



Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie,  
l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile



*Ministero dello Sviluppo Economico*

## RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

# Modelli predittivi e soluzioni pilota per la diagnostica e controllo di smart buildings

*M. Annunziato, M. Bosello, M. De Felice, C. Meloni, S. Pizzuti*



MODELLI PREDITTIVI E SOLUZIONI PILOTA PER LA DIAGNOSTICA E CONTROLLO DI SMART BUILDINGS

M. Annunziato, M. De Felice, C. Meloni, S. Pizzuti (ENEA), M. Bosello (UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI ROMA TRE)

Settembre 2011

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica

Progetto: Studi e valutazioni sull'uso razionale dell'energia: Utilizzo dell'energia elettrica e solare per la climatizzazione estiva

Responsabile Progetto: Nicolandrea Calabrese, ENEA

## SOMMARIO

<b>1. SINTESI DELLA ATTIVITÀ DI RICERCA .....</b>	<b>5</b>
<b>2. LA GESTIONE ENERGETICA DEGLI EDIFICI DEL SETTORE TERZIARIO .....</b>	<b>8</b>
2.1 Gli edifici del settore terziario.....	10
2.2 Le strategie della gestione degli edifici del settore terziario .....	17
2.3 Le criticità .....	20
<b>3. SVILUPPO DELLA MODELLISTICA PREDITTIVA.....</b>	<b>22</b>
3.1 Le predizioni neurali .....	23
3.2 Conclusioni .....	34
<b>4. PROGETTO E REALIZZAZIONE DI UN EDIFICIO SPERIMENTALE PER LA QUALIFICAZIONE DELLE STRATEGIE DI OTTIMIZZAZIONE DELLA GESTIONE ....</b>	<b>37</b>
4.1 Sviluppo del progetto per l'edificio sperimentale .....	38
4.2 Analisi delle possibili strategie di diagnostica e controllo dell'edificio .....	41
4.2.1 L'edificio F40 del C.R. ENEA Casaccia .....	41
4.2.2 Sviluppo di configurazioni di controllo dell'edificio.....	42
4.3 Un esempio della importanza della diagnostica sull'edificio F40.....	45
4.4 Risparmi energetici .....	48
4.4.1 Soluzione A – Livello edificio .....	48
4.4.2 Soluzione B – Livello di piano .....	50
4.4.3 Soluzione C – Livello di Stanza.....	51
4.5 Conclusioni .....	53

## Riferimenti

Questo rapporto tecnico si riferisce all'Accordo di Programma tra Ministero dello Sviluppo Economico ed ENEA, nel contesto della Ricerca di Sistema il cui obiettivo è il miglioramento del sistema elettrico nazionale sia in termini di nuove tecnologie che di efficienza energetica.

Il rapporto si inquadra nell'Area "Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica", nell'ambito del PAR 2008-09, in riferimento alla tematica di ricerca "Utilizzo dell'energia elettrica e solare per condizionamento estivo" - Progetto 3.4, Linea C "Sistemi di regolazione, monitoraggio e controllo degli impianti di climatizzazione in edifici complessi e/o distretti energetici".

La ricerca illustrata in questo rapporto si focalizza sullo sviluppo di metodologie di modellazione predittiva, ottimizzazione e regolazione dell'intero sistema edificio-sistema di climatizzazione innovativa e delle utenze ad essa correlate, attraverso cui si intende cogliere l'ulteriore margine di efficienza ma anche garantire la competitività del sistema nel suo insieme.

Dopo una introduzione sulle tecnologie più diffuse per la diagnostica e controllo degli edifici il rapporto si articola sullo sviluppo dei due obiettivi previsti dal piano annuale PAR 2008-2009 del Progetto 3.4 Task C: "Sistemi di regolazione, monitoraggio e controllo degli impianti di climatizzazione in edifici complessi e/o distretti energetici" di cui questo Rapporto Tecnico fa parte.

In particolare la prima parte della ricerca (task C1) prevede lo sviluppo di un modello predittivo della richiesta energetica per la climatizzazione (estate-inverno) di un edificio complesso. Il modello tiene conto delle componenti periodiche long e medium term (giornaliere, settimanali e stagionali) e delle componenti short term che hanno un carattere a corta predicibilità (variazioni rapide di richiesta dell'utenza, guasti, effetti climatici) e fa uso di predittori neurali e metodologie di evolutionary computation. Non si basa su predizioni teoriche (non ha lo scopo di progettare il sistema di climatizzazione, bensì quello di gestirlo), ma ricostruisce progressivamente nel tempo il profilo di utenza dell'edificio al fine di ottimizzarne la prestazione. Pertanto è stato elaborato/qualificato sulla base di dati sperimentali provenienti da un edificio reale. L'utilità del modello risiede sia nella regolazione ottimale che nella disponibilità di un potenziale profilo di produzione, base per una strategia di negoziazione della rete attiva con la rete elettrica esterna, passo molto importante per un sistema soggetto alla variabilità delle rinnovabili. Accanto alla climatizzazione è stato necessario estendere lo studio alle altre utenze energetiche in quanto strettamente correlate per gli aspetti della diagnostica e del controllo.

Nella seconda parte (task C2) viene identificata una metodologia di ottimizzazione fondata sia sullo sviluppo di una metodologia diagnostica e sia sulla ottimizzazione

multiobiettivo della regolazione delle varie componenti di climatizzazione e di produzione energetica, interne ed esterne all'edificio, per ottenere la massima efficienza, il minimo impatto ambientale, la garanzia di funzionamento, il minimo costo di gestione.

L'attività è articolata in diverse linee di ricerca ed in particolare:

Fase 1: Sviluppo di una modellistica predittiva;

Fase 2: Sviluppo di un modello per la diagnostica;

Fase 3: Sviluppo di una strategia di controllo ottimizzato di un impianto di solar cooling;

Fase 4: Allestimento di un sistema di diagnostica e controllo avanzato in un edificio pilota.

Nel presente rapporto ci si concentra sugli aspetti relativi alle linee 1 e 4 mentre le fasi 2 e 3 sono trattate in un rapporto separato.

## 1. SINTESI DELLA ATTIVITÀ DI RICERCA

Il presente studio si fonda sulla quantificazione della importanza della diagnostica e della gestione ottimale dell'edificio ai fini del contenimento del consumo energetico; infatti la maggior parte degli approcci più utilizzati sono concentrati sull'efficientamento energetico degli involucri e degli impianti mentre ancora molto poco è stato approfondito sul tema della gestione ottimale, ossia monitoraggio, diagnostica, controllo ed ottimizzazione dell'uso delle utenze energetiche all'interno di uno o più edifici. La diagnostica e l'ottimizzazione sono stati dunque i due aspetti sui quali si è incentrato il lavoro: essi sono stati affrontati attraverso i seguenti strumenti:

- **la modellistica predittiva;**
- **la qualificazione sperimentale;**
- **la simulazione e diagnostica.**

Nel seguito si riporta una sintesi dell'intero panorama di attività svolta. Nei capitoli seguenti tali tematiche saranno esposte in modo dettagliato.

### ***Modellistica: predizione del consumo energetico per la regolazione ed ottimizzazione; (task C1)***

La modellistica si è basata sulla predizione del consumo energetico per la regolazione ed ottimizzazione; la previsione del carico, in un orizzonte temporale più vario, svolge un ruolo critico per la gestione delle operazioni in ambito elettrico.

L'abilità di predire i comportamenti futuri degli utenti e le loro richieste è una parte necessaria sia per la corretta analisi di ciò che sta avvenendo nell'edificio e sia per trasmettere tali dati verso i sistemi di controllo della rete in cui l'uso di sistemi intelligenti sta crescendo notevolmente. Una buona previsione deve essere accurata e, assai importante, presentare un errore massimo il più piccolo possibile. In generale più alto è l'errore e maggiore è l'incertezza del sistema di gestione a seguire le richieste della domanda e di conseguenza sono più elevati i costi di gestione.

Le attività svolte hanno riguardato lo sviluppo delle metodologie di modellazione predittiva dell'intero sistema edificio-climatizzazione, attraverso cui si intende cogliere l'ulteriore margine di efficienza ma anche garantire la robustezza del sistema nel suo insieme. I metodi predittivi tradizionali sono basati o su approcci statistici o sull'intelligenza artificiale. I metodi più comuni sono Box-Jenkins, metodi esponenziali (Holt-Winters), le reti neurali e più recentemente, le Support Vector Machines (SVM). Nel presente studio sono state utilizzate, con successo, predittori neurali che hanno dimostrato la loro efficacia in diversi contesti industriali ed ingegneristici, vista la loro capacità di trovare relazioni tra le variabili osservate, arrivando a risultati eccellenti anche nell'ambito della previsione dei carichi energetici.

La ricerca si è focalizzata sullo sviluppo di una metodologia innovativa per la previsione a breve termine della richiesta energetica di un edificio complesso. Generalmente si parla

di previsione a breve termine quando l'orizzonte temporale varia dall'ordine delle ore a quello di una settimana. Per questo tipo di previsione tutti i fattori che influenzano il pattern di consumo. Ovviamente il tipo di variabili da considerare per la previsione può variare in base al tipo di utenza, se residenziale, industriale o terziaria. I dati di carico energetico normalmente mostrano una periodicità, spesso più di una; il carico ad un preciso istante è generalmente correlata al valore del carico nell'ora precedente ma anche nello stesso orario della settimana precedente e così via.

Tale attività è stata condotta nella maggior parte da ENEA ed è documentata in questo rapporto tecnico.

***Qualificazione sperimentale: database preesistenti; identificazione delle variabili principali, progetto di un edificio sperimentale, acquisizione ed installazione sull'edificio (task C1)***

Per qualificare i modelli sviluppati (basati su predittori neurali) è stato necessario utilizzare un database orario dei consumi di un edificio. Tali dati sono stati raccolti presso un edificio del centro ricerche ENEA di Casaccia (C59). I dati hanno permesso di qualificare i predittori neurali sviluppati ma nella continuazione delle attività sarà necessario qualificare sperimentalmente sia le strategie di diagnostiche che le logiche di ottimizzazione sviluppate in questo progetto. Si avrà necessità quindi di una sensoristica molto più approfondita di quella attualmente disponibile sull'edificio C59, di sistemi di controllo ed attuazione con la possibilità di disalimentare alcune utenze dell'edificio o singoli piani o automazione di stanza; di remotizzare l'informazione in tempo reale presso una sala controllo.

Per questo motivo è stato sviluppato il progetto e successivamente realizzato un edificio sperimentale presso il CRE Casaccia (edificio F40) realizzato appunto per qualificare tutta la modellistica finora sviluppata. Il progetto dell'edificio ha richiesto uno studio approfondito per identificare le informazioni necessarie che permettano di ottenere strategie di diagnosi e di controllo efficaci, definire la sensoristica, determinare i costi che occorre affrontare in relazione alla vetustà e ai vincoli dell'immobile e quantificare il risparmio energetico/ambientale ottenibile dall'impiego di differenti strategie. Da questo studio, condotto in sinergia con il Politecnico di Torino per quanto riguarda gli aspetti della sensoristica, è emersa (vedi cap. 4) chiaramente l'importanza del monitoraggio come strumento di diagnosi negli edifici e la soluzione che sembra ottimale. E' emerso inoltre che il sistema di controllo sul singolo locale negli edifici ad uso di ufficio sembra essere il più efficiente, garantendo un forte risparmio sia in termini energetici che economici. Lo studio si è concluso con un progetto funzionale e successivamente ordine verso una azienda che ha fornito il progetto esecutivo, le attrezzature, la installazione ed il collaudo della stessa.

Tale attività è stata condotta nella maggior parte da ENEA ed è documentata in questo rapporto tecnico.

***Simulazione e diagnostica: Modelli diagnostici, impianto di solar-cooling e test di strategie di controllo con ottimizzazione multi-obiettivo (task C2)***

La ricerca relativa al task C2 ha riguardato specificamente l'ottimizzazione delle prestazioni energetiche del sistema edificio-impianti nelle condizioni reali di gestione e utilizzo: operativamente, la ricerca ha approfondito alcune tematiche connesse a questo tema generale.

Un filone di approfondimento è stato indirizzato verso lo studio di strategie di diagnostica che permettano di rilevare aspetti di conduzione sub-ottimali dovuti a malfunzionamenti, inefficienza nel sistema di automazione, cattiva gestione dell'edificio, eccessiva obsolescenza di alcuni componenti, comportamenti errati da parte delle persone che ne usufruiscono. Sono stati quindi elaborati alberi di concatenazione tra cause da diagnosticare e relativi sintomi deducibili dai dati acquisiti o da elaborazioni intermedie che possano supportare tali diagnosi. Sempre in questa logica è stata quindi identificata la sensoristica in grado di produrre la base per evidenziare i "sintomi diagnostici" presi in considerazione.

Un secondo filone è invece connesso alle tematiche della regolazione ottimale per la quale è stato impostato condotto uno studio in un caso specifico di climatizzazione innovativa basata su un impianto di solar cooling per la quale è stata sviluppato un simulatore sul quale sono state successivamente testate e messe a confronto le strategie di ottimizzazione multi-obiettivo con le strategie convenzionali più diffuse. Per avere un riscontro sperimentale come edificio da simulare è stato scelto l'edificio F51 dle centro CRE Casaccia dell'ENEA sul quale nella precedente annualità della Ricerca di Sistema era stato realizzato un impianto di solar cooling.

Tale attività è stata condotta in maggior parte dal Politecnico di Torino e documentata nel rapporto tecnico "Strategie di diagnostica ed ottimizzazione multiobiettivo di edifici con climatizzazione innovativa".

## 2. LA GESTIONE ENERGETICA DEGLI EDIFICI DEL SETTORE TERZIARIO

Nella ricerca su scala mondiale svolta dal “World Resources Institute” relativo all'aumento di emissioni di gas serra “Navigating the Numbers: Greenhouse Gas Data and International Climate Policy” emerge un dato significativo: il 25 % delle emissioni di gas serra proviene dal settore residenziale e commerciale. Tale valore risulta, inoltre, tendenzialmente in aumento a causa di fattori socio-economici globali. Per quanto riguarda i consumi di energia, in base ai dati IEA “International Energy Agency”: in Europa il 54,7 % di energia elettrica è impiegata tra il settore residenziale (28,5 %) e il settore commerciale e di pubblico servizio (26, 2%), in particolare in Italia il residenziale ha una quota del 22 %, mentre il commerciale il 27 %, per un totale di 49 % di energia consumata. Da questi dati si evince come sia importante valutare delle strategie per il risparmio energetico per entrambi i settori residenziale e commerciale al fine di aumentare l'efficienza degli edifici, limitandone conseguentemente i consumi.

La Comunità Europea ha emanato una nuova direttiva 2010/31/UE<sup>1</sup>, approvata il 18 maggio 2010, che sostituirà la direttiva 2002/91/UE, la quale sarà abrogata dal 1 febbraio 2012. Tale provvedimento fissa gli obiettivi europei futuri; godono di particolare interesse gli edifici di nuova costruzione e gli edifici occupati da enti pubblici e di proprietà di questi ultimi. Gli Stati membri devono, inoltre, provvedere affinché entro il 31 dicembre 2020 tutti gli edifici di nuova costruzione siano edifici a energia quasi zero.

Il concetto alla base della direttiva “The Energy Performance of Buildings Directive (Recast), 2010/31/EU” è il Nearly Zero Energy Building (Edifici a energia quasi zero). Un Nearly Zero Energy Building è un edificio che possiede delle caratteristiche di altissima efficienza energetica con un apporto significativo da parte di risorse rinnovabili, sostanzialmente indipendente (vedi figura 2.1).

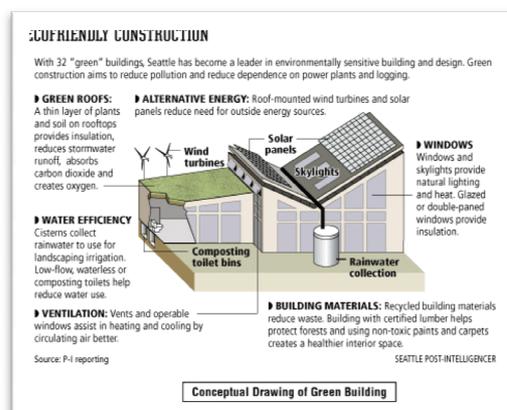


Figura 2.1: principi del Nearly Zero Energy Building

<sup>1</sup> DIRETTIVA 2010/31/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO del 19 maggio 2010 sulla prestazione energetica nell'edilizia.

Il concetto di passive building è trasformato in un edificio attivo capace di regolare, in base alle condizioni esterne e interne, il comfort globale degli utenti con il miglior rendimento energetico attuabile in quel momento. Il principio alla base è l'automazione, è stato infatti constatato che il singolo utente difficilmente può essere in grado di gestire una complessità di fattori e di attuare una serie di regolazioni e comandi necessari al corretto funzionamento dei meccanismi energetici di un edificio passivo, tenendo presente che le azioni di controllo richieste sono nella maggior parte dei casi di tipo ripetitivo (oscuramento superficie vetrate, ventilazione, ecc.).

Naturalmente un edificio attivo non si limita alla sola gestione della funzione energetica e di climatizzazione, ma interviene sull'intera offerta di requisiti e prestazioni richieste.

In un Active Building gli elementi costruttivi dell'edificio operano assieme alle tecnologie bioclimatiche per raggiungere un elevato rendimento in termini di consumo energetico, comfort termico e qualità dell'aria negli ambienti chiusi.

