



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



*Ministero dello Sviluppo Economico*

## RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

# Strategie di diagnostica ed ottimizzazione multiobiettivo di edifici con climatizzazione innovativa

*S. P. Corgnati, V. Verda, G. Baccino, A. Capozzoli, F. Causone, N. Talà*



Dipartimento ENERGETICA



POLITECNICO DI TORINO



TEBE Research Group

Report RdS/2011/258

STRATEGIE DI DIAGNOSTICA ED OTTIMIZZAZIONE MULTIOBIETTIVO DI EDIFICI CON  
CLIMATIZZAZIONE INNOVATIVA

S.P. Corgnati, V. Verda, G. Baccino, A. Capozzoli, F. Causone, N. Talà (POLITECNICO DI  
TORINO)

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



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



*Ministero dello Sviluppo Economico*

## ACCORDO DI PROGRAMMA

### MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO - ENEA

ai sensi dell'art. 3 comma 2 del decreto ministeriale 23 marzo 2006 per le

### ATTIVITÀ DI RICERCA E SVILUPPO DI INTERESSE GENERALE

### PER IL SISTEMA ELETTRICO NAZIONALE

### PIANO ANNUALE DI REALIZZAZIONE 2008-2009

**Progetto 3.4 "Utilizzo dell'energia elettrica e solare per la climatizzazione estiva"**

**Utilizzo dell'energia elettrica e solare per condizionamento estivo**

**Attività C. Sistemi di regolazione, monitoraggio e controllo degli impianti di climatizzazione in edifici complessi e/o distretti energetici**

Strategie di diagnostica ed ottimizzazione multiobiettivo di edifici  
con climatizzazione innovativa

*S. P. Corgnati, V. Verda, G. Baccino, A. Capozzoli, F. Causone, N. Talà*



POLITECNICO DI TORINO



Dipartimento ENERGETICA



TEBE  
TEBE Research Group

## INTRODUZIONE GENERALE

La presente relazione illustra le attività e le risultanze frutto degli approfondimenti sviluppati nell'ambito della collaborazione tra ENEA e Politecnico di Torino - Dipartimento di Energetica sui temi della diagnostica remota e ottimizzazione della gestione energetica degli edifici.

Infatti, attraverso l'Accordo di Programma MSE-ENEA sulla Ricerca di Sistema Elettrico, **Piano Annuale di Realizzazione 2008-2009 progetto 3.4 task C2** "Studi e valutazioni sull'uso razionale dell'energia: utilizzo dell'energia elettrica e solare per la climatizzazione estiva", si è messo in atto un programma di ricerca di interesse congiunto dal titolo "Progetto di una rete e sviluppo della modellistica per la diagnostica remota e la ottimizzazione della gestione di reti di edifici".

Come anche espresso dalle recenti definizioni adottate dal Comitato Tecnico Italiano e dalle normative tecniche di settore, l'edificio è considerato un organismo energeticamente complesso costituito da una struttura portante, un involucro e da dotazioni impiantistiche. Quando ci si riferisce ad un edificio, si sottintende quindi che si stia parlando del "sistema edificio", integrazione di struttura, involucro e impianti. La prestazione energetica dell'edificio dipende ed è influenzata sia dalle specifiche prestazioni delle singole parti costituenti il sistema, sia dalle prestazioni derivanti dall'interazioni reciproche tra le parti del sistema.

La difficoltà nella caratterizzazione energetica delle prestazioni energetiche dell'edificio, già problematica in fase di progetto, aumenta ancor più se queste vogliono essere valutate in fase di esercizio a causa della forte stocasticità delle forzanti agenti sul sistema, e più in generale dei parametri influenzanti la dinamica energetica dell'edificio.

Il livello di complessità di descrizione del sistema incrementa poi quando l'oggetto di studio non si limita ad un singolo edificio, ma si amplia ad una rete di edifici fino ad arrivare a patrimoni edilizi di grande entità.

Al fine di affrontare la problematica attraverso un approccio strutturato, risulta fondamentale in primis acquisire le informazioni riguardanti quei parametri che maggiormente influenzano il consumo in fase di esercizio, nonché dati sui consumi reali. Occorre cercare di descrivere nel modo più accurato possibile la "realtà", in modo da esaminarla, evidenziare criticità e ove necessario attuare azioni correttive volte all'ottimizzazione dell'operatività del sistema. In quest'ottica, occorre definire con accuratezza i piani di monitoraggio continuo degli edifici attraverso cui raccogliere, in database strutturati, le informazioni relative alle dinamiche energetiche reali dell'edificio o degli edifici. Negli ultimi anni, il forte sviluppo del settore ICT, l'ampia diffusione delle tecnologie wireless e la riduzione dei costi della sensoristica hanno permesso un deciso ampliamento dei campi di applicazione dei monitoraggi remotizzati e di lungo periodo delle grandezze energetiche e climatiche indoor e outdoor negli edifici. La stesura di un corretto piano di monitoraggio non è operazione banale: occorre infatti definire con chiarezza l'obiettivo del monitoraggio (perché misurare?) e individuare cosa misurare (quali grandezze e con quale accuratezza?), come misurare (quali sensori e quali apparecchi di misura?), dove (densità della griglia / mappa di misurazioni?) e quando (quale frequenza di campionamento per le diverse grandezze?). Tutto ciò trovando un giusto equilibrio tra gli obiettivi del monitoraggio e i costi da sostenere. Come descritto di seguito, il tema del "sistema di monitoraggio" ha rappresentato un primo e importante argomento di approfondimento nella ricerca condotta.

Una volta acquisite in modo opportuno le grandezze, queste possono alimentare il processo di elaborazione e analisi dei dati: questa è la parte preliminare del processo diagnostico che ha come obiettivo, tra gli altri, l'individuazione di criticità/anomalie/malfunzionamenti nel comportamento del sistema edificio. Il processo di elaborazione deve essere in grado estendere il numero di grandezze che possono essere esaminate in fase di analisi: alle pure grandezze misurate di cui si conoscono i profili temporali e gli andamenti statistici, occorre affiancare grandezze aggregate (grandezze specifiche, grandezze normalizzate, etc.) e indicatori prestazionali che si riferiscano a diversi periodi temporali di investigazione (sub-orario, orario, giornaliero, settimanale, mensile, annuale) e che consentano un esame completo della dinamica energetica del sistema edificio. Lo studio di queste grandezze consente lo sviluppo di processi diagnostici che si possono spingere fino a "diagnostiche evolute" basate su logiche probabilistiche multicriteriali per l'espressione dei legami

cause-effetto influenzanti il comportamento energetico degli edifici in condizioni di reale esercizio. Queste tematiche hanno rappresentato un secondo filone di approfondimento della ricerca.

Il monitoraggio energetico-ambientale è stato infine esaminato come strumento essenziale per l'ottimizzazione del funzionamento di sistemi impiantistici in fase di esercizio. La tematica è stata affrontata con riferimento ad un sistema impiantistico complesso che evidenzia ampie prospettive applicative: il sistema di climatizzazione ambientale basato sul solar cooling. Il tema della gestione della climatizzazione alimentata da fonti solari è un tema cruciale per il prossimo futuro, soprattutto per i paesi dell'area mediterranea: tuttavia, la complessità del sistema deve essere ancora profondamente investigata. Infatti, il sistema opera con differenti logiche in condizione estiva, invernale e nelle mezze stagioni: perciò è necessario definire criteri di funzionamento operativo che, mantenendo sotto controllo i settaggi del sistema, consentano di aumentarne le prestazioni energetiche nelle diverse stagioni di esercizio. Analogamente al "sistema complesso edificio", questi sistemi impiantistici risultano vincenti non solo se progettati correttamente ma anche, e soprattutto, se gestiti con ottimizzate logiche di controllo e regolazione.

Nel dettaglio, quindi, la ricerca ha riguardato specificamente la gestione e l'ottimizzazione delle prestazioni energetiche del sistema edificio e dei sottosistemi impiantistici nelle condizioni reali di gestione e utilizzo.

Come introdotto, un filone di approfondimento è stato indirizzato allo studio e sviluppo di un sistema intelligente di monitoraggio energetico-ambientale per edifici a destinazione d'uso terziaria. Lo studio si è confrontato con un caso reale, per il quale è stata progettata l'architettura del sistema di monitoraggio, che rappresenta un potente strumento a supporto della gestione e ottimizzazione energetica degli edifici in fase operativa. Parallelamente, è stato condotto un approfondimento relativo allo sviluppo di procedure di analisi a supporto di attività diagnostiche, basate sui dati acquisiti dai monitoraggi e finalizzati al miglioramento delle prestazioni energetiche e alla qualità climatica degli ambienti confinati.

Sempre connesso alle logiche di ottimizzazione, è stato sviluppato l'ulteriore approfondimento finalizzato alla riduzione dei consumi energetici per la climatizzazione ambientale attraverso lo studio della specifica soluzione tecnologica "solar cooling": per questa è stata condotta un approfondimento sulle tecniche di modellazione e sulle strategie innovative di controllo, regolazione e gestione finalizzate all'ottimizzazione della prestazione energetica della tecnologia stessa.

# **CAPITOLO 1 – METODOLOGIA DIAGNOSTICA**

## ***PARTE 1 - INDICATORI E MODELLI PER LA DIAGNOSTICA***

### **INTRODUZIONE**

L'oggetto della ricerca sintetizzata nel presente rapporto tecnico riguarda i monitoraggi energetici ed ambientali e la successiva analisi numerica dei dati di monitoraggio, realizzata attraverso metodologie diagnostiche e tecniche statistiche concepite per fornire un supporto decisionale e interpretativo delle anomalie riscontrabili nel sistema edificio. Le metodologie di analisi e interpretazione dei dati monitorati sviluppate nell'ambito della ricerca, sono finalizzate alla valutazione energetica ed ambientale, al fine di operare secondo un processo di tipo inverso (e cioè a partire da dati monitorati) una più attendibile caratterizzazione dell'edificio basata sul suo comportamento effettivo.

Lo scopo è acquisire conoscenze ed esperienze per un servizio di monitoraggio energetico e ambientale dedicato alla diagnosi energetica del sistema edificio-impianto ed al controllo della qualità ambientale. Il monitoraggio in continuo dei consumi energetici e dei principali parametri dell'ambiente interno (temperatura, umidità relativa, CO<sub>2</sub>, illuminamento) consente di attivare un processo sistematico e documentato finalizzato ad individuare i possibili interventi di miglioramento di natura tecnologica e gestionale. In tal senso si possono analizzare le correlazioni esistenti tra fabbisogno energetico e la qualità dell'ambiente interno e ricercare soluzioni per l'ottimizzazione energetica nel rispetto della qualità microclimatica dell'ambiente interno. Inoltre, attraverso l'analisi dei consumi elettrici e termici si potranno valutare gli indicatori della prestazione energetica dell'edificio e analizzare gli interventi di retrofit energetico sulla base dei dati monitorati.

Se confrontati con i dati di un monitoraggio energetico, gli output di un monitoraggio ambientale permettono inoltre di relazionare le condizioni ambientali ai consumi energetici, consentendo di individuare alcune potenziali criticità degli impianti a servizio dell'edificio, del sistema di controllo, delle prestazioni dell'involucro o del comportamento dell'utenza.

La necessità di correlare le condizioni microclimatiche ambientali ad i reali consumi energetici è espressamente richiamata dalla direttiva europea 2002/91/CE, che anzi parla di qualità ambientale interna, includendo anche benessere visivo ed acustico. Il riferimento normativo che recepisce queste indicazioni e che deve essere usato come traccia per la pianificazione di monitoraggi ambientali e la loro attuazione è la norma europea EN 15251.

Un progetto di monitoraggio richiede competenze di diversa natura ed implica quindi una delicata organizzazione di diverse figure professionali. E' richiesto innanzitutto competenza per analizzare l'edificio oggetto di indagine, effettuare sempre un controllo della qualità dei dati di monitoraggio, per la gestione e l'acquisizione dei dati e per la selezione della tecnologia della strumentazione di misura. Aspetto fondamentale inoltre è rappresentato dall'accuratezza e dell'affidabilità dei dati monitorati e dalle successive analisi di elaborazione.

Una possibile classificazione dei progetti di monitoraggio può essere effettuata in base agli obiettivi, all'approccio sperimentale, al livello di dettaglio del monitoraggio, agli utilizzi, alla procedura di validazione e analisi dei dati, alla frequenza e alla durata dei dati campionati, e alla tecnologia di strumentazione utilizzata.

In letteratura viene proposta una classificazione dei diversi scopi legati a un progetto di monitoraggio secondo la seguente classificazione:

### ***Usi energetici***

Questi progetti di monitoraggio sono tipicamente focalizzati su specifici sistemi energetici o edifici. Il monitoraggio richiede misuratori dedicati per ogni uso energetico finale, e l'analisi richiede la valutazione di tutti i fattori che possono influenzare la prestazione energetica del sistema edificio-impianto. Esempi tipici sono rappresentati da analisi dettagliate dei carichi elettrici e termici, la valutazione di programmi di incentivazione, e l'uso dei dati monitorati per la calibrazione dei modelli numerici dei sistemi energetici. A seconda degli obiettivi del progetto, la frequenza di campionamento dei dati monitorati può variare dalla misura spot dei sistemi a pieno carico, alla registrazione nel tempo delle grandezze di interesse ai carichi parziali.

### ***Valutazione di una specifica tecnologia***

Questa tipologia di progetto ha come obiettivo la valutazione della prestazione di specifici sistemi energetici o di apparecchiature, o ancora di strategie di riqualificazione che influenzano la richiesta energetica dell'edificio quali ad esempio azioni di riqualificazione dell'involucro dell'edificio, valutazione dei carichi o dei risparmi a seguito di azioni di retrofit (per esempio sui sistemi di illuminazione) o analisi dettagliate su particolari macchine a servizio dell'edificio.

L'obiettivo tipico è la verifica su campo di progetti di retrofit attraverso la stima del risparmio energetico conseguente, cercando per mezzo di tecniche numeriche di post processing di isolare le possibili altre cause di variazione della richiesta energetica non legate all'azione di efficientamento effettuata (come le condizioni climatiche interne ed esterne, le caratteristiche costruttive, o il comportamento degli occupanti). La frequenza di campionamento e la tipologia di dati da monitorare dipendono dagli obiettivi del monitoraggio e dalle condizioni specifiche del sito che si analizza. I progetti di monitoraggio appartenenti a questa categoria tipicamente prevedono la valutazione delle prestazioni tra diversi edifici o un'analisi sul singolo edificio prima e dopo un'azione di retrofit. La strumentazione adottata in questi casi deve consentire spesso il monitoraggio dettagliato di tutti i parametri critici di prestazione o di miglioramento dell'efficienza energetica.

### ***Verifica e misura del risparmio energetico***

In questi casi l'obiettivo diventa l'individuazione di una metodologia di monitoraggio per la misura del risparmio energetico la quale deve fondarsi sulle seguenti azioni:

- Individuazione dei dati di prestazione nelle condizioni di preretrofit
- Definizione accurata delle condizioni e assunzioni della baseline rispetto alla quale valutare il risparmio energetico
- Monitoraggio dei sistemi nel periodo di post retrofit
- Stima del risparmio energetico attraverso tecniche di modellazione dei dati di monitoraggio

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

## Gestione dell'edificio e verifiche di dettaglio

In questo caso l'obiettivo è la misura dei parametri fisici e operativi che determinano la richiesta energetica dell'edificio e dei sistemi che lo servono. Tipicamente l'obiettivo in questo caso è l'individuazione delle cause dei problemi, o la modellazione calibrata e il miglioramento della prestazione energetica dell'edificio, o ancora l'isolamento dell'effetto di un singolo componente per valutare la sua influenza sulla richiesta energetica globale (analisi di sensibilità). Questa tipologia di progetto quasi sempre richiede misure spot o comunque di breve periodo. Affinché l'operazione diagnostica sia efficace è necessario che la frequenza di campionamento delle misure effettuate sia maggiore del grado di variazione degli effetti che si stanno monitorando. La più comune e basilare operazione di diagnostica che si esegue in questa tipologia di progetti, è la determinazione della quantità di energia richiesta o anche della potenza media in uno specifico periodo, quasi sempre istantaneo o di poche settimane. Lo scopo della misura può interessare un singolo componente od anche l'intero edificio. Lo scopo può variare dalla misura finalizzata alla stima dei parametri di un sistema energetico, alla verifica delle condizioni di targa di una macchina, od anche alla valutazioni dei profili di carico giornalieri o settimanali.

Tipiche applicazioni riguardano la misura per la verifica dell'efficienza delle caldaie, chillers, pompe di calore a regime, la misura delle perdite per infiltrazione di un edificio attraverso tecniche di pressurizzazione, verifiche per la misura dei trafiletti dei sistemi di distribuzione dell'aria, analisi termografiche all'infrarosso per analizzare l'involucro dell'edificio o anche per determinare suoi parametri prestazionali di natura termofisica.

In tabella 1 sono riassunte le principali caratteristiche dei progetti di monitoraggio di applicazione più comune secondo la classificazione sopra riportata.

**Tabella 1 – Esempi di monitoraggio energetico di edifici – ASHRAE Handbook Applications 2007**

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

Sulla base di un esteso studio di letteratura di seguito vengono proposte le fasi che secondo un approccio generalizzato caratterizzano un progetto di monitoraggio e che rappresentarono la traccia sulla quale è stato sviluppato il seguente rapporto tecnico.

**Tabella 2. Le fasi di cui si compone una procedura di monitoraggio energetico-ambientale**

---

<b>FASE I: Monitoraggio real time e raccolta dati statici</b> – Campionamento e registrazione delle grandezze che variano nel tempo e rilievo di quelle statiche
<b>FASE II: Pre-processing o organizzazione dei dati</b> – Organizzazione e rappresentazione dei dati primari monitorati e dei dati secondari o quantità dedotte (es. energia termica consumata da un edificio, calcolata come una portata per una differenza di temperatura)
<b>FASE III: Modellistica</b> – analisi inferenziale, modelli statistici, modelli neurali, analisi di sensibilità, etc.
<b>FASE IV: Calcolo e verifica di indicatori prestazionali</b> – Indici rappresentativi delle prestazioni dell'edificio-impianto
<b>FASE V: Diagnostica</b> – Individuazione delle anomalie attraverso la lettura e l'analisi dei dati
<b>FASE VI: Strategie di intervento</b> – individuazione di interventi atti a ridurre i consumi energetici e/o migliorare la qualità dell'ambiente interno (automatiche o tramite interazione con l'operatore o utente)

---

La prima parte del capitolo 1 è dedicata alle metodologie di diagnostica, ed in esso vengono affrontate le seguenti tematiche:

- **la struttura del database e le categorie di informazioni che in esso devono essere contenute**

Questo approfondimento è propedeutico alla proposta della tipologia di analisi da effettuare nella fase di pre-processing dei dati per la valutazione di grandezze aggregate o pre-elaborate e degli indicatori ambientali ed energetici. Inoltre esso risulta funzionale alla qualità dell'analisi di post-processing che è possibile effettuare.

In particolare la struttura del database deve essere concepita per fornire informazioni chiare e immediate circa la qualità dei dati a disposizione, sia in termini di numerosità delle grandezze monitorate (di natura fisica e non), sia di consistenza del campione a disposizione per ogni grandezza, dipendente quest'ultima, dal periodo temporale scelto e dalla frequenza di campionamento adottata. E' chiaro che il livello di dettaglio del database da strutturare, così come la sua organizzazione logica, devono essere intimamente connessi agli obiettivi dell'analisi diagnostica che si vuole condurre e ai descrittori che si vogliono analizzare.

Inoltre, il database deve essere strutturato secondo livelli che consentono da un lato la corretta individuazione di ogni sensore in campo, per cui è necessario specificare univocamente la sua posizione fisica, dall'altro le caratteristiche principali di natura metrologica, di frequenza di campionamento e del periodo temporale in cui la misura è effettuata. Un database strutturato secondo tale logica, costituisce l'interfaccia attraverso la quale deve risultare possibile accedere in maniera efficace ai dati monitorati per le successive elaborazioni. A supporto di tale database devono inoltre essere rese disponibili tutte le informazioni relative alle caratteristiche geometriche dell'edificio e gli schemi logici unifilari per la corretta interpretazione della struttura della rete di sensori in campo.

- **Reportistica**

In questa sezione viene descritta una metodologia per l'organizzazione razionale e logica delle grandezze oggetto di monitoraggio specificando inoltre per ognuna di esse il tipo di rappresentazione più opportuno.

- **individuazione di grandezze aggregate o pre-elaborate e di indicatori ambientali ed energetici**

In questa sezione è messo in luce il differente approccio del monitoraggio energetico ed ambientale e delle logiche diagnostiche adottate quando si analizza il singolo edificio o uno stock di edifici, soprattutto in ragione della diversa qualità e quantità dei dati a disposizione (numero e tipologie di grandezze monitorate, frequenze di campionamento).

In particolare per il singolo edificio è opportuno ricavare delle grandezze aggregate o pre-elaborate di natura ambientale ed energetica (p.e kWhmax, kWhmed, Tmax ecc.) che risultano efficaci nel processo di diagnostica, se sono confrontate con valori o logiche di soglia o di allarme che sostanzialmente sono individuati attraverso analisi numeriche o modellistiche delle serie storiche dei dati a disposizione.

Per i patrimoni edilizi è invece necessario individuare degli indicatori ambientali ed energetici che risultano normalizzati e/o adimensionali al fine di confrontare la prestazione di più edifici rispetto a valori di riferimento (valori di benchmark ricavati per mezzo di approcci tipologici). Alla luce di quanto detto sono presentate tabelle di sintesi sia per le grandezze aggregate sia per i principali indicatori energetici ed ambientali.

- **le tecniche di post-processing relative a valutazioni sulla qualità energetica e climatica indoor degli edifici, con particolare riferimento alle tecniche di modellazione inversa e presentazione di un caso di studio esemplificativo**

In questa sezione vengono descritte tecniche di modellazione inversa per la caratterizzazione del sistema edificio sottolineando i vantaggi connessi a tale approccio modellistico quando si hanno a disposizione dati di monitoraggio e a tecniche di valutazione della qualità dell'ambiente interno. Viene inoltre presentato un caso di studio esemplificativo con l'applicazione delle tecniche di modellazione presentate.

- **Individuazione di una tabella di diagnostica funzionale all'individuazione delle relazioni esistenti tra le fasi pre-processing (consistente nell'individuazione delle grandezze aggregate che consentono il riscontro dell'anomalia attraverso la lettura dei dati monitorati), dell'individuazione dell'evento all'origine del sintomo (situation assessment) e delle cause che hanno determinato l'evento (causes)**

In questa sezione sulla base della tabella di diagnostica costruita si procede alla individuazione delle connessioni esistenti tra ogni causa individuata (*causes*) e i livelli di *situation assessment* e *preprocessing* attraverso lo sviluppo di alberi decisionali, su cui si fonderà il processo di ricerca di ottimizzazione energetica.

## IL DATABASE

L'elaborazione di un database contenente informazioni energetiche relative agli edifici rappresenta una questione estremamente complessa che gli operatori del settore sono chiamati ad affrontare.

Da un lato l'avvento di sofisticate apparecchiature di misura ha prodotto la raccolta di un numero consistente di dati per un edificio o parte di esso, dall'altro monitoraggi estesi a grandi patrimoni edilizi in cui ogni edificio è caratterizzato da poche informazioni impone la necessità di creare una struttura logica con la quale organizzare i dati a disposizione.

Per affrontare la questione posta sopra, un passaggio cruciale consiste nel focalizzare l'attenzione sulla scala del problema. Man mano che la scala aumenta in termini di numero di edifici e si passa dall'edificio/impianto/sottosistemi dell'impianto ad una scala territoriale più estesa quartiere/città/regione/nazione, il livello di dettaglio e la scansione temporale con cui si raccolgono i dati diminuisce come mostrato nella Figura sotto.

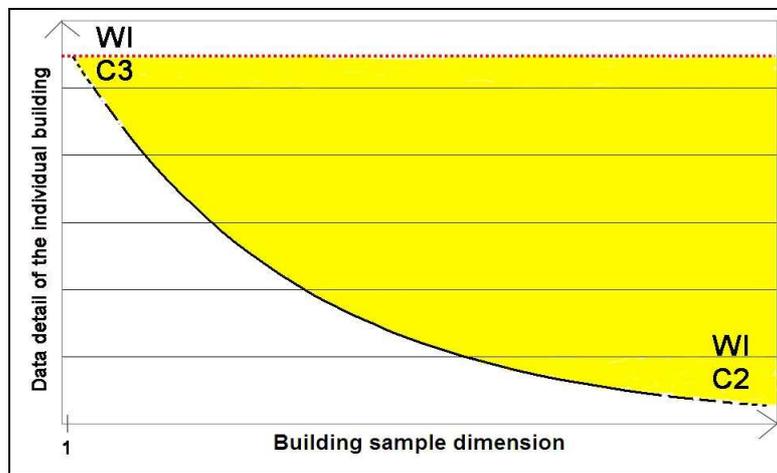


Figura 1. Relazione tra il livello di dettaglio dei dati raccolti nel database e il numero di edifici (dimensione del campione)

In altre parole si possono presentare spesso due situazioni estreme, per cui si dispone di poche informazioni per un numero elevato di edifici oppure informazioni dettagliatissime di uno solo o pochi edifici.

L'elaborazione di un database presuppone quindi lo studio a monte delle finalità per le quali il database viene strutturato.

Gli interrogativi ai quali occorre dar risposta per creare la struttura logica del database sono quindi: "che cosa si vuole indagare (obiettivo) e su chi si concentra l'indagine (dal singolo edificio/al parco nazionale di edifici)?" ; "di quali strumenti si dispone per raggiungere l'obiettivo desiderato (modello/metodo)?"

Rispondere alle domande esplicitate sopra aiuta a definire le condizioni del problema per stabilire qual è la natura del dato, misurabile una sola volta oppure misurabile con un passo temporale molto più ristretto tipicamente di 15 o 60 minuti.

Quando il soggetto delle analisi è il singolo edificio, il database contiene una serie di grandezze per alcune delle quali la misura è restituita sottoforma di serie temporali. Se i dati osservati si presentano in questa forma è richiesta una analisi (pre-elaborazione) a prescindere dal modello che descrive il fenomeno. La pre-elaborazione permette di ridurre il volume di dati ed esprimere l'informazione in essi contenuta attraverso indicatori numerici di sintesi (grandezze aggregate). Le grandezze aggregate consentono lo svolgimento di indagini di tipo comparativo e la verifica tra i dati sperimentali ed un eventuale modello teorico ipotizzato.

Le grandezze aggregate tipicamente misurano la tendenza centrale dei dati (media, mediana) e la dispersione dei dati (varianza e scarto quadratico medio o deviazione standard).

Se la scala del problema cambia ed il soggetto delle analisi diventa un campione di edifici, le grandezze scelte a rappresentare la prestazione devono essere sottoposte ad una operazione di normalizzazione. L'applicazione di una tecnica di normalizzazione ad una grandezza dà origine all'indicatore di prestazione. I fattori rispetto ai quali le grandezze energetiche sono tipicamente normalizzate sono la superficie, le ore di esercizio delle attività, le unità di prodotto finito, il numero di occupanti, clima.

Le tabelle (ALLEGATO 3. Tabelle di sintesi sulle grandezze energetiche ed ambientali da monitorare) rappresentano una sintesi delle grandezze da monitorare suddivise per grandezze ambientali, grandezze relative all'energia termica e grandezze elettriche.

Per ogni tabella viene riportata la tipologia di sensore, l'intervallo di misura e la risoluzione con la relativa associazione di due diversi livelli di accuratezza nel relativo intervallo di confidenza.

I dati riportati nelle tabelle sono ripresi dalla normativa tecnica di settore o quando non esistente dalla letteratura internazionale.

