calcolare SEER, è possibile ottenere l'efficienza a carico parziale al fine di rendere operativa la UNI 11135.
Senza ulteriori prove è così possibile determinare un rendimento stagionale decisamente più corretto sia nell'ambito della simulazione dinamica che nelle procedure di certificazione energetica.

[6] CTI, Prestazioni energetiche degli edifici, Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale, UNI TS 11300-1, febbraio 2008.

[7] CTI, Prestazioni energetiche degli edifici, Parte 3: Energia primaria per la climatizzazione estiva, UNI TS 11300-3, dicembre 2007.

[8] ARI, Air Conditioning & Refrigeration Institute, Unitary air-conditioning and air-source heat pump equipment, standard 210/240, Arlington Virginia, 1989.

[9] 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.

[10]UNI 11135, Condizionatori d'aria, refrigeratori d'acqua e pompe di calore. Calcolo dell'efficienza stagionale, UNI 2004

[11] UNI 10963, Condizionatori d'aria, refrigeratori d'acqua e pompe di calore. Determinazione delle prestazioni a potenza ridotta, UNI 2001.

3.2.1. L'indice ESEER

Il consorzio europeo EUROVENT ha proposto un indice medio di valutazione denominato ESEER (European SEER).
La procedura di calcolo del ESEER della proposta UNI TS 11300 terza parte che definisce le modalità di determinazione sperimentale di un indice di prestazione stagionale delle macchine frigorifere. Lo scopo di questo indice normalizzato detto appunto ESEER 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 ESEER 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 certamente lo stesso e nemmeno le temperature effettive qualunque sia l'edificio.
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:

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

Tipologia:		**aria- aria**		**acqua- aria**	
prova	carico	ti aria esterna	ti aria interna	ti acqua torre/falda	ti 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	ti aria esterna	tu acqua fan-coil/pannelli	ti acqua torre/falda	tu 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

Tabella 1 - Temperature in ingresso (ti) e uscita (tu) previste per le prove a carico parziale

Le condizioni di prova per la determinazione dei coefficienti di prestazione a carico parziale indicati in (Tabella 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 Tabella 1.
Qui le temperature dell'aria per le varie tipologie di impianti sono indicate con l'indicazione "i" per ingresso nello scambiatore (evaporatore o condensatore). Con "tu 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 esterno è di 35°C e la temperatura di uscita dall'evaporatore è di 7°C 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.

		Tipologia:			
prova	Carico	**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%

Tabella 2 - II Fattori di pesatura per gli *EER* a carico parziale scelti per il calcolo di *ESEER*

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.

In Tabella 2 sono riportati 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 lo scambiatore interno sia ad aria o ad acqua.
La norma specifica differenti procedure a seconda della tipologia di macchina permettendo in alcuni casi di ricavare gli *EER* a carico parziale anche con modalità alternative in cui si prevede un numero limitato di prove. A volte infatti è previsto che partendo solo da misure a pieno carico si possa desumere la resa a carico parziale.
Ad esempio per le macchine aria-aria o acqua aria, nel caso di unità con regolazione on-off (senza intervalli di parzializzazione e senza modulazione), i valori della prestazione a carico parziale sono calcolati utilizzando la seguente relazione:

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

dove:

- EER_{pl}: *EER* a carico parziale
- EER_{fl}: *EER* a pieno carico ma alle stesse temperature del caso a carico parziale
- *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 sempre con regolazione on-off è possibile determinare gli *EER* a carico parziale partendo dai valori a pieno carico per le quattro temperature di Tabella 1 con la seguente relazione:

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

con:

$$Load = \frac{Pc_{fl,A} \cdot X}{Pc_{fl,x}} \tag{4}$$

dove:

- EER_{pl}: *EER* a carico parziale
- EER_{fl}: *EER* a pieno carico nelle stesse condizioni di temperatura relative al carico parziale
- $Pc_{fl,A}$: 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 nei test A, B, C, D (1-0,75-0,5-0,25)
- *Cc*: fattore di degrado (la norma di default assume il valore 0,1).

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 formula 10.

3.2.2. Limiti dell'indice ESEER

Il ESEER è un indice prestazionale della macchina frigorifera ottenuto assumendo delle condizioni convenzionali di funzionamento. La sua introduzione ha il grande merito di aver focalizzato l'attenzione non più solo sull'efficienza nominale a pieno carico come avveniva prima, ma anche sul comportamento a carico parziale. A parità di ipotesi di riferimento per il calcolo di ESEER per varie macchine offerte dal mercato, questo indice permette al cliente un confronto più adeguato delle loro prestazioni. Proprio l'arbitrarietà e la generalizzazione di queste ipotesi impediscono però al ESEER di rappresentare la reale efficienza stagionale di una determinata macchina in un certo contesto operativo. 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 COP 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 ESEER 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 del rendimento di produzione scoraggia il sovradimensionamento delle caldaie. D'altronde sappiamo che senza questa ipotesi cade tutta la teoria del ESEER 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

3.2.3. 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. 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, in applicazione della legge 10/91.
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 nel caso delle macchine frigorifere il *COP* della UNI 11135 coincide con *EER* della PrEN 14825. L'impiego del simbolo *COP* in luogo di *EER* nasce dalla circostanza che il metodo normato si applica anche al funzionamento come pompa di calore della macchina a ciclo inverso. Si è quindi preferito utilizzare per l'efficienza un simbolo con validità più generale.
L'efficienza media stagionale viene qui indicata come COP_s e risulta invece calcolata in modo diverso dal SEER precedentemente visto in PrEN 14825.

3.2.4. 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 *COP* 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. Il *COP* effettivo medio nell'intervallo di tempo considerato (COP_i) si ottiene moltiplicando il *COP* a pieno carico per un coefficiente correttivo *Y* calcolato secondo quanto previsto dalla norma UNI 10963 in funzione del fattore di carico medio.

3.2.5. 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 *COP* medio mensile a pieno carico e la potenza termica massima media mensile con lo stesso metodo previsto nei paragrafi precedenti.
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 *COP* effettivo medio mensile (COP_i) si ottiene moltiplicando il *COP* 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.

3.2.6. Calcolo finale del COP medio stagionale (COP_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 *COP* 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:

$$Q_s = \sum_{i=1}^{n} Q_i = \sum_{i=1}^{n} \frac{Q_{u,i}}{COP_i} \tag{5}$$

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 $Q_{u,s}$:

$$Q_{u,s} = \sum_{i=1}^{n} Q_{u,i} \tag{6}$$

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

$$COP_s = \frac{Q_{u,s}}{Q_s} \tag{7}$$

Il COP_s non risulta quindi pari alla semplice media aritmetica dei COP_i, 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 il COP_s può anche essere espresso come:

$$COP_s = \frac{Q_{u,s}}{Q_s} = \frac{\sum_{i=1}^{n} Q_{u,i}}{\sum_{i=1}^{n} Q_i} = \frac{\sum_{i=1}^{n} (Q_i \cdot COP_i)}{\sum_{i=1}^{n} Q_i} \tag{8}$$

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

3.2.7. 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=COPr/COPa* dove *COPr* è il coefficiente di prestazione a potenza termica ridotta e *COPa* è il coefficiente di prestazione a piena potenza nelle stesse condizioni di temperatura. Analogamente *X=Pcr/Pca* dove *Pcr* è la potenza termica ridotta e *Pca* 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*).

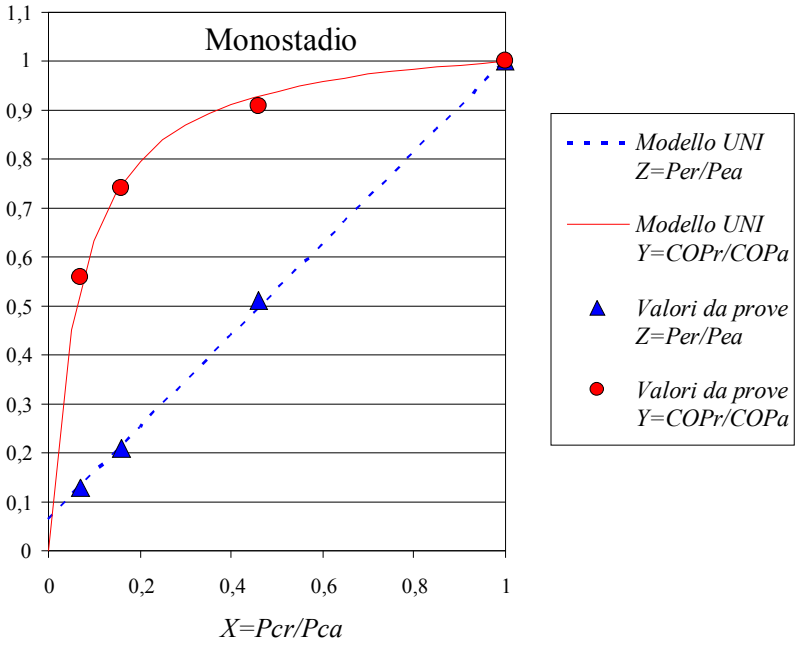


Figura 11. Modelli UNI dei parametri *Z* e *Y* in funzione di *X* e valori da prove per una macchina aria-aria monostadio.

In figura 10 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:

$$CO\,\mathrm{Pr} = \frac{Pcr}{Per} \qquad COPa = \frac{Pca}{Pea} \qquad Z = a \cdot X + b \tag{9}$$

pertanto:

$$Y = \frac{CO\,\mathrm{Pr}}{COPa} = \frac{Pcr}{Per} \cdot \frac{Pea}{Pca} = \frac{X}{\frac{Per}{Pea}} = \frac{X}{Z} = \frac{X}{a \cdot X + b} \tag{10}$$

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 riportati in figura 11.
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 (fmax) ed un valore minimo (fmin).
Raggiunta la fmin un'ulteriore riduzione della potenza può essere ottenuta nuovamente agendo con gli attacca-stacca come nel monostadio.

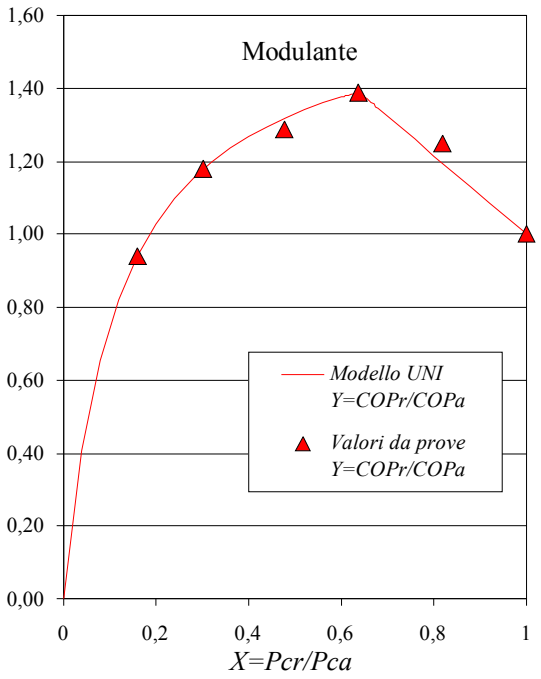


Figura 12. Modello UNI del parametro *Y* in funzione di *X* e valori da prove per una macchina modulante.

In figura 12 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.

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 COP 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 del *COP*.
A livello europeo semplici correlazioni sono state proposte per valutare *Y* in funzione di *X* in assenza di prove sperimentali a carico parziale nel caso di regolazione on-off. Ad esempio per i refrigeratori aria-acqua la prEN 14825 propone il seguente modello matematico:

$$Y = \frac{X}{C_D \cdot X + (1 - C_D)} \tag{7}$$

Dove C_D è il coefficiente di degrado posto uguale a 0,9 in assenza di dati sperimentali.
In figura è riportata pure la curva del modello EN (con C_D uguale a 0,9) il cui scostamento rispetto ad UNI risulta assolutamente accettabile. E' proprio il modello EN che è stato utilizzato per tutte le macchine considerate per le successive valutazioni.
Nel caso di macchine multistadio o con regolazione modulante mediante inverter una curva sufficientemente accurata può essere ottenuta per interpolazione tra quattro punti di prova a carico parziale ottenuti proprio in corrispondenza ai quattro diversi livelli termici già richiesti dalle norme per caratterizzare le prestazioni della macchina. A tale scopo si possono utilizzare le quattro prove comunque già svolte dal costruttore per ottenere l'indice prestazionale *ESEER* .

3.2.7. Calcolo del coefficiente Y partendo dai dati necessari per ESEER

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 13 con curve parametriche in funzione della temperatura esterna molto simili.

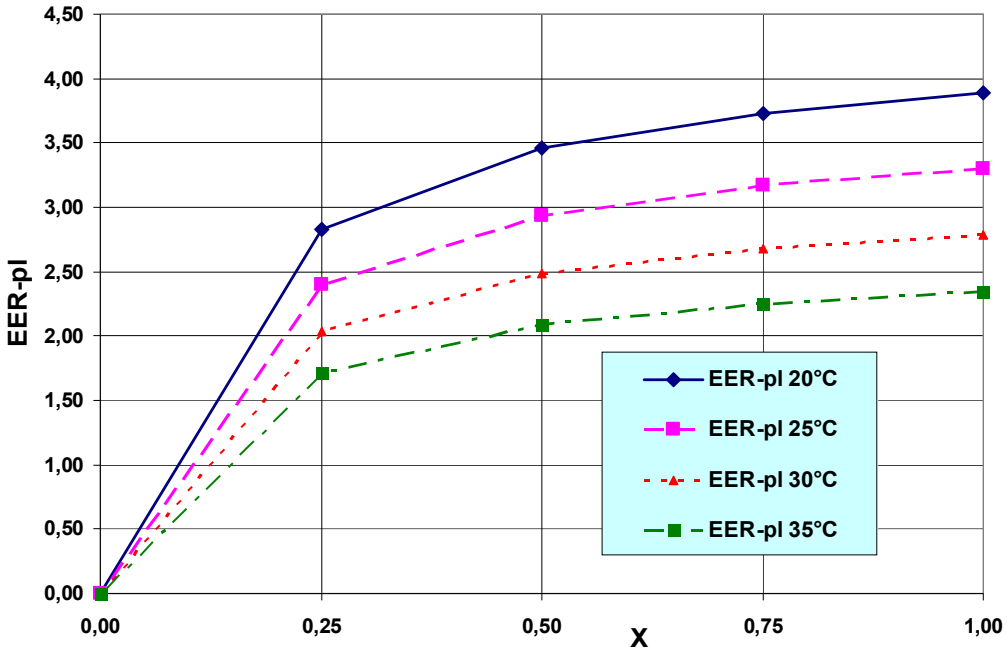


Figura 13. Curve di efficienza a carico parziale per varie temperature esterne.

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….. EER_D già ottenuti per il calcolo del ESEER anche per calcolare ben quattro valori di *Y* più che sufficienti per stimarne l'andamento in funzione di *X*.

Precisamente si ha:

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

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*);
- $EER_{fl,r}$ coefficiente di prestazione a piena potenza alla stessa temperatura di $EER_{pl,r}$.

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 ogni macchina è riportata la tabella con i dati del funzionamento a pieno carico e a carico parziale. Precisamente si riportano la potenza frigorifera ottenuta (Pc) e la potenza elettrica assorbita (Pe) il cui rapporto fornisce *EER*. Infine ogni tabella riporta i valori di *Y* ottenuti proprio dal rapporto tra i due *EER* a pieno carico (*EER-fl*) e a carico parziale (*EER-pl*) nelle stesse condizioni di temperatura.
Per il significato dei simboli si rimanda alla nomenclatura a fine articolo.
Consideriamo anzitutto un refrigeratore acqua-acqua (macchina 1) con un solo circuito frigorifero munito di un compressore scroll.
Le condizioni di funzionamento a pieno carico sono state appunto ricavate dalla documentazione tecnica commerciale normalmente fornita del costruttore, anche i dati a carico ridotto sono stati forniti dal costruttore.
Sono infatti quelli ottenuti con le prove certificate, svolte in laboratori riconosciuti, previste secondo Eurovent/CEN e utilizzate dal costruttore per calcolare il ESEER inserito a catalogo e che in questo caso vale 4,51.

I dati della macchina 1 sono riportati in Tabella 3.

A pieno carico							
	X (%)	Tw,ev (°C)	Tw,co (°C)	Pc (kW)	Pe (kW)	*EER-fl*	
A	100	7	30	13,10	3,17	4,13	
B	100	7	26	13,71	2,85	4,81	
C	100	7	22	14,01	2,70	5,19	
D	100	7	18	14,22	2,60	5,47	
A carico parziale							
	X (%)	Tw,ev (°C)	Tw,co (°C)	Pc,r (kW)	Pe,r (kW)	*EER-pl*	*Y*
A	100	7	30	13,10	3,17	4,13	1,00
B	75	7	26	10,28	2,22	4,63	0,96
C	50	7	22	7,01	1,50	4,66	0,90
D	25	7	18	3,56	0,87	4,10	0,25

Tabella 3 - Prestazioni a pieno carico e a carico parziale con conseguenti coefficienti *Y* per la macchina 1

In figura 14 i riportano invece gli andamenti dei parametri Y e Z calcolati in base alla tabella 3 in funzione di X. Si osservi anche per questa macchina acqua-acqua la linearità di Z in funzione di X già vista in figura 11 per la macchina aria-aria.

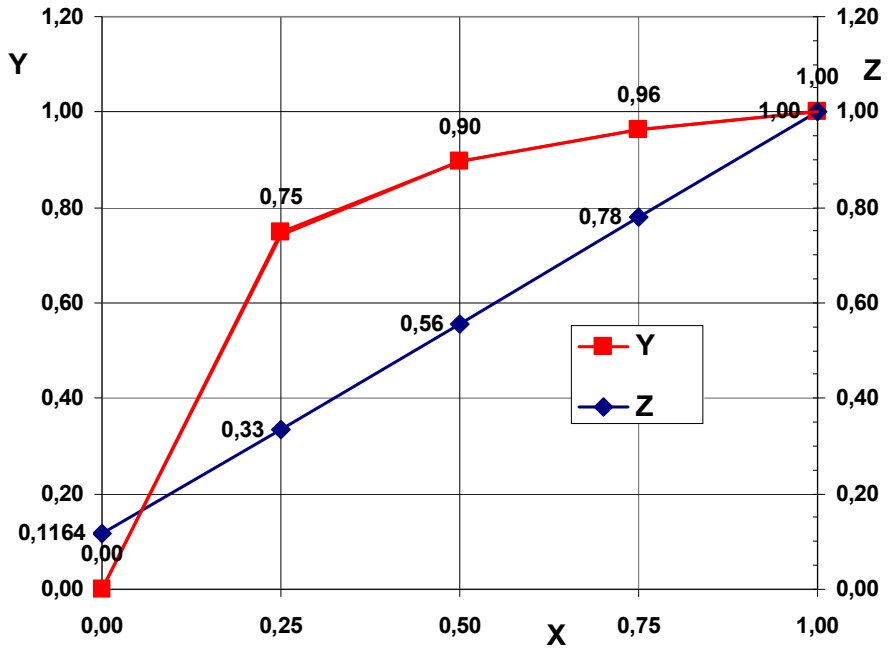


Figura 14. Andamenti dei parametri *Z* e *Y* in funzione di *X* per la macchina 1

Si conferma quindi la conseguente procedura prevista per la UNI 10963 per le macchine con regolazione di tipo on-off.
In Tabella 4 si riportano i dati relativi ad una macchina frigorifera aria-acqua (macchina 2) con un compressore scroll su un circuito frigorifero. L' ESEER di catalogo è 2,81.

A pieno carico							
	***X* (%)**	**Tw,ev (°C)**	**Tw,co (°C)**	**Pc (kW)**	**Pe (kW)**	***EER-fl***	
A	100	7	35	10,40	4,43	2,35	
B	100	7	30	11,08	3,97	2,79	
C	100	7	25	11,69	3,54	3,30	
D	100	7	20	12,28	3,16	3,89	
A carico parziale							
	***X* (%)**	**Tw,ev (°C)**	**Tw,co (°C)**	**Pc,r (kW)**	**Pe,r (kW)**	***EER-pl***	***Y***
A	100	7	35	10,40	4,43	2,35	1,00
B	75	7	30	8,31	3,10	2,68	0,96
C	50	7	25	5,85	1,99	2,94	0,89
D	25	7	20	3,07	1,08	2,83	0,73

Tabella 4 - Prestazioni a pieno carico e a carico parziale con conseguenti coefficienti *Y* per la macchina 2

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 di solito un andamento lineare come si può osservare in figura 15 per questa macchina.

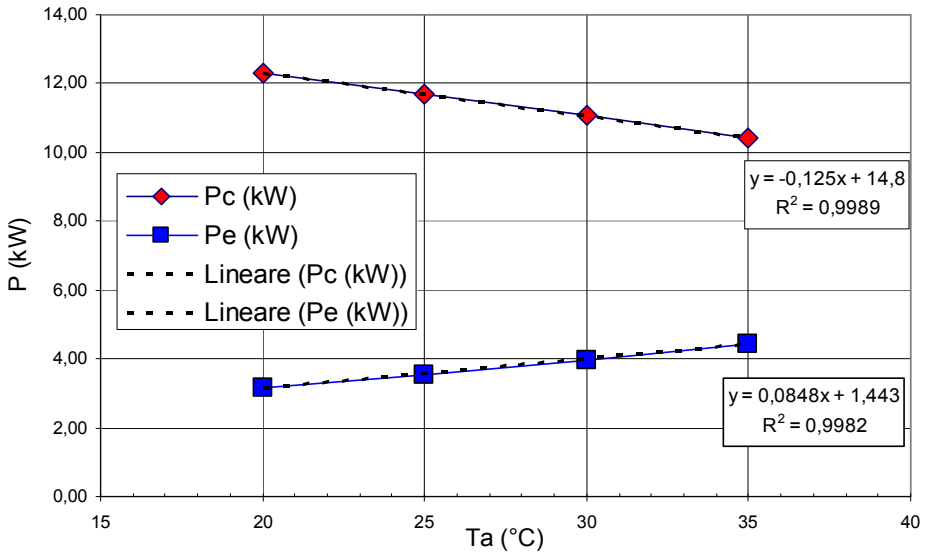


Figura 15. Potenze rese Pc e assorbite Pe al variare della temperatura dell'aria esterna Ta per la macchina 2

Si noti che il coefficiente di correlazione R è prossimo all'unità per entrambe le relazioni.
Anche in questo caso in figura 16 è inoltre raffigurato il grafico dei parametri *Y* e *Z* in funzione di *X*.

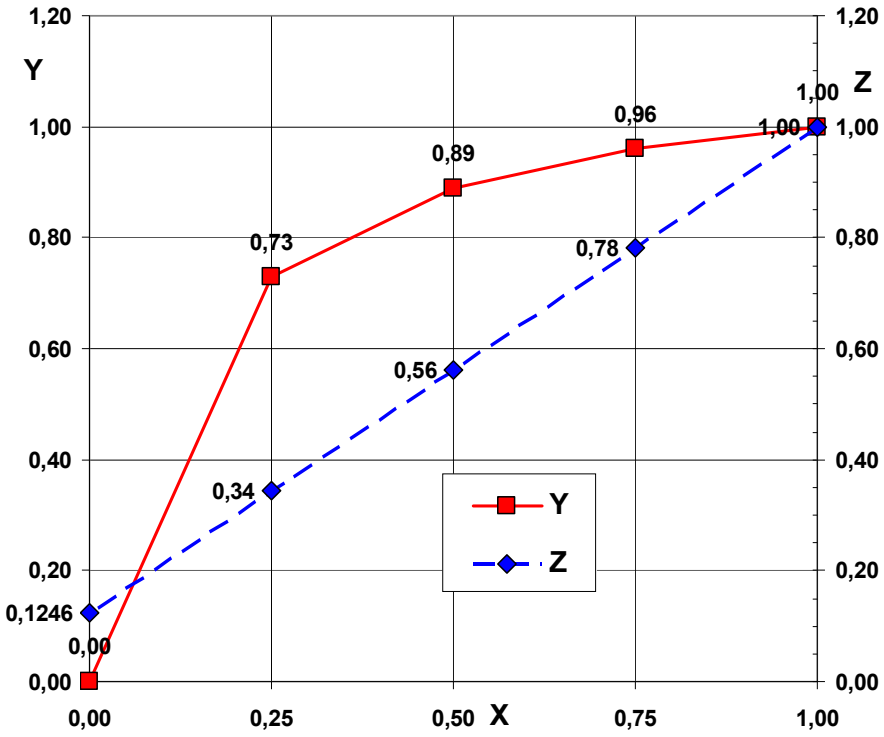


Figura 16. Andamenti dei parametri *Z* e *Y* in funzione di *X* per la macchina 2.

Di nuovo si riconferma la norma UNI 10963. Il parametro *Z* ha una andamento perfettamente lineare e quindi si può utilizzare il modello semplificato già proposto. 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 utilizzato nella norma, solo per questa tipologia di macchine, per ricavare il valore di *Y* tramite una relazione algebrica:

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

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

La modellazione semplificata precedente non è più utilizzabile nel caso di macchine con regolazione della potenza a gradini o modulanti. Avendo già considerato il caso modulante (figura 12) consideriamo ora il caso a gradini. Vediamo quindi un gruppo frigorifero aria-acqua con 4 compressori scroll su due circuiti frigoriferi (macchina 3).

I dati di calcolo della macchina 3 forniti dal costruttore sono riportati in tabella 5.

A pieno carico							
	X **(%)**	**Tw,ev (°C)**	**Tw,co (°C)**	**Pc (kW)**	**Pe (kW)**	***EER-fl***	
A	100	7	35	261,30	95,70	2,73	
B	100	7	30	277,00	88,30	3,14	
C	100	7	25	292,20	81,50	3,59	
D	100	7	20	307,70	74,30	4,14	
A carico parziale							
	X **(%)**	**Tw,ev (°C)**	**Tw,co (°C)**	**Pc,r (kW)**	**Pe,r (kW)**	***EER-pl***	***Y***
A	100	7	35	261,30	95,70	2,73	1,00
B	75	7	30	207,75	57,07	3,64	1,16
C	50	7	25	146,10	31,97	4,57	1,27
D	25	7	20	76,93	14,19	5,42	1,31

Tabella 5 - Prestazioni a pieno carico e a carico parziale con conseguenti coefficienti *Y* per la macchina 3

L' ESEER è 4,40.

In figura 17 anche in questo caso è stata inserita la rappresentazione del parametro *Z* , che diversamente al caso delle macchine con un solo compressore presenta in questa conformazione un andamento non lineare rispetto a *X*.

La semplice interpolazione tra i valori di *Y* trovati con la procedura qui proposta permette certamente anche per le macchine con regolazione a gradino una valutazione accettabile di *Y* nell'intero campo di variabilità di *X*.

Si noti come in un ampio intervallo i valori di *Y* a carico parziale siano maggiori di uno e quindi che una corretta progettazione della macchina con regolazione a gradini permetta in effetti di migliorare la resa a carico parziale rispetto al funzionamento a pieno carico così come avevamo già trovato con la regolazione modulante con inverter.

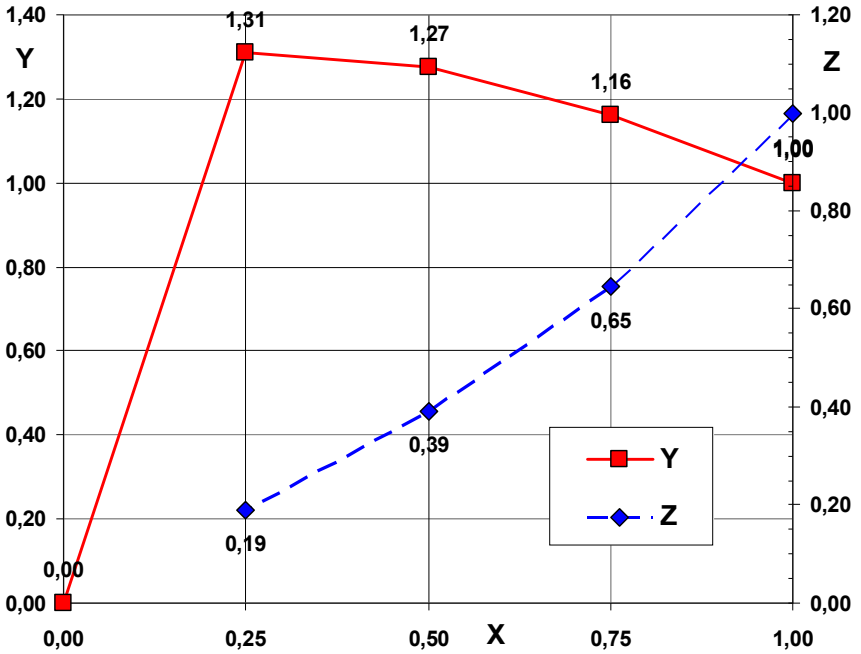


Figura 17. Andamenti dei parametri *Z* e *Y* in funzione di *X* per la macchina 3

Si propongono infine in tabella 6 i dati di calcolo per una macchina acqua-acqua (macchina 4) di potenza più elevata con 2 compressori bi-vite su due circuiti frigoriferi.

A pieno carico							
	***X* (%)**	**Tw,ev (°C)**	**Tw,co (°C)**	**Pc (kW)**	**Pe (kW)**	***EER-fl***	
A	100	7	35	474,50	163,00	2,91	
B	100	7	30	501,60	151,60	3,31	
C	100	7	25	527,00	141,60	3,72	
D	100	7	20	555,50	130,70	4,25	
A carico parziale							
	***X* (%)**	**Tw,ev (°C)**	**Tw,co (°C)**	**Pc,r (kW)**	**Pe,r (kW)**	***EER-pl***	***Y***
A	100	7	35	474,50	163,00	2,91	1,00
B	75	7	30	376,20	106,27	3,54	0,96
C	50	7	25	263,50	64,11	4,11	0,89
D	25	7	20	138,88	29,42	4,72	0,73

Tabella 6 - Prestazioni a pieno carico e a carico parziale con conseguenti coefficienti *Y* per la macchina 4

L' ESEER è 4,03. In figura 18 si riportano i valori di *Z* e *Y* per la macchina 4.

Pure in questo caso anche una semplice interpolazione lineare tra i quattro valori forniti è sufficiente a fornire una buona stima di *Y*.

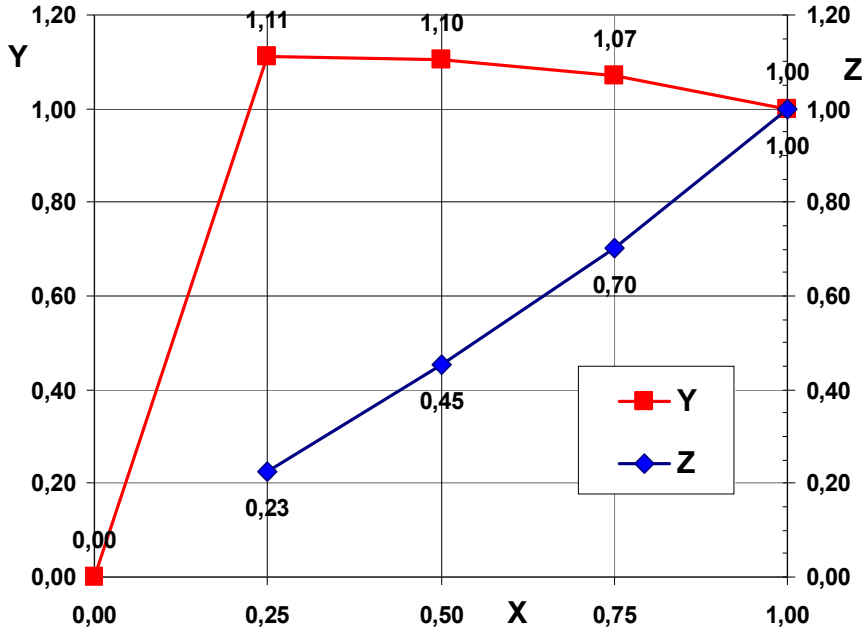


Figura 18. Andamenti dei parametri *Z* e *Y* in funzione di *X* per la macchina 4

3.2.8. Conclusioni

Partendo dai valori certificati di *EER* già disponibili, perché necessari per il calcolo dell' ESEER, il costruttore può ricavare immediatamente quattro valori del coefficiente di degrado per le quattro percentuali di carico (25, 50, 75, 100%). E' quindi sufficiente che nella documentazione tecnica inserisca accanto all' ESEER, questi quattro valori. In questo modo senza ulteriori prove il progettista potrà applicare la norma UNI 11135 per il calcolo del rendimento stagionale da utilizzare per valutare il fabbisogno di energia primaria per il condizionamento sia con i codici di simulazione dinamica che con la procedura in regime stazionario attualmente prevista nell'ambito della certificazione energetica.

Legenda

Tw,ev	temperatura dell'acqua in uscita dall'evaporatore, °C;
Tw,co	temperatura dell'acqua in ingresso al condensatore, °C;
Ta,co	temperatura dell'aria in ingresso al condensatore, °C;

Pca	potenza frigorifera a pieno carico, kW;
Pea	potenza elettrica assorbita a pieno carico, kW;
Pcr	potenza frigorifera a carico ridotto, kW;
Per	potenza elettrica assorbita a carico ridotto, kW;
X	frazione di carico parziale;
EER-fl	efficienza a pieno carico;
EER-pl	efficienza a carico parziale.

PARTE QUARTA: Analisi del comportamento degli edifici storici tramite monitoraggio

INDICE CAPITOLO

4.1. Premesse allo studio 94

4.2. Impianto metodologico per un monitoraggio 96

4.3. Parametri e modelli nel monitoraggio..... 98

4.4. Le fasi del monitoraggio..... 101
4.4.1. Il database 101
4.4.2. Reportistica..... 101
4.4.3. Individuazione di grandezze e di indicatori ambientali ed energetici..... 102
4.4.4. Diagnostica alla luce dei dati raccolti..... 102

4.5. Analisi della qualità dell'ambiente interno a partire dai dati di monitoraggio ambientali..... 103
4.5.1. Le condizioni di benessere dell'utenza..... 104

4.1. Premesse allo studio

Il termine monitoraggio va ad identificare "*l'osservazione a scopo di controllo di una grandezza variabile eseguita mediante appositi strumenti*" nella ricerca oggetto di studio è l' edificio in quanto organismo energeticamente complesso costituito da una struttura portante, un involucro e da dotazioni impiantistiche.
La prestazione energetica dell'edificio dipende ed è influenzata sia dalle specifiche prestazioni delle singole parti costituenti il sistema, sia dalle prestazioni derivanti dall'interazioni reciproche tra le parti del sistema.
La difficoltà nel definire le prestazioni energetiche dell'edificio, già problematica in fase di progetto, aumenta ancor più se queste vogliono essere valutate in fase di esercizio a causa della forte stocasticità delle forze agenti sul sistema, e più in generale dei parametri influenzanti la dinamica energetica dell'edificio.
Il livello di complessità di descrizione del sistema incrementa poi quando l'oggetto di studio non si limita ad un singolo edificio, ma si amplia ad una rete di edifici fino ad arrivare a patrimoni edilizi di grande entità.
Al fine di affrontare la problematica attraverso un approccio strutturato, risulta fondamentale in primis acquisire le informazioni riguardanti quei parametri che maggiormente influenzano il consumo in fase di esercizio, nonché i dati sui consumi reali. Occorre cercare di descrivere nel modo più accurato possibile la "realtà", in modo da esaminarla, evidenziare criticità e ove necessario attuare azioni correttive volte all'ottimizzazione dell'operatività del sistema.
In quest'ottica, bisogna definire con accuratezza i piani di monitoraggio continuo dei fabbricati attraverso cui raccogliere, in database strutturati, le informazioni relative alle dinamiche energetiche reali dell'edificio o degli edifici.
Negli ultimi anni, il forte sviluppo del settore ICT, l'ampia diffusione delle tecnologie wireless e la riduzione dei costi della sensoristica, hanno permesso un deciso ampliamento dei campi di applicazione dei monitoraggi remotizzati e di lungo periodo delle grandezze energetiche e climatiche indoor e outdoor negli edifici. Fondamentale appare trovare un giusto equilibrio tra gli obiettivi del monitoraggio e i costi da sostenere.
Una volta acquisite in modo opportuno le grandezze, queste possono alimentare il processo di elaborazione e analisi dei dati: questa è la parte preliminare del processo diagnostico che ha come obiettivo, tra gli altri, l'individuazione di criticità/anomalie/malfunzionamenti nel comportamento del sistema edificio.
Il processo di elaborazione deve essere in grado estendere il numero di grandezze che possono essere esaminate in fase di analisi: alle grandezze misurate di cui si conoscono i profili temporali e gli andamenti statistici, occorre affiancare grandezze aggregare (grandezze specifiche, grandezze normalizzate, etc.) e indicatori prestazionali che si riferiscano a diversi periodi temporali di investigazione (sub-

orario, orario, giornaliero, settimanale, mensile, annuale) e che consentano un esame completo della dinamica energetica del sistema edificio.
Lo studio di queste grandezze permette lo sviluppo di processi diagnostici per l'espressione dei legami cause-effetto influenzanti il comportamento energetico degli edifici in condizioni di reale esercizio.
Queste tematiche hanno rappresentato un secondo filone di approfondimento della ricerca, esso è complementare alla metodologia della simulazione dinamica precedentemente illustrata.

Il monitoraggio energetico-ambientale è stato esaminato come strumento essenziale per l'ottimizzazione del funzionamento di sistemi impiantistici in fase di esercizio. La tematica è stata affrontata con riferimento a sistemi impiantistici che saranno oggetto della trattazione nel capitolo conclusivo del lavoro di indagine.
La ricerca relativa al primo caso studio analizzato (Ex magazzino 6 IUAV) ha, infatti, riguardato specificamente la gestione e l'ottimizzazione delle prestazioni energetiche del sistema edificio e dei sottosistemi impiantistici nelle condizioni reali di gestione e utilizzo.
L' edificio IUAV che ospita ambienti adibiti alla didattica, per il quale è stata progettata l'architettura del sistema di monitoraggio, rappresentando un potente strumento a supporto della gestione e ottimizzazione energetica degli edifici in fase operativa, mi ha offerto l'opportunità di studio sul campo.
Parallelamente, è stato condotto un approfondimento relativo allo sviluppo di procedure di analisi a supporto di attività diagnostiche, basate sui dati acquisiti dai monitoraggi e finalizzati al miglioramento delle prestazioni energetiche e alla qualità climatica degli ambienti confinati.
Sempre connesso alle logiche di ottimizzazione, l'obbiettivo dello studio è stato finalizzato alla riduzione dei consumi energetici per la climatizzazione ambientale per questa è stata condotto un approfondimento sulle tecniche di modellazione e sulle strategie innovative di controllo, regolazione e gestione finalizzate all'ottimizzazione della prestazione energetica delle tecnologie adottate nella progettazione dell'impianto.

4.2. Impianto metodologico per un monitoraggio

L'obiettivo di un monitoraggio energetico-ambientale di lungo periodo è valutare le condizioni di consumo energetico e di qualità ambientale interna in cui si trova un sistema edificio-impianto.
Sulla base delle misure effettuate possono essere identificate le problematiche relative ad eccessi di consumo di energia o ad un basso livello di qualità ambientale rispetto ai consumi ed, in seconda istanza, possono essere proposti degli interventi atti al risparmio energetico ed al miglioramento delle condizioni ambientali interne.
Come prima fase di un monitoraggio energetico-ambientale deve essere predisposto un piano di monitoraggio che ha la funzione di stabilire, sulla base di un rilievo e dello studio dell'edificio-impianto:

- le grandezze che devono essere misurate;
- la distribuzione spaziale delle misure;
- i tempi di campionamento
- le tipologie e le caratteristiche della strumentazione;
- le modalità ed i tempi di verifica periodica della taratura della strumentazione;
- i possibili output del processo di monitoraggio.

Le grandezze ambientali ed energetiche da monitorare devono essere scelte sulla base di tre elementi:

- obiettivi del monitoraggio;
- caratteristiche dell'edificio-impianto;
- disponibilità economica.

Incrociando le esigenze che derivano da questi tre elementi si possono identificare gli indicatori prestazionali più opportuni e di conseguenza le grandezze che devono essere necessariamente misurate.
I monitoraggi energetici assumono diverse forme di dettaglio in base alla complessità del sistema energetico e sono tipicamente di lungo periodo.
Per poter fornire una buona statistica delle condizioni ambientali outdoor ed indoor, è necessario infatti, che il monitoraggio microclimatico abbia una durata annuale. Questo arco di tempo permetterà di svolgere studi comparativi di differenti tipologie, quali sono quelli giornalieri, mensili, stagionali e di comparare anche le eventuali variazioni rilevate dai sistemi in relazione ai giorni/periodi.
L'acquisizione dei dati interni deve essere ragionata sulla base delle problematiche esistenti e rilevabili.