Gli edifici attivi infatti non si comportano come oggetti statici che necessitano di grossi impianti di riscaldamento e raffrescamento per mantenere le condizioni di comfort interno ma diventano sfere viventi attorno agli occupanti che sono in contatto con la natura

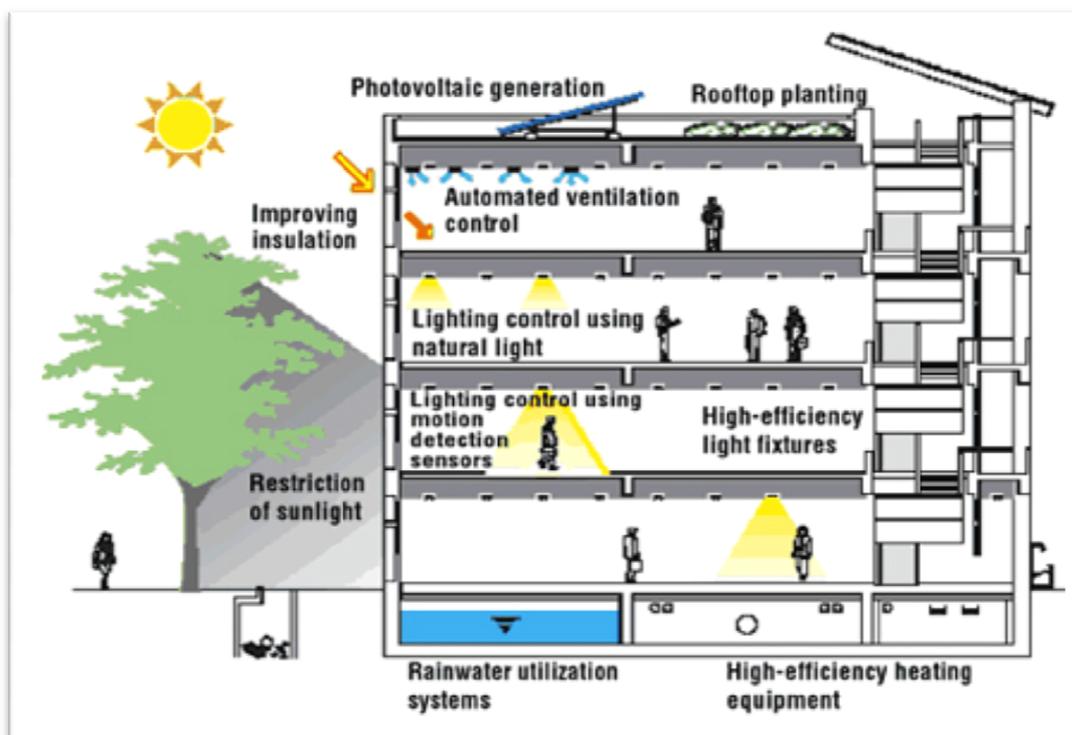


Figura 2.2: principi e strategie di controllo termico in un edificio attivo

chiamati per la loro caratteristica di rispondere in modo dinamico ai cambiamenti in atto sia all'interno (variabili ambientali, presenza di utenti, ecc.) che all'esterno del fabbricato (cambiamenti meteorologici, ombreggiamento, ecc.) sono integrati con le strategie di controllo termico caratteristiche degli edifici passivi e con le principali fonti di energie rinnovabili in un sistema in grado di raggiungere un'ottimale prestazione in termini di

natura  
,  
protetti solo  
quando  
o  
necessario.  
In  
un  
edificio  
o  
attivo  
gli  
elementi  
responsivi,  
così

consumi energetici, consumo di risorse, impatto ambientale e qualità dell'ambiente interno (comfort ambientale) (Figura 2.2)

## 2.1 Gli edifici del settore terziario

Nella direttiva europea sopra citata, le scadenze per gli edifici pubblici sono più stringenti: a partire dal 31 dicembre 2018 gli edifici di nuova costruzione occupati da enti pubblici e di proprietà di questi ultimi dovranno essere edifici a energia quasi zero. A questo proposito gli Stati membri devono elaborare piani nazionali destinati ad aumentare il numero di edifici a energia quasi zero, che possono includere obiettivi differenziati per tipologia edilizia. Gli Stati membri devono procedere inoltre, sull'esempio del settore pubblico, alla definizione di politiche e all'adozione di misure, quali la fissazione di obiettivi, finalizzate a incentivare la trasformazione degli edifici ristrutturati in edifici a energia quasi zero.

Per quanto riguarda la gestione degli edifici del settore terziario (ed in primo luogo del terziario pubblico) esistono già i margini per investimenti che possono essere ripagati nel giro di pochi anni e quindi si presenta come il settore maggiormente proficuo per una rapida applicazione delle tecnologie intelligenti per la ottimizzazione della gestione. Inoltre, uno dei motivi di interesse L'interesse per

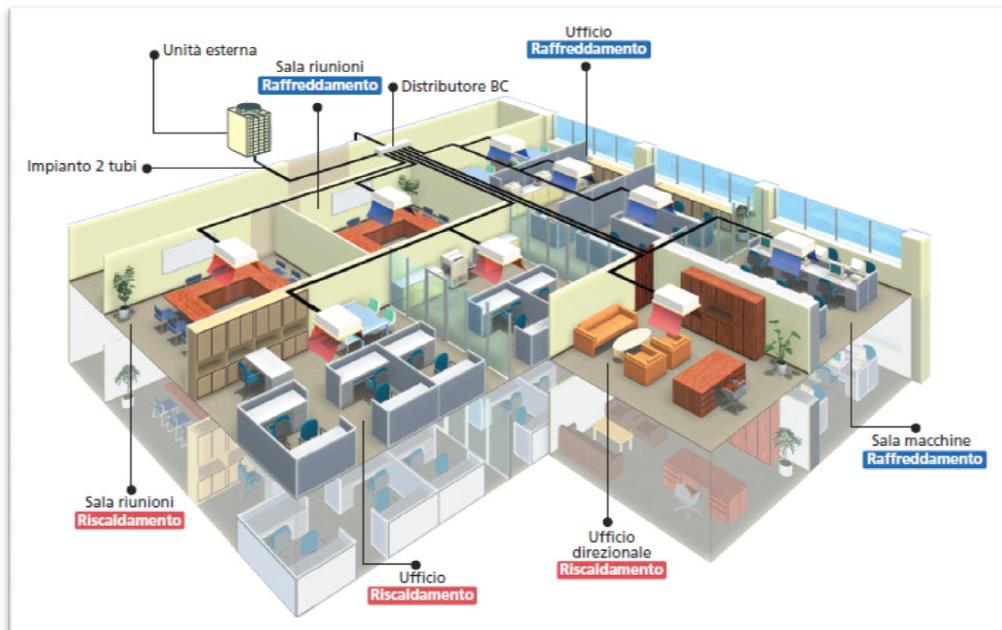


Figura 2.3: esempio delle utenze di un ufficio

questo particolare settore di edifici è dettato dalla sua individuazione come quello con la più preoccupante evoluzione dei consumi.

In questo tipo di edifici è stato, infatti, registrato negli ultimi anni un considerevole aumento dei consumi elettrici, con una tendenza che potrebbe portarne l'incidenza a superare il 50% dei consumi totali.

Il maggior numero delle unità locali adibite ad uso ufficio occupa superfici in immobili ad uso promiscuo, in maggior parte edifici realizzati per un utilizzo residenziale. Secondo

l'Agenzia del Territorio (Catasto) le unità immobiliari di categoria A10 (ufficio) ammontano complessivamente a 568.577. Di queste, secondo l'indagine campionaria effettuata dal Cresme (Centro Ricerche Economiche Sociali Mercato per l'Edilizia e il Territorio), il 30,5% occupa spazi interni a 64.911 edifici interamente o prevalentemente adibiti ad uso ufficio.

Il 30% di tali edifici è concentrato in 12 province, di queste Roma ha il maggior numero di edifici (735), seguita dalle province di Torino (426), Napoli (376) e Milano (371).

Queste province detengono il 14% del totale.

Il 50% degli edifici è distribuito si distribuisce nelle 26 maggiori province. Inoltre, oltre la metà (53%) è realizzato nei comuni di piccola e medio-piccola dimensione demografica (fino a 20 mila abitanti).

Negli ultimi 7 anni, il flusso medio di edifici di nuova realizzazione è stato di 860 fabbricati, pari a circa l'1,3% dell'esistente. I fabbricati per uffici utilizzati dalle Amministrazioni Pubbliche sono 13.581, pari al 20,9% dello stock totale.

I 64.911 edifici sviluppano una superficie complessiva di 56,7 milioni di mc e una volumetria pari a quasi 200 milioni. La quota maggiore di fabbricati è di piccole dimensioni: il 50,6% non supera i 350 mq. Tuttavia il 32% delle superfici e delle volumetrie sono espresse da poco meno di 1.200 edifici di grande dimensione (oltre 5.000 mq). Questi ultimi sono prevalentemente concentrati nelle regioni settentrionali del Paese.

### **Classificazione in base a epoche costruttive**

La classificazione dei sistemi impiantistici è stata effettuata sulla base dei dati dell'indagine CRESME per ENEA in funzione della tipologia di alimentazione, sul sistema di emissione dell'aria e sul sistema di regolazione della temperatura per gli impianti di riscaldamento, mentre per quelli di climatizzazione estiva si è considerata la tipologia di impianto e il sistema di regolazione.

L'estrapolazione dei dati utili a determinare le tipologie impiantistiche prevalenti è stata inoltre effettuata in relazione alle 5 epoche costruttive (ante 1920, 1920-1945; 1946-1970, 1971-1990, dal 1991-oggi) ed alle 3 principali zone geografiche in cui abbiamo suddiviso il territorio italiano (Nord – Centro – Sud e Isole).

	Numero	%
prima del 1919	13.048	20,1%
Dal 1920 al 1945	5.911	9,1%
Dal 1946 al 1961	7.208	11,1%
Dal 1962 al 1971	7.888	12,2%
Dal 1972 al 1981	7.082	10,9%
Dal 1982 al 1991	7.776	12,0%
Dal 1992 al 2001	9.979	15,4%
Dal 2002 al 2008	6.018	9,3%
<b>TOTALE</b>	<b>64.911</b>	<b>100,0%</b>

*Tabella 2.1: numero edifici uso ufficio per epoca di costruzione*

## **Gli impianti termotecnici**

In particolare per gli impianti di riscaldamento sono state considerate tre tipologie di alimentazione, (gas, gasolio ed elettrico), tre tipologie di sistemi di emissione dell'aria (radiatori, fan-coil e termoconvettori) e due sistemi di regolazione della temperatura (per stanza e per piano); gli impianti di climatizzazione sono stati suddivisi in quattro tipologie (condizionatore fisso, mobile, pompe di calore e caldaie) e di due sistemi di regolazione della temperatura (per stanza e per piano).

Negli impianti:

- il combustibile maggiormente impiegato è il gas (56%) seguito dall'elettricità (20%) e dal gasolio (13%). I tubi del circuito di distribuzione sono prevalentemente in traccia (89%);
- il sistema di emissione dell'aria più adoperato è costituito da radiatori (48%) seguito dal fan-coil (22,6%) e dai termoconvettori (19,5%);
- il 42% degli edifici possiede un sistema di regolazione della temperatura per ogni stanza, il 33,6% ne dispone uno per ogni piano;
- nel 69% degli edifici è presente un sistema di climatizzazione, la maggior quota di questi (66,4%) dispone di un sistema fisso (split) mentre il 29% utilizza la pompa di calore. Infine, solo il 4% impiega fonti di energia rinnovabili, in quasi egual misura il solare termico ed il fotovoltaico.

NOTA: Per quanto riguarda i carichi termici, i consumi di energia termica sono attribuibili quasi esclusivamente al fabbisogno di calore per il riscaldamento degli stabili durante il periodo invernale; il fabbisogno di calore per l'ACS risulta trascurabile e, a volte, addirittura nullo.

Nelle pagine successive sono riportati le caratteristiche degli impianti di climatizzazione classificati in base a disposizione geografica (Nord, Centro, Sud), zona climatica e epoca di costruzione.

LE CARATTERISTICHE DEGLI IMPIANTI CLIMATICI - tipologie più frequenti - NORD

	ZONA CLIMATICA E: 26.751			ZONA CLIMATICA ALTRE: 2.808			TOTALE: 29.559		
	epoca costruzione			epoca costruzione			epoca costruzione		
	ante '70	'70 - '80	post '80	ante '70	'70 - '80	post '80	ante '70	'70 - '80	post '80
<b>N° EDIFICI</b>	<b>14.385</b>	<b>3.421</b>	<b>8.945</b>	<b>1.759</b>	<b>268</b>	<b>781</b>	<b>16.144</b>	<b>3.689</b>	<b>9.726</b>
<b>Alimentazione: il tipo</b>									
Gas	7,1	69,5	66,1	57,8	57,0	42,8	74,8	65,7	64,2
Gasolio	14,7	15,8	6,2	32,7	43,0	32,8	16,8	18,1	8,5
Elettrico	5,1	14,1	22,9	2,8	(-)	14,5	4,8	13,2	22,2
Biomassa	0,4	(-)	3,9	2,3	(-)	(-)	0,7	(-)	3,6
Altro	2,6	3,3	0,8	4,4	(-)	9,9	2,8	3,0	1,6
<b>Alimentazione: i tubi circuito</b>									
A vista	12,5	4,8	7,7	20,3	5,0	11,6	13,4	4,5	8,0
In traccia	83,6	91,5	92,3	78,1	87,9	88,4	83,0	91,2	92,0
Entrambi	3,9	3,7	(-)	1,6	7,1	(-)	3,7	3,9	(-)
<b>Sistema Emissione aria</b>									
Bocchette aria a soffitto	13,4	1,8	8,0	4,8	8,0	13,4	8,0	13,4	4,8
Bocchette aria a parete	86,6	95,2	92,0	95,2	92,0	86,7	92,0	86,7	95,1
Fall-coil	10,7	27,8	29,5	2,3	(-)	18,7	9,7	25,4	28,4
Radiatori	66,0	45,7	25,7	76,8	77,1	52,4	67,2	48,1	28,0
Termostrutture	20,1	24,7	34,5	12,6	7,7	16,4	18,3	22,9	32,9
Altro	4,2	1,8	5,4	6,0	15,1	9,5	4,4	2,6	5,8
<b>Sistema regolazione temp.</b>									
SI, per ogni stanza	36,8	39,9	60,9	27,9	22,3	54,2	35,8	38,5	60,4
SI, per ogni piano	42,2	43,4	31,3	44,5	50,0	24,8	42,5	48,5	30,7
NO	20,9	11,7	7,8	27,7	27,8	21,0	21,7	13,0	8,9
<b>Impianto condiz.: detazione</b>									
Condizionatore fisso split	70,7	79,2	72,8	79,5	48,5	67,6	71,2	78,2	72,8
Condizionatore mobile (pinguino)	2,4	3,1	1,5	(-)	5,8	(-)	2,3	4,8	1,5
Cadala	4,4	(-)	3,1	11,8	(-)	13,2	4,7	(-)	3,5
Pompa di calore	23,7	15,5	23,9	9,0	(-)	19,2	22,9	15,0	23,7
Altro	1,4	2,1	0,3	(-)	(-)	(-)	1,3	2,0	0,2
<b>Fonti rinnovabili: detazione</b>									
Soare termico	1,5	2,8	8,8	11,1	20,1	9,4	2,6	4,0	8,8
Fotovoltaico	23,1	100,0	35,6	4,0	(-)	(-)	13,9	60,1	32,3
	40,2	(-)	34,8	81,7	-00,0	81,8	80,1	35,9	39,0

Fonte:indagine Cresme per ENEA (2009)

LE CARATTERISTICHE DEGLI IMPIANTI CLIMATICI - tipologie e più frequenti - CENTRO

	ZONA CLIMATICA D: 6.305		ZONA CLIMATICA E: 2.369		ZONA CLIMATICA ALTRE: 308		TOTALE: 11.582							
	EPOCA COSTRUZIONE				EPOCA COSTRUZIONE									
	anni 70	70 - 80	post 80	anni 70	70 - 80	post 80	anni 70	70 - 80	post 80					
<b>N° EDIFICI</b>	<b>5.145</b>	<b>947</b>	<b>2.213</b>	<b>1.399</b>	<b>198</b>	<b>781</b>	<b>375</b>	<b>105</b>	<b>428</b>	<b>6.910</b>	<b>1.250</b>	<b>3.422</b>		
<b>Alimentazione: il tipo</b>	Gas 13,2 7,6 (-)	54,8 (-) 7,6 (-) 3,2 (-) 11,3 (-)	56,1 (-) 36,1 (-) 2,6 (-)	70,0 5,5 (-) 13,4 (-) 4,2 (-)	100,0 (-) 15,6 (-) 7,5 (-)	57,9 9,0 (-) 13,6 (-) 7,5 (-)	46,8 (-) 30,7 (-) 16,5 (-)	53,2 11,6 (-) 62,4 (-) 2,9 (-) 7,3 (-)	(-) (-) (-) (-) (-) (-)	34,6 3,0 (-) 62,4 (-) 100,0 (-)	55,2 5,8 (-) 20,1 (-) 16,8 (-)	57,5 2,4 36,7 4,2 3,4 (-)	54,2 2,4 36,7 4,2 3,4 (-)	
<b>Alimentazione: i tubi circolo</b>	4,5 93,4 2,2 (-)	4,2 35,8 (-) 3,3 (-)	7,5 58,2 (-) 3,3 (-)	14,4 81,0 4,6 (-)	(-) 100,0 (-) 4,6 (-)	(-) 100,0 (-) (-) (-)	19,2 80,8 (-) (-)	7,0 30,4 2,6 (-)	(-) (-) (-) (-)	7,0 30,4 (-) (-)	3,4 56,5 (-) (-)	4,9 32,9 (-) (-)	4,9 32,9 (-) (-)	
<b>Sistema Emissione aria</b>	4,5 2,1 (-) 19,1 60,0 14,7 2,8 (-)	(-) (-) 37,7 37,5 21,0 (-) (-)	5,7 3,2 (-) 45,3 20,5 30,8 (-)	(-) (-) 13,2 52,9 35,3 4,2 (-)	(-) (-) 35,7 100,0 (-) (-) (-)	25,3 (-) 15,6 13,3 25,3 9,0 (-)	(-) (-) 38,6 44,6 41,8 3,4 (-)	(-) (-) 13,9 37,8 25,4 3,1 (-)	(-) (-) (-) (-) (-) (-)	3,4 15 (-) 17,9 15,2 (-)	(-) (-) 34,3 44,4 16,0 (-)	(-) (-) 38,0 44,4 27,6 (-)	9,6 3,6 (-) 19,2 27,6 (-)	9,6 3,6 (-) 19,2 27,6 (-)
<b>Sistema regolazione temp.</b>	42,4 33,1 24,5	51,2 30,0 18,8	58,4 21,5 10,0	31,5 47,6 20,9	35,7 23,7 35,7	53,7 31,3 (-)	22,8 13,9 62,3	(-) (-) 100,0	(-) (-) 100,0	65,9 8,9 25,1	(-) (-) 25,8	44,8 27,4 28,0	39,2 22,3 9,5	39,2 22,3 9,5
<b>Impianto condiz.: detrazione</b>	61,4	32,6	57,1	58,0	71,5	74,7	62,5	100,0	97,2	53,8	69,8	35,5		
<b>Impianto condiz.: tipo</b>	64,5 6,7 6,7 24,3 (-)	58,4 4,0 (-) 36,5 (-)	46,0 1,8 7,7 38,6 8,8	76,5 (-) (-) 21,5 (-)	100,0 (-) (-) (-) (-)	44,3 12,1 (-) 43,6 (-)	77,7 (-) (-) 22,3 (-)	50,0 50,0 (-) (-)	71,0 (-) (-) 29,0 (-)	50,0 (-) (-) (-)	53,7 5,5 5,5 23,8 (-)	63,7 7,5 5,1 26,7 (-)	49,0 3,6 5,1 38,3 6,0	
<b>Fonti rinnovabili: detrazione</b>	6,6	7,4	8,3	5,1	(-)	13,6	3,0	(-)	(-)	5,1	5,7	9,2		
<b>Fonti rinnovabili: i tipi prevalenti</b>	68,7 10,3	130,0 (-)	38,7 81,3	100,0 (-)	(-) (-)	45,6 54,6	(-) 100,0	(-) (-)	(-) (-)	72,2 13,9	100,0 (-)	41,5 86,5		