## REPORTISTICA

La prestazione energetica degli edifici è valutata attraverso diversi approcci che si differenziano per complessità di analisi e precisione dei risultati ottenuti nelle diverse fasi di vita di un edificio. Molteplici sono i motivi che spingono gli operatori energetici ad analizzare il "comportamento" dell'edificio mediante misure, ma in ogni caso è essenziale una corretta rappresentazione delle grandezze misurate mentre una uniformità di metodo è auspicabile al fine di descrivere delle quantità che seppure sono assolute risultano confrontabili.

In questo contesto la caratterizzazione e la rappresentazione della prestazione energetica degli edifici avviene attraverso la determinazione del consumo energetico, della domanda di energia elettrica e della energia autoprodotta in complessi di edifici esistenti appartenenti al settore terziario/commerciale. Le quantità energetiche prestazionali definite nel prosieguo del documento formano una base utile alla valutazione e rappresentazione della prestazione energetica ma è da prevedersi una estensione o una riduzione delle stesse da stabilire di volta in volta a seconda del caso specifico trattato. Evidenziare le grandezze misurabili produce l'effetto di creare una base di dati comune e condivisa e risultati confrontabili con valori di riferimento al fine, ad esempio, di verificare il raggiungimento di obiettivi minimi di prestazione.

La metodologia è suddivisa in due livelli di analisi e rappresentazione a seconda del grado di dettaglio dei risultati e della complessità delle procedure necessarie allo svolgimento delle stesse. Il Livello1 di analisi restituisce e riporta i risultati con un passo temporale mensile/annuale in riferimento al complesso di edifici nel suo insieme e principalmente sulla base delle letture del contatore della società che eroga energia. Il Livello2 di analisi fornisce valori con un passo temporale di 15 o 60 minuti distinguendo i dispositivi di uso finale dell'energia.

Si prendono in considerazione tutte le forme di energia presenti sul mercato: energia elettrica, gasolio, metano, carbone, teleriscaldamento e tutte le forme di conversione energetica e di produzione in sito.

Dall'esame dei documenti reperiti in letteratura sul tema emerge che esiste un forte interesse a valutare e rappresentare la prestazione energetica di un edificio ma se da un lato privilegiare la descrizione delle fasi di un piano di monitoraggio permette di trattare la questione in maniera generale, dall'altro specificarne i dettagli preclude la possibilità di generalizzazione del problema.

In sintesi, la procedura presentata di seguito mira a:

- definire l'approccio metodologico utile alla stesura di una relazione tecnica contenente valori assoluti

- illustrare la metodologia attraverso uno schema energetico semplificato ma adattabile ad edifici appartenenti al settore terziario (vedi Figura 2).

Con il termine *Complesso Di Edifici* si intende un edificio o un insieme di edifici con annessi servizi esterni che condividono un contatore energetico.

La scelta di isolare una superficie di controllo avente al suo interno un *Complesso Di Edifici* così come definito prima risiede nel fatto che il procedimento è inteso valere per strutture appartenenti al settore terziario.

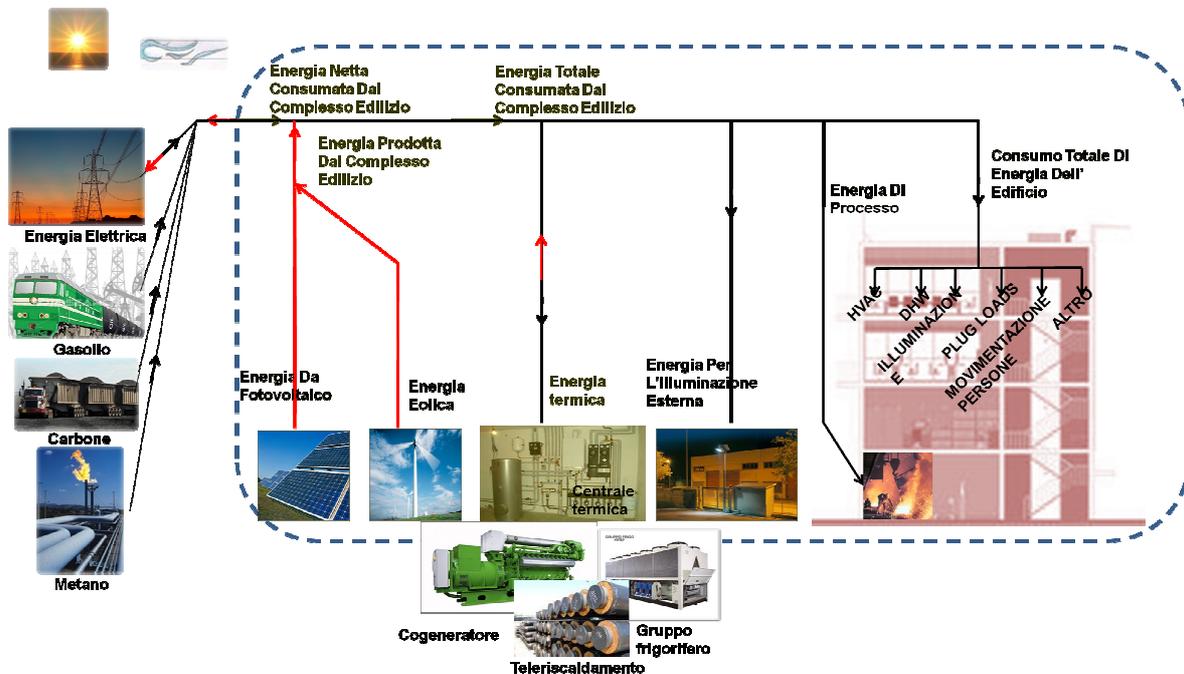


Figura 2. Schema energetico adottato

Così se da un lato sono computate in ingresso al sistema tutte le forme di energia presenti sul mercato (energia elettrica, gasolio, carbone, metano), dall'altro sono espressi al suo interno gli usi dell'energia suddivisi per:

- energia consumata all'interno dell'edificio per soddisfare le categorie di domanda quali climatizzazione, acqua calda sanitaria, illuminazione, plug loads, people mover e altro;
- energia consumata per lo svolgimento delle attività di un processo di produzione industriale o commerciale;
- energia consumata per l'illuminazione esterna.

All'interno dei confini del sistema energetico esteso adottato sono considerate le forme di produzione energetica quali fotovoltaico, eolico, geotermico e solare termico. L'energia autoprodotta compensa quella acquistata proveniente dall'esterno per soddisfare le richieste dell'edificio, del particolare processo svolto all'interno dell'edificio e dell'illuminazione esterna.

Il grado di dettaglio col quale si sceglie di descrivere gli usi finali si riflette nel livello di analisi attuabile e viceversa il livello di analisi desiderato è condizionato dalla descrizione che si possiede del sistema.

Una analisi di Livello1 si limita a registrare il consumo energetico totale, quello netto e l'energia autoprodotta del *Complesso Di Edifici*, i risultati sono espressi come valori mensili e annuali sulla base dei dati a disposizione sulle fatturazioni di bolletta. Questo tipo di analisi richiede ridotti sforzi elaborativi, tempi brevi per l'esecuzione delle operazioni ed una contenuta disponibilità economica a fronte di risultati poco dettagliati.

Le analisi di Livello2 permettono di dettagliare gli usi energetici specificando le categorie di domanda all'interno delle quali gli usi finali sono inclusi. Una elevata precisione dei risultati richiede altresì l'installazione di sottocontatori e la messa in campo di un Sistema Di Acquisizione Dei Dati composto da sensori e trasduttori in grado registrare i dati con un passo temporale di 15 o 60 minuti. La definizione delle quantità misurabili riportata di seguito ha lo scopo di assegnare delle definizioni standard aventi pochi margini di interpretazione al fine di creare un linguaggio comune e stabilire un terreno di confronto e discussione tra gli operatori fruitori di questo procedimento, non intende rappresentare una lista esaustiva di tutte le grandezze misurabili ma piuttosto un elenco da integrare o ridurre a seconda dei casi. Per ognuna delle quantità presenti è riportata l'unità di misura e la rappresentazione possibile.

### 1. Energia usata per la distribuzione dell'aria

Energia usata dai ventilatori per muovere l'aria in un edificio per il riscaldamento, il raffrescamento o la ventilazione

**Unità di misura:** kWh o Joules

**Rappresentazione attraverso:** Totali mensili (tabella), medie giornaliere mensili (grafico), valore totale annuale, grafico del giorno di picco in ciascun periodo di fatturazione

### 2. Domanda di energia elettrica dell'edificio

Picco della domanda di energia elettrica dell'edificio nell'arco di un mese così come definito dalla struttura tariffaria della società elettrica

**Unità di misura:** kW o kVA

**Rappresentazione attraverso:** Valori mensili, valore massimo annuale dei valori mensili (valori stagionali estivi e invernali) incluso la data e l'ora alla quale i valori di picco si registrano

### 3. Energia usata dall'edificio

Energia consumata in un edificio per il riscaldamento, la ventilazione ed il condizionamento dell'aria, l'illuminazione degli spazi interni, l'illuminazione della facciata, l'acqua calda sanitaria, i plug loads, lo spostamento delle persone ed altri usi. Sono escluse l'energia usata per un processo specifico e le perdite del cogeneratore (quando presente).

**Unità di misura:** kWh o Joules

**Rappresentazione attraverso:** Totali mensili (tabella), medie giornaliere mensili (grafico), totale annuale, grafico del giorno di picco in ciascun periodo di fatturazione

### 4. Energia usata per l'illuminazione dell'edificio

= Energia usata per l'illuminazione installata + Energia usata per l'illuminazione Plug in + Energia usata per l'illuminazione della facciata

**Unità di misura:** kWh o Joules

**Rappresentazione attraverso:** Totali mensili (tabella), medie giornaliere mensili (grafico), totale annuale, grafico del giorno di picco in ciascun periodo di fatturazione

#### 5. Energia elettrica prodotta dal cogeneratore

Energia elettrica prodotta attraverso la cogenerazione.

**Unità di misura:** kWh o Joules

**Rappresentazione attraverso:** Totali mensili (tabella), medie giornaliere mensili (grafico), totale annuale, grafico del giorno di picco in ciascun periodo di fatturazione

#### 6. Combustibile usato dal cogeneratore

Combustibile usato dall'impianto di cogenerazione

**Unità di misura:** kWh o Joules

**Rappresentazione attraverso:** Totali mensili (tabella), medie giornaliere mensili (grafico), totale annuale, grafico del giorno di picco in ciascun periodo di fatturazione

#### 7. Perdite del cogeneratore

= Combustibile usato dal cogeneratore – Energia elettrica prodotta dal cogeneratore – Energia termica prodotta dal cogeneratore

**Unità di misura:** kWh o Joules

**Rappresentazione attraverso:** Totali mensili (tabella), medie giornaliere mensili (grafico), totale annuale, grafico del giorno di picco in ciascun periodo di fatturazione

#### 8. Energia termica prodotta dal cogeneratore

Energia termica prodotta dall'impianto di cogenerazione

**Unità di misura:** kWh o Joules

**Rappresentazione attraverso:** Totali mensili (tabella), medie giornaliere mensili (grafico), totale annuale, grafico del giorno di picco in ciascun periodo di fatturazione

#### 9. Energia usata per il raffrescamento

Energia usata dai condizionatori, dai chiller, dalle pompe di calore o altri dispositivi che sono usati per raffrescare l'edificio

**Unità di misura:** kWh o Joules

**Rappresentazione attraverso:** Totali mensili (tabella), medie giornaliere mensili (grafico), totale annuale, grafico del giorno di picco in ciascun periodo di fatturazione

#### 10. Perdite del sistema di generazione dell'energia elettrica

Perdite nei componenti elettrici che sono integrati con il sistema di generazione dell'energia elettrica del complesso edificio ma non quelli dei componenti del generatore

**Unità di misura:** kWh o Joules

**Rappresentazione attraverso:** Totali mensili (tabella), medie giornaliere mensili (grafico), totale annuale, grafico del giorno di picco in ciascun periodo di fatturazione

#### 11. Energia usata per l'illuminazione della facciata

Energia usata per illuminare le superfici esterne dell'edificio

**Unità di misura:** kWh o Joules

**Rappresentazione attraverso:** Totali mensili (tabella), medie giornaliere mensili (grafico), totale annuale, grafico del giorno di picco in ciascun periodo di fatturazione

#### 12. Produzione di energia del complesso edilizio

Totale di tutta l'energia prodotta dal complesso edilizio, sia essa usata dal complesso che esportata. Sono escluse perdite entro i sistemi di produzione dell'energia

**Unità di misura:** kWh o Joules

**Rappresentazione attraverso:** : Totali mensili (tabella), medie giornaliere mensili (grafico), totale annuale (Livello1 o Livello2); grafico del giorno di picco in ciascun periodo di fatturazione (soltanto Livello2)

#### 13. Area Funzionale

Un area del complesso edilizio, sia essa interna o esterna all'edificio, dove l'energia è usata in comune con una o più attività commerciali

**Unità di misura:** m<sup>2</sup>

**Rappresentazione attraverso:** Uno o più valori assegnati

#### 14. Area interna lorda

Area interna totale degli spazi dell'edificio misurata dalla superficie interna dei muri esterni o dalla superficie interna dei muri in comune con edifici adiacenti

**Unità di misura:** m<sup>2</sup>

**Rappresentazione attraverso:** Uno o più valori assegnati

#### 15. Energia usata per il riscaldamento

Energia usata dalle caldaie, dalle pompe di calore o altri dispositivi usati per riscaldare l'edificio

**Unità di misura:** kWh o Joules

**Rappresentazione attraverso:** Totali mensili (tabella), medie giornaliere mensili (grafico), totale annuale, grafico del giorno di picco in ciascun periodo di fatturazione

#### 16. Energia usata dagli impianti di climatizzazione

Scambiatori, chillers, pompe, ventilatori ed altri carichi che costituiscono il sistema di climatizzazione

= Energia usata per il riscaldamento + Energia usata per il raffrescamento + Energia usata per la distribuzione dell'aria + Altra energia usata per gli impianti di climatizzazione

**Unità di misura:** kWh o Joules

**Rappresentazione attraverso:** Totali mensili (tabella), medie giornaliere mensili (grafico), totale annuale, grafico del giorno di picco in ciascun periodo di fatturazione

#### 17. Temperatura interna di zona

Temperatura dell'aria all'interno di una certa zona dell'edificio che corrisponde alle misurazioni dell'Energia usata dall'edificio

**Unità di misura:** °C

**Rappresentazione attraverso:** Medie mensili, media annuale e grafici che illustrano i cambiamenti significativi

#### 18. Energia usata per l'illuminazione installata

Energia elettrica misurata in tutti i circuiti che sono dedicati all'illuminazione interna.

**Unità di misura:** kWh o Joules

**Rappresentazione attraverso:** Totali mensili (tabella), medie giornaliere mensili (grafico), totale annuale, grafico del giorno di picco in ciascun periodo di fatturazione

#### 19. Domanda di energia elettrica netta del complesso edilizio

Picco della domanda di energia elettrica alla società elettrica nell'arco del mese come definito nella struttura tariffaria della società elettrica

**Unità di misura:** kW o kVA

**Rappresentazione attraverso:** Valori mensili, valore massimo annuale dei valori mensili (valori stagionali estivi e invernali) incluso la data e l'ora alla quale i valori di picco si registrano

#### 20. Energia netta usata dal complesso edilizio

=Energia totale usata dal complesso – Energia prodotta dal complesso edilizio

**Unità di misura:** kWh o Joules

**Rappresentazione attraverso:** Totale e dettagliato per tipo di combustibile. Totali mensili (tabella), medie giornaliere mensili (grafico), totale annuale (Livello1 o Livello2); grafico del giorno di picco in ciascun periodo di fatturazione (soltanto Livello2)

#### 21. Fattore netto di carico del complesso edilizio

Un fattore di carico è il rapporto tra la media della domanda di energia elettrica e il picco della domanda. Il fattore netto di carico è il fattore di carico come visto dalla società elettrica

**Unità di misura:** Adimensionato

**Rappresentazione attraverso:** Valori mensili e annuali (valori stagionali estivi ed invernali)

## 22. Altra energia usata dall'edificio

Il consumo interno all'edificio che non è incluso nelle altre categorie Energia usata dall'edificio, Energia usata per il processo e Perdite del cogeneratore

**Unità di misura:** kWh o Joules

**Rappresentazione attraverso:** Totali mensili (tabella), medie giornaliere mensili (grafico), totale annuale, grafico del giorno di picco in ciascun periodo di fatturazione

## 23. Altra produzione di energia elettrica del complesso di edifici

Energia elettrica prodotta dal complesso edilizio attraverso sistemi non inclusi nella categoria Produzione di energia del complesso edilizio

**Unità di misura:** kWh o Joules

**Rappresentazione attraverso:** Totali mensili (tabella), medie giornaliere mensili (grafico), totale annuale, grafico del giorno di picco in ciascun periodo di fatturazione

## 24. Altra energia usata dagli impianti di climatizzazione

Energia usata dall'impianto di climatizzazione che non può essere disaggregate in riscaldamento, raffrescamento, distribuzione dell'aria e usi finali

**Unità di misura:** kWh o Joules

**Rappresentazione attraverso:** Totali mensili (tabella), medie giornaliere mensili (grafico), totale annuale, grafico del giorno di picco in ciascun periodo di fatturazione

## 25. Temperatura esterna

Temperatura dell'aria ambiente nei siti del complesso edilizio

**Unità di misura:** °C

**Rappresentazione attraverso:** Medie mensili e annuali, heating degree-days e cooling degree-days. Per il Livello1 di analisi questa quantità si determina dalla stazione meteorologica più vicina mentre per analisi di Livello2 viene misurata in sito

## 26. Energia usata per lo spostamento delle persone

Energia consumata dagli ascensori e altri dispositivi per il movimento

**Unità di misura:** kWh o Joules

**Rappresentazione attraverso:** Totali mensili (tabella), medie giornaliere mensili (grafico), totale annuale, grafico del giorno di picco in ciascun periodo di fatturazione

**27. Energia usata per l'illuminazione "Plug-in"**

Energia consumata dalle apparecchiature per l'illuminazione interne che non sono collegate ad un circuito dell'illuminazione dedicato

**Unità di misura:** kWh o Joules

**Rappresentazione attraverso:** Totali mensili (tabella), medie giornaliere mensili (grafico), totale annuale, grafico del giorno di picco in ciascun periodo di fatturazione

**28. Energia usata per i carichi "Plug"**

Energia elettrica misurata in tutti i circuiti che sono dedicati ai carichi "plug"

**Unità di misura:** kWh o Joules

**Rappresentazione attraverso:** Totali mensili (tabella), medie giornaliere mensili (grafico), totale annuale, grafico del giorno di picco in ciascun periodo di fatturazione

**29. Energia usata per il processo**

Energia consumata per supportare un processo di produzione, industriale o commerciale

**Unità di misura:** kWh o Joule

**Rappresentazione attraverso:** Totali mensili (tabella), medie giornaliere mensili (grafico), totale annuale, grafico del giorno di picco in ciascun periodo di fatturazione

**30. Produzione di energia da fotovoltaico**

Energia elettrica prodotta dai pannelli fotovoltaici meno le perdite nei componenti che sono integrate al sistema fotovoltaico

**Unità di misura:** kWh o Joules

**Rappresentazione attraverso:** Totali mensili (tabella), medie giornaliere mensili (grafico), totale annuale, grafico del giorno di picco in ciascun periodo di fatturazione

**31. Produzione di energia termica**

Energia termica generata dal complesso edilizio

**Unità di misura:** kWh o Joules

**Rappresentazione attraverso:** Totali mensili (tabella), medie giornaliere mensili (grafico), totale annuale, grafico del giorno di picco in ciascun periodo di fatturazione è facoltativo

**32. Domanda di energia elettrica totale del complesso edilizio**

Picco della domanda di energia elettrica del complesso edilizio nell'arco del mese come definite nella struttura tariffaria della società elettrica

**Unità di misura:** kW o kVA corrispondente alla struttura di fatturazione della società elettrica

Rappresentazione attraverso: Valori mensili, valore massimo annuale dei valori mensili (valori stagionali estivi e invernali) incluso la data e l'ora alla quale i valori di picco si registrano

### **33. Energia totale usata dal complesso edilizio**

Totale di tutta l'energia consumata dal complesso edilizio

**Unità di misura:** kWh o Joules

**Rappresentazione attraverso:** Totale e dettagliato per tipo di combustibile. Totali mensili (tabella), medie giornaliere mensili (grafico), totale annuale (Livello1 o Livello2); grafico del giorno di picco in ciascun periodo di fatturazione (soltanto Livello2)

### **34. Produzione di energia dal vento**

Energia elettrica prodotta dalle turbine nel complesso edilizio, meno le perdite nei component che sono integrati alle turbine

**Unità di misura:** kWh o Joules

**Rappresentazione attraverso:** Totali mensili (tabella), medie giornaliere mensili (grafico), totale annuale, grafico del giorno di picco in ciascun periodo di fatturazione

Un passaggio essenziale conseguente alla raccolta dei dati è l'analisi dei dati dove per analisi dei dati, in questo contesto si intende la determinazione di tutte le quantità prestazionali definite al fine di verificarne la consistenza.

I Bilanci Energetici rappresentano una modalità di controllo della qualità dei dati.

Di seguito si riportano alcuni esempi di rappresentazione grafica.

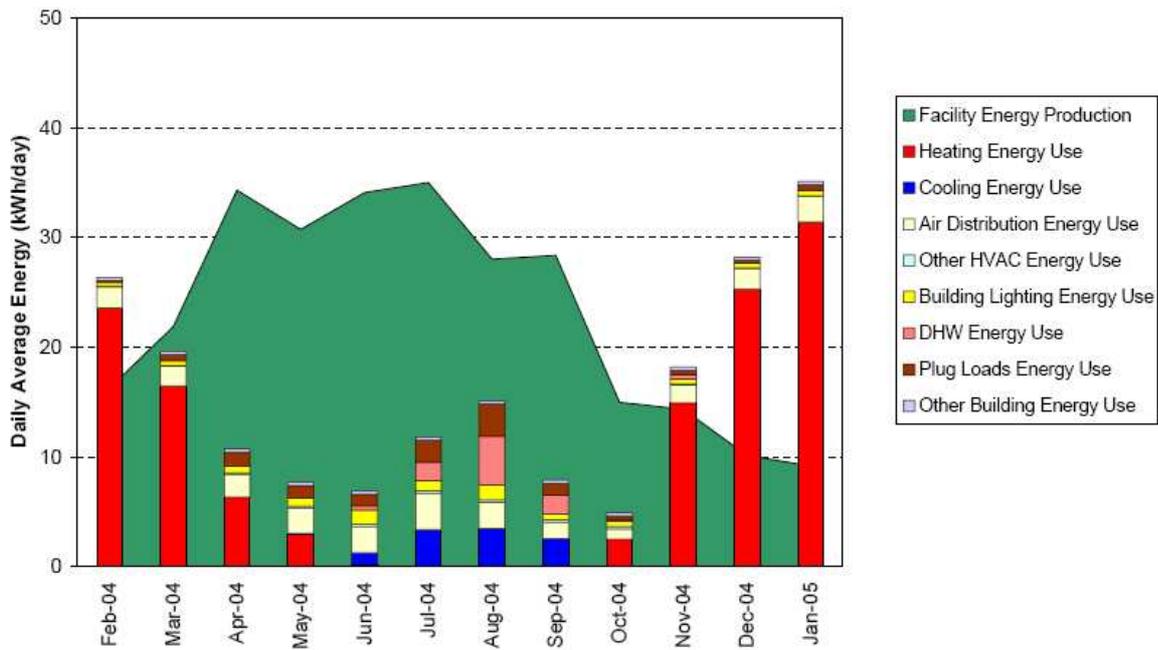


Figura 3. Esempio di grafico che riporta i valori mensili delle quantità di prestazione rispetto alle medie giornaliere

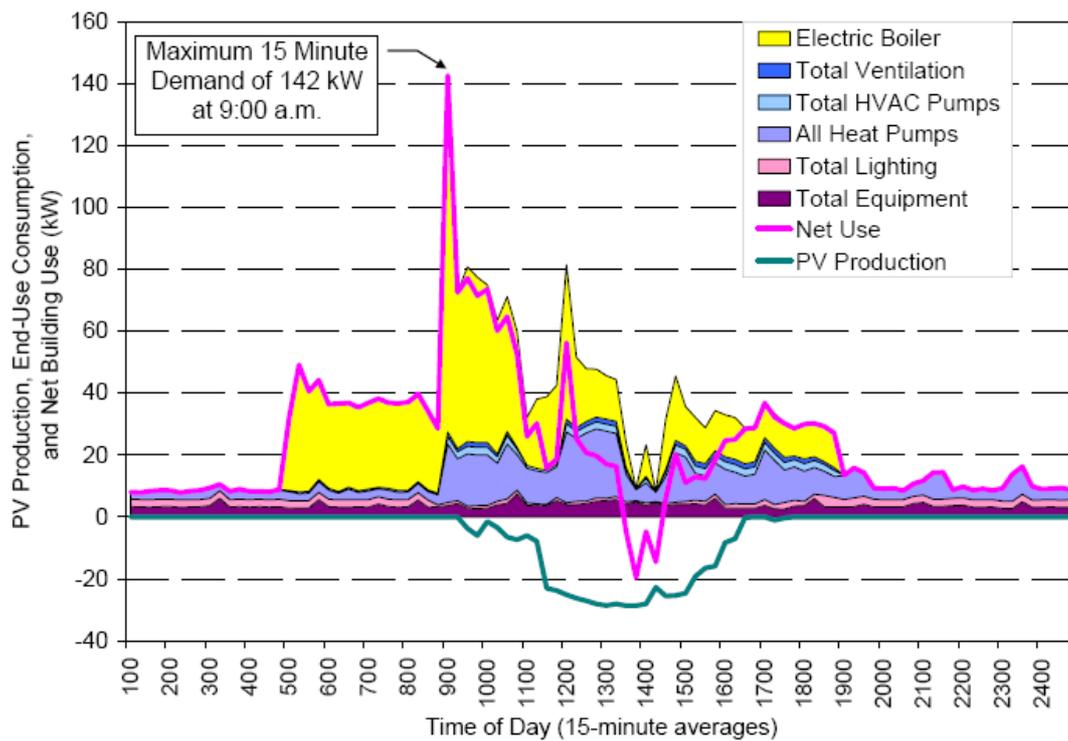


Figura 4. Esempio di grafico dei profili del giorno di picco

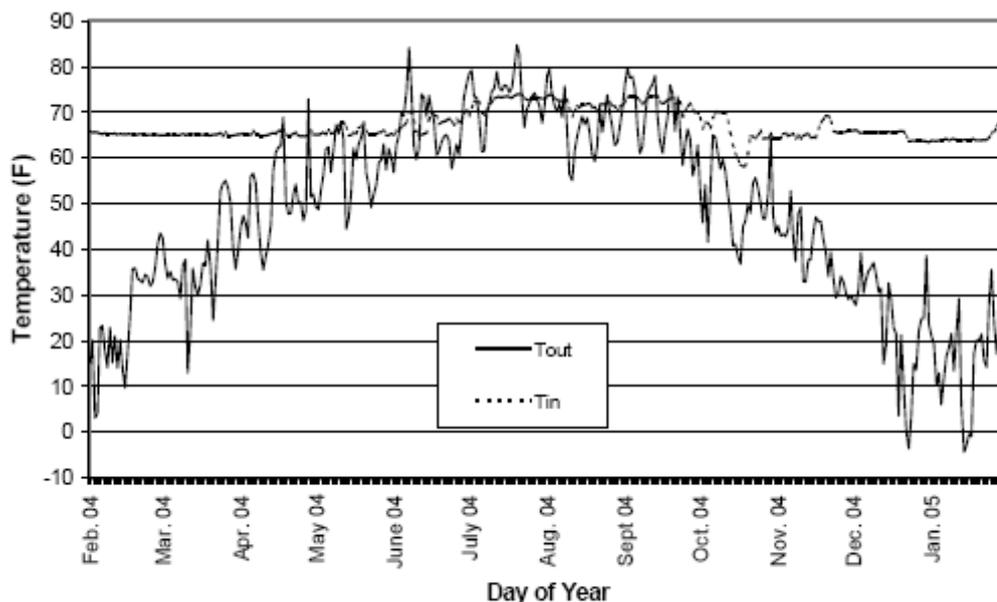


Figura 5. Medie giornaliere delle temperature interne ed esterne per l'anno di analisi

## GRANDEZZE AGGREGATE E INDICATORI

Dalle quantità di prestazione rappresentabili è possibile estrarre le quantità aggregate.