Per progettare un monitoraggio efficiente ed efficace è importante localizzare un numero di sonde opportuno in base alla volumetria ed alle caratteristiche dimensionali dell'ambiente.
La distribuzione spaziale delle misure viene stabilita a seguito di un'attenta analisi dell'edificio-impianto. In particolare la definizione della griglia di misura si basa sui seguenti passaggi:

- suddivisione dell'edificio in zone omogenee per carichi interni (destinazione d'uso), forzanti climatiche esterne (esposizione) , tipologia di involucro, tipologia di impianto e regolazione;
- scelta dei locali di riferimento per ogni zona omogenea;
- scelta del posizionamento della strumentazione all'interno dei locali di riferimento;
- individuazione dei flussi energetici da monitorare;
- scelta del dettaglio della misura del singolo flusso energetico (usi finali, quadro di piano, in centrale, etc.);
- scelta del posizionamento della strumentazione atta alla misura flussi energetici.

I tempi di campionamento, ovvero la frequenza con cui una grandezza viene misurata e registrata, rappresentano un elemento cruciale per l'esito del monitoraggio, poiché essi influenzano l'incertezza di misura, i costi di monitoraggio (scelta dei sensori, delle modalità di trasmissione dei dati, della memoria per il salvataggio dei dati, etc.) e quindi la qualità ed attendibilità degli output finali.
La scelta dei tempi di campionamento deve essere condotta con attenzione in funzione delle caratteristiche specifiche del caso di studio. .
I possibili output del processo di monitoraggio devono essere definiti fin dalle prime fasi del piano, per poter valutare l'effettiva fattibilità del progetto. La scelta dei sensori in termini di quantità e qualità (caratteristiche metrologiche), l'accuratezza finale della misura e la trasmissione/acquisizione dei dati sono fortemente vincolati dall'uso finale che verrà fatto del dato.

4.3. Parametri e modelli nel monitoraggio

Le metodologie di analisi e interpretazione dei dati monitorati sviluppate nell'ambito della ricerca, sono finalizzati alla valutazione energetica ed ambientale, al fine di operare secondo un processo di tipo inverso (e cioè a partire da dati monitorati) una più attendibile caratterizzazione dell'edificio basata sul suo comportamento effettivo. Il monitoraggio in continuo dei consumi energetici e dei principali parametri dell'ambiente interno (temperatura, umidità relativa, CO2) consente, inaffti, di attivare un processo sistematico e documentato finalizzato ad individuare i possibili interventi di miglioramento di natura tecnologica e gestionale.
I progetti di monitoraggio possono essere classificati in base agli obiettivi, all'approccio sperimentale, al livello di dettaglio del monitoraggio, agli utilizzi, alla procedura di validazione e analisi dei dati, alla frequenza e alla durata dei dati campionati, e alla tecnologia di strumentazione utilizzata.
In tabella 7 sono riassunte le principali caratteristiche dei progetti di monitoraggio di applicazione più comuni.

TIPOLOGIA DI PROGETTO	SCOPI E OBIETTIVI	APPROCCIO GENERALE	LIVELLO DI DETTAGLIO	UTILIZZI
Usi energetici di un edificio	Determinare le caratteristiche di specifici usi energetici di un edificio	Utilizzo di elevati campioni di dati e monitoraggio della domanda energetica o del profilo di ogni uso finale di interesse	Monitoraggio di dati dettagliati riguardo a ogni uso finale. Individuazione delle caratteristiche operative che possono ingluenzare ogni uso di interesse	Previsione del carico di ogni uso energetico. Identificazione e verifica di progetti finalizzati al risparmio energetico
Valutazione di una specifica tecnologia	Misurare le prestazioni sul campo di una particolare tecnologia a servizio dell'edificio	Caratterizzazione energetica del singolo edificio o della specifica tecnologia, del comportamento, degli occupanti e del profilo di funzionamento	Utilizzo di audit dettagliati, monitoraggio di dettaglio, misura delle condizioni microclimatiche interne ed esterne, uso di questionari per gli occupanti. Si possono usare dati con frequenza settimanale, oraria o suboraria.	Valutazione delle prestazioni di una tecnologia, valutazione della prestazione di un'azione di retrofit. Validazione di modelli inversi di previsione
Verifica e misura del risparmio energetico	Stimare l'impianto di un'azione di retrofit energetico, commissioning, o qualsiasi altra azione per stimare i benefici	Il consumo misurato prima dell'azione di retrofi è usato per creare ul modello di base. Il consumo di post retrofit è misurato e la differenza rappresenta la stima del risparmio energetico	Può variare sostanzialmente, includendo verifiche per il potenziale di risparmio energetico, azione di retrofit di una particolare tecnologia, valutazione della prestazione energetice dell'intero edificio, o simulazioni calibrate.	Incentrata su uno specifico campo, edificio, componente o sistema. La quantità e la frequenza dei dati monitorati può variare fortemente a seconda del progetto.
Gestione dell'edificio e verifiche di dettaglio	Risoluzione di problemi. Misura di parametri fisici o gestionali che hannno effetto sulle richieste energetiche o che sono necessarie per la modellazione dell'edificio o di un singolo componente	Tipicamente sono utilizzate misure spot e/o misure di breve periodo con speciali indagini, come misure termografiche, blowerdoor e analisi dei gas.	Focalizzata su uno specifico componente o sistema dell'edificio. La quantità e la frequenza dei dati di monitoraggio può variare molto a seconda del progetto.	Audit energetico. Identificare e risolvere problematiche di manutenzione e gestione, qualità dell'aria interna problemi impiantistici. Commissioning dell'edificio. Individuare variabili di input per la modellazione numerica

Tabella 7 - Esempi di monitoraggio energetico di edifici – ASHRAE Handbook Applications 2007

Nella pratica i progetti di monitoraggio si differenziano nelle seguenti categorie:

- Monitoraggio dei fattori energetici: progetti focalizzati su specifici sistemi energetici o edifici. Il monitoraggio richiede misuratori dedicati per ogni uso energetico finale, e l'analisi richiede la valutazione di tutti i fattori che possono influenzare la prestazione energetica del sistema edificio-impianto (per esempio analisi dei carichi elettrici o termici). A seconda degli obiettivi del progetto, la frequenza di campionamento dei dati monitorati può variare dalla misura spot dei sistemi a pieno carico, alla registrazione nel tempo delle grandezze di interesse ai carichi parziali.

- Valutazione di una specifica tecnologia: progetti che hanno come obiettivo la valutazione della prestazione di specifici sistemi energetici, ad esempio valutazione dei carichi o dei risparmi a seguito di azioni di retrofit . L'obiettivo tipico è la verifica su campo di progetti di retrofit attraverso la stima del risparmio energetico conseguente, cercando di isolare le possibili altre cause di variazione della richiesta energetica non legate all'azione di efficientamento effettuata (come le condizioni climatiche interne ed esterne, le caratteristiche costruttive, o il comportamento degli occupanti). La frequenza di campionamento e la tipologia di dati da monitorare dipendono dagli obiettivi del monitoraggio e dalle condizioni specifiche del sito che si analizza.

- Verifica e misura del risparmio energetico: in questi casi l'obiettivo diventa l'individuazione di una metodologia di monitoraggio per la misura del risparmio energetico. Una valutazione corretta del potenziale risparmio energetico, associato all'azione di retrofit effettuata, richiede il confronto della richiesta energetica prima e dopo l'intervento, e soprattutto una delicata analisi di normalizzazione rispetto a tutte le possibili cause di variazione della domanda energetica non oggetto dell'azione di retrofit operata. (per esempio il clima esterno e l'occupazione) Affinché possa essere misurato l'effetto del solo retrofit attuato, infatti, è necessario rimuovere l'influenza di queste variabili nel migliore modo possibile, minimizzando l'incertezza che deriva dalle tecniche numeriche utilizzate. Tra le cause di incertezza compare sicuramente l'errore di misura o della strumentazione utilizzata, la normalizzazione da eseguire e i modelli utilizzati. Ogni causa di incertezza può essere minimizzata andando a variare il grado di precisione della tecnologia di strumentazione di misura utilizzata, dei modelli numerici, della dimensione e qualità dei campioni dei dati monitorati e delle ipotesi di base.

- Monitoraggio della Gestione dell'edificio: l'obiettivo è la misura dei parametri fisici e operativi che determinano la richiesta energetica dell'edifico e dei

- sistemi che lo servono. Lo scopo in questo caso è l'individuazione delle cause dei problemi e il miglioramento della prestazione energetica dell'edificio, l'effetto di un singolo componente per valutare la sua influenza sulla richiesta energetica globale . Affinché l'operazione diagnostica sia efficace è necessario che la frequenza di campionamento delle misure effettuate sia maggiore del grado di variazione degli effetti che si stanno monitorando.. Frequentemente viene determinata la quantità di energia richiesta quasi sempre istantanea o di poche settimane. Lo scopo della misura può interessare un singolo componente od anche l'intero edificio.

4.4. Le fasi del monitoraggio

Importante appare chiarire le fasi che generalmente caratterizzano un progetto di monitoraggio, esse si dividono in:

1. La struttura del database,
2. Reportistica,
3. Individuazione di grandezze e di indicatori ambientali ed energetici,
4. Individuazione di una tabella di diagnostica.

4.4.1. Il database

L'elaborazione di un database parte dalla necessità di creare una struttura logica con la quale organizzare i dati a disposizione. Man mano che la scala aumenta in termini di numero di edifici e si passa dall'edificio/impianto/sottosistemi dell'impianto ad una scala territoriale più estesa quartiere/città/regione/nazione, il livello di dettaglio e la scansione temporale con cui si raccolgono i dati diminuisce.
L'elaborazione di un database presuppone quindi lo studio a monte delle finalità per le quali il database viene strutturato.
Nell'elaborazione di un data base bisognerà definire : gli obiettivi; l'oggetto dell' l'indagine; gli strumenti di cui si dispone .
Circoscritto il campo d'indagine viene definita la natura del dato, misurabile una sola volta oppure misurabile con un passo temporale molto più ristretto tipicamente di 15 o 60 minuti.
Quando i dati oggetto di analisi sono numerosi è possibile aggregarli attraverso indicatori numerici di sintesi. Le grandezze aggregate consentono lo svolgimento di indagini di tipo comparativo e la verifica tra i dati sperimentali ed un eventuale modello teorico ipotizzato.
Le grandezze aggregate tipicamente misurano la tendenza centrale dei dati (media, mediana) e la dispersione dei dati (varianza e scarto quadratico medio o deviazione standard).

4.4.2. Reportistica

La prestazione energetica degli edifici è valutata attraverso diversi approcci che si differenziano per complessità di analisi e precisione dei risultati ottenuti nelle diverse fasi di vita di un edificio.
L'utilizzo dei dati relativi al "comportamento" dell'edificio, rilevati mediante misure dagli operatori energetici, può soddisfare varie esigenze , ma in ogni caso è essenziale una corretta rappresentazione delle grandezze misurate e una uniformità

di metodo, al fine di descrivere delle quantità che seppure sono assolute risultano confrontabili.
In questo contesto la caratterizzazione e la rappresentazione della prestazione energetica degli edifici avviene attraverso: la determinazione del consumo energetico - della domanda di energia elettrica e della energia autoprodotta.
La metodologia generale è suddivisa in due livelli di analisi e rappresentazione a seconda del grado di dettaglio dei risultati e della complessità delle procedure necessarie allo svolgimento delle stesse.
Il Livello1 di analisi restituisce e riporta i risultati con un passo temporale mensile/annuale
Il Livello2 di analisi fornisce valori con un passo temporale di 15 o 60 minuti distinguendo i dispositivi di uso finale dell'energia.
Per i casi studio analizzati si è optato per l'utilizzo di un passo temporale molto ridotto (livello 2)

4.4.3. Individuazione di grandezze e di indicatori ambientali ed energetici.

Nel caso di analisi di un singolo edificio o uno stock di edifici l'approccio del monitoraggio energetico ed ambientale e delle logiche diagnostiche , soprattutto in ragione della diversa qualità e quantità dei dati a disposizione (numero e tipologie di grandezze monitorate, frequenze di campionamento) è opportuno ricavare delle grandezze aggregate o pre-elaborate di natura ambientale ed energetica (p.e kWhmax, kWhmed. Tmax ecc.) che risultano efficaci nel processo di diagnostica,

4.4.4. Diagnostica alla luce dei dati raccolti

I dati sono poi raccolti in una tabella diagnostica funzionale all'individuazione delle relazioni esistenti tra dati monitorati consentendo di individuare l'evento all'origine del sintomo e le cause che hanno determinato l'evento.
Si procede poi sulla base dell'analisi dei dati della tabella diagnostica alla individuazione delle connessioni esistenti tra ogni causa individuata, i sintomi riscontrati e i dati relativi alla situazione esistente, per giungere a definire strategie decisionali, su cui si fonderà il processo di ricerca di ottimizzazione energetica.

4.5. Analisi della qualità dell'ambiente interno a partire dai dati di monitoraggio ambientali

Dai dati raccolti tramite monitoraggio è possibile effettuare oltre alla valutazione dell'efficienza energetica dell'edificio anche la stima della qualità dell'ambiente interno. Nella direttiva europea 2002/91/CE[1] viene esplicitamente fatto riferimento alla qualità ambientale interna, includendo anche benessere visivo ed acustico.
La norma europea UNI EN 15251 [2] recepisce queste indicazioni e deve essere usato come traccia per la pianificazione di monitoraggi ambientali e la loro attuazione.
L'analisi dei dati può essere condotta verificando le ore di occupazione dell'edificio in cui gli ambienti ricadono in una certa categoria di comfort.
L'edificio può essere classificato in una certa categoria solo se per un numero di ore maggiore del 95% le condizioni microclimatiche registrate ricadono entro i limiti della categoria stessa.
Un ulteriore metodo di analisi è quello dei gradi ora. Il tempo durante cui la temperatura eccede i limiti di un intervallo specificato ,nel periodo di occupazione, è pesato attraverso dei fattori che sono una funzione del numero di gradi centigradi che la temperatura operativa ha assunto al di fuori dell'intervallo di tolleranza indicato.I due metodi descritti per risultare efficaci possono essere usati integrati al fine di avere una visione temporale ed una quantificazione basata su dei fattori di peso nel tempo in cui , nell'edificio analizzato, sono stati rispettati i limiti indicati negli intervalli di benessere.

[1] DIRETTIVA 2002/91/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO del 16 dicembre 2002 sul rendimento energetico nell'edilizia, tra gli aspetti indicati che devono essere compresi nel metodo di calcolo del rendimento energetico degli edifici si trova anche : "i) qualità climatica interna, incluso il clima degli ambienti interni progettato."

[2] La direttiva 2009 /91/CE sull'efficienza energetica in edilizia ha visito come diretta conseguenza la pubblicazione della UNI EN 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'ambente termico all'illuminazione e all'acustica .La norma afferma che non ha senso una dichiarazione di efficienza energetica senza una dichiarazione relativa alla qualità dell'ambiente interno. La norma specifica:

- i parametri relativi all' ambiente interno che influiscono sulla prestazione energetica degli edifici;
- la modalità per definire dei parametri di input relativi all'ambiente interno per la valutazione dell'edificio inteso come sistema e per i calcoli della prestazione energetica;
- i metodi per la valutazione a lungo termine dell'ambiente interno ottenuta, a partire dal calcolo o da risultati di misure;
- i criteri di misurazione che potrebbero essere utilizzati, se necessario, per valutare la conformità per mezzo di un'ispezione;
- i parametri da utilizzare ed esporre negli ambienti interni negli edifici esistenti;
- il modo in cui le diverse categorie di criteri relativi all'ambiente interno possono essere utilizzate, anche se non impone i criteri che devono essere utilizzati.
- La norma si applica essenzialmente agli edifici non industriali per cui i criteri relativi all' ambiente interno sono definiti dall'occupazione umana, in cui l attività produttiva o di processo non abbia un impatto sostanziale sull' ambiente interno.

L'obiettivo ultimo dell'analisi è quello di evidenziare che l'ottenimento di certe condizioni microclimatiche in un edificio è strettamente correlato ai consumi energetici degli impianti. Una corretta progettazione dell'edifico e degli impianti ed una loro accurata gestione sono fondamentali per ridurre i consumi necessari a massimizzare le richieste di comfort dell'utenza.

4.5.1. Le condizioni di benessere dell'utenza

Dopo aver considerato i valori ottimali dei parametri microclimatici, è doveroso tener conto delle condizioni di benessere per l'utenza, riferendosi anche alla destinazione d'uso dei locali. Intendendo infatti il benessere come stato dell'ambiente adatto alla vita, alla salute e allo svolgimento delle attività degli utenti, si comprende come tale parametro risulti strettamente legato all'utente e in particolare alle azioni che lo stesso può svolgere all'interno dello spazio destinato ad una sua specifica funzione.
Avvalendosi inoltre della definizione di benessere proposta dall'Organizzazione Mondiale della Sanità – OMS[3], come *"lo stato di benessere fisico, mentale e sociale e non semplicemente l'assenza di malattie o menomazioni"*, si comprende come esso sia da intendersi come un fattore tale per cui un soggetto esprime soddisfazione nei confronti delle condizioni che lo circondano.
Il benessere racchiude tutti gli aspetti legati alla salute fisica, alla condizione psicologica ed al rapporto uomo-contesto. È importante, pertanto, migliorare la qualità degli ambienti costruiti, avendo cura di adottare soluzioni utili ad evitare la possibilità di insorgenza di stati di malessere nelle persone che usufruiranno gli spazi.
Risulta molto difficile quantificare gli effetti dell'inquinamento e della cattiva qualità dell'aria indoor sulla salute, dato che ogni individuo reagisce in modo diverso in relazione anche allo stati di stress e di discomfort personale, molti sono però i problemi e le patologie riconducibili a una cattiva qualità dell'aria dovuta ad un'alta concentrazione di inquinanti ed il rischio dipende dalla concentrazione e dalla permanenza della persona nell'ambiente (esposizione).
In un ambiente chiuso gli inquinanti prodotti all'interno si sommano a quelli provenienti dall'esterno raggiungendo concentrazioni da 10 a 100 volte superiori rispetto a quelle esterne. Le persone aumentano le concentrazioni di sostanze tossiche anche solo attraverso il loro stesso metabolismo.
È necessario, al fine di risolvere o quantomeno attenuare questo problema, garantire l'uso corretto della ventilazione provvedendo all'ottimale ricambio d'aria in ogni luogo in cui si soggiorna.

[3] La salute è definita nella Costituzione dell'Organizzazione Mondiale della Sanità nel 1948, come "stato di completo benessere fisico, psichico e sociale e non semplice assenza di malattia", viene considerata un diritto e come tale si pone alla base di tutti gli altri diritti fondamentali che spettano alle persone.

Al benessere degli spazi interni, assieme agli aspetti di salubrità degli ambienti, concorrono anche le corrette condizioni di benessere psico-fisico.
Le caratteristiche che determinano il comfort indoor possono essere divise tra quantitative (qualità dell'aria, inquinamento elettromagnetico, radon, qualità dell'illuminazione, rumorosità) e qualitative, ossia misurabili solamente tramite l'esperienza personale diretta.
I requisiti di benessere che permettono di definire la qualità ambientale, sono principalmente i seguenti:

- benessere termo-igrometrico (velocità dell'aria, umidità relativa, temperatura)
- benessere visivo (quantità e qualità della luce presente)
- benessere acustico (protezione nei confronti di rumori fastidiosi)
- benessere respiratorio - olfattivo
- benessere psicologico

Figura 19. Fattori che incidono sul Comfort ambientale

Il benessere termo-igrometrico è raggiungibile solo in una stretta fascia di valori di temperatura, umidità e velocità dell'aria.
La conoscenza dei parametri ambientali non è sufficiente per valutare in modo completo lo stato di soddisfazione di un individuo in un determinato ambiente e luogo. La sensazione di benessere, infatti, è legata anche all'attività fisica svolta dal soggetto ed alle caratteristiche di isolamento termico del vestiario.
Bisogna considerare, inoltre, il fatto che, anche quando le condizioni microclimatiche possono considerarsi ottimali, esiste comunque una certa percentuale di persone insoddisfatte (PPD), dato che la sensazione umana rispetto ai parametri

termici non è la stessa per tutti, ed è necessario analizzare qual è la massima percentuale di persone che ritengono confortevoli una serie di condizioni microclimatiche ambientali. Per valutare correttamente le condizioni microclimatiche di un ambiente bisogna tenere conto, da un lato, dell'equilibrio termico del corpo umano e, dall'altro, dei parametri termo-igrometrici ambientali.
È da notare, poi, come il comfort dipende termicamente da due temperature: temperatura dell'aria e temperatura media radiante dell'involucro dell'ambiente considerato. È possibile raggiungere una condizione di benessere con diverse combinazioni delle due. I sistemi di riscaldamento tradizionali influiscono sulla temperatura dell'aria, i sistemi radianti a parete, a pavimento o a soffitto innalzano, invece, la temperatura radiante, diminuendo quella dell'aria.
Ragionamenti dello stesso tipo possono essere svolti anche per la velocità dell'aria e per l'umidità relativa.
Quando sono fissate l'attività del soggetto, il suo abbigliamento ed un determinato microclima, è possibile definire il PMV (Predicted Mean Value), ossia la valutazione del giudizio che una persona darebbe riguardo le condizioni termo-igrometriche dell'ambiente, variando un parametro termo-igrometrico e mantenendo costanti gli altri.
È interessante constatare il valore di temperatura considerato ottimale da un certo numero di soggetti posti in ambienti a condizioni microclimatiche controllate.
Del PMV sono suggeriti i limiti di accettabilità in ambienti civili: per un valore di $-0,5 < PMV < +0,5$, corrisponde statisticamente una percentuale di persone insoddisfatte minore del 10%. Tuttavia il valore del PMV che rientra in questo intervallo è una condizione necessaria ma non sufficiente a stabilire il comfort ambientale. Esiste, infatti, la possibilità che vi siano alcuni fenomeni, in alcune zone dell'ambiente, che generano discomfort locale:

- elevata differenza verticale della temperatura
- pavimento troppo caldo o troppo freddo
- presenza di correnti d'aria
- elevata asimmetria della temperatura media radiante.

In particolare la presenza di correnti d'aria è influenzata dal valore massimo e dalle fluttuazioni di velocità istantanea.
È importante, poi, tenere sotto controllo il gradiente di temperatura, dato che l'aria tende a stratificarsi con l'aria più calda vicina al soffitto e quella più fredda al pavimento.
Infine è da considerare la differenza di temperatura radiante da parte delle superfici. La sensazione di discomfort, in questo caso, è soprattutto percepibile in inverno dove sono presenti superfici vetrate di notevole dimensione.
Nel caso di edifici storici è necessario tener conto di quanto detto e dei parametri necessari alla conservazione del manufatto architettonico.

Le norme non pongono molta differenza in termini di comfort tra edifici nuovi ed edifici storici.
Con attività leggera, ossia sedentaria, si considerano i seguenti valori di comfort:

- temperatura operativa compresa tra 18°/23° C nel periodo invernale
- temperatura operativa compresa tra 23°/26° C nel periodo estivo
- umidità relativa compresa tra 30%-70%
- velocità dell'aria inferiore a 0,2 m/s
- temperatura di pavimento compresa tra 19° - 26° C (fino a 29° C per pavimenti radianti).
- l'eventuale asimmetria in direzione orizzontale della temperatura radiante dovuta a superfici fredde e calde (ad esempio finestre, radiatori ecc.) deve essere inferiore a 10°C (la misura viene riferita a una piccola superficie planare posta a 0,6 m dal pavimento)
- l'eventuale asimmetria in direzione verticale della temperatura radiante, dovuta in particolare all'irradiazione del 'Pavimento e del soffitto, deve essere inferiore a 5° C (la misura viene riferita a una piccola superficie planare parallela ai piani emittenti, posta a 0,6 m dal pavimento).

Negli edifici storici sussiste maggiore possibilità di discomfort localizzato dovuto a elementi quali:

- pareti poco isolate e, di conseguenza, basse temperature interne e bassa temperatura radiante ,
- pavimenti poco isolati e pavimento freddo, nonché elevato gradiente verticale di temperatura ,
- pareti fredde che causano correnti discendenti con discomfort localizzato ,
- livelli di umidità nell'involucro per risalita capillare o perdite ,
- possibilità di condensa superficiale nei punti freddi della parete ,
- spifferi dovuti alla scarsa tenuta dei serramenti antichi.

Lo spessore elevato della massa muraria, invece, rappresenta una risorsa. In inverno grazie all'inerzia termica, facilita il riscaldamento dell'edificio, in estate, invece, garantisce sfasamento e attenuazione delle oscillazioni di temperatura esterna.
Per quanto riguarda la ventilazione, risulta essere fondamentale per la salubrità dell'ambiente indoor, essa può essere naturale o forzata, ossia regolata da meccanismi impiantistici. La ventilazione naturale può essere utilizzata per garantire i corretti ricambi d'aria, ma anche come mezzo di climatizzazione nel periodo estivo.
L'immissione e l'estrazione di aria sono generate dalle differenze di pressione dovute alla differenza di temperatura tra interno ed esterno e dall'azione del vento.

Essa può avvenire in modo controllato e può essere favorita o inibita in funzione delle scelte progettuali. Oggi è possibile implementare la ventilazione con dispositivi meccanici di ventilazione utilizzando infissi, camini e aperture con dispositivi di apertura meccanici controllati da sensori di anidride carbonica.
Un fattore importante nella valutazione della qualità dell'aria è anche l'umidità relativa, elemento a cui il nostro corpo è sensibile e che è ancora più significativo nel caso di edifici storici, come messo in evidenza anche in precedenza. Livelli troppo alti di umidità relativa portano alla proliferazione di muffe e batteri, ma, d'altra parte, livelli troppo bassi creano situazioni di disagio legati a sensazioni di secchezza delle mucose ed eccessiva traspirazione.

PARTE QUINTA: Casi studio: edifici storici a Venezia

INDICE CAPITOLO

5.1. Le ragioni delle scelte 110

5.2. Ambito di studio : l' ex Magazzino 6 112
5.2.1. Gli impianti interni 117
5.2.2. Le centrali tecnologiche 126
5.2.3. Il funzionamento dell'impianto di climatizzazione 131
5.2.4. La supervisione e il monitoraggio 133
5.2.5. L'Umidità relativa nel magazzino 6 137
5.2.6. La ventilazione controllata 144

5.3. Ambito di studio: ala Sud dell'ex convento dei Tolentini 157
5.3.1. Il sistema edificio-impianto 158
5.3.2. Il modello della pompa di calore 164
5.3.3. Il modello dello scambiatore a terreno 171
5.3.4. Risultati delle simulazioni 175
5.3.5. Confronto: un impianto geotermico e un impianto tradizionale 182
5.3.6. Conclusioni 184

5.4 Caso studio: ex convento dei crociferi 186
5.4.1. Il recupero del Convento dei Crociferi 186
5.4.2. Analisi dei risultati 191
5.4.3. Conclusioni 197

5.1. Le ragioni delle scelte

La precedente analisi normativa individua un dato significativo per il mio lavoro di ricerca: nel Dicembre del 2009 la Comunità Europea con il pacchetto legislativo 20-20-20 targets ha imposto entro il 2020 la riduzione del consumo di energia da combustibili fossili del 20% da conseguire mediante un aumento dell'efficienza energetica, un aumento del 20% della quota di energia fornita da fonti rinnovabili e una riduzione del 20% dell'emissione di gas ad effetto serra e in particolare di anidride carbonica.
Successivamente la riformulazione nel 2010 della direttiva europea Energy Performance Building Directive (EPBD) ha focalizzato il campo di azione nel settore dell'edilizia introducendo la scadenza del 2020 anche per l'obbligo della qualifica nearly Zero Energy Buildings (nZEB) per i nuovi edifici.
Dall'analisi della normativa italiana (vedi capitolo 2.4) si evince come l'Italia recepisca nel 2011 con il decreto legislativo 28, la direttiva europea che demanda ai paese membri la responsabilità normativa. Il decreto 28 ha , infatti, stabilito il raggiungimento di tale obiettivo mediante il ricorso alle energie rinnovabili per coprire una quota considerevole e crescente nel tempo del fabbisogno energetico dell'edificio.
In particolare a partire dal gennaio 2017 la quota coperta da fonti energetiche rinnovabili dovrà essere almeno del 50%. .
Come analizzato nel capito 1.1.1 per raggiungere questi risultati non si può trascurare l'edilizia esistente. Ma chi opera in centri storici o in città caratterizzate da un elevato patrimonio monumentale, come Venezia, si trova poi spesso nella condizione di non poter assolutamente modificare le caratteristiche dell'involucro edilizio esistente visti i vincoli di tutela imposti. Come sottolineato in precedenza, la legge prevede in questo caso di operare in deroga alla normativa energetica in vigore. Resta però il fatto che di conseguenza la domanda energetica legata alle dispersioni attraverso l'involucro cresce, spingendo così i consumi stagionali verso valori intollerabili nell'ambito dell'odierna attenzione al risparmio energetico nell'edilizia.
Rischia così di diventare più pressante una questione generale da molti posta e cioè se valga la pena di valorizzare gli edifici storici destinandoli a funzioni moderne (musei, scuole, residenze) impegnandosi quindi nel loro recupero oppure se conviene mantenerli unicamente per il loro valore monumentale.
Questa seconda soluzione può sembrare la più semplice, ma in realtà il mancato utilizzo di un edificio comporta sempre il forte rischio del progressivo abbandono e infine del degrado stanti comunque i forti costi di esercizio e di manutenzione.
Per rendere più sostenibile la prima soluzione e cioè il riuso, occorre allora pensare di diminuire i consumi finali del sistema edificio-impianto impegnandosi ancor di

più che negli edifici nuovi proprio per la loro criticità dovuta al rischio di una domanda energetica specifica decisamente più elevata da soddisfare.
Uno sforzo particolare va dedicato all'efficienza di produzione del caldo e del freddo e alla riduzione delle altre voci della richiesta energetica, ricercando soluzioni che non siano in contrasto con le esigenze di tutela.
Di seguito si riporta lo studio di tre diversi edifici storici caratterizzati da diverse criticità, differenti sono le soluzioni impiantistiche utilizzate nei tre progetti, diversi sono stati i metodi di analisi e le soluzioni rilevate.
In comune questi tre progetti hanno i forti vincoli di tutela imposti dalla Soprintendenza e una progettazione degli impianti particolarmente attenta al risparmio energetico e ai costi di gestione.
Lo studio delle modalità di integrazione di questi impianti negli edifici storici è perciò parte significativa della ricerca ai fini di un'ottimizzazione del loro funzionamento per ottenere le migliori prestazioni energetiche conseguendo anche un sensibile risparmio economico e il rispetto dei i vincoli imposti dalle direttive europee.

5.2. Ambito di studio : l' ex Magazzino 6

I magazzini Ligabue nascono e si sviluppano alla fine dell' ottocento come magazzini portuali a seguito dell'attività di Anacleto Ligabue che si stabilisce a Venezia svolgendo un' attività commerciale.
Da qui la necessità di dotare il porto di Venezia di magazzini di deposito e stoccaggio per le derrate alimentari.

Figura 20. Vista dei Magazzini dal Canale della Giudecca

Il punto franco, così com'era chiamato il complesso dei magazzini Ligabue, è caratterizzato dalla presenza di diversi capannoni di carattere architettonico denominabile "pre-industriale" con mattoni a faccia vista come altri edifici di carattere industriale e/o manifatturiero dell'epoca presenti nella zona.
L'obbiettivo dell'intervento di recupero sono stati due di questi magazzini, il 5 e il 6 per adattarli a funzioni universitarie.
Questi due magazzini praticamente identici nella forma e dimensioni, costituiscono il doppio corpo centrale , il più importante e visibile del vecchio porto franco portuale. Essi fanno parte del water-front cittadino verso il canale della Giudecca e

forniscono un' immagine di grandi fabbricati sullo sfondo del contesto più antico della città.

Figura 21. Vista dei Magazzini

Nell'estate del 2005 le due università veneziane IUAV e Ca Foscari hanno avviato l'elaborazione del progetto e la realizzazione del restauro dei due magazzini. I lavori sono iniziati alla fine del 2006 per concludersi con il collaudo delle opere nei primi mesi del 2008. Considerati i tempi normali per le autorizzazioni e le difficoltà di operare con un cantiere nell'area storica di Venezia , la velocità della realizzazione è stata fuori dall'ordinario. Essa doveva infatti rispondere ad altrettanto straordinarie necessità di riorganizzazione e razionalizzazione dell'offerta didattica in città.

Committente	Università Ca' Foscari e Università Iuav di Venezia
Progettazione e Direzione Lavori	Iuav Studi&Progetti (ISP) srl
Direttore e coordinatore generale	Arch. Mario Spinelli
Progetto e Direzione Lavori degli impianti	Prof. Ing. Luigi Schibuola

Impresa costruttrice	Ing. Pio Guaraldo spa, Paese (TV)
Impianti meccanici	Fiorese spa, Bassano (VI)
Impianti elettrici	MA.FRA Gestioni srl, Venezia
Costo di costruzione	€ 9.504.000
Costi tecnici e allacciamenti a pubblici servizi	€ 2.010.000
Inizio progettazione	Luglio 2005
Consegna ufficiale dell'opera	4 Marzo 2008
Superficie coperta e climatizzata	6400 m^2
Affollamento massimo di progetto	3520 persone
Potenza elettrica cabina	1250 KVA
Portata aria di ventilazione di progetto	44000 m^3/h
Potenza frigorifera installata	664 kW
Potenza pompa di calore installata	691 kW
Potenza Cladaie installate (dato per singolo edificio)	414+363 kW

Tabella 8 - Dati principali dell'opera

Gli edifici presentano tre piani per un totale di 3210 m^2 e un volume totale climatizzato di 13450 m^3.
In figura 22 sono mostrati una sezione longitudinale e la pianta di uno dei piani.

L'attività sperimentale è stata indirizzata alla messa a punto del sistema di monitoraggio degli impianti di climatizzazione installati nell'ex magazzino 6.
Il magazzino 5 è stato fin dall'inizio destinato all'Università Cà Foscari, mentre il magazzino 6 è , per ora , utilizzato, dall'Università IUAV che prevede un affollamento decisamente inferiore. Dato che si presume venga successivamente restituito a Cà Foscari per un impiego analogo al magazzino 5, gli impianti del magazzino 6 sono stati realizzati in vista dello stesso affollamento. Per i due magazzini quindi gli impianti di climatizzazione sono uguali.

Il progetto individua per ciascuno dei due edifici due nuove aule da 180 posti, dieci aule da 90 posti e otto aulette da 45 posti.
Per il magazzino 6, nell'attuale fase di utilizzo da parte dell'Università IUAV si è tenuto conto delle diverse esigenze legate alla didattica, le aule sono infatti utilizzate sia per lezioni ex-cathedra che per laboratori di progettazione architettonica. In tale contesto si effettua un numero elevato di corsi ma con un minor numero di studenti. In questo caso risulta utile un'alta flessibilità che consenta una riduzione delle aule più grandi ottenuta mediante pannelli interni trasversalmente mobili in grado di modificarne la capienza secondo necessità.
L'utilizzo totale previsto per edificio risulta di 1620 posti massimi disponibili a cui si deve aggiungere il personale docente e di portineria.

L'edificio dispone inoltre di locali di servizio comprendenti la centrale idrica e il depuratore, unici per i due magazzini. Tali locali sono stati dimensionati in base alle esigenze numeriche di abitabilità sopra evidenziate e collocati al di fuori dell'edificio.

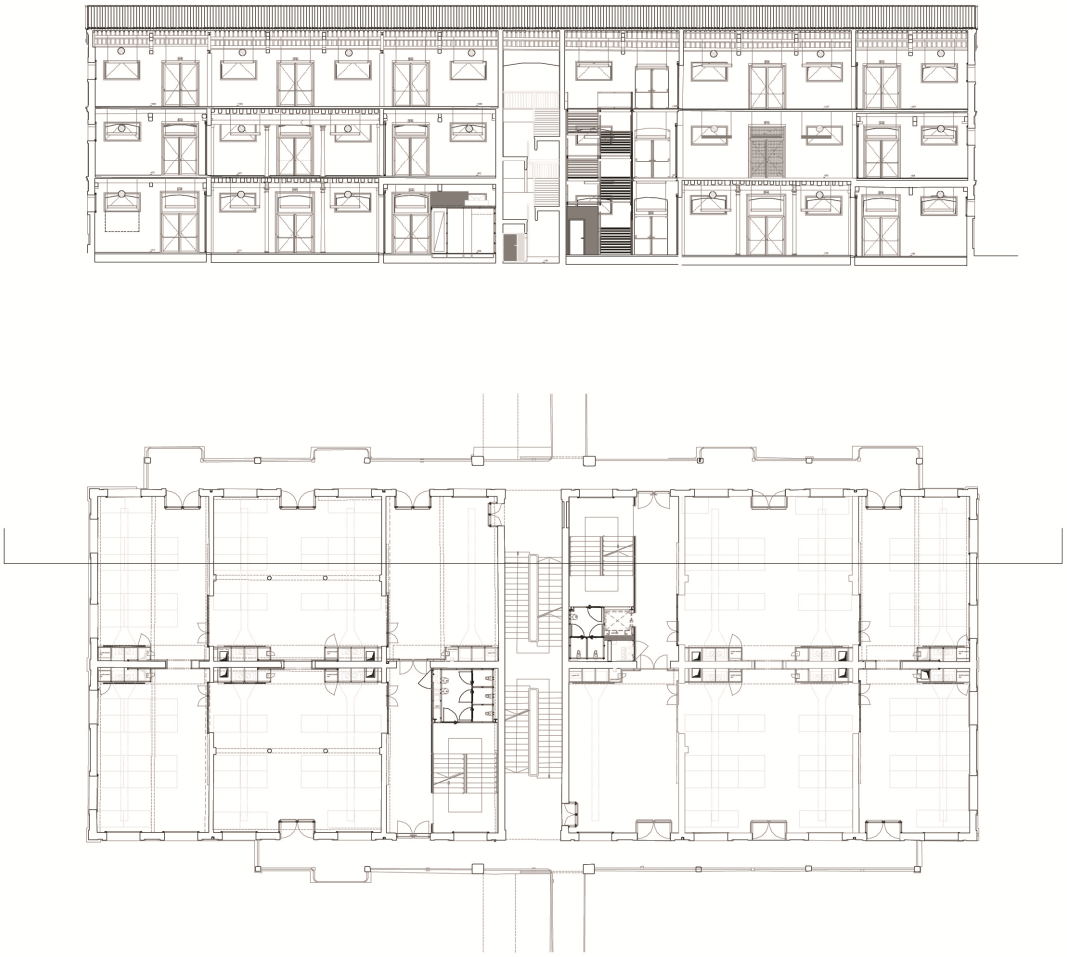


Figura 22. Sezione longitudinale e pianta di un piano dell'edificio

Come è apparso nell'analisi precedentemente sviluppata l'approccio progettuale all'edificato storico comporta un' elevata criticità legata sia alla natura dell'edificio sia all'esigenza di conservarne le qualità documentarie. Perciò numerose sono state anche nel caso dei Magazzini le difficoltà di progettazione correlate ai vincoli presenti:

- vincoli di area disponibile intorno agli edifici per la realizzazione di eventuali locali accessori dato che il complesso confina direttamente con la banchina portuale ancora in uso per le navi da crociera
- vincoli più severi imposti dalla Soprintendenza ai Beni Monumentali, che hanno determinato l'impossibilità di modificare l'involucro esterno degli edifici e ridotto al minimo necessario per la nuova destinazione d'uso, la concessione di modifiche all'impianto generale interno.

Il recupero effettuato si è posto l'obiettivo di coniugare una forte filosofia del restauro conservativo applicato su fabbriche tradizionali ottocentesche (muratura di mattoni a vista e solai frequentemente in legno) con una infrastrutturazione moderna che mira però a sfruttare al meglio i materiali originali presenti.
Alla fine l'intervento ha confermato l'assetto distributivo originario dei magazzini, recuperando gli ampi ambienti collegati tra loro e serviti trasversalmente dai ballatoi in cemento armato già esistenti, senza modificare l'unità tipologica e la natura costruttiva dei corpi di fabbrica.
L'operatività degli spazi per la didattica viene assicurata limitando gli interventi al consolidamento strutturale, alla revisione di tutte le finiture e all'inserimento delle necessarie parti impiantistiche e di servizio, costituendo una dorsale attrezzata sul muro di spina longitudinale che innerva ciascun edificio fino alla copertura .