Fonte: indagine Cresme per ENEA (2005)

LE CARATTERISTICHE DEGLI IMPIANTI CLIMATICI - tipologie più frequenti - SUD

	ZONA CLIMATICA C: 12-102		ZONA CLIMATICA D: 5-970		ZONA CLIMATICA B: 3-805		ZONA CLIMATICA ALTRE: 1-555		TOTALE					
	EPOCA COSTRUZIONE		EPOCA COSTRUZIONE		EPOCA COSTRUZIONE		EPOCA COSTRUZIONE		EPOCA COSTRUZIONE					
	70-80	post 80	70-80	post 80	70-80	post 80	70-80	post 80	70-80	post 80				
<b>N° EDIFICI</b>	<b>6.869</b>	<b>1.401</b>	<b>3.839</b>	<b>3.955</b>	<b>794</b>	<b>1.221</b>	<b>2.531</b>	<b>3.11</b>	<b>919</b>	<b>318</b>	<b>673</b>	<b>14.300</b>	<b>2.824</b>	<b>5.946</b>
<b>Alimentazione tipo</b>														
Gas	32,7	27,5	32,8	55,4	56,0	32,4	10,1	35,6	6,2	28,2	47,4	95,5	42,7	35,9
Gasolio	22,7	33,9	4,7	-3,6	37,3	20,5	4,9	-2,0	6,2	2,4	15,2	1,3	-2,9	32,8
Elettrico	33,6	36,8	47,6	24,0	4,2	9,3	47,5	23,7	78,1	6,4	3,2	32,6	15,1	36,0
Biomassa	1,0	1,4	1,3	6,1	1,4	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	0,7
Altro	3,2	15,8	-3,7	3,8	5,5	7,7	24,3	35,6	7,3	1,1	1,1	1,1	3,9	10,3
<b>Alimentazione luci e riscaldamento</b>														
A elettr.	11,6	18,8	3,5	4,1	15,3	6,4	13,5	1,1	7,1	24,1	1,1	1,0	17,8	
In fessia	85,4	76,9	82,7	95,9	66,8	93,5	84,4	100,0	52,2	75,2	100,0	87,5	74,7	
Enteambi	3,0	4,2	3,8	6,1	17,9	6,1	6,1	6,1	1,1	1,1	1,1	1,6	7,4	
<b>Sistema Emissioni aria</b>														
Boiler aria e scuffio	0,9	1,4	3,6	6,1	1,4	3,9	6,1	6,2	1,1	1,1	1,1	5,4	4,4	
Boiler aria a parete	1,0	1,4	1,1	6,1	1,4	1,1	2,7	1,1	1,1	1,1	1,1	1,0	4,1	
Fornace	24,9	15,7	43,5	23,5	4,2	8,7	43,0	61,4	72,2	6,1	11,6	25,7	15,5	
Riscaldori	45,2	39,6	32,0	55,5	73,1	74,5	14,3	1,4	13,4	71,7	57,2	47,8	42,4	
Termocamion	15,1	24,0	3,4	11,8	14,1	6,3	7,0	1,1	1,1	20,1	2,3	24,1	13,6	
Altro	3,9	4,2	3,7	5,2	1,4	1,1	6,1	4,2	1,1	1,1	1,1	5,1	3,1	
<b>Sistema regolazione</b>														
Si per ogni stanza	33,5	43,0	63,9	33,5	35,9	11,5	44,5	22,7	59,3	26,3	1,1	55,9	37,3	
Si per ogni piano	33,7	29,7	23,9	27,0	30,6	52,4	10,2	15,3	26,1	27,1	54,2	44,1	27,4	
No	33,7	27,3	21,2	33,4	33,3	25,5	41,2	57,9	14,3	46,2	35,4	1,1	35,3	
<b>Impianto condiz. : ventilazione</b>														
Condizionatore fessia (scuffio)	75,8	80,4	82,2	55,2	58,2	59,5	83,5	82,7	53,1	44,2	28,2	75,3	62,3	
Condizionatore mobile (portatile)	62,6	46,4	31,8	67,6	76,8	84,5	41,0	52,1	78,2	25,2	100,0	37,0	29,2	
<b>Impianto condiz. : po</b>														
Condizionatore mobile (portatile)	1,0	1,4	6,1	3,7	1,4	6,1	6,1	6,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	
Condizionatore mobile (portatile)	4,9	1,4	6,1	1,6	1,4	6,1	5,5	1,1	1,1	13,2	1,1	35,1	4,8	
Pompa di calore	31,0	67,5	42,2	33,7	30,5	19,1	56,7	49,9	21,2	51,1	25,0	35,6	45,9	
Altro	6,1	1,4	6,1	6,1	1,4	6,1	6,1	6,1	1,1	1,1	1,1	6,1	6,1	
<b>Fonti rinnovabili : dotazione</b>														
Solare termico	1,1	1,4	6,1	100,0	1,4	6,1	6,1	6,1	1,1	58,3	1,1	4,1	75,7	
Fotovoltaico	100,0	100,0	82,0	6,1	1,4	6,1	6,1	100,0	14,2	1,1	100,0	21,9	100,0	

Fonte: Indagine Casarsa del EVCA (2009)

## Utenze elettriche ed illuminazione

I consumi elettrici variano sensibilmente in funzione della zone climatiche e risultano largamente variabili a causa di fattori poco prevedibili e standardizzabili come gli orari di lavoro, le abitudini dei lavoratori o il tipo di servizio/bene prodotto.

Generalmente possono essere associati a:

- macchine da ufficio (PC, stampanti, fotocopiatrici);
- apparati di sollevamento (ascensori e montacarichi);
- impianti di illuminazione interni e esterni;
- impianti tecnologici;
- impianto di condizionamento e ventilazione.

Ad oggi i consumi elettrici non vengono adeguatamente investigati, in particolare per quanto riguarda i consumi degli apparati da ufficio (computers, stampanti etc) e dei sistemi di sollevamento (ascensori e montacarichi).

A livello bibliografico sono pochi, se non inesistenti gli studi e le analisi effettuate sugli edifici adibiti ad uso di ufficio che correlano il peso dei consumi elettrici con l'utenza in genere (personale, addetti), anche se sarebbe da considerare con maggiore interesse visto che tale correlazione consumi elettrici-personale può incidere per circa un terzo sul totale dei consumi energetici di un edificio direzionale.

Il condizionamento, nonostante risulti per sua natura un fabbisogno di tipo termico, viene solitamente associato ad assorbimenti elettrici convenzionali in quanto le macchine delegate a questa funzione sono generalmente alimentate da fonte elettrica.

Sono due gli aspetti che hanno portato ad incentrare il lavoro sugli edifici del settore terziario:

- il primo è dato dal fatto che nella vita utile di questo tipo di edifici, oltre l'80 % dei costi è riconducibile al costo del personale, mentre i costi di costruzione e ristrutturazione sono nell'ordine del 5%, e i costi energetici e di manutenzione sono nell'ordine del 3 %. Alla luce ciò un investimento in efficienza energetica ha dunque un impatto diretto sull'8% dei costi complessivi dell'edificio, ma ha anche un effetto indiretto molto importante sull'80%, rappresentato dai costi per il personale, perché, contribuendo sostanzialmente a migliorare le condizioni di lavoro, permette di migliorare la produttività;

- il secondo è legato al fatto che nel settore terziario si inseriscono i numerosi edifici della pubblica amministrazione che in base al D. Lgs 115/2008<sup>2-3</sup> ha la responsabilità amministrativa, gestionale ed esecutiva dell'adozione degli obblighi di miglioramento dell'efficienza energetica nel settore pubblico, come promotore dell'efficienza energetica.

L'iniziativa di impiegare un sistema di monitoraggio – diagnostica - automazione può essere considerata come un'opera di riqualificazione, che prevede una riduzione dei consumi di energia misurabile e predeterminata.

---

<sup>2</sup> Decreto Legislativo 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"

<sup>3</sup> DIRETTIVA 2006/32/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO del 5 aprile 2006 concernente l'efficienza degli usi finali dell'energia e i servizi energetici e recante abrogazione della direttiva 93/76/CEE del Consiglio.

## 2.2 Le strategie della gestione degli edifici del settore terziario

Le strategie generalmente utilizzate per la gestione ottimale in questo settore consistono in:

- adottare sistemi efficienti di regolazione automatica della temperatura ambiente (regolazione della temperatura a livello locale su ogni radiatore o collettore di zona con valvole termostatiche riducendo la portata del fluido termovettore caldo agli elementi radianti);
- adottare sistemi efficienti di regolazione automatica della temperatura di mandata;
- revisionare il rivestimento isolante del serbatoio di accumulo e delle condotte asservite al generatore di calore;
- verificare l'efficienza del sistema di recupero condense negli impianti utilizzatori e installando sistemi di raccolta di condensa;
- utilizzare sistemi di controllo che regolano accensione/spegnimento e l'intensità luminosa in risposta ad un segnale esterno (controllo manuale, presenza di persone, timer, luminosità esterna); tali sistemi si possono basare su interruttori manuali localizzati, sensori di presenza, timer, sensori di illuminazione diurna, regolatori di luminosità.
- adottare sistemi domotici automatici per il controllo degli edifici: sistema integrato di impianti tecnologici che ottimizzano la gestione, migliorandone la sicurezza, il comfort, e l'efficienza energetica dell'edificio stesso. I servizi che caratterizzano i sistemi domotici sono:
  - automazione e controllo di illuminazione interna/esterna, termoregolazione, gestione energia, attivazioni orarie;
  - informazione e comunicazione telefono, ethernet;
  - sicurezza: antintrusione, rilevazione incendio e fughe di gas, videocamere, telesoccorso.

### **BEMS (Building Energy Management Systems)**

Il componente centrale del sistema di automazione dell'edificio è il BEMS (Building Energy Management Systems ) che si trova negli edifici più avanzati.

Ad esempio con il diffondersi in campo edilizio di accorgimenti per sfruttare al meglio la ventilazione naturale, i guadagni solari ed i principi dell'architettura bioclimatica, un sistema di controllo integrato della casa o dell'edificio, che possa gestire le aperture sulla facciata, il sistema di ombreggiatura, il sistema di trattamento dell'aria stanza per stanza, l'illuminazione artificiale e gli altri elementi utili, diventa indispensabile per garantire un corretto funzionamento della casa e quindi condizioni di comfort e riduzione dei consumi.

Se da un lato aumenta la complessità degli impianti tecnologici, sia come gestione che come manutenzione, dall'altro aumenta l'importanza della loro efficienza, in termini di funzionalità e di obblighi di legge e normativi. In questo ambito si è sviluppata la necessità di sistemi di automazione di edificio ed il concetto di sistema integrato, indicato come building automation e supervisione di impianto, dove le figure di riferimento possono essere il gestore di edificio, energy manager ed utente

con esigenze complesse di gestione e manutenzione dell'immobile e degli impianti tecnologici contenuti. Con i moderni sistemi di automazione e telecontrollo di edificio è possibile controllare le funzioni di sicurezza, allarmi, energia, climatizzazione, accessi, illuminazione, comunicazione, ecc. Gli impianti possono essere comandati in maniera semplificata grazie ad automatismi e monitorati tramite videoterminali presenti nell'edificio stesso oppure da postazioni operative remote.

Un sistema di BEMS rispetto agli impianti tradizionali presenta innumerevoli vantaggi individuabili con l'analisi delle seguenti categorie:

- Risparmi tangibili;
- Risparmi intangibili.

#### Risparmi Tangibili

- Risparmi sulla gestione dell'edificio:
  - gestione carichi elettrici (abitudini di consumo, distacco carichi);
  - manutenzione (correttiva, preventiva, predittiva);
  - supervisione (controlli automatici, report di gestione);
  - efficienza nella gestione della Security and Safety (personale).
- Risparmi sugli impianti (termotecnici, elettrici):
  - gestione degli orari di funzionamento;
  - fornitura delle prestazioni solo quando richiesto, funzionamento solo in presenza di utenti o quando le condizioni ambientali effettivamente lo richiedono (es. riscaldamento, raffrescamento, ricambio aria, illuminazione, ecc.) ;
  - mantenimento costante dell'efficienza di funzionamento.

#### Risparmi Intangibili

Questa è una tipologia di risparmio difficilmente quantificabile, ma diretta conseguenza del sistema di BEMS che porta ad un miglioramento delle condizioni di vivibilità all'interno dell'edificio:

- miglioramento del comfort, ad esempio una migliore gestione del comfort climatico non è solo un risparmio energetico ma porta anche un miglior benessere;
- maggiore accessibilità e fruibilità (automazioni);
- aumento del valore dell'edificio (prestigio e valore economico);
- maggiore flessibilità nella gestione degli ambienti interni (possibilità di suddivisione dinamica degli stessi).

#### **Architettura di sistema**

I sistemi di automazione e in genere tutti i dispositivi elettronici atti alla gestione, regolazione e misurazione impiantistica negli edifici vengono indicati come HBES (Home and Building Electronic System) e spesso differenziati nel modo seguente:

- RESIDENZIALE: domotica, home automation
- NON RESIDENZIALE: BA (Building Automation).

Da NORMA EN 15232<sup>4</sup> si possono usare le seguenti terminologie:

- **BAC Building Automation and Control:** Descrizione di prodotti, software e servizi energetici per il controllo automatico, monitoraggio e ottimizzazione degli interventi manuali e gestionali per avere una serie di dispositivi al servizio dell'edificio che ne garantisca l'efficienza energetica l'economia e la sicurezza;
- **BACS: BAC & System:** comprende tutti i prodotti di cui sopra per il controllo automatico incluso gli interazione tra i diversi sistemi impiantistici;
- **TBM & TBS (Technical Building Management & Technical Building System):** il processo e il servizio delle operazioni di gestione dell'edificio incluso tutti i dispositivi tecnici in relazione con altre discipline (progettazione e gestione economica, project management e project financing).

Il sistema BEMS può essere descritto come composto da due sistemi un sistema Building Automation (BACS, TBM, TBS) e un sistema Information & Communication Technology (ICT)

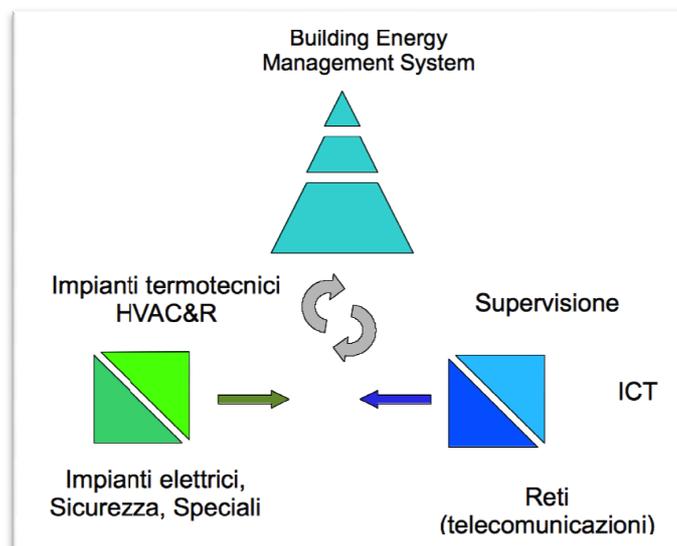


Figura 2.4: interazione sistemi BA-ICT

Si individuano i seguenti ambiti impiantistici:

- Riscaldamento (BACS/HBES);
- Raffrescamento (BACS/HBES);
- Ventilazione (BACS/HBES);
- Produzione di acqua calda (BACS/HBES);
- Illuminazione (BACS/HBES);
- Controllo tapparelle/luminosità ambienti (BACS/HBES);
- Centralizzazione e controllo integrato delle diverse applicazioni (TBM);
- Diagnostica (TBM);
- Rilevamento consumi/miglioramento dei parametri di automazione (TBM)

<sup>4</sup> CEN EN 15232 "Energy performance of buildings - Impact of Building Automation Control and Building Management"- "Prestazione energetica degli edifici - Incidenza dell'automazione, della regolazione e della gestione tecnica degli edifici"

Si può concludere dicendo che grazie ai sistemi BEMS è dato il corretto peso agli impianti tecnologici che assumono un ruolo rilevante al pari degli aspetti architettonici. Attraverso dunque la misura, l'analisi e il controllo è garantita l'efficienza energetica dell'edificio.

La tecnologia BEMS ha come effetto la razionalizzazione, la semplificazione e personalizzazione della gestione degli impianti installati nell'edificio.

Nonostante tale tecnologia permetta al gestore di ricevere vantaggi notevoli, riscontra una notevole limitazione nella possibilità di applicazione ad un solo elemento globale (l'edificio).