La Tabella sotto riporta l'elenco delle quantità misurabili e significative per caratterizzare l'edificio da un punto di vista energetico. Come già detto, le quantità misurabili raccolte sottoforma di serie temporali (evidenziate in azzurro in tabella) possono essere sottoposte ad elaborazione (calcolo della media, mediana, varianza e scarto quadratico medio o deviazione standard) restituendo le grandezze aggregate definite sopra.

**Tabella 3: Elenco delle quantità misurabili e rappresentabili. In azzurro sono evidenziate le grandezze aggregate**

<i>N.ro</i>	<i>Grandezze legate alla prestazione</i>	<i>Frequenza di misurazione</i>
1	<i>Energia usata per la distribuzione dell'aria</i>	Serie temporale
2	<i>Domanda di energia elettrica dell'edificio</i>	Mensile
3	<i>Energia usata dall'edificio</i>	Serie temporale
4	<i>Energia usata per l'illuminazione dell'edificio</i>	Serie temporale
5	<i>Energia elettrica prodotta dal cogeneratore</i>	Serie temporale
6	<i>Combustibile usato dal cogeneratore</i>	Serie temporale
7	<i>Perdite del cogeneratore</i>	Serie temporale
8	<i>Energia termica prodotta dal cogeneratore</i>	Serie temporale
9	<i>Energia usata per il raffrescamento</i>	Serie temporale
10	<i>Perdite del sistema di generazione dell'energia elettrica</i>	Serie temporale
11	<i>Energia usata per l'illuminazione della facciata</i>	Serie temporale
12	<i>Produzione di energia del complesso edilizio</i>	Serie temporale
13	<i>Area Funzionale</i>	Una volta
14	<i>Area interna lorda</i>	Una volta
15	<i>Energia usata per il riscaldamento</i>	Serie temporale
16	<i>Energia usata dagli impianti di climatizzazione</i>	Serie temporale
17	<i>Temperatura interna di zona</i>	Serie temporale
18	<i>Energia usata per l'illuminazione installata</i>	Serie temporale
19	<i>Domanda di energia elettrica netta del complesso edilizio</i>	Serie temporale
20	<i>Energia netta usata dal complesso edilizio</i>	Serie temporale
21	<i>Fattore netto di carico del complesso edilizio</i>	Mensile
22	<i>Altra energia usata dall'edificio</i>	Serie temporale
23	<i>Altra produzione di energia elettrica del complesso di edifici</i>	Serie temporale
24	<i>Altra energia usata dagli impianti di climatizzazione</i>	Serie temporale
25	<i>Temperatura esterna</i>	Serie temporale
26	<i>Energia usata per lo spostamento delle persone</i>	Serie temporale
27	<i>Energia usata per l'illuminazione "Plug-in"</i>	-
28	<i>Energia usata per i carichi "Plug"</i>	Serie temporale
29	<i>Energia usata per il processo</i>	Serie temporale
30	<i>Produzione di energia da fotovoltaico</i>	Serie temporale
31	<i>Produzione di energia termica</i>	Serie temporale
32	<i>Domanda di energia elettrica totale del complesso edilizio</i>	Mensile
33	<i>Energia totale usata dal complesso edilizio</i>	Serie temporale
34	<i>Produzione di energia dal vento</i>	Serie temporale

Come già detto indagini comparative tra edifici sono possibili solo a seguito dell'applicazione di opportune tecniche di normalizzazione.

La Tabella sotto riporta i fattori di normalizzazione delle grandezze energetiche.

**Tabella 4: Fattori di normalizzazione delle grandezze energetiche**

Codice su Schema	Tipo Grandezza	*Grandezza Assoluta	Indicatori								Valori			
			per m3,risc	per m2,pav	per GG,risc	per m3,risc e GG,risc	per occupant e	per postazio ne lavoro	per unità di prodott o finito	per ore di esercizio delle attività	**Bench mark	Soglia	Allarme	
1	Energetica	kWhel,illu												
2	Energetica	kWhrisc												
	...													

Di seguito si riportano i principali indici di valutazione delle condizioni ambientali all'interno degli edifici:

**Indice:** PMV - Voto medio previsto

$$PMV = [0.303 \exp(-0.036M) + 0.028]L$$

**Unità di misura:** [-]

**Grandezze da misurare per calcolare l'indice:**

$t_a$  – Temperatura dell'aria [°C]

$\bar{t}_r$  – Temperatura media radiante [°C]; (può essere calcolata dalle misure di temperatura globotermometrica, di temperature piane radianti o di temperature superficiali ed i fattori di vista)

$v_a$  – Velocità dell'aria [ms<sup>-1</sup>]

R.H. – Umidità relativa [%]

**Grandezze da assumere per calcolare l'indice:**

M – Flusso metabolico [Wm<sup>-2</sup>]; (vedi UNI EN ISO 7730)

$I_{cl}$  – Isolamento dell'abbigliamento [m<sup>2</sup>KW<sup>-1</sup>]; (vedi UNI EN ISO 7730)

**Note:**

- combina tutti gli scambi di calore, sensibile e latente, tra corpo umano ed ambiente in un unico indice, che esprime la sensazione termica plausibilmente percepita dall'utente

**Indice:** PPD – Percentuale prevista degli insoddisfatti

$$PPD = 100 - 95 \exp[-(0.03353 \cdot PMV^4 + 0.2179 \cdot PMV^2)]$$

**Unità di misura:** [%]

**Grandezze da misurare per calcolare l'indice:**

$t_a$  – Temperatura dell'aria [°C]

$\bar{t}_r$  – Temperatura media radiante [°C]; (può essere calcolata dalle misure di temperatura globotermometrica, di temperature piane radianti o di temperature superficiali ed i fattori di vista)

$v_a$  – Velocità dell'aria [ms<sup>-1</sup>]

R.H. – Umidità relativa [%]

**Grandezze da assumere per calcolare l'indice:**

M – Flusso metabolico [Wm<sup>-2</sup>]; (vedi UNI EN ISO 7730)

$I_{cl}$  – Isolamento dell'abbigliamento [m<sup>2</sup>KW<sup>-1</sup>]; (vedi UNI EN ISO 7730)

**Note:**

- mette in relazione PMV ed insoddisfatti

**Indice:** ET\* – Nuova temperatura effettiva; SET\* - Temperatura effettiva standard

$ET^* = t_o + w_{im} LR(p_a - 0.5p_{ET^*,s})$ ; esistono altri algoritmi semplificati non iterativi

**Unità di misura:** [°C]

**Grandezze da misurare per calcolare l'indice:**

$t_o$  – Temperatura operativa [°C]; (può essere calcolata dalle misure di temperatura dell'aria e di temperatura media radiante)

$p_a$  – Pressione parziale del vapore [kPa]

$v_a$  – Velocità dell'aria [ $ms^{-1}$ ]

**Grandezze da assumere per calcolare l'indice:**

$p_{ET^*,s}$  – Pressione del vapor saturo [kPa]

$w$  – Umidità della pelle [-]

$i_m LR$  – indice di permeabilità al vapore, rapportato alla relazione di Lewis [K  $kPa^{-1}$ ]

**Note:**

- Combina temperatura e umidità in un unico indice di benessere termico
- per il calcolo della temperatura equivalente è necessario il modello a due nodi del corpo umano per calcolare la temperatura prevista del corpo; è possibile in alternativa utilizzare delle tabelle con dei set di equivalenze tra SET e temperatura del corpo umano

**Indice:** WBGT – Temperatura a bulbo umido globotermometrica

$WBGT = 0,7t_{nwb} + 0,2t_g + 0,1t_a$  (per esterni);  $WBGT = 0,7t_{nwb} + 0,3t_g$  (per interni)

**Unità di misura:** [°C]

**Grandezze da misurare per calcolare l'indice:**

$t_a$  – Temperatura dell'aria [°C]

$t_g$  – Temperatura globotermometrica [°C]

$t_{nwb}$  – Temperatura a bulbo umido (con ventilazione naturale) [°C]

**Note:**

- Indica l'effetto combinato della temperatura dell'aria, dello scambio termico radiativo a bassa temperatura, della radiazione solare e dei movimenti d'aria
- È un indice di stress termico

**Indice:** ST – Temperatura soggettiva

$ST = 0,56t_a + 0,44\bar{t}_r$  (per  $v < 0,15 ms^{-1}$ );

$ST = 0,44\bar{t}_r + 0,56 \cdot (5 - \sqrt{10v}) (5 - t_a) / 0,44 + 0,56\sqrt{10v}$  (per  $v > 0,15 ms^{-1}$ );

$ST = t_g + 2,8 \cdot (1 - \sqrt{10v}) / 0,44 + 0,56\sqrt{10v}$  (per misure con globotermometro);

**Unità di misura:** [°C]

**Grandezze da misurare per calcolare l'indice:**

$t_a$  – Temperatura dell'aria [°C]

$t_g$  – Temperatura globotermometrica [°C]

$\bar{t}_r$  – Temperatura media radiante [°C]; (può essere calcolata dalle misure di temperatura globotermometrica, di temperature piane radianti o di temperature superficiali ed i fattori di vista)

$v_a$  – Velocità dell'aria [ $ms^{-1}$ ]

**Note:**

- Fino ad una resistenza termica dell'abbigliamento di 1,5 clo e ad un flusso metabolico di  $150 Wm^{-2}$ , fornisce una buona approssimazione dell'equazione di comfort di Fanger
- È un indice privo di basi teoriche, tuttavia è di facile utilizzo e per condizioni prossime a quelle di comfort, dà buone corrispondenze con la temperatura effettiva standard

**Indice:** FLD – Fattore di luce diurna

$FLD = E_{in}/E_{out}$

**Unità di misura:** [%]

**Grandezze da misurare per calcolare l'indice:**

---

E – Illuminamento [lux]

---

**Note:**

---

- È un indice del livello di illuminazione naturale negli ambienti interni

**Indice:** DGI – Indice di abbagliamento da luce naturale

---

$$DGI = 10 \log_{10} 0,478 \cdot (L_s^{1,6} \Omega^{0,8} | L_b + (0,07 \omega^{0,5} \cdot L_s))$$

---

**Unità di misura:** [-]

---

**Grandezze da misurare per calcolare l'indice:**

---

L – Luminanza [cd m<sup>-2</sup>]

---

**Note:**

---

- È un indice della qualità dell'ambiente visivo

## MODELLISTICA

### Introduzione

Nella presente sezione è approfondita la fase di post-processing relativa a valutazioni sulla prestazione energetica e climatica indoor degli edifici, con particolare riferimento all'applicazione di alcune tecniche di modellazione inversa. Al fine di esemplificare i fondamenti teorici che si tratteranno, si è ritenuto utile presentare alcuni dei risultati emersi da un caso studio sviluppato su un edificio per il terziario (Palazzo Ciocca, sede del comune di Livorno Feraris – Vercelli). Per l'applicazione in esame sono stati effettuati sopralluoghi e rilievi per l'identificazione dei parametri di maggiore interesse necessari alla caratterizzazione energetica del sistema edificio impianto, alle successive analisi numeriche in regime dinamico, e alla redazione di protocolli di monitoraggio.

In particolare sono stati rilevate:

- proprietà geometriche;
- caratteristiche termofisiche dei componenti opachi e trasparenti;
- destinazione d'uso dell'edificio;
- profilo di occupazione;
- tipologia e numero di apparecchiature presenti in ambiente;
- caratteristiche dell'impianto di riscaldamento/climatizzazione presente;
- tipologia di sistema di distribuzione idronica e/o aeraulica;
- numero, tipologia e potenza termica dei terminali presenti in ambiente (radiatori e/o fan-coil a seconda dell'applicazione);
- sistema di regolazione.

Sulla base delle informazioni individuate è stato prodotto un protocollo di monitoraggio con l'identificazione delle grandezze da misurare, la specificazione della modalità di misura in relazione all'applicazione considerata, le caratteristiche tecnologiche e metrologiche della strumentazione da installare, la mappatura dei punti in pianta per il posizionamento e il numero delle sonde, il posizionamento dei contatori di energia termica in centrale e dei contatori di energia all'interno del quadro elettrico.

Il microclima degli ambienti è monitorato con rilevamento di T e UR interna ed esterna, sia con metodologia tradizionale (datalogger autonomi) che con il sistema wireless. E' monitorata inoltre la concentrazione di CO2 interna ed esterna attraverso l'utilizzo di sonde tradizionali alimentate dalla rete elettrica ma collegate al modulo wireless che acquisisce e invia al data-storage il valore della grandezza misurata. Vi è una contabilizzazione diretta tramite sistema ad ultrasuoni dell'energia termica erogata dalla caldaia attraverso la misura della portata e delle temperature di mandata e ritorno del fluido termovettore, nonché dell'energia elettrica assorbita dalla pompa (quest'ultima per verificare la possibilità di individuare una correlazione tra l'energia elettrica della pompa e la portata in volume veicolata, e l'errore legato a una misura indiretta di tale natura). Sulla base dei dati di monitoraggio energetico ed ambientale sono state applicate alcune tecniche di modellazione inversa in regime stazionario per caratterizzarne la prestazione in funzione delle variabili monitorate di maggiore interesse.

Parallelamente all'attività sperimentale, sono state condotte analisi numeriche attraverso il codice di simulazione dinamica Energy Plus. La finalità delle analisi numeriche condotte è legata alla necessità di calibrare le condizioni al contorno del modello numerico in modo che il consumo energetico monitorato sia molto prossimo a quello predetto attraverso la simulazione numerica (simulazione calibrata). In questo modo, sulla base del modello calibrato, potranno reiterarsi numerosi scenari energetici con risultati di

output affidabili per ogni sistema edificio-impianto analizzato, simulando gli effetti di possibili interventi di retrofit energetico.

Inoltre i risultati delle simulazioni numeriche effettuate sono stati utilizzati per condurre analisi inverse con il fine di individuare equazioni di regressione di facile implementazione che facessero emergere il legame tra il fabbisogno energetico e le variabili indipendenti di maggiore influenza (analisi di sensibilità).

### **Studio e sviluppo di modelli inversi per la modellazione del sistema edificio impianto a partire dai dati monitorati**

Sono state analizzate e studiate le diverse metodologie di analisi energetica basate sull'approccio inverso con il fine di valutare lo stato dell'arte e determinare formulazioni matematiche e tecniche di modellazione per l'applicazione della metodologia al caso studio individuato.

L'attività di studio ha comportato dapprima un'analisi critica delle metodologie generali di modellazione per la valutazione energetica del sistema edificio-impianto (approccio diretto o forward approach e approccio inverso o inverse approach) con il fine di evidenziare i vantaggi e gli svantaggi connessi al loro utilizzo, nonché le criticità correlate rispetto alla natura dei dati a disposizione, e lo scopo della diagnosi da condurre. Attraverso la modellazione inversa si opera un'analisi empirica sulla prestazione dell'edificio al fine di individuare le variabili che maggiormente influenzano la sua prestazione. E' inoltre possibile valutare e stimare le cause di scostamento tra il consumo monitorato e il fabbisogno calcolato (individuando le cause che dipendono dal comportamento dell'utente) o valutare il potenziale risparmio energetico direttamente legato all'intervento di retrofit effettuato (normalizzando rispetto alle altre possibili cause).

Sono stati pertanto valutati tutti i metodi basati su modellazione forward, dai semplificati (metodo dei gradi giorno, metodo bin) a quelli complessi (metodi in regime dinamico), osservando che la difficoltà della modellazione è funzione dell'accuratezza attesa dei risultati, del regime utilizzato (stazionario, quasi stazionario o dinamico) e del passo temporale adottato per la simulazione. Inoltre, per un'analisi dettagliata, l'approccio diretto richiede una conoscenza molto particolareggiata della modalità di gestione dell'edificio e di tutti i fenomeni fisici che influenzano la prestazione energetica risultando spesso complesse modellazioni che permettano la simulazione della reale prestazione energetica del sistema edificio-impianto analizzato.

Un differente approccio per l'analisi energetica del sistema edificio-impianto è basato sull'analisi inversa. In questo caso le variabili di ingresso e di uscita sono note e l'obiettivo diventa la stima dei parametri e l'identificazione del modello matematico che definisce il loro legame. Per mezzo dell'analisi inversa è possibile operare diagnosi energetiche dell'edificio così come costruito (la valutazione del modello è condotta sulla base di dati misurati) consentendo spesso una più accurata valutazione del risparmio energetico conseguente ad azioni di riqualificazione, rispetto a un metodo diretto. Nello studio delle metodologie di modellazione data-driven, invece, sono stati analizzati sia l'approccio "empirico o black box", sia l'approccio della "simulazione calibrata", sia l'approccio a "scatola grigia". L'attenzione è stata rivolta in particolare all'approccio empirico, per il quale le variabili di ingresso (variabili regressori o forcing variables) e di uscita (variabili di risposta o dipendenti) sono note e l'obiettivo diventa la stima dei parametri e l'identificazione del modello matematico che definisce il loro legame.

I modelli inversi analizzati includono sia modelli in regime stazionario (regressione semplice o multi variabile con uno o più parametri) che modelli in regime dinamico (modelli ARMA, reti neurali). Nell'approccio empirico sono state analizzate le tecniche di regressione lineare ritenute più robuste per le applicazioni dell'analisi energetica quali quelle del tipo "change point" (con una o più variabili) o "Variable-Based Degree Day" (VBDD), con il fine di correlare la richiesta di energia con una o più variabili di influenza indipendenti.

Il più semplice modello data-driven stazionario è quello sviluppato attraverso la regressione dei dati del consumo energetico mensile e delle temperature medie registrate nel periodo di osservazione. I modelli a singola variabile possono essere applicati anche a dati giornalieri compensando le differenze come il

consumo dei giorni della settimana e del week-end separando i dati, di conseguenza, ed identificando separatamente modelli per ogni periodo.

Gli svantaggi dei modelli data-driven stazionari a singola variabile includono l'insensibilità ad effetti dinamici (p.e. la massa termica) ed a variabili diverse dalla temperatura (p.e. l'umidità e gli apporti solari), e l'inadeguatezza per alcuni edifici (p.e. edifici con forti carichi on/off dipendenti dall'andamento nel tempo o edifici con punti di cambio multipli). I modelli di regressione change-point lavorano meglio con i dati energetici da edifici con sistemi che tendono a mantenere la linearità con i carichi parziali (vale a dire sistemi che divengono meno efficienti come cominciano i cicli on/off con i carichi parziali).

Sono stati analizzati anche i modelli multi variabile. Il fine della modellazione del consumo di energia con l'approccio multi-variabile è quello di caratterizzare il consumo di energia dell'edificio con alcune variabili di input disponibili facilmente ed affidabili. Queste variabili di input dovrebbero essere selezionate con cura. Il modello deve contenere variabili non influenzate dagli interventi di retrofit ma suscettibili di cambiamento dal periodi pre-intervento a quello post-intervento (per esempio variabili climatiche).

Le variabili ambientali che incontrano questi criteri per la modellazione dei consumi di energia per riscaldamento e raffrescamento includono la temperatura a bulbo asciutto dell'aria esterna, la radiazione solare e l'umidità specifica esterna, la concentrazione di CO2 ecc.

I modelli change point sono risultati essere particolarmente adatti per la caratterizzazione dei dati energetico-ambientali monitorati per il caso di studio individuato. In questi modelli i dati sono organizzati statisticamente in intervalli, all'interno di ognuno dei quali vi è un diverso andamento dell'equazione che spiega i dati attraverso una regressione. Esistono diversi tipi di modelli poiché ognuno risulta essere adatto a specifiche caratteristiche del sistema edifico-impianto. Nella figura seguente sono presentati le forme più note di modelli "change-point", ossia con punto o più punti di cambio a singola variabile (solitamente la temperatura esterna media giornaliera) analizzati. I modelli si caratterizzano per il numero di parametri che caratterizzano l'equazione identificati con la lettera  $\beta$ .

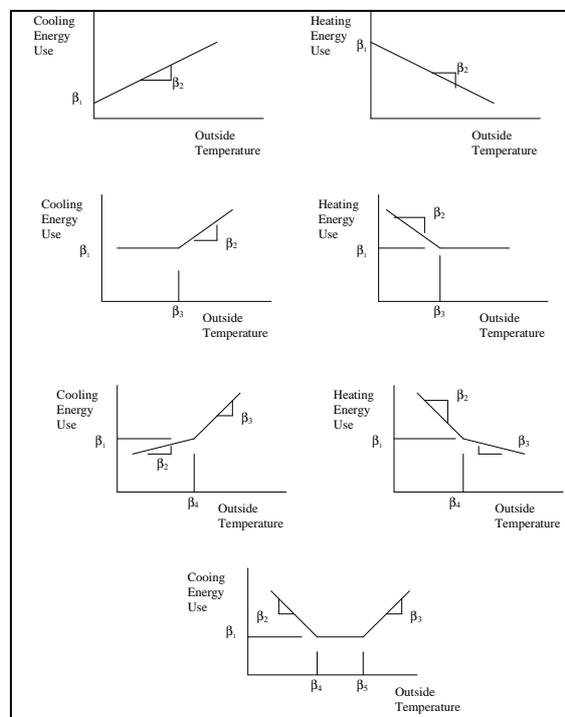


Figura 6. Prima riga dall'alto: modelli a due parametri per richiesta energetica in raffreddamento e riscaldamento. Seconda riga dall'alto: modelli a tre parametri per richiesta energetica in raffreddamento e riscaldamento. Terza riga dall'alto: modelli a 4 parametri per richiesta energetica in raffreddamento e riscaldamento. Riga in basso: : modelli a 5 parametri per richiesta energetica in raffreddamento e riscaldamento.

Modello stazionario a tre parametri in regime di riscaldamento e raffreddamento (3P)

$$Y_h = \beta_1 + \beta_2(X_1 - \beta_3)^-$$

$$Y_c = \beta_1 + \beta_2(X_1 - \beta_3)^+$$

Nelle equazioni  $\beta_1$  rappresenta il consumo di energia di base e  $\beta_2$  è la pendenza della retta di regressione per valori di temperatura esterna dopo il punto di cambio (change-point)  $\beta_3$ .

I segni + e - ad esponente indicano rispettivamente che sono considerati solamente i valori positivi in raffrescamento e negativi in riscaldamento.

Sono stati analizzati anche modelli risultato di combinazioni di modelli di regressione a tre parametri e multi variabile del tipo:

$$Y_h = \beta_1 + \beta_2(X_1 - \beta_3)^- + \beta_4 X_2 + \beta_5 X_3 + \beta_6 X_4$$

$$Y_c = \beta_1 + \beta_2(X_1 - \beta_3)^+ + \beta_4 X_2 + \beta_5 X_3 + \beta_6 X_4$$

dove  $X_1$  è tipicamente la temperatura media esterna, mentre  $X_2$ ,  $X_3$  e  $X_4$  sono ulteriori variabili indipendenti.

Modello stazionario a quattro parametri (4P)

$$Y = \beta_1 + \beta_2(X_1 - \beta_4)^- + \beta_3(X_1 - \beta_4)^+$$

Nell'equazione,  $\beta_1$  rappresenta l'energia di base relativa esattamente al punto di cambio  $\beta_4$ , mentre  $\beta_2$  e  $\beta_3$  sono le pendenze delle rette di regressione sopra e sotto il punto di cambio.

Sono stati analizzati anche modelli risultato di combinazioni di modelli di regressione a quattro parametri e multi variabile (4P-MVR) del tipo:

$$Y = \beta_1 + \beta_2(X_1 - \beta_4)^- + \beta_3(X_1 - \beta_4)^+ + \beta_5 X_2 + \beta_6 X_3$$

dove  $X_1$  è tipicamente la temperatura media esterna, mentre  $X_2$ ,  $X_3$  e  $X_4$  sono ulteriori variabili indipendenti.

Modello stazionario a cinque parametri (5P)

$$Y = \beta_1 + \beta_2(X_1 - \beta_4)^- + \beta_3(X_1 - \beta_5)^+$$

Nell'equazione  $\beta_1$  rappresenta il consumo di energia costante,  $\beta_2$  e  $\beta_3$  sono le pendenze sinistra e destra,  $\beta_4$  è il punto di cambio a sinistra e  $\beta_5$  è il punto di cambio a destra.

Sono stati analizzati anche modelli risultato di combinazioni di modelli di regressione a quattro parametri e multi variabile (5P-MVR) del tipo:

$$Y = \beta_1 + \beta_2(X_1 - \beta_4)^- + \beta_3(X_1 - \beta_5)^+ + \beta_6 X_2$$

dove  $X_1$  è tipicamente la temperatura media esterna mentre  $X_2$  è una variabile indipendente aggiuntiva. Sono state inoltre studiate le linee guida prodotte dall'ASHRAE, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, (Guideline 14-2002: Measurement of Energy and Demand Savings), attraverso le quali sono fornite indicazioni e metodologie per la misura del risparmio energetico conseguente ad azioni di retrofit attraverso modellazione inversa.

Le linee guida prodotte dall'ASHRAE forniscono indicazioni anche riguardo alle caratteristiche tecniche della strumentazione da utilizzare per il monitoraggio, alla gestione dei dati, alla tipologia di misura da effettuarsi, alle procedure per la misura dell'incertezza legata al risparmio e alle tecniche di regressione dei dati.

La metodologia indicata nelle linee guida è stata applicata al caso studio di Palazzo Ciocca, riscontrando che la criticità primaria dell'analisi non è tanto legata all'ottenimento del valore di risparmio energetico finale quanto alla scelta di un modello di regressione valido e robusto, con un basso livello di incertezza.

A supporto delle Guideline sviluppate dall'AHRAE sono state condotte simulazioni con analisi inverse con in codice sviluppato in ambiente fortran, a partire dai dati ottenuti dalla simulazione numerica dinamica e con il codice Energy plus dai dati monitorati, stimando i principali indicatori statistici per diversi modelli di regressione

**Tabella 5. Risparmio energetico calcolato sulla base della metodologia dettata dalle Guideline 14-2002: Measurement of Energy and Demand Savings sulla base del modello diretto calibrato del sistema edificio impianto di Palazzo Ciocca (sede del comune di Livorno Feraris – Vercelli)**

	Richiesta energetica riscaldamento[kWh/m2]				Richiesta energetica raffrescamento [kWh/m2]			
	Retrofitting	EnergyPlus	3PH-Tsa	3PH-T	Retrofitting	EnergyPlus	3PC-Tsa	3PC-T
		60,70	52,87	52,22		8,42	7,10	7,72
Retrofit.1	40,32	20,38	12,55	11,90	9,82	-1,40	-2,73	-2,10
Retrofit.2	64,86	-4,16	-11,99	-12,63	6,52	1,90	0,57	1,20
Retrofit.3	46,94	13,76	5,93	5,28	8,00	0,42	-0,90	-0,28
Retrofit.4	58,42	2,29	-5,54	-6,19	8,66	-0,24	-1,57	-0,94

Le ricerche effettuate hanno dimostrato che l'approccio inverso rappresenta una metodologia più esatta rispetto all'approccio diretto per la valutazione delle cause di scostamento tra il fabbisogno calcolato e quello reale e per indagare circa gli effetti e il peso relativo delle variabili o dei fattori di influenza. Questi fattori sono spesso legati al comportamento dell'utente e alla gestione del sistema edifico e quindi difficilmente schematizzabili per mezzo di un approccio diretto.