Figura 23. Sezione trasversale dei magazzini

Le scelte che hanno determinato il progetto del sistema edificio-impianto hanno cercato di soddisfare le indicazione delle più recenti normative puntando a una significativa ottimizzazione delle prestazioni del manufatto.
Il progetto ha puntato all'eliminazione degli sprechi provocati da una gestione dell'edificio non ottimizzata.Per raggiungere l'obiettivo della riduzione dello spreco di energia, infatti, si è optato per l'utilizzo di un sistema di monitoraggio dell'edificio che ha consentito la rilevazione termoigrometrica delle variabili interne attraverso

l'installazione di un sistema di supervisione che ha permesso una gestione attenta dell'impianto nelle sue varie articolazioni .Grazie al sistema di monitoraggio dell'edificio si è approfondita l'importanza di indagare se il picco di occupazione previsto, al fine di dimensionare l'impianto di climatizzazione , sia costante durante le ore di lavoro. Il rispetto dell'umidità relativa interna di progetto, il 50% sia in inverno che in estate, prescritto dal capitolato tecnico, provoca n incremento del fabbisogno di energia. Una causa importante dei consumi energetici dell'impianto di climatizzarne è infatti proprio il controllo dell'umidità, a maggior ragione durante il condizionamento dell'aria in estate e nel caso di edifici con notevole livello di affollamento, che influisce significativamente sul carico latente.
Proprio considerando l'elevato affollamento negli edifici è stata considerata come prioritaria anche la corretta regolazione della ventilazione. La ventilazione è stata controllata mediante un sistema di supervisione molto capillare che è stato direttamente gestito tramite un'unità centrale e che ha permesso la registrazione di tutti i dati di funzionamento rilevati.Tali dati sono stati analizzati e sintetizzati al fine di evidenziare le modalità di funzionamento e le reali prestazioni del controllo di ventilazione nell'edificio.
L'analisi dei dati ha consentito la corretta taratura e la conseguente ottimizzazione della regolazione direttamente in opera e quindi studiata proprio per questo particolare edificio.

5.2.1. Gli impianti interni

Figura 24. Vista dei ballatoi

Ogni magazzino presenta tre piani, divisi al centro dal vano scala principale che permette di accedere ai ballatoi che comunicano con le aule e che quindi separa il fabbricato in due corpi indicati come corpo Nord e corpo Sud (quello verso il canale della Giudecca)
In figura 25 si riporta una vista in pianta dei due edifici a livello del primo piano.

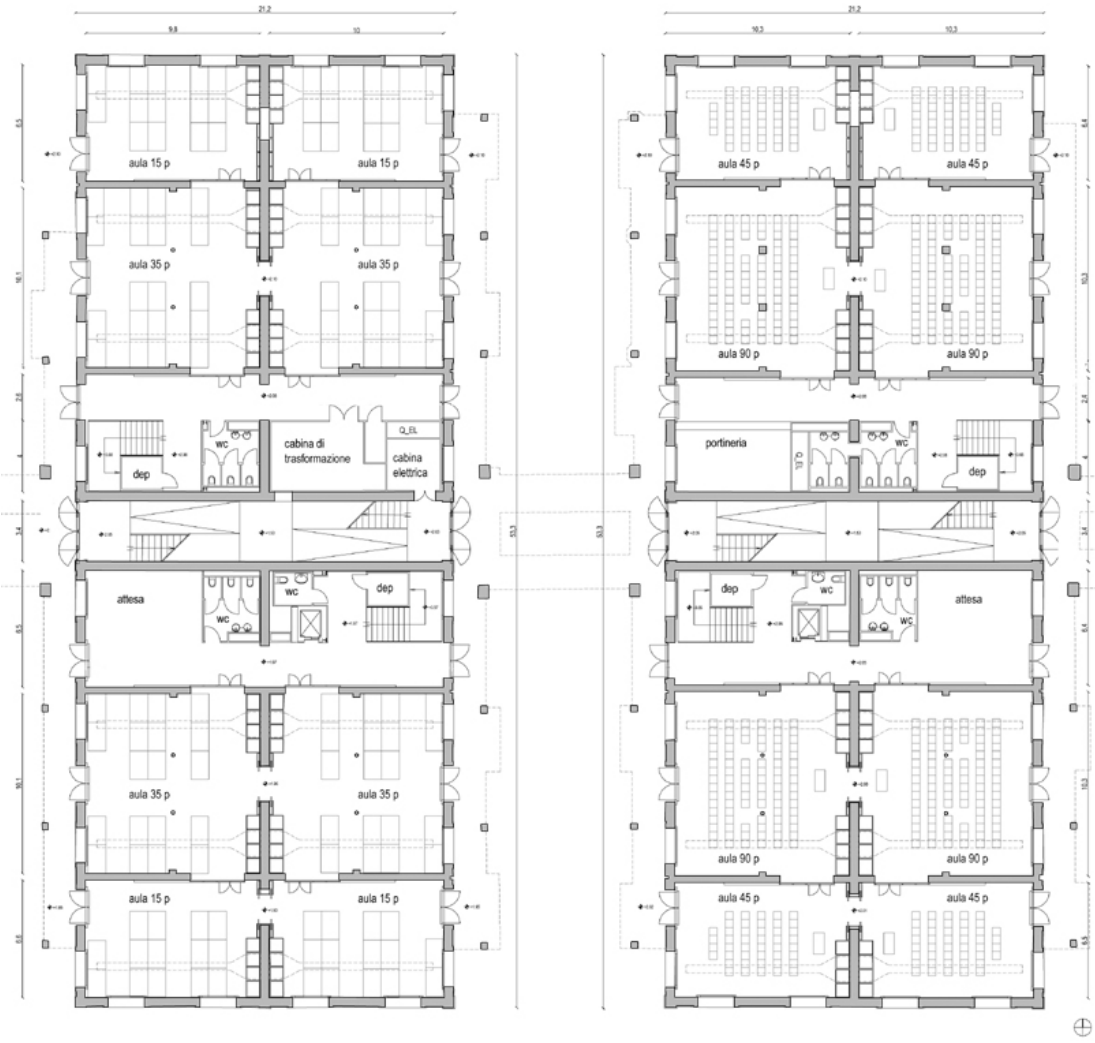


Figura 25. Pianta primo piano dei due magazzini

In ciascun corpo un elemento della struttura modulare è stato utilizzato per un nuovo vano scala interno e per i servizi come evidenziato nelle piante in figura 25 e nella figura 26.
Tutti gli altri spazi presenti nei due edifici sono stati utilizzati per la destinazione

d'uso primaria e cioè spazi per la didattica, data la richiesta decisamente elevata della committenza. In particolare l'affollamento previsto negli ambienti dell'edificio ha determinato in modo univoco la tipologia impiantistica, rendendo centrale la richiesta di ventilazione.
Per ciascun dei quattro corpi di fabbrica dei due edifici è prevista una portata di ventilazione totale massima di 22000 m^3/h con una macchina di trattamento posta sulla copertura dell'edificio e relativi canali di mandata e di ripresa dell'aria disposti all'interno.

Figura 26. Pianta primo piano dei due magazzini

Dati gli esigui spazi tecnici a disposizione, si è reso necessario porre questi canali in prossimità delle bocchette di immissione e ripresa creando problemi di insonorizzazione. Queste canalizzazioni di mandata e ripresa dell'aria primaria, di geometria analoga, sono disposte ciascuna sui due lati del muro di spina centrale all'interno dei vani tecnici realizzati e muniti di mascheramento finale con pannellatura in legno. Precisamente su ogni lato è presente una distribuzione a pettine, di mandata o di ripresa a livello di soffitto del secondo piano da cui si partono quattro colonne per ogni corpo di fabbrica.
Ad ogni piano ogni colonna serve due condizionatori disposti sui due lati del muro

centrale fornendo l'aria di ventilazione nel caso del canale di mandata o prelevando un'equivalente portata di espulsione nel caso del canale di ripresa.

La realizzazione delle aule sfrutta la modularità dei locali già presente nei magazzini. Ciascun modulo ha una dimensione interna media utile di 6,4 m di lunghezza per 8,9 m di profondità.Il piano secondo ha il tetto a falde con travi a vista in legno. Con un modulo di superficie 6,4x8,9=57 m^2 si realizza un'aula da 45 posti, con due moduli l'aula da 90 e con quattro l'aula da 180 posti. Per tutte le aule quindi l'affollamento massimo previsto risulta sempre di 45/57=0,79 persone/m^2, tale valore riulta essere sempre decisamente superiore alla media[1].

Figura 27. Impianti interni alle aule: senza mascheramento al piano 2

La norma UNI 10339 fissa, infatti, un'affollamento standard per le aule universitarie pari a 0,60 persone/m^2 .

[1] La normativa UNI 10339 fornisce indicazioni in merito alla classificazione e la definizione dei requisiti minimi degli impianti e dei valori delle grandezze di riferimento durante il funzionamento degli stessi.
La normativa UNI 10339 viene applicata agli impianti aeraulici destinati al benessere delle persone, installati in edifici chiusi. L'impianto aeraulico deve consentire di raggiungere e mantenere: le condizioni di qualità e movimento dell'aria e le condizioni termiche ed igrometriche dell'aria specifiche delle funzioni assegnate (filtrazione, riscaldamento, raffrescamento, umidificazione, deumidificazione) in accordo con le prescrizioni della UNI 10339. L'impianto deve assicurare:

- un'immissione di aria esterna pari o maggiore ai valori minimi, per ciascun tipo di destinazione d'uso, riferiti o al numero di persone presenti, o alla superficie in pianta, o al volume dell'ambiente
- una filtrazione minima convenzionale dell'aria (esterna e ricircolata) tramite impiego di filtri di classe appropriat per ciascun tipo di locale
- una movimentazione dell'aria (nel volume convenzionale occupato) con velocità comprese entro i limiti prescritti dalla normativa

In queste condizioni e in fase di condizionamento estivo neppure il pretrattamento dell'aria di ventilazione (7 l/s a persona) permette ad un condizionatore con un'unica batteria fredda un controllo dell'umidità prossimo al valore di progetto (u.r. 50%) assicurando contemporaneamente la temperatura interna di progetto (26°C). Conseguente è stata quindi fatta la scelta di utilizzare condizionatori a doppia batteria, una calda e l'altra fredda alimentate ad acqua. Come mostrato in figura 28. La batteria calda di postriscaldamento in presenza di forte affollamento delle aule consente di intensificare la deumidificazione .
L'unità di trattamento aria è installata in alto presso il muro di spina centrale come evidenziato in figura 29. Un'uguale portata viene contemporanea spillata ed espulsa dalla cassetta di ripresa disposta in basso.

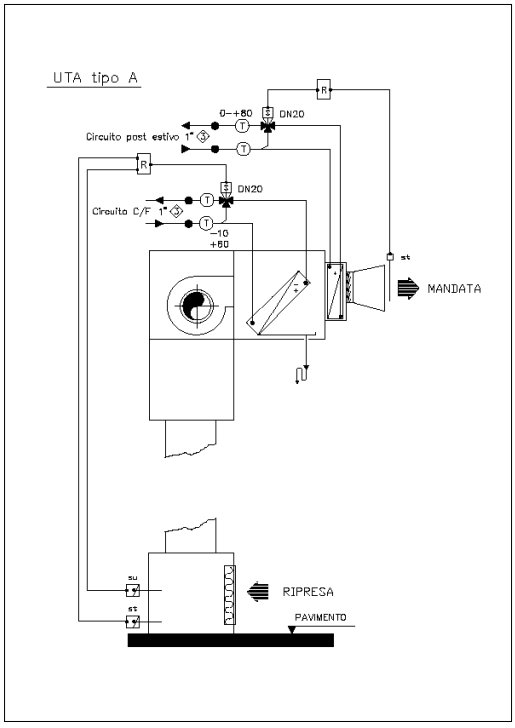


Figura 28. Schema di un unità di trattamento dell'aria interna

La mandata dell'aria in ambiente avviene per ciascuna unità in alto tramite un tratto orizzontale di canale circolare a vista con bocchette rettangolari munite di serrande regolabili. La ripresa avviene in basso tramite un'unica griglia installata sulla relativa cassetta. Le canalizzazioni tra le due cassette di miscelazione e ripresa nonché parte delle macchina sono alla fine mascherate tramite una pannellatura

in legno che nella parte superiore diventa un semplice grigliato come visibile in figura 29.

Figura 29. Impianti interni alle aule: con mascheramento parziale al piano 1

La portata di ventilazione viene adeguata all'effettiva richiesta mediante serrande motorizzate (figura 30) inserite sugli attacchi a ciascuna macchina. Le serrande sono comandate da una sonda di CO_2 installata sulla cassetta di ripresa in grado di indicare quindi la reale occupazione dell'aula.
E' prevista un'unità di trattamento dell'aria per ogni modulo. Di conseguenza le aule possono contenere una, due o quattro unità ciascuna munita della propria regolazione di temperatura, umidità e portata di ventilazione.
Ulteriori armadi condizionatori di rinforzo, privi di aria primaria, sono collocati, dietro un mascheramento, nei corridoi di collegamento con le uscite al piano terra e verso i ballatoi.In ogni edificio in totale sono installati 34 condizionatori da 2000 m^3/h con immissione e ripresa di aria primaria, 6 con sola immissione e 6 senza aria primaria.

Figura 30. Impianti interni alle aule: serrande motorizzate di controllo ventilazione

Figura 31. Le aule al primo piano

Oltre alla climatizzazione e all'idrico-sanitario, la nuova dotazione impiantistica prevede il rifacimento totale dell'impianto elettrico interno di illuminazione e forza motrice, l'impianto antintrusione e di videosorveglianza, il controllo accessi, la diffusione sonora, la trasmissione dei dati e un sistema di supervisione.
Naturalmente è presente negli edifici un impianto antincendio con sistema di rivelazione ed allarme, rete di idranti collegati con la centrale antincendio e relativa riserva idrica.
Anche in questo caso i collegamenti impiantistici verticali sono celati entro lo spazio ricavato presso entrambi i lati della parete di spina centrale di ciascun edificio. Infatti allo scopo di alloggiare tutte le unità impiantistiche e i cablaggi orizzontali e verticali si impiega una parete attrezzata suddivisa in moduli di uguale dimensione e dotati di ante apribili ed elementi smontabili per la manutenzione (figura 33).
L'intero sistema costituisce delle asole tecniche che celano alla vista anche i quadri elettrici di piano, tutti gli apparecchi speciali ed il passaggio dei cavidotti elettrici e dell'aria garantendo la possibilità di movimento tra i piani e all'interno degli stessi.
Ogni aula è equipaggiata secondo le esigenze della moderna didattica. Lavagne tradizionali, schermi per le lavagne luminose e videoproiettori, impianti sonori trovano la loro collocazione proprio sulla parete attrezzata (figura 33)

Figura 32. Le aule al secondo piano

Figura 33. Le aule

Tenendo conto dell'uso diffuso di personal computer portatili da parte degli studenti è da menzionare anche la presenza distribuita nelle aree didattiche di 2100 punti presa di forza motrice e una rete di trasmissione dati con 470 punti presa rete fissa e un impianto Wi-Fi attualmente previsto per un numero stimato di utenti pari a 1150 unità.

Per quanto riguarda l'impianto a quattro tubi per l'alimentazione delle unità di trattamento distribuite nelle aule, non è stato possibile per la rete in partenza dalla centrale termofrigorifera realizzata in copertura una esecuzione analoga ai canali dell'aria primaria. Infatti proprio la presenza della iniziale distribuzione a pettine dei canali ha tolto lo spazio necessario per una simile distribuzione delle grosse tubazioni in partenza dalla centrale all'interno dello spazio tecnico del secondo piano. Anche all'esterno tra le falde del tetto ciò è stato impedito dalla presenza della piattaforma tecnologica già affollatissima. Di conseguenza si è optato per la discesa di tali tubazioni dalla centrale fino al pavimento del piano terra in un cavedio presso il vano scala centrale con successiva distribuzione orizzontale sotto pavimento e risalita dei montanti per servire le unità di trattamento disposte verticalmente incolonnate e a coppie su ciascun piano.

Si è quindi realizzata una distribuzione a pettine a pavimento del piano terra praticamente simmetrica a quella dei canali a soffitto del secondo piano. Questa distribuzione idraulica potrebbe ritornare molto utile in futuro dato che l'area di San Basilio si sta trasformando in un campus universitario di notevoli dimensioni.
In queste situazioni risulta spesso conveniente realizzare centrali termofrigorifere uniche per l'intero complesso eliminando via via nel tempo le centrali autonome esistenti quando obsolete. Il collegamento ad una rete generale è ottenibile semplicemente allacciando il piede colonna dei montanti al piano terra. Sarà possibile alimentare contemporaneamente sia le unità interne che le centrali di trattamento dell'aria primaria poste in copertura.

5.2.2. Le centrali tecnologiche

Una precisa richiesta della committenza ha costretto a dedicare un unico locale interno a vano tecnico per la realizzazione della cabina elettrica.
Analogamente non è stato possibile prevedere nessuna centrale tecnologica fuori terra nell'area esterna di pertinenza dei due manufatti a causa, sia dei vincoli ambientali e monumentali, sia delle limitate aree disponibili e delle esigenze dell'autorità portuale che ha giurisdizione sull'intera zona.
In aggiunta a queste esigenze anche ulteriori vincoli archeologici hanno limitato la realizzazione di locali interrati alle sole centrali idrica, antincendio e al depuratore. Di conseguenza le due centrali termofrigorifere, uguali per ciascun edificio, sono state necessariamente realizzate in copertura.
Anche in questo caso la precisa richiesta della Soprintendenza è stata quella di non alterare la struttura dei tetti a falde e di ridurre al minimo l'impatto visivo soprattutto dal canale della Giudecca. Si é quindi dovuta evitare la realizzazione di coperture sopra le macchine installate e limitare al minimo l'altezza di quest'ultime.
La soluzione consiste nella realizzazione di una pedana metallica installata tra i due tetti a falde che si appoggia sul muro di spina centrale ottocentesco così come evidenziato in figura 34. Questa decisione ha creato un notevole problema strutturale : le macchine istallate pesano parecchie tonnellate e vibrano quando sono in funzione e quindi non possono gravare sulle falde esistenti dei tetti.
Due centrali di trattamento aria primaria da 22000 m^3/h sono poste sui due lati esterni della pedana ad un distanza dai bordi estremi concertata con la Soprintendenza. Ciascuna ha di fronte il relativo modulo di espulsione/recupero.
Questa soluzione è stata resa necessaria dalla limitata larghezza della pedana e dal vincolo di limitare al minimo l'altezza della macchina e dei canali. Per gli stessi motivi la decisione di utilizzare un sistema di recupero a doppia batteria.

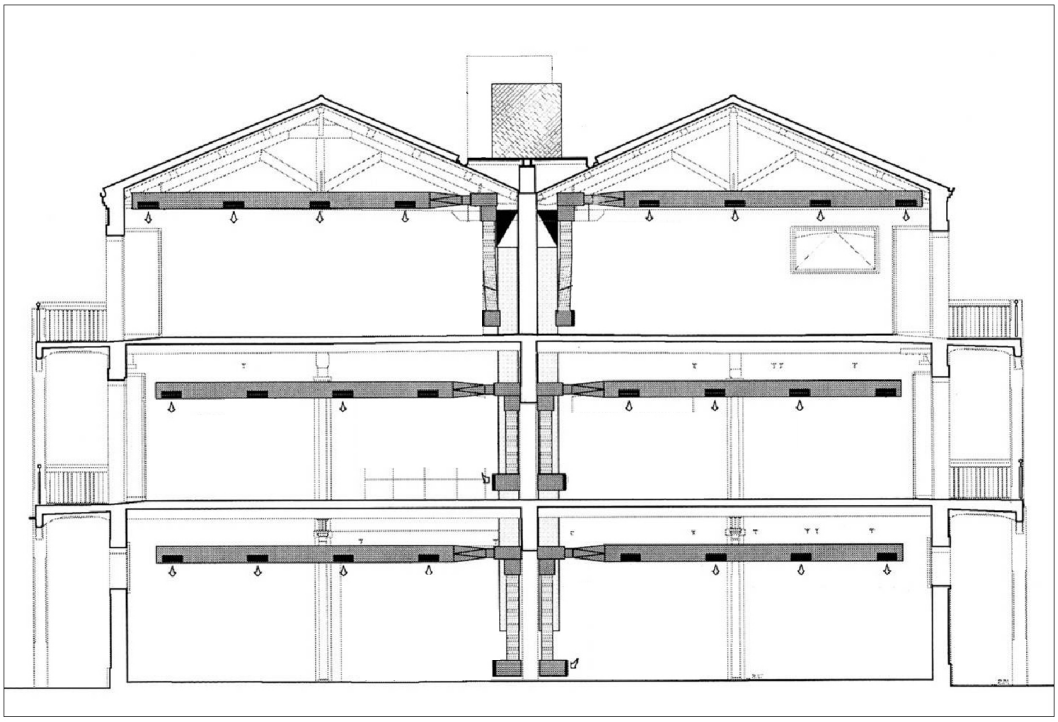


Figura 34. Gli impianti

A valle del recupero interno l'aria di una delle due centrali viene espulsa in corrispondenza delle prese d'aria del gruppo frigorifero/pompa di calore permettendo così un ulteriore recupero (termodinamico) quando il gruppo è in funzione.
La velocità dei ventilatori di mandata e di ripresa delle centrali di trattamento dell'aria sono regolate mediante inverter comandate da pressostati differenziali. In questo modo il funzionamento dei ventilatori si adegua all'effettiva richiesta di ventilazione in base all'apertura delle valvole motorizzate che regolano l'afflusso di aria alle unità di trattamento dell'aria installate all'interno.
Nella zona più centrale della pedana è installata la pompa di calore aria/acqua ad inversione di ciclo con una potenza frigorifera nominale di 664 kW, acqua fredda con salto 7-12°C, in fase riscaldamento una potenzialità nominale di 691 kW, acqua 40-45°C.
In fase raffreddamento è previsto il recupero parziale dal desurriscaldamento del refrigerante di una potenza di 183 kW (salto 40-45°C).
Il peso della macchina in funzionamento supera le sette tonnellate.
Grande attenzione è stata dedicata al funzionamento a carico parziale anche per l'impossibilità di installare un accumulo d'acqua adeguato da utilizzare come volano termico inerziale. La macchina, funzionante con R407C, presenta 12 gradini di parzializzazione realizzati con 12 compressori ermetici tipo scroll.

Figura 35. Gli impianti

La parzializzazione della macchina risulta molto efficiente data anche la presenza di due soli scambiatori lato impianto ed un unico scambiatore lato aria. A carico parziale le superfici di scambio risultano sovradimensionate con benefica influenza sull'efficienza della macchina.
Anche la velocità e quindi i consumi dei ventilatori si adeguano al carico. La macchina è in versione super silenziata essendo disposta direttamente sopra le aule del piano secondo. Realizzata per installazione esterna in ambiente marino aggressivo, è munita di protezione antigelo e naturalmente di supporti antivibranti alla base molto efficienti.
In alternativa alla pompa di calore sono state installate dua caldaie a gas metano a condensazione di tipo modulare a basamento previste per installazione esterna. Le potenze al focolare sono rispettivamente di 363 e 414 kW. Nel periodo inverna le queste caldaie lavorano in alternativa alla pompa di calore come spiegato più avanti.
Nel periodo estivo vanno in soccorso, se necessario, del recupero termico dal gruppo frigorifero per assicurare il post riscaldamento nelle unità di trattamento aria interne.

La produzione dell'acqua calda per usi sanitari avviene invece mediante bollitori elettrici, due per edificio, disposti sopra i bagni del secondo piano proprio per evitare il più possibile l'uso delle caldaie nel periodo estivo. D'altronde il consumo di acqua calda è limitatissimo. E' dovuto infatti solo ai lavabi presenti negli antibagni dei servizi igienici. Data l'attenzione alla riduzione degli sprechi di acqua, tali lavabi sono muniti di rubinetto monocomando temporizzato con valvola termostatica a monte che miscela l'acqua calda e fredda in modo da assicurare la temperatura minima richiesta per il semplice lavaggio delle mani.

Figura 36. Gli impianti

L'accesso alla pedana tecnologica è garantito dall'interno tramite un sistema di scale retrattili installate sopra un locale servizi igienici che sfociano su un'apertura a botola sul tetto in prossimità dell'area centrale in cui sono installate le pompe e i quadri elettrici.
All'estremità Nord della pedana è poi presente un paranco motorizzato, normalmente coricato per motivi estetici, ma immediatamente raddrizzabile in caso di necessità di sollevamento di componenti quali pompe o grosse valvole.
L'assenza di una protezione collettiva e l'aggressività dell'ambiente marino ha imposto l'utilizzo di lamiere in acciaio inox sia per i pannelli di tamponamento di tutte

le macchine che per gli armadi contenenti le regolazioni e i quadri elettrici.
Analoghe scatole protettive individuali sono presenti per i gruppi di pompaggio e le valvole di regolazione.
In figura 35 e in figura 36 si presentano, per maggiore chiarezza, alcune immagini della pedana tecnologica.

Esiste un unico accesso per tutte le centrali da un vano con scala di discesa normalmente coperto da una griglia carrabile come evidenziato in figura 34 in modo da ridurne al minimo la visibilità.

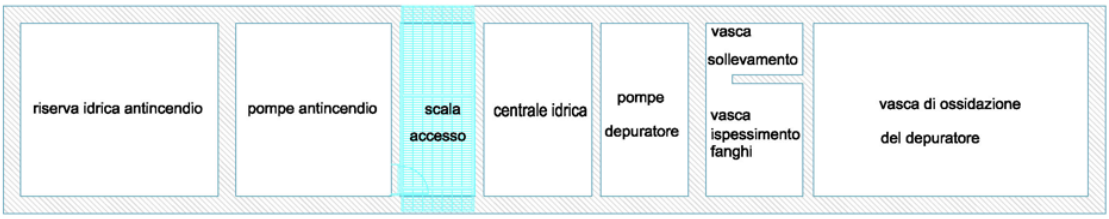


Figura 37. Schema delle centrali tecnologiche interrate

Dato l'elevato affollamento e gli spazi limitati si è dovuto scegliere un depuratore particolarmente efficiente basato su un reattore che opera secondo sequenze cicliche automatiche nello stesso bacino.
Ogni ciclo è costituito da tre fasi: aerazione, sedimentazione e scarico.
Il trattamento è quindi di tipo aerobico a massa sospesa e segue lo schema di processo a fanghi attivati ad aerazione prolungata.

Figura 38. Griglia di accesso delle centrali tecnologiche interrate

La cabina elettrica è installata al piano terra del magazzino 6 e con una potenza di 1250 kVA assicura l'alimentazione ad entrambi gli edifici. Un impianto di ventilazione forzata interviene in caso di necessità per evitare sovratemperature interne in ausilio alla ventilazione naturale.

5.2.3. Il funzionamento dell'impianto di climatizzazione

Lo schema funzionale della centrale termofrigorifera di ciascun edificio è presentato in figura 39.

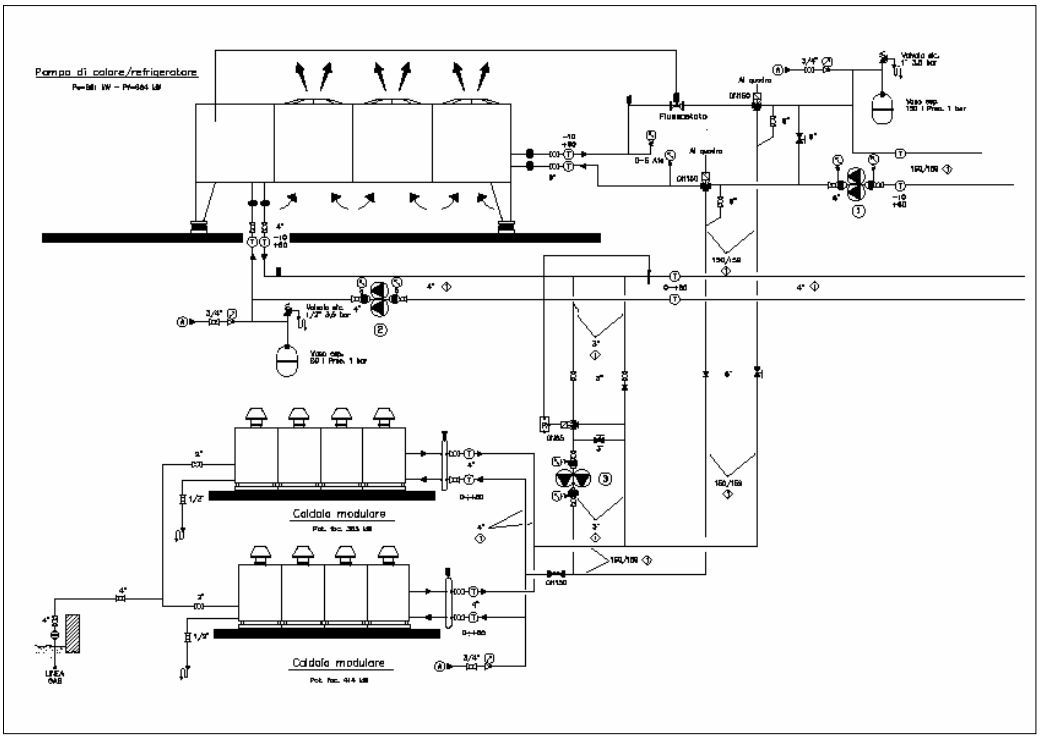


Figura 39. Schema della centrale termofrigorifera

Durante il periodo di riscaldamento è attivo solo il circuito principale azionato dalla pompa (1) che alimenta le batterie di pre e postriscaldamento delle due di centrali di trattamento dell'aria primaria e le batterie principali di tutte le unità di trattamento interne. Tale circuito è normalmente collegato con la pompa di calore.

Nel periodo invernale la pompa di calore permette nelle fasce orarie e nei periodi climatici più favorevoli un considerevole risparmio energetico ed economico rispetto all'uso delle caldaie a gas. Occorre però ricordare che dato l'impegno di potenza elettrica totale dei due edifici, siamo in presenza di tariffa elettrica multioraria e quindi in presenza di una forte differenziazione del costo dell'energia elettrica nelle diverse fasce.Per queste motivo nelle ore di punta invernali soprattutto nei periodi più freddi può risultare più conveniente l'utilizzo delle caldaie.
A questo si aggiunge che la potenza della pompa di calore è conseguente il dimensionamento della macchina come refrigeratore estivo. Di conseguenza nel clima più rigido e in caso di richiesta massima di ventilazione la sua potenza termica non è sufficiente.

Anche in questo caso è previsto il passaggio al funzionamento con le caldaie in base al segnale di sonde di temperature inserite sul circuito.
L'alternativa è comandata dal sistema di supervisione che spegne la pompa di calore e devia il circuito sulle caldaie mediante valvole motorizzate a tre vie.
La presenza della miscela antigelo (acqua e glicole) è limitata ai soli circuiti di recupero a doppia batteria mentre in tutti gli altri circuiti primari e secondari si ha la presenza di sola acqua per evitare la penalizzazione di resa dovuta ai più ridotti coefficienti di scambio termico. Pompa di calore e caldaie sono macchine munite di protezione antigelo.

Per le centrali di trattamento aria e i circuiti esterni, è previsto che anche nei periodi di spegnimento degli impianti, di notte e fine settimana, se la temperatura esterna scende sotto un certo valore, partono le pompe e si aprono le valvole a tre vie delle centrali di trattamento aria in copertura per consentire la circolazione interna.
Nel periodo estivo il circuito principale è collegato al gruppo che lavora in refrigerazione. Nelle centrali di trattamento dell'aria primaria interviene solo la batteria fredda.
L'aria di ventilazione subisce quindi in copertura solo un pretrattamento di raffreddamento e deumidificazione e viene così inviata fredda nelle unità di trattamento interne dove si miscela con l'aria ripresa abbassandone la temperatura.
In questo modo si cerca di sfruttare il più possibile il forte consumo energetico per la deumidificazione dell'aria di rinnovo. La batteria fredda dell'unità interna interviene per abbassare la temperatura ambiente fino al valore impostato e, solo se richiesto dal controllo di umidità interno, spinge ulteriormente il raffreddamento. In questo caso a valle interviene la batteria di postriscaldamento che evita che la temperatura di mandata e quella ambiente scendano al di sotto dei limiti impostati.
Le batterie di postriscaldamento delle unità interne sono alimentate dal circuito di recupero parziale del gruppo frigorifero. Tale circuito è quindi attivo solo nel periodo di condizionamento estivo.

Le caldaie intervengono in aiuto del recupero quando questo non è sufficiente ad assicurare i postriscaldamenti. A tale scopo è presente un circuito con valvola a tre vie modulante comandata da una sonda che controlla la temperatura di mandata del circuito di recupero.

5.2.4. La supervisione e il monitoraggio

Ogni edificio è dotato di una postazione centrale, remotabile via rete, da cui è possibile agire sul sistema di supervisione.

Figura 40. Schermate della supervisione:planimetria di piano

La supervisione è suddivisa in più sezioni che riguardano l'impianto elettrico generale, l'impianto di illuminazione e forza motrice, rilevazione incendi, antintrusione e videosorveglianza, diffusione sonora. Il software permette la visualizzazione e l'intervento sulle apparecchiature rappresentate sulle planimetrie dei vari piani degli edifici. Tutti gli eventi e lo stato degli apparecchi vengono registrati in un'ampia banca dati facilmente esportabile. Degna di nota nell'impianto elettrico generale è la misura in continuo dei dati relativi al consumo dell'intera cabina, dei

singoli edifici suddivisi fra consumi interni e centrali in copertura. A questo si aggiunge la misura del consumo elettrico di ciascun gruppo frigorifero
La registrazione, ad intervalli di 15', di tutte queste misure dà un contributo importante al monitoraggio degli impianti.Particolare attenzione è rivolta infatti alla supervisione dell'impianto di climatizzazione sia all'interno che per la centrale in copertura.
Cliccando sulla sua immagine nella planimetria di ciascun piano si accede alla schermata di controllo della singola unità di trattamento aria installata all'interno (figura 40/41).

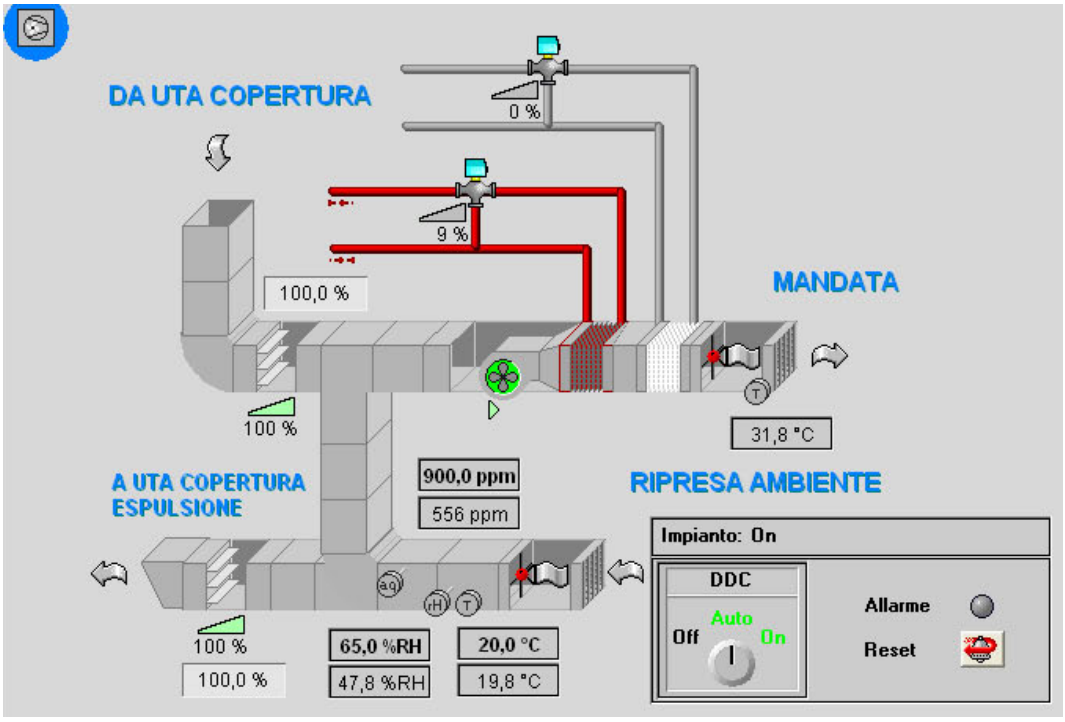


Figura 41. Schermate della supervisione:schema di unità di trattamento aria

Al controllo dello stato, delle temperature dei fluidi e ambiente e degli allarmi si aggiunge la possibilità per il gestore di modificare direttamente i parametri di funzionamento.
Precisamente per l'ambiente l'umidità relativa e le temperature massima e minima estiva ed invernale, temperatura massima e minima di mandata, il tasso massimo di CO_2 (ppm) che comanda la modulazione della ventilazione, l'apertura percentuale minima delle serrande motorizzate comunque assicurata. In questo modo sono facilmente impostabili e immediatamente modificabili in base anche al giudizio dell'utenza.

Come insegna l'odierna scienza del benessere è possibile d'estate assicurare condizioni di comfort anche per umidità relative interne ben superiori al fatidico 50% di progetto.
Con un'umidità relativa al 60% si può avere una buona condizione interna e contemporaneamente una sensibile riduzione dei consumi.
Questa riduzione riguarda non solo il minor fabbisogno frigorifero, ma anche la possibilità di provvedere al postriscaldamento utilizzando solo il recupero parziale evitando l'intervento delle caldaie in estate.

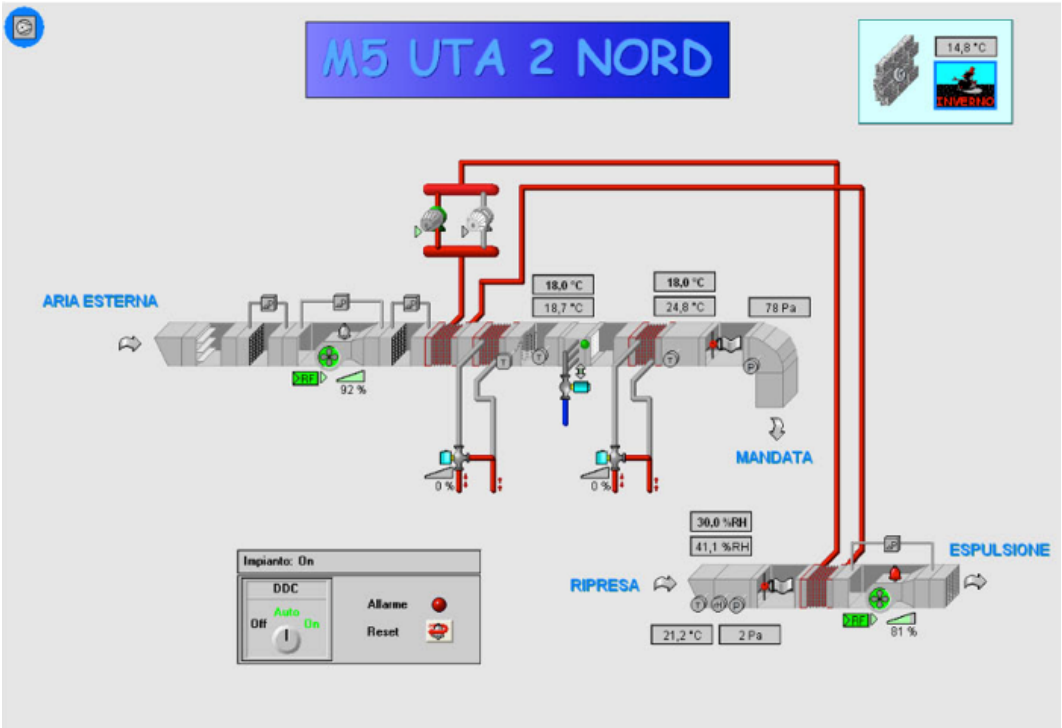


Figura 42. Schermate della supervisione:centrale di trattamento aria primaria

Considerazioni analoghe riguardano anche l'impostazione delle temperature per il post riscaldamento.
La supervisione delle centrali in copertura riguarda tutti i parametri di funzionamento delle centrali di trattamento dell'aria, delle caldaie e del gruppo frigorifero .
La registrazione delle temperature dell'acqua calda o fredda misurate in ingresso ed uscita dalle macchine in aggiunta alla conoscenza delle portate delle pompe, costanti in fase di funzionamento, permette il calcolo delle potenze termiche e quindi con il dato del contemporaneo assorbimento elettrico anche l'efficienza di

produzione del caldo e del freddo.
In aggiunta viene misurata e registrata anche la temperatura dell'aria esterna. Infatti Il passaggio da funzionamento con pompa di calore alle caldaie avviene in base al controllo della temperatura esterna che viene continuamente confrontata con una temperatura limite al di sopra della quale conviene lavorare con la pompa di calore mentre al di sotto di tale valore vengono attivate le caldaie a condensazione.