### **2.3 Le criticità**

Benchè il BEMS provveda alla operatività dell'edificio, non assume su di sé funzionalità di diagnostica avanzata (es: identificazione guasti non facilmente rilevabili o errati comportamenti degli utenti o valutazioni sulla obsolescenza dell'edificio o dei suoi impianti o sulla necessità di manutenzione o errate procedure del BEMS stesso) pertanto è fondamentale l'elemento umano nel processo di valutazione e conduzione dell'edificio stesso. La complessità della gestione è un problema non indifferente: nel caso di enti pubblici o privati e nelle aziende viene nominato un tecnico responsabile per l'uso razionale dell'energia, chiamato Energy Manager. L'Energy manager è il responsabile per la conservazione e l'uso razionale dell'energia; è una figura introdotta in Italia dalla legge 10/91<sup>5</sup> per i soggetti (enti pubblici e privati) caratterizzati da consumi importanti, espressi in tonnellate equivalenti di petrolio (tep):

- 10.000 tep per le imprese del settore industriale;
- tep per i soggetti del terziario e della Pubblica Amministrazione.

L'Energy Manager dovrebbe disporre di una adeguata conoscenza delle tecnologie e degli interventi di risparmio energetico ed una piena consapevolezza, dal punto di vista tecnico energetico ed economico, dell'insieme degli edifici e degli impianti in gestione all'Ente Locale. Oltre alla competenza tecnica, l'Energy Manager deve essere una figura esterna ed imparziale, assolutamente indipendente dai fornitori di combustibile e soprattutto dai fornitori di calore ed energia. Purtroppo, i dati disponibili spesso sono pochi e raccolti in modo inadeguato (mai in tempo reale e/o su dinamiche temporali tali da poter far emergere problematiche di gestione) e senza i dati di partenza è impossibile fare una qualsiasi valutazione credibile. A causa della complessità delle Amministrazioni Pubbliche le informazioni energetiche sensibili sono di competenza di diversi segmenti dell'amministrazione medesima.

Attualmente non esistono dei veri e propri modellatori o sistemi in grado di effettuare una diagnostica avanzata in modo automatico. Generalmente infatti ci si limita a delle semplici collezioni di dati mentre la diagnostica in senso stretto è

---

<sup>5</sup> 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.

demandata ad operatori umani che analizzano i dati acquisiti. Questo naturalmente causa un elevato costo operativo e la necessità di un energy manager esperto il cui costo è molto elevato. Inoltre la competenza dell'energy manager è tanto più elevata quanto più grande è il parco di edifici che deve controllare (ad esempio esistono molte reti di edifici in Italia che superano i 3000 uffici) ma in questo caso è praticamente impossibile visionare a fondo tutti i dati. In definitiva l'intervento di diagnostica ed ottimizzazione si limita alla identificazione di cause macroscopiche senza disporre di un vero processo di elaborazione dei dati.

### 3. SVILUPPO DELLA MODELLISTICA PREDITTIVA

La modellistica si è basata sulla predizione del consumo energetico per la regolazione ed ottimizzazione; la previsione del carico, in un orizzonte temporale più vario, svolge un ruolo critico per la gestione delle operazioni in ambito elettrico. Nelle reti elettriche del futuro una previsione accurata e robusta permetterebbe di ottenere un maggiore controllo e flessibilità rispetto alle reti odierne e si potrebbero evitare i problemi derivanti da picchi inattesi, oltretutto si potrebbero avere informazioni molto utili nell'acquisto e nello scheduling della produzione energetica.

L'abilità di predire i comportamenti futuri degli utenti e le loro richieste è una parte necessaria sia per la corretta analisi di ciò che sta avvenendo nell'edificio e sia per trasmettere tali dati verso i sistemi di controllo della rete in cui l'uso di sistemi intelligenti sta crescendo notevolmente ("Smart Grids"). Una buona previsione deve essere accurata e, assai importante, presentare un errore massimo il più piccolo possibile. Infatti l'efficacia della gestione energetica di una rete, o complesso di edifici, è fortemente influenzata dai picchi di errore ed un predittore con una bassa varianza può essere preferito ad uno che presenta un errore medio inferiore ma picchi di errore più accentuati. Sottostimare la richiesta energetica può avere un impatto negativo sul Demand Response e può rendere il controllo dei sovraccarichi più difficile. Al contrario una sovrastima può creare un surplus inatteso di produzione. In ambedue i casi è chiaro che più alto è l'errore e maggiori sono i costi di gestione, arrivando a situazioni in cui un distretto energetico è costretto a comprare elettricità dalla rete a costi più alti di quanto sarebbero stati grazie ad un'accurata predizione. In generale più alto è l'errore e maggiore è l'incertezza del sistema di gestione a seguire le richieste della domanda e di conseguenza sono più elevati i costi di gestione.

Le attività svolte hanno riguardato lo sviluppo delle metodologie di modellazione predittiva dell'intero sistema edificio-climatizzazione, attraverso cui si intende cogliere l'ulteriore margine di efficienza ma anche garantire la robustezza del sistema nel suo insieme. Nel presente studio sono state utilizzate, con successo, predittori neurali che hanno dimostrato la loro efficacia in diversi contesti industriali ed ingegneristici, vista la loro capacità di trovare relazioni tra le variabili osservate, arrivando a risultati eccellenti anche nell'ambito della previsione dei carichi energetici. La ricerca si è focalizzata sullo sviluppo di una metodologia innovativa per la previsione a breve termine della richiesta energetica di un edificio complesso.

### 3.1 Le previsioni neurali

I metodi predittivi tradizionali sono basati o su approcci statistici o sull'intelligenza artificiale. I metodi più comuni sono Box-Jenkins, metodi esponenziali (Holt-Winters), le reti neurali e più recentemente, le Support Vector Machines (SVM). Le reti neurali hanno dimostrato la loro efficacia in diversi contesti industriali ed ingegneristici, vista la loro capacità di trovare relazioni tra le variabili osservate, arrivando a risultati eccellenti anche nell'ambito della previsione dei carichi energetici.

Generalmente si parla di previsione a breve termine quando l'orizzonte temporale varia dall'ordine delle ore a quello di una settimana. Per questo tipo di previsione tutti i fattori che influenzano il pattern di consumo. Ovviamente il tipo di variabili da considerare per la previsione può variare in base al tipo di utenza, se residenziale, industriale o terziaria.

I dati di carico energetico normalmente mostrano una periodicità, spesso più di una, il carico ad un preciso istante è generalmente dipendente dal valore del carico nell'ora precedente ma anche nello stesso orario della settimana precedente e così via.

Le metodologie sviluppate sono state qualificate su dati di carichi elettrici che presentano le periodicità più complesse (giornaliera, settimanale, stagionale) ma la loro valenza è applicabile con pochi adattamenti a tutti i carichi energetici "standard" dell'edificio quali climatizzazione e condizionamento, illuminazione, utenze di ufficio (PC, stampanti, ecc...).

### Il Caso Studio

I dati che presenteremo sono stati raccolti presso il centro ricerche ENEA di Casaccia e sono così descritti:

- A. Carico Elettrico Orario: misurato in un edificio del centro (C59) considerando illuminazione, condizionamento e dispositivi vari (comunemente PC)
- B. Dati Climatici: temperatura esterna e radiazione solare misurati con una centralina all'interno del centro ricerche
- C. Dati Affluenza: il numero di persone all'interno del C59 è stato stimato usando i dati forniti dai lettori di badge presenti all'ingresso del centro.

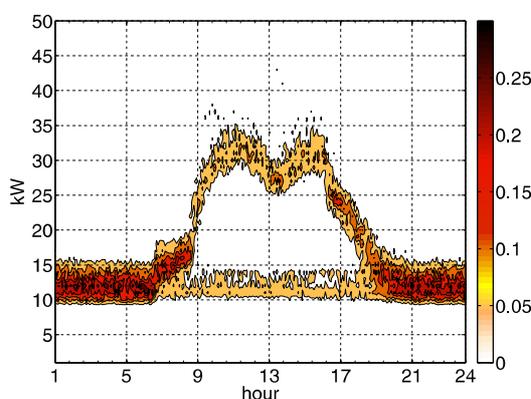


Figura 3.1: distribuzione dei dati durante il giorno

Tutti questi dati sono stati raccolti per un anno intero ma in questo lavoro sono state usate 13 settimane di dati per un totale di 2184 dati orari. Nel periodo considerato il carico ha un valore medio di 17.49 kW, un minimo di 8.49 kW ed un massimo di 54.9 kW.

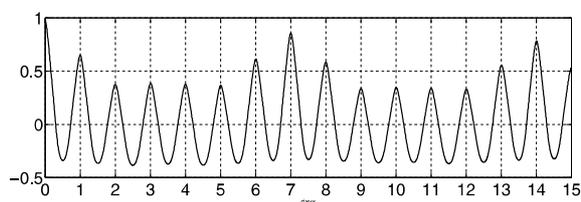


Figura 3.2: autocorrelazione del segnale di carico

Come prevedibile i dati di carico mostrano una periodicità netta come mostrato nel grafico in Figura 3.2, dove una periodicità settimanale è chiaramente visibile. Il numero di persone presenti all'interno dell'edificio durante le ore lavorative varia comunemente tra 45 e 70. La relazione tra il carico e il numero di persone è visibile in Figura 3.3.

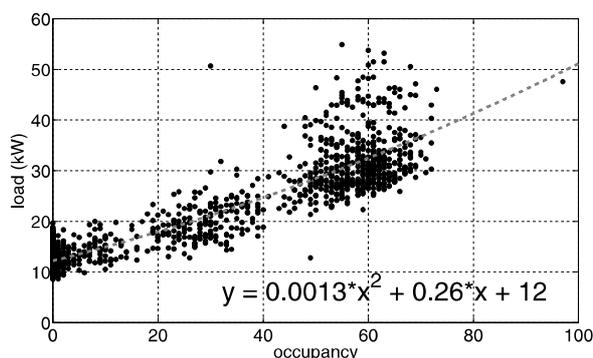


Figura 3.3: relazione tra il numero di persone nell'edificio e il carico. La linea tratteggiata è il miglior fitting polinomiale osservato all'interno dei dati.

La richiesta energetica è comunemente influenzata dal clima per l'uso del condizionamento/riscaldamento e illuminazione. Nel caso in questione, a causa del tipo di impianto di riscaldamento utilizzato (gestito dal timer) non si è osservata nessuna relazione tra temperatura/radiazione e dato di carico.

## Modelli Predittivi

Qui di seguito descriviamo i modelli usati in questo capitolo.

### Modello Naive

Per fornire un confronto significativo tra i vari metodi un modello naive va introdotto per quantificare i miglioramenti introdotti da metodi sicuramente più sofisticati ed "intelligenti". Per dati periodici un modello naive può essere il seguente:

$$x_t = x_{t-S}$$

dove  $S$  è il periodo osservabile. Questo modello non fa altro che predire il segnale al tempo  $t$  fornendo lo stesso valore osservato esattamente  $S$  istanti passati. Nei dati del C59 il valore di  $S$  è pari a 168, una settimana visto che i dati utilizzati hanno frequenza oraria.

### Modelli Box-Jenkins

Un modello a serie temporali è certamente la prima scelta quando si affronta un problema di predizione, normalmente una scelta consona è un modello ARIMA che considera la non-stazionarietà dei dati, presentato da Box & Jenkins nel 1970. In questo modello si assume che il segnale futuro sia una funzione lineare delle osservazioni passate con l'aggiunta di un termine di errore (supposto a media nulla). Data la periodicità dei dati si è optato per la variante "stagionale" dei modelli ARIMA, chiamata SARIMA.

Definiti gli operatori di backshift e differenziazione come:

$$B^k x_t = x_{t-k} \quad (2)$$

$$\nabla^n x_t = (1 - B)^n x_t \quad (3)$$

$$\nabla_s^N x_t = (1 - B_s)^N x_t \quad (4)$$

un modello SARIMA definito come  $ARIMA(p, d, q) \times (P, D, Q)_s$  ha la seguente forma:

$$\Phi_P(B^s)\phi(B)\nabla_s^D\nabla^d x_t = \alpha + \Theta_Q(B^s)\theta(B)e_t$$

Dove  $x_t$  è il valore del segnale al tempo  $t$  e  $e_t$  è invece il termine di errore (supposto come rumore bianco). I termini  $d$  e  $D$  sono invece il grado di differenziazione mentre

$\Phi_P(B^s)$  e  $\Theta_Q(B^s)$  sono rispettivamente gli operatori autoregressivi stagionali e a media mobile stagionale di ordine  $P$  e  $Q$  definiti come:

$$\Phi_P(B^s) = 1 - \Phi_1 B^s - \Phi_2 B^{2s} - \dots - \Phi_P B^{Ps} \quad (6)$$

$$\Theta_Q(B^s) = 1 - \Theta_1 B^s - \Theta_2 B^{2s} - \dots - \Theta_Q B^{Qs} \quad (7)$$

Gli operatori non-stagionali  $\phi(B)$  e  $\theta(B)$  sono simili a quelli stagionali ma considerano un periodo ( $s$ ) unitario.

Il modello ARIMA può essere esteso aggiungendo un termine esterno  $I$ , tale modello viene generalmente denominato ARIMAX, similmente il modello SARIMA diviene SARIMAX, definito con la seguente equazione:

$$\Phi_P(B^s)\phi(B)\nabla_s^D\nabla^d x_t = \Gamma I_t + \alpha + \Theta_Q(B^s)\theta(B)e_t \quad (8)$$

In questo lavoro il processo di selezione dei valori di  $p$ ,  $d$ ,  $q$ ,  $P$ ,  $D$  e  $Q$  è stato svolto con un metodo di ottimizzazione noto in letteratura ed i valori ottenuti sono:  $p = 2$ ,  $d = 1$ ,  $q = 1$ ,  $P = 1$ ,  $D = 1$  e  $Q = 1$ .

## Reti Neurali

Diversamente dai modelli precedenti, la cui linearità può rappresentare un grosso limite nell'affrontare i problemi più complessi, le reti neurali sono strumenti di modellazione non-lineare pensati per trovare la relazione ottimale tra ingressi e uscite osservati in un sistema durante una fase chiamata di 'addestramento'. Le reti più usate sono le reti feed-forward come i perceptron multistrato (MLP) i cui pesi sono generalmente definiti usando il noto algoritmo di backpropagation.

Il modello predittivo più semplice che possiamo considerare per una rete neurale è quello che prende in ingresso i valori passati dell'uscita:

$$x_t = f(x_{t-1}, \dots, x_{t-N})$$

Similmente possiamo usare delle informazioni esterne  $I$  disponibili all'istante  $t$  per predire:

$$x_t = f(x_{t-1}, \dots, x_{t-N}, I_t, \dots, I_{t-K})$$

Il numero di nodi di ingresso e quindi il numero di intervalli da considerare come ingresso è una variabile critica per le applicazioni di previsione, poiché un numero troppo basso potrebbe limitare le informazioni disponibili per una previsione accurata mentre un numero troppo alto potrebbe rendere l'addestramento della rete troppo difficile per via della dimensione dello spazio delle soluzioni. Dopo una serie di test preliminari dove diverse combinazioni di ingresso sono state provate, abbiamo selezionato l'insieme di intervalli  $L$  che corrisponde alle ultime 24 ore più una e due settimane, quindi con  $L[1,2,\dots,24,168,336]$ . In questo caso il modello della rete diviene:

$$x_t = f(x_{t-1}, \dots, x_{t-24}, x_{t-168}, x_{t-336})$$

La scelta del numero degli strati nascosti della rete e il numero di neuroni per ogni strato è stata eseguita seguendo una serie di regole empiriche e *good practise* presenti in letteratura.

In questo lavoro sono state scelte due tipologie di rete neurale: perceptron multistrato (MLP) e reti neurali a base radiale (RBF).

Nella progettazione delle reti MLP dopo una serie di test è stato scelto il valore di 64 neuroni nello strato nascono. Le funzioni di attivazioni sono tangenti iperboliche per lo strato nascosto e lineari per l'ultimo strato. La scelta dell'algoritmo di addestramento è ricaduta sulla backpropagation Levenberg-Marquardt con il valore di damping impostato a 0.1. Il criterio di stop è infine il raggiungimento di 1000 epoche di addestramento.

Per le reti RBF abbiamo proceduto nello stesso modo e 128 funzioni Gaussiane sono presenti nello strato di hidden. La procedura di addestramento in questo caso consiste nel posizionamento delle funzioni a base radiale in base ad una selezione casuale dei campioni di ingresso e con un algoritmo di ottimizzazione SCG per l'ottimizzazione successiva dei pesi e delle coordinate.

## Ensemble di Reti Neurali

In questo lavoro sono stati studiati due tipi di ensemble di reti neurali: uno basato sulla media aritmetica ed un altro sulla correlazione tra gli errori delle reti.

Il primo è una semplice combinazione di  $M$  reti neurali tramite media aritmetica delle loro uscite ( $\mathbf{y}_i$ ):

$$y_{ens}(x_k) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M y_i(x_k)$$

Con questo metodo tutte le reti neurali sono addestrate separatamente e poi, per ogni input  $\mathbf{x}_k$ , l'uscita dell'ensemble è calcolata con una media aritmetica di tutte le

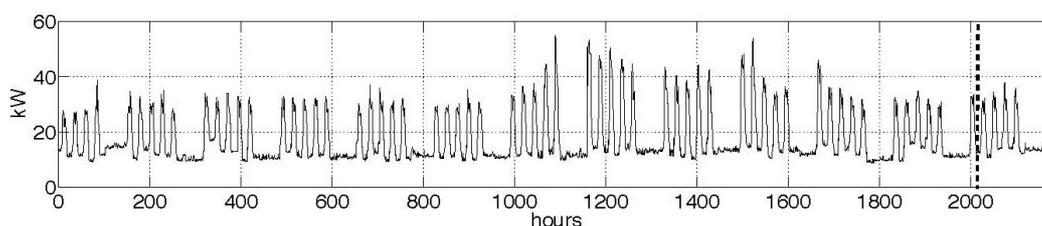
uscite delle reti neurali che lo compongono. Il calcolo di quest'ensemble è qui eseguito con un insieme di 100 reti MLP.