Con l'applicazione dell'approccio data-driven, invece, è possibile sviluppare metodologie statistiche al fine di identificare la relazione esistente tra il consumo energetico e le variabili di influenza così come il reale effetto di misure di contenimento della spesa di energia.

#### **Analisi della qualità dell'ambiente interno a partire dai dati di monitoraggio ambientali**

Ulteriore analisi effettuata è stata la valutazione della qualità dell'ambiente interno attraverso la metodologia fornita dalla norma UNI EN 15251.

L'analisi dei dati, secondo le indicazioni normative, parte dall'individuazione di locali rappresentativi del 95% delle condizioni ambientali dell'edificio (la norma non specifica come i locali rappresentativi vadano individuati, se, ad esempio, attraverso la scelta di un unico locale significativo, piuttosto che attraverso l'uso di pesi specifici (area, volume, etc.) per diversi locali.

È necessario poi individuare dei limiti (superiore ed inferiore) per le tre classi di comfort in cui l'edificio può essere classificato. Per edifici dotati di un impianto di climatizzazione, che prevede un completo controllo del microclima interno, i limiti vengono riportati nella stessa normativa. Per edifici ventilati naturalmente, invece, i limiti devono essere calcolati sulla base della temperatura corrente esterna, una temperatura in grado di rappresentare il clima esterno percepito dagli utenti, basata sulla temperatura esterna media giornaliera di alcuni giorni precedenti a quelli in analisi. Tale approccio fa riferimento alla teoria del comfort adattativo, la quale sostiene che il comfort percepito dagli utenti in locali ventilati naturalmente è influenzato da diversi fattori: culturali, comportamentali e psicologici. Proprio a causa di ciò, in simili

ambienti, gli utenti possono adattarsi al clima ed accettare condizioni microclimatiche diverse da quelle rigidamente fissate per un ambiente completamente controllato da impianti.

L'analisi dei dati può essere condotta verificando le ore di occupazione dell'edificio in cui gli ambienti ricadono in una certa categoria di comfort. L'edificio può essere classificato in una certa categoria solo se per un numero di ore maggiore del 95% le condizioni microclimatiche registrate ricadono entro i limiti della categoria stessa.

Un ulteriore metodo di analisi è quello dei gradi ora (degree hours criteria). Il tempo durante cui la temperatura eccede i limiti di un intervallo specificato (classe I, II o III), nel periodo di occupazione, è pesato attraverso dei fattori che sono una funzione del numero di gradi centigradi che la temperatura operativa ha assunto al di fuori dell'intervallo di tolleranza indicato.

Questa analisi va riferita al limite di superiore della classe nella fase di raffrescamento estivo ed al limite inferiore nella fase di riscaldamento invernale.

I due metodi descritti, per essere efficaci, non devono essere utilizzati uno in sostituzione dell'altro, ma integrati, al fine di avere una visione temporale ed una quantificazione basata su dei fattori di peso, del tempo in cui, nel locale/edificio in analisi, sono stati rispettati i limiti indicati dagli intervalli di benessere.

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

L'analisi permette inoltre di mettere in luce come non esista una sola possibile condizione di comfort negli edifici, ma che invece esistano intervalli di maggiore o minore tolleranza. Le classi di comfort più elevate possono essere raggiunte solo attraverso un forte consumo energetico, se l'involucro e l'impianto non sono stati adeguatamente progettati e se il comportamento degli utenti non è attento.

Attraverso un monitoraggio di lungo periodo viene infine messo in evidenza che un impianto non è in grado di mantenere costantemente le condizioni microclimatiche di set-up. L'obiettivo è tuttavia quello di mantenere scostamenti percentuali relativamente ridotti, accettabili per gli utenti. L'analisi da condurre deve comunque contemplare la valutazione dell'indice di scostamento per la grandezza di interesse con riferimento all'intervallo di comfort degli occupanti, e all'intervallo rispetto di set-point dell'impianto di climatizzazione. Sulla base dei dati di monitoraggio acquisiti nell'anno 2009 e 2010 è stata valutata la qualità dell'ambiente interno per l'edificio Palazzo Ciocca secondo la metodologia dettata dalla UNI EN 15251:2008. In particolare è stato analizzato sia il periodo di "free running" al fine di valutare la qualità dell'involucro nel mantenere l'ambiente termico qualitativamente accettabile, sia il periodo di riscaldamento con il fine di valutare la qualità del sistema impiantistico nel garantire un ambiente termico qualitativamente accettabile.

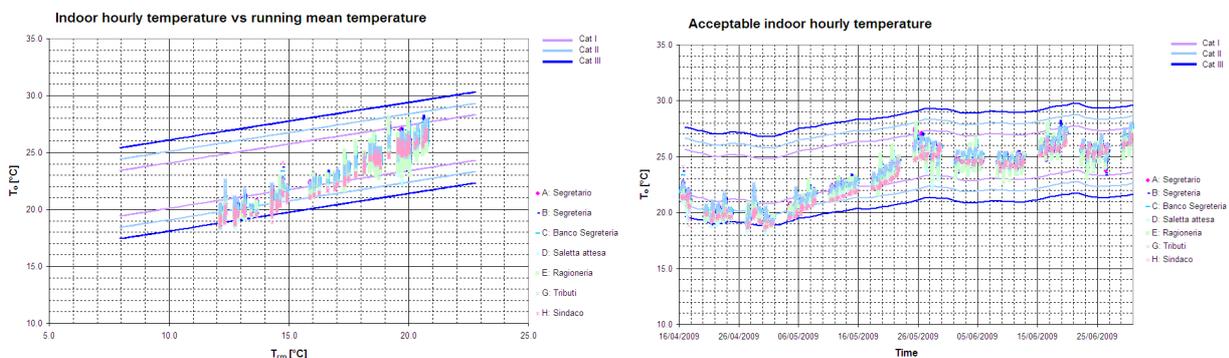


Figura 7. Analisi della qualità dell'ambiente interno secondo la metodologia dettata dalla UNI EN 15251:2008 per il caso studio "Palazzo Ciocca (sede del comune di Livorno Ferraris – Vercelli)" nel periodo di free-running

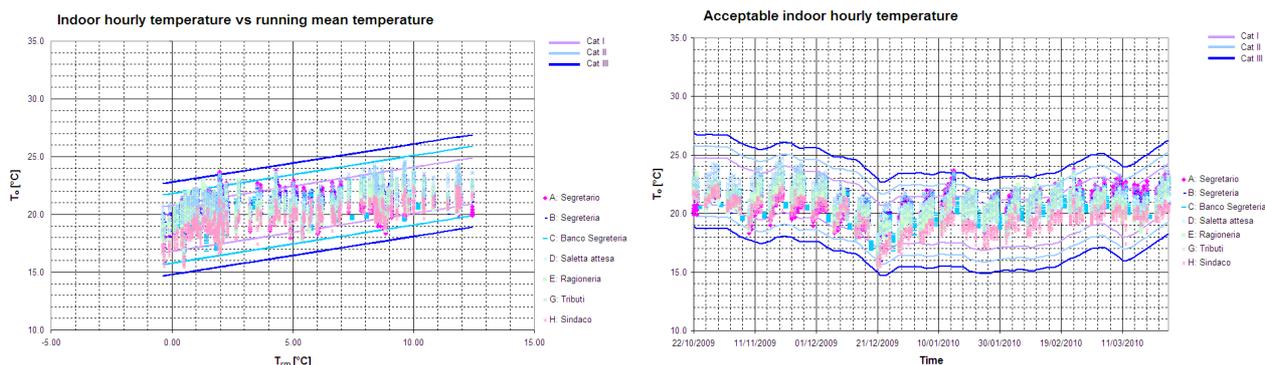


Figura 8. Analisi della qualità dell'ambiente interno secondo la metodologia dettata dalla UNI EN 15251:2008 per il caso studio "Palazzo Ciocca (sede del comune di Livorno Ferraris – Vercelli)" nel periodo di riscaldamento

Tabella 6. Qualità dell'ambiente interno espressa in percentuale di tempo nelle quattro categorie

Qualità dell'ambiente interna espressa in % di tempo nelle quattro categorie				
Percentuale	1	13	18	68
Ambiente termico	IV	III	II	I

Failure index riferito al limite superiore e inferiore di ogni categoria

$FI_{U, I} = 1\%$  ;  $FI_{L, I} = 31\%$   
 $FI_{U, II} = 0\%$  ;  $FI_{L, II} = 14\%$   
 $FI_{U, III} = 0\%$  ;  $FI_{L, III} = 1\%$

## Applicazione della modellazione inversa

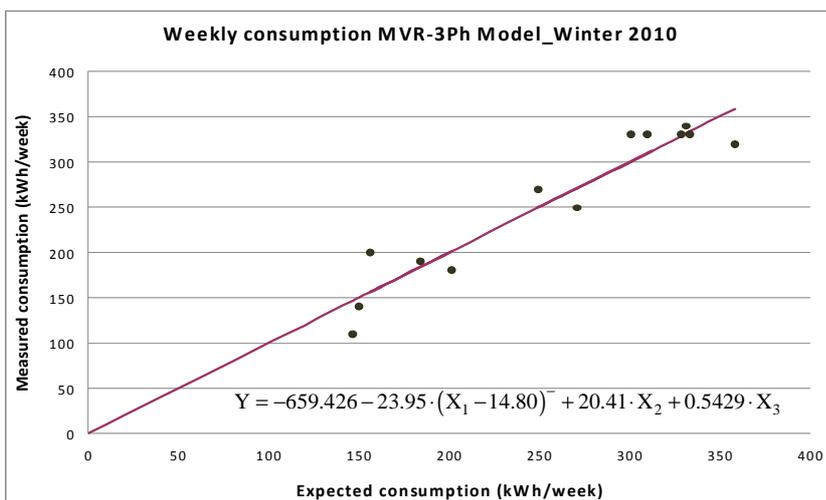
### 1) Analisi dei dati di monitoraggio stagione 2009/2010

Di seguito sono riportati i principali risultati ottenuti per l'applicazione in esame con riferimento all'applicazione di modelli inversi del tipo change-point a singola variabile o multi variabile. Di seguito è riportata una tabella riassuntiva in cui risultano evidenziati la base temporale presa a riferimento per l'analisi, la tipologia e il numero di variabili indipendenti selezionate e il valore dei principali parametri statistici che forniscono la qualità del modello e dei parametri individuati.

CASO STUDIO: Terziario - Palazzo Ciocca (sede del comune di Livorno Ferraris – Vercelli):

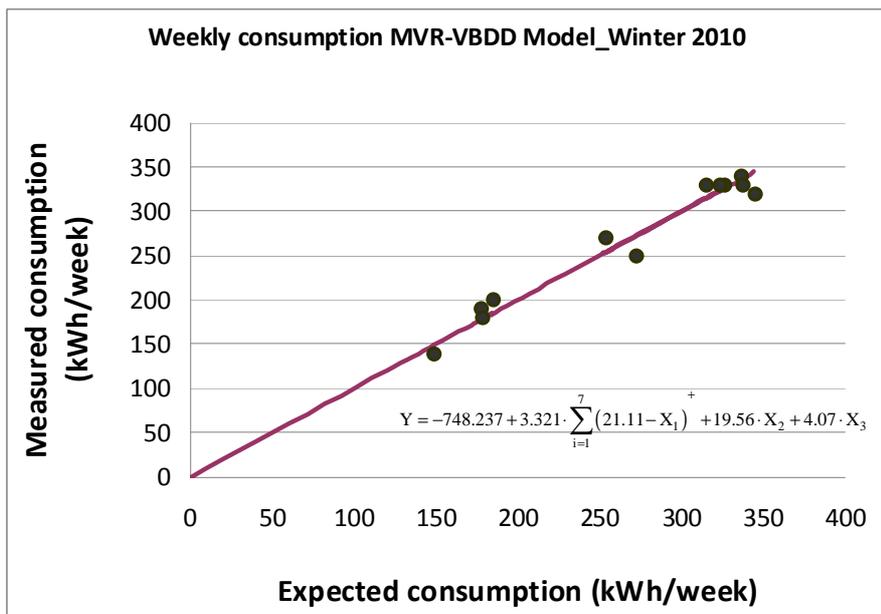
Case study	Model	Observations	Indipendent variables	R2	RMSE	CV-RMSE	p	DW
CIOCCA	2P	Week	Text	0.901	27,0058	10,575	-0,127	1,810
	3Ph	Week	Text	0.898	27,4451	10,747	-0,078	1,731
	4Ph	Week	Text	0.945	21,2099	8,305	-0,512	2,874
	MVR-3Ph	Week	Text, Tint, Irr	0.908	28,8809	11,309	-0,085	1,761
	MVR-4Ph	Week	Text, Tint, Irr	0.946	23,5117	9,206	-0,579	3,030
	VBDD	Week	Text	0.922	23,9412	9,375	-0,281	2,194
	VBDD-MVR	Week	Text, Tint, Irr	0.966	17,4457	6,831	0,057	1,544

Tabella 7 - Valori dei principali indicatori statistici in funzione del modello matematico utilizzato, della base temporale presa a riferimento e delle variabili indipendenti selezionate per l'applicazione "Palazzo Ciocca (sede del Comune di Livorno Ferraris – Vercelli)"



Case study	CIOCCA
Model	MVR-3Ph
Observations	Week
Indipendent variables	Text, Tint, Irr
R2	0.908
RMSE	28,8809
CV-RMSE	11,309
p	-0,085
DW	1,761

Figura 9. Energia misurata in funzione dell'energia predetta attraverso il modello di regressione (modello MRV-3Ph)



Caso studio	CIOCCA
Modello	VBDD-MVR
Osservazioni	Week
Variabili indipendenti	Text, Tint, Irr
R2	0.966
RMSE	17,4457
CV-RMSE	6,831
p	0,057
DW	1,544

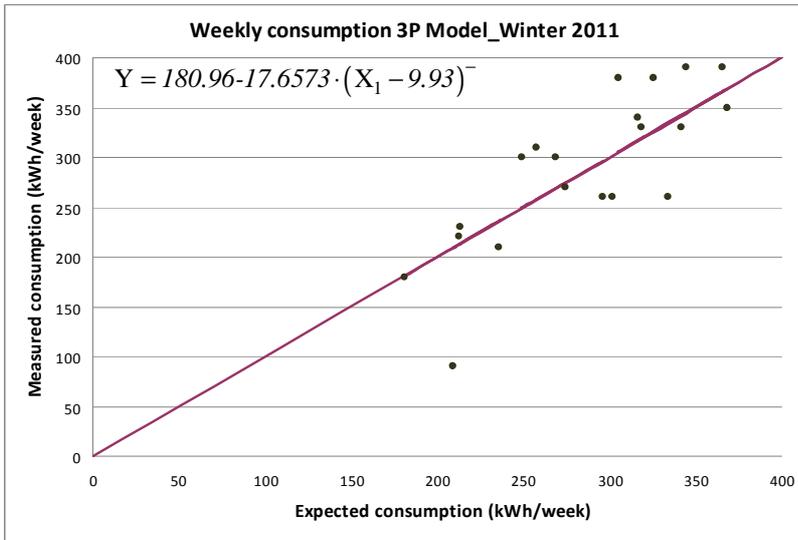
Figura 10. Energia misurata in funzione dell'energia predetta attraverso il modello di regressione (modello VBDD-MRV)

## F2) Analisi dei dati di monitoraggio stagione 2010/2011

L'analisi effettuata ha consentito da una parte di individuare i modelli più adatti per i dati energetico-ambientali misurati e dall'altra di costruire modelli più robusti sulla base dei dati di monitoraggio di entrambe le stagioni, 2009/2010 e 2010/2011. Inoltre il sistema di monitoraggio è stato potenziato e migliorato sulla base dell'esperienza accumulata relativamente alle problematiche di trasmissione riscontrate nella stagione 2009/2010.

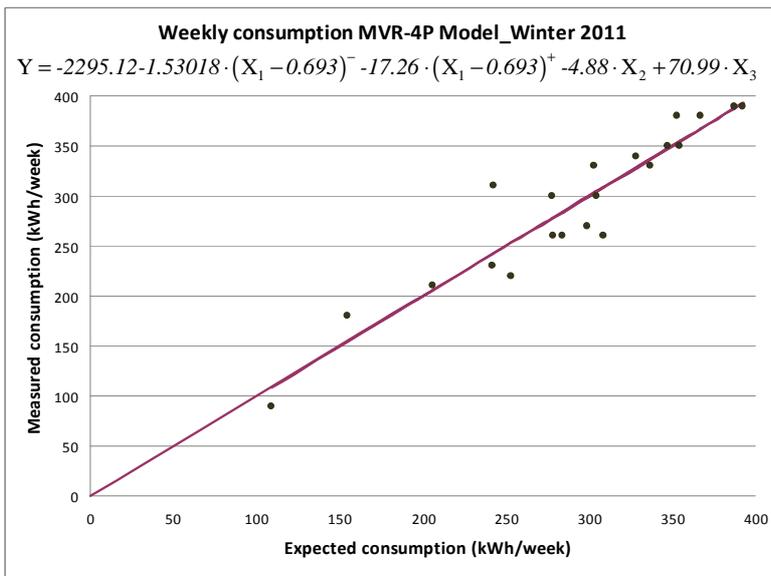
**Tabella 8. Valori dei principali indicatori statistici in funzione del modello matematico utilizzato, della base temporale presa a riferimento e delle variabili indipendenti selezionate per l'applicazione "Palazzo Ciocca (sede del Comune di Livorno Ferraris – Vercelli)"**

Caso studio	Modello	Osservazioni	Variabili indipendenti	R2	RMSE	CV-RMSE	p	DW
CIOCCA	2P	Week	Text	0.613	49.38	16.92	0.02	1.59
	3Ph	Week	Text	0.617	49.15	16.84	0.00	1.63
	4Ph	Week	Text	0.65	48.25	16.53	0.00	1.61
	MVR-3Ph	Week	Text, Irr	0.618	50.38	17.26	0.07	1.54
	MVR-3Ph	Week	Text, Tint	0.810	35.59	12.19	-0.36	2.38
	MVR-3Ph	Week	Text, Tint, Irr	0.871	30.19	10.34	-0.09	1.85
	MVR-4Ph	Week	Text, Irr	0.659	48.97	16.78	0.18	1.44
	MVR-4Ph	Week	Text, Tint	0.811	36.47	12.49	-0.17	2.01
	MVR-4Ph	Week	Text, Tint, Irr	0.889	28.84	9.88	-0.01	1.66



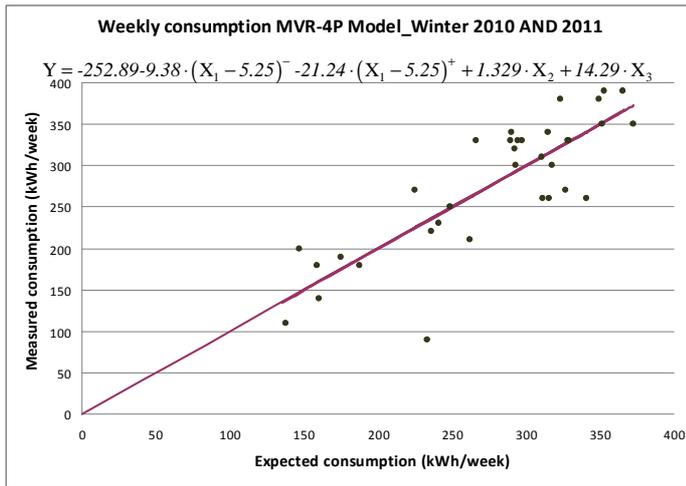
Caso studio	CIOCCA
Modello	3p
Osservazioni	Week
Variabili indipendenti	Text
R2	0,62
RMSE	49,15
CV-RMSE	16
p	0,04
DW	1,659

Figura 11. Energia misurata in funzione dell'energia predetta attraverso il modello di regressione (modello 3ph)



Caso studio	CIOCCA
Modello	MVR - 4p
Osservazioni	Week
Variabili indipendenti	Text, Tint, Irr
R2	0,889
RMSE	28,83
CV-RMSE	9,8
p	-0,014
DW	1,659

Figura 12. Energia misurata in funzione dell'energia predetta attraverso il modello di regressione (MRV-4ph)



Caso studio	CIOCCA
Modello	MVR – 4p
Osservazioni	Week
Variabili indipendenti	Text, Tint, Irr
R2	0,695
RMSE	47,21
CV-RMSE	16,9
p	0,326
DW	1,344

Figura 13. Energia misurata in funzione dell'energia predetta attraverso il modello di regressione (MRV-4ph)

I risultati ottenuti con l'attività sviluppata consentono di trarre le seguenti osservazioni generali circa i vantaggi connessi all'applicazione della modellazione inversa:

- i modelli a singola variabile sono semplici e di immediata comprensione;
- in generale, le simulazioni multi-variabile migliorano la capacità previsionale dei modelli;
- è possibile relazionare consumi energetici a variabili legate all'occupazione, come la concentrazione di anidride carbonica in ambiente e la temperatura interna impostata;
- l'analisi inversa è risultata essere una buona metodologia per investigare gli effetti dei principali fattori influenzanti nell'analisi energetica degli edifici;

Riassumendo l'esperienza condotta ha premesso di raggiungere i seguenti obiettivi successivamente mutuabili nel progetto in corso, per il quale non sono ancora disponibili dati per eseguire specifiche analisi :

- analisi delle metodologie di modellazione inversa e sviluppo di modelli di regressione adattati alle diagnosi energetiche del sistema edificio-impianto;
- implementazione delle metodologie di analisi inversa a partire da dati ottenuti attraverso la simulazione numerica in regime dinamico e attraverso il monitoraggio.
- analisi delle criticità di installazione e configurazione del sistema di monitoraggio progettato;
- conoscenza finalizzata all'ottimizzazione del processo di monitoraggio e all'analisi dei dati per il servizio di diagnosi energetica di edifici a destinazione d'uso terziaria;
- analisi delle problematiche tecniche di installazione dei sistemi di monitoraggio ambientali ed energetici;
- sviluppo di metodologie statistiche per identificare la relazione tra usi energetici e fattori influenzanti e gli effetti di future strategie di risparmio energetico.

## DIAGNOSTICA

Di seguito è presentata una metodologia diagnostica finalizzata a supportare la complessa operazione decisionale legata all'individuazione delle cause connesse alle anomalie riscontrabili, a partire dai dati di monitoraggio pre-elaborati attraverso la definizione di grandezze aggregate. L'approccio adottato prevede che la tabella sia strutturata secondo la suddivisione logica di tre diversi elenchi di possibili sintomi o anomalie, di eventi connessi all'anomalia, e delle cause effettive, raccolti e organizzati con le dizioni condivise di *preprocessing*, *situation assessment* e *causes*. La tabella è caratterizzata da tre elenchi in colonna indipendenti nel senso che non esiste una connessione diretta e biunivoca per ogni riga, ma più elementi di una colonna possono riferirsi a uno o più elementi delle altre colonne. Come sarà più chiaro in seguito l'obiettivo dell'analisi è risultato primariamente l'individuazione dei legami esistenti tra questi elementi.

Nella fase di pre-processing, nella prima colonna della tabella, sono individuate e assegnate delle qualità alle grandezze oggetto di monitoraggio organizzate in forma aggregata, con il fine di identificare criteri di soglia attraverso cui attivare il processo di diagnostica e riconoscimento delle possibili cause all'origine dell'evento. Le grandezze energetiche elencate sono organizzate specificandone la natura (elettrica o termica) e secondo gli usi finali associati (riscaldamento, raffreddamento, illuminazione, forza elettromotrice, emergenza).

Sulla base delle serie storiche dei dati di monitoraggio e dell'analisi di pre-elaborazione (valore medio, valore massimo ecc.) sono individuati principi qualitativi che evidentemente richiedono la valutazione di valori o criteri di riferimento su cui possa fondarsi il loro significato. Pertanto qualità assegnate alle grandezze, quali "trend anomalo", o "cambio del valor medio" o "picco" richiedono l'individuazione di valori, criteri o regole perché possano compiutamente risultare indicative nell'attivazione del processo diagnostico. E' utile osservare che la definizione dei criteri di riferimento può avvenire solo sulla base della serie di dati storici a disposizione per l'edificio in esame e in relazione all'obiettivo della diagnosi che si vuole effettuare: sulla base di queste informazioni l'utilizzo di modelli inversi predittivi attraverso cui è possibile caratterizzare dal punto di vista energetico ed ambientale il sistema edificio sulla base dei dati di monitoraggio, risultano efficaci a tale scopo. In tal senso i criteri di allarme o di soglia necessari a esprimere il significato alle qualità delle grandezze aggregate risultano variabili nel tempo e funzione dell'andamento delle variabili forzanti individuate nei modelli predittivi, che quindi, secondo tale approccio, avranno carattere adattativo rispetto alla loro identificazione.

Al fine di facilitare la connessione esistente tra il sintomo riscontrato attraverso la metodologia esposta (basata sul pre-processing dei dati e sull'individuazione di criteri di soglia), e le effettive cause, seguendo un approccio basato su un frame work concettuale, nella seconda colonna della tabella sono elencati i possibili eventi origine del sintomo. La valutazione degli eventi rappresenta un livello intermedio di natura inferenziale attraverso cui risulta più efficace l'individuazione delle effettive cause e della loro connessione ai descrittori individuati attraverso i dati di monitoraggio.

Infine nella terza colonna della tabella sono elencate le possibili cause che hanno indotto il processo di analisi diagnostica, attraverso la cui individuazione è possibile attivare il processo di ottimizzazione per mezzo di strategie di intervento. Le cause individuate sono riferite sia a comportamenti impropri dell'utente (l'effetto del comportamento dell'utente sulla richiesta energetica dell'edificio è un tema di grande importanza e peso), sia a malfunzionamenti o guasti di componenti dei sistemi impiantistici, sia a possibili errori progettuali o di settaggio.

Al fine di identificare il grado di relazione logica esistente tra gli elementi facenti parte delle colonne della tabella sopra descritte sono stati sviluppati degli alberi decisionali.

La costruzione degli alberi decisionali si è basata sull'identificazione della relazione esistente tra ciascuna causa e i relativi *situation assessment* e tra questi e gli output del processo di pre-processing. Per ogni causa, pertanto, identificata con la lettera C negli schemi di seguito riportati, è stato sviluppato un albero decisionale attraverso l'individuazione logica della connessione esistente tra questa e una o più *situation assessment* (indicate con la lettera S) e tra ogni *situation assessment* individuata e gli output del processo

di pre-processing delle grandezze oggetto di monitoraggio (indicati con la lettera P). Attraverso tale metodologia, pertanto, è stato condotto uno sviluppo della tabella strutturata al fine di chiarire tutte le possibili associazioni di ciascuna causa agli eventi connessi e poi alla grandezza energetica o ambientale misurata che ha assunto un valore limite e o di soglia tale da attivare il processo diagnostico.

Lo sviluppo degli alberi decisionali per tutte le cause elencate nella tabella rappresenta un passo fondamentale per la successiva individuazione e formalizzazione di una procedura di supporto decisionale all'operazione di diagnostica e poi di ottimizzazione.

Attraverso tale fase, infatti, potranno individuarsi sulla base delle grandezze aggregate e dei criteri di soglia che attivano il processo diagnostico l'elenco delle cause più probabili associate alle anomalie riscontrate.