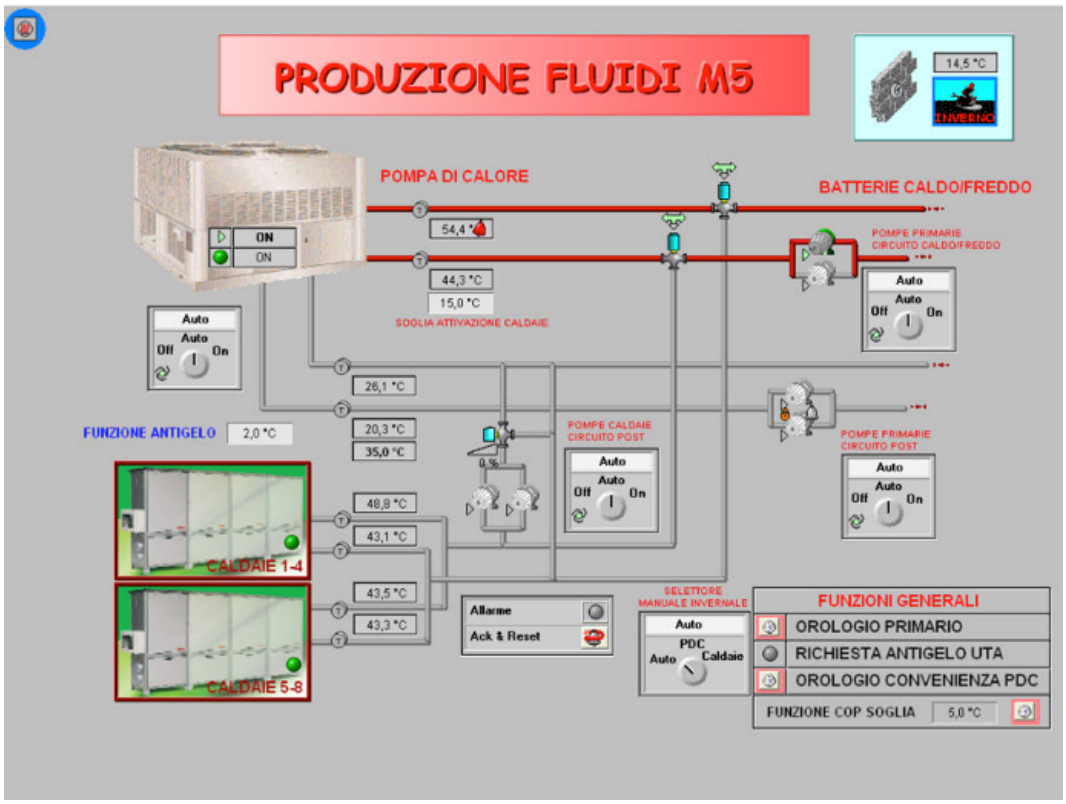


Figura 43. Schermate della supervisione: centrale termofrigorifera

Data la presenza della tariffa multioraria tale valore viene impostato dal programmatore per ogni ora del giorno e per tutti i mesi dell'anno.
Questa temperatura limite viene scelta in base al confronto tra le tariffe elettrica e del gas. In questo modo è possibile stabilire un COP limite di convenienza al funzionamento della pompa di calore.
A parità di altre condizioni tale COP varia in funzione della temperatura della sua sorgente fredda, cioè dell'aria esterna e quindi è possibile per ogni valore del

COP limite ricavare un corrispondente valore limite della temperatura esterna. Attualmente tale funzione è stata elaborata partendo dalle curve del COP a pieno carico in base alle temperature operative fornite dal costruttore, corrette mediante un coefficiente che tiene conto del funzionamento a carico parziale legato all'effettivo fabbisogno di riscaldamento stimato a partire dalla sola temperatura esterna.
Proprio il monitoraggio in corso delle prestazioni delle macchine a ciclo inverso permetterà di migliorare queste stima in base ai dati sperimentali raccolti.
Alla fine quindi per ogni ora della stagione di riscaldamento viene inserito un valore di temperatura limite. Tenendo condo della variabilità delle tariffe e che anche la stessa formulazione delle fasce orarie è soggetta a cambiamenti, si deve prevedere la possibilità di una frequente modifica dei valori impostati. Di conseguenza massima cura è stata posta nel realizzare un meccanismo di programmazione facilmente accessibile anche da parte dell'utente finale.

5.2.5. L'Umidità relativa nel Magazzino 6

Il primo passo è stato quello di costruire un modello del sistema edificio impianto utilizzando il programma Energy Plus [2].
L'occupazione dell'edificio è stato programmata sulla base del calendario scolastico e dell'orario delle lezioni. Le ore di lezione tenute nell'edificio e quindi ore di funzionamento dell'impianto di climatizzazione sono dalle 8.00 alle 18.00 dal lunedì al venerdì.
Gli ambienti creati dall'unione di due moduli sono normalmente usati per le classi formate da 50 studenti, quelle create da quattro differenti moduli per le classi da 100 studenti, mentre gli ambienti formati da un unico modulo sono utilizzati per le revisioni e lo studio. Il livello di occupazione massimo previsto è di 0,5 persone/m^2 con una riduzione nella prima e nell'ultima ora del 50% e della pausa pranzo del 20%. Per il carico interno dovuto alla presenza di attrezzature , in particolare i computer portatili degli studenti sono stati considerati 10 W/m^2 legato all'occupazione prevista, invece il carico dovuto all'illuminazione è di 25 W/mq . costante dalle 8.00 allle 19.00.
La portata di ventilazione è variabile a seconda delle presenza all'interno nell'edificio e all'interno delle diverse aule, infatti il progetto dell'impianto ha considerato una ventilazione dell'aria esterna per persona di 25 m^3/h, 7,2 l/s, raccmandata come valore minimo sia dalla legilazione italiana sia da quella internazionale. [3]

[2] Crawley 2001. Come analizzato nel capitolo 3, Energy Plus è un codice di simulazione dinamica sviluppato sulle prestazioni e capacità di calcolo di due programmi precedenti BLAST e DOE.

[3] UNI 10339 "Impianti aeraulici a fini di benessere. Generalità, classificazione e requisiti" e "Regole per la richiesta d'offerta, l'offerta, l'ordine e la fornitura", 1995 e ; ANSI/ASHRAE Standard 62-2001,Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality

Le temperature interne considerate da progetto sono: 20°C in inverno e 26°C in estate.
La scienza moderna del benessere insegna come si possono accertare valori più flessibili per l'umidità relativa , senza compromettere le condizioni di comfort delle persone.
Le temperature di progetto interne impostate sono quelle tipiche: 20°C in inverno e 26°C in estate.
Per l'umidità relativa interna il capitolato tecnico per questo edificio pubblico ha imposto il valore del 50%, sia in inverno che in estate. Ma la possibilità di una semplice modifica e controllo per ogni UTA, grazie al sistema di supervisione, ha suggerito di indagare l'effetto di diversi valori scelti sulla base della moderna teoria del comfort elaborata da Fanger[4]
Fanger ha indicizzato livelli di comfort che nascono dalle relazioni tra il funzionamento del corpo umano e la sensazione di benessere termico.
La norma UNI EN ISO 7730[5] ne individua due:

- *Predicted Mean Vote* (PMV), ovvero Voto Medio Previsto, è un indice di valutazione dello stato di benessere di un individuo e tiene conto delle variabili soggettive e ambientali; si basa sull'equazione di bilancio termico per il corpo umano che dà come risultato un valore numerico su una scala con range -3 (indice di sensazione di troppo freddo) a +3 (indice di sensazione di troppo caldo), dove lo zero rappresenta lo stato di benessere termico. Essendo un indice medio riferito ad un gruppo di individui, il raggiungimento del PMV pari a zero non significa che l'intero gruppo ha raggiunto le condizioni di benessere.
- *Percentage of Person Disatisfaied* (PPD), esprime la percentuale di persone insoddisfatte in un determinato ambiente e può essere calcolato come una funzione del PMV.

[4] Il benessere termoigrometrico o thermal comfort è definito dall'American Society of Heating Ventilation and Air-conditioning Engineers (ASHRAE) come quel particolare stato della mente che esprime soddisfazione con l'ambiente circostante. Gli studi-esperimenti condotti dal danese P. Ole Fanger hanno messo in evidenza come negli edifici scolastici il discomfort termoigrometrico crea un decisivo abbattimento del grado di attenzione e il conseguente rendimento. Secondo le teorie di Fanger il benessere termoigrometrico in un edificio si raggiunge a seconda delle relazioni che si instaurano tra le variabili soggettive e le variabili ambientali.
Le variabili soggettive sono relative all'attività che l'individuo svolge all'interno dell'ambiente e al tipo di vestiario.
Le variabili ambientali sono le quattro variabili che dipendono dalle condizioni climatiche esterne ed interne all'edificio:

1. Temperatura dell'aria(in °C);
2. Umidità relativa dell'aria interna (rapporto tra la quantità di vapore contenuto da una massa d'aria e la quantità massima che ne può contenere quella massa d'aria nelle stesse condizioni di temperatura e pressione. Si misura in percentuale %),.
3. Temperatura media radiante (in °C, si calcola come media delle temperature delle pareti interne all'ambiente, compresi soffitto e pavimento).
4. Velocità dell'aria (in m/s)

[5] "*Ambienti termici moderati. Determinazione degli indici PMV e PPD e specifica delle condizioni di benessere termico*", UNI EN ISO 7730:1997

Questi indici sono accettati sia dagli standard internazionali che nazionali[6]
Il calcolo del PMV è ottenuto da una procedura semplice che puo essere oggi calcolata grazie a un software dotato di un interfaccia grafica elementare. Questo è il caso del programma utilizzato (Marsh 2005) i quali risultati sono riportati in figura 44 sia per l'estate che per l'inverno.

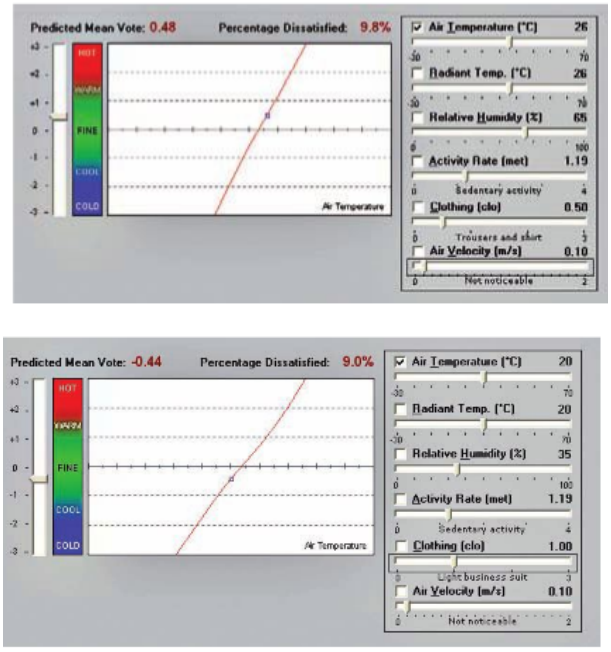


Figura 44. Calcoli PMV e PPD nel periodo estivo e invernale da parte di un tool software

In questo caso i parametri assunti per i calcoli sono tipici per la scuola:

- temperatura radiante uguale a quella dell'aria;
- tasso metabilico di 1.2 Met;
- velocità dell'aria media di 0,1m/s..

In inverno:

- temperatura dell'aria: 20 °C
- resistenza del vestiario: 1 Clo.

In estate:

- temperatura dell'aria: 20 °C
- resistenza del vestiario: 0,5 Clo.

[6] *" Indoor environmental parameters for assessment of energy performance of buildings, addressing indoor ai quality, thermal environment, lighting and acoustics"* .UNI EN 15251

In entrambi i casi gli andamenti di PMV sono stati valutati in funzione dell'umidità relativa.
In base ai calcoli effettuati nel caso estivo si verificano condizioni accettabili fino a un umidità relativa del 65% (PMV = 0,48, PPD = 9,8%). In inverno si può scendere al 35% (PMV = -0,44, PPD = 9%).
Di conseguenza, questi due set-point di umidità relativa sono stati adottati nell'edificio vero e proprio durante il periodo di monitoraggio. L'importanza del set-point di umidità è stata studiata anche nel periodo estivo, considerando in questo caso il giorno di progetto.
Nella Figura 45 vengono riportate le tendenze del carico di raffreddamento con tre diversi set-point di umidità (65%, 60%, 50%). La variazione tra le tendenze è significativa.

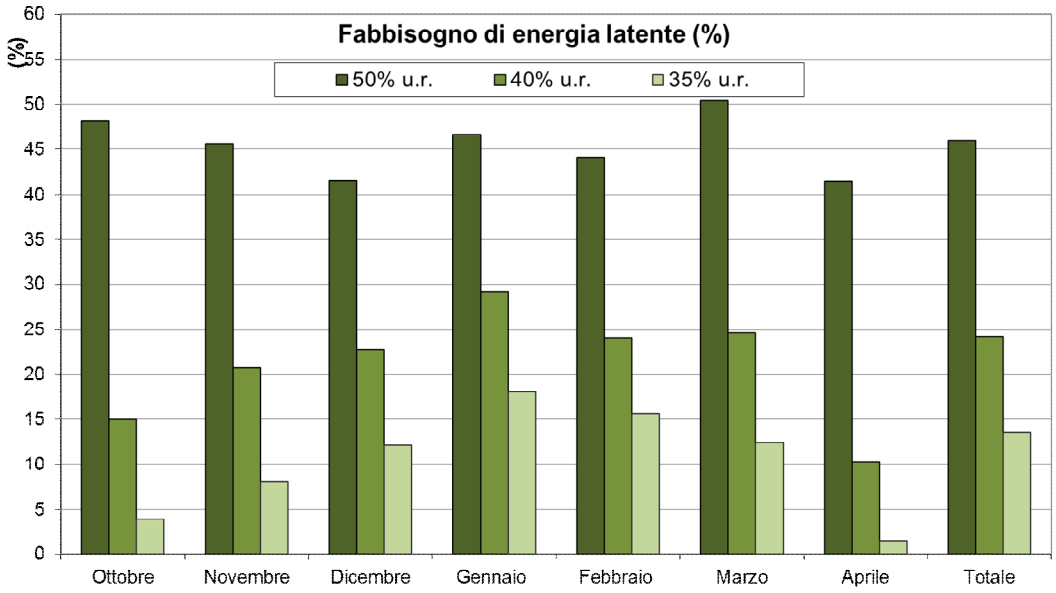


Figura 45. Fabbisogno di energia latente (%) riferita al totale di riscaldamento per tre diversi set point per l'umidità relativa- Infine Il fabbisogno totale nei tre casi.

Rispetto al caso con set-point di umidità relativa al 50%, il picco di carico diminuisce del 12% con umidità relativa al 60% e del 17% con umidità relativa al 65%.
Questo risultato indica la possibilità di ridurre le dimensioni delle macchine di refrigerazione e quindi il costo dell'impianto. Ma la migliore prestazione riguarda il fabbisogno di energia.
Nel grafico (Figura 46) vengono inoltre riportate le quote latenti (in percentuale) riferite al fabbisogno totale di energia nel giorno di progetto per i tre set-point.

L'analisi del condizionamento dell'aria conferma le precedenti considerazioni per quanto concerne il periodo invernale.

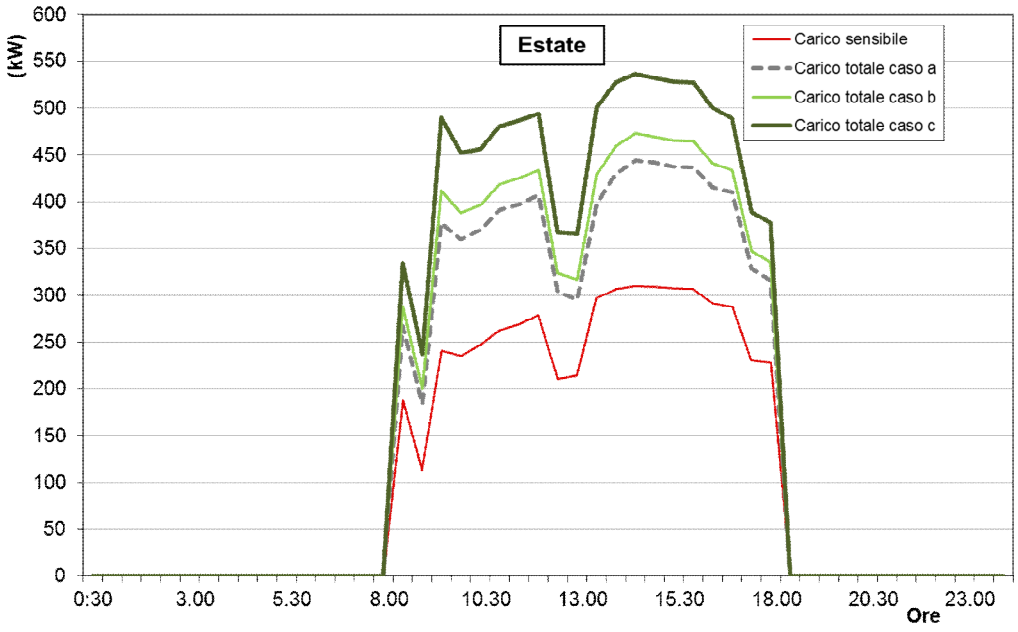


Figura 46. Andamento del carico di progetto estivo e del carico sensibile per tre diversi set- point. La quota latente(%) ,riferita al fabbisogno totale di energia, viene riportata per i tre set- point.

Alla simulazione dinamica del sistema edificio impianto analizzato nel magazzino 6 è stato affiancato il monitoraggio a lungo termine che ha potute indagare i precisi valori di umidità e quantificare i risparmi ottenibili dalle ipotesi formulate precedentemente con l'utilizzo della simulazione.
In figura sono riportati gli andamenti dell'umidità relativa per l'aria ripresa dalla UTA, destinata al lato sud, durante tre giorni tipici di ciascun mese nel periodo invernale.
L'effettivo set-point di umidità relativa è al 35%.
Tuttavia l'umidità è spesso superiore a questo valore, soprattutto per l'elevato livello di affollamento durante le lezioni.
Con un'umidità relativa al 35% l'intervento di umidificazione adiabatica, pertanto, non è frequente.
Nella figura 48 è riportata la quota di energia calcolata per passare da un umidità relativa del 35% a un umidità relativa del 40% per tutti i mesi di tutto il periodo invernale. Questo quota è riferita a un ammontare al fabbisogno energetico latente totale per arrivare al 50% dal set point attuale del 35%.

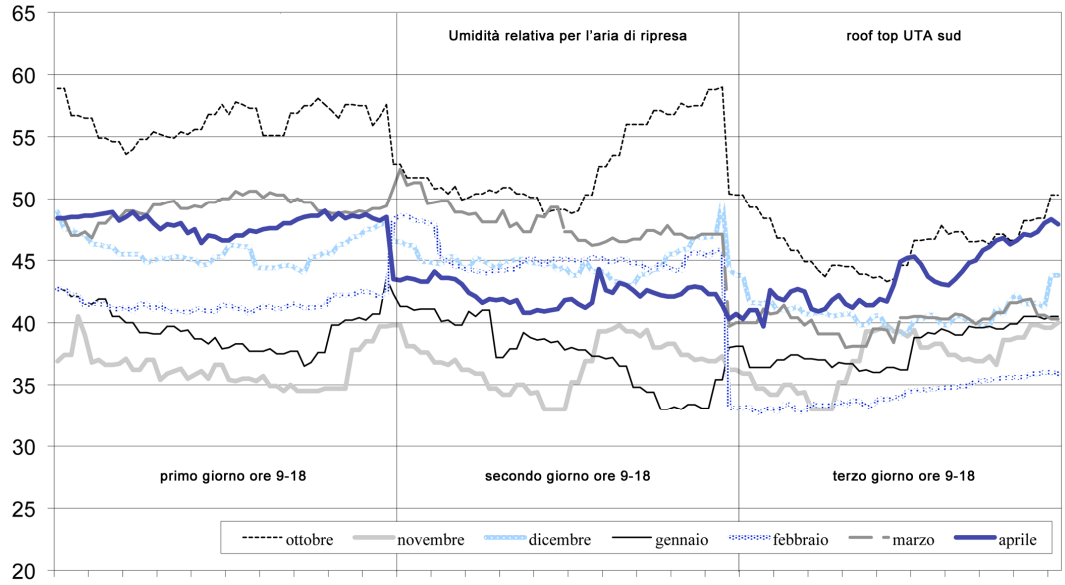


Figura 47. Andamento dell'umidità relativa (%) per l'aria di ripresa della UTA lato sud durante tre giorni per ciascun mese in inverno.

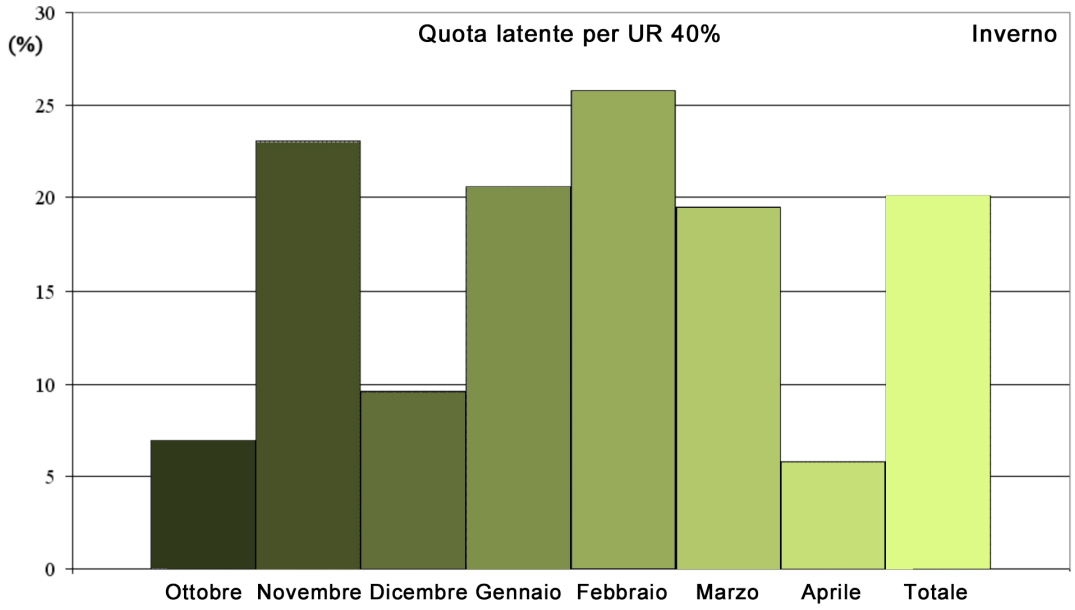


Figura 48. Quote di fabbisogno energetico latente per mantenere l'umidità relativa al 40% in Inverno. Questa quota è riferita al fabbisogno energetico latente per arrivare al 50% dal set point attuale del 35%

Possiamo osservare che nel Dicembre 2008 il fabbisogno è inferiore a Novembre 2008. Questo a causa della più elevata umidità interna provocata da un Dicembre 2008 piovoso. Possiamo anche notare che questa quota è fortemente inferiore al totale.
Si desidera evidenziare come un set-point pari al 40% consenta un notevole risparmio (80%) per quanto riguarda l'energia necessaria a raggiungere il valore di progetto del 50%. Solo il 20% del fabbisogno consente una riduzione di un terzo (dal 35% al 40%) dell'intervallo totale (dal 35% al 50%).
Infatti, spesso, l'umidità interna arriva vicino al 40% naturalmente, senza interventi di umidificazione, grazie alle persone e all'umidità esterna.

La figura 49 mostra gli andamenti dell'umidità interna in tre aule durante le ore di lavoro di tre giorni scelti, nelle tre settimane dal 25 giugno al 16 luglio 2008.
Il periodo analizzato presentava particolari criticità: le aule erano infatti molto affollate per i tradizionali laboratori di progettazione estivi.

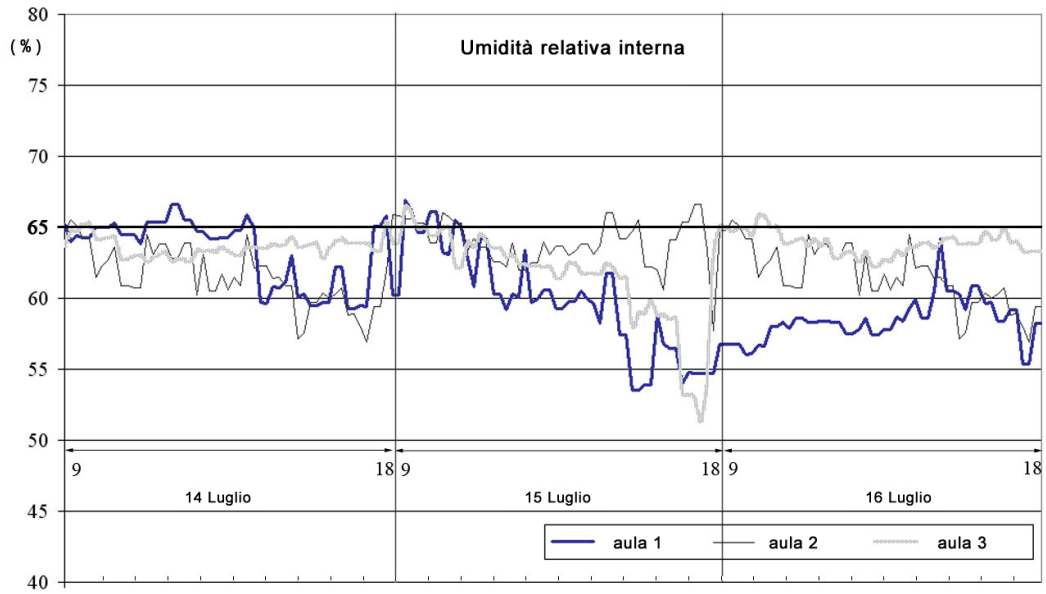


Figura 49. Andamento dell'umidità relativa interna % in tre classi durante tre giorini

La deumidificazione interna agisce solo per mantenere l'umidità al di sotto del 65%
Analogamente alla situazione invernale, la figura 50 mostra le quote di energia, per ogni settimana e in totale nel periodo, necessarie per abbassare l'umidità relativa dal 65% al 60% sulla base dei valori misurati dalle tre UTA interne, ognuna

installata in un'aula diversa. Tali quote percentuali si riferiscono al fabbisogno latente totale necessario a passare dal 65% al 50%.

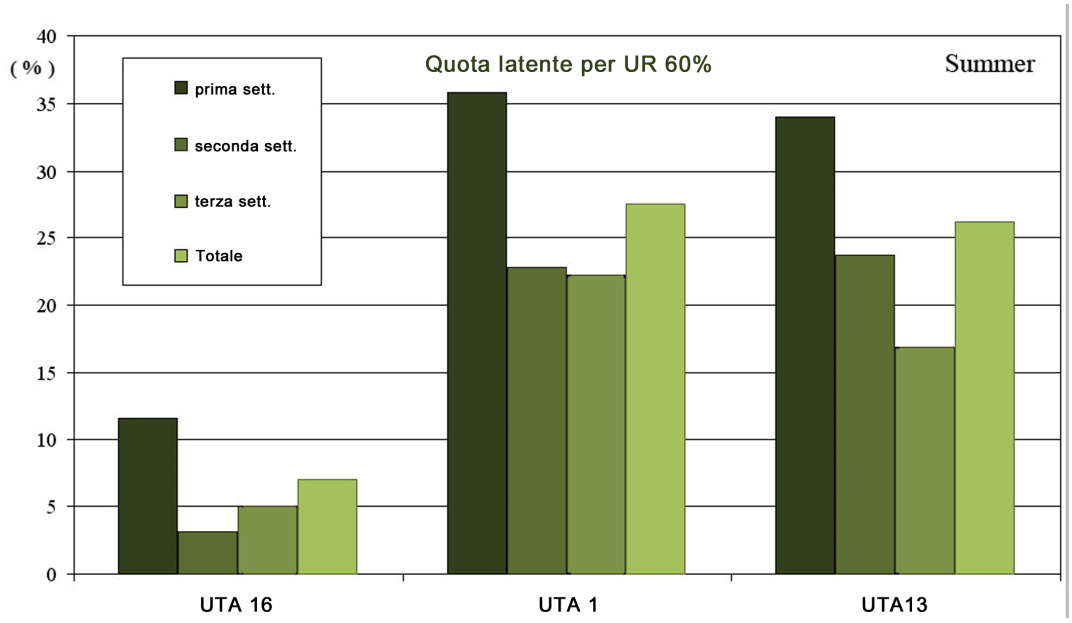


Figura 50. Quote di fabbisogno energetico latente per mantenere l'umidità relativa al 60% in estate. Questa quota è riferita al totale necessario per arrivare al 50% del set-point attuale del 65%.

È possibile notare, ancora una volta, come questa quota parziale sia chiaramente inferiore alla parte corrispondente (un terzo) dell'intervallo totale di umidità.
Gli edifici scolastici sono particolarmente adatti a trarre beneficio da un uso flessibile del set-point di umidità relativa interna. Pertanto, soprattutto in questo caso, una attenta gestione degli impianti permette di ottenere risparmi energetici ed economici consistenti.

5.2.6. La ventilazione controllata

Fra tutti i parametri ambientali controllati, (per esempio temperatura massima e minima estiva e invernale , temperatura massima e minima di mandata) interessante è stato analizzare , oltre all'umidità relativa trattata nel precedente capitolo, il tasso massimo di CO_2 (ppm) che comanda la modulazione della ventilazione.
Il controllo della modulazione delle due serrande motorizzate per ciascuna unità di ventilazione interna era bastato su un valore di riferimento pari a 850 ppm per la concentrazione di CO_2 misurata entro la cassetta plenum di ripresa di ciascuna macchina

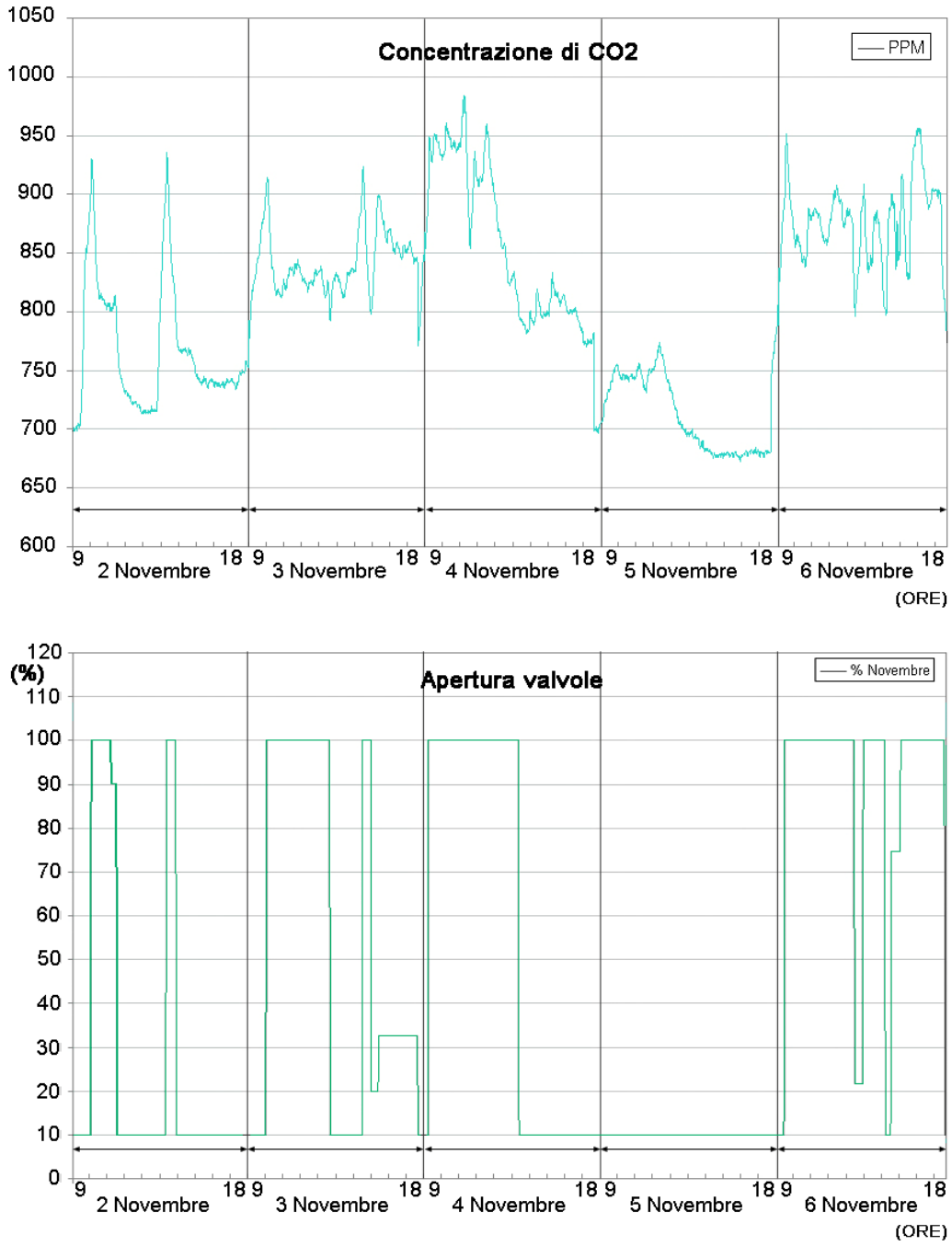


Figura 51.: Andamento della concentrazione di CO_2 (%) in un'aula durante le ore di funzionamento di una settimana tipo (in alto) con corrispondente grado di apertura (%) delle valvole di ventilazione (in basso).

.

Precisamente la valvola apre a 900 ppm e chiude a 800 ppm.

Infatti le norme[7] internazionali raccomandano di mantenere la concentrazione interna di CO_2 sotto le 1000 ppm.Una quota minima di apertura pari al 10% del totale è sempre comunque assicurata in modo da mantenere un ricambio d'aria minimo nelle aule pari a circa 0.5 vol/h durante le ore di funzionamento.
A titolo esemplificativo la figura 51 riporta le condizioni di funzionamento rilevate dal sistema di monitoraggio in una settimana tipo per un'aula.
L'elevata variabilità della concentrazione misurata testimonia una presenza molto varia e difficilmente prevedibile. Questo a dimostrazione della necessità di adattare continuamente la ventilazione alla reale esigenza. Si osserva poi come effettivamente a volte è necessaria tutta la portata in quanto si supera il limite delle 900 ppm fissato come set-point per la nostra regolazione. Vedremo in seguito come lo sforamento di questo limite è legato ai parametri impostati nella legge della regolazione.
Nella figura 51 in basso sono riportate le aperture delle valvole modulanti la ventilazione. Si osservi la conseguente elevata modulazione. In particolare è significativo che spesso il grado di apertura minimo previsto (10%) è comunque in grado di assicurare la ventilazione controllata entro i limiti. Viceversa però l'apertura totale a volte non è sufficiente come appunto già rilevato nella figura 51 in alto.

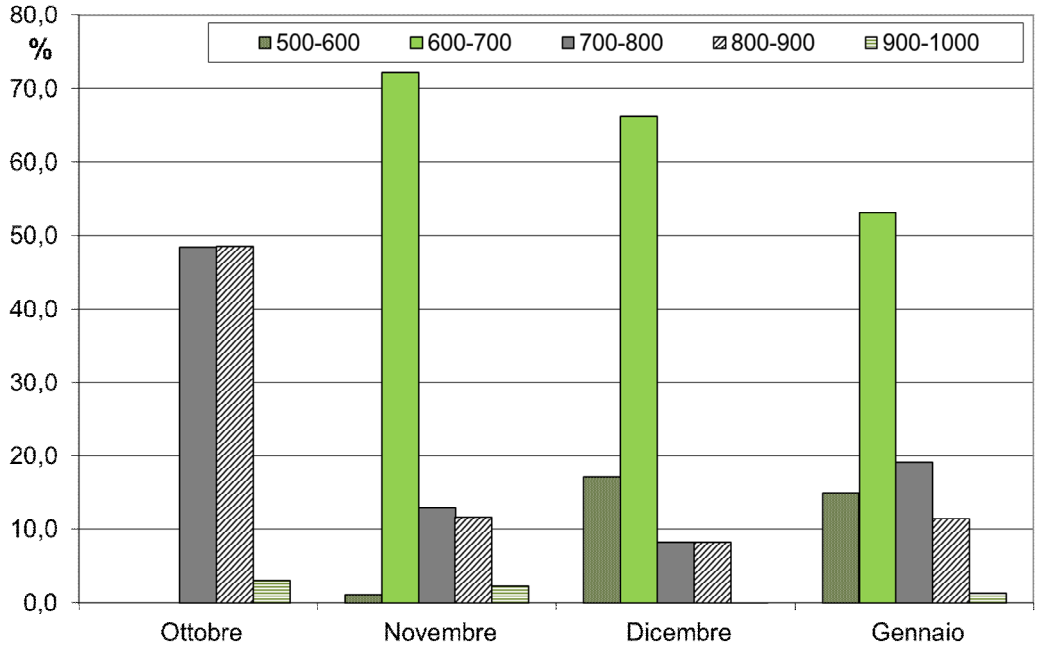


Figura 52.: Andamento delle frequenze della concentrazione di CO_2 (%) in dieci aule e per vari mesi durante le ore di funzionamento

[7] ASHRAE standard 62-1982, ventilation for Accettable Indoor Air Quality, American Society od Heating Refrugerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta GA, 1992

In figura 52 si riportano le frequenze (%) con cui i valori delle concentrazioni di CO_2 rilevate durante le ore di funzionamento ricadono nell'intervalli indicati.
Questi si riferiscono alle misure fatte ogni 10 minuti contemporaneamente su dieci aule per vari mesi.
Si osservi in ogni caso che la flessibilità nella portata di ventilazione consente di assicurare quasi sempre una concentrazione entro il set-point fissato e comunque inferiore al valore limite imposto dalla normativa (1000 PPM).
Inoltre nei mesi di dicembre e gennaio si rileva una riduzione nella frequenza di superamento del limite di 900 PPM grazie alla ottimizzazione dei parametri di regolazione svolta e successivamente qui riportata. Ad esempio la frequenza di sforamento del limite passa dal 3% di ottobre al 1,4% di gennaio.

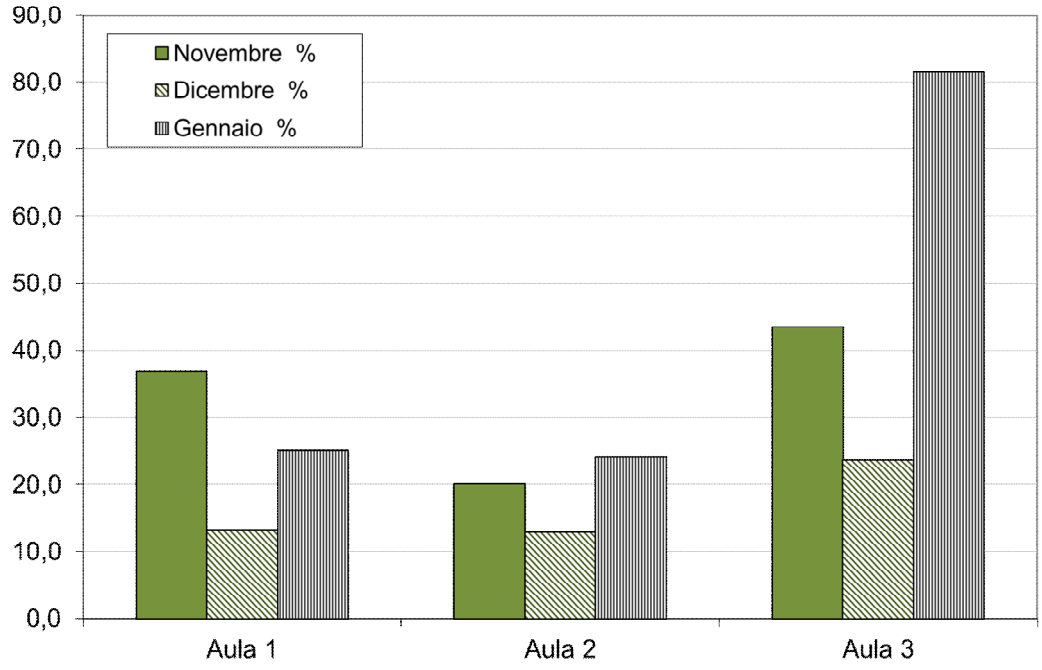


Figura 53.: Media del grado di apertura (%) misurato ogni minuto per tre aule durante le ore di funzionamento per tre mesi.