Il secondo metodo di ensembling che qui consideriamo è chiamato Regularized Negative Correlation Learning (RNCL) ed è stato proposto da Chen & Yao nel 2009. Questo metodo migliora il precedente Negative Correlation Learning (NCL) aggiungendo un termine di regolarizzazione con lo scopo di ridurre l'overfitting. La regolarizzazione aumenta la capacità di generalizzazione delle reti penalizzando i pesi troppo grandi che possono portare ad un'uscita discontinua. In questo lavoro le reti RBF sono usate al posto degli MLP in questo tipo di ensembling.

### **Previsione del Carico: approccio univariato**

In questa sezione applicheremo i modelli selezionati, calibrati usando una parte dei dati disponibili, sulla predizione del carico orario sulla parte restante dei dati non usati in fase di calibrazione.

L'insieme dei dati orari di carico elettrico è stato suddiviso in due parti: la prima consiste in 12 settimane (2016 campioni orari) mentre la restante è una singola settimana (168 campioni orari).



*Figura 3.4: data set, i dati oltre la linea tratteggiata è la parte di testing*

Questa suddivisione è stata selezionata per creare una situazione realistica che supponesse la possibilità di aggiornare il modello in tempo reale usando un sottoinsieme degli ultimi dati campionati.

La calibrazione/addestramento dei modelli è stata eseguita usando la prima parte del dataset e successivamente una predizione di 1-24 ore in avanti è stata eseguita sulla parte restante dei dati (vedi Figura 3.5) ottenendo al termine della fase di test una "finestra di predizione" di 145 campioni (il numero di intervalli lunghi 24 ore all'interno dei dati di test).

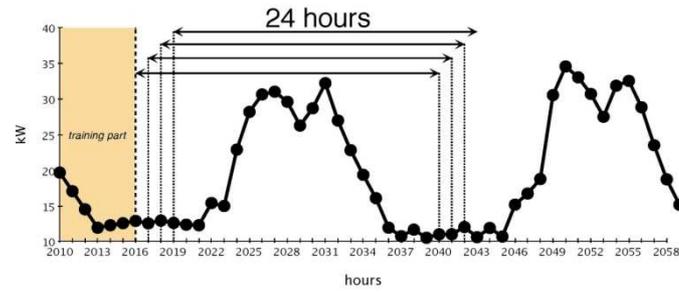


Figura 3.5: strategia di testing

La parte di test è stata a sua volta suddivisa in due parti (T1 e T2) così da fornire un'informazione più granulare sul comportamento dei vari modelli.

Il metodo di predizione considerato utilizza il dato predetto al tempo  $t$  come ingresso per le successive predizioni ( $t+1$ ,  $t+2$ , ecc), questo è un approccio comune per i modelli Box-Jenkins e perciò abbiamo fatto lo stesso per le reti neurali.

Due criteri di errore sono stati usati per valutare i singoli modelli, il MSE (Errore Quadratico Medio) e il MAE (Errore Assoluto Medio), definiti come segue:

$$\text{MAE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i - \hat{y}_i|$$

$$\text{MSE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2$$

In aggiunta abbiamo considerato anche l'errore assoluto massimo, vista la sua importanza come discusso precedentemente.

Nella Tabella 3.1 mostriamo i risultati dei vari modelli, sia sull'insieme di training che su quelli di testing.

Model	Training		Testing T1			Testing T2		
	MAE	MSE	MAE	MSE	Max	MAE	MSE	Max
Naive	2.45	14.97	2.11	7.61	7.35	2.28	6.4	6.36
SARIMA	1.14	4.34	1.89	5.52	7.15	1.24	2.17	4.79
ANN MLP best training	0.67	1.41	2.06	9.1	23.95	2.22	13.55	24.11
Average ANN MLP	1.03 (0.38)	3.65 (2.19)	2.34 (0.79)	10.9 (17.88)	12.53 (9.22)	2.49 (1.47)	21.67 (59.29)	15.69 (15.2)
MLP Ensemble	1.02	2.92	1.38	2.95	8.32	1.09	2.4	5.88
ANN RBF best training	1.17	3.36	1.72	4.36	8.15	1.21	2.14	4.51
Average ANN RBF	3.11 (2.55)	29.51(62.62)	2.96 (1.68)	19.44 (29.20)	12.49 (9.36)	3.20 (1.17)	19.91 (14.63)	15.39 (7.27)
RNCL	1.51	5.98	1.47	3.34	7.28	1.07	2.82	8.53

Tabella 3.1: comparazione dei risultati

Come prevedibile i modelli proposti hanno fornito risultati migliori del modello naive. Le reti MLP mostrano una varianza molto alta e se usassimo l'errore mediano (piuttosto che quello medio), che è meno sensibile agli outliers, otteniamo un MAE medio di 2.13 e 2.21 rispettivamente su T1 e T2 e un MSE di 7.27 e 8.25. Si noti che il MAE più piccolo di testing è per le reti MLP è 1.36 e 0.91 (T1 e T2) e l'MSE minore è di 2.99 e 1.78, errori molto vicini a quelli ottenuti con un ensemble. Possiamo osservare come le reti RBF portano ad un errore medio e deviazione standard più alte delle reti MLP e questa differenza si nota anche nei rispettivi ensemble. Il modello SARIMA, nonostante i suoi risultati medi siano leggermente peggiori degli ensemble, mostra un errore massimo di testing ottimo per T1 e molto vicino all'ottimo (ottenuto dalla rete RBF best-training) nel caso T2.

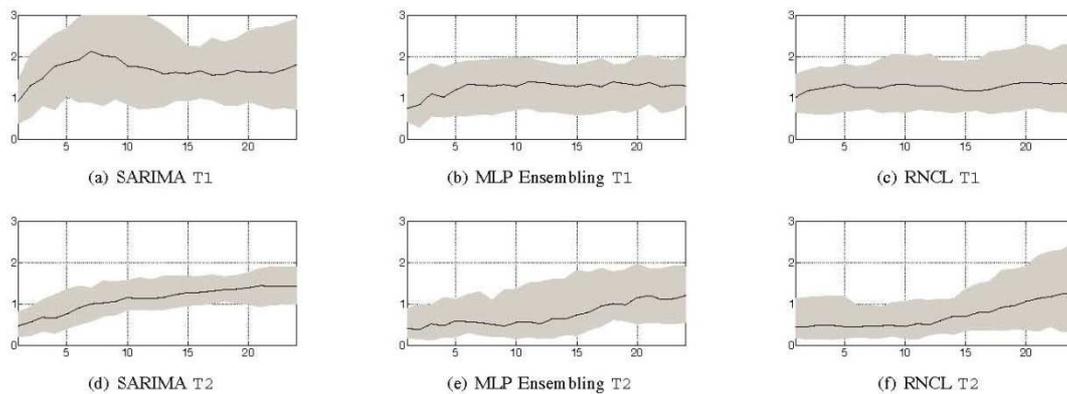


Figura 3.6: approccio uni variato: comparazione modelli

Come mostrato in Figura 3.6 i numeri presenti nella Tabella 3.1 non bastano a spiegare cosa accade nei singoli modelli. Nella figura sono presenti gli errori per ogni orizzonte di predizione e, importante, anche la loro varianza. In generale si osserva un errore crescente con l'orizzonte di predizione e l'insieme T1 sembra più difficile del T2, che però includendo un weekend porta ad un errore assoluto più basso.

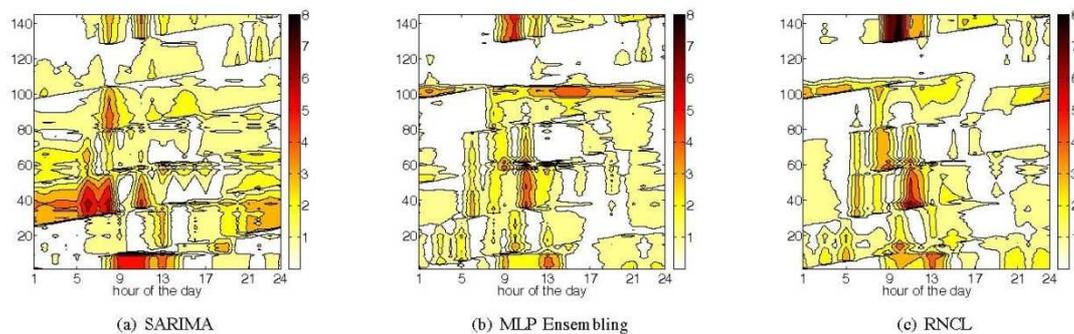


Figura 3.7: approccio uni variato : errori di assoluti (kWh) in funzione dell'orizzonte di predizione

Una visione d'insieme degli errori di previsione ottenuti dai vari modelli nella settimana di test è visibile in Figura 3.7. Ovviamente in alcune parti tutti i modelli

presentano una bassa accuratezza e gli errori sono più marcati all'inizio dell'orario lavorativo (8 AM) e durante la pausa pranzo (12-13).

### Previsione del Carico: approccio multivariato

In questa sezione osserviamo come l'inserimento dei dati aggiuntivi (come l'affluenza dell'edificio) influenza i vari modelli. Come discusso precedentemente l'utilizzo dei dati meteo non ha portato un miglioramento nella predizione e per questo motivo non sono stati considerati in questo lavoro. Sono stati considerati tre tipi diversi di dati esterni:

1. Informazioni sull'ora del giorno;
2. Flag per un giorno feriale o non lavorativo;
3. Numero di occupanti nell'edificio.

Il calcolo delle prime due variabili è semplice, mentre per la terza sarebbe stato necessario predire anch'essa nello stesso intervallo temporale della predizione del carico. In questo lavoro abbiamo assunto di poter conoscere in anticipo il valore di tutte le variabili esterne, in uno scenario più realistico avremmo dovuto predire i valori delle variabili esterne (non deterministiche, come il numero di occupanti) e usare tale predizione come ingresso nel modello della predizione del carico.

In questa sezione abbiamo usato le stesse condizioni di test del caso univariato.

Model	Training		Testing T1			Testing T2		
	MAE	MSE	MAE	MSE	Max	MAE	MSE	Max
Naive (no ext. data)	2.45	14.97	2.11	7.61	7.35	2.28	6.4	6.36
SARIMA	1.13	4.31	1.91	5.61	8.00	1.20	2.07	5.18
ANN MLP best training	0.36	0.70	3.51	20.28	18.00	2.20	11.83	24.53
Average ANN MLP	1.20 (0.31)	3.25 (1.52)	2.46 (0.83)	12.13 (16.80)	13.84 (16.62)	2.34 (1.00)	11.61 (10.61)	13.00 (6.01)
MLP Ensemble	0.74	1.47	1.42	3.30	7.98	<b>0.75</b>	<b>1.27</b>	4.79
ANN RBF best training	1.06	2.48	1.36	3.03	6.43	0.88	1.61	7.05
Average ANN RBF	1.65 (0.86)	7.71 (10.61)	1.97 (1.01)	7.99 (13.19)	8.22 (5.71)	1.77 (1.39)	8.98 (21.24)	10.74 (6.18)
RNCL	1.15	3.35	<b>1.33</b>	<b>2.71</b>	<b>5.37</b>	0.92	1.62	<b>4.52</b>

Tabella 3.2: comparazione modelli (multivariato)

Secondo quanto si osserva nella Tabella 3.2 tutti i modelli, escluso il SARIMA, migliorano i loro errori in almeno uno dei due insiemi di test. La parte T2 è quella dove la riduzione di errore dovuta all'ingresso dei nuovi dati è più evidente: l'ensemble di MLP riduce il suo MAE da 1.09 a 0.75 e arriva quasi a dimezzare il suo MSE (da 2.4 a 1.27) e risultati simili si ottengono per l'ensemble RNCL. Diversamente da quanto visto precedentemente l'ensemble MLP mostra un errore di testing più basso del migliore ottenuto dalle singole reti che lo compongono. In fatti la singola rete con il miglior errore ha un MAE di 1.37/0.98 ed un MSE di 3.25/2.48. Infine si

noti che anche il massimo errore assoluto è ridotto, per tutti i modelli a parte SARIMA, rispetto a quelli presentati in Tabella 3.1.

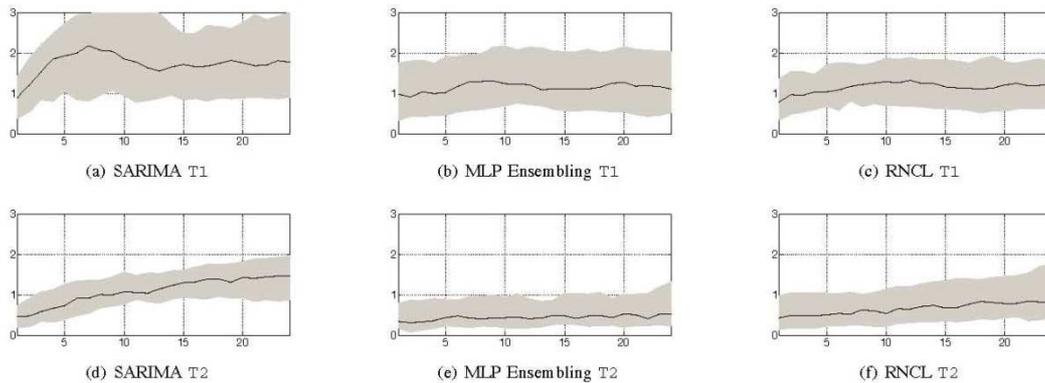


Figura 3.8: errore di predizione a 24h con dati esterni

L'errore medio per la predizione a 24 ore è mostrato in Figura 3.8 e rispetto a quello mostrato in Figura 3.6 l'introduzione dei dati aggiuntivi sembra aver ridotto la varianza (l'area grigia) dei modelli a rete neurale.

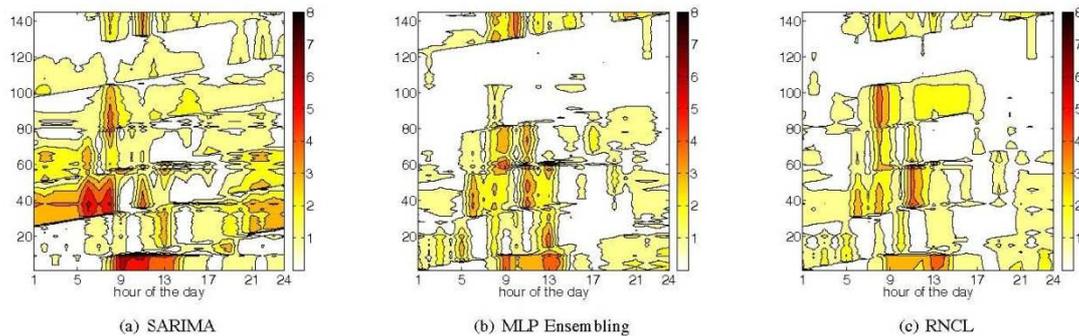
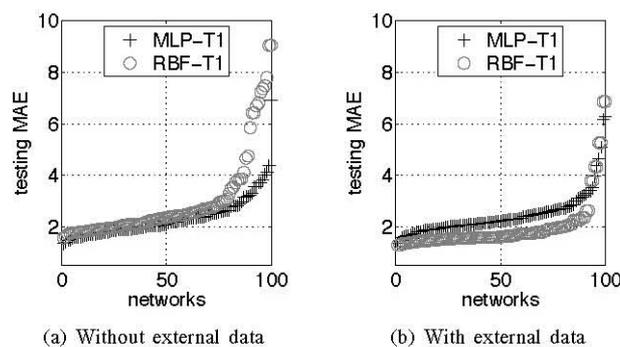


Figura 3.9: errore assoluti di predizione con dati esterni

Altre informazioni sono disponibili in Figura 3.9, che confrontandola con la Figura 3.7, evidenzia le aree del dataset che hanno migliorato il loro errore con l'aggiunta dei nuovi ingressi.



(a) Without external data

(b) With external data

Figura 3.10: comparazione MAE tra reti neurali MLP e RBF

## Discussione

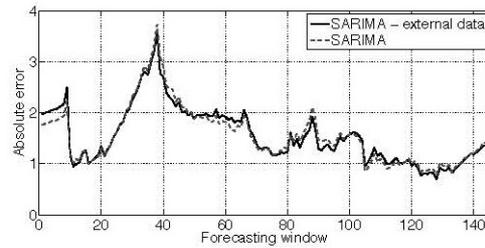
Nelle Figure 3.10(a) e 3.10(b) sono mostrati gli errori assoluti di testing, in ordine crescente, per tutte le reti MLP e RBF sull'insieme T1. Si può osservare come dopo l'introduzione degli input aggiuntivi, le reti RBF addestrate con RNCL danno una predizione migliore delle reti MLP, come anche sottolineato in Tabella 3.1 e 3.2.

Osservando i risultati numerici è chiaro come gli ensemble di reti neurali offrano un errore minore (o al massimo uguale) a quello della miglior rete addestrata, sia per le MLP che per le reti RBF.

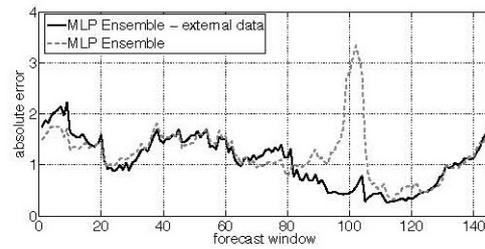
Questo significa che l'ensemble permette di sfruttare l'informazione 'contenuta' in tutte le singole reti che lo compongono, superando i problemi più comuni di tali modelli: l'overfitting e la tendenza a rimanere intrappolate in minimi locali.

In generale l'informazione fornita dagli input aggiuntivi sembra aiutare i modelli non lineari nella predizione, in Figura 3.11 è evidente come le nuove informazioni aiutino a migliorare il segnale predetto, si noti ad esempio come il picco presente intorno l'istante 100 scompaia nelle predizioni delle reti neurali, a differenza del modello SARIMA che non migliora la sua efficacia con i nuovi ingressi.