**Tabella 9: Tabella di diagnostica**

<b>PREPROCESSING</b>	<b>SITUATION ASSESSMENT</b>	<b>CAUSES</b>
<i>Sintomo o anomalia riscontrabile attraverso la lettura dei dati di monitoraggio</i>	<i>Individuazione dell'evento origine del sintomo</i>	<i>Causa effettiva dell'evento</i>
<b>P1.</b> Picco di consumo energia elettrica (illuminazione)	S1. Accensione contemporanea di un numero anomalo di utenze elettriche rispetto al livello di occupazione (illuminazione)	C1. Sostituzione apparecchi di illuminazione con altri di diversa potenza
<b>P2.</b> Picco di consumo energia elettrica (climatizzazione)	S2. Accensione impianti, strumentazione o terminali per il riscaldamento al di fuori dell'orario previsto di funzionamento	C2. Guasto dell'orologio in centrale termica
<b>P3.</b> Picco di consumo energia termica o risorsa energetica (riscaldamento)	S3. Accensione contemporanea di un numero anomalo di utenze elettriche rispetto al livello di occupazione (f.e.m)	C3. Guasto localizzato impianto termico (malfunzionamento o rottura delle pompe di circolazione) per il circuito di riscaldamento
<b>P4.</b> Picco di consumo energia termica (raffreddamento)	S4. Immissione incontrollata di aria esterna (apertura finestre)	C4. Guasto localizzato impianto termico (malfunzionamento o rottura ventilatori)
<b>P5.</b> Trend anomalo di energia termica rispetto all'andamento storico ricorrente (riscaldamento)	S5. Impostazione anomala set-point termostato locale	C5. Guasto localizzato impianto termico (malfunzionamento o rottura macchina frigorifera)
<b>P6.</b> Trend anomalo di energia termica rispetto all'andamento storico ricorrente (raffreddamento)	S6. Accensione impianti, strumentazione o terminali per il raffrescamento al di fuori dell'orario previsto di funzionamento	C6. Guasto localizzato impianto (malfunzionamento o rottura generatore di calore a combustione)
<b>P7.</b> Trend anomalo di energia elettrica rispetto all'andamento storico ricorrente (raffreddamento)	S7. Accensione utenze elettriche locali al di fuori degli orari di lavoro (f.e.m)	C7. Rottura termostato ambiente
<b>P8.</b> Trend anomalo di energia elettrica rispetto all'andamento storico ricorrente (illuminazione)	S8. Accensione apparecchi di illuminazione degli spazi comuni al di fuori degli orari di lavoro	C8. Rottura o malfunzionamento del terminale di emissione in ambiente (riscaldamento)
<b>P9.</b> Cambio del valore medio di potenza elettrica assorbita (illuminazione)	S9. Elevate perdite energetiche al sottosistema di distribuzione	C9. Rottura o malfunzionamento del terminale di emissione in ambiente (raffrescamento)
<b>P10.</b> Cambio del valore medio di potenza elettrica assorbita (raffreddamento)	S10. Locali serviti dall'impianto di illuminazione in assenza di occupanti	C10. Distacco per sovraccarico o sospensione servizio
<b>P11.</b> Cambio del valore medio di potenza termica assorbita (riscaldamento)	S11. Accensione di sistemi di riscaldamento ausiliari energivori (stufette elettriche)	C11. Apertura finestra da parte dell'utente
<b>P12.</b> Cambio del valore medio di potenza termica assorbita (raffreddamento)	S12. Insufficiente potenza termica dell'impianto di riscaldamento	C12. Cambio impostazione set-point termostato locale da parte dell'utente
<b>P13.</b> Picco di temperatura dell'aria interna	S13. Insufficiente potenza termica utile emessa dall'impianto di raffrescamento	C13. L'occupante lascia utenze elettriche alimentate al di fuori degli orari di lavoro per negligenza (illuminazione)
<b>P14.</b> Picco di umidità relativa dell'aria interna	S14. Modifica posizione delle schermature da parte dell'utente	C14. L'occupante lascia utenze elettriche alimentate al di fuori degli orari di lavoro per negligenza (f.e.m)
<b>P15.</b> Picco di concentrazione di CO <sub>2</sub> interna	S15. Accensione delle luci di emergenza anomalo	C15. Mancato isolamento termico sistema di distribuzione energia termica (riscaldamento)
<b>P16.</b> Trend anomalo di temperatura dell'aria interna	S16. Accensione numero anomalo di utenze elettriche (f.e.m) in assenza di occupanti	C16. Mancato isolamento termico sistema di distribuzione energia termica (raffrescamento)
<b>P17.</b> Trend anomalo di umidità relativa dell'aria interna	S17. Frequenti malfunzionamenti circuiti di linea	C17. Malfunzionamento del sistema di regolazione (riscaldamento)
<b>P18.</b> Trend anomalo di concentrazione di CO <sub>2</sub> interna	S18. Frequenti malfunzionamenti circuiti elettrici di linea	C18. Dimensionamento errato dell'impianto termico (riscaldamento)
<b>P19.</b> Trend anomalo del livello di illuminamento interno	S19. Interruzione dell'energia elettrica erogata e/o distacco	C19. Dimensionamento errato dell'impianto termico (raffrescamento)
<b>P20.</b> Interruzione temporanea dati	S20. Accensione numero anomalo di	C20. Invecchiamento dell'impianto

	utenza elettriche	(riscaldamento)
<b>P21.</b> Rapporto tra energia termica effettiva ed energia termica erogata dalla centrale basso (riscaldamento)		C21. Invecchiamento dell'impianto (raffrescamento)
<b>P22.</b> Grado di correlazione anomalo tra energia termica e clima esterno		C22. Malfunzionamento del sistema di regolazione (raffrescamento)
<b>P23.</b> Andamento anomalo della portata in volume del fluido vettore		C23. Guasto localizzato impianto termico (malfunzionamento o rottura delle pompe di circolazione) per il circuito di raffrescamento
<b>P24.</b> Livello di occupazione medio		C24. Livello di illuminamento sul piano di lavoro inadeguato
P25. Trend anomalo energia elettrica (riscaldamento, ventilatori e/o sistemi ausiliari)		C25. Abbagliamento dell'utente
P26. Cambio valor medio potenza elettrica assorbita (riscaldamento, ventilatori e/o sistemi ausiliari)		C26. Ferie o festività
P27. Picco di consumo energia elettrica (f.e.m)		
P28. Picco di consumo energia elettrica (emergenza)		
P29. Trend anomalo di energia elettrica rispetto all'andamento storico ricorrente (f.e.m)		
P30. Trend anomalo di energia elettrica rispetto all'andamento storico ricorrente (emergenza)		
P31. Cambio valor medio potenza elettrica assorbita (f.e.m)		
P32. Cambio valor medio potenza elettrica assorbita (emergenza)		
P33. Rapporto tra energia termica effettiva ed energia termica erogata dalla centrale basso (raffrescamento)		

## SVILUPPO DEGLI ALBERI DECISIONALI

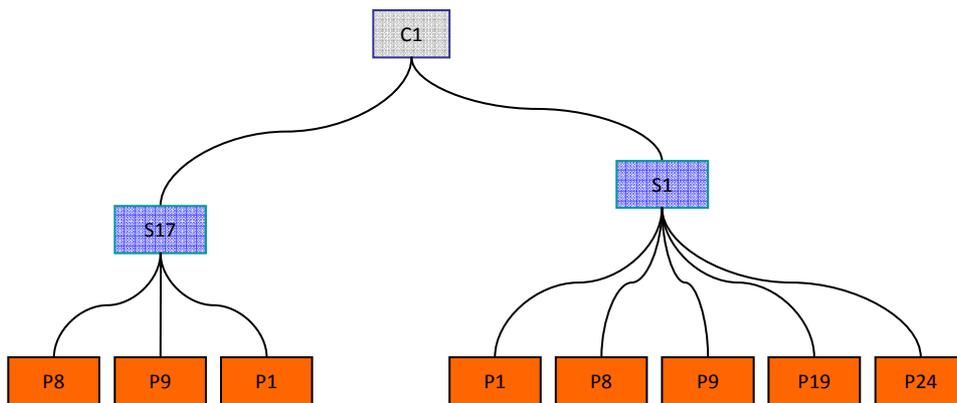


Figura 14. Albero decisionale relativo alla causa C1 : sostituzione apparecchi di illuminazione con altri di diversa potenza

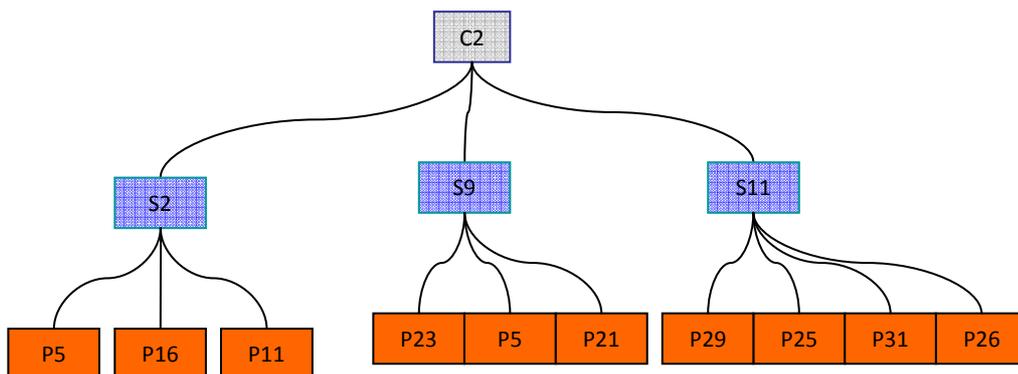


Figura 15. Albero decisionale relativo alla causa C2 :guasto dell'orologio in centrale termica

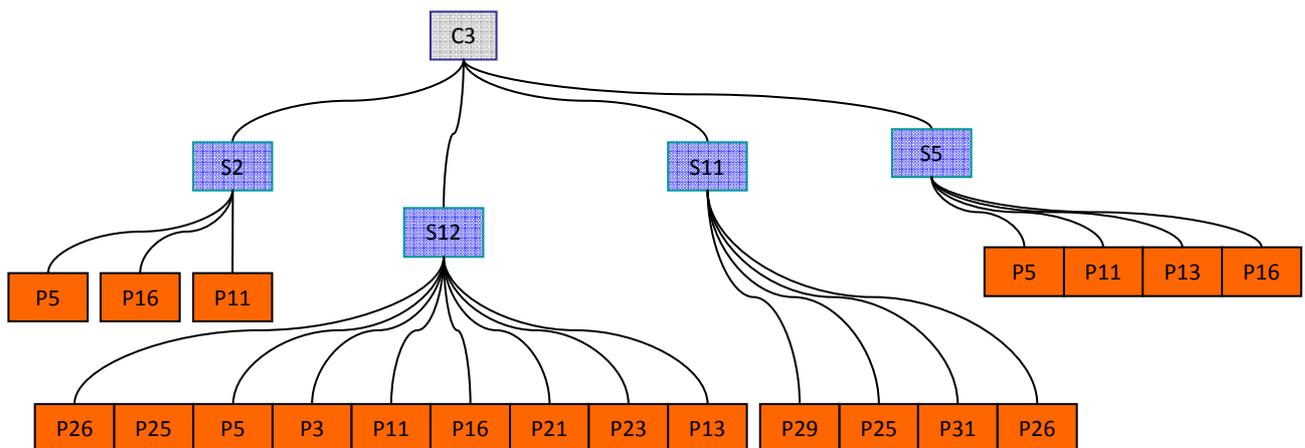


Figura 16. Albero decisionale relativo alla causa C3 : guasto localizzato impianto termico (malfunzionamento o rottura delle pompe di circolazione) per il circuito di riscaldamento

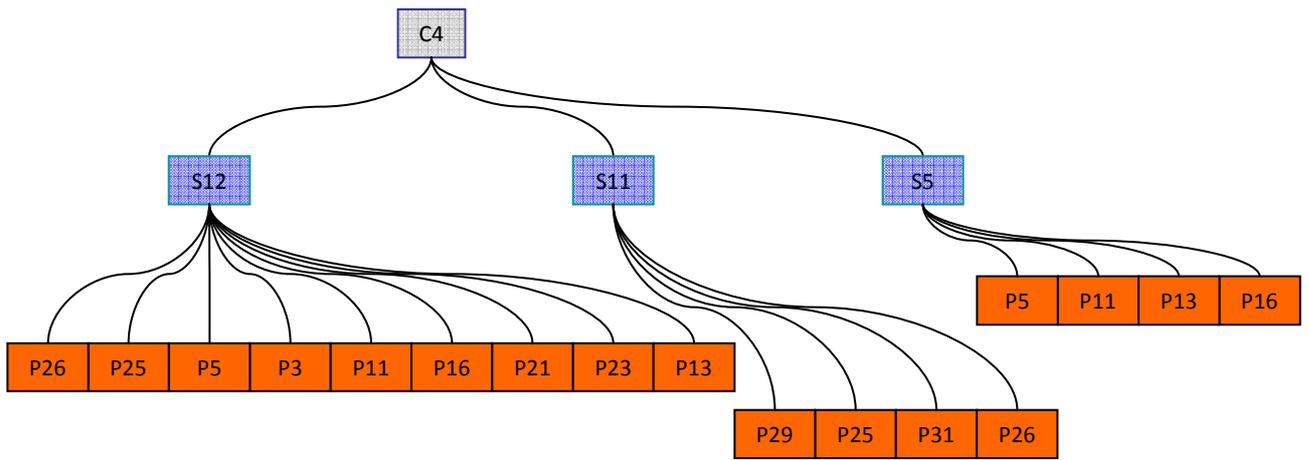


Figura 17. Albero decisionale relativo alla causa C4 : guasto localizzato impianto termico (malfunzionamento o rottura ventilatori)

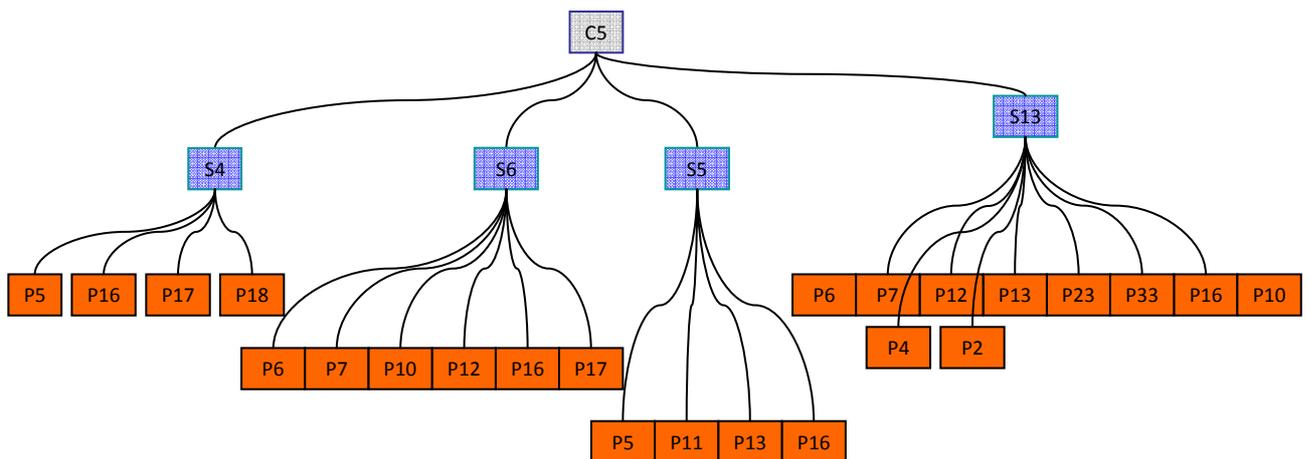


Figura 18. Albero decisionale relativo alla causa C5: guasto localizzato impianto termico (malfunzionamento o rottura macchina frigorifera)

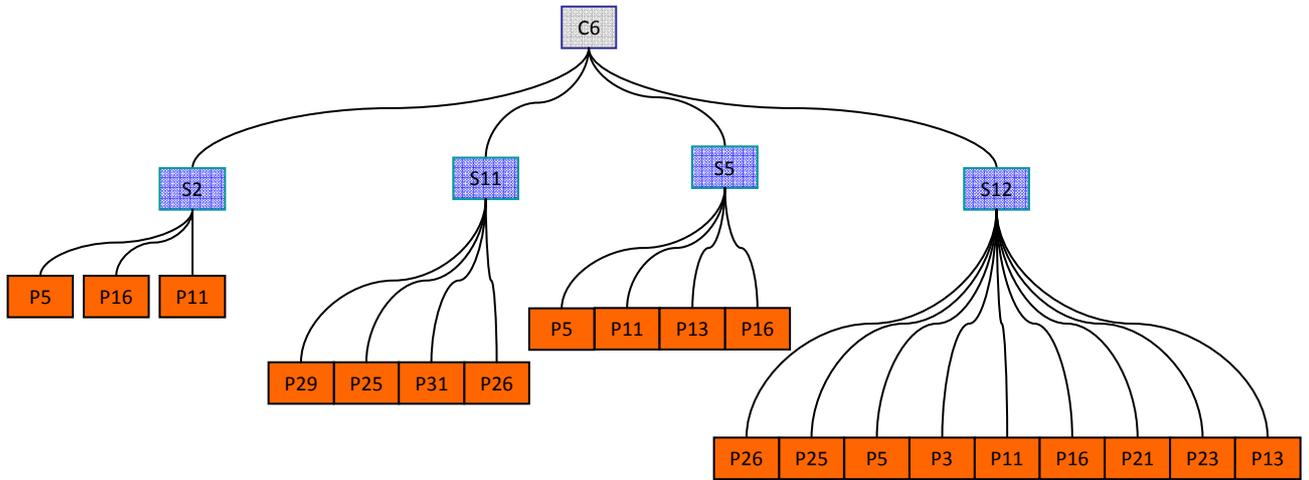


Figura 19. Albero decisionale relativo alla causa C6 : guasto localizzato impianto (malfunzionamento o rottura generatore di calore a combustione)

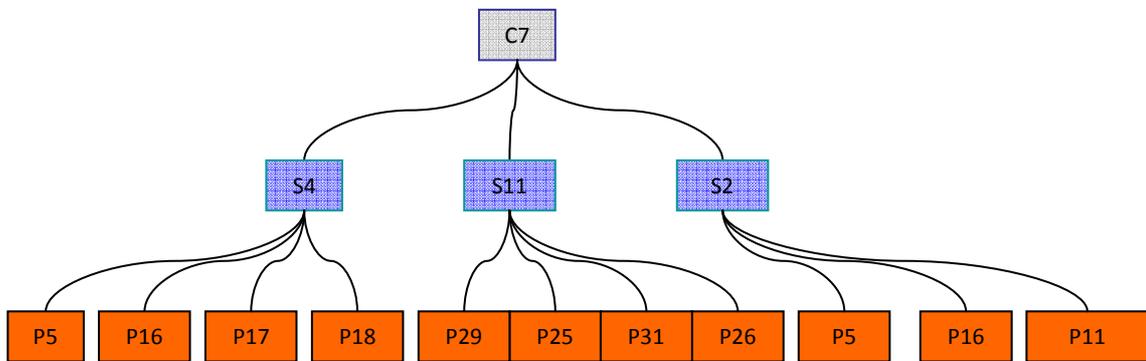


Figura 20. Albero decisionale relativo alla causa C7: rottura termostato ambiente

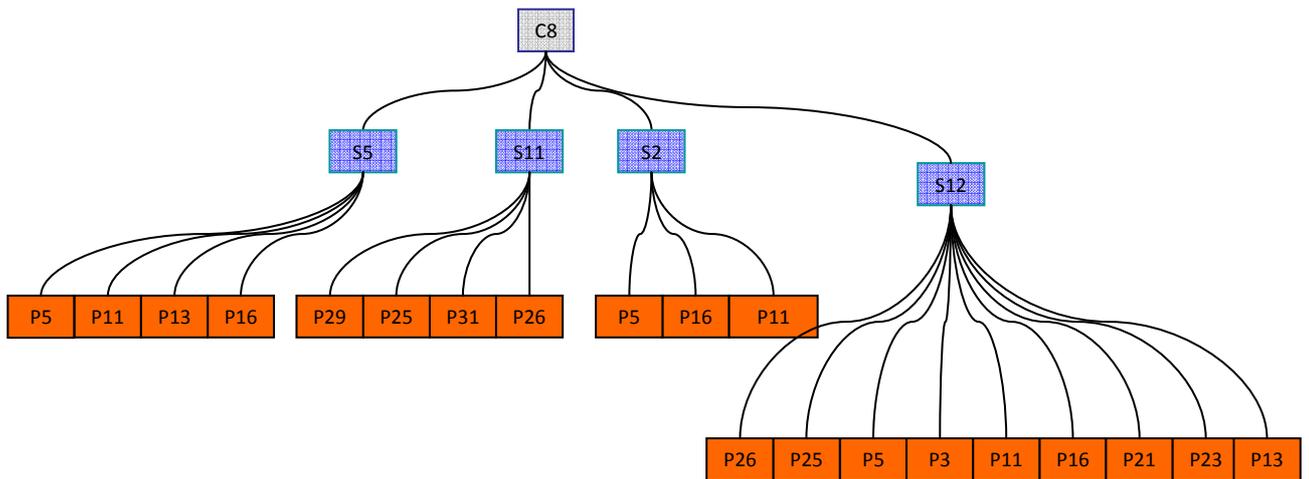


Figura 21. Albero decisionale relativo alla causa C8 : rottura o malfunzionamento del terminale di emissione in ambiente (riscaldamento)

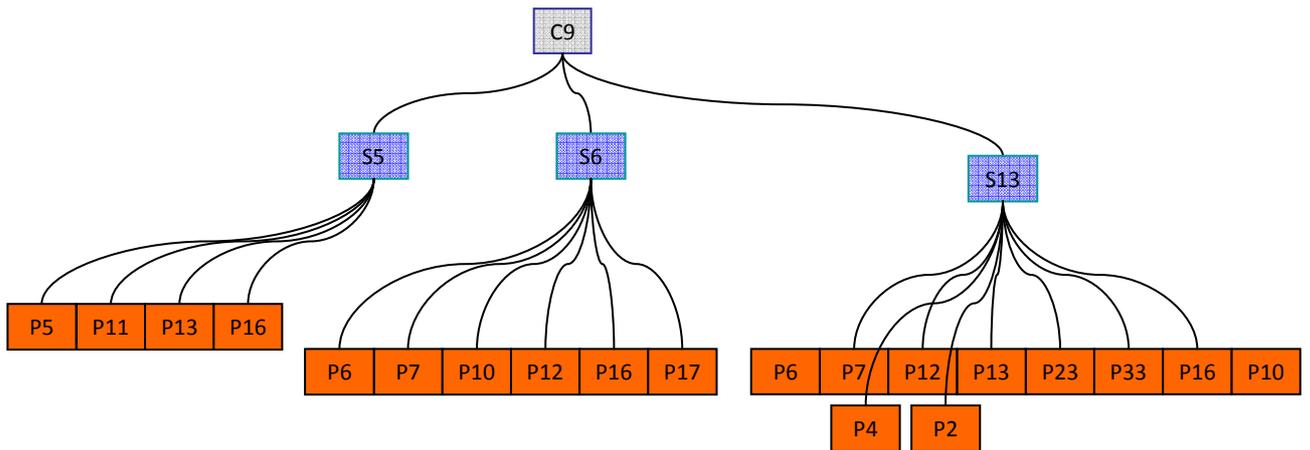


Figura 22. Albero decisionale relativo alla causa C9 : Rottura o malfunzionamento del terminale di emissione in ambiente (raffrescamento)

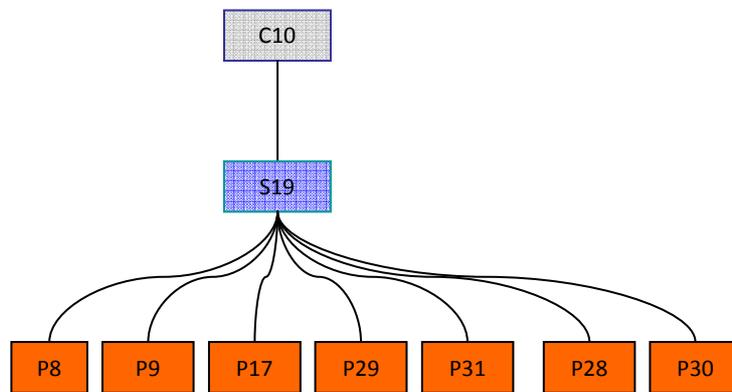


Figura 23. Albero decisionale relativo alla causa C10 : Distacco per sovraccarico o sospensione servizio

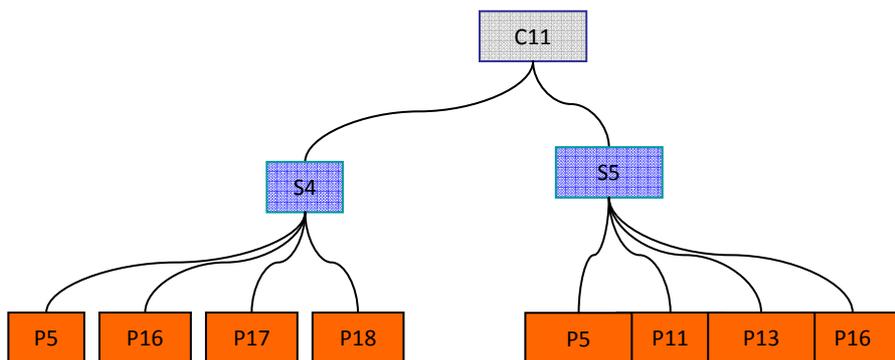


Figura 24. Albero decisionale relativo alla causa C11 : apertura finestra da parte dell'utente

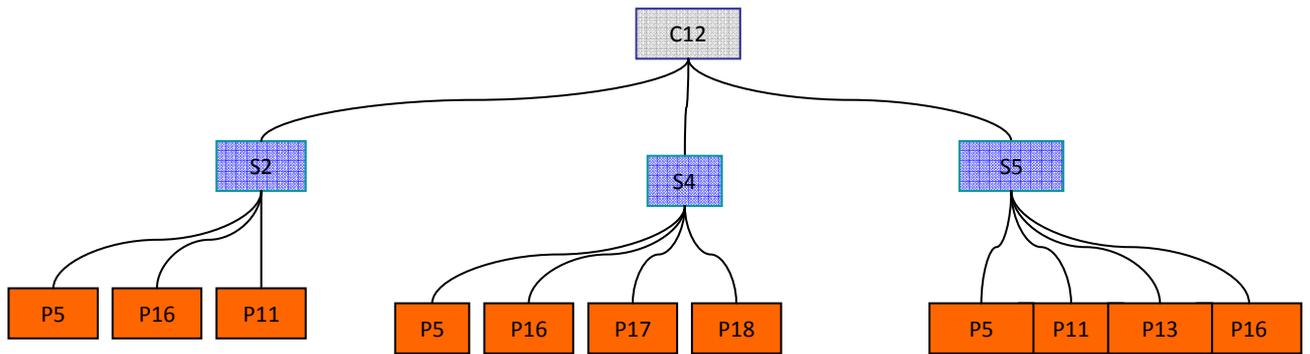


Figura 25. Albero decisionale relativo alla causa C12 : Cambio impostazione set-point termostato locale da parte dell'utente

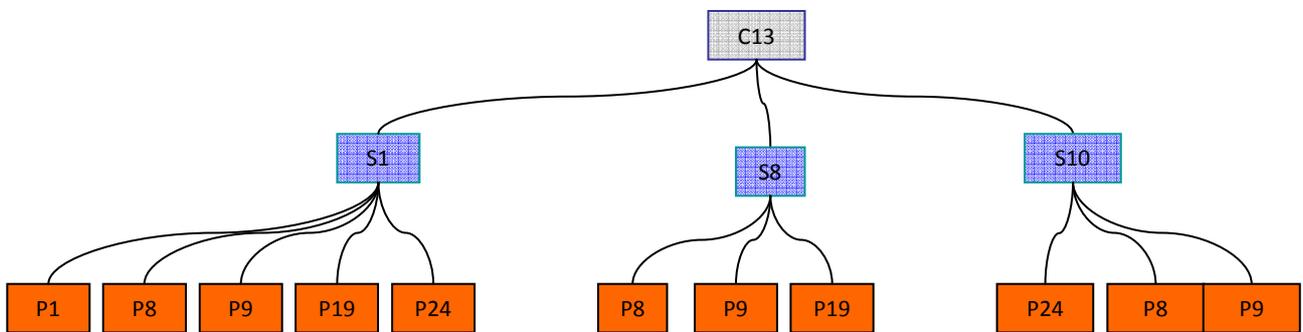


Figura 26. Albero decisionale relativo alla causa C13: l'occupante lascia utenze elettriche alimentate al di fuori degli orari di lavoro per negligenza (illuminazione)