In figura 53 si riporta la media del grado di apertura (%) durante le ore di funzionamento misurato ogni minuto per tre aule nei mesi di Novembre, Dicembre e Gennaio.Si osservi ancora una volta l'elevata variabilità del grado di apertura per ciascuna aula che evidenzia il diverso fabbisogno di ventilazione che caratterizza ciascuna zona e quindi anche difficilmente prevedibile a priori.

L'elevata percentuale media di apertura nell'aula 3 (81,6%) nel mese di Gennaio testimonia la necessità a volte di portate elevate anche per lunghi periodi.
Complessivamente su questi tre mesi le medie della percentuale di apertura per le tre aule sono rispettivamente 34,3%, 16,5% e 43%. La media totale risulta pari a 31,3%. E' quindi evidente l'elevato risparmio energetico che si può conseguire rispetto ad una ventilazione a portata costante.

Si sono così ottimizzati i parametro della regolazione.
Il sistema di supervisione installato adotta una regolazione di tipo PID per quanto riguarda il controllo dell'apertura delle valvole di ventilazione.
Il controllo proporzionale-integrativo-derivativo abbreviato comunemente come PID è un sistema in retroazione negativa (figura 54) ampiamente impiegato nei sistemi di controllo. Infatti è fondamentale l'uso del feedback (retroazione) come capacità di un sistema di usare le proprie uscite per modificare gli ingressi.

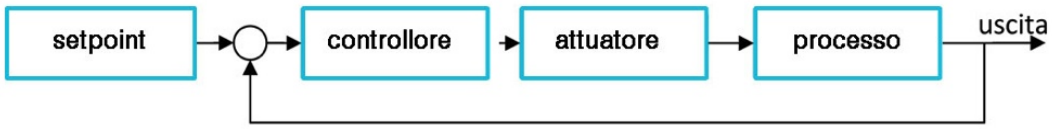


Figura 54.: Schema a blocchi di un sistema di controllo con retroazione

Il controllore acquisisce in ingresso un valore del processo e lo confronta con il valore di set-point. La differenza, il cosiddetto segnale di errore viene quindi usata per determinare il valore della variabile di uscita del controllore che è la variabile manipolabile del processo.
Precisamente il PID regola l'uscita in base a:

1. il valore del segnale di errore (azione proporzionale)
2. i valori passati del segnale di errore (azione integrale)
3. la velocità con cui il segnale di errore si modifica (azione derivativa)

Rispetto ad algoritmi di controllo più sofisticati oggi introdotti il sistema PID indubbiamente risulta essere più facile da installare e ottimizzare.
Infatti questo tipo di controllore ha alla base una rappresentazione matematica molto semplice e potente, basata sulla trasformata di Laplace, che contribuisce a renderlo facilmente applicabile ed utilizzabile.
Le tre azioni di un PID vengono calcolate separatamente e semplicemente sommate algebricamente:

$$u = u_p + u_i + u_d \tag{1}$$

L'azione proporzionale è ottenuta moltiplicando il segnale di errore *e* con un'opportuna costante:

$$u_p = K \cdot e = K_p \cdot e \tag{2}$$

E' perfettamente possibile regolare un processo con un simile controllore che risulta anche in grado di stabilizzare processi instabili. Non è però possibile garantire la convergenza esatta al valore di set-point: questo perché un'azione di controllo *u* è possibile solo se *e* è diversa da zero. L'azione integrale è proporzionale all'integrale nel tempo del segnale di errore moltiplicato per la costante K che è la stessa dell' azione proporzionale e diviso per una costante di tempo integrale τ_l:

$$u_I = \frac{K}{\tau_l} \int e \cdot dt = K_I \int e \cdot dt \tag{3}$$

Questa definizione dell'azione integrale fa si che il controllore si ricordi dei valori passati del segnale di errore; in particolare, il valore dell'azione integrale non è necessariamente nullo se è nullo il segnale di errore. Questa proprietà dà al PID la capacità di portare il processo esattamente al punto di riferimento richiesto, dove la sola azione proporzionale risulterebbe nulla.
Per migliorare l'azione del controllore si aggiunge l'azione derivativa:

$$u_D = K \cdot \tau_D \frac{de}{dt} = K_D \frac{de}{dt} \tag{4}$$

L'idea è compensare rapidamente le variazioni del segnale di errore: se vediamo che *e* sta aumentando, l'azione derivativa cerca di compensare questa deviazione in ragione della sua velocità di cambiamento senza aspettare che l'errore diventi significativo o che persista in un certo intervallo di tempo.

In figura 55 è visibile uno schema a blocchi di un controllore PID generico, i parametri K_p, K_i , e K_D sono associati all'azione proporzionale, integrale e derivativa. In ingresso c'è l'errore, lo scostamento tra il valore da controllare e quello di riferimento (set-point).

La progettazione di un controllore PID si basa sulla scelta della sua struttura e dei valori dei parametri. La scelta della struttura consiste in quale azione usare, ognuna delle quali introduce delle dinamiche a regime e durante al transitorio ben definite:

1. azione proporzionale: velocizza la risposta del transitorio ma non elimina i disturbi a regime.
2. azione integrale: elimina i disturbi a regime ma diminuisce la stabilità del controllore
3. azione derivativa : minimizza il transitorio eseguendo una predizione dell'errore, ma può sollecitare gli attuatori ad enfatizzare le alte frequenze.

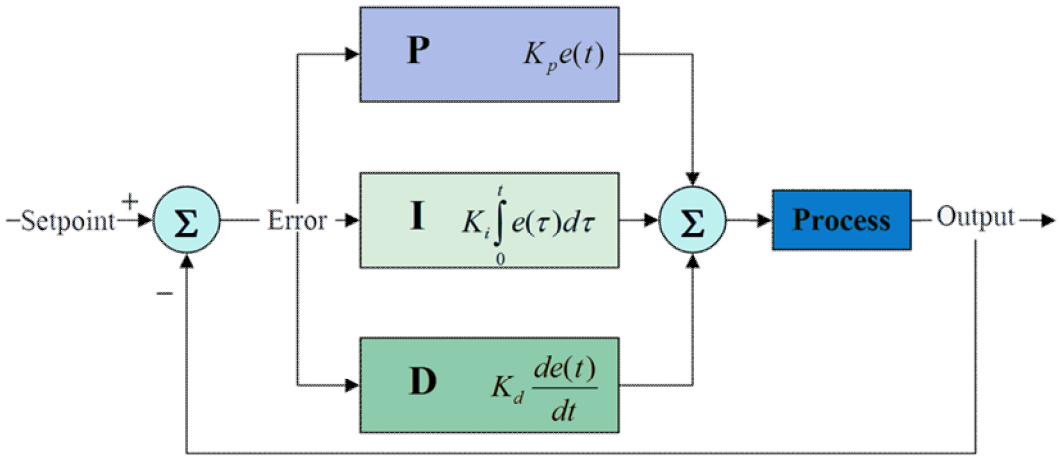


Figura 55.: Schema di un controllore PID

La scelta dei parametri (tuning) può basarsi sull'esperienza o per i sistemi più semplici esistono delle regole per calcolare il valore dei parametri (Ziegler e Nichols, Cohen e Coon o altri).

Nell'impianto in esame ci siamo trovati con valvole di regolazione a farfalla che lavoravano in on-off in quanto il differenziale di isteresi inizialmente impostato era molto basso (5 PPM) provocando una continua e inaccettabile pendolazione fra apertura e chiusura complete.

Il primo intervento è stato quello di inserire un differenziale adeguato per un funzionamento modulante. Infatti pur essendo qui installate semplici valvole a farfalla ,la presenza di servomotori a controllo proporzionale installati ha permesso comunque di usufruire anche in questo caso della regolazione PID prevista dal sistema di supervisione per il comando delle valvole. Occorre anche ricordare che in effetti le valvole di regolazione attualmente disponibili sul mercato per questo tipo di applicazioni negli impianti ad aria sono proprio di tipo a farfalla. Come abbiamo visto però la regolazione PID richiede una scelta opportuna dei parametri e in particolare in questo caso il sistema di supervisione installata permette di agire solo sul parametro K_p (gain).
Questo aggiustamento dei parametri (tuning) si è reso necessario dato che, come vedremo, il valore iniziale attribuito al gain era pari a 1 (valore massimo qui previsto) e si è rivelato non ottimizzato. Tradizionalmente in casi come questi si ricorre ad un tuning che si basa su strumenti informatici dedicati e che richiedono personale specializzato. Invece, sfruttando l'opportunità della semplicità dell'interfaccia utente tipica di questi moderni sistemi di supervisione, risulta possibile per il comune gestore intervenire direttamente adeguando la regolazione alle richieste dell'utente finale.
E' stata quindi monitorata la risposta della ventilazione all'impostazione di diversi valori del K_p (gain), arrivando così a definire un valore più adatto.

Nelle figure 56 e 57 si riportano rispettivamente, per un'aula con affollamento medio ed una con un forte affollamento, in alto l'andamento della concentrazione di CO_2 (ppm) e sotto quello conseguente di apertura (%) delle valvole.
Per ogni figura si confrontano i due diversi andamenti ottenuti in due giornate tipo (stesso affollamento) nella stessa aula con due diversi Kp.
Precisamente è osservabile il funzionamento che si ottiene con il K_p posto pari ad 1 come era inizialmente previsto e con il K_p pari a 0,5 che è il valore migliore fra quelli da noi trovati. Il miglior funzionamento è dovuto alla migliore modulazione. Infatti con K_p uguale ad 1 si ha un intervento più drastico con un aumento dell'oscillazione come d'altronde previsto nella teoria della regolazione PID. Invece con K_p uguale a 0,5 si una regolazione che segue più attentamente la domanda. In questo modo si evita da un lato un'apertura eccessiva rispetto all'esigenza che però oltretutto a volte è ritardata. Questo comporta un peggior controllo dei picchi al di sopra del limite di 900 ppm.
Questo aspetto è già evidente nel confronto riportato in queste due ultime figure, ma in realtà risulta essere molto più significativa a livello mensile nei valori riportati nella figura 52 in cui, come già preannunciato, si osserva una netta riduzione della frequenza oltre le 900 ppm nei mesi (dicembre e gennaio) successivi all'impostazione della regolazione con K_p pari a 0,5 rispetto ai precedenti mesi.

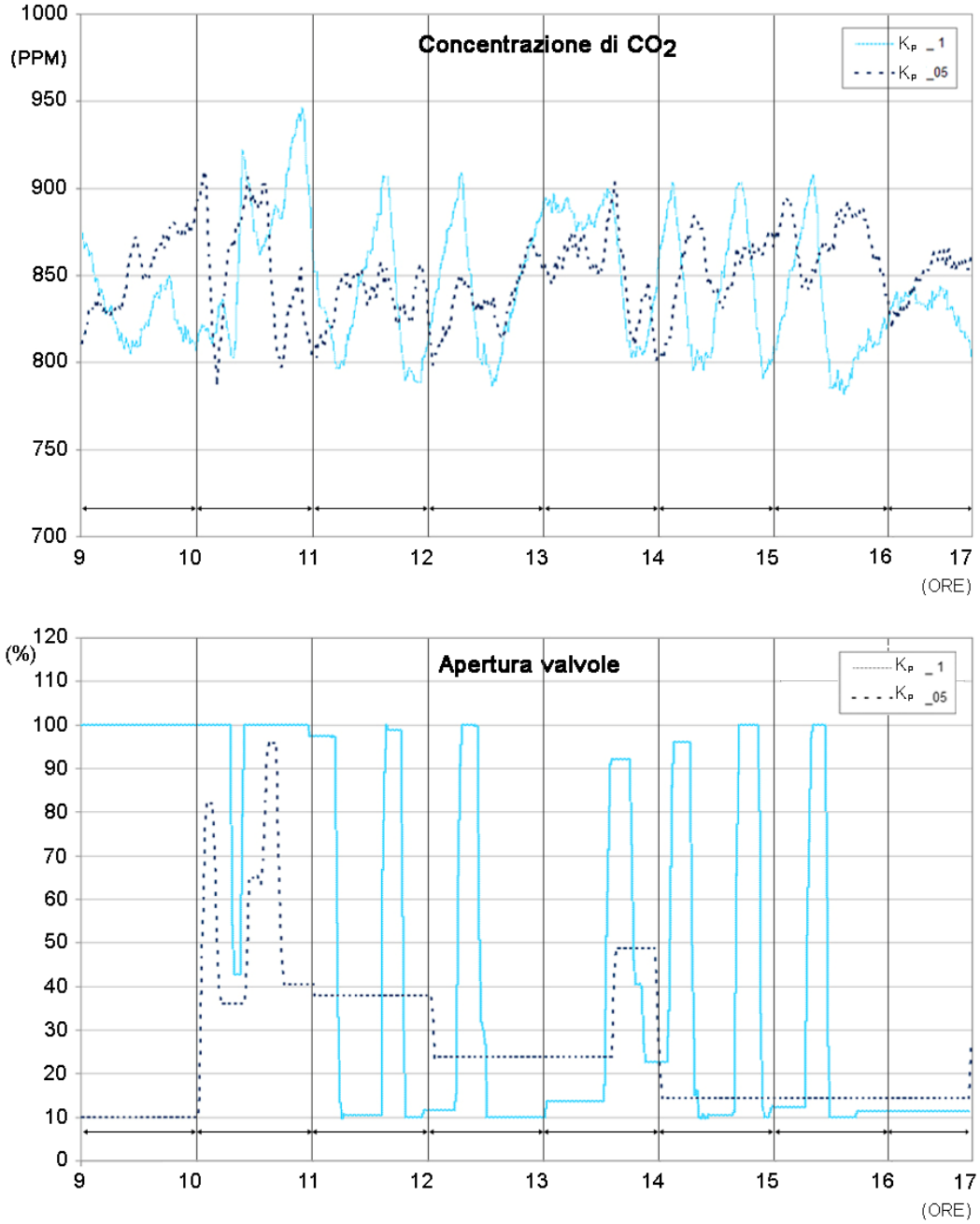


Figura 56.: Confronto degli andamenti della concentrazione di CO_2 (%) in un'aula con affollamento medio durante le ore di funzionamento in due giornate tipo con due diversi K_p (in alto) e corrispondenti gradi di apertura (%) delle valvole di ventilazione (in basso).

Complessivamente per l'aula della figura 56 risulta nelle due giornate con lo stesso affollamento rispettivamente un'apertura media pari a 49,6% con K_p pari a 1 e 25,7% con K_p pari a 0,5.

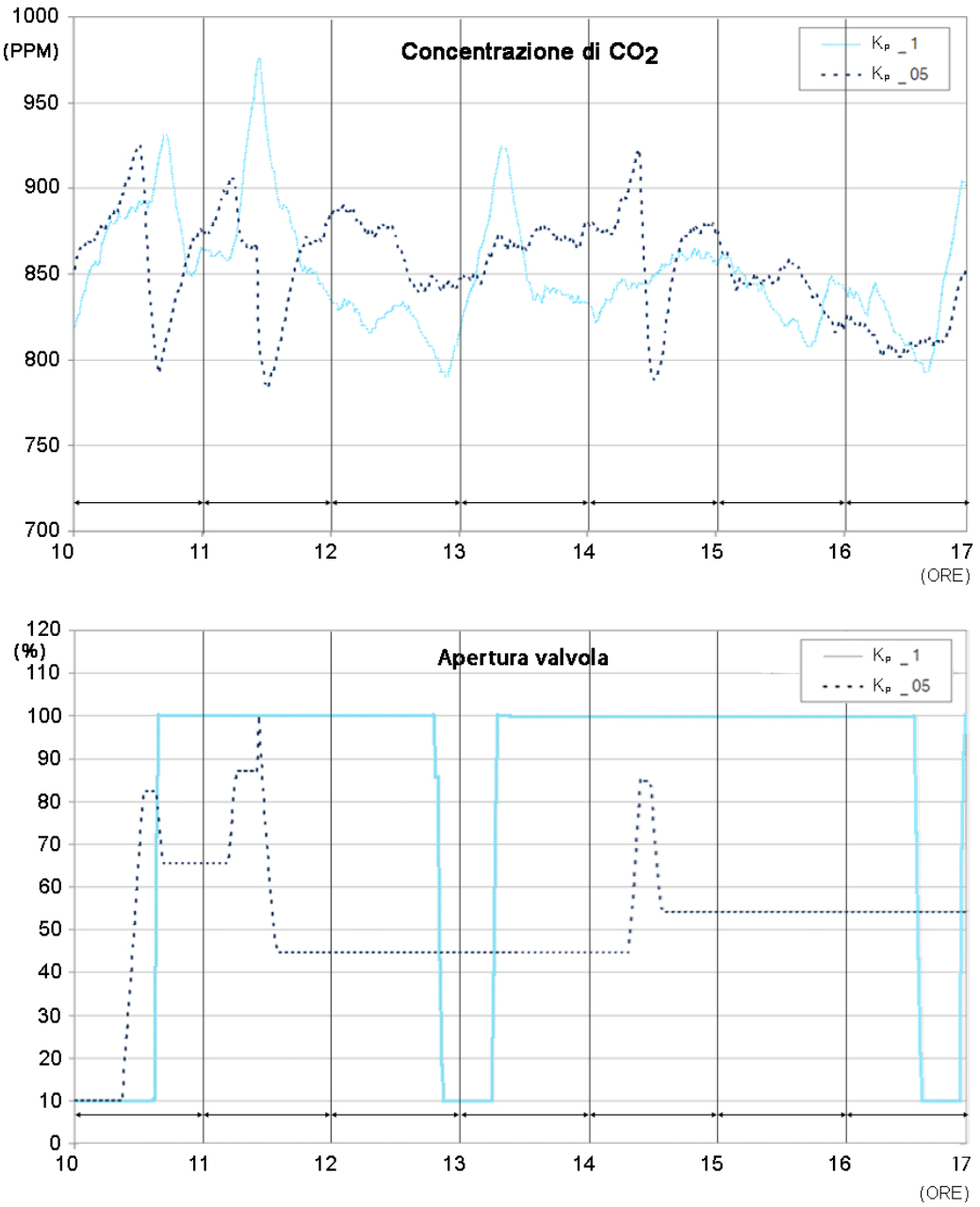


Figura 57.: Confronto degli andamenti della concentrazione di CO_2 (%) in un'aula con alto affollamento durante le ore di funzionamento in due giornate tipo con due diversi K_p (in alto) e corrispondenti gradi di apertura (%) delle valvole di ventilazione (in basso).

Nel caso dell'aula più affollata di figura 57, rispettivamente un'apertura media pari a 81,7% con K_p pari a 1 e 51,1% con K_p pari a 0,5.

Grazie alla messa a punto della regolazione abbiamo quindi una riduzione considerevole nella portata di ventilazione con controllo della concentrazione di CO_2 perfino migliore.

5.2.7. La ventilazione controllata nella certificazione energetica

Nell'ambito della normativa per la certificazione energetica degli edifici la specifica tecnica UNI/TS 11300-1 contiene la metodologia semplificata di calcolo del fabbisogno per la ventilazione.
Per gli edifici dotati di sistema di ventilazione meccanica a doppio flusso, come nel progetto in esame , la norma prevede di assumere la portata d'aria di progetto del sistema di ventilazione meccanica previsto tenendo conto dell'eventuale presenza di un recuperatore di calore sull'aria espulsa.
E' tuttavia evidente che nel caso oggetto di studio la variabilità della reale portata adeguata alle effettive esigenze porti più correttamente alla necessità di utilizzare una portata decisamente inferiore. Questa però può essere stimata a priori solo prevedendo una certa distribuzione dell'affollamento interno così come si è soliti fare nei programmi di simulazione dinamica. Nel nostro caso nelle valutazioni energetiche abbiamo previsto una ventilazione dal lunedì al venerdì dalle 9 alle 18.
La portata è legata invece alla variabilità dell'affollamento. Una sua previsione può essere tentata in base all'orario ufficiale delle lezioni. Rispetto al valore massimo, si prevede un 20% nelle ore iniziali e finali della giornata (9-10 e 17-18) e un 50% nelle ore di pranzo (13-14). In queste condizioni l'affollamento medio dalle 9 alle 18 risulta del 77% e di conseguenza si ha la stessa portata di ventilazione media nella giornata. Quindi la portata di progetto va ridotta col coefficiente 0,77 dato che la ventilazione prevista è di 25 m^3/h per persona effettivamente presente.
In realtà però le valutazioni qui presentate a seguito delle analisi dei dati misurati relativi alla reale ventilazione in questo edificio mostrano che la riduzione è molto maggiore. Questa è anche conseguenza della difficile previsione dei reali affollamenti data l'estrema variabilità riscontrata giorno per giorno in vari periodi dell'anno.
Valutazioni statistiche su campioni sufficientemente estesi potrebbero però fornire per le diverse destinazioni d'uso degli edifici dei valori del coefficiente di riduzione più corretti. Questo in analogia a quanto si fa per gli edifici dotati di estrazione meccanica a semplice flusso (aspirazione). In questo caso infatti per la ventilazione igro-regolabile la norma indica un coefficiente di riduzione pari a 0,6.

4.2.8. Conclusioni

Nella fase iniziale del progetto di questo edificio, a causa dei vincoli esistenti, è stata scartata la possibilità di ricorrere alle soluzioni più frequentemente suggerite dalla moderna tecnica impiantistica per aumentare l'efficienza energetica.
Prima di tutto, il ricorso all'energia solare, stante il divieto assoluto da parte della Soprintendenza di installare collettori termici o fotovoltaici in area storica.
Così non è stato possibile l'utilizzo dell'acqua, abbondante e termicamente adeguata, del canale della Giudecca come sorgente fredda/dissipatore delle macchine frigorifere, data l'indisponibilità dell'autorità del porto a far operare, per realizzare le necessarie canalizzazioni, sull'antistante banchina portuale in uso. L'indisponibilità di aree per altri vani interrati ha impedito l'opzione di un accumulo termico giornaliero, caldo/freddo, suggerito dal tipo di esercizio e dalla presenza della tariffa multioraria. Lo stesso vale per la realizzazione di una centrale di cogenerazione.
Alla fine quindi si sono sviluppate essenzialmente tre soluzioni:

1. La modulazione automatica dell'ingente portata di ventilazione di progetto in base all'effettivo affollamento. I monitoraggi in corso stanno dimostrando che in edifici di questo tipo, caratterizzati da presenze variabilissime, questa regolazione è assolutamente indicata, dati i risparmi che garantisce.
2. La possibile scelta fra due alternative per la produzione del calore resa automatica nelle singole ore della giornata,mediante intervento della supervisione. In questo modo si ottiene un'ottimizzazione del costo del calore in base a criteri oltretutto flessibili con riferimento anche a futuri cambiamenti delle tariffe elettriche e del gas.
3. L'esistenza di una supervisione capillare degli impianti che permette agevolmente al gestore di intervenire autonomamente, anche per ciascuna unità, sui parametri della regolazione per ottimizzarne il funzionamento, sia in termini di benessere che di riduzione dei consumi.Monitorando contemporaneamente i risultati fin nei minimi dettagli.

Nell'impossibilità di ricorrere a impianti innovativi, ci si è quindi concentrati sull'ottimizzazione della modalità di gestione e controllo di impianti tradizionali, dimostrando che anche in questo caso è comunque possibile ottenere risultati significativi in termini di contenimento dei consumi energetici e dei relativi costi.

In particolare lo studio ha potuto rilevare come gli edifici scolastici sono particolarmente adatti a trarre benefico da un uso flessibile del set-point di umidità relativa interna e da un tasso variabile di ventilazione gestito da un controllo automatico basato sui sensori di CO2.

Questi edifici sono spesso caratterizzati da un affollamento con elevati picchi di presenze, ma anche molto variabile nel tempo. In essi risulta quindi particolarmente vantaggiosa la realizzazione di una ventilazione controllata e variabile in funzione dell'effettiva necessità verificabile nelle aule mediante l'utilizzo di sensori di CO2 installati sui condotti di ripresa dell'aria ambiente.
Mediante il monitoraggio permesso da un impianto di supervisione molto accurato sono state presentate le opportunità di risparmio energetico permesse da questo tipo di ventilazione controllata notando come sia possibile nell'ex magazzino 6 ridurre in modo considerevole le portate di ventilazione e di contribuire in modo rilevante al risparmio energetico.
L'opportunità conseguente la presenza della ventilazione controllata deve essere meglio apprezzata nell'ambito della normativa per la certificazione energetica di quanto non lo sia attualmente.

Legenda

u	: azione regolante	
u_p	: azione regolante proporzionale	
u_I	: azione regolante integrale	
u_d	: azione regolante derivativa	
e	: segnale di errore	
K, K_p	: costante proporzionale	(adimensionale)
K_I	: costante integrativa	(secondi^{-1})
K_D	: costante derivativa	(secondi)
τ_I	: tempo integrale	(secondi)
τ_D	: tempo derivativo	(secondi)

5.3. Ambito di studio: ala Sud dell'ex convento dei Tolentini

Fra le energie rinnovabili l'uso della fonte geotermica a bassa entalpia associata alle pompe di calore presenta un particolare interesse nell'ambito della climatizzazione degli edifici.
Mentre l'impiego dell'acqua superficiale o di falda non è sempre possibile per mancanza di disponibilità o di autorizzazione, decisamente meno invasivo dell'ambiente esterno appare essere l'uso di scambiatori a terreno orizzontali o verticali che costituiscono un circuito chiuso in grado di scambiare solo energia termica con il terreno.
Attualmente però dato l'elevato costo di questi sistemi, le opportunità di diffusione sono legate all'ottimizzazione del binomio costi-prestazioni che stimola lo sviluppo di tecniche di realizzazione più economiche, di componenti quali sonde a terreno e pompe di calore più efficienti e studiate appositamente per queste applicazioni.
Fondamentale risulta essere poi l'elaborazione di procedure di valutazione delle prestazioni da usare nella fase di progettazione sia per il dimensionamento che per l'analisi energetica e finanziaria dell'intervento. Strumenti di previsione che nonostante la molteplicità delle variabili da considerare, risultino alla fine affidabili, ma nello stesso tempo di facile applicabilità anche per scopi professionali.
Per ottenere questo risultato la ricerca applicata è oggi impegnata a studiare l'introduzione di questi impianti geotermici in diverse realtà in modo da evidenziarne le possibilità e i limiti di applicazione. Molteplici infatti sono i fattori da considerare e molti legati al particolare contesto in cui si pensa di realizzarli.
All'interno del mio lavoro di ricerca è stato studiato come questi sistemi possano adattarsi nelle città storiche. Anche in questo caso l'edificio oggetto dell'indagine si trova all'interno del centro storico di Venezia.
Qui le difficoltà legate all'installazione di macchine di tipo tradizionale per la produzione del caldo e del freddo sono tutte presenti e ulteriormente accentuate.
Per le caldaie spesso esigenze legate alla prevenzione incendi farebbero maggiormente optare per l'impiego di pompe di calore in edifici storici.
D'altronde l'installazione di macchine a ciclo inverso che usano l'aria esterna come sorgente fredda nel funzionamento in riscaldamento o per lo smaltimento del calore in raffreddamento direttamente o mediante torre evaporativa è ostacolata dalla mancanza di aree idonee date le dimensioni richieste e i limiti imposti dalla normativa acustica o di tutela monumentale.
Anche il ricorso all'acqua come sorgente rinnovabile certamente suggerita dalla collocazione costiera di Venezia non è poi così generalizzabile come potrebbe sembrare. Stante il divieto di prelevare l'acqua di falda in città, l'impiego di acque superficiali è in realtà possibile e conveniente solo in prossimità dei canali maggiori quali il Canal Grande e il Canale della Giudecca oppure degli spazi lagunari

aperti. In tutti gli altri canali la quantità d'acqua disponibile è molto variabile durante l'anno e spesso piuttosto modesta ed inoltre i livelli termici si avvicinano moltissimo a quelli dell'aria esterna riducendone di molto la convenienza e provocando il divieto al suo impiego nel periodo estivo più caldo quando l'acqua restituita risulti superare la temperatura di 30°C. Anche ove possibile il prelievo, i costi aggiuntivi legati ai componenti per la filtrazione dell'acqua e alla loro manutenzione piuttosto frequente data la notevole sporcizia che la caratterizza, stimolano l'interesse per possibili sistemi alternativi.
Il progetto analizzato utilizza quindi un impianto geotermico a circuito chiuso con sonde verticali più adatte di quelle orizzontali dati i limitati spazi normalmente disponibili in Venezia. Questa geometria ricorda il tradizionale uso delle palificate su cui si fonda l'intera città e che può trovare in prospettiva proprio la possibile integrazione di sonde geotermiche nei moderni pali di fondazione.
Altrettanto importante è poi la possibilità di sfruttare le caratteristiche del suolo e la sua elevata umidità e quindi una condizione particolarmente indicata per ottenere ottime prestazioni energetiche. La saturazione del suolo legata alla notevole presenza di acqua certamente permette di prevedere alte conduttività nel terreno in grado di provocare un rapido riequilibrio del campo di temperature e quindi la possibilità di usufruire al massimo dell'inerzia termica del suolo.
E' stata quindi svolta un'analisi delle prestazioni di una pompa di calore invertibile accoppiata ad uno scambiatore a terreno a sonde verticali ancora da realizzare a Venezia. E' uno studio preliminare svolto con riferimento ad un intervento ora in corso di realizzazione in cui è previsto un impianto di questo tipo. Utilizzando opportuni modelli appositamente elaborati per lo scambiatore a terreno e per la pompa di calore, la simulazione dinamica del sistema edificio-impianto fornisce una valutazione annuale delle prestazioni ottenibili sia in fase di riscaldamento che di raffrescamento.
Per quanto riguarda la valutazione della domanda dell'edificio è stato usato il programma Design Builder.
E' stata così svolta anche un'analisi parametrica in funzione delle varie variabili che caratterizzano l'impianto e in particolare la geometria dello scambiatore allo scopo di una sua ottimizzazione.

5.3.1. Il sistema edificio-impianto

L'edificio costituisce l'ala Sud dell'ex convento dei Tolentini.
Originariamente nasce come monastero commissionato dai Padri Teatini all'arch. Scamozzi sul finire del 1500, ma con l'arrivo di Napoleone nel 1806 passa al demanio e diventa prima caserma, poi distretto militare e infine deposito.
A partire dagli anni 50 del secolo scorso, l'immobile viene messo a disposizione dell'Istituto Universitario di Architettura per diventare la sua sede principale.

Figura 58.: Vista del chiostro dei Tolentini

Lo spostamento dell'attività didattica in altri edifici ha permesso di pianificare un intervento di trasformazione dei piani secondo e terzo già adibiti ad aule in sale di lettura della biblioteca ripristinando l'antica destinazione di queste aree nel convento.

Figura 59.: Vista dell' Aula Magna

La parte più significativa dell'intervento si riferisce però all'adeguamento impiantistico che nell'ambito di un edificio storico soggetto a forte tutela come questo è sottoposto a stringenti esigenze di rispetto del manufatto.

Figura 60.: Viste del progetto di ristrutturazione dell'ala Sud: sezione longitudinale

Figura 61.: Viste del progetto di ristrutturazione dell'ala Sud: sezioni trasversali

I nuovi impianti devono infatti inserirsi in modo non traumatico, ricorrendo a soluzioni tali da non interferire con le strutture esistenti.
La nuova dotazione impiantistica prevede la realizzazione degli impianti di climatizzazione invernale ed estiva in sostituzione dell'impianto di riscaldamento a radiatori esistente in precedenza.
In particolare è prevista la realizzazione di impianti di climatizzazione ad aria primaria e ventilconvettori opportunamente mascherati nell'arredo per le sale di lettura ed un impianto a tutta aria per l'aula magna del piano primo (figura 59).

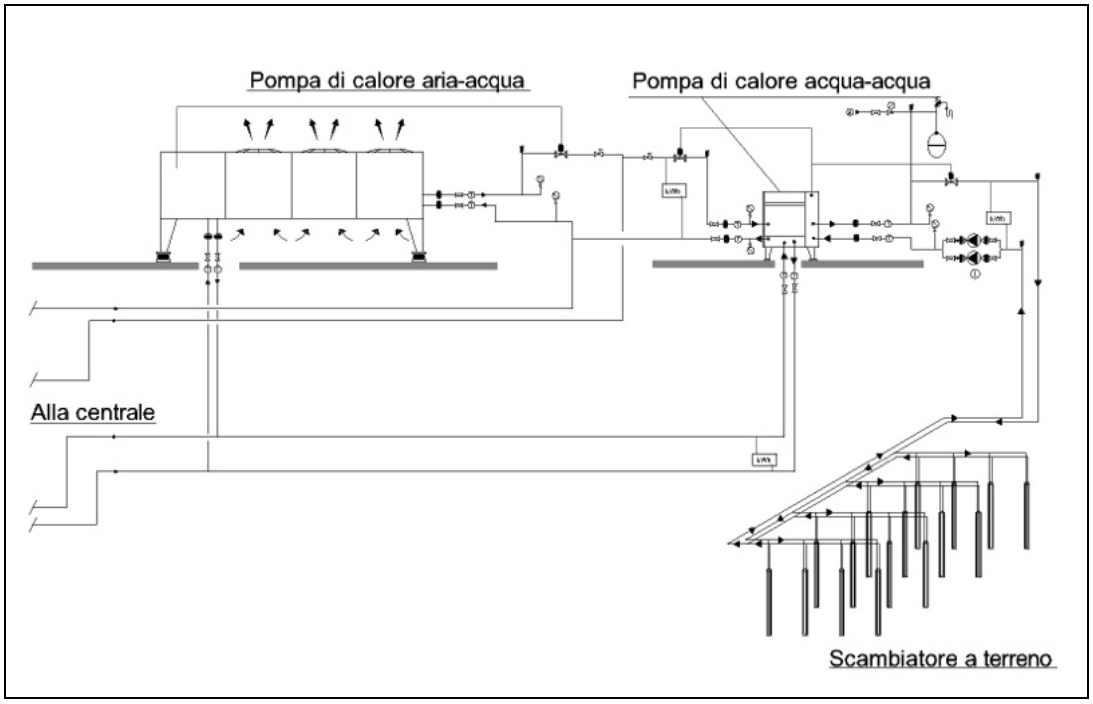


Figura 62.:Schema funzionale delle nuove macchine installate

.La produzione del freddo avverrà mediante due pompe di calore invertibili funzionanti in parallelo (Figura 62).
Nel periodo estivo è previsto un recupero parziale dai condensatori dei gruppi frigoriferi per assicurare i post riscaldamenti delle centrali di trattamento dell'aria, limitando, così, la necessità di funzionamento delle caldaie esistenti. Pertanto dalle due macchine frigorifere partiranno due coppie di tubazioni interrate, preisolate, del tipo utilizzato usualmente per il teleriscaldamento, precisamente la rete primaria del caldo/freddo per i periodi inverno/estate e la rete primaria del recupero per il post riscaldamento estivo. Tali tubazioni raggiungeranno la centrale di distribuzione prevista esternamente sul lato est del fabbricato principale.

Queste macchine saranno installate nel giardino adiacente all'asilo aziendale (Casetta Palma) dell'Università Iuav di Venezia in una porzione inevitabilmente sacrificata per alloggiare questi gruppi vista l'indisponibilità di altre aree.
Uno dei gruppi sarà del tipo aria/acqua, con una potenza nominale in raffreddamento di 174 kW (183 kW in riscaldamento).
La priorità di funzionamento è comunque data alla seconda macchina del tipo acqua-acqua, con potenza nominale in raffreddamento pari a 41 kW in raffreddamento (50 kW in riscaldamento).
In entrambi in casi si tratta di macchine con compressori multipli di tipo scroll e refrigerante R410a.
Questo secondo gruppo frigorifero è accoppiato ad uno scambiatore a terreno con sonde geotermiche verticali. Tali sonde verranno installate sempre nel giardino di Casetta Palma in prossimità alla macchina cui sono collegate (Figura 63).

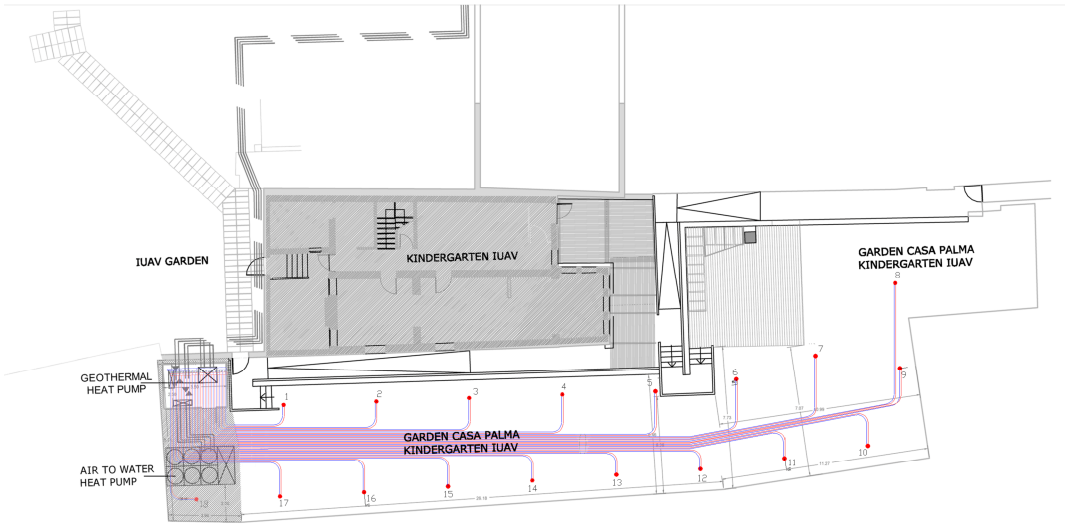


*Figura 63.*Distribuzione delle sonde nel giardino dell'asilo.

Il funzionamento della due macchine in pompa di calore nel periodo invernale è ad integrazione della centrale termica esistente Al calore così prodotto, soprattutto nei periodi più rigidi dell'inverno, si aggiungerà, se necessario per soddisfare il fabbisogno, il contributo del calore generato dalle caldaie della centrale termica già in servizio per l'attuale impianto di riscaldamento. E' quindi presente un allacciamento alla rete di riscaldamento già in esistente realizzato in corrispondenza alla centrale di distribuzione. La ridotta potenza del gruppo acqua-acqua rispetto alla potenza totale installata è conseguenza delle limitazioni imposte per la realizzazione dello scambiatore a terreno. Anzitutto l'esiguità dell'area disponibile.

Inoltre la cautela, da parte degli enti preposti, al rilascio dei permessi per autorizzare l'impiego della geotermia, essendo una tecnologia nuova per una realtà fragile come quella Veneziana. Questa ha portato ad una precisa indicazione di limitare per il momento, in assenza di esperienze, la profondità delle sonde stabilendo di non superare i 40 m. Il timore è quello di alterare sia con la perforazione che con il successivo scambio termico l'equilibrio delle falde esistenti sotto tale profondità.
E' necessario notare che buona parte della potenza di picco installata è conseguenza della richiesta dell'aula magna (250 posti) che però è in funzione solo molto saltuariamente per cui nel funzionamento ordinario buona parte del fabbisogno è effettivamente coperto con continuità dalla macchina più piccola.

Lo scambiatore a terreno previsto è costituito da 18 sonde con lunghezza utile di scambio di 40 m disposte come indicato in figura 61. Il passo minimo tra le sonde è di 4 m. Ciascuna sonda sarà inserita in apposito pozzo ottenuto per trivellazione e successivamente cementato mediante riempimento con bentonite. Le sonde sono costituite da tubo in polietilene PE PN 16 con diametro DN 32 munito nel fondo di una zavorra (piede di sonda) per facilitare l'inserimento della tubazione stessa.
Lo studio preliminare dell'impianto mediante simulazione dinamica, ha analizzato scelte differenti riguardanti le dimensioni, passo e profondità, caratteristiche delle sonde e di regolazione (on-off o modulante) della macchina proprio per affrontare il problema dell'ottimizzazione e volendo evidenziare le possibilità e i limiti di applicazione della geotermia a Venezia.

Per quanto riguarda le caratteristiche termofisiche del terreno si è fatto riferimento alla relazione geologica allegata al progetto e basata su sondaggi penetrometrici e correlazioni stratigrafiche in zone prossime a quella interessata dallo scambiatore riportati in vari studi relativi al centro storico veneziano [8].
Dopo un primo strato antropico di 2-3 m risulta la presenza di un'alternanza di strati di sabbie alluvionali, limose o fini fortemente permeabili e di strati argillosi più o meno limosi fino ad una profondità di oltre 100 m. Per le caratteristiche del terreno si è quindi fatto riferimento a dati di letteratura[9] riportati in tabella 9.