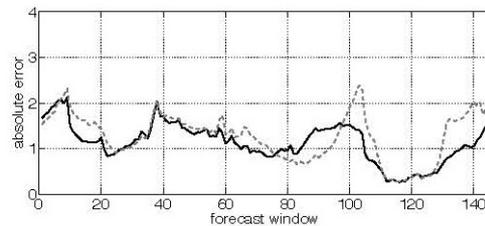
Concludendo possiamo dire che gli ensemble, in questo caso studio qui analizzato, sembrano rendere le reti neurali uno strumento più adatto in ambito ingegneristico, riducendo la loro varianza e quindi rendendo i loro risultati più affidabili. L'ensemble RNCL, e più in generale le reti RBF, hanno mostrato di saper sfruttare maggiormente l'aggiunta dei dati esterni, un fenomeno che merita certamente una maggiore analisi.



(a) SARIMA



(b) MLP Ensembling



(c) RNCL

Figura 3.11: comparazione risultati di previsione 24h senza dati esterni

### 3.2 Conclusioni

In questo capitolo è stato illustrato il processo che ha portato alla scelta della migliore metodologia per la previsione della evoluzione dell'edificio a breve termine, informazione fondamentale per identificare la strategia di gestione ottimale dell'edificio e trasformarlo in uno "smart building".

Con il termine metodologia ci si riferisce alla scelta delle variabili in input al modello ed alla scelta dei migliori archi temporali sia per gli input che per la previsione, alla metodologia di addestramento, alla topologia delle reti, alla quantificazione degli errori commessi. Tale selezione è stata condotta per via sperimentale su dati relativi ad un edificio reale. La metodologia scelta è del tipo "neural ensemble", un metodo molto recente ed innovativo che sta avendo ampio successo a livello internazionale, su cui ENEA ha sviluppato una serie di lavori di ricerca e sviluppo. Con tale metodo si è potuto arrivare a stime sul carico orario con errori medi assoluti che si avvicinano ad 1 Kw su un consumo massimo di 35 kw. Si ritiene quindi di aver raggiunto un livello predittivo ragionevolmente idoneo per gli scopi e gli obiettivi del presente studio.

## Bibliografia

- [1] [Online]. Available: <http://www.addressfp7.org/>
- [2] Z. A. Vale, H. Morais, H. Khodr, B. Canizes, and J. Soares, "Technical and economic resources management in smart grids using heuristic optimization methods," jul. 2010, pp. 1–7.
- [3] P. J. Brockwell and R. A. Davis, *Introduction to Time Series and Forecasting*. Springer, March 2002.
- [4] E. A. Feinberg and D. Genethliou, "Load forecasting," in *Applied Mathematics for Restructured Electric Power Systems: Optimization, Control and, Computational Intelligence*, J. Chow, F. Wu, and J. Momoh, Eds. Springer, 2005, pp. 269–285.
- [5] H. Hippert, C. Pedreira, and R. Souza, "Neural networks for short-term load forecasting: a review and evaluation," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 16, no. 1, pp. 44–55, feb. 2001.
- [6] L. Hansen and P. Salamon, "Neural network ensembles," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 12, no. 10, pp. 993–1001, oct. 1990.
- [7] G. E. P. Box and G. M. Jenkins, *Time series analysis; forecasting and control*. Holden-Day San Francisco, 1970.
- [8] R. J. Hyndman and Y. Khandakar, "Automatic time series forecasting: the forecast package for r," Monash University, Department of Econometrics and Business Statistics, Monash Econometrics and Business Statistics Working Papers 6/07, Jun. 2007. [Online]. Available: <http://ideas.repec.org/p/msh/ebswps/2007-6.html>
- [9] R Development Core Team, *R: A Language and Environment for Statistical Computing*, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2010, ISBN 3-900051-07-0. [Online]. Available: <http://www.R-project.org/>
- [10] M. Cho, J. Hwang, and C. Chen, "Customer short term load forecasting by using arima transfer function model," vol. 1, nov. 1995, pp. 317–322.
- [11] J. Fan and J. McDonald, "A real-time implementation of short-term load forecasting for distribution power systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 9, no. 2, pp. 988–994, may 1994.
- [12] M. T. Hagan and S. M. Behr, "The time series approach to short term load forecasting," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 2, no. 3, pp. 785–791, aug. 1987.
- [13] I. Kaastra and M. Boyd, "Designing a neural network for forecasting financial and economic time series," *Neurocomputing*, vol. 10, no. 3, pp. 215 – 236, 1996, financial Applications, Part II.

- [14] G. Zhang, B. E. Patuwo, and M. Y. Hu, "Forecasting with artificial neural networks:: The state of the art," *International Journal of Forecasting*, vol. 14, no. 1, pp. 35–62, 1998.
- [15] H. Chen and X. Yao, "Regularized negative correlation learning for neural network ensembles," *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 20, no. 12, pp. 1962–1979, 2009.
- [16] Y. Liu and X. Yao, "Ensemble learning via negative correlation," *Neural Networks*, vol. 12, no. 10, pp. 1399–1404, 1999.
- [17] J. Kreider and J. Haberl, "Predicting hourly building energy usage," *ASHRAE Journal*, vol. 36, no. 6, 1994.

#### 4. PROGETTO E REALIZZAZIONE DI UN EDIFICIO SPERIMENTALE PER LA QUALIFICAZIONE DELLE STRATEGIE DI OTTIMIZZAZIONE DELLA GESTIONE

Per qualificare i modelli sviluppati (vedi cap. 3) è stato necessario utilizzare un database orario dei consumi di un edificio. Tali dati hanno permesso di qualificare i predittori neurali sviluppati, ma nella continuazione delle attività sarà necessario qualificare sperimentalmente sia le strategie di diagnostiche che le logiche di ottimizzazione sviluppate in questo progetto. Si avrà necessità quindi di una sensoristica molto più approfondita di quella attualmente disponibile sull'edificio C59 ed in particolare l'utilizzo di altri sensori (per la misura di presenza, dei consumi termici, dei consumi energetici per piano, delle variabili climatiche esterne ed in alcune stanze di riferimento); di sistemi di controllo ed attuazione con la possibilità di disalimentare l'intero edificio (escluse le utenze elettriche e le emergenze) o singoli piani o automazione di stanza; di remotizzare l'informazione in tempo reale presso una sala controllo.

Per questo motivo è stato sviluppato il progetto e successivamente realizzato un edificio sperimentale presso il CRE Casaccia (edificio F40) realizzato appunto per qualificare tutta la modellistica finora sviluppata. Il progetto dell'edificio ha richiesto uno studio approfondito per identificare le informazioni necessarie che permettano di ottenere strategie di diagnosi e di controllo efficaci, definire la sensoristica, determinare i costi che occorre affrontare in relazione alla vetustà e ai vincoli dell'immobile e quantificare il risparmio energetico/ambientale ottenibile dall'impiego di differenti strategie.

La logica seguita per la elaborazione del progetto dell'edificio sperimentale non è stata quella di realizzare un "dimostrativo di smart building" ma piuttosto quella di elaborare un "edificio sperimentale" in cui sia possibile sperimentare mettere è stata quella di elaborare delle "configurazioni teoriche di strategie di controllo". Per ognuna di queste strategie corrisponde:

- uno specifico set di strumentazione (sensori, attuatori, sistemi di trasmissione dati). Nel seguito indicato come "kit strumentale di controllo".
- una specifica prestazione in termini di consumo energetico e comfort
- uno specifico costo

L'obiettivo dello "smart building sperimentale" è quello di identificare la "strategia di controllo" che massimizza l'efficienza energetica ed il comfort, minimizza il tempo di ritorno dell'investimento e massimizza il VAN. Per arrivare a tali risultati occorre quindi costruire un edificio con controllo "ridondante" che possa permettere di impostare le varie configurazioni di controllo e qualificarne i risultati sulla base di un set di misure di riferimento.

L'obiettivo è quello di trovare la migliore soluzione per l'applicazione su vasta scala su grandi patrimoni immobiliari del settore terziario (es: banche, poste, scuole,

complessi direzionali, logistica, caserme, complessi universitari, poli tecnologici, ecc...).

Nello specifico questo studio si è concluso con un progetto funzionale e successivamente ordine verso una azienda che ha fornito il progetto esecutivo, le attrezzature, la installazione ed il collaudo della stessa.

#### **4.1 Sviluppo del progetto per l'edificio sperimentale**

La metodologia impiegata al fine di raggiungere l'obiettivo finale è stata la seguente:

- individuare le variabili necessarie a monitorare l'interno di un edificio appartenente al settore terziario ad uso di ufficio;
- individuare i sensori necessari al monitoraggio delle variabili scelte e comprendere le criticità connesse all'impiego di tali tecnologie;
- descrivere le logiche di attuazione e controllo, tradizionali e avanzate, applicabili all'interno dello stabile in base alla tipologia di dispositivi installati;
- individuare un edificio all'interno del complesso ENEA Casaccia che ben rappresentasse un immobile ad uso d'ufficio (F40);
- descrivere le caratteristiche dell'edificio scelto;
- progettare per l'edificio individuato un sistema di sensori e di attuatori molto spinto che permetta di studiare contemporaneamente possibili soluzioni di monitoraggio e controllo;
- sulla base del sistema così costituito, individuare differenti pacchetti con diverso livello di controllo (edificio, piano, stanza), descriverli, valutare per ognuno di essi il costo d'installazione;
- effettuare delle simulazioni delle strategie di controllo in relazione alle tre soluzioni definite e stimare i relativi risparmi energetici conseguibili;
- effettuare il confronto tra i diversi pacchetti per mezzo di una analisi tecnico - economica sui costi/benefici ;
- definire un'ipotesi di scelta ottimale.

Il primo passo è consistito nell'individuare le variabili che è necessario tenere in considerazione all'interno di un edificio ad uso di ufficio e i sensori che è possibile impiegare per monitorarle.

Le variabili da scegliere devono rientrare nei seguenti raggruppamenti:

- clima esterno;
- clima interno;
- consumi di energia termica e frigorifera per la climatizzazione invernale ed estiva;
- consumi elettrici;
- attività nell'edificio.

Di seguito si riportano sinteticamente i risultati di questo studio.

### **Dati climatici esterni**

Variabile: temperatura dell'aria, umidità relativa, irraggiamento solare sul piano orizzontale, illuminamento sul piano orizzontale, velocità del vento.

Obiettivo: monitorare le variabili climatiche esterne all'edificio.

Finalità: registrazione delle variabili climatiche esterne al fine di ottenere informazioni utili al risparmio energetico dei sistemi di climatizzazione, illuminazione e riscaldamento.

### **Dati climatici interni**

Variabile: temperatura dell'aria, umidità relativa dell'aria, concentrazione di CO<sub>2</sub>, illuminamento.

Obiettivo: monitorare le variazioni delle variabili climatiche indoor influenzanti il comfort termo igrometrico e la qualità dell'aria attraverso un indicatore indiretto (CO<sub>2</sub>).

Finalità: verificare il soddisfacimento delle condizioni di comfort termo - igrometrico di qualità dell'aria all'interno dell'intero edificio/piano/zona e relazionarle con i corrispondenti consumi energetici per la climatizzazione.

### **Consumi termici**

Variabile: energia termica e frigorifera.

Obiettivo: monitorare i consumi termici e frigoriferi per l'intero edificio all'interno della centrale termica e frigorifera.

Finalità: la disponibilità di dati sui consumi termici permette, insieme con l'analisi dei consumi elettrici, di effettuare una completa e efficace operazione di diagnosi energetica dell'edificio, con la conseguente individuazione di criticità del sistema.

### **Consumi elettrici**

Variabile: energia elettrica

Obiettivo: monitorare i consumi elettrici in base alle differenti utenze/usi: illuminazione, illuminazione sicurezza, forza motrice, ascensori, utenze di tipo termico che necessitano di energia elettrica (pompe di calore, fan coil);

Finalità: La disponibilità di dati sui consumi elettrici suddivisa per destinazione d'uso permette di effettuare una efficace operazione di diagnosi e quindi l'individuazione di criticità energetiche dell'edificio (es. gestione energetica non ottimale, comportamento inefficiente degli utenti).

### **Presenza utenti**

Variabile: presenza delle persone

Obiettivo: individuazione del numero di persone all'interno dell'edificio e dei locali.

Finalità: monitorare la presenza di persone all'interno dell'edificio e dei locali per attuare delle politiche di gestione intelligente per l'impianto di riscaldamento/climatizzazione e illuminazione.

A valle di queste scelte sono stati esaminati i sensori più idonei. Di seguito i risultati di questo studio.

### **Dati climatici esterni**

Sensore: centralina di rilevazione atmosferica

Possibili criticità: posizionamento della centralina in un luogo ottimale, necessità di alimentazione elettrica della centralina climatica.

### **Dati climatici interni**

Sensore: Termocoppia o Termoresistenza, Psicometro, sensore rilevazione livelli di CO<sub>2</sub>

Possibili criticità: definizione appropriata del piano di monitoraggio delle variabili indoor; il numero di sensori per la misura delle variabili climatiche deve essere appropriato alle caratteristiche della zona che si intende monitorare, in modo da ottenere dati significativi per le zone esaminate attraverso sensori posti in selezionati ambienti campione; necessità di una procedura per individuare i locali di riferimento o pilota.

### **Consumi termici**

Sensore: per l'energia utile a valle del generatore di calore e del gruppo frigorifero, misuratore di portata e due sensori di temperatura (tipicamente ad immersione); a monte del generatore di calore, lettura del contatore di combustibile; a monte del gruppo frigorifero, multimetro misuratore di energia elettrica assorbita dagli elementi presenti in centrale termica: pompe di distribuzione, gruppo frigorifero, ventilatori, etc.

Possibili criticità: una prima criticità si incontra nel dover schematizzare l'impianto, in secondo luogo bisognerà distinguere i consumi termici per quanto riguarda il periodo invernale ed estivo.

Per quanto concerne il riscaldamento vi saranno delle difficoltà nell'individuare la posizione per l'inserimento degli elementi di misura; possono infatti non essere presenti pozzetti per il posizionamento delle sonde o sezioni predisposte per l'utilizzo di misuratori di portata.

Per la climatizzazione estiva e quindi la lettura del consumo di energia elettrica dei compressori, si potrebbe presentare l'impossibilità di inserire un elemento di misura nel quadro in centrale termica.

### **Consumi elettrici**

Sensore: multimetri digitali e contatori di energia con interfaccia multifunzione.

Possibili criticità: reperimento dello schema elettrico completo con l'esatta e aggiornata suddivisione e posizionamento delle utenze.

### **Presenza utenti**

Possibili criticità: difficoltà di posizionamento dei sensori all'interno del singolo locale

Sensore: sensore di presenza

## 4.2 Analisi delle possibili strategie di diagnostica e controllo dell'edificio

Finalità di questa analisi è stata l'individuazione di un kit, costituito da sensori, sistema di trasmissione dati, server e control room, per il monitoraggio, la diagnostica e il controllo remoto da fornire al singolo edificio. Tale kit ha l'obiettivo di garantire il miglior rapporto costi-benefici.

Sono stati individuati tre differenti pacchetti atti a tale finalità; tali pacchetti si distinguono per il livello di monitoraggio e le logiche di controllo impiegate. Per i singoli pacchetti si è effettuata una analisi tecnico-economica su un'applicazione reale ad un edificio.

### 4.2.1 L'edificio F40 del C.R. ENEA Casaccia

Come precedentemente accennato è stato selezionato un edificio presso il Centro di Ricerca ENEA Casaccia (F40). È stato scelto tale immobile perché ben rappresenta un edificio tipo del settore terziario adibito ad uso di ufficio degli anni '80 sia dal punto di vista delle caratteristiche dell'involucro sia per le caratteristiche dell'impianto di climatizzazione e della suddivisione dell'impianto elettrico.

Su tale edificio è stato sviluppato un progetto che mira a definire:

- La sensoristica da installare;
- Il sistema di controllo ed attuazione;
- Il sistema di remotizzazione e raccolta dati e gestione da control room.

#### Caratteristiche

L'edificio prescelto si suddivide in due aree: Palazzina Uffici e Zona Hall Tecnologica. Lo studio e la sperimentazione sono stati effettuati nella Palazzina Uffici, che si articola su 3 piani con una superficie utile di 5700 mq. All'interno sono presenti i seguenti locali: n. 50 stanze e n. 9 servizi. L'edificio è considerato di classe energetica G con un consumo di 200 kWh/m<sup>2</sup> anno.

#### Impianto di climatizzazione

Al piano interrato è presente un locale adibito a centrale termica.

L'edificio è collegato, come gli altri 188 edifici presenti in Casaccia, ad un sistema di teleriscaldamento; è presente in centrale uno scambiatore di calore vapore-acqua, nel quale in fluido termovettore riscalda l'acqua dell'impianto di riscaldamento dell'intero edificio. Il circuito secondario distribuisce l'acqua calda a:

- rete di alimentazione degli elementi radianti (Fan Coil)
- UTA (Unità Trattamento Aria)

La climatizzazione estiva è garantita attraverso l'impiego di un gruppo frigo che distribuisce l'acqua refrigerata ai fan coil e all'UTA. I fan coil sono dotati di due batterie di scambio termico aria/acqua (calda e fredda), un ventilatore, un filtro dell'aria, una vaschetta per la raccolta della condensa. Gli stessi presentano i collegamenti con le reti dell'acqua calda e refrigerata e hanno lo scopo di scaldare o

raffreddare l'aria dell'ambiente, mentre l'UTA controlla l'umidità e il ricambio dell'aria. Il sistema di climatizzazione è controllato tramite un orologio manuale – settimanale (6.00-18.00), che dopo l'analisi dei consumi si è individuato non controllare l'abilitazione e disabilitazione delle pompe di distribuzione, mentre l'impiego di termostati pneumatici per singolo ambiente era predisposto, ma che per motivi di mancata manutenzione sono stati disattivati.

#### **4.2.2 Sviluppo di configurazioni di controllo dell'edificio**

Di seguito sono descritte tre configurazioni di controllo (a complessità progressiva):

- Il primo monitoraggio-controllo sull'intero edificio;
- il secondo più spinto a livello di piano;
- il terzo, il più avanzato, che va ad agire fino sul singolo locale.

Tali configurazioni successivamente sono stati messi a confronto attraverso una analisi tecnico – economica, individuandone il costo di investimento e i risparmi conseguibili dal loro utilizzo.