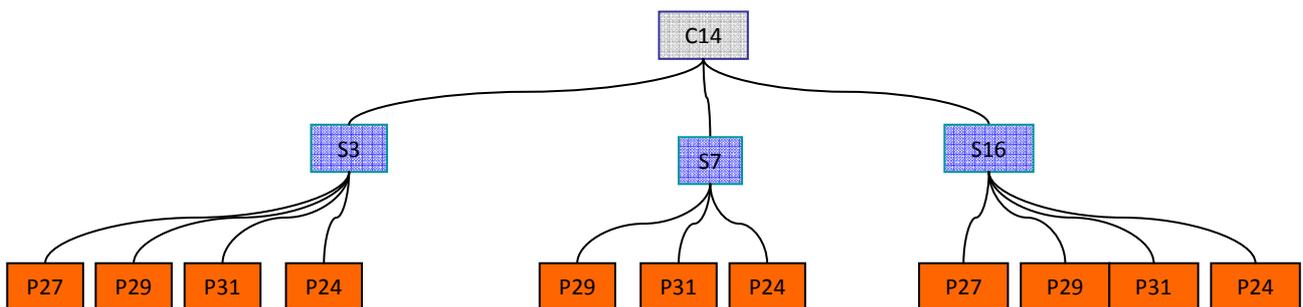


Figura 27. Albero decisionale relativo alla causa C14 : l'occupante lascia utenze elettriche alimentate al di fuori degli orari di lavoro per negligenza (f.e.m)

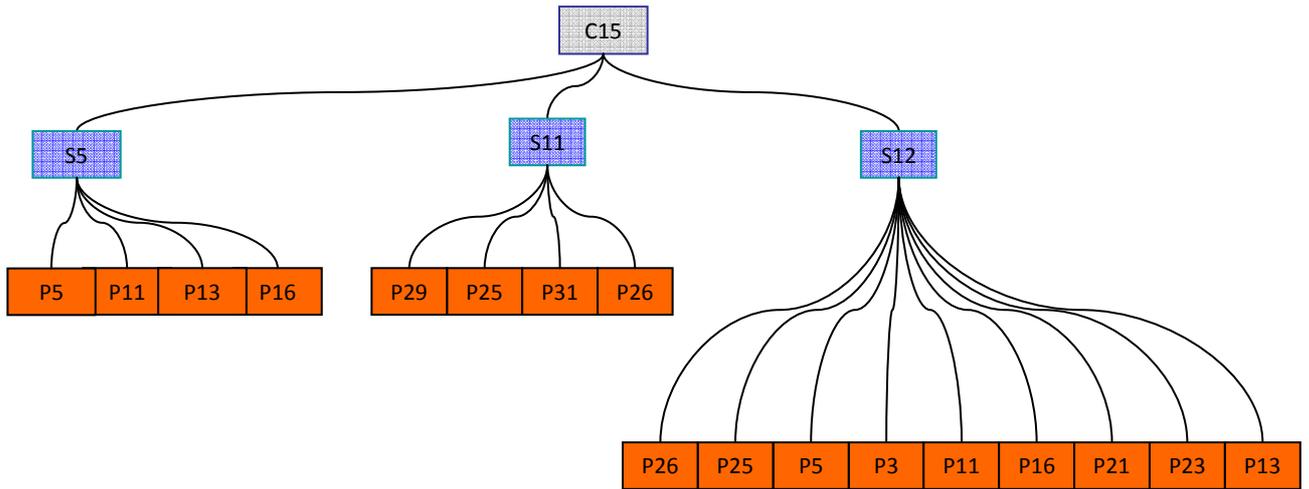


Figura 28. Albero decisionale relativo alla causa C15 : mancato isolamento termico sistema di distribuzione energia termica (riscaldamento)

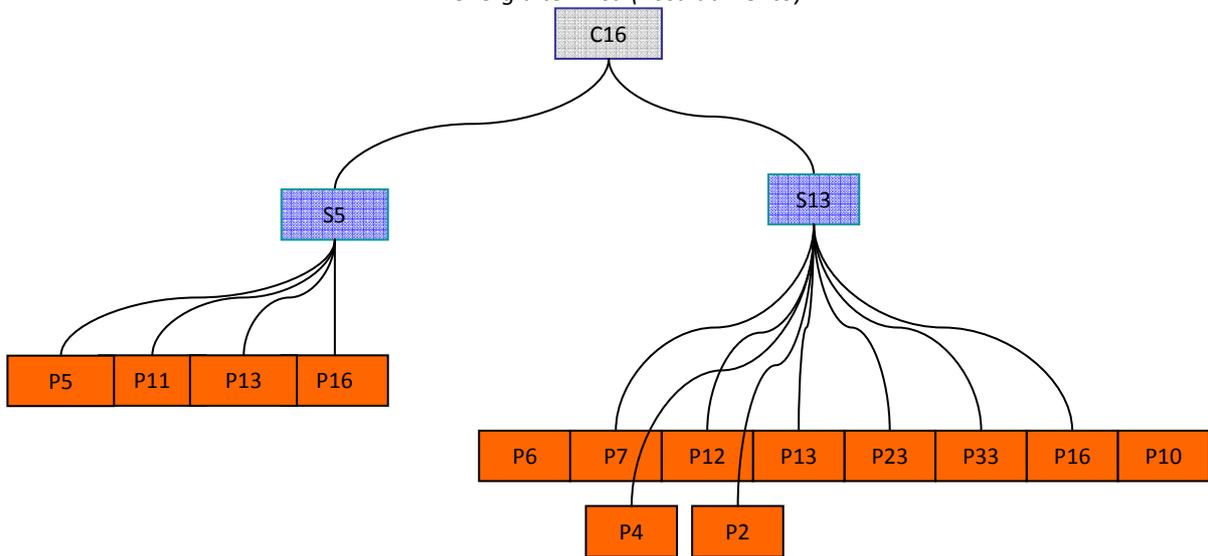


Figura 29: Albero decisionale relativo alla causa C16 : mancato isolamento termico sistema di distribuzione energia termica (raffrescamento)

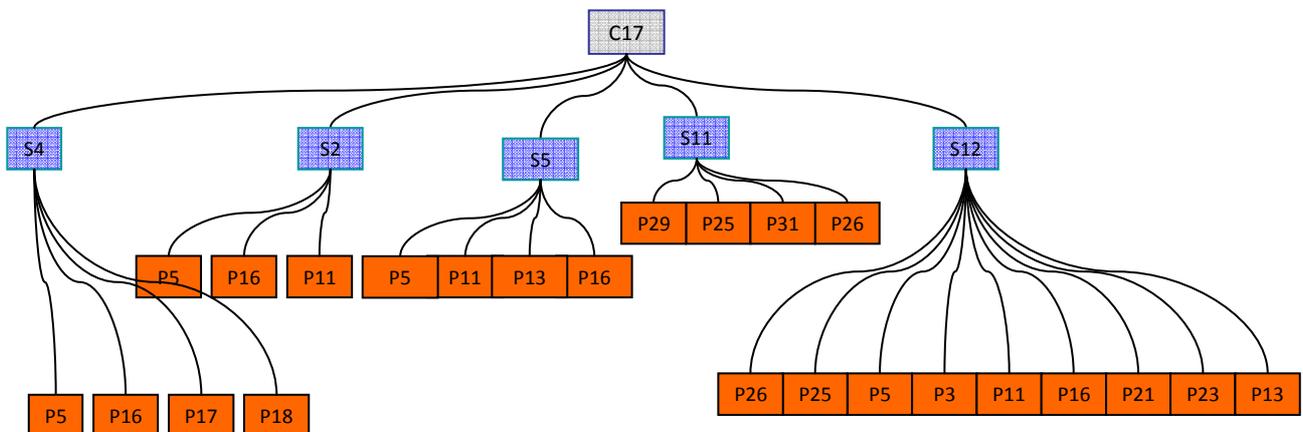


Figura 30. Albero decisionale relativo alla causa C17 : malfunzionamento del sistema di regolazione (riscaldamento)

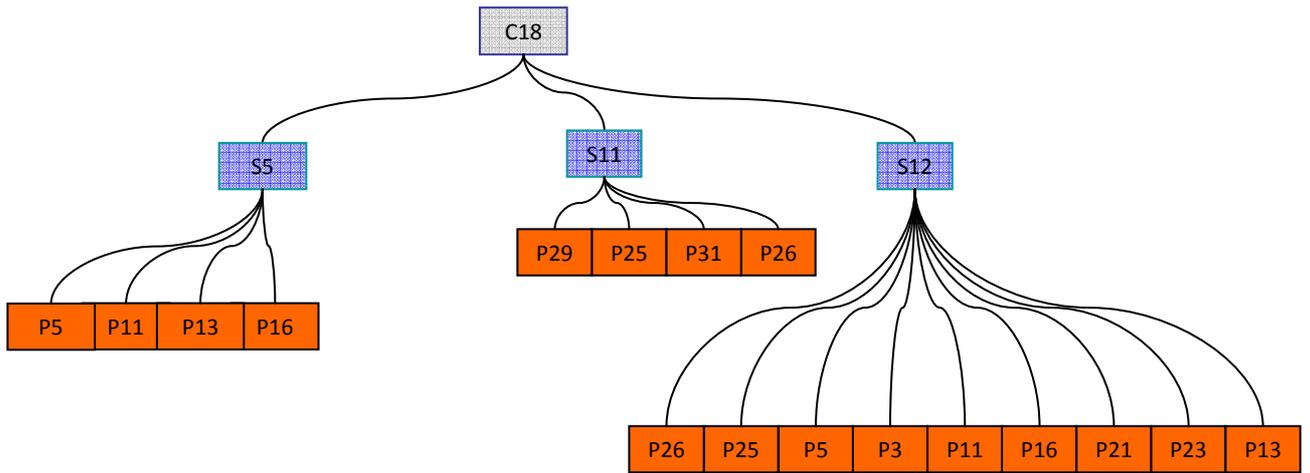


Figura 31. Albero decisionale relativo alla causa C18 : dimensionamento errato dell'impianto termico (riscaldamento)

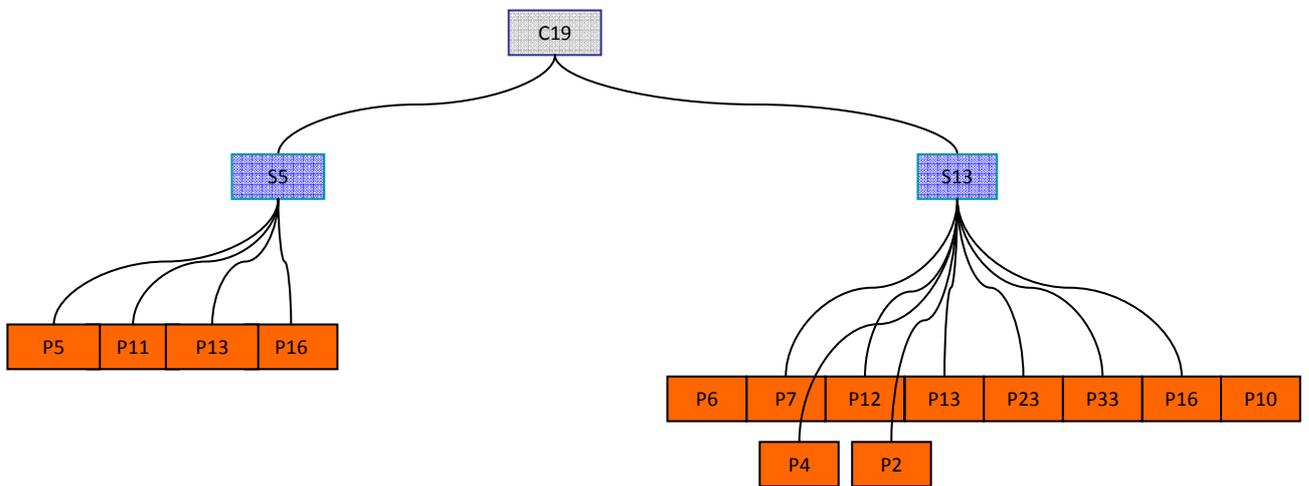


Figura 32. Albero decisionale relativo alla causa C19 : dimensionamento errato dell'impianto termico (raffrescamento)

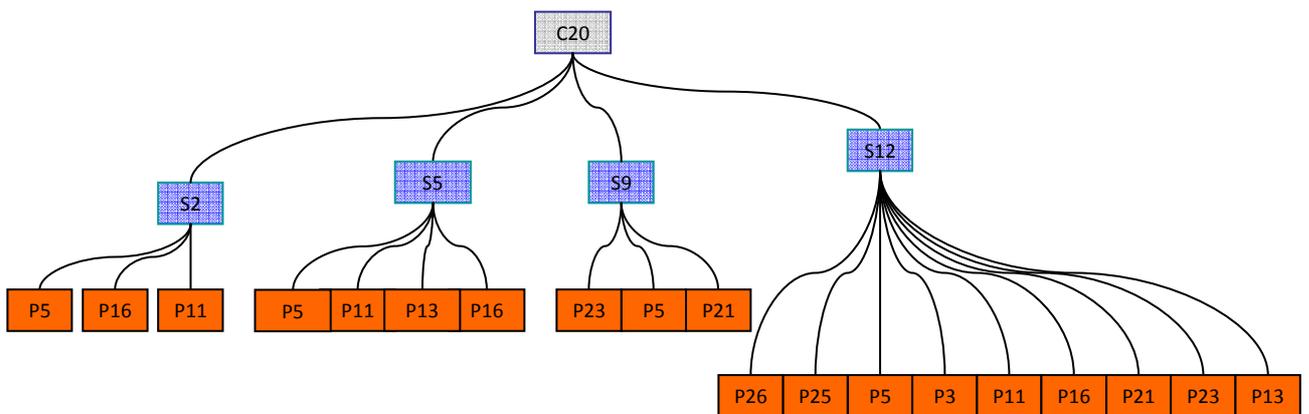


Figura 33. Albero decisionale relativo alla causa C20 : invecchiamento dell'impianto (riscaldamento)

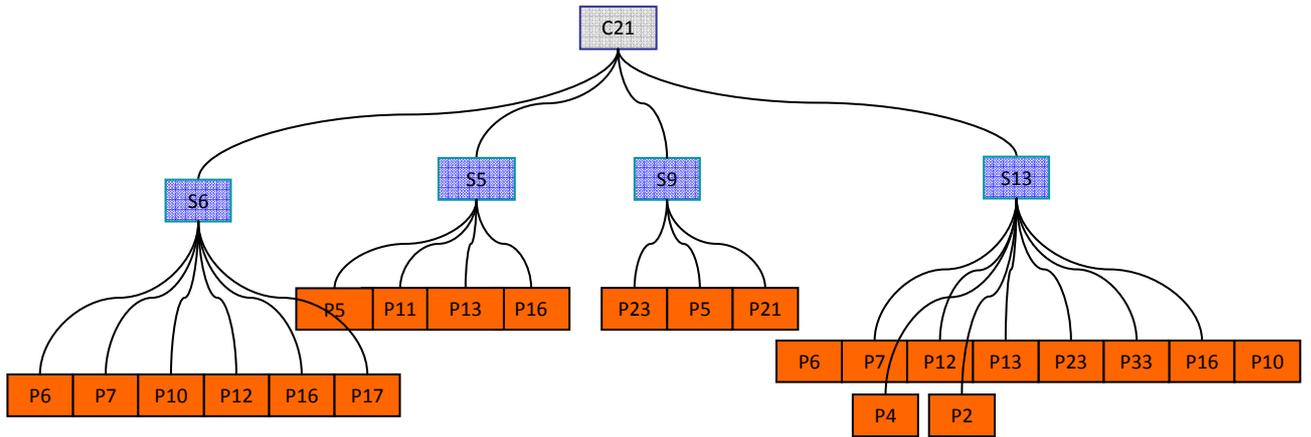


Figura 34. Albero decisionale relativo alla causa C21 : invecchiamento dell'impianto (raffrescamento)

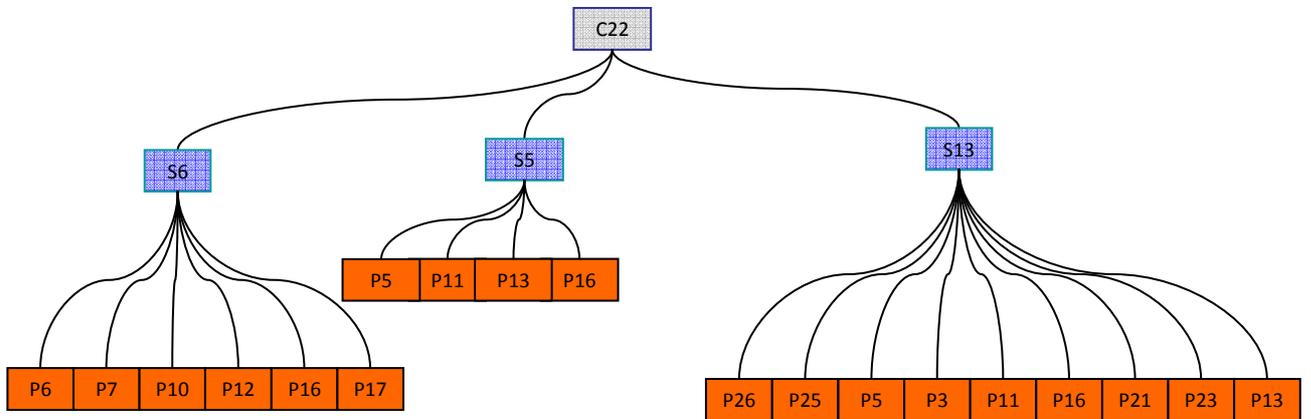


Figura 35. Albero decisionale relativo alla causa C22 : malfunzionamento del sistema di regolazione (raffrescamento)

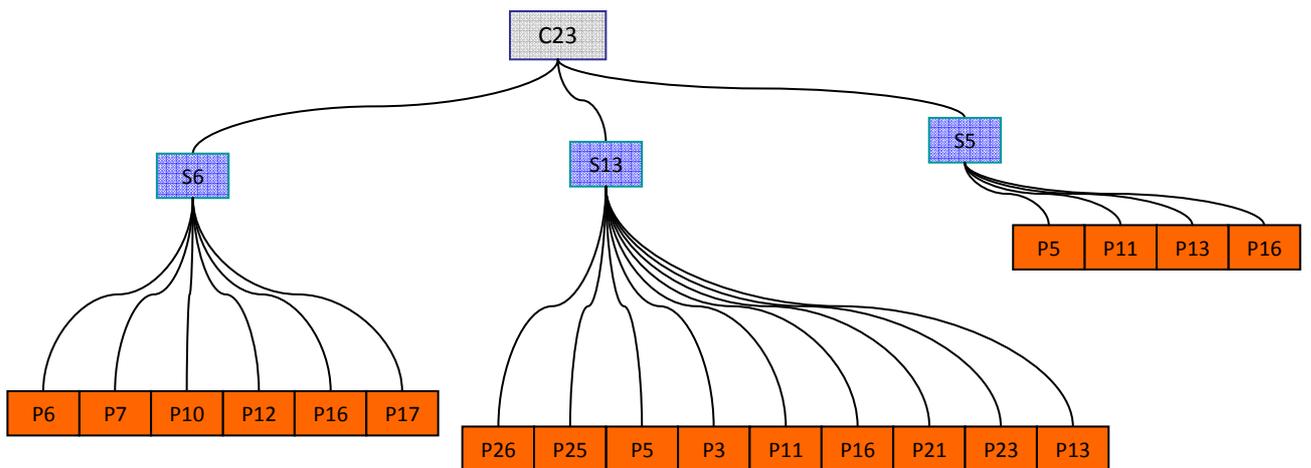


Figura 36. Albero decisionale relativo alla causa C23 : guasto localizzato impianto termico (malfunzionamento o rottura delle pompe di circolazione) per il circuito di raffrescamento

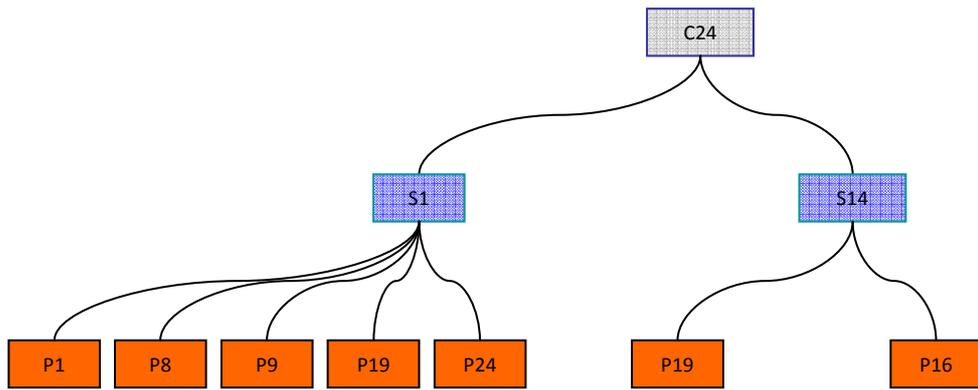


Figura 37. Albero decisionale relativo alla causa C24 : livello di illuminamento sul piano di lavoro inadeguato

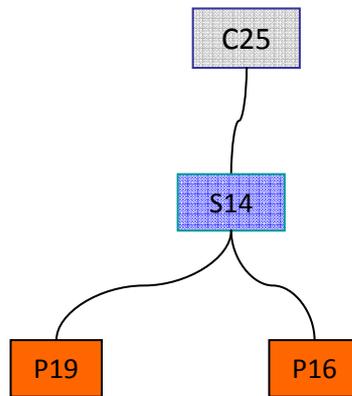


Figura 38. Albero decisionale relativo alla causa C25 : abbagliamento dell'utente

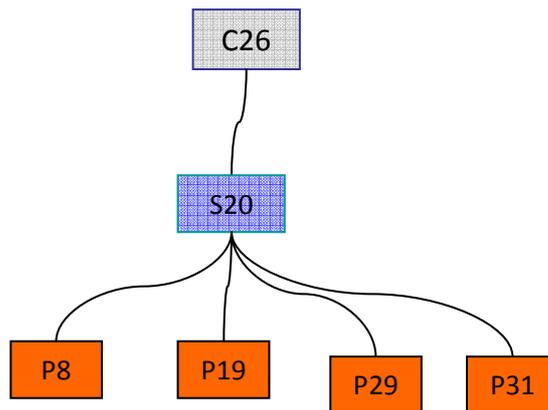


Figura 39. Albero decisionale relativo alla causa C26 : ferie o festività

## **PARTE 2 – UNA METODOLOGIA PER IL PIANO DI MONITORAGGIO**

### INTRODUZIONE

L'obiettivo di un monitoraggio energetico-ambientale di lungo periodo è valutare le condizioni di consumo energetico e di qualità ambientale interna in cui verte un sistema edificio-impianto. Sulla base delle misure possono essere identificate le problematiche relative ad eccessi di consumo o ad un basso livello di qualità ambientale rispetto ai consumi ed, in seconda istanza, possono essere proposti degli interventi atti al risparmio energetico ed al miglioramento delle condizioni ambientali interne. Tutte queste operazioni devono essere condotte con una certa affidabilità.

Affinché la procedura di monitoraggio e misura sia sufficientemente affidabile, deve essere gestita controllando gli errori casuali (random errors) e gli errori sistematici (bias). Gli errori casuali sono influenzati dalla qualità della strumentazione di misura, dalle procedure o tecniche di misura e della procedura di campionamento. Gli errori sistematici sono influenzati dalla qualità dei dati misurati, dalle assunzioni e dalle procedure di analisi. Per ridurre gli errori è necessario incrementare i costi del monitoraggio, quindi, le richieste di riduzione dell'incertezza di misura devono essere giustificate dal valore aggiunto ottenibile con utilizzo di informazioni più precise.

A monte di un monitoraggio energetico-ambientale deve quindi essere predisposto un piano di monitoraggio che ha la funzione di stabilire, sulla base di un rilievo e dello studio dell'edificio-impianto:

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

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

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

Incrociando le esigenze che derivano da questi tre elementi si possono identificare gli indicatori prestazionali più opportuni e di conseguenza le grandezze che devono essere necessariamente misurate.

In termini del tutto generali, si può affermare che i monitoraggi ambientali di breve periodo e spot, utilizzando strumentazione portatile o removibile ed affrontando problemi di dettaglio, hanno come obiettivo la misura di grandezze atte al calcolo di indici più complessi. I monitoraggi ambientali di lungo periodo, invece, utilizzando strumentazione per lo più permanente ed essendo concentrati su una valutazione di carattere più globale (meno dettagliata), fanno principalmente riferimento al calcolo di indici più semplici.

I monitoraggi energetici invece assumono diverse forme di dettaglio in base alla complessità del sistema energetico e sono tipicamente di lungo periodo.

**La distribuzione spaziale delle misure** viene stabilita a seguito di un'attenta analisi dell'edificio-impianto. In particolare la definizione della griglia di misura si basa sui seguenti passaggi:

- suddivisione dell'edificio in zone omogenee per carichi interni (destinazione d'uso), forzanti climatiche esterne (esposizione), tipologia di involucro, tipologia di impianto e regolazione;
- scelta dei locali di riferimento per ogni zona omogenea;

- scelta del posizionamento della strumentazione all'interno dei locali di riferimento;
- individuazione dei flussi energetici da monitorare;
- scelta del dettaglio della misura del singolo flusso energetico (usi finali, quadro di piano, in centrale, etc.);
- scelta del posizionamento della strumentazione atta alla misura flussi energetici.

**I tempi di campionamento**, ovvero la frequenza con cui una grandezza viene misurata e registrata, rappresentano un elemento cruciale per l'esito del monitoraggio, poiché essi influenzano l'incertezza di misura (rappresentazione temporale limitata di una porzione di popolazione), i costi di monitoraggio (scelta dei sensori, delle modalità di trasmissione dei dati, della memoria per il salvataggio dei dati, etc.) e quindi la qualità ed attendibilità degli output finali. La scelta dei tempi di campionamento deve essere condotta con attenzione in funzione delle caratteristiche specifiche del caso di studio.

**Le tipologie e le caratteristiche della strumentazione** riguardano la scelta dei sensori, del sistema di acquisizione, dei protocolli di comunicazione, del sistema di memorizzazione e gestione dei dati. In particolare la scelta del sensore più opportuno dipende dal tipo di misura che deve essere fatta. Spesso la normativa tecnica di sensore fornisce le caratteristiche minime che la strumentazione deve possedere per essere coerentemente utilizzata.

**Le modalità ed i tempi di verifica periodica della taratura della strumentazione** sono particolarmente importanti per un monitoraggio di lungo periodo, poiché la strumentazione è generalmente installata permanentemente in situ. La strumentazione di misura, prima di essere messa in campo, è soggetta ad un processo di taratura da parte del produttore o del gestore del servizio, al fine di garantire una certa affidabilità di misura. Nel tempo, tuttavia, si verifica sempre un fenomeno di deriva della misura, dovuto all'invecchiamento dei materiali e a forzanti esterne. È bene dunque prevedere, sin dalla definizione del piano di monitoraggio, un processo di verifica periodica della taratura della strumentazione.

**I possibili output del processo di monitoraggio** devono essere definiti fin dalle prime fasi del piano, per poter valutare l'effettiva fattibilità del progetto. La scelta dei sensori in termini di quantità e qualità (caratteristiche metrologiche), l'accuratezza finale della misura e la trasmissione/acquisizione dei dati sono fortemente vincolati dall'uso finale che verrà fatto del dato.