[8] Come riferimenti sono stati considerati:
- F. Zezza, *The sedimentary structure of Upper Pleistocene-Holocene deposits in Venice and its effects on the stability of the historic centre*, Accademia Lincei, Springer- Verlag 2010.
- -F. Zezza, *Geologia, proprietà e deformazione dei terreni del centro storico di Venezia, Geologia e progettazione nel centro storico di Venezia, atti secondo convegno nazionale: la riqualificazione della città e dei territori*, Venezia dicembre 2007.
- P. Mozzi, C. Bini, L. Zilocchi, R. Beccatini, M. Mariotti Lippi, *Stratigraphy, paleopedology and palinology of late Pleistocene and Holocene deposits in the landward sector of the Lagoon of Venice in relation to the caranto level*. Il Quaternario, Italian Journal of Quaternario Science, 16/1 bis:139-210 2003.

[9] Vedi: VDI 4640, *Thermal Use of the Underground*, VDI Guideline, 2010.

Numero di strato [-]	Composizione del suolo [-]	Spessore [m] /Profondità [m]→[m]	Conducibilità termica [W/(m·K)]	Densità [kg/m^3]	Calore Specifico [J/(kg·K)]	Presenza di acqui-feri [Si/No]
1	Materiale di riempimento (ghiaia e argilla)	2 / 0→2	2.0	2700	890	Si
2	Argilla sedimentata	13 / 2→15	1.6	2700	1260	No
3	Argilla grigia e sabbia	3 / 15→18	1.6	2700	1260	No
4	Sabbia grigia argillosa	3 / 18→21	1.6	2700	1260	Si
5	Sabbia fine	3 / 21→24	2.3	2600	1070	Si
6	Strato argilloso	2 / 24→26	1.6	2700	1260	No
7	Sabbia fine	10 / 26→36	2.3	2600	1070	Si
8	Sabbia compatta	4 / 36→40	2.3	2600	1070	Si

Tabella 9 - Caratteristiche termofisiche utilizzate per i vari strati

E' poi presente un sistema multifalda caratterizzato da acquiferi sospesi presenti nelle zone sabbiose e confinati dagli strati argillosi più impermeabili.
Tali acquiferi sono in rapporto diretto con le oscillazioni di marea mentre piuttosto scarsa è la dipendenza dalle precipitazioni.
Sono inoltre interessati dal fenomeno dell'intrusione marina. La circolazione sotterranea delle acque è quindi fortemente variabile essendo legata alle maree e alle stagioni, e di difficile valutazione.
In generale comunque la presenza di acqua in movimento ha certamente una conseguenza positiva sul funzionamento dello scambiatore, sia perchè può incrementare lo scambio termico sul lato esterno delle sonde, sia perché può facilitare il riequilibrio del campo termico grazie al trasporto di calore e di massa. Infine è garanzia di mantenimento di condizione di saturazione d'acqua e quindi di elevate conduttività termiche per gli strati in cui le sonde sono immerse.

5.3.2. Il modello della pompa di calore

Nel seguito, per dovere di concisione e generalità, chiameremo "pompe di calore" tutte le macchine a ciclo inverso, sia in fase di riscaldamento che in fase di riscaldamento, a prescindere dagli specifici fluidi secondari.
Le prestazioni delle pompe di calore a compressione di vapore dipendono fortemente dalle condizioni operative, in particolare dai livelli di temperatura dei fluidi secondari e dal grado di parzializzazione. Per calcolare il consumo energetico con sufficiente accuratezza è dunque necessario prevedere la resa della macchina nelle condizioni operative contingenti.
Esistono alcuni modelli per la determinazione del comportamento di pompe di calore basate su cicli a compressione di vapore, ma richiedono la conoscenza di dettagli costruttivi spesso preclusi al progettista termotecnico.

Si è allora scelto di ricorrere a un modello sviluppato precedentemente e capace di prevedere il COP di macchine a compressione di vapore con buona accuratezza (entro il 10%), pur partendo da dati di catalogo e quindi facilmente ottenibili dal progettista termotecnico. Tale modello, implementato in FORTRAN, si rivela quindi ideale anche per l'integrazione all'interno di software di calcolo del comportamento dinamico del sistema edificio-impianto[10].
Nel presente capitolo si illustra il modello sviluppato per il calcolo delle performance della pompa di calore.
Tale modello è basato su una descrizione fisica del ciclo termodinamico svolto dalla pompa di calore. I parametri di input del modello consistono in dati di catalogo, a partire dai quali, in una prima fase di calcolo, il modello determina parametri interni alla macchina stessa, successivamente utilizzati nella fase di calcolo alle condizioni contingenti.
Il modello necessita dei seguenti dati di input:

- fluidi secondari interno ed esterno (acqua/acqua, acqua/aria, aria/acqua, aria/aria);
- fluido refrigerante (R134a, R407C, R410A);
- potenze utili in condizioni nominali, in riscaldamento e/o in raffrescamento ($P_{U,Cool}^{nom}$ e $P_{U,Heat}^{nom}$);
- coefficienti di prestazione in condizioni nominali, in riscaldamento e/o in raffrescamento (COP_{Cool}^{nom} e COP_{Heat}^{nom});
- potenze spese negli ausiliari in condizioni nominali, in riscaldamento e/o in raffrescamento ($P_{Auxil,Cool}^{nom}$ e $P_{Auxil,Heat}^{nom}$);
- valore di stima dell'efficienza globale del motore del compressore (η_{Motor});
- indice di dimensionamento degli scambiatori di calore (I_{Dim}, valore compreso tra 0 e 10);
- valori delle temperature dei fluidi secondari alle condizioni nominali, in riscaldamento e/o in raffrescamento ($T_{S,Evap,In,Heat}^{nom}$, $T_{S,Evap,Out,Heat}^{nom}$, $T_{S,Cond,In,Heat}^{nom}$, $T_{S,Cond,Out,Heat}^{nom}$, $T_{S,Evap,In,Cool}^{nom}$, $T_{S,Evap,Out,Cool}^{nom}$, $T_{S,Cond,In,Cool}^{nom}$, $T_{S,Cond,Out,Cool}^{nom}$).

La prima serie di calcoli svolta dal modello consiste nella determinazione dei parametri di base della macchina, a partire dai valori di input sopra menzionati.
Di seguito si riassume la procedura di calcolo, eseguita sia per la fase di riscaldamento che per quella di raffrescamento:

1. Calcolo della potenza di compressione all'interno del ciclo termodinamico, in condizioni nominali:

[10] Fischer, and C. K. Rice. The Oak Ridge Heat Pump Models: Steady-State Computer Design Model for Air-to-Air Heat Pumps. Oak Ridge National Laboratory, 1983

$$P_{Compr}^{nom} = \left(\frac{P_U^{nom}}{COP^{nom}} - P_{Auxil}^{nom} \right) \cdot \eta_{Motor} \qquad (1)$$

2. Calcolo della portata di massa dei fluidi secondari all'evaporatore e al condensatore:

$$\dot{m}_{S,Evap}^{nom} = \frac{P_{Evap}^{nom}}{c_{p,Evap} \cdot (T_{S,Evap,In}^{nom} - T_{S,Evap,Out}^{nom})} \qquad (2a)$$

$$\dot{m}_{S,Cond}^{nom} = \frac{P_{Cond}^{nom}}{c_{p,Cond} \cdot (T_{S,Cond,Out}^{nom} - T_{S,Cond,In}^{nom})} \qquad (2b)$$

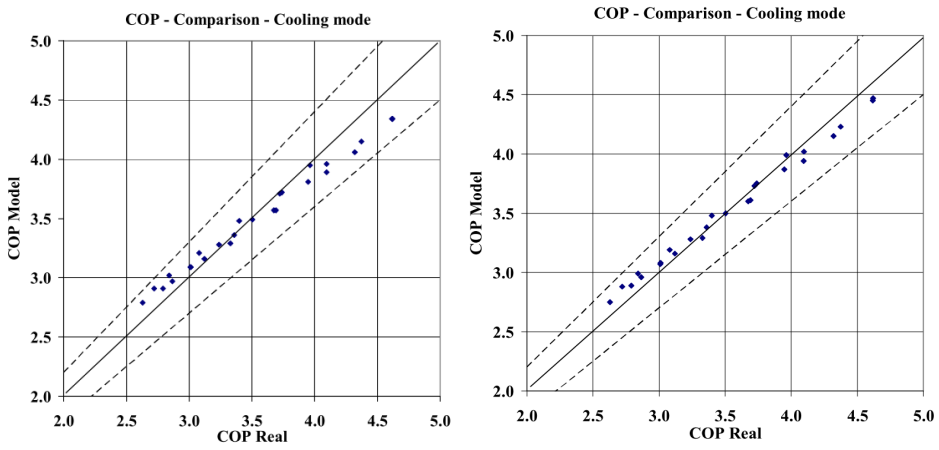
3. Calcolo delle temperature di evaporazione e di condensazione. In funzione del tipo di macchina e della modalità di funzionamento (riscaldamento o raffrescamento), il modello determina le differenze di temperatura minime e massime tra il fluido refrigerante e le temperature medie dei fluidi secondari, attraverso la seguente tabella:

	Aria		Acqua	
	Min ΔT [°C]	**Max ΔT [°C]**	**Min ΔT [°C]**	**Max ΔT [°C]**
Evaporatore in raffrescamento	11	20	4	8
Condensatore in raffrescamento	6	20	5	12
Evaporatore in riscaldamento	6	15	5	12
Condensatore in riscaldamento	18	27	4	8

Tabella 10 - Range definiti per le differenze di temperature tra fluido refrigerante e fluidi secondari, in funzione dello scambiatore di calore (evaporatore o condensatore) e della modalità di funzionamento (riscaldamento o raffrescamento)

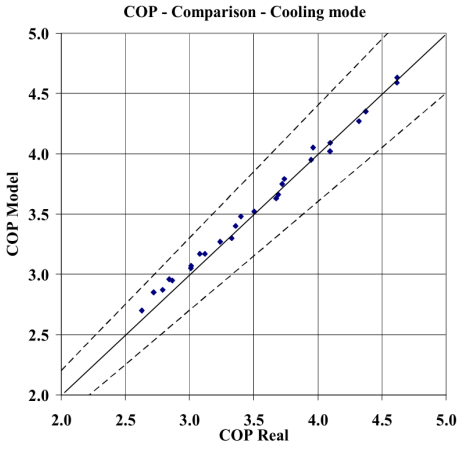
Come detto, i valori presenti costituiscono la base per il calcolo delle differenze di temperatura tra fluido refrigerante e fluido secondario assunte per il funzionamento in condizioni nominali.
Tale stima viene effettuata attraverso il ricorso all'indice di dimensionamento degli scambiatori di calore, precedentemente citato tra i parametri di input del modello.
Tale dato è assunto dall'utente, in funzione dell'azienda costruttrice.

In breve, tale indice assume valori tra 0 (sottodimensionamento degli scambiatori) e 10 (sovradimensionamento degli scambiatori).
In quanto assunto dall'utente, tale valore non è univoco. Tale dato potrebbe dunque apparire critico, in quanto vincola l'accuratezza del modello alle scelte dell'utente. Tuttavia, un'analisi di sensitività ha dimostrato che la variazione dell'indice di dimensionamento degli scambiatori non modifica sostanzialmente l'accuratezza del modello, rendendosi quindi utile per un ulteriore affinamento dei risultati. Ad esempio di tale affermazione si riportano i 4 diagrammi, rappresentanti il confronto tra COP previsti e COP misurati per 4 diversi valori dell'indice di dimensionamento degli scambiatori:

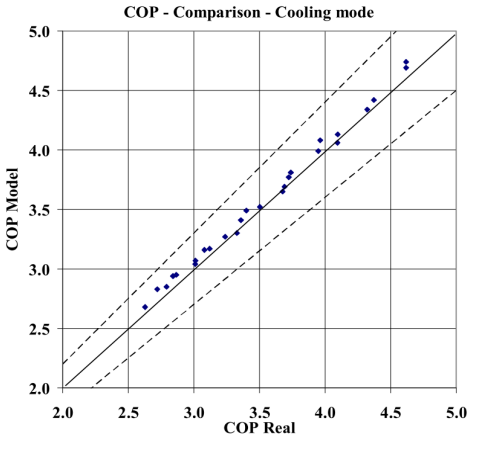


a) I_{Dim} = 5

b) I_{Dim} = 7



c) I_{Dim} = 9



d) I_{Dim} = 10

Figura 64. Comparazione dei valori di COP calcolati e misurati per pompa di calore in raffrescamento, al variare dell'indice di dimensionamento degli scambiatori

In base all'indice di dimensionamento definito dall'utente, il modello definisce, attraverso interpolazione lineare dei valori , le differenze di temperatura tra fluido refrigerante e fluidi secondari, all'evaporatore e al condensatore, in condizioni nominali, in riscaldamento e/o in raffrescamento.
In tal modo si giunge alla determinazione delle temperature di evaporazione e di condensazione del refrigerante($T^{nom}_{F,Evap}$ e $T^{nom}_{F,Cond}$) in condizioni nominali.

- Calcolo dell'efficienza termica dell'evaporatore e del condensatore, in riscaldamento e/o in raffrescamento:

$$\varepsilon_{Cond} = \frac{T^{nom}_{S,Cond,Out} - T^{nom}_{S,Cond,In}}{T^{nom}_{F,Cond} - T^{nom}_{S,Cond,In}} \qquad (3a)$$

$$\varepsilon_{Evap} = \frac{T^{nom}_{S,Evap,In} - T^{nom}_{S,Evap,Out}}{T^{nom}_{S,Evap,In} - T^{nom}_{F,Evap}} \qquad (3b)$$

A tal fine si suppone che il fluido refrigerante evolva isotermo, senza tener conto del surriscaldamento e del sottoraffreddamento dello stesso. Tale ipotesi risulta infatti accettabile, considerando che la maggior parte dell'energia termica viene scambiata nel corso dei cambiamenti di fase del fluido refrigerante.

- Calcolo della portata di massa dei fluidi secondari all'evaporatore e al condensatore:

$$\dot{m}^{nom}_{S,Cond} = \frac{P^{nom}_{Cond}}{C_{p,Cond} \cdot (T^{nom}_{S,Cond,Out} - T^{nom}_{S,Cond,In})} \qquad (4a)$$

$$\dot{m}^{nom}_{S,Cond} = \frac{P^{nom}_{Cond}}{C_{p,Cond} \cdot (T^{nom}_{S,Cond,Out} - T^{nom}_{S,Cond,In})} \qquad (4b)$$

- Determinazione dei punti di riferimento nel ciclo termodinamico, in condizioni nominali. A tal fine il modello usa le caratteristiche termodinamiche del fluido refrigerante presente nella macchina in esame, che spesso costituisce un dato da catalogo. I punti vengono denominati secondo quanto illustrato nella sottostante figura 65.

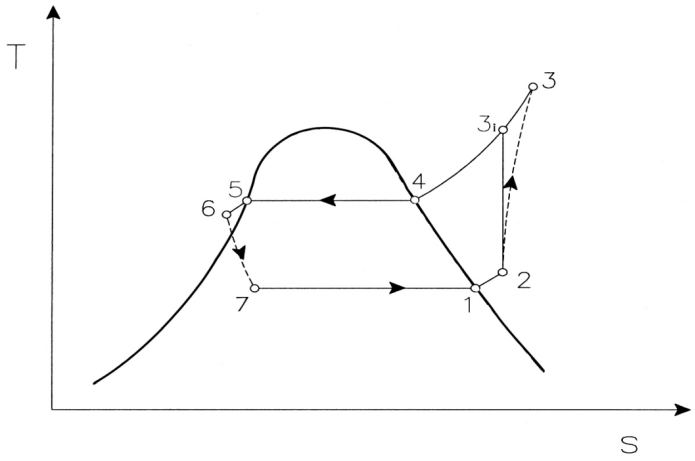


*Figura 65.*Denominazione dei punti costituenti il ciclo termodinamico di riferimento

- Determinazione della portata volumetrica di refrigerante in condizioni nominali:

$$\dot{V} = \dot{m}_F^{nom} \cdot v_2 = \frac{P_{Evap}^{nom}}{h_2 - h_7} \cdot v_2 \qquad (5)$$

Si suppone che la portata volumetrica del fluido refrigerante si mantenga costante in qualsiasi condizione operativa, limitando dunque l'uso del modello a pompe di calore mosse da compressori volumetrici. Le prestazioni nel caso di pompe di calore dotate di inverter al compressore vengono considerate anch'esse a portata volumetrica costante, considerando successivamente le curve di parzializzazione ottenute dall'applicazione della prEN ISO 14825.

- Calcolo dell'entalpia al punto di riferimento 3 del ciclo termodinamico sopra illustrato:

$$h_3^{nom} = h_2^{nom} + \frac{P_{Compr}^{nom}}{\dot{m}_F^{nom}} \qquad (6)$$

- Determinazione dell'efficienza isentropica del compressore in condizioni standard:

$$\eta_{is}^{nom} = \frac{\dot{m}_F^{nom} \cdot (h_{3i}^{nom} - h_2^{nom})}{P_{Compr}^{nom}} \qquad (7)$$

In questo modo risultano determinati tutti i parametri di base per la pompa di calore in oggetto, utilizzando, come visto, dati di catalogo e dati prestazionali nominali. A partire dai parametri di base vengono successivamente calcolate le prestazioni (principalmente potenza utile massima e COP) della pompa di calore in condizioni operative contingenti. A tal fine, per ciascuna condizione di lavoro (corrispondente, per esempio, a un timestep di simulazione, nel caso di software di simulazione dinamica edificio-impianto), è richiesto l'inserimento dei seguenti dati da parte dell'utente (o del software di simulazione dinamica):

- portata di massa dei fluidi secondari ($\dot{m}_{S,Ext}^{timestep}$ e $\dot{m}_{S,Int}^{timestep}$) nello specifico timestep, quando diverse da quelle nominali;
- temperature dei fluidi secondari nello specifico timestep, in entrata alla macchina ($T_{S,Ext,In}^{timestep}$ e $T_{S,Int,In}^{timestep}$);
- modalità di funzionamento (riscaldamento o raffrescamento);
- potenza media utile richiesta dall'utenza nel corso dello specifico timestep ($P_U^{timestep}$);
- potenza elettrica totale mediamente consumata dai sistemi ausiliari nel corso dello specifico timestep ($P_{Aux}^{timestep}$), quando diversa da quella rilevata in condizioni nominali.

Di seguito si riassume lo schema di calcolo (iterativo) delle performance delle pompe di calore in condizioni operative contingenti, a seguito dei valori di input sopra indicati. Alla prima iterazione il modello assume le potenze nominali all'evaporatore e al condensatore quali valori di primo tentativo. Da qui parte la fase di calcolo, comune a tutte le iterazioni:

1. considerando che l'efficienza dell'evaporatore e del condensatore sian costanti al variare delle condizioni al contorno, vengono calcolate le temperature di evaporazione e di condensazione:

$T_{F,Cond} = \frac{P_{Cond}}{\dot{m}_{S,Cond} \cdot C_{p,Cond} \cdot \varepsilon_{Cond}} + T_{S,Cond,In}$	(8a)
$T_{F,Evap} = T_{S,Evap,In} - \frac{P_{Evap}}{\dot{m}_{S,Evap} \cdot C_{p,Evap} \cdot \varepsilon_{Evap}}$	(8b)

2. tracciamento del ciclo termodinamico;
3. comparazione tra le potenze termiche trasferite all'evaporatore e al condensatore assunte all'inizio dell'iterazione e quelle derivanti dal ciclo termodinamico tracciato. Se le potenze termiche differiscono per entità superiori al valore di tolleranza imposto, viene avviata una nuova iterazione, assegnando alle potenze termiche all'evaporatore e al condensatore i valori calcolati attraverso il ciclo termodinamico tracciato.

Al termine del ciclo iterativo vengono quindi ottenute la potenza utile massima erogabile dalla macchina e il COP a piena potenza.
A questo punto resta da determinare la variazione del valore di COP indotta dalla regolazione e quindi dall'eventuale parzializzazione (vedi Capitolo 3).

5.3.3. Il modello dello scambiatore a terreno

Il modello CaRM[11] permette di simulare in modo dettagliato il comportamento termico degli scambiatori di calore a terreno a sviluppo verticale, in particolare la singola U, doppia U, tubi concentrici e pali energetici. Per la risoluzione della conduzione termica in regime variabile si fa uso dell'analogia elettrica.
Qui di seguito si riporta una breve descrizione del modello.
Nel terreno lo scambio termico considerato è per sola conduzione termica: questa ipotesi è realistica quando la velocità della falda acquifera è relativamente bassa, utilizzando una conduttività termica equivalente per gli strati di terreno.
Quando la velocità incomincia ad essere elevata, intervengono altri fenomeni di scambio, sia termici che di massa che, come già sottolineato, migliorano decisamente lo scambio termico e quindi le prestazioni ottenibili. D'altronde la difficoltà di prevedere la variabilità durante l'anno di questa circolazione dell'acqua ci ha portato ad accettare l'ipotesi di sola conduzione che fornisce quindi un alto grado di sicurezza e quindi di affidabilità dei risultati prestazionali ottenuti e utilizzati per verificare il dimensionamento del sistema geotermico.
Con riferimento alla figura 66, il terreno e lo scambiatore di calore sono suddivisi in *m* dischi in profondità. Ogni disco a sua volta è suddiviso in *n* corone cilindriche nella direzione radiale. Per il *j-esimo* disco e per la *i-esima* corona cilindrica, può essere scritta la seguente equazione di bilancio termico:

$$\frac{T(j,i-1)-T(j,i)}{R(j,i-1)}+\frac{T(j,i+1)-T(j,i)}{R(j,i)}= C(j,i)\cdot\frac{T(j,i)-T_{-\Delta\tau}(j,i)}{\Delta\tau} \qquad (1)$$

[11] De Carli M, Tonon M, Zarrella A, Zecchin R. A computational capacity resistance model (CaRM) for vertical ground coupled heat exchangers. Renewable Energy 35 (2010), pp. 1537-1550

dove: *C* è la capacità termica, *R* è la resistenza termica tra due corone cilindriche adiacenti, *T* è la temperatura del nodo al passo temporale di calcolo, $T_{-\Delta\tau}$ è la temperatura riferita al precedente istante di calcolo.
L'equazione (1) considera la diffusione termica soltanto in direzione radiale. Inoltre nel modello si assume la simmetria cilindrica attorno allo scambiatore di calore, quindi la temperatura di parete della perforazione è considerata uniforme. In realtà, la variazione di temperatura del fluido termovettore lungo le tubazioni determina un'asimmetria termica locale in direzione assiale; tuttavia questa è stata verificata come trascurabile, in quanto la differenza massima di temperatura sul fluido termovettore tra mandata e ritorno all'ingresso dello scambiatore è normalmente di 4-5°C.

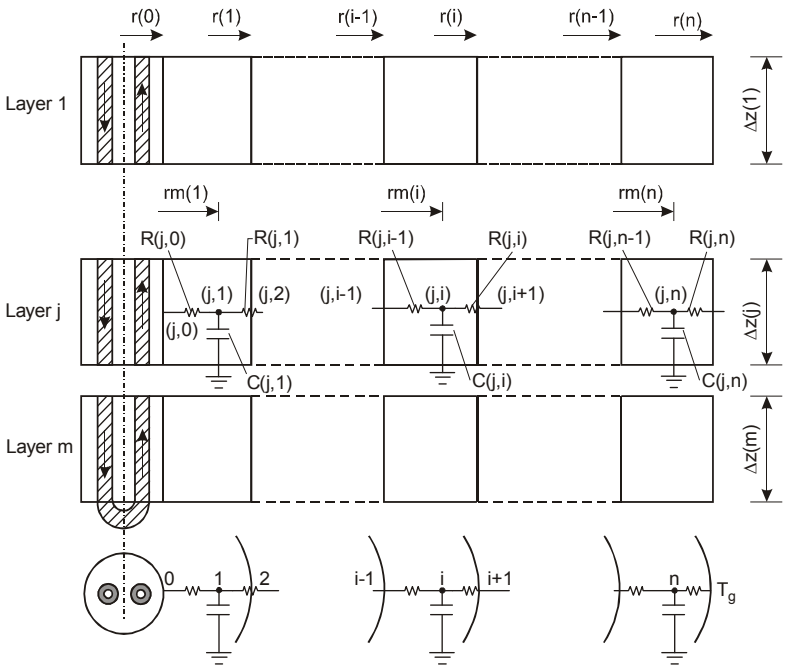


Figura 66. Modellizzazione del terreno in CaRM.

Per l'ultima corona cilindrica la condizione al contorno è la temperatura indisturbata del terreno (T_g).
Ad ogni disco è possibile associare un particolare valore della temperatura indisturbata: in questo modo è possibile considerare un profilo verticale di temperatura, che può essere importante nel caso di siti con anomalia geotermica.
Lo scambio termico tra il fluido termovettore che scorre nello scambiatore di calore e il terreno circostante dipende dalla posizione dei tubi nella perforazione, dalle

proprietà termofisiche (soprattutto la conduttività termica) del materiale di riempimento e del materiale delle tubazioni.
In figura 67, è riportato lo schema della modellizzazione della sonda a doppia U. Le resistenze termiche tra i tubi e tra tubo e parete della perforazione sono costanti nel tempo e sono un input per il modello CaRM: esse possono essere valutate con formule disponibili in letteratura o con software che risolvono la conduzione termica.

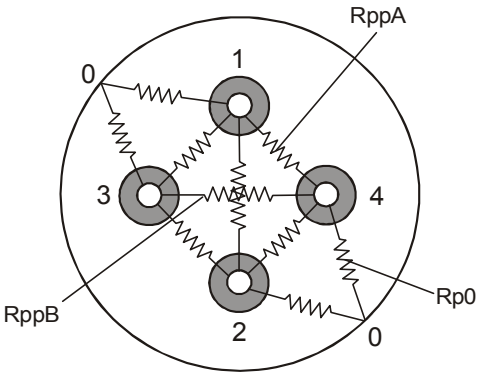


Figura 67. Modello di sonda a terreno (doppia U).

Anche la resistenza termica di convezione all'interno delle tubazioni può giocare un ruolo non trascurabile. A tal proposito, il coefficiente di scambio termico convettivo viene calcolato tenendo conto del regime di deflusso (laminare, transizione, turbolento).

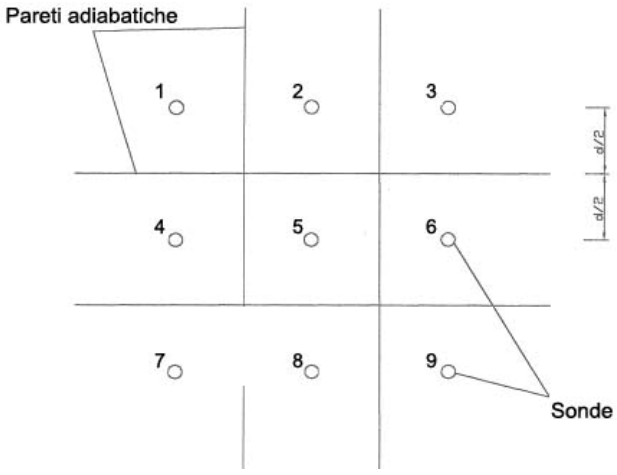


*Figura 68.*Esempio di suddivisione dell'area dello scambiatore tra sonde adiacenti nel modello.

Il modello permette di analizzare il comportamento termico del campo “geotermico”, ovvero la disposizione degli scambiatori di calore, prendendo in considerazione l’interferenza termica tra sonde adiacenti. In questo caso la condizione a contorno è quella di adiabaticità in corrispondenza della superficie posta a metà interasse (figura 68).

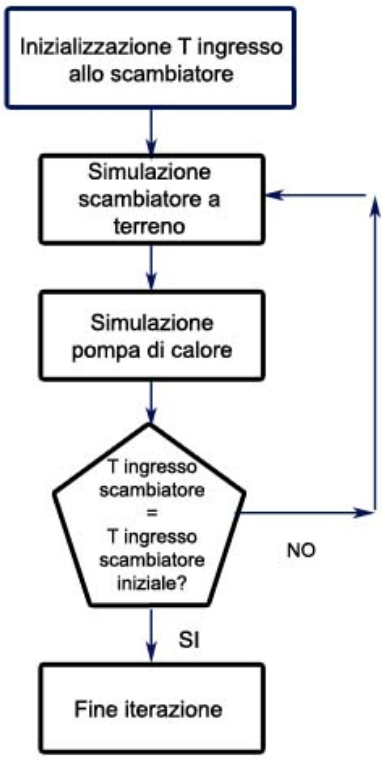


Figura 69. Diagramma di flusso del codice integrato.

La capacità termica dello scambiatore di calore, dovuta sia al materiale di riempimento che al fluido termovettore diventa molto importante quando vengono effettuate simulazioni con passo temporale di calcolo inferiore al tempo di risposta caratteristico dello scambiatore di calore che si sta analizzando.
Per tale motivo un miglioramento del modello in questo senso è stato successivamente elaborato[12].
Per passare dal carico termico o frigorifero, lato edificio, al circuito scambiatore di calore a terreno, il modello CaRM è stato integrato con il modello presentato nel

[12] Zarrella A, Scarpa M, De Carli M. Short time step analysis of vertical ground-coupled heat exchangers: the approach of CaRM. Renewable Energy 36 (2011), pp. 2357-2367.

capitolo precendente.[13], che permette di simulare il funzionamento della pompa di calore.
Quest'ultimo codice è stato opportunamente modificato, in modo da potersi interfacciare con il modello per gli scambiatori di calore a terreno. Il risultato è un unico programma integrato che vede come ingresso sia il carico dell'edificio che la temperatura di ritorno dall'impianto lato utenza fornendo come uscita l'efficienza della macchina e le temperature di ingresso e uscita dello scambiatore geotermico, oltre che le temperature del terreno.
In Figura 69 è rappresentato il diagramma di flusso sommario del funzionamento del codice di calcolo integrato.

5.3.4. Risultati delle simulazioni

Le simulazioni hanno essenzialmente riguardato un'analisi di sensitività alle caratteristiche fondamentali dello scambiatore quali la scelta del tipo di sonda, a singola o doppia U, la lunghezza delle sonde e il passo tra loro.
La portata di fluido lato scambiatore è stata raddoppiata nel passaggio da semplice a doppia U per evitare l'insorgere di moto laminare che porterebbe ad una forte penalizzazione del coefficiente di scambio termico interno alla sonda.
Per quanto riguarda la macchina, come da progetto le temperature di mandata all'utenza sono 7°C in raffrescamento e 45°C in riscaldamento.
Per la regolazione della macchina si sono considerate le due ipotesi alternative di funzionamento on-off oppure modulante fino al 25% della potenza massima mediante inverter sull'alimentazione dei motori elettrici dei compressori.
Si sono così individuate quattro tipologie di coppie macchina-scambiatore:

- Sonda singola U + On Off
- Sonda singola U + modulante
- Sonda doppia U + On Off
- Sonda doppia U + modulante

Il periodo di riscaldamento va dal 15 ottobre al 15 aprile come previsto per la zona climatica "E". Il condizionamento estivo è normalmente previsto negli edifici dell'Università Iuav di Venezia, dal 1 giugno al 30 settembre.
Le simulazioni sono state svolte con riferimento al Test Reference Year (TRY) fornito con il codice di calcolo (è presente infatti nel database di Energy Plus) usato per la valutazione della domanda oraria dell'edificio.

[13] Binotto, L. Cecchinato, M. De Carli, M. Mantovan, M. Scarpa, R. Zecchin. Numerical Model for the Estimation of Performances of Heat Pumps and Chillers in Real Conditions. SET 2006, Vicenza.

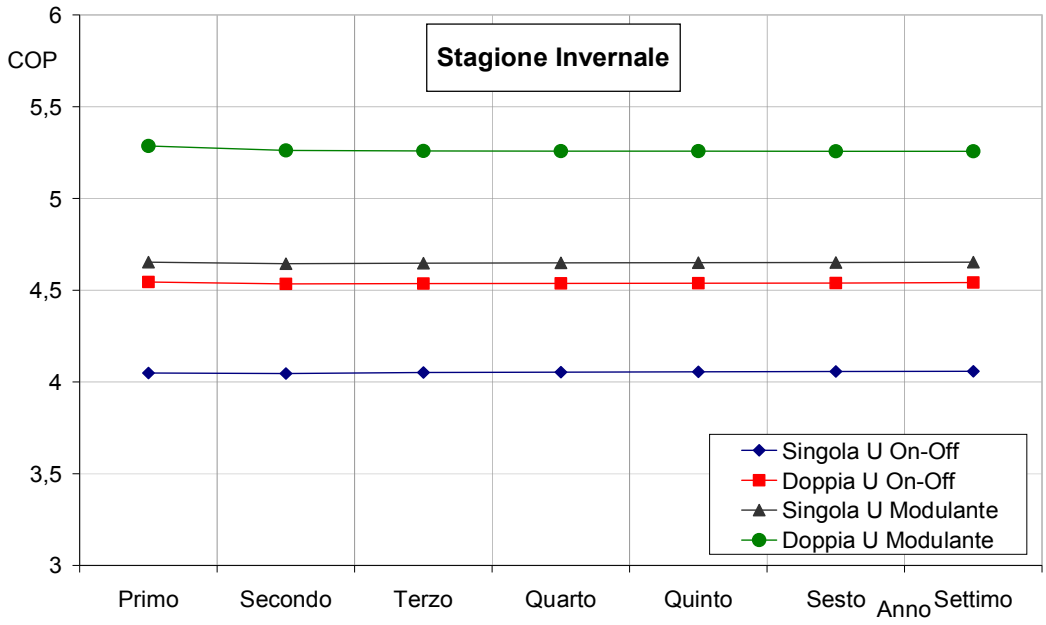


Figura 70. Andamento del COP stagionale in sette anni.

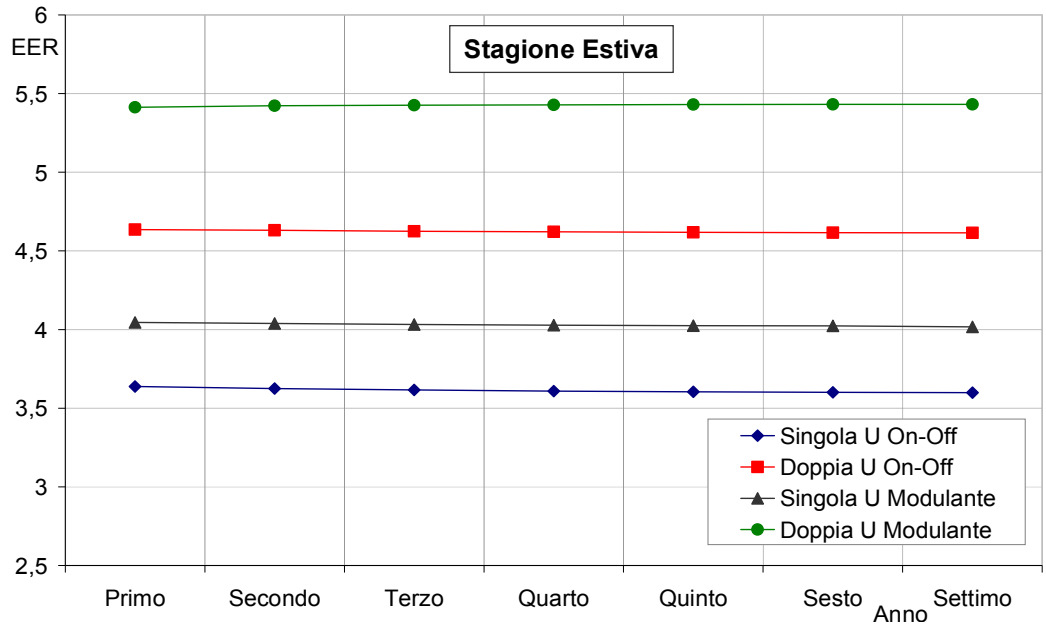


Figura 71. Andamento del EER stagionale in sette anni.

Si è quindi provveduto alla verifica della variabilità dei risultati ottenuti nel tempo a fronte degli stessi dati medi per le condizioni meteorologiche e la domanda.

I risultati sono riportati nelle figure 70 e 71 rispettivamente per quanto riguarda il COP e l'EER stagionali.
Si osservi una notevole stabilizzazione di queste prestazioni nonostante la differenza fra la domanda estiva e quella invernale. Tale effetto è certamente dovuto all'inerzia termica della porzione del terreno interessato dalla presenza dello scambiatore, elevata rispetto ai flussi di energia stagionali in gioco. Il rapido riequilibrio termico è così agevolato dall'elevata umidità del terreno.
Ciò deriva anche dal bilancio dell'energia presa dal terreno durante il periodo invernale e ceduta allo stesso durante il periodo estivo. Infatti, il riscaldamento annuale dell'edificio e l'energia spesa in raffrescamento non sono bilanciate, ma il corrispondente scambio energetico con il suolo lo è, come si può vedere dalla figura 72 (tipologia di sonda: doppia "U": lunghezza sonda: 40 m; spazio della sonda: 4 m).

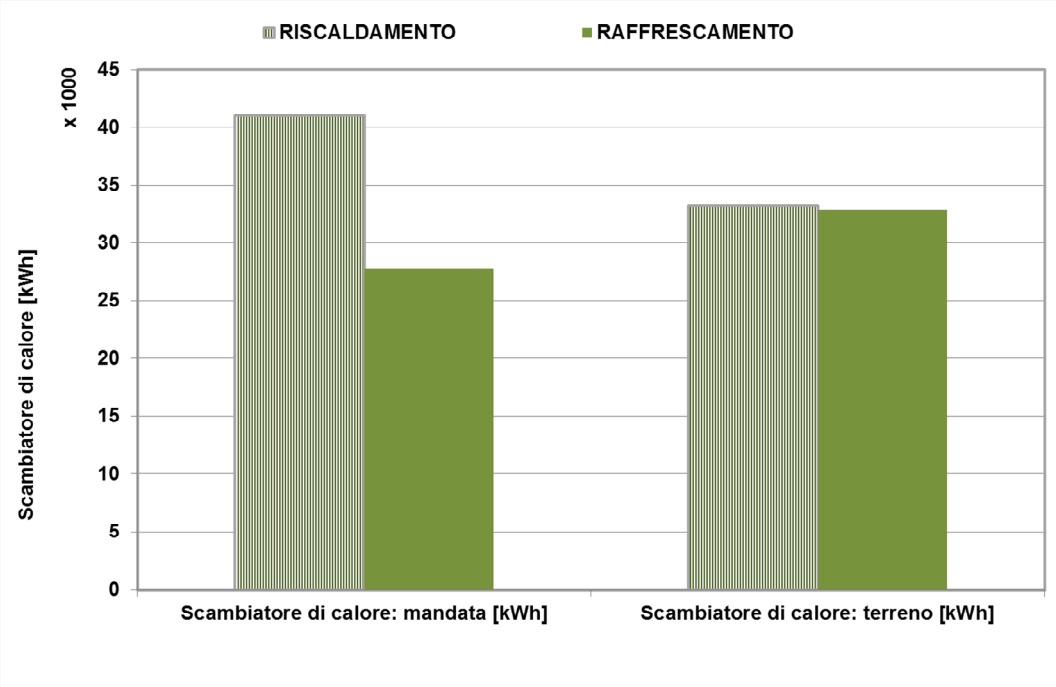


Figura 72. Example of thermal energy exchange at the user and borehole sides in heating and cooling seasons.

I successivi risultati presentati per un singolo anno possono quindi essere considerati effettivamente rappresentativi per ciascuna configurazione.
Questi quattro casi evidenziano una fortissima influenza delle scelte sulle prestazioni finali con netti miglioramenti legati all'opzione della sonda a doppia U e della regolazione modulante.

Nel periodo invernale i COP stagionali sono sempre comunque compresi tra 4 e 5,3 mentre in estate l'EER stagionale è compreso tra 3,6 e 5,4.