#### **SOLUZIONE A- livello edificio**

La prima soluzione prevede il monitoraggio, la diagnostica e il controllo su intero edificio, con la capacità di eseguire le seguenti azioni:

- monitoraggio dei consumi elettrici (Forza Motrice, Luce, FAN COIL) a livello di intero edificio;
- monitoraggio dei consumi termici a livello di intero edificio;
- capacità di abilitare/disabilitare i sistemi di riscaldamento/climatizzazione estiva tramite attuatori (timer giornalieri);
- capacità di abilitare/disabilitare i servizi luce e fan coil tramite attuatori (timer giornalieri);
- acquisizione dati su consumi e accessi (sistema badge-tornelli ingresso Casaccia) da remoto tramite interfaccia software.

Tramite l'architettura del sistema così predisposta è possibile:

- conoscere consumi elettrici intero edificio;
- conoscere consumi termici;
- controllare l'abilitazione/disabilitazione di riscaldamento/ condizionamento con timer giornalieri;
- controllare l'abilitazione /disabilitazione dell'alimentazione motorini fan coil tramite timer giornalieri;
- controllare l'abilitazione /disabilitazione luce generale tramite timer giornalieri.

Il sistema offre la semplice possibilità di effettuare una diagnostica complessiva dell'edificio.

## **SOLUZIONE B- livello piano**

Questa seconda soluzione prevede il monitoraggio, la diagnostica e il controllo a livello di piano con le seguenti finalità:

- monitoraggio dei consumi elettrici (FORZA MOTRICE, LUCE, FAN COIL) a livello di piano;
- monitoraggio dei consumi termici a livello di intero edificio;
- monitoraggio presenza di utenti nei luoghi comuni per mezzo di sensori di presenza con la possibilità di disabilitare luce;
- capacità di abilitare/disabilitare i sistemi di riscaldamento/climatizzazione estiva tramite attuatori (timer giornalieri);
- capacità di abilitare/disabilitare i servizi luce e fan coil tramite attuatori (timer giornalieri);
- capacità di abilitare/disabilitare i servizi luce e fan coil a livello di piano in base all'effettivo ingresso/uscita del personale;
- acquisizione dati in tempo reale su consumi - accessi - attivazione sensori di presenza da remoto tramite interfaccia software;
- possibilità da remoto di agire sugli attuatori.

Tramite l'architettura del sistema così predisposta è possibile:

- conoscere consumi elettrici a livello di singolo piano;
- conoscere consumi termici dell'intero edificio;
- controllare l'abilitazione /disabilitazione di riscaldamento/condizionamento con timer giornalieri e associando il controllo alla presenza effettiva degli utenti la possibilità di disabilitare l'impianto prima dell'azione prevista dal timer (fine giornata);
- controllare l'abilitazione /disabilitazione dell'alimentazione motorini fan coil con timer giornalieri e associando il controllo alla presenza effettiva degli utenti la possibilità di disabilitare l'impianto prima dell'azione prevista dal timer (fine giornata);
- controllare l'abilitazione /disabilitazione luce zone uffici e laboratori tramite timer giornalieri e associando il controllo alla presenza effettiva degli utenti la possibilità di disabilitare l'impianto prima dell'azione prevista dal timer (fine giornata);
- controllare l'illuminazione dei luoghi comuni (atri e corridoi) attraverso l'impiego di sensori di presenza (logiche di attuazione I2).

Il sistema offre la semplice possibilità di effettuare una diagnostica complessiva dell'edificio e a livello di piano per i consumi elettrici.

## **SOLUZIONE C - livello stanza**

La terza soluzione, la più avanzata, permette il monitoraggio, la diagnostica e il controllo fino a livello di singolo locale, con la capacità di eseguire le seguenti azioni:

- monitoraggio dei consumi elettrici (FORZA MOTRICE, LUCE, FAN COIL) a livello di piano;
- monitoraggio dei consumi termici a livello di intero edificio;
- monitoraggio presenza di utenti nei luoghi comuni per mezzo di sensori di presenza con la possibilità di disabilitare luce;
- monitoraggio presenza di utenti nei singoli locali per mezzo di sensori di presenza con la possibilità di disabilitare luce e alimentazione motori fan coil;
- capacità di abilitare/disabilitare i sistemi di riscaldamento/climatizzazione estiva tramite attuatori (timer giornalieri);
- acquisizione dati su consumi - accessi – attivazione dei sensori di presenza da remoto tramite interfaccia software;
- possibilità da remoto di agire sugli attuatori.

Tramite l'architettura del sistema così predisposta è possibile:

- conoscere consumi elettrici a livello di singolo piano;
- conoscere consumi termici dell'intero edificio;
- controllare l'abilitazione /disabilitazione di riscaldamento/condizionamento con timer giornalieri e associando il controllo alla presenza effettiva degli utenti la possibilità di disabilitare l'impianto prima dell'azione prevista dal timer (fine giornata);
- controllare l'abilitazione /disabilitazione dell'alimentazione motorini fan coil con timer giornalieri e associando il controllo alla presenza effettiva degli utenti la possibilità di disabilitare l'impianto prima dell'azione prevista dal timer (fine giornata);
- controllare l'abilitazione /disabilitazione di luce e alimentazione dei motorini fan coil in tutti i locali (uffici e laboratori) tramite l'utilizzo di sensori di presenza (logiche di attuazione I1 e I3);
- controllare l'illuminazione dei luoghi comuni (atri e corridoi) attraverso l'impiego di sensori di presenza (logiche di attuazione I2).

Il sistema offre la semplice possibilità di effettuare una diagnostica complessiva dell'edificio e a livello di piano per i consumi elettrici.

### 4.3 Un esempio della importanza della diagnostica sull'edificio F40

In base ad un precedente monitoraggio si sono potuti analizzare i dati relativi ai consumi dell'edificio F40. Tale monitoraggio consisteva nella lettura della potenza elettrica istantanea assorbita, campionata ogni 5 min, a livello di quadro generale, del carico totale e dell'illuminazione. Inoltre sono stati acquisiti i dati sulla potenza elettrica assorbita dalle utenze poste all'interno della centrale termica per la climatizzazione (pompe, compressori, etc).

Avere a disposizione un database di un monitoraggio durato un anno ha permesso di individuare alcune criticità e mal funzionamenti dell'intero edificio. Elaborando tali dati si è potuto calcolare il consumo elettrico reale dell'edificio. Dall'analisi dei dati sui consumi elettrici in centrale termica è stato possibile verificare ciò che gli operatori, che eseguono la manodopera nell'edificio, segnalavano. Il sistema di controllo del condizionamento, infatti, basato su orologio settimanale per l'attivazione/disattivazione delle pompe di distribuzione dell'acqua calda e fredda, è risultato guasto. L'edificio F40, come già segnalato nella descrizione dello stabile, è un edificio edificato negli anni '80, ha quindi alle spalle 30 anni di attività. Si vuole sottolineare che l'edificio appartiene alla classe energetica più bassa e il sistema richiederebbe una efficace manutenzione ordinaria, per individuare per tempo guasti e malfunzionamenti. Ad oggi la manutenzione nel presente edificio è semplicemente su segnalazione degli utenti all'interno dello stabile al servizio di manutenzione: un sistema estremamente inefficiente.

Si riportano in tabella 4.1 i consumi elettrici annuali per l'illuminazione e per la climatizzazione (centrale termica); quest'ultimi suddivisi in riscaldamento invernale e condizionamento estivo.

	Illuminazione	Climatizzazione	
		Riscaldamento inv.	Condizionamento est.
Tempo di funz. [gg]	365	151	122
Consumo elettrico [kWh/anno]	74995	22.524	115626
Consumo termico [kWh <sub>t</sub> /anno] → (kWh <sub>ele</sub> ) <sup>6</sup>		521.428,57 (239.857)	

Tabella 4.1: consumi F40

<sup>6</sup> Per la conversione da kWh termici a kWh elettrici si è tenuto conto del fattore 0,46, considerato che l'Autorità per l'Energia elettrica e il gas fissa il nuovo valore di conversione dei kWh in tep è fissato pari a  $0,187 \times 10^{-3}$  tep/kWh e 1 tep è uguale a 11628 kWh per quanto riguarda i combustibili

Le impostazioni sullo strumento erano settate per attivare le pompe di distribuzione acqua (funz. invernale) e le pompe di distribuzione acqua e i compressori per la macchina frigorifera (funz. estivo) durante il giorno lavorativo dalle 6.00 alle 18.00 e disattivare durante il periodo notturno dalle 18.00 e 6.00 e i giorni festivi (sabato domenica).

Per un più corretto calcolo dei risparmi energetici si è modificato opportunamente il diagramma di carico di potenza assorbita per il riscaldamento (Figura 4.1), ipotizzando l'impiego di un orologio settimanale (attivo sistema giorno ferialle 6.00-18.00; disattivo 18.00-6.00 e festivi). Per il calcolo dei consumi termici dell'edificio si è considerato il prodotto tra EPgl pari a 200 kWh termici/m<sup>2</sup> anno (CLASSE G) e la superficie pari 3650 m<sup>2</sup>.

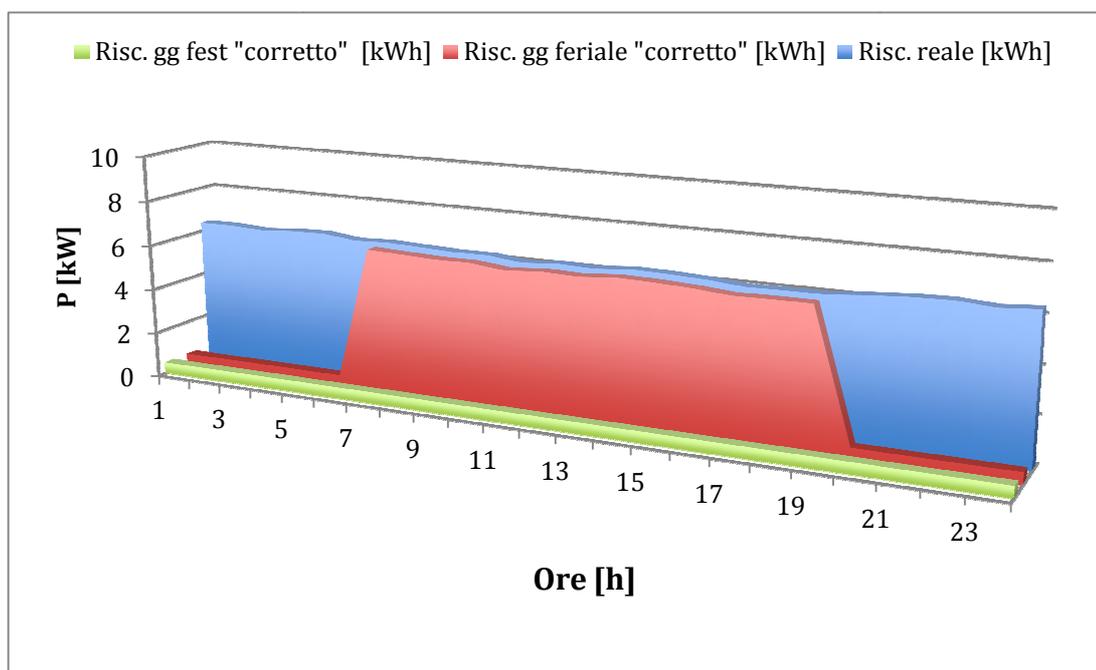


Figura 4.1: diagramma giornaliero della potenza assorbita per il riscaldamento invernale

Anche il diagramma giornaliero della potenza assorbita durante il condizionamento estivo è stato opportunamente modificato (Figura 4.2).

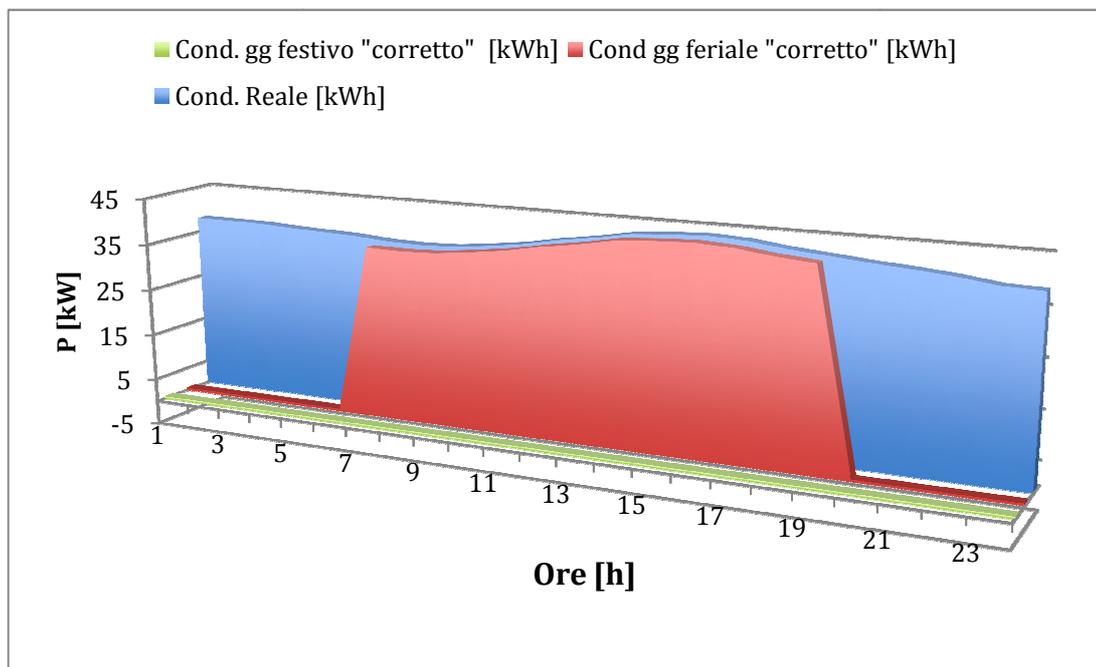


Figura 4.2: diagramma giornaliero della potenza assorbita per il condizionamento estivo

I risparmi energetici conseguiti tramite l'opportuno impiego di un timer per il controllo delle utenze elettriche in centrale termica sono riportati nella Tabella 4.2.

	<i>Riscaldamento invernale</i>	<i>Condizionamento estivo</i>
Tempo di funz. effettivo [gg]	110	84
Periodo festivo [gg]	41	38
Risparmio energetico [kWh/anno]	12.970	70.740
%	57,6	61,2

Tabella 4.2: riscaldamento invernale e condizionamento estivo

Dopo aver corretto adeguatamente i diagrammi orari di riscaldamento invernale e condizionamento estivo si vanno ora ad analizzare i possibili risparmi energetici conseguibili a seguito dell'applicazione delle tre soluzioni (A, B e C) precedentemente descritte.

## 4.4 Risparmi energetici

Le analisi che seguono derivano dalla applicazione delle varie logiche di controllo ai dati di consumo elettrico e di affluenza rilevati sull'edificio C59 simulando ora per ora gli interventi e facendo delle ipotesi quando i dati specifici non erano disponibili. Non è stato invece possibile effettuare la stessa simulazione sui consumi termici.

### 4.4.1 Soluzione A – Livello edificio

I risparmi conseguibili dall'utilizzo di tale pacchetto sono relativi alla sola illuminazione: tale servizio è disattivato/abilitato tramite timer programmato con orario 6.00-19.00 durante i giorni lavorativi, garantendo quindi la disattivazione del servizio luce durante i giorni festivi. Il carico di base presente sia durante la notte, sia durante i giorni festivi corrisponde all'illuminazione d'emergenza che deve essere assicurata per motivi di sicurezza. Il numero di giorni lavorativi considerati sono pari a 235, mentre per i giorni festivi si sono considerati pari a 130 (sabato, domenica e festività): tale ipotesi è rimasta invariata per ogni pacchetto. I diagrammi di carico giornaliero (feriale e festivo) risultano modificati, come in figura 4.3 e 4.4.