Di seguito sono elencati i vari passaggi che costituiscono il processo di monitoraggio, suddivisi tra piano di monitoraggio, installazione in campo, monitoraggio ed analisi:

#### **PIANO DI MONITORAGGIO**

1. Definizione dello scopo del monitoraggio
2. Descrizione del sistema e dei suoi confini
3. Definizione delle grandezze che devono essere misurate
4. Definizione della distribuzione spaziale delle misure
5. Definizione dei tempi di campionamento (sampling)
6. Definizione delle tipologie e delle caratteristiche della strumentazione
7. Definizione delle modalità ed dei tempi di verifica periodica della taratura della strumentazione
8. Identificazione dei possibili output del processo di monitoraggio
9. Stesura del piano di monitoraggio

#### **INSTALLAZIONE IN CAMPO**

10. Verifica della fattibilità del piano di monitoraggio
11. Installazione sensoristica

12. Collaudo sistema di monitoraggio
13. Relazione sullo stato di installazione

#### **MONITORAGGIO ED ANALISI DATI**

14. Monitoraggio real time
15. Preprocessing o organizzazione dei dati
16. Modellistica
17. Calcolo e verifica indicatori prestazionali
18. Diagnostica
19. Strategie di intervento

I passaggi necessari alla stesura di un piano di monitoraggio energetico-ambientale di lungo periodo sono elencati in Figura 1, cercando di fornire anche una logica temporale di processo. Non necessariamente tutti i passaggi vanno sempre eseguiti nel dettaglio, ma devono essere valutati rispetto all'oggetto di analisi

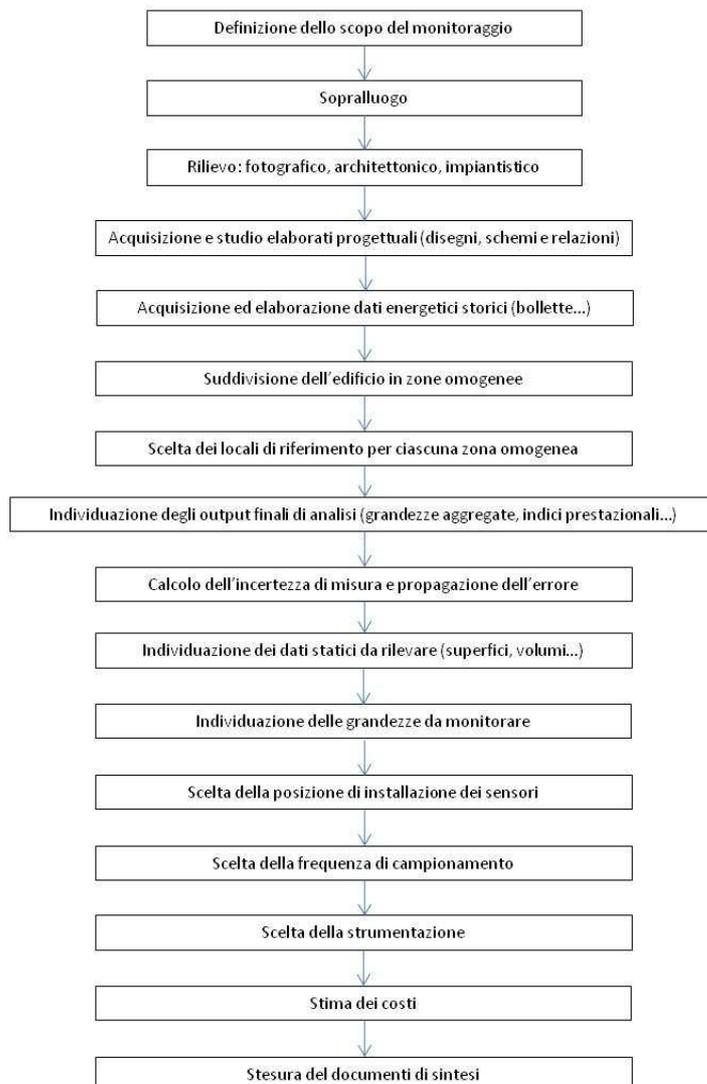


Figura 40. Diagramma dei passaggi dei passaggi intermedi necessari per la definizione di un piano di monitoraggio

## DESCRIZIONE DEL PIANO DI MONITORAGGIO PER L'EDIFICIO F40 DI ENEA CASACCIA

L'edificio F40, oggetto del piano di monitoraggio, è stato studiato nelle sue caratteristiche di configurazione geometrica, di involucro, di destinazione d'uso e di tipologie impiantistiche, al fine di definire con sufficiente dettaglio le caratteristiche della strumentazione a supporto del monitoraggio ed il suo posizionamento in campo. Segue una sintesi delle operazioni che hanno condotto alla definizione del piano.

**Oggetto del monitoraggio:** monitoraggio energetico-ambientale continuativo di lungo periodo dell'edificio F40 presso Enea Casaccia.

**Obiettivo del monitoraggio:** individuazione della strumentazione minima necessaria a svolgere un monitoraggio energetico-ambientale in edifici per uffici, con finalità di diagnosi e proposta di strategie di intervento.

**Caratteristiche dell'edificio ed individuazione di zone omogenee:** edificio a stecca con tre piani fuori terra, unito sul lato maggiore ad un'area di laboratorio (che non sarà oggetto del monitoraggio). L'edificio si caratterizza per un'unica stratigrafia di involucro opaco verticale ed una sola tipologia di infissi vetrati.

Sono state inizialmente identificate 13 zone omogenee, caratterizzate ciascuna da ugual destinazione d'uso, esposizione e posizionamento di piano all'interno dell'edificio (Figura 2). Valutata la similitudine di distribuzione tra zone omogenee all'interno dei tre piani (le zone 1, 6, 10; le zone 2, 9, 11; e le zone 3, 12 sono analoghe), al fine di ridurre i costi per la strumentazione, si è deciso di utilizzare solo il secondo piano (terzo piano fuori terra) come rappresentativo dell'intero edificio, suddividendolo in quattro zone omogenee, ciascuna caratterizzata da due locali di riferimento (Figura 3). In questi locali verranno installati i sensori per il monitoraggio delle grandezze ambientali.

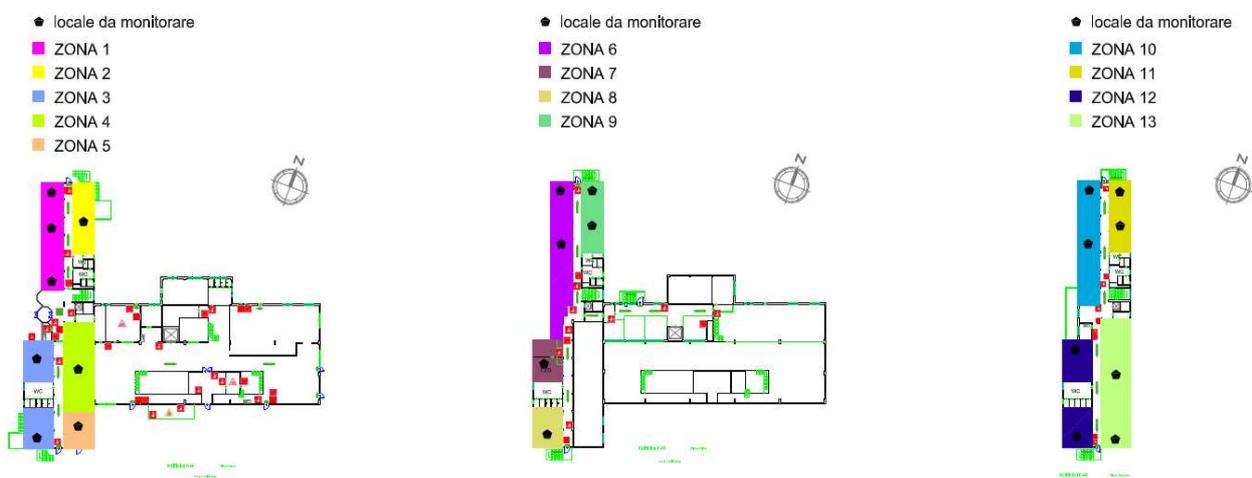


Figura 41. La prima suddivisione dell'edificio in zone omogenee. A sinistra il piano terra, al centro il primo piano a destra il secondo piano

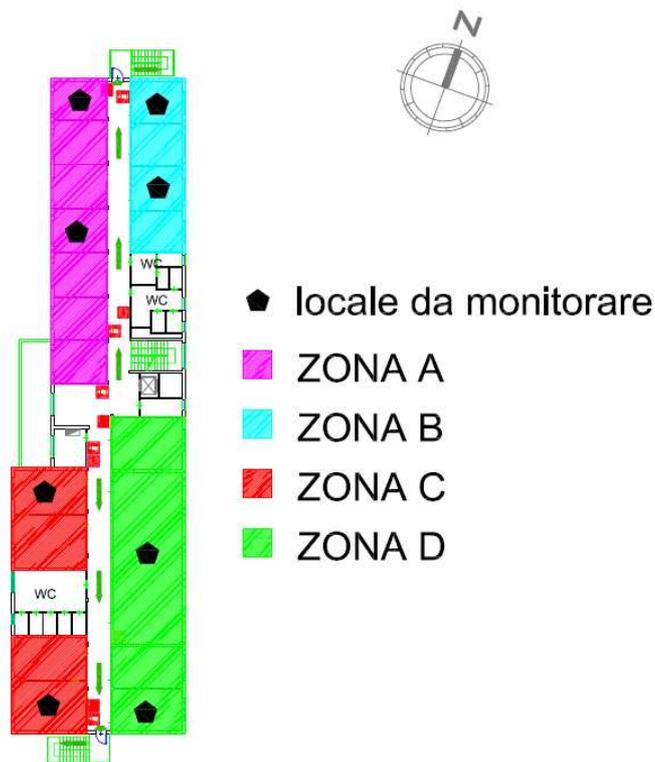


Figura 42. Suddivisione del secondo piano in zone omogenee ed individuazione dei locali di riferimento

**Caratteristiche dell'impianto termico e misura dell'energia termica:** la tipologia di impianto che serve l'edificio F40 è del tipo misto, con terminali convettivi e aria primaria costituita da tutta aria esterna. Il fluido termovettore caldo che alimenta le unità terminali in ambiente costituite da: fan coil negli uffici, aerotermini nei laboratori e batterie di scambio termico nell'unità di trattamento dell'aria (UTA), è ottenuto per mezzo dello scambio termico con fluido proveniente da centrale termica remota (teleriscaldamento), attraverso uno scambiatore di calore con una potenza nominale pari a 430000 kcal/h. La portata nominale di fluido vettore che alimenta il circuito dei fan coil è pari a 11,5 m<sup>3</sup>/h, mentre la portata veicolata alle batterie dell'UTA e agli aerotermini è complessivamente pari a 16 m<sup>3</sup>/h. L'UTA è predisposta per il trattamento dell'aria primaria dei singoli locali. Il fluido termovettore freddo che alimenta i fan coil e le batterie di scambio termico dell'UTA è invece prodotto da un gruppo refrigeratore con un potenza nominale pari a 180000 frig/h, collegato ad una torre evaporativa all'esterno dell'edificio F40.

Per la misura dell'energia termica saranno installati 2 contatori di calore (fluido caldo e fluido freddo) composti ciascuno da un misuratore di portata volumetrica ad ultrasuoni e una coppia di sensori di temperatura ad immersione. La selezione della taglia del contatore di calore sarà operata sulla base della portata nominale e il diametro della tubazione. Le caratteristiche metrologiche dei componenti del contatore di calore sono riassunti nella tabella riportata negli allegati alla fine di questo capitolo. I dati misurati attraverso il contatore di calore (portata e temperatura del fluido termovettore in mandata e in ritorno ed energia) dovranno essere trasmessi opportunamente, attraverso segnali in uscita che consentano la registrazione dei singoli dati con un passo temporale predeterminato al fine di consentire successive elaborazione ed evitare problemi legati alla modalità di trasmissione per impulsi, secondo la quale il tempo di campionamento non risulta costante ma dipendente dalla dinamiche di richiesta dell'energia. Il tempo di campionamento definitivo verrà quindi stabilito a valle dell'installazione dei 2 contatori, che avverrà in centrale termica: a valle dello scambiatore di calore per il fluido caldo e a valle del gruppo refrigeratore per il fluido freddo.

**Caratteristiche dell'impianto elettrico e misura dell'energia elettrica:** la logica di monitoraggio che sarà adottata prevede la misura delle principali grandezze elettriche (energia, potenza reale, potenza reattiva, fattore di potenza, armoniche) a livello di quadro generale e di quadro di piano. In particolare la misura sarà

condotta disaggregando i dati misurati rispetto agli usi: forza motrice, illuminazione, emergenza e climatizzazione (ventilatori dei fan coil).

**Misura dei parametri ambientali interni:** negli 8 locali di riferimento verranno misurate delle grandezze ambientali interne, utili a caratterizzare le condizioni di qualità ambientale dell'edificio e le prestazioni degli impianti. Sulla base delle caratteristiche dei terminali ambiente (fan coil ed aria primaria), si è ritenuto opportuno monitorare la temperatura dell'aria e l'umidità relativa come indicatori delle condizioni termoigrometriche. Si è invece scelto di misurare il livello di illuminamento sul piano di lavoro per qualificare le condizioni di benessere visivo nei locali. Infine, sulla base delle disponibilità economiche si prevede di dotare i locali di un sensore di CO<sub>2</sub>, al fine di qualificare la qualità dell'aria intera (numero di ricambi orari, infiltrazioni) ed indirettamente il livello di occupazione dei locali. Il tempo di campionamento tipico delle grandezze ambientali è di 15 minuti. Possono essere previsti tempi di campionamento inferiori per illuminamento e CO<sub>2</sub>, in funzione della capacità del sistema di logging.

**Tabella 10. Le grandezze ambientali interne da monitorare nei locali di riferimento**

Grandezza	Qualità ambientale
t <sub>a</sub> – Temperatura dell'aria [°C]	Qualità termica
UR – Umidità relativa [%]	Qualità igrometrica
E – Illuminamento [lux]	Qualità luminosa
CO <sub>2</sub> – Concentrazione di CO <sub>2</sub> [ppm]	Qualità dell'aria

**Misura dei parametri ambientali esterni:** oltre ai parametri ambientali interni ed ai consumi energetici, in prossimità dell'edificio F40 verranno monitorate le grandezze climatiche esterne, che rappresentano alcune delle forzanti del sistema energetico e dei valori di confronto rispetto alle grandezze interne. I tempi di campionamento sono analoghi a quelli dei parametri ambientali interni.

**Tabella 11. Set minimo di grandezze esterne da monitorare**

Grandezza	Forzate del sistema	Valore di confronto
T <sub>e</sub> – Temperatura dell'aria esterna [°C]	X	X
R.H. – Umidità relativa [%]	X	X
p <sub>a</sub> – Pressione atmosferica [Pa]	X	
v <sub>a</sub> – Velocità del vento [ms <sup>-1</sup> ]	X	
I – Irradianza solare [W m <sup>-2</sup> ]	X	
E – Illuminamento esterno [lux]	X	X
CO <sub>2</sub> – Concentrazione di CO <sub>2</sub> [ppm]		X

**Altre misure:** al fine di aumentare le possibilità di interpretazione dei dati monitorati a fini diagnostici e di proposta di soluzioni di intervento, si è ritenuto opportuno prevedere per l'edificio F40 anche il monitoraggio dell'occupazione dei locali con un sensore di presenza per camera. Questo monitoraggio verrà affiancato da una veridica condotta ai tornelli della sede di ENEA Casaccia, al fine di valutare l'effettiva presenza dei lavoratori all'interno dell'edificio F40.

**Incertezza di misura e modalità di verifica periodica della taratura della strumentazione:** le caratteristiche metrologiche della strumentazione, riportate negli allegati alla fine di questo capitolo (allegato 3), devono essere verificate in fase di acquisto. Devono essere tuttavia previste delle verifiche periodiche, con intervalli inferiori all'anno, per valutare ed eventualmente correggere delle derive della strumentazione installata. Questa operazione è di fondamentale importanza, poiché, ad esempio, la deriva di pochi decimi di grado di una sonda di temperatura del fluido termovettore può condurre a macroscopici errori di valutazione del consumo di riscaldamento dell'edificio.

**Possibili output del monitoraggio:** come già anticipato, il monitoraggio energetico-ambientale dell'edificio F40 ha sia finalità di tipo diagnostico (individuazione delle anomalie attraverso la lettura e l'analisi dei dati), sia finalità di ottimizzazione (individuazione di interventi atti a ridurre i consumi energetici e/o migliorare la

qualità dell'ambiente interno attraverso attuazioni automatiche o tramite un'interazione con l'operatore o utente). In particolare le logiche di controllo che potranno essere studiate saranno:

- controllo dell'illuminazione di stanza (attraverso il sensore di presenza per ogni locale del piano)
- controllo del riscaldamento/raffrescamento dell'intero edificio (curva climatica basata sul sensore di temperatura esterno)
- controllo del riscaldamento/raffrescamento di stanza (in uno dei locali di riferimento la velocità del fan coil potrà essere controllata sulla base della temperatura dell'aria).

I locali di riferimento potranno oltremodo essere utili per condurre delle diagnosi atte a:

- definire se l'impianto è in grado di mantenere condizioni omogenee di comfort nonostante le forti differenze di uso ed esposizione tra locale e locale (temperatura ed umidità relativa)
- individuare malfunzionamenti dovuti alla cattiva gestione dell'impianto o dell'edificio (finestre aperte troppo a lungo, luci accese anche con elevati livelli di illuminamento naturale, etc.) (concentrazione di CO<sub>2</sub>, temperatura, umidità relativa, illuminamento).

Si ricorda infine che l'obiettivo ultimo del processo di monitoraggio è quello di individuare la strumentazione minima necessaria a svolgere un monitoraggio energetico-ambientale in edifici per uffici, con finalità di diagnosi e proposta di strategie di intervento.

Vengono di seguito riportati degli allegati riassuntivi di tutta l'attività svolta per la definizione del piano di monitoraggio dell'edificio F40. In particolare l'allegato 1 riporta una tabella di sintesi delle misure, dei sensori e dei tempi di campionamento previsti, l'allegato 2 riporta una tabella e degli schemi unifilari riassuntivi delle grandezze monitorate e delle conseguenti grandezze aggregate valutabili a seguito di elaborazioni statistiche. Nella tabella sono riassunte tutte le grandezze energetiche ed ambientali misurate e monitorate nell'edificio F40, specificando il livello di approfondimento di misura: edificio, piano o stanza. È poi precisato che i valori di soglia, specifici per ogni misura, non possono che essere inizialmente determinati dalla letteratura e solo successivamente da dati storici dell'edificio stesso. Attraverso gli schemi è inoltre possibile identificare il collocamento fisico dei punti di misura elencati nella prima colonna della tabella. Questo permette una lettura più immediata, utile all'installazione ed alle successive fasi di campionamento ed analisi dati, dei punti di misura rispetto alla distribuzione degli impianti: elettrico, di riscaldamento, di raffrescamento e di rilevamento dell'occupazione. L'allegato 3 riporta infine le caratteristiche metrologiche che i vari sensori devono possedere. Tali valori rispettano le indicazioni normative, ove disponibili e gli standard produttivi e di mercato nei casi non affrontati dalla normativa tecnica. I sensori installati nell'edificio F40 risponderanno alle indicazioni riportate in tabella, in termini di accuratezza, confidenza e risoluzione.

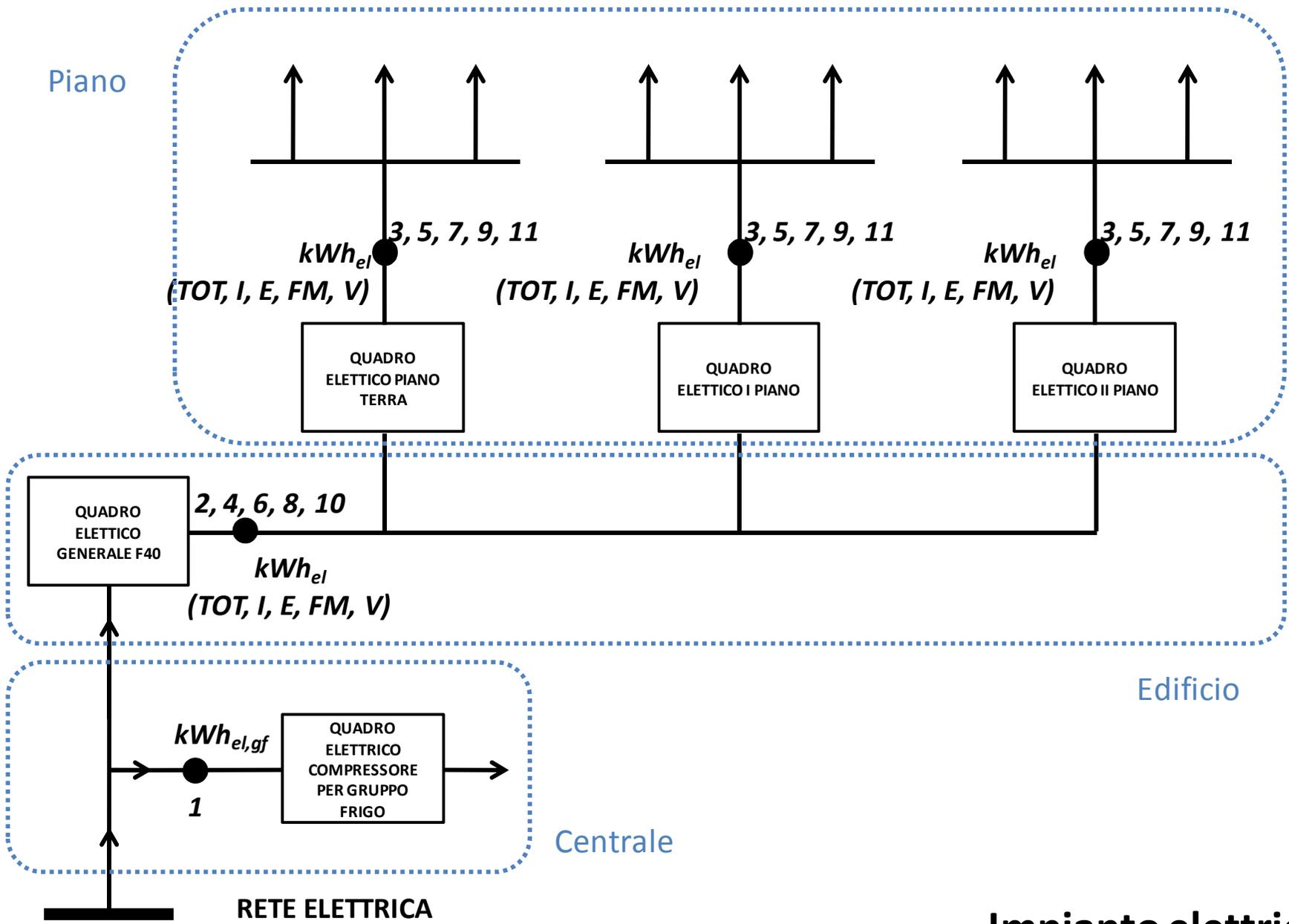
A seguito di questa attività è stato disposto da parte di ENEA un capitolato tecnico per ottenere delle offerte economiche relative alla sensoristica, ai sistemi di comunicazione ed acquisizione dati e all'installazione in campo. La valutazione economica dell'intervento non viene pertanto riportata nel presente documento tecnico.

**ALLEGATO 1. Tabelle di sintesi sui sensori ed i relativi tempi di campionamento**

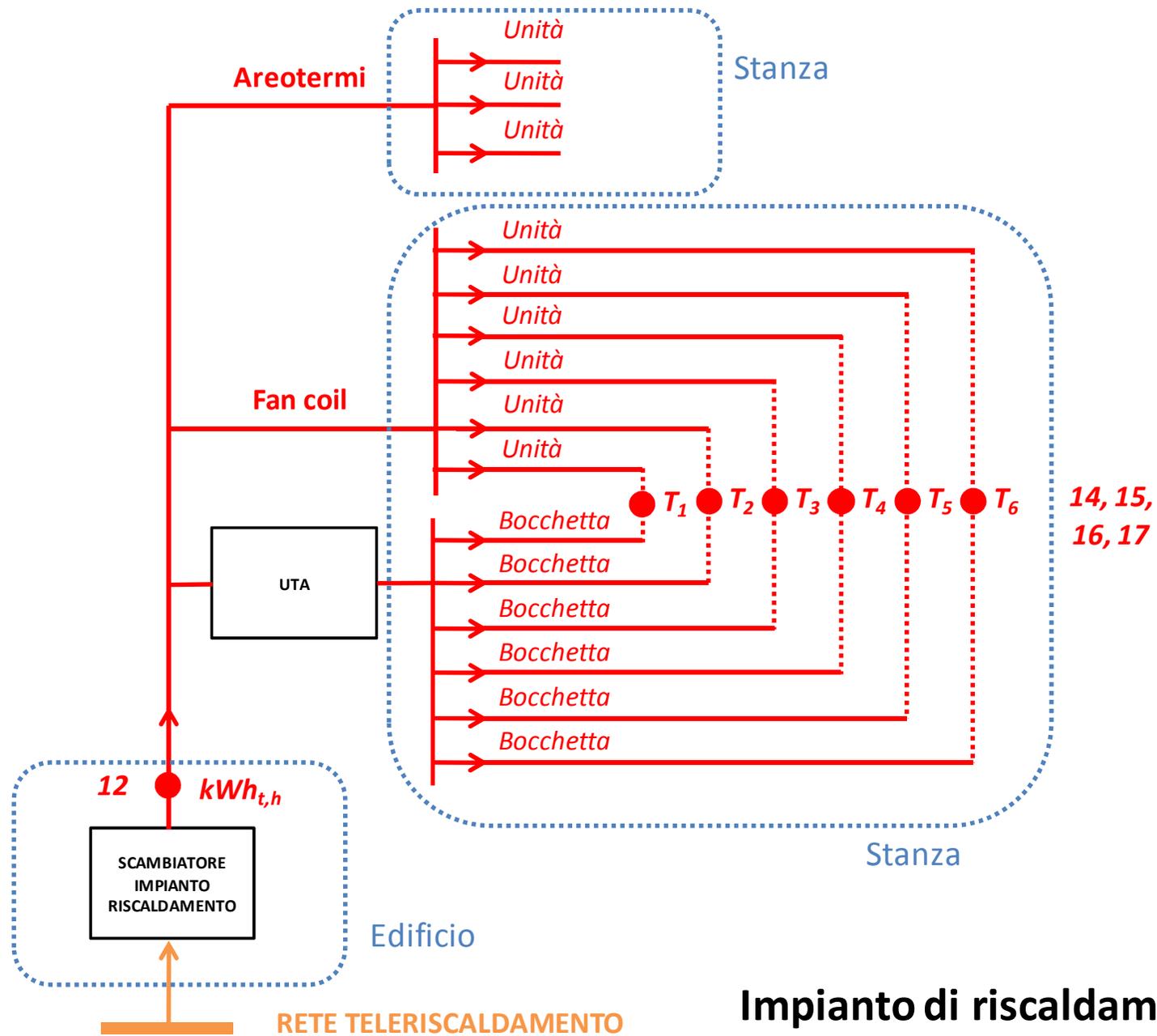
MISURA	SENSORE	QUANTITA'	TEMPO DI CAMPIONAMENTO
Energia elettrica	Multimetro	21	00:00:01
Portata fluido termovettore	Misuratore portata	2	00:00:01
Temperatura fluido termovettore	Termoresistenza	4	00:00:01
Temperatura interna	Termoresistenza	8	00:15:00
Umidità relativa interna	Igrometro	8	00:15:00
Illuminamento interno	Luxmetro	8	00:15:00
Concentrazione interna CO <sub>2</sub>	Misuratore CO <sub>2</sub>	8	00:15:00
Presenza	Misuratore infrarossi	65	sempre attivo
Temperatura esterna	Termoresistenza	1	00:15:00
Umidità relativa esterna	Igrometro	1	00:15:00
Illuminamento esterno	Luxmetro	1	00:15:00
Concentrazione esterna CO <sub>2</sub>	Misuratore CO <sub>2</sub>	1	00:15:00
Irraggiamento solare	Solarimetro	1	00:15:00
Velocità del vento	Anemometro	1	00:15:00
Pressione	Barometro	1	00:15:00