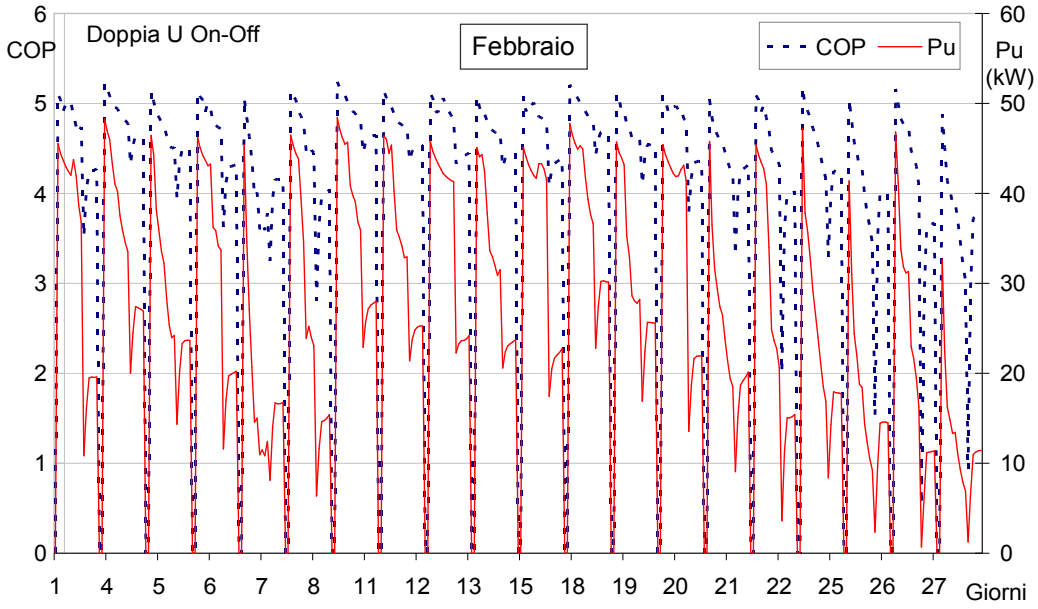


Figura 73. Profili di COP orari e potenza resa (Pu) dalla macchina nel mese di febbraio durante le ore di funzionamento.

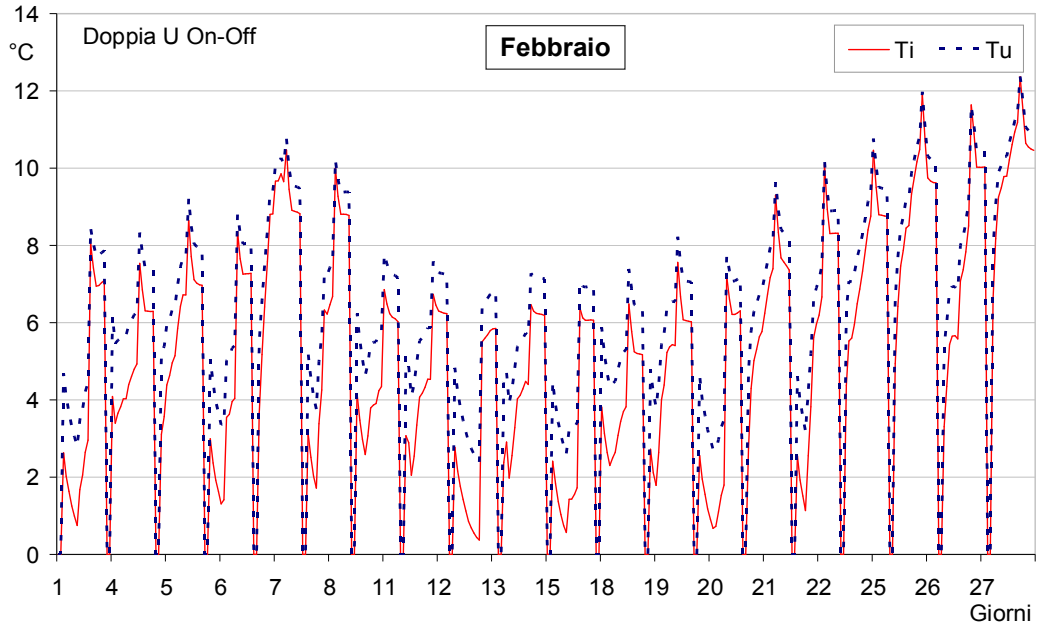


*Figura 74.*Temperature ingresso (Ti) e uscita (Tu) dallo scambiatore nel mese di febbraio durante le ore di funzionamento.

Nella figura 73 si riportano a titolo rappresentativo rispettivamente gli andamenti del COP e della corrispondente potenza termica fornita all'utenza quando diversa da zero nel mese di febbraio.
Nella figura 74 sono presentati i corrispondenti andamenti delle temperature in ingresso ed uscita dallo scambiatore a terreno, che coincidono con le temperature di uscita e ingresso dall'evaporatore della macchina. Le prove si riferiscono allo scambiatore con sonda doppia U e macchina con regolazione on-off.Si osservi un andamento giornaliero abbastanza simile per il COP. Inizialmente un picco intorno a 5 che poi si riduce gradatamente anche per effetto della penalizzazione on-off quando il gruppo parzializza maggiormente. Lo spegnimento notturno permette però di ripristinare rapidamente la situazione termica nell'intorno di ciascuna sonda riportando per la mattina la situazione precedente. Le temperature di uscita oscillano tra i 3°C e gli 8°C nel periodo più gravoso.

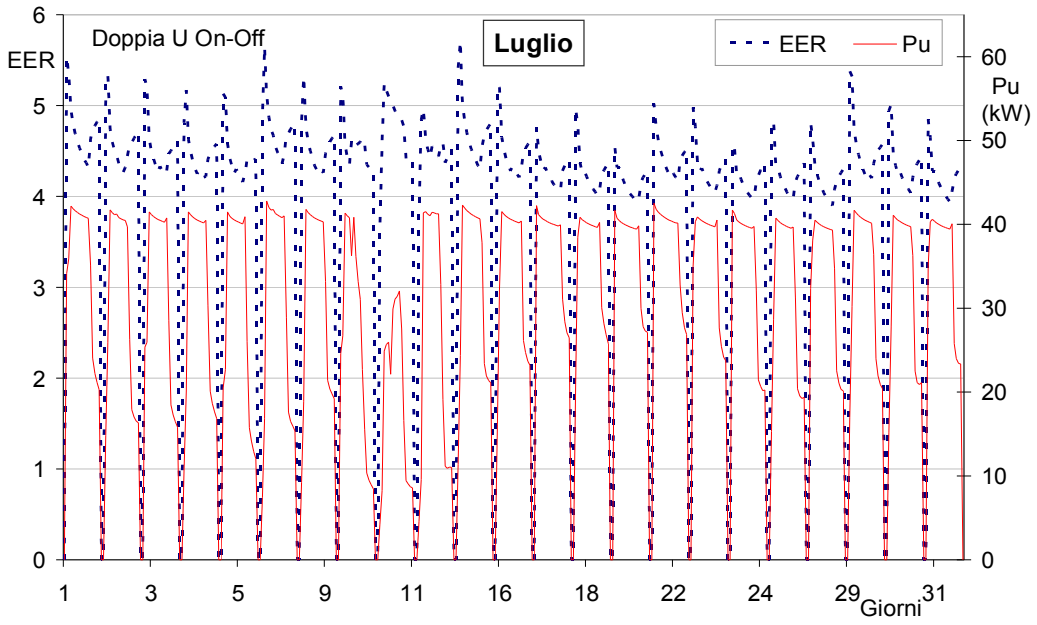


Figura 75. Profili di EER orari e potenza resa dalla macchina nel mese di luglio durante le ore di funzionamento.

Analogamente per la stessa coppia scambiatore e macchina nelle figure 75 e 76 si riportano, per il mese di luglio in cui la domanda è più forte, gli andamenti del EER e della potenza frigorifera fornita all'utenza quando diversa da zero nonché le relative temperature di ingresso ed uscita dallo scambiatore.
Anche in questo caso nonostante un leggero calo di EER nel corso della giornata i valori si mantengono piuttosto elevati con temperature di raffreddamento del condensatore comprese 30-35°C.

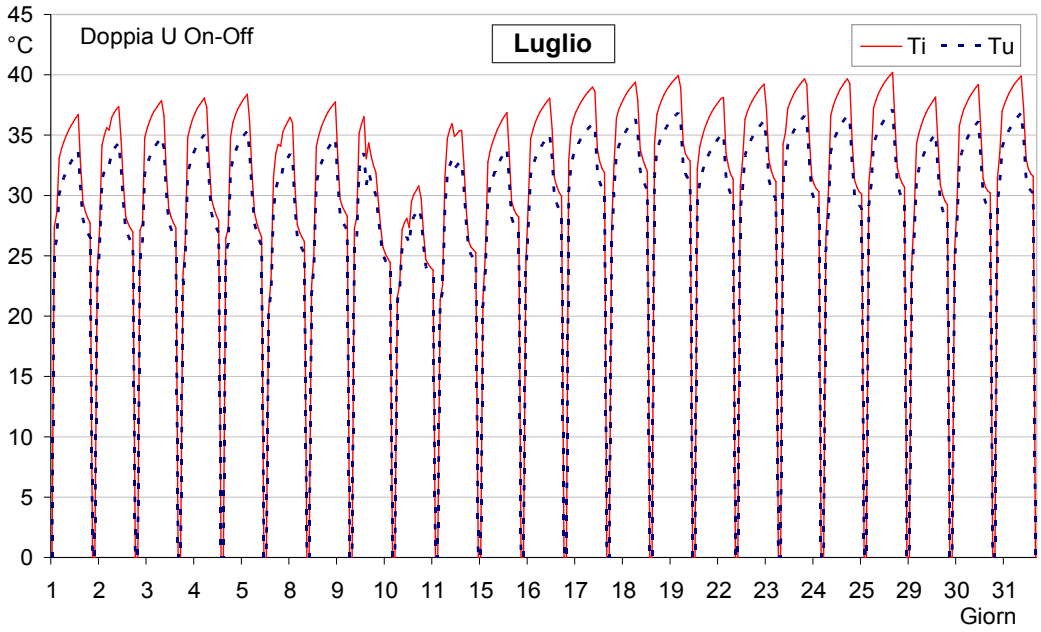


Figura 76. Temperature ingresso e uscita dallo scambiatore nel mese di luglio durante le ore di funzionamento.

Per quanto riguarda la geometria dell'accumulo l'effetto della lunghezza delle sonde è riportato nelle figure 77 e 78.

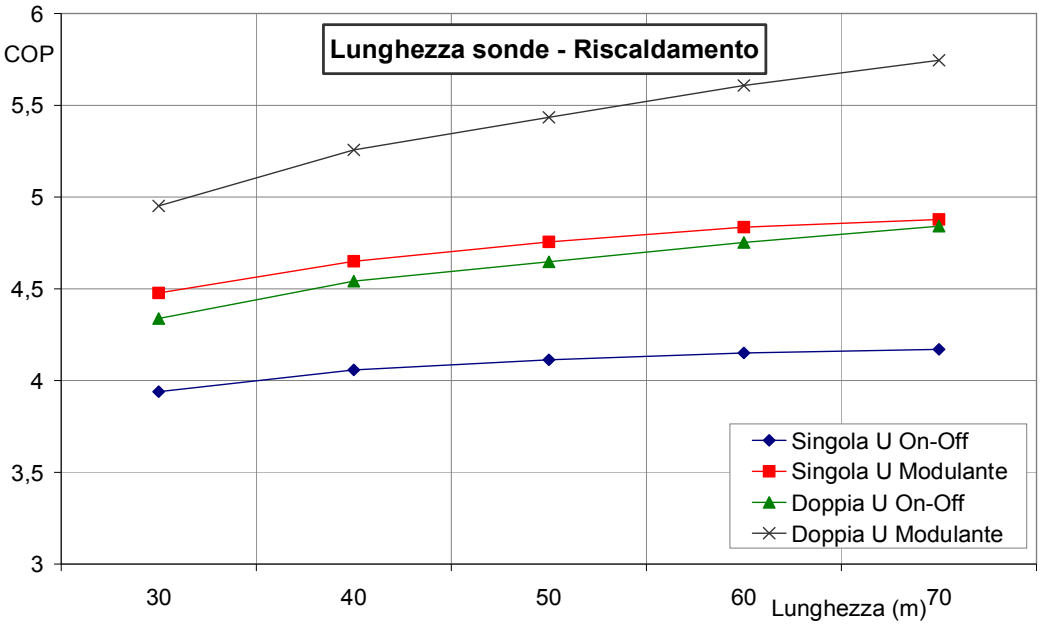


Figura 77. COP stagionali al variare della lunghezza delle sonde.

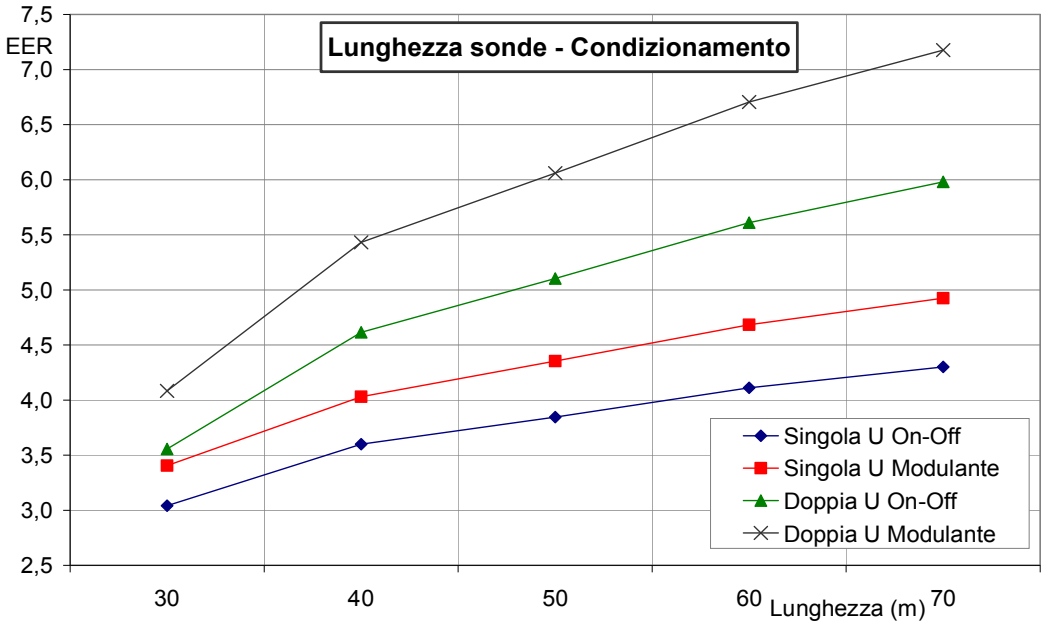


Figura 78. COP stagionali al variare della lunghezza delle sonde.

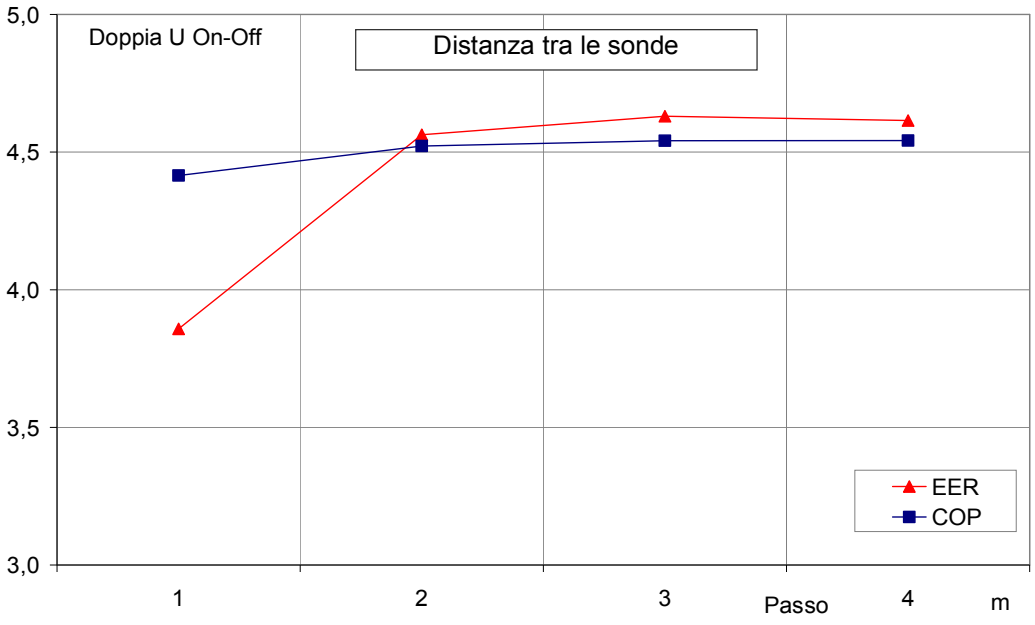


Figura 79. COP ed EER stagionali al variare del passo tra le sonde

Aumentare la lunghezza significa naturalmente incrementare la superficie di scambio e questo ha un effetto benefico vistoso sull'aumento delle prestazioni del sistema, in particolare sui COP ed EER stagionali.
L'opportunità viene poi pienamente sfruttata proprio in presenza di quei componenti che risultano migliorativi per la macchina e cioè la sonda doppia U e la regolazione modulante, come si evince dal notevole aumento della pendenza delle curve, specie nel caso estivo
Si considera, infine, l'influenza del passo minimo tra le sonde, i cui effetti sono riportati sempre in termini di COP ed EER stagionali nella figura 79 per la macchina on-off e sonde doppia U.
Sorprendentemente in questo caso l'aumento del passo e quindi della dimensione dello scambiatore non risulta dare un netto beneficio. Evidentemente con le potenze in gioco e le caratteristiche del terreno un passo di 4 m è già adeguato.

5.3.5. Confronto: un impianto geotermico e un impianto tradizionale

In questa sottosezione la pompa di calore geotermica è stata paragonata con altre tipologie impiantistiche.
In tabella 11 sono riassunti i casi analizzati.

Codice	Descrizione dell'impianto
A	Pompa di calore invertibile con regolazione On-Off accoppiata con scambiatore di calore geotermico
B	Pompa di calore invertibile con regolazione ad Inverter con scambiatore di calore geotermico
C	Pompa di calore invertibile raffreddata con acqua di laguna e torre evaporative (per l picchi di carico estivi)
D	Caldaia a condensazione + chiller accoppiato con torre evaporativa.
E	Pompa di calore invertibile con regolazione On-Off ad aria
F	Pompa di calore invertibile con regolazione ad Inverter, raffreddata ad aria

Tabella 11 - Descrizione degli diversi impianti considerati

Le prestazioni delle altre tipologie impiantistiche sono calcolate facendo riferimento al modello di pompa di calore sviluppato e già analizzato nel capitolo 5.1.
In caso di pompe di calore invertibili accoppiate con acqua di laguna sono stati usati valori della temeperatura dell'acqua misurata nell'anno 2007 nel centro di Venezia a 1,5 m di profondità.
Le prestazioni della caldaia a condensazione è stata simulata attraverso l'interpolazione dei dati da catalogo.

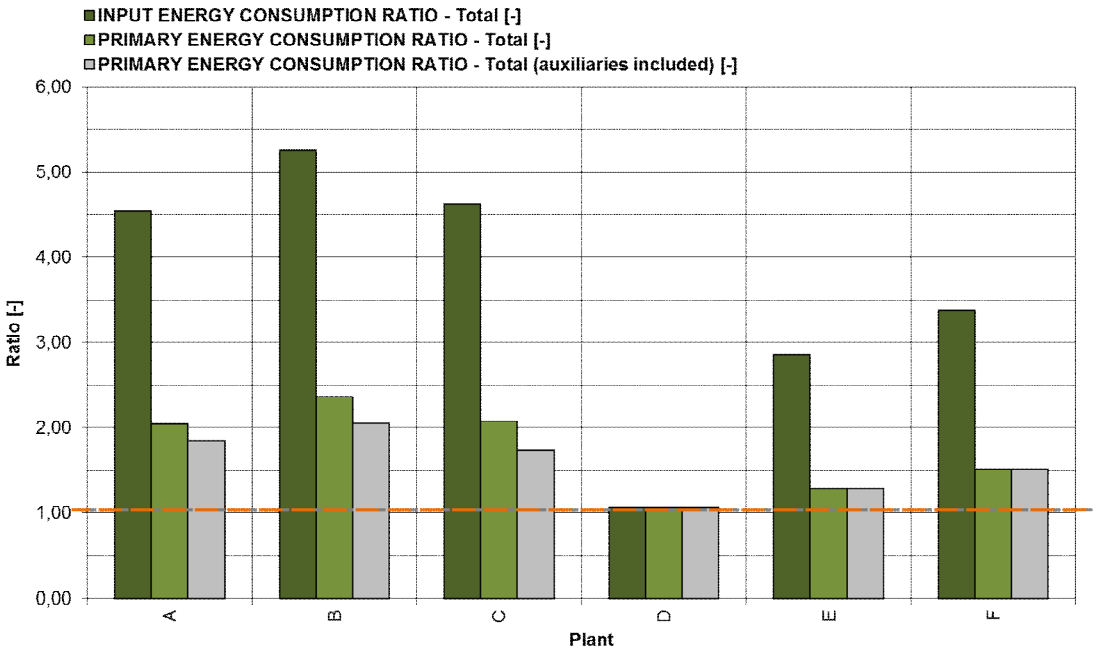


Figura 80.Livelli di consumo energetico durante la stagione invernale

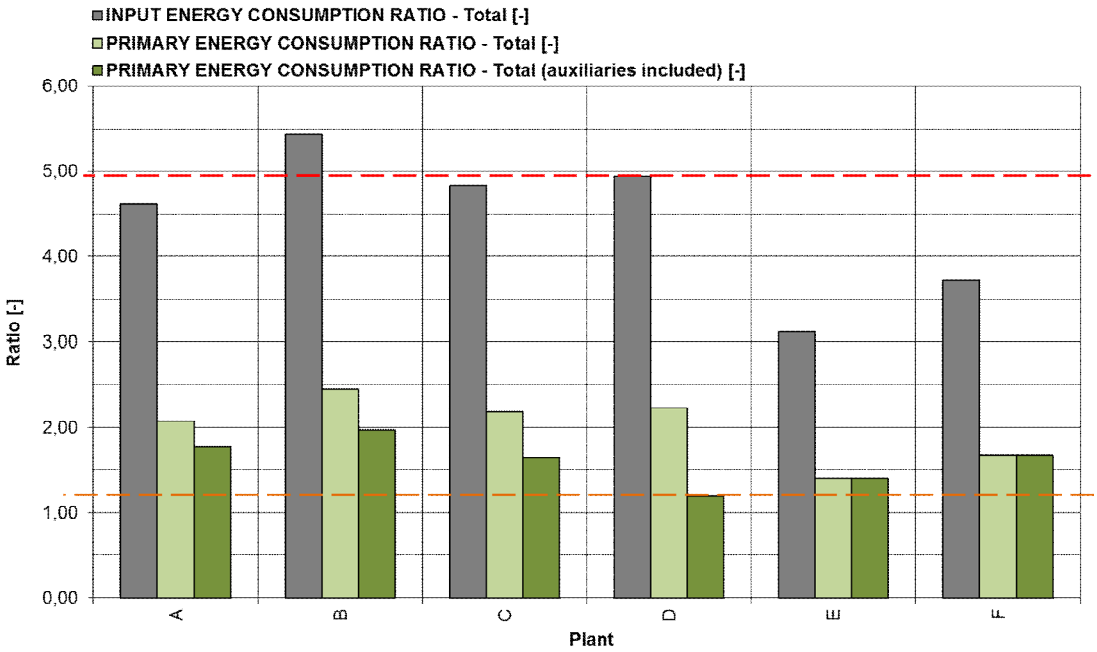


Figura 81. Livelli di consumo energetico durante la stagione estiva

In un primo momento il calcolo teneva in considerazione solo la produzione di energia termica con nessun riferimento al consumo di energia dovuto ai dispositivi ausiliari. In un secondo momento tale consumo è stato stimato e conseguentemente il fabbisogno energetico è stato calcolato nuovamente.
In figura 80/81 gli indicatori di consumo energetico di ingresso e (E_{needs}/ E_{Imput}) e l'indicatore di consumo di energia primaria ($E_{needs}/E_{primary}$, con l'efficienza di conversione di energia primaria uguale a 0,4 nel caso dell'utilizzo di elettricità) sono mostrati per ciascun tipo di sistema e per la stagione di raffrescamento e di riscaldamento: più alto è il valore, migliore è l'efficienza dell'impianto.
In particolare l'indice di consumo di energia primaria è calcolato sia tenendo conto solo dell'energia termica distribuita sia tenendo anche conto del consumo derivato dai dispositivi ausiliari.
Nelle figure 80/81 i risultati raggiunti, nel caso di riferimento, sono sottolineati da una linea tratteggiata e usati come punto di riferimento per i valori di consumo di energia in ingresso e i valori di consumo di energia primaria inclusi gli ausiliari.
La figura 80 mostra come la prestazione migliore sia ottenuta dal sistema B, mentre l'impianto A e C presentano gli stessi vantaggi.
In particolare nel caso B l'indice di consumo di energia primaria è doppio rispetto al sistema di riscaldamento tradizionale con l'utilizzo di caldaie.
In una fase intermedia, la pompa di calore invertibile aria acqua mostra efficienze energetiche migliori rispetto al sistema di riferimento ma ancora lontane dai livelli di efficienza raggiunti dalla pompa di calore geotermica e da quella con acqua di laguna.
La figura 81 mostra i risultati meglio bilanciati che nel caso del riscaldamento. Infatti, il sistema B ottiene le migliori prestazioni mentre il sistema A e C sono comparabili con la soluzione di pompa di calore invertibile ad aria con inverter.

5.3.6. Conclusioni

Lo studio svolto mediante simulazione delle prestazioni dello scambiatore geotermico verticale, al variare di dimensioni orizzontali e verticali, accoppiato ad una pompa di calore ha evidenziato coefficienti di prestazioni stagionali sempre decisamente superiori a quelli che si ottengono con la più frequente macchina aria-acqua e quindi decisamente interessanti dal punto di vista energetico e dei costi di gestione.
L'impianto geotermico è stato confrontato con altri tipi di impianti. La pompa di calore a inverter accoppiata con scambiatori di calore geotermici ha ottenuto i migliori risultati sia in riscadamento che in raffrescamento: la pompa di calore On Off accoppiata con scambiatori geotermici o con acqua di laguna ha mostrano buone performance in inverno mentre le prestazioni estive sono comparabili con la pompa di calore aria acqua con inverter.

In ogni caso nei periodi di riscaldamento le peggiori prestazioni sono ottenute dall'impianto tradizionale che consiste nelle caldaie a condensazione. Infatti, questo impianto raggiunge un consumo di energia primaria doppio se comparato con l'impianto più efficiente, considerando anche il consumo di energia elettrica dovuto ai dispositivi ausiliari del circuito esterno.

L'analisi di sensitività ha indicato la possibilità di incrementare decisamente i coefficienti prestazionali degli impianti geotermici utilizzando sonde con maggiore superficie di scambio (doppia U) e macchine più efficienti grazie ad una regolazione modulante.
L'esigenza di utilizzare aree piuttosto limitate nella realizzazione degli scambiatori non risulta avere effetti molto penalizzanti dato il livello di saturazione dell'acqua negli strati che permette un rapido riequilibrio dello stato termico anche in presenza di passi limitati. Viceversa l'aumento della lunghezza delle sonde dell'impianto fino a 70-100 m, valori abbastanza consueti per gli impianti geotermici realizzati nella terraferma, può permettere di incrementare decisamente il comportamento dell'impianto.La superficie di scambio è quindi il parametro su cui si deve puntare per un ulteriore miglioramento.
Da questo punto di vista è opportuno adoperarsi presso gli enti amministrativi preposti affinchè superino la loro attuale ritrosia ingiustificata, permettendo di installare anche a Venezia sonde di profondità maggiore degli attuali 40 m.

5.4 Caso studio: ex convento dei crociferi

Come sottolineato nel capitolo precedente, nel recupero degli edifici storici soggetti a tutela monumentale l'utilizzo di energia rinnovabile richiede molto più sforzo progettuale che nei nuovi edifici poichè quasi tutte le piu diffuse tecnologie sono inutilizzabili.
Dopo i due casi studio già presentati è stato analizzato il caso di utilizzo di una pompa di calore accoppiata all'uso dell'acqua di laguna nel recupero del Convento dei Crociferi, un complesso storico in Venezia soggetto a tutela monumentale. Qui l'Università Iuav di Venezia ha deciso di realizzare un campus di residenze universitarie dotato di tutti i servizi che oggi si richiedono per queste strutture.
La disponibilità di acque superficiali con un'adeguata circolazione di rinnovo dovuta alla vicinanza dell'edificio allo spazio lagunare aperto, permette di prevedere livelli termici interessanti per la macchina. A Venezia l'uso delle acque di falda normalmente non è permesso a causa del pericolo della subsidenza. L'installazione di una pompa di calore con scambiatore a terreno non è qui possibile a causa della significativa potenza della macchina prevista che richiedebbe, per la costruzione dello scambiatore a terreno, una vasta area indisponibile in questo caso.
Lo studio è stato svolto mediante simulazione dinamica e lanalisi è stata svolta per ottimizzare le scelte progettuali quantificando il risparmio energetico e lo sfruttamento di energie rinnovabili.

5.4.1. Il recupero del Convento dei Crociferi

Per la sua storia e valore architettonico il complesso dei Crociferi è soggetto a tutela monumentale.
Il convento e l'ospedale furono fondati alla metà del XII° secolo dall'ordine dei Crociferi accanto alla chiesa di Santa Maria Assunta per aiutare e dare rifugio ai pellegrini e ai crociati sulla loro strada verso la Terra Santa.
Esso fu ricostruito dopo gli incendi nel 1214 e 1514, e acquistato dai gesuiti nel 1657 a seguito della soppressione dell'ordine dei Crociferi.
Quando i gesuiti furono soppressi nel 1773, il monastero divenne scuola e poi caserma, nel 1808. I gesuiti ritornarono nel 1844 e tuttora occupano la parte del Convento a nord della chiesa. Quella a sud fu invece usate come caserma fino al 1990.
Una foto aerea della parte meridionale del convento è visibile in figura 80.
Questa parte è l'oggetto dell'intervento attuale che prevede il rinnovo con nuova destinazione d'uso in residenze universitarie con servizi ausiliare per studenti e professori ospiti.

Figura 82. Foto aerea della parte meridionale del Convento dei Crociferi

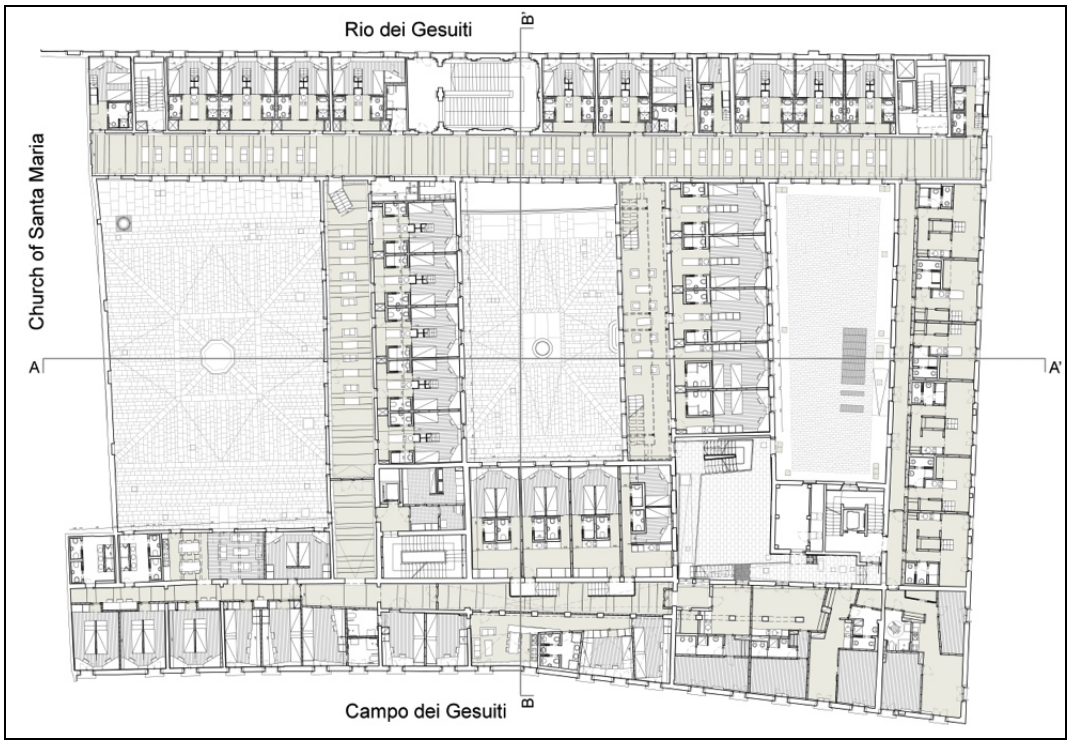


Figura 83. : Vista in pianta dell'area dell'intervento

Come mostrato in figura 83 esso presenta due chiostri sul lato sinistro e due ulteriori più piccoli cortili di servizio sul lato destro del complesso.
Nel mezzo di ciascun chiostro c'è un pozzo come si può vedere nella figura 84 per il chiostro principale. Ciascun pozzo è collegato ad una cisterna sotterranea che raccoglie le acque piovane dal cortile sovrastante.

Figura 84. Viste del Convento dei Crociferi : il chiostro principale

La volontà di conservare e anzi riattivare questi dispositivi ha impedito l'installazione di sistemi impiantistici o reti idrauliche sotto i chiostri. Nuove installazioni impiantistiche sono state possibili solo nei piu piccoli cortili di servizio
Il retro del complesso è bagnato dal Rio dei Gesuiti, come mostrato in figura 85.

Il progetto prevede la creazione di 177 appartamenti per studenti, ciascuno di essi con due posti letto, bagni autonomi, cucina e area studio. Ulteriori 32 unità residenziali più grandi saranno riservate a professori in visita.
Servizi quali lavanderia, sale riunioni, aule e sale studio saranno a disposizione degli ospiti interni. Invece i servizi di comunità come il bar, il ristorante per 100 coperti con relativa cucina, la palestra, la sala computer e la biblioteca, saranno aperti anche alla cittadinanza nei piu piccoli cortili di servizio.

Figura 85. Viste del Convento dei Crociferi : il canale Rio dei Gesuiti

L'impianto di climatizzazione è stato scelto per essere alimentato con acqua a bassa temperatura (40-45°C) in riscaldamento per permettere un uso soddisfacente della pompa di calore.
Nelle unità residenziali sono presenti ventilconvettori mascherati nell'arredo e una ventilazione controllata con immissione nelle camere e aspirazione nei bagni. Il sistema di ventilazione centralizzato permette un efficiente recupero termico dall'aria espulsa per preriscaldare l'aria di rinnovo. Ciascuna unità residenziale è automaticamente esclusa dalla rete di ventilazione in assenza di persone nella stanza e il totale flusso di aria è controllato da inverters che agiscono sui motori dei ventilatori.
Nelle stanze più grandi al piano terra gli impianti sono basati su ventilconvettori e distribuzione di aria primaria trattata da centrali poste nel sottotetto.
Particolare impegno ha richiesto l'installazione degli impianti in presenza di pareti affrescate. In qualche area, in assenza di tutela dei pavimenti esistenti, è stato possibile installare pannelli radianti. Tuttavia l'impossibilità di un uso generalizzato di questi ha impedito un livello termico dell'acqua di alimentazione più favorevole (30-35°C) per la pompa di calore.

Le centrali tecnologiche sono localizzate in una torre posta fra i due cortili sul lato destro e in vani sotterranei appositamente realizzati sotto questi due cortili. Nella torre viene installata una pompa di calore invertibile del tipo acqua-acqua usata per il riscaldamento e il condizionamento estivo.
L'acqua di laguna è prelevata dal Rio dei Gesuiti. Come si vede in figura 83 il canale ha dimensioni sufficienti per assicurare una portata adeguata e il punto di prelievo è posizionato vicino all'uscita in laguna aperta. La restituzione avviene più internamente a circa 50 m di distanza. Questo è importante in quanto a Venezia un uso conveniente delle acque superficiali è in realtà possibile solo in edifici prossimi ai canali maggiori o in laguna aperta mentre nei canali minori il ricambio dell'acqua è così modesto che la saturazione termica della riserva idrica viene spesso raggiunta.

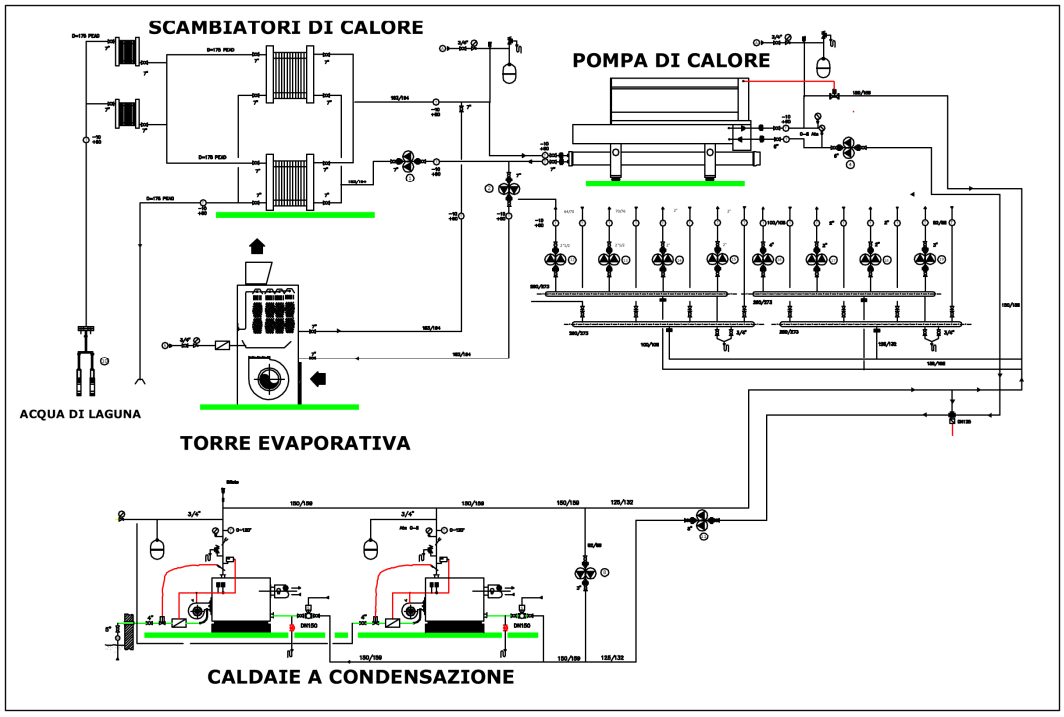


Figura 86. Diagramma funzionale della pompa di calore ad acqua di laguna

In figura 84 è mostrato un diagramma funzionale della pompa di calore installata. La pompa di calore elettrica ha una potenza nominale di 610 kW con salto termico dell'acqua lato evaporatore di 7-4°C, con salto termico al condensatore per l'acqua calda prodotta di 40-45°C. In raffeddamento la potenza nominale è di 580 kW con temperatura dell'acqua di raffreddamento con salto di 30-35°C e acqua fredda prodotta con salto di 12-7°C.

Uno scambiatore di calore a piastre è interposto tra il circuito di prelievo dell'acqua di laguna e il circuito della pompa di calore al fine di evitare incrostazioni negli scambiatori interni alla macchina. In inverno, la temperatura minima operativa per l'acqua di laguna è 8°C in ingresso e conseguentemente 5°C in uscita. Il dimensionamento dello scambiatore permette, in queste condizioni, il salto termico 7-4°C nel circuito lato evaporatore.
Questo limite è stato scelto per assicurare elevate efficienze per la macchina ed evitare la necessità di miscele anticongelanti che penalizzerebbero le sue prestazioni. Pertanto, quando la temperatura dell'acqua di laguna è inferiore a 8°C, la pompa di calore non lavora e il fabbisogno termico è coperto da caldaie ausiliarie a condensazione. Analogamente, in estate, il massimo salto termico per l'acqua di laguna è 27-30°C, cui corrisponde il salto 30-35°C nominale sul circuito lato condensatore. Infatti, la legislazione vigente impedisce che l'uso termico delle acque superficiali comporti una variazione di temperatura superiore a 3°C e che la temperatura dell'acqua in uscita possa superare i 30°C. Quindi in estate, quando questi valori sono superati, si interrompe il prelievo ed interviene una torre evaporativa per lo smaltimento del calore assicurando comunque il funzionamento della macchina frigorifera.
La pompa di calore invertibile ha due circuiti indipendenti di refrigerazione, ciascuno con un compressore a vite. Il fluido refrigerante è R113a.
Per il confronto con la sorgente aria, un'equivalente macchina aria-acqua è stata usata. Riferendosi a modelli attualmente disponibili nel mercato, non ci sono macchine commerciali di questa potenza che presentino un controllo di tipo modulante con inverter. Pertanto, le due pompe di calore confrontate hanno un controllo di potenza basato solo sulla tradizionale cassetta modulante per i compressori a vite.
Nel circuito acqua di laguna sono presenti due scambiatori a piastre in titanio, per resistere alla corrosione marina, che lavorano in alternativa per permettere una periodica pulizia senza interrompere il servizio. Gli scambiatori sono preceduti da un efficiente sistema di filtraggio autopulente dato che l'acqua di laguna nei canali è normalmente molto sporca.