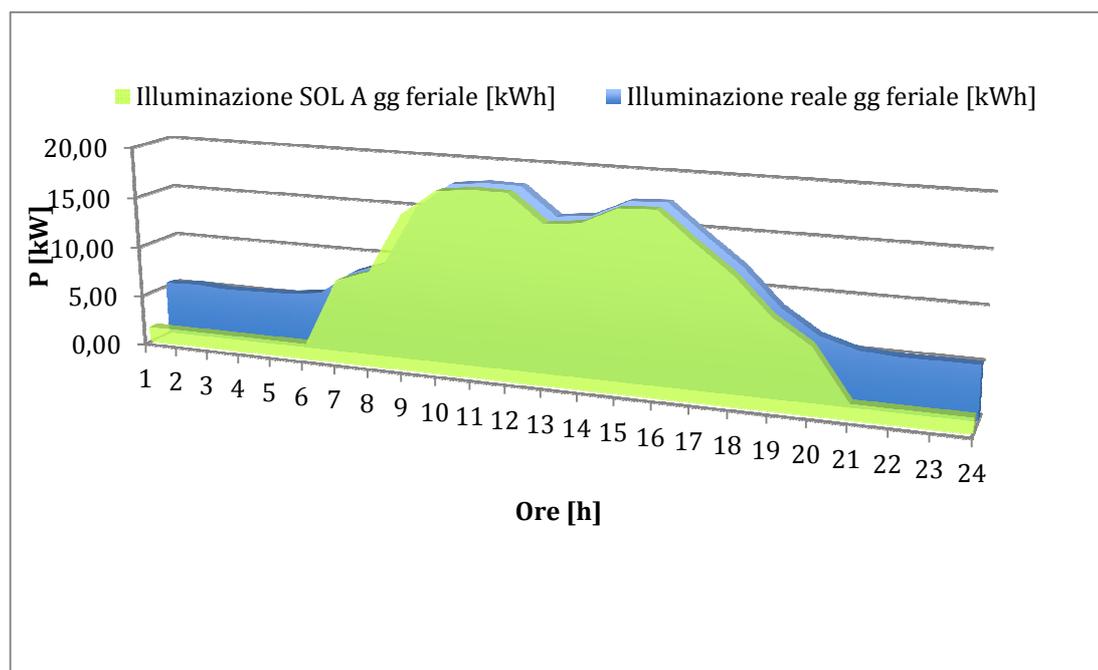


Figura 4.3: diagramma luce giorno feriale Soluzione A

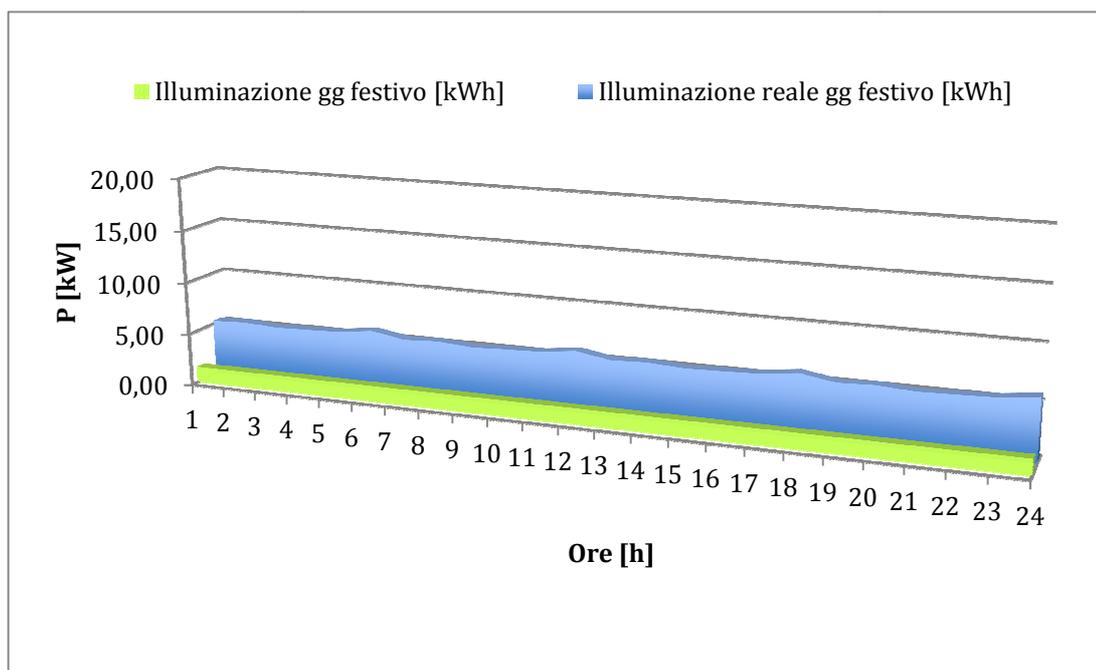


Figura 4.4: diagramma luce giorni festivi

I risparmi derivanti dall'applicazione della soluzione A sono riportati in tabella:

SOL. A	Consumo reale [kWh/anno]	Consumo SOL A [kWh/anno]	Risparmi energetici [kWh/anno]	%
Illuminazione	74995,28	53825,62	21169,66	28,23
Riscaldamento	9935,71	9935,71	0,00	0,00
Condizionamento	44883,74	44883,74	0,00	0,00
Consumi termici (*)	239.857	239.857	0,00	0,00
Tot	369672	348502	21169,66	5,7

Tabella 4.3: soluzione A

Il 28,23% rappresenta il risparmio percentuale ottenuto dall'impiego dei timer giornalieri applicati sul servizio di illuminazione, che attua uno spegnimento della luce generale a fine giornata.

La maggiore quota di risparmio di questo 28,23% è riconducibile ai giorni festivi, tramite il sistema di controllo predisposto si diminuisce notevolmente l'assorbimento di energia elettrica: da un consumo per giorno festivo misurato di 130 kWh si passa ad un consumo di soli 36 kWh.

Il risparmio sui consumi totali considerati è esiguo, una quota del 5,7 % in quanto si agisce solo sul servizio di illuminazione.

Nel calcolo di questa percentuale si è tenuto conto anche dei consumi termici annuali dell'edificio applicando un fattore di conversione opportuno per riportare i consumi termici espressi in kWh<sub>termici</sub> in consumi elettrici.

#### 4.4.2 Soluzione B – Livello di piano

In questo pacchetto sono presenti, oltre ai timer per la disabilitazione del servizio luce durante i giorni festivi e durante i giorni lavorativi con programma 18.00-6.00, i sensori di presenza disposti nei luoghi comuni. Tali dispositivi permettono di costruire un nuovo diagramma giornaliero luce (figura 4.5) secondo le seguenti ipotesi:

- durante l'orario 6.00-16.00 le luci nei luoghi comuni saranno accese per l'80% del tempo;
- mentre durante il periodo 16.00-19.00 le luci rimarranno accese solo il 60%.

La presenza ulteriore di un sistema di controllo della affluenza al piano permetterebbe inoltre di disabilitare il servizio luce generale prima del timer, tale eventualità si può verificare nel momento in cui il piano risulti vuoto. Tale condizione si è ipotizzata verificarsi il 9% sul totale dei giorni lavorativi (circa una volta ogni due settimane). Si tratta di una ipotesi molto conservativa ed i risultati potrebbero essere più significativi nei casi reali.

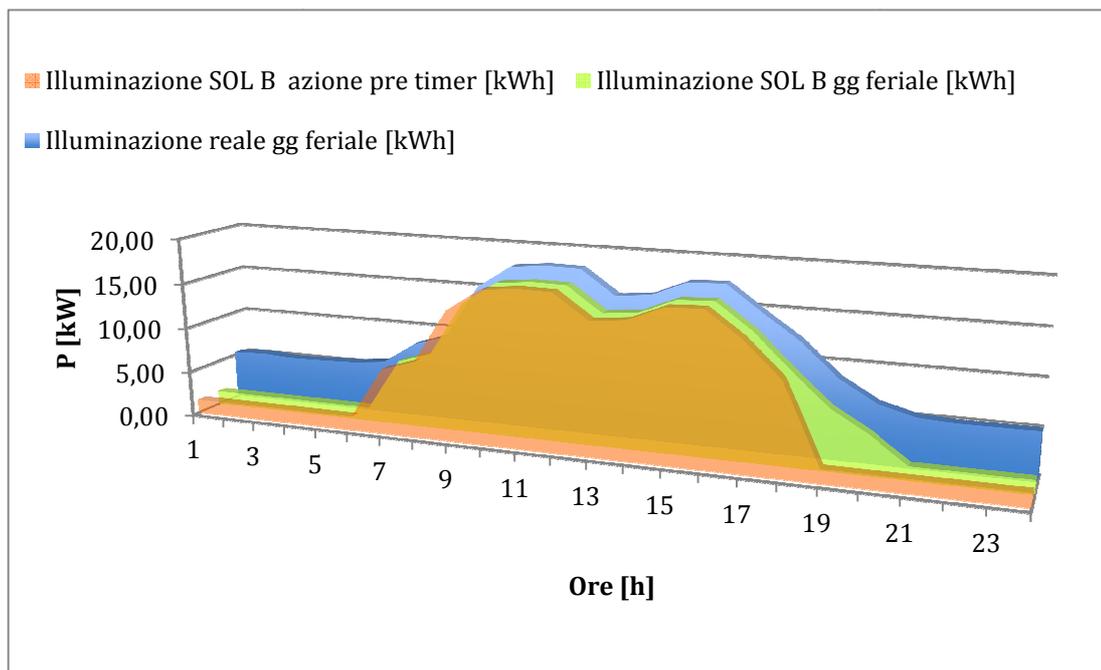


Figura 4.5: diagramma luce giorno feriale soluzione B

I risparmi conseguiti sono riportati in tabella:

SOL. B	Consumo reale [kWh/anno]	Consumo SOL B [kWh/anno]	Risparmi energetici [kWh/anno]	%
Illuminazione	74995,28	49433,35	25561,93	34,08
Riscaldamento	9935,71	9935,71	0,00	0,00
Condizionamento	44883,74	44883,74	0,00	0,00
Consumi termici (*)	239.857	239.857	0,00	0,00
Tot	369672	344110	25561,93	6,9

Tabella 4.4: soluzione B

L'utilizzo del pacchetto B ha portato ad un lieve incremento del risparmio energetico totale, circa di un punto percentuale. Andando comunque ad analizzare il solo servizio di illuminazione, ha avuto un incremento di circa il 6% rispetto alla soluzione che utilizzava il pacchetto A, si beneficia dunque dell'utilizzo di un sistema di più complesso che adotta i sensori di presenza nei luoghi comuni.

#### 4.4.3 Soluzione C – Livello di Stanza

Nella soluzione C grazie all'impiego dei sensori di presenza nelle stanze, il diagramma dell'illuminazione del giorno feriale si modifica ulteriormente secondo le seguenti ipotesi Figura (4.6):

- durante l'orario 6.00-16.00 le luci nei luoghi comuni saranno accese per l'80% del tempo;
- mentre durante il periodo 16.00-19.00 le luci rimarranno accese solo il 60%;
- inoltre ci sarà un risparmio del 20% legato al controllo della luce in singola stanza.

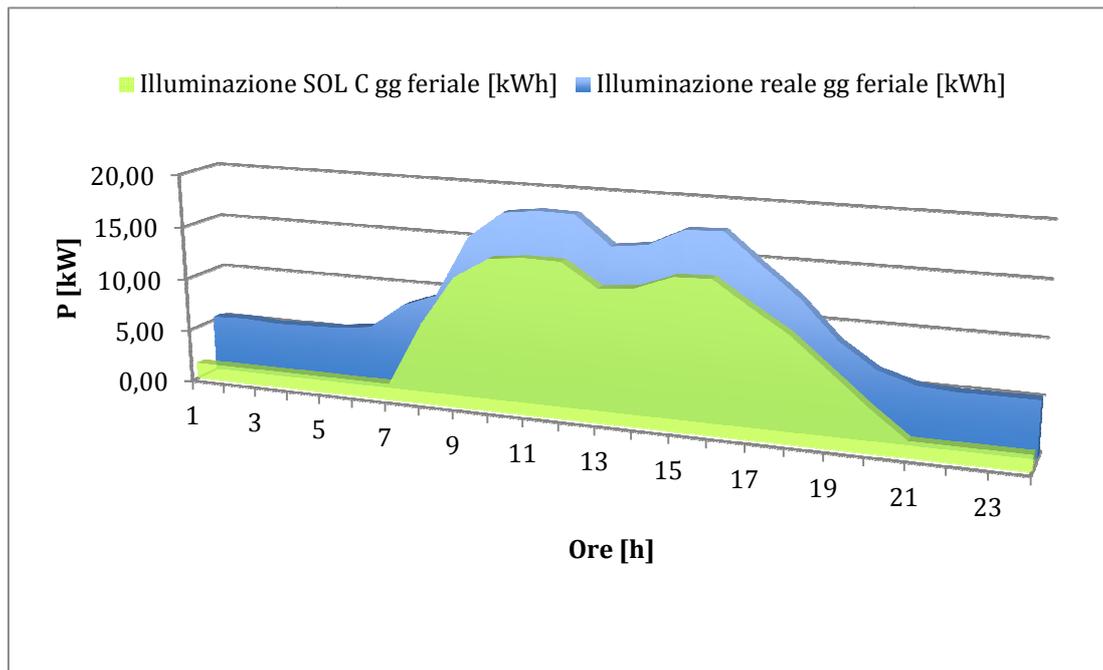


Figura 4.6: diagramma Luce giorno feriale Sol C

Un ulteriore risparmio, ottenibile con l'impiego di sensori di stanza, è sul condizionamento estivo. L'assorbimento totale di energia elettrica è legato fortemente al numero di persone presenti.

Non è raro che durante il periodo estivo alcuni locali rimangano vuoti, ma comunque vengono condizionati pur essendo il personale assente (ferie). Si è dunque ipotizzato un risparmio conseguibile del 20%, considerando che degli 84 giorni lavorativi in cui il condizionamento estivo è garantito 18 giorni l'utente non è presente. Considerazioni simili possono essere svolte per il consumo termico: in particolare si considera che il risparmio energetico sia derivato dal fatto che degli effettivi 111 giorni di riscaldamento invernale considerati, le stanze rimarranno vuote per un numero di giorni pari a 15 (13,5%).

I risparmi conseguiti sono riportati in tabella

SOL. C	Consumo reale [kWh/anno]	Consumo SOL C [kWh/anno]	Risparmi energetici [kWh/anno]	%
Illuminazione	74995,28	43262,88	31732,40	42,31
Riscaldamento	9935,71	9935,71	0,00	0,00
Condizionamento	44883,74	35265,80	9617,95	21,43
Consumi termici (*)	239.857	207149	32708	13,6
Tot	369671,87	295613,73	74058,14	20,02

Tabella 4.5: soluzione C

Il pacchetto C ha dei notevoli effetti di risparmio energetico ben il 20,02% sul totale; questo incremento è da associare al fatto che il sistema, sicuramente più complesso nella sua architettura, permette il controllo su differenti servizi.

Mentre i precedenti permettevano un risparmio solo nel servizio di illuminazione, andando ora ad agire sul singolo locale, per mezzo di sensori di presenza, l'edificio risulta avere un margine di efficientamento più elevato. Colpisce come il condizionamento estivo e il consumo termico in un edificio adibito ad uso di ufficio risultino così influenzati dalla presenza delle persone, il risparmio ottenibile è del 21,43% per il primo e 13,6 per il secondo. Inoltre il risparmio per quanto concerne il servizio di illuminazione subisce ulteriormente un aumento, arrivando a un 42,31%. Questa situazione può essere correlata al fatto che i sistemi di controllo ad oggi in uso all'interno dei singoli locali non permettono all'utente di gestire in maniera appropriata il proprio locale, nel momento in cui il personale non è presente.

#### 4.5 Conclusioni

Lo studio ha messo in luce in primo luogo l'importanza del monitoraggio.

Nel paragrafo 4.3 è stata effettuata una operazione di diagnostica sulla base della lettura dei dati di consumo elettrico in centrale termica, con l'individuazione di un malfunzionamento dell'orologio settimanale. Tale guasto del dispositivo porta ad avere, per l'edificio F40 uno spreco di energia pari 83840 kWh/anno che in euro corrispondono a 8384 €/anno.

Tale esperienza ha permesso di confermare l'esigenza secondo la quale un qualsiasi edificio debba essere fornito di un adeguato sistema di monitoraggio; in questo modo attraverso l'acquisizione dei dati è possibile individuare immediatamente le eventuali criticità ed agire tempestivamente.

Un secondo aspetto è stato messo in evidenza dall'analisi tecnico-economica effettuata sui tre pacchetti di monitoraggio-diagnostica-controllo.

Le tre soluzioni si differenziano per il livello di controllo:

- soluzione A – livello edificio
- soluzione B – livello piano
- soluzione C – livello stanza.

Legando la strumentazione necessaria alla varie soluzioni, con i costi di tali attrezzature si è potuto calcolare il tempo di ritorno dell'investimento, riportato in fig. 4.7.

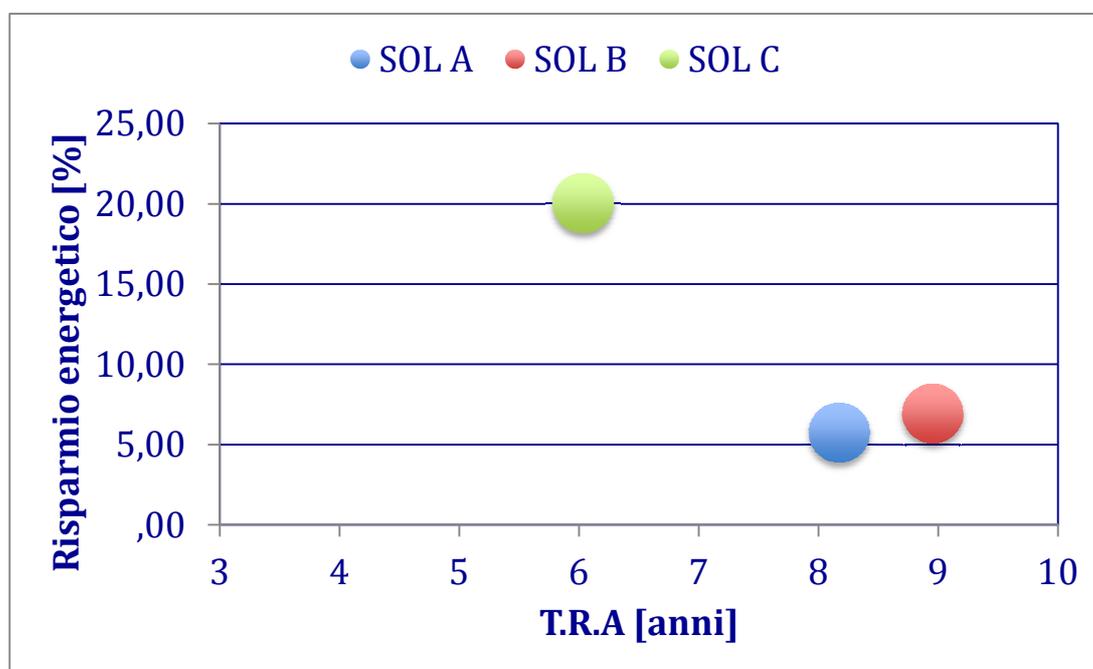


Figura 4.7: confronto risparmi energetici tra le differenti soluzioni

Da questa analisi si evince che il controllo di stanza, almeno al livello di monitoraggio della presenza, sembra la soluzione migliore in termini di reale ottimizzazione dell'edificio presentando peraltro ottimi tempi di ritorno dell'investimento. Pertanto, benché rappresenti l'intervento a più alto investimento iniziale, rappresenta una delle soluzioni più promettenti.

Tale configurazione è stata pertanto inclusa nel progetto dell'edificio sperimentale il quale dovrà confermare o meno tali conclusioni attraverso i risultati sperimentali.

L'attività futura, oltre a qualificare tali indicazioni, implementare le funzioni di diagnostica, predizione ed ottimizzazione dovrà provvedere anche a sviluppare un

ulteriore task che consisterà nel tentativo di sviluppare nuove configurazioni strumentali e modellistiche, probabilmente ibride rispetto alle tre qui considerate, con lo scopo di ottenere simili risparmi energetici ma un impiego minore di strumentazione e di conseguenza minori costi di investimento e tempi di ritorno dell'investimento ancor più favorevoli di quelli finora calcolati.