5.4.2. Analisi dei risultati

La pompa di calore invertibile è dedicata unicamente a soddisfare la domanda per la climatizzazione.
La produzione dell'acqua calda sanitaria (ACS) durante l'intero anno non è qui considerata.
Infatti, il progetto dell'impianto prevede l'installazione di un sistema autonomo di cogenerazione il cui recupero termico è stato espressamente dimensionato per soddisfare la domanda di calore per la produzione di ACS che viene immagazzinata in due grandi serbatoi.

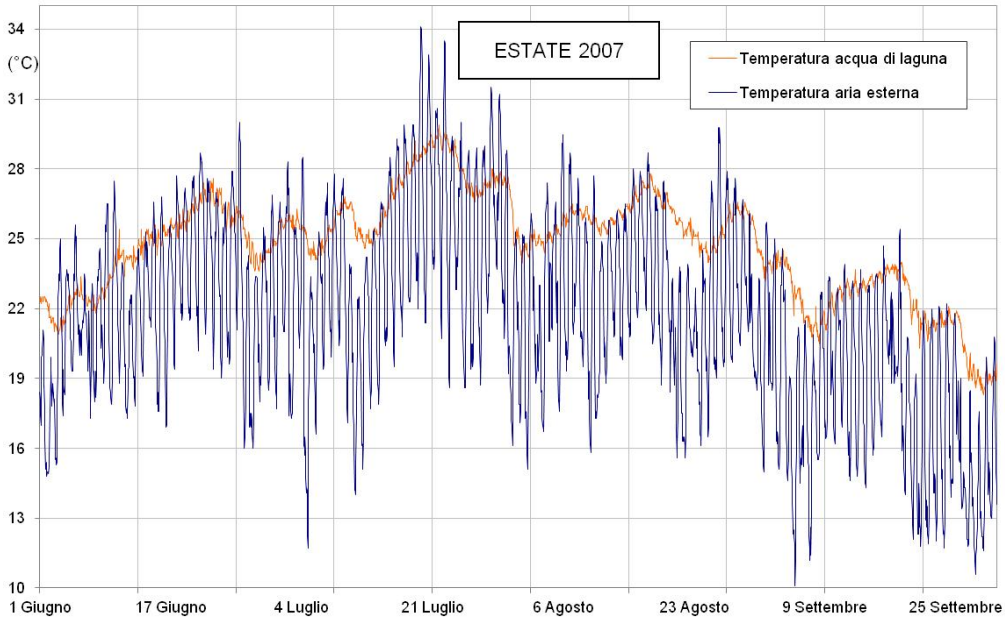


Figura 87. Temperature dell'aria esterna e dell'acqua di laguna nell'estate 2007

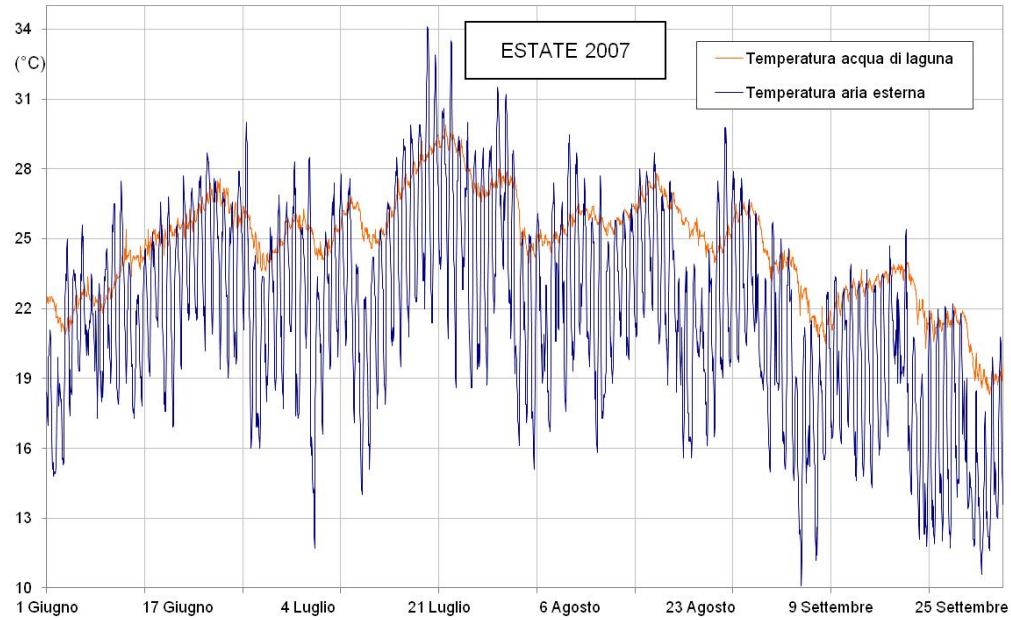


Figura 88. Temperature dell'aria esterna e dell'acqua di laguna nell'inverno 2006-7

La legislazione vigente impone a Venezia una stagione di riscaldamento dal 15 ottobre al 15 aprile; il condizionamento è normalmente in funzione tra giugno e settembre.

La valutazione delle prestazioni stagionali è stata ottenuta per mezzo della simulazione del sistema edificio-impianto per tre inverni, dal 2004-2005 al 2006-2007 e 4 estati dal 2004 al 2007.
I dati meteorologici necessari per l'analisi sono stati forniti da stazioni meteorologiche locali. In particolare i valori della temperatura dell'acqua di laguna provengono da una centralina di registrazione in prossimità del Rio dei Gesuiti.
Questa sequenza meteorologica presenta due inverni più freddi della media seguiti da un terzo inverno nettamente più mite. Le quattro estati sono piuttosto simili.

Nelle figure 87 e 88 sopra riportate gli andamenti delle temperature dell'acqua e dell'aria esterna sono riportati per l'estate 2007 e l'inverno 2006-07 rispettivamente. Il confronto mostra l'effetto dell'inerzia termica che riduce le oscillazioni orarie della temperatura rispetto all'aria esterna. I livelli termici dell'acqua appaiono comunque meno favorevoli e più variabili del previsto se confrontati con la temperatura di pozzo (costante a 13-14°C) o dell'acqua marina fuori costa.
L'effetto penalizzante dovuto alla limitata circolazione delle correnti marine è certamente importante.
Questo è particolarmente evidente in estate quando nel periodo più caldo l'acqua di laguna arriva oltre i 27°C, come mostrato in figura 88, imponendo così l'uso alternativo della torre evaporativa.
Invece nell'inverno 2006-07 (figura 87) la temperatura dell'acqua non raggiunge mai il limite operativo di 8°C. Nei due precedenti inverni freddi le ore di arresto della pompa di calore sono rispettivamente il 12% e il 13% dell'ammontare totale delle ore di funzionamento. Nelle quattro estati lo stesso valore a livello stagionale è fra l'1% e il 6%.
Per mezzo della simulazione si è proceduto ad un confronto fra tre possibili alternative impiantistiche per la produzione del caldo e del freddo richiesti per la climatizzazione degli edifici: pompa di calore assistita da acqua di laguna e integrata da torre evaporativa e caldaie a condensazione, pompa di calore con sorgente aria, soluzione tradizionale con sole caldaie a condensazione in inverno e un refrigeratore d'acqua raffreddato ad aria in estate.
Per questa analisi sono stati elaborati opportuni modelli di simulazioni per l'edificio e i componenti dell'impianto. In particolare l'efficienza della pompa di calore è calcolata su base oraria in funzione dei livelli termici dei fluidi esterni che scambiano calore all'evaporatore e al condensatore tenendo conto anche del comportamento della macchina nel funzionamento a carico parziale [14].

.[14] Gastaldello A., Schibuola L., Il calcolo dell'efficienza stagionale delle macchine a ciclo inverso impiegate nella climatizzazione, convegno internazionale AICARR Milano, 2004

Metodo analogo è stato utilizzato per la modellazione delle caldaie a condensa zione [15].
I carichi dell'edificio sono calcolati per mezzo del programma EnergyPlus[16], assumendo tipiche distribuzioni per i carichi interni, l'occupazione e l'illuminazione.
Le simulazioni stagionali hanno fornito un'efficienza media calcolata come rapporto tra il calore totale (o freddo) fornito e il totale consumo elettrico della pompa di calore nello stesso periodo.
Per la modalità riscaldamento questa efficienza media è indicata come *SPF* (Seasonal Performance Factor) come chiamata nella direttiva EPBD e ripresa dal D.lgs 28/2011. Per la modalità condizionamento tale efficienza è usualmente chiamata Seasonal Energy Efficiency Ratio (*SEER*) nella letteratura tecnica. Un altro importante indice di efficienza è il Primary Energy Ratio (*PER*) che è il rapporto fra l'energia fornita e il consumo di energia primaria dell'impianto compresi i sistemi ausiliari.
Per calcolare questo consumo di energia primaria è stato usato il valore ufficiale italiano 2,22 del fattore di conversione dell'energia elettrica all'utente finale in consumo effettivo di energia primaria in centrale termoelettrica.
Nel caso della pompa di calore abbinata all'acqua di laguna si è tenuto conto dei contributi, in inverno delle caldaie a condensazione ausiliarie e in estate dell'uso della torre evaporativa.

Nelle figure 89/90 questi indici ed efficienze stagionali sono riportati rispettivamente per i periodi estivi ed invernali analizzati. PER_h è riferito al riscaldamento mentre PER_c al condizionamento.
La simulazione indica una netta superiorità della pompa di calore raffreddata con acqua di laguna, specialmente durante il periodo invernale, effetto dovuto al più favorevole livello termico di questo periodo.

[15] R. Lazzarin, Le caldaie a condensazione nella ristutturazione di edifici e impianti, Atti convegno, AICARR, Padova, 2011.

[16] Crawley, B. D., Lawrie, K. L., Winkelmann, F., C., Pedersen C.O., EnergyPlus: new capabilities in a whole-building energy simulation program, the 7th Int. Conf. of the International Building Performance Simulation Ass ciation (IBPSA), Rio de Janeiro, Brasile, 2001.

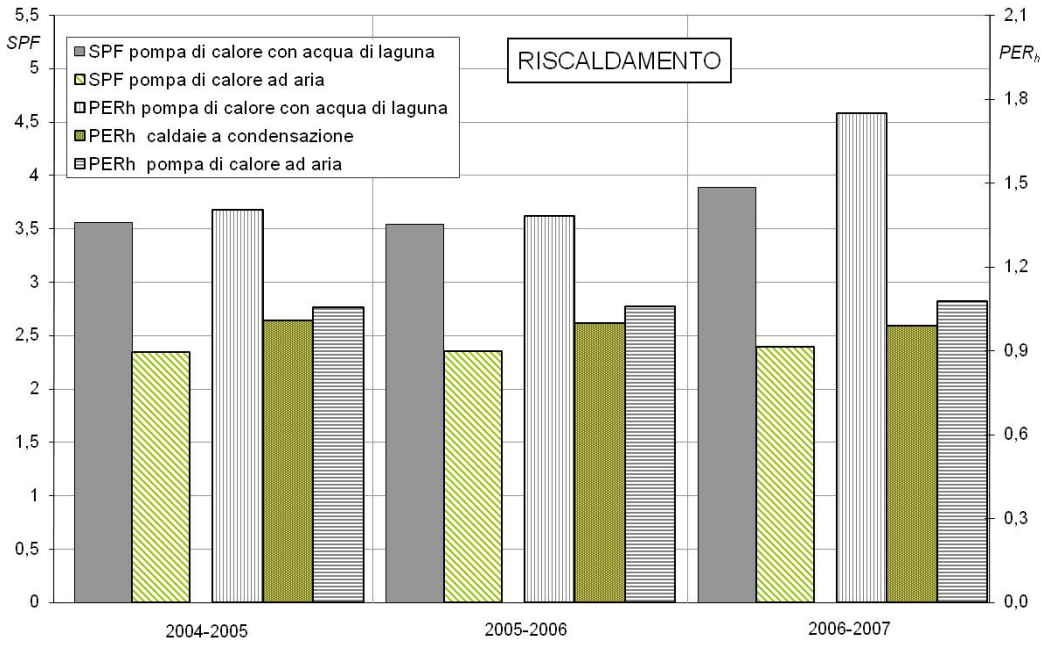


Figura 89. Fattore di efficienza stagionale *SPF* della pompa di calore e rapporto energia primaria media invernale PER_h delle soluzioni analizzate nei tre inverni.

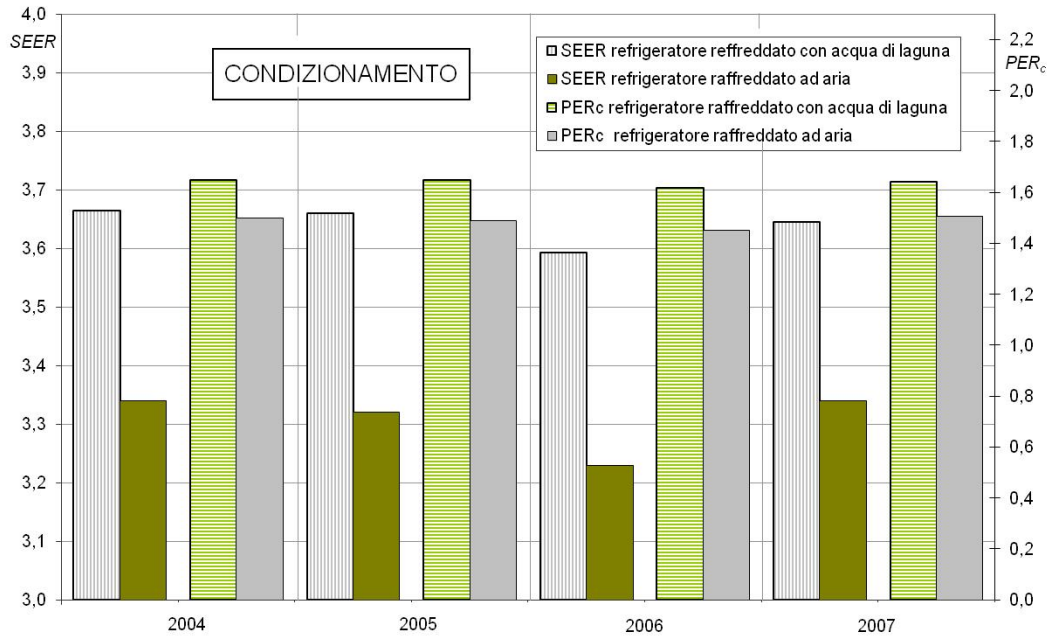


Figura 90. Rapporto di efficienza energetica stagionale *EERc* delle due pompe di calore in funzionamento estivo e loro rapporto di energia primaria media *PERc* nelle quattro estati

La figura 91 mostra un confronto tra i risparmi di energia primaria con le due pompe di calore nel periodo invernale e annuale per tre anni. Qui, al fine di evitare di interrompere le stagioni invernali, ciascun anno si è fatto convenzionalmente iniziare dal 15 ottobre fino alla stessa data dell'anno seguente. Il risparmio è riferito al consumo di energia primaria per la climatizzazione nel caso di impianto tradizionale con caldaie a condensazione e refrigeratori raffreddati ad aria. I risparmi sono più rilevanti in inverno e pertanto i valori annuali sono attenuati dal comportamento estivo.
A livello annuale il risparmio energetico e quindi anche la corrispondente riduzione di emissioni di gas climalteranti, si è sempre mantenuta sopra il 20% con una media sui tre anni maggiore del 24%.

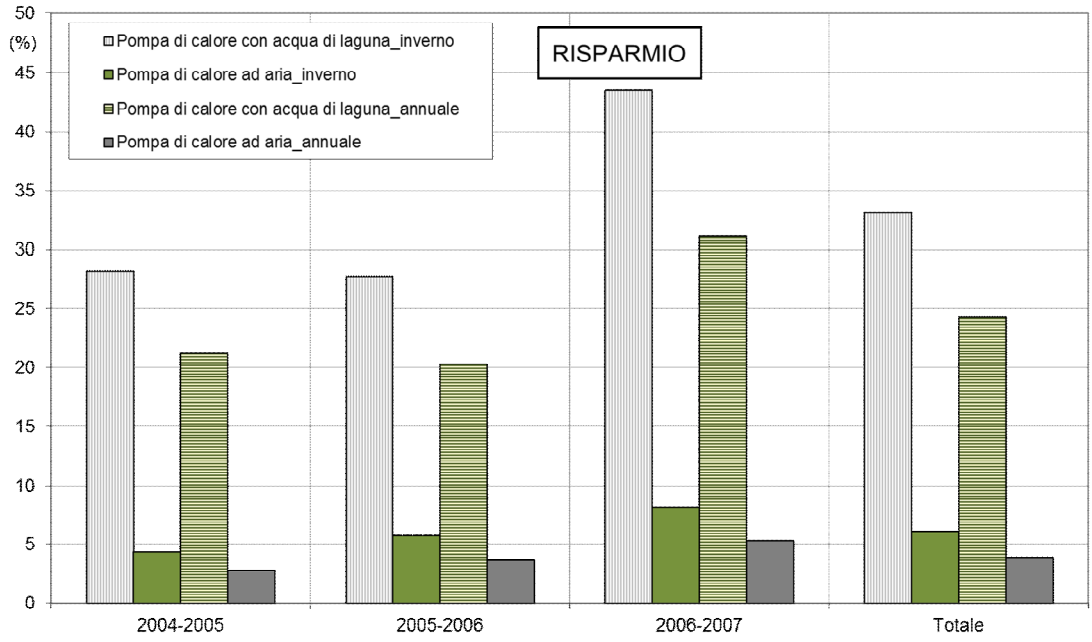


Figura 91. Risparmi (%) di energia primaria nella stagione di riscaldamento e annuali per i tre anni e per l'intero periodo. Il risparmio è riferito al consumo di energia primaria per la climatizzazione con l'impianto tradizionale.

Le quote di energie rinnovabili QE_{RES} riferite alla totale domanda per la climatizzazione sono confrontate in fig. 92 per le due pompe di calore.
Come richiesto da EPBD solo l'energia prelevata dalla pompa di calore dall'aria o dall'acqua in fase riscaldamento può essere considerata in questa quota. In termini di contributo di energia rinnovabile la pompa di calore ad aria ha pure prestazioni elevate, poiché il suo funzionamento non ha limitazioni.
Al contrario una bassa temperatura dell'acqua di laguna impone l'intervento delle caldaie a condensazione che non sfruttano l'energia rinnovabile.

Nondimeno con l'acqua di laguna la quota annuale QE_{RES} risulta sempre sopra il 25% con una media del 33% nei tre anni.

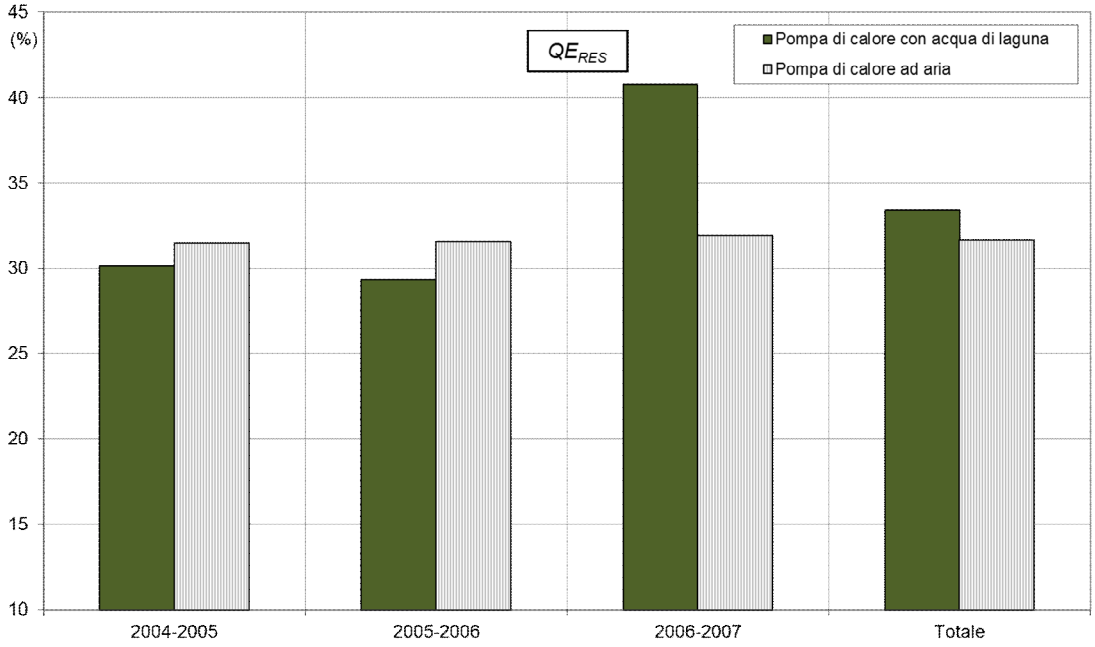


Figura 92. Quota di energia rinnovabile QE_{RES} (%) per tre anni e per l'intero periodo. Il risparmio è riferito al consumo di energia primaria per la climatizzazione con l'impianto tradizionale.

5.4.3. Conclusioni

Lo studio ha mostrato notevoli opportunità applicative per l'uso della pompa di calore invertibile abbinata all'acqua di laguna a Venezia. Anche riferendosi a macchine commerciali non particolarmente efficienti in termini di controllo di potenza e di livelli termici di alimentazione dell'utenza finale, la soluzione con acqua di laguna permette di raggiungere efficienze stagionali molto interessanti. Il risparmio energetico è oltre il 20% con riferimento a impianti tradizionali e nettamente superiore a quello ottenuto con la pompa di calore ad aria.
Grazie all'uso dell'acqua di laguna lo sfruttamento dell'energia rinnovabile è possibile anche negli edifici storici nonostante siano soggetti a pesanti restrizioni di tutela.
In questo modo anche gli interventi di recupero di edifici monumentali possono contribuire a centrare l'obiettivo 20-20-20 entro il 2020.

Legenda

COP	Coefficiente di prestazione pompa di calore (-)
EER	Coefficiente di prestazione refrigeratore (-)
Pu	Potenza della macchina resa all'utenza (W)
T	Temperatura (°C)
C	Capacità termica (J/kg K)
R	Resistenza termica (W/m^2 K)

CONCLUSIONI E PROSPETTIVE DI RICERCA

La ricerca fin qui documentata ha individuato strumenti e strategie che consentono di rendere gli impianti negli edifici storici vantaggiosi dal punto di vista del risparmio energetico e ha studiato le concrete possibilità di integrazione architettonica in contesti reali quantificando i risultati ottenuti mediante il monitoraggio di edifici già recuperati. Con l'obiettivo di ridurre il più possibile lo iato tra esigenze di tutela monumentale e l'inalienabile bisogno di efficienza energetica, il progetto di lavoro svolto ha esteso annualmente a più edifici l'attività di analisi delle prestazioni energetiche e delle condizioni di comfort interno.
Il lavoro ha potuto confermare come la ricerca si avvalga di fondamentali strumenti quali il monitoraggio e la simulazione.
Il lavoro svolto grazie all'utilizzo della simulazione ha permesso di individuare indicatori utili alla definizione di parametri finalizzati al risparmio energetico e al miglioramento del benessere degli utenti a seconda della destinazione d'uso degli edifici analizzati.
Attraverso il monitoraggio si è posta particolare attenzione al miglioramento delle condizioni di benessere all'interno degli ambienti considerando caratteristiche quali l'umidità relativa interna e la concentrazione di CO2 in essi contenuta e si è approfondita la conoscenza delle interazioni tra i diversi parametri microclimatici e l'uomo, che di tale microclima deve fruire nella maniera migliore possibile, compatibilmente con le attività che esso esplica.
Al fine di raggiungere gli obiettivi prefissati sono state studiate 3 diverse strategie impiantistiche relative al risparmio energetico degli edifici, sia sul fronte del contenimento dell'utilizzo della risorsa energia per la climatizzazione invernale ed estiva dei manufatti storici nell'ottica della riduzione degli inquinanti emessi in atmosfera sia sul fronte della certificazione energetica:

1. un impianto caratterizzato da un sistema di controllo capillare che consente tramite un controllo automatico un uso flessibile del set-point di umidità relativa interna e un tasso variabile di ventilazione basato sui sensori di CO2. al fine di contenere l'elevato consumo energetico determinato da un affollamento elevato, ma variabile dei locali costituenti l'edificio oggetto di studio

2. l'utilizzo di una pompa di calore invertibile con scambiatore geotermico con sonde verticali., evidenziando come con questo impianto sia possibile ottenere coefficienti di prestazioni stagionali superiori a quelli che si otterrebbero con l'utilizzo della più frequente macchina aria-acqua e individuando la superficie di scambio come il parametro su cui si deve puntare per un ulteriore miglioramento.

3. l'uso di una pompa di calore invertibile abbinata all'acqua di laguna a Venezia, notando come è possibile raggiungere efficienze stagionali molto interessanti, il risparmio energetico che è stato calcolato tramite simulazione è oltre il 20% con riferimento a impianti tradizionali e nettamente superiore a quello ottenuto con la pompa di calore ad aria.

In sintesi i 3 casi studio hanno consentito le seguenti conclusioni :

1. **Ambito di studio: l'ex magazzino 6**

Il lavoro di ricerca ha confermato alcune ipotesi formulate attraverso l'analisi del contesto inizialmente effettuata : l'impossibilità di ricorrere a impianti innovativi in presenza di edifici storici Risulta invece facilmente dimostrabile attraverso il monitoraggio come ottimizzazione della modalità di gestione e controllo di impianti tradizionali, significativi in termini di contenimento dei consumi energetici e dei relativi costi. Nel particolare caso degli edifici scolastici lo studio ha messo in luce come questi siano particolarmente adatti a trarre benefico da un uso flessibile del set-point di umidità relativa interna e da un tasso variabile di ventilazione gestito da un controllo automatico basato sui sensori di CO2.

2. **Ambito di studio: ex convento dei Tolentini**

Lo studio svolto mediante simulazione delle prestazioni della pompa di calore invertibile accoppiata a uno scambiatore geotermico con sonde verticali, ha dimostrato che al variare della superficie di scambio i coefficienti di prestazioni stagionali sono sempre decisamente superiori a quelli che si ottengono con la più frequente macchina aria-acqua e quindi decisamente interessanti dal punto di vista energetico e dei costi di gestione. Il confronto con gli altri tipi di impianti ha dimostrato in particolare che la pompa di calore con regolazione modulate raggiunge i migliori risultati sia in riscadamento che in raffrescamento, mentre la macchina con regolazione On Off ha buone performance in inverno mentre le prestazioni estive sono comparabili con la pompa di calore aria acqua con inverter.
In conclusione l'analisi di sensitività condotta sull'impianto ha indicato la possibilità di incrementare decisamente i coefficienti prestazionali degli impianti geotermici utilizzando sonde con maggiore superficie di scambio (doppia U) e macchine più efficienti grazie ad una regolazione modulante.
L'esigenza di utilizzare aree piuttosto limitate nella realizzazione degli scambiatori non risulta avere effetti molto penalizzanti dato il livello di saturazione dell'acqua negli strati che permette un rapido riequilibrio dello stato termico anche in presenza di passi limitati. Viceversa l'aumento della lunghezza delle sonde dell'impianto fino a 70-100 m, valori abbastanza consueti per gli impianti geotermici realizzati nella terraferma, permette di incrementare decisamente il comportamento dell'impianto.

3. **Ambito di studio: i Crociferi**
   Lo studio ha mostrato notevoli opportunità applicative per l'uso della pompa di calore invertibile abbinata all'acqua di laguna a Venezia. Anche riferendosi a macchine commerciali non particolarmente efficienti in termini di controllo di potenza e di livelli termici di alimentazione dell'utenza finale, la soluzione con acqua di laguna permette di raggiungere efficienze stagionali molto interessanti. Il risparmio energetico è oltre il 20% con riferimento a impianti tradizionali e nettamente superiore a quello ottenuto con la pompa di calore ad aria. Grazie all'uso dell'acqua di laguna lo sfruttamento dell'energia rinnovabile è possibile anche in edifici storici nonostante siano soggetti a pesanti restrizioni di tutela.In questo modo anche gli interventi di recupero di edifici monumentali possono contribuire a centrare l'obiettivo 20-20-20 entro il 2020.

I casi studiati e le conclusioni tratte costituiscono un limitato contributo all'analisi delle numerose possibilità di intervento applicabili a edifici di rilevanza storica, ma rappresentano la conferma che gli edifici storici possono e debbono trovare all'interno di un campo di applicazione normativo e progettuale una prassi di intervento che deve diventare una costante per una realta' come quella italiana dove gli edifici storici costituiscono un significativo patrimonio.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

PARTE PRIMA: Introduzione e struttura della ricerca

- III Rapporto Saienergia realizzato dal Cresme ,SAIE di Bologna ,7 ottobre 2011

- [1]Fairclough G. *Cultural Landscape Sustainability and living with Change?* In "Managing Change : Sustainable Approaches to the conservation of the Built Enviroment " proceedings 4th Annual US/Icoms International Symposium (Philderphia 2001), Los Angeles, The Getty Conservation Institute , 2003

- Pew Center on Global Climate Change (PCGCC)., *Energy Efficiency Standards and Targets*., 2010

- World Business Council for Sustainable Development (WBCSD)., *"Energy Efficiency in Buildings: Transforming the Market."*, 2009

- Kelly, M. J., *Energy efficiency, resilience to future climates and long-term sustainability: the role of the built environment*. Phil. Trans. R. Soc. A 368, 1083–1089, 2010

- Steemers, K., Towards a research agenda for adapting to climate change. *Building Research & Information,* 31(3-4), 291-301, 2003

- Larsson, N., Adapting to climate change in Canada. *Building Research & Information,* 32(1), 71-74, 2003

- Rousseau, D., Adapting to climate change: some observations. *Building Research & Information,* 32(1), 58-60, 2004

- Lowe, R. J., Lessons from climate change: a response to the commentaries. *Building Research & Information,* 32(1), 75-78, 2004

- Ball, R., Developers, regeneration and sustainability issues in the reuse of vacant buildings. *Building Research & Information,* 27(3), 140-148, 1999

- Latham, D., *Creative Re-Use of Buildings*. Donhead Publishing Ltd, Dorset, United Kingdom, 2000

- Rovers, R., Existing buildings, a hidden resource, ready for mining, 2004 http://www.sustainbalebuilding.info

- Jackson, Mike. “Embodied Energy and Historic Preservation: A Needed Reassessment.” *Journal of Preservation Technology* 36:4, 2005.

- United Nations Environment Programme (UNEP)., *Sustainable building construction: facts and figures Industry and Environment*. April – September 2003 [online] Available at http://www.uneptie.org/media/review/vol26no2-3/005-098.pdf [Accessed 2 May 2011], 2003

- Cole, R.J. and P.C. Kernan. *“Life-Cycle Energy Use in Office Buildings.” Building and Environment* 31: (4), 1996.

- Ball, R.M., *Re-use potential and vacant industrial premises: revisiting the regeneration issue in Stoke-on-Trent*, Journal of Property Research, 19(2), 93-110, 2002

- Bullen, P. A., *“Adaptive reuse and sustainability of commercial buildings."* Facilities 25(1/2): 20-31, 2007

- Itard, L. & Klunder, G., *Comparing environmental impacts of renovated housing stock with new construction*. Building Research & Information, 35, 252 – 267, 2007

- Douglas, J., *Building Adaptation*, 2 ed., Elsevier: Oxford, 2006.

- Gorse, C. & Highfield, D., *Refurbishment and Upgrading of Buildings*. Spon Press (Taylor and Francis): London & New York, 2009.

PARTE SECONDA : I quadri normativi di riferimento

- EUROPEAN COMMISSION, *Project Cycle Management Handbook*, 2002

- EUROPEAN COMMISSION, *Project Cycle Management Guidelines*, 2004

- GREFFE X., MARIOTTI. A., *La gestione del patrimonio culturale*, Franco Angeli, Milano, 2003

- DLgs 28/11, 3 marzo 2011, n. 28. Decreto di attuazione della direttiva 2009/28/CE sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili, recante modifica e successiva abrogazione delle direttive 2001/77/CE e 2003/30/CE.

- Nypan TM “ *Effects of European legislation on the built cultural Heritage”* consultabile al sito http://www.riksantikvaren.no/filestore/EffectsofEULeg_v01DS.pdf

- Kuhtz S., "*Energia e sviluppo sostenibile. Politiche e tecnologie*", Rubettino editore, 2005,p-55

- "*L'innovazione energetica in edilizia*". Rapporto ONRE 2010 sui regolamenti edilizi comunali a cura di CRESME RICERCA SPA e LEGAMBIENTE e con la partecipazione di SAIENERGIA e DELTA GRUPPO.

- AA:VV, *Reports on the concept development of the demonstration buildings* in BRITA in PuBs, 2005, entrambi pubblicati on-line al sito http://edit.brita-inpubs. Eu

- BOARIN P., *Un duplice approccio per la riqualificazione energetica e ambientale. Edifici con forte valore testimoniale*, in "Recupero e conservazione" n. 97/2011, pp. 36-41

- BORIANI M., GIAMBRUNO M., GARZULINO A., *Studio, sviluppo e definizione di schede tecniche di intervento per l'efficienza energetica negli edifici di pregio*, 2011, Report di ricerca scaricabile dal sito www.enea.it

- BRUNTLAND G., *Our common future: The World Commission on Environment and development*, Oxford, Oxford University Press, 1987. Trad. It. Il futuro di tutti noi. Rapporto della Commissione Mondiale per l'ambiente e lo sviluppo, Bompiani, Milano, 1988

- CANZIANI A., SCALTRITTI M., *L'approccio prestazionale alla risorsa culturale*, in "Il progetto sostenibile", n. 22-23/2009, pp. 22-27

- CESSERI L., GIGLIARELLI E., *Tecnologie sostenibili per le analisi diagnostiche e gli interventi conservativi*, in "Il progetto sostenibile", n. 22-23/2009, pp. 84-87

- CIB, Agenda 21 on Sustainable Construction, CIB Report Pubblication 237, Cib Ed., Rotterdam, 1999

- DALL'O' G., GALANTE A., *Efficienza energetica e rinnovabili nel regolamento edilizio comunale. Programmazione, controllo e gestione di uno strumento operativo per la pianificazione sostenibile del territorio*, Edizioni Ambiente, Città di Castello, 2009

PARTE TERZA: Analisi del comportamento edifici storici tramite simulazione / PARTE QUARTA: Analisi del comportamento degli edifici storici tramite monitoraggio

- Crawley, B. D., Lawrie, K. L., Winkelmann, F. C., Pedersen C. O., 2001, *EnergyPlus: new capabilities in whole-building energy simulation program*, 7th International IBPSA Conference, Rio de Janeiro Brazil.

- CIBSE *Admittance method, Chartered Institution of Building Services Engineers Design*, Guidebook A, 1999.

- DesignBuilder 2006,versione 1.2, DesignBuilder Software (DBS) Ltd, Stroud Gloucestershire, UK. http://www.designbuilder.co.uk

- BLAST 1993. *The building loads analysis and system thermodynamics program*. Department of Mechanical and Industrial Engineering, University of Illinois at Urbana Champaign.

- E. Nolo, A. Busatto, "*Densificazione sostenibile a Mestre*", tesi di laurea specialistica in Architettura per la Sostenibilità, relatori proff. L. Schibuola, B. Albrecht, N. Sinopoli. AA 2003/2004, Venezia.

- R. Busatto, "Buffer zones a Bassano del Grappa: i bordi del sistema del verde", tesi di laurea specialistica in Architettura per la Sostenibilità, relatori proff. L. Schibuola, B. Albrecht, N. Sinopoli. A.A. 2005/2006, Venezia.

- D. Alpago, E. Manente, "*Costruire nel costruito a Mestre*", tesi di laurea specialistica in Architettura per la Sostenibilità, relatori proff. L. Schibuola, B. Albrecht, G. Roccatagliata,. A.A. 2004/2005, Venezia.

- CTI, *Prestazioni energetiche degli edifici*, Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale, UNI TS 11300-1, febbraio 2008.

- CTI, *Prestazioni energetiche degli edifici*, Parte 3: Energia primaria per la climatizzazione estiva, UNI TS 11300-3, dicembre 2007.

- 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.

PARTE QUINTA: Casi studio: edifici storici a Venezia

- ASHRAE Standard 62-1989. "*Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality"*, American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta, GA, 1992.

- BLAST 1993. *"The building loads analysis and system thermodynamics program"*. Department of Mechanical and Industrial Engineering, University of Illinois at Urbana Champaign.

- 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.

- DOE 1994. *"Department of Energy program*", Simulation Research Group, Lawrence Berkeley.

- Fanger P.O. 1970, Thermal Comfort, New York: McGraw-Hill Marsh A., 2005. *"Predictive Mean Vote tool"*. Version 2, SQUARE ONE research, squ1.com.

- UNI 10339, 1995, *"Impianti aeraulici ai fini del benessere. Generalità, classificazione e requisiti. Regole per la richiesta d'offerta, l'offerta, l'ordine e la fornitura*". Italian standard UNI.

- F. Zezza, *The sedimentary structure of Upper Pleistocene- Holocene deposits in Venice and its effects on the stability of the historic centre*, Accademia Lincei, Springer- Verlag 2010

- .F. Zezza, *Geologia, proprietà e deformazione dei terreni del centro storico di Venezia, Geologia e progettazione nel centro storico di Venezia, atti secondo convegno nazionale: la riqualificazione della città e dei territori*, Venezia dicembre 2007.

- P. Mozzi, C. Bini, L. Zilocchi, R. Beccatini, M. Mariotti Lippi, *Stratigraphy, paleopedology and palinology of late Pleistocene and Holocene deposits in the landward sector of the Lagoon of Venice in relation to the caranto level*. Il Quaternario, Italian Journal of Quaternario Science, 16/1 bis:139-210 2003.

- VDI 4640, *Thermal Use of the Underground*, VDI Guideline, 2010.

- Fischer, and C. K. Rice. *The Oak Ridge Heat Pump Models: Steady-State Computer Design Model for Air-to-Air Heat Pumps*. Oak Ridge National Laboratory, 1983.

- Binotto, L. Cecchinato, M. De Carli, M. Mantovan, M. Scarpa, R. Zecchin. *Numerical Model for the Estimation of Performances of Heat Pumps and Chillers in Real Conditions*. SET 2006, Vicenza.

- prEn ISO 14825 – *Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps, with electrically driven compressors, for space heating and cooling* - Testing and rating at part load conditions. 02-09,2011.

- De Carli M, Tonon M, Zarrella A, Zecchin R. *A computational capacity resistance model (CaRM) for vertical ground coupled heat exchangers. Renewable Energy* 35 (2010), pp. 1537-1550.

- Bennet J, Claesson J, Hellström G. *Multipole method to compute the conductive heat flows to and between pipes in a composite cylinder. Technical Report*, University of Lund, Department of Building Technology and Mathematical Physics. Sweden, 1987.

- Zarrella A, Scarpa M, De Carli M. *Short time step analysis of vertical ground-coupled heat exchangers: the approach of CaRM*. Renewable Energy 36 (2011), pp. 2357-2367.

- EU Community, *Climate and Energy package: 20-20-20 targets*, dicembre 2008.

- EU Community, *Energy Performance Building Directive EPBD* (recast), direttiva 2009/28/CE, aprile 2009.

- D.lgs n. 28 del 3/03/2011, Attuazione della Direttiva 2009/28 /CE sulla promozione dell'energia da fonti rinnovabili, recante modifica e successiva abrogazione delle direttive 2011/77/CE e 2003/30/CE

- Gastaldello A., Schibuola L., *Il calcolo dell'efficienza stagionale delle macchine a ciclo inverso impiegate nella climatizzazione*, convegno internazionale AICARR Milano, 2004

- R. Lazzarin, *Le caldaie a condensazione nella ristutturazione di edifici e impianti,* Atti convegno AICARR, Padova, 2011.

- Crawley, B. D., Lawrie, K. L., Winkelmann, F. C., Pedersen C.O., *EnergyPlus: new capabilities in a whole-building energy simulation program*, the 7th Int. Conf. of the International Building Performance Simulation Association (IBPSA), Rio de Janeiro, Brasile, 2001.