**ALLEGATO 2. Tabella e grafici di sintesi sulle grandezze aggregate ed i punti di misura all'interno dell'F40. Nei grafici accanto al punto di misura è riportato il codice della prima colonna**

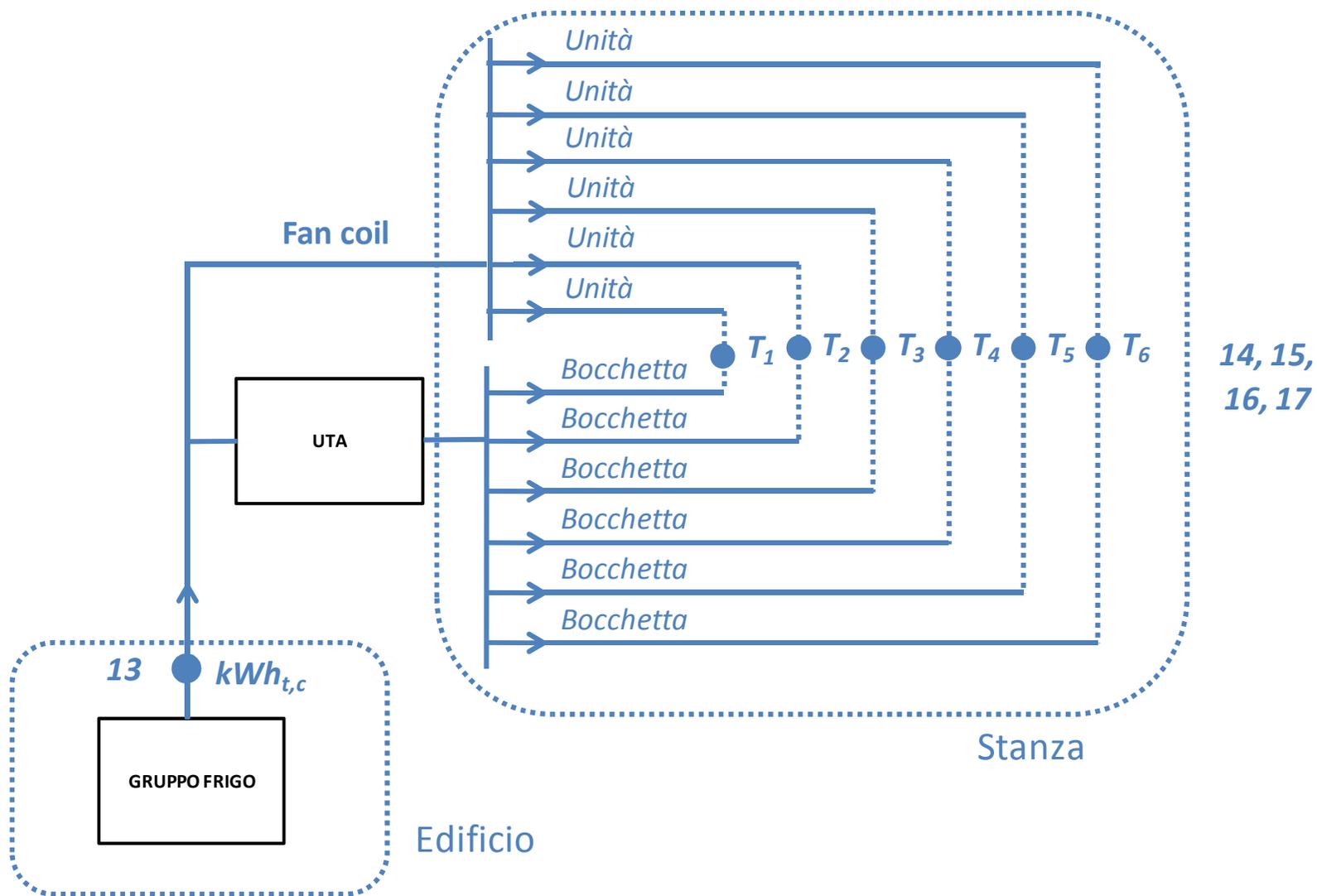
Codice su Schema	Tipo Grandezza	Grandezza	Unità di misura	Grandezze aggregate   pre-elaborazioni					Livello	Descrizione
				Picco	Media	Massimo	Minimo	Altre elaborazioni statistiche		
1	Energetica	Energia elettrica	kWh <sub>el,ef</sub>	x	x	x	x	x	Edificio	Assorbimento compressore gruppo frigorifero e pompe di circolazione
2	Energetica	Energia elettrica	kWh <sub>el,tot</sub>	x	x	x	x	x	Edificio	Assorbimento generale edificio
3	Energetica	Energia elettrica	kWh <sub>el,tot</sub>	x	x	x	x	x	Piano	Assorbimento generale piano
4	Energetica	Energia elettrica	kWh <sub>el,i</sub>	x	x	x	x	x	Edificio	Assorbimento per illuminazione
5	Energetica	Energia elettrica	kWh <sub>el,i</sub>	x	x	x	x	x	Piano	Assorbimento per illuminazione
6	Energetica	Energia elettrica	kWh <sub>el,e</sub>	x	x	x	x	x	Edificio	Assorbimento per luci di emergenza
7	Energetica	Energia elettrica	kWh <sub>el,e</sub>	x	x	x	x	x	Piano	Assorbimento per luci di emergenza
8	Energetica	Energia elettrica	kWh <sub>el,fm</sub>	x	x	x	x	x	Edificio	Assorbimento per forza elettromotrice e acs
9	Energetica	Energia elettrica	kWh <sub>el,fm</sub>	x	x	x	x	x	Piano	Assorbimento per forza elettromotrice e acs
10	Energetica	Energia elettrica	kWh <sub>el,v</sub>	x	x	x	x	x	Edificio	Assorbimento ventilconvettori
11	Energetica	Energia elettrica	kWh <sub>el,v</sub>	x	x	x	x	x	Piano	Assorbimento ventilconvettori
12	Energetica	Energia termica	kWh <sub>t,h</sub>	x	x	x	x	x	Edificio	Consumo per riscaldamento
13	Energetica	Energia termica	kWh <sub>t,c</sub>	x	x	x	x	x	Edificio	Consumo per raffrescamento
14	Ambientale	Temperatura interna	°C	x	x	x	x	x	Stanza	Temperatura dell'aria interna
15	Ambientale	Umidità relativa interna	%	x	x	x	x	x	stanza	Umidità relativa interna
16	Ambientale	Illuminamento interno	Lux	x	x	x	x	x	Stanza	Illuminamento interno sul piano di lavoro
17	Ambientale	Concentrazione interna CO <sub>2</sub>	ppm	x	x	x	x	x	Stanza	Livello interno di concentrazione CO <sub>2</sub>
18	Ambientale	Presenza	-	x	x	x	x	x	Stanza	Presenza
19	Ambientale	Presenza	-	x	x	x	x	x	Edificio	Rilevamento tornello
20	Ambientale	Temperatura esterna	°C	x	x	x	x	x	Edificio	Temperatura dell'aria esterna
21	Ambientale	Umidità relativa esterna	%	x	x	x	x	x	Edificio	Umidità relativa esterna
22	Ambientale	Illuminamento esterno	Lux	x	x	x	x	x	Edificio	Illuminamento esterno sul piano orizzontale
23	Ambientale	Concentrazione esterna CO <sub>2</sub>	ppm	x	x	x	x	x	Edificio	Livello esterno di concentrazione CO <sub>2</sub>
24	Ambientale	Irraggiamento solare	W/m <sup>2</sup>	x	x	x	x	x	Edificio	Irraggiamento solare esterno sul piano orizzontale
25	Ambientale	Velocità del vento	m/s	x	x	x	x	x	Edificio	Velocità del vento
26	Ambientale	Pressione	Pa	x	x	x	x	x	Edificio	Pressione atmosferica



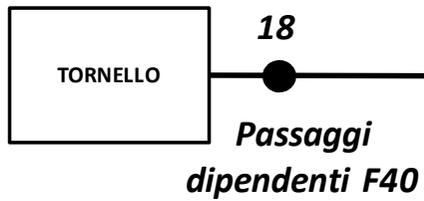
# Impianto elettrico



## Impianto di riscaldamento



## Impianto di raffrescamento



*Sensore  
presenza  
ON/OFF*

●  
19

**Presenze**

*20, 21, 22, 23,  
24, 25, 26*

●  
*T [°C]  
UR [%]  
P [Pa]  
v [m/s]  
I [W/m<sup>2</sup>]*

**Forzanti climatiche**

**ALLEGATO 3. Tabelle di sintesi sulle grandezze energetiche ed ambientali da monitorare**

Grandezza	Tipo di sensore	Intervallo di misura	Risoluzione	Accuratezza minima	Confidenza minima nell'intervallo di misura	Accuratezza ottimale	Confidenza ottimale nell'intervallo di misura	Riferimenti normativi
Temperatura dell'aria interna ( $T_{a,in}$ )	Termoresistenza; Termocoppia	10°C ÷ 40°C	≤ 0,05°C	± 0,5°C	95%	± 0,2°C	95%	UNI EN ISO 7726:2002
Umidità relativa interna ( $UR_{in}$ )	Igrometro	5% ÷ 95%	≤ 0,05%	± 3%	95%	± 2%	95%	UNI EN ISO 7726:2002
Concentrazione interna CO <sub>2</sub> ( $CO_{2,in}$ )	Cella elettrochimica	0 ppm ÷ 2000 ppm	≤ 1 ppm	± 3 ppm	95%	± 3 ppm	95%	N/A
	NDIR: Non-Dispersive Infrared Technology	0 ppm ÷ 2000 ppm	≤ 1 ppm	± 50 ppm	95%	± 25 ppm	95%	N/A
Illuminamento interno ( $E_{in}$ )	Luxmetro	0 lux ÷ 2000 lux	1 lux	≤ 5%	95%	≤ 10%	95%	UNI EN 12464:2004; UNI 11142:2004
Temperatura dell'aria esterna ( $T_{a,out}$ )	Termoresistenza; Termocoppia	- 40°C ÷ 80°C	≤ 0,05°C	± 0,5°C	95%	± 0,2°C	95%	DIN 43760; BS EN 60751:2008
Umidità relativa esterna ( $UR_{out}$ )	Igrometro	5% ÷ 95%	≤ 0,05%	± 3%	95%	± 2%	95%	N/A
Concentrazione esterna CO <sub>2</sub> ( $CO_{2,out}$ )	Cella elettrochimica	0 ppm ÷ 2000 ppm	≤ 1 ppm	± 3 ppm	95%	± 3 ppm	95%	N/A
	NDIR: Non-Dispersive Infrared Technology	0 ppm ÷ 2000 ppm	≤ 1 ppm	± 50 ppm	95%	± 25 ppm	95%	N/A
Illuminamento esterno ( $E_{out}$ )	Luxmetro	0 lux ÷ 200000 lux	1 lux	≤ 3%	95%	≤ 3%	95%	N/A
Irraggiamento solare esterno ( $I_{out}$ )	Piranometro; Radiometro	0 W/m <sup>2</sup> ÷ 2000 W/m <sup>2</sup> nel campo spettrale 0,3 μm ÷ 3 μm	≤ 1 W/m <sup>2</sup>	± 15 W/m <sup>2</sup> (incertezza totale ≤ 5%)	95%	± 7 W/m <sup>2</sup> (incertezza totale ≤ 2%)	95%	ISO 9060; ISO9847; WMO Guide 1996
Velocità del vento ( $v_{out}$ )	Anemometro	0 m/s ÷ 60 m/s	≤ 0,01 m/s	± 0,5 m/s	95%	± 0,1 m/s	95%	N/A

Grandezza	Tipo di sensore	Intervallo di misura	Risoluzione	Accuratezza minima	Confidenza minima nell'intervallo di misura	Accuratezza ottimale	Confidenza ottimale nell'intervallo di misura	Riferimenti normativi
Delta termico del fluido termovettore ( $\Delta\theta$ )	Termoresistenza	-20°C ÷ 20°C	≤ 0,05°C	± (0,5 + 3 $\Delta\theta_{min} / \Delta\theta$ )	95%	± (0,5 + 3 $\Delta\theta_{min} / \Delta\theta$ )	95%	UNI EN 1434
Portata del fluido termovettore ( $q$ )	Misuratore di portata	variabile	≤ 1 L/h	± 5% (classe 3)	95%	± 5% (classe 2)	95%	UNI EN 1434
Energia termica ( $E_T$ )	Contatore di calore	variabile	≤ 1 kWh	± (4 + 4 $\Delta\theta_{min} / \Delta\theta$ + 0,05 $q_p/q$ ) (classe 3)	95%	± (3 + 4 $\Delta\theta_{min} / \Delta\theta$ + 0,02 $q_p/q$ ) (classe 2)	95%	UNI EN 1434

Grandezza	Tipo di sensore	Intervallo di misura	Accuratezza	Condizioni di utilizzo	Riferimenti normativi
misura corrente continua	sensore ad effetto Hall	range da 0 a 1000A	Errore di non linearità <1% Sensibilità 280 V/T Campo di misura lineare -5 mT ÷ +5 mT Tempo di risposta < 6µs Misure ingegnerizzate in decimo di Ampere	Condizioni di utilizzo: -10 ÷ +60°C; <80% U.R. non condensante Condizioni di stoccaggio: -20 ÷ +70°C; <80% U.R. non condensante Protezione scatola: IP 55	C Direttive Comunitarie 2006/95/CE, 89/336/CE, 99/5/CE
misura della corrente alternata	Trasduttore di corrente semirigido Rogowski	10-500A	Risoluzione lettura:1A Precisione lettura: ±2% previa calibrazione del sensore Rogowsky	Condizioni di utilizzo: -10 ÷ +60°C; <80% U.R. non condensante Condizioni di stoccaggio: -20 ÷ +70°C; <80% U.R. non condensante	Direttive Comunitarie 2006/95/CE, 89/336/CE, 99/5/CE UNI EN 1434
Tensione Vac Potenza Attiva W Potenza Reattiva Var Potenza Apparente VA Potenza Distorcente Corrente Equivalente Trifase A Corrente Di Linea A CosFI WH Fattore di Potenza PF Energia Attiva Erogata Wh Energia Attiva Assorbita Wh Energia Reattiva Induttiva Tensione alimentazione Frequenza Hz	Multimetro	Tensione nominale [V rms] 230 +15% - 10% [V rms] 240 +15% - 10% [V rms] 115 +15% - 10% Frequenza [V rms] 120 +15% - 10% Hz] 45...65 Potenza assorbita [VA] <6 Range ingressi tensione [V rms] 10...500 V (L-N) Corrente Range [A rms] 0.05...5	Tensione ±0.5% Corrente ±0.5% fondo scala Potenza attiva ±1% ±0.1% a fondo scala da $\cos\phi = 0.3$ a $\cos\phi = -0.3$ <b>Frequenza</b> ±0.2% ±0.1Hz da 40.0 to 99.9 Hz ±0.2% ±1 Hz da 100 a 500 Hz Valore Massimo di Energia misurata per ogni singola fase 4294.9 MWh (MVarh) con KA = KV = 1 Valore Massimo per sistema trifase 4294.9 MWh (MVarh) con KA = KV = 1 Accuratezza Class 1 Massima potenza assorbita [VA] 1.4 per ogni input	Temperatura [°C] 0...+50 Temperatura di conservazione [°C] -10...+60 Umidità relative 90% massima (senza condensazione) a40°C	

## CONCLUSIONI

L'attività svolta si è focalizzata sullo studio e sviluppo un approccio diagnostico delle prestazioni energetiche e ambientali dell'edificio, supportato dalle informazioni derivanti da un sistema di monitoraggio energetico-ambientale a bordo dell'edificio stesso. La destinazione d'uso presa in esame è stata quella terziaria.

Lo studio ha declinato la fase diagnostica come composta da attività intercorrelate, che vanno dalla definizione puntuale delle informazioni da raccogliere e delle grandezze da misurare fino al "situation assessment" per l'individuazione di criticità di gestione.

Si è da subito evidenziata la necessità di una chiara definizione degli obiettivi da raggiungere attraverso un piano di monitoraggio a supporto della diagnostica. Dopo aver risposto alla domanda "perché misurare?" in modo da chiarire le finalità dell'analisi, è quindi essenziale stabilire quali grandezze misurare (cosa misuro?), dove effettuare la misura (dove misuro?) in base alla reale possibilità di intercettare i flussi energetici dell'edificio, con quali strumenti e apparecchiature condurre le misurazioni (come misuro?), con quale frequenza effettuare le misure (quando misuro?).

La risposta alle domande sopra presentate consente di ideare l'adeguata struttura del database, che potrà collezionare sia le grandezze misurate sia opportune elaborazioni delle grandezze stesse (le cosiddette grandezze aggregate) sia indicatori caratterizzanti delle prestazioni energetiche e ambientali degli edifici. Nello studio presentato, sono stati in particolare introdotti questi parametri con riferimento all'edilizia terziaria e sono stati puntualmente definiti per il caso dell'edificio ENEA F40, sul quale è stato possibile sviluppare una importante esperienza applicativa in termini di definizione sia dell'architettura del sistema di monitoraggio, che delle caratteristiche dei sistemi di misura da mettere in campo.

Le grandezze acquisite ed elaborate sono state successivamente lo spunto per lo sviluppo di una originale logica di diagnostica energetico-ambientale degli edifici di tipo real-time, basata sullo sviluppo di alberi decisionali. Questa logica, frutto di una approfondita riflessione da parte del gruppo di lavoro, potrà trovare un ulteriore approfondimento attraverso la futura applicazione all'edificio ENEA F40: non appena il monitoraggio dei dati sarà a regime, esso potrà alimentare il processo logico descritto che potrà essere testato, rivisto e validato.

In generale, quindi, lo studio condotto ha permesso di sviluppare un approccio metodologico per i piani di monitoraggio e per la successiva fase di pre-processing dei dati, aspetti fondamentali per la diagnostica della gestione energetica degli edifici. Come primo risultato, l'organizzazione logica del database e le successive elaborazioni devono restituire la caratterizzazione della prestazione energetica attraverso indicatori in grado di rappresentarne il consumo energetico, dall'energia primaria agli usi finali.

La corretta acquisizione e strutturazione delle informazioni nel database, ha consentito inoltre lo sviluppo del "situation assessment" attraverso lo sviluppo di modelli (alberi decisionali) previsionali real-time di difetti o malfunzionamenti.

I prossimi sviluppi del presente progetto si concentreranno sulle attività che fanno capo alla fase di pre-processing, con particolare attenzione dedicata alla definizione dei valori di soglia per le grandezze monitorate e per le grandezze aggregate, nonché la definizione di valori di riferimento per gli indicatori prestazionali energetico e ambientali utili ai fini diagnostici. Inoltre, gli sviluppi del progetto si focalizzeranno sulla verifica e validazione delle logiche di "situation assessment" introdotte che rappresentano un originale risultato della ricerca condotta.

## **CAPITOLO 2 - OTTIMIZZAZIONE**

L'ottimizzazione del sistema di controllo costituisce un efficace modalità per aumentare l'efficienza di sistema produttivo. Un appropriato sistema di controllo permette infatti di aumentare la produzione e ridurre i costi di funzionamento, più di qualunque altro dispositivo [Shinsky]. In questo secondo capitolo si analizzerà pertanto un approccio per l'ottimizzazione del sistema di regolazione di un sistema energetico innovativo. Tale approccio sarà applicato ad un modello dinamico dell'impianto di solar cooling installato presso il centro di ricerca Enea Casaccia.

**NOTA:**

[1] F.G. Shinskey (1978). Energy Conservation through control. Academic Press. New York

## DESCRIZIONE DEL SISTEMA

Il sistema oggetto della presente analisi è costituito dall'impianto di solar cooling installato presso l'edificio F51 della sede Enea di Casaccia. L'impianto è qui descritto brevemente al fine di definirne le caratteristiche e le considerazioni che sono state fatte dal punto di vista modellistico. Per una più completa descrizione si rimanda a (Simonetti et al. 2010).

Uno schema dell'impianto è riportato in Figura 1. Esso si compone di 7 componenti: il campo solare, un accumulo di acqua calda costituito da due serbatoi, uno scambiatore di calore, la caldaia di integrazione, il gruppo frigorifero ad assorbimento, la torre evaporativa e un accumulo di acqua fredda. Oltre a questi è presente un gruppo frigorifero a compressione di vapore, utilizzato per integrazione e riserva.

L'impianto è dimensionato in modo da poter fornire una potenza frigorifera massima di 70 kW.

**Il campo solare** è costituito da 30 pannelli del tipo Kloben Sky 21, per una superficie totale di 99 m<sup>2</sup>. La potenza termica in condizioni di riferimento è circa 65 kW (calcolati con una radiazione di 1000 W/m<sup>2</sup>, temperatura di mandata dell'acqua di 88 °C e ritorno di 83 °C, come richiesto in condizioni di progetto dall'assorbitore, e una temperatura esterna di 35 °C).

**Lo scambiatore di calore** serve per disaccoppiare il circuito idraulico del campo solare, da quello di alimentazione del gruppo frigorifero.

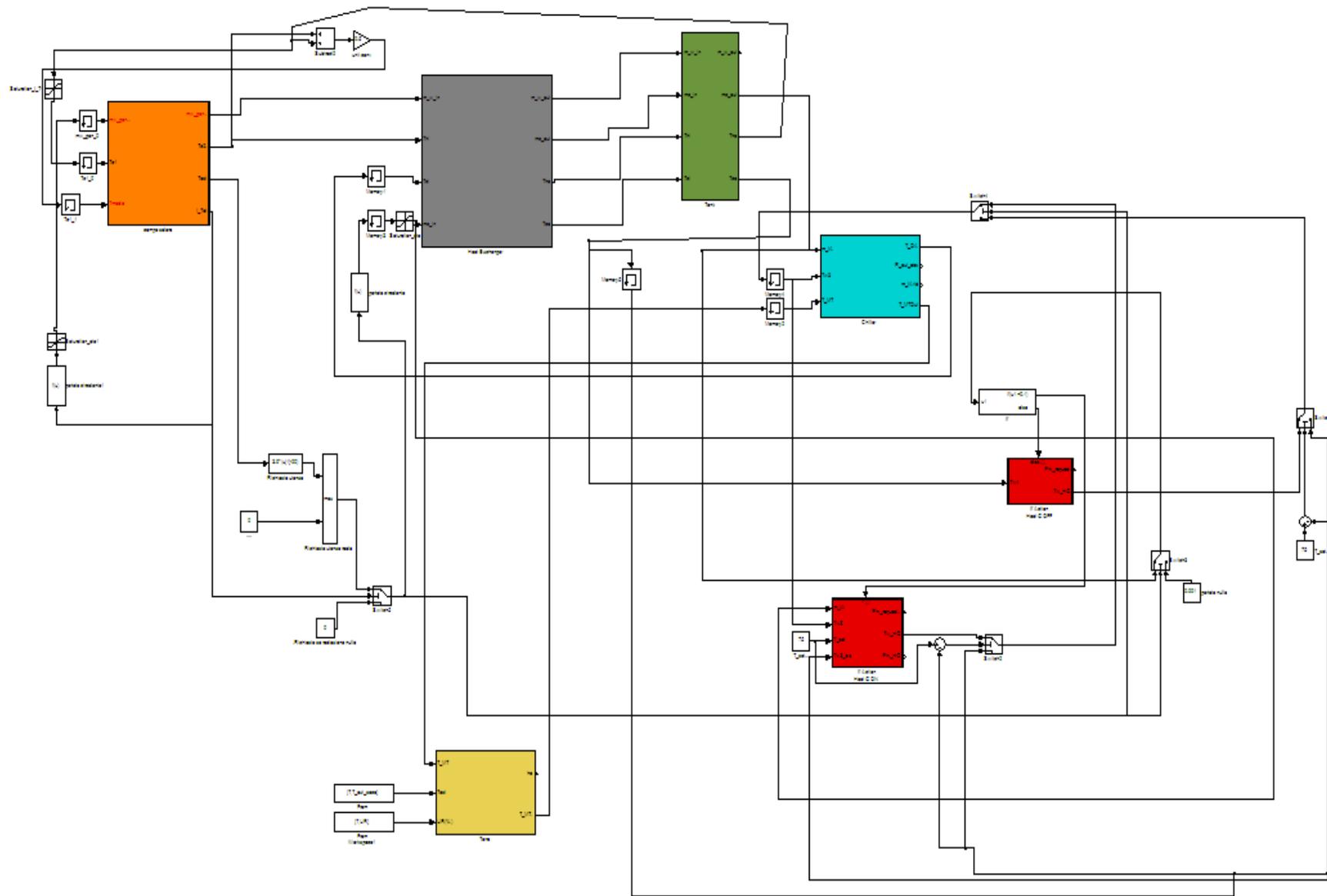
**I serbatoi di accumulo** hanno un volume di 1.5 m<sup>3</sup> ciascuno. Considerando una variazione di 5°C tra la temperatura di alimentazione del gruppo frigorifero e quella di ritorno, la quantità di energia che può

essere complessivamente accumulata è di 63 MJ, corrispondenti a circa 16 minuti di funzionamento ad una potenza di 65 kW. Questa considerazione è utile al fine della scelta delle ipotesi da considerare in fase di ottimizzazione del sistema.

**La caldaia** è utilizzata per aumentare la temperatura dell'acqua che alimenta il gruppo frigorifero. Attualmente la temperatura massima alla quale la caldaia è in grado di portare l'acqua è di 75 °C. Nelle analisi è stata anche considerata l'ipotesi di sostituzione della caldaia con una in grado di riscaldare l'acqua fino alla temperatura di 90 °C.

**Il gruppo frigorifero** è una unità ad assorbimento YAZAKI WFC 20, che utilizza come fluido di processo una miscela di acqua e bromuro di litio. Questa macchina è in grado di funzionare in un campo di temperature di alimentazione comprese tra 95 °C e 70 °C, con una potenza frigorifera utile compresa tra 85 kW e 5 kW, in funzione, oltre che della temperatura di alimentazione anche della temperatura dell'acqua di torre. La temperatura dell'acqua refrigerata è 7 °C.

**La torre evaporativa** è utilizzata per il raffreddamento dell'acqua che alimenta il condensatore e l'assorbitore del gruppo frigorifero. Si tratta di una torre ad umido alimentata in condizioni nominali con una portata d'aria di 3.7 m<sup>3</sup>/s e una portata di acqua di 7.6 kg/s. E' caratterizzata da un banco di ventilatori centrifughi che possono essere azionati da motori a doppia velocità, per una potenza installata di 3 kW.



**Figura 43.** Schema del sistema realizzato in ambiente Simulink – connessioni logiche tra i blocchi

## MODELLO DI CALCOLO

Il modello di calcolo dei componenti descritti nella sezione precedente ne definisce il comportamento in condizioni di progetto e fuori progetto. Per tutti i componenti, con l'eccezione dei serbatoi di accumulo, sono state considerate condizioni stazionarie. Di seguito sono riportate le equazioni dei componenti, unitamente ai parametri che li caratterizzano.

### **Campo solare**

La potenza  $Q_u$  prodotta da un pannello solare termico può essere valutata come

$$Q_u = A_c \cdot I_t \cdot \eta$$

dove  $A_c$  rappresenta l'area occupata dai collettori,  $\eta$  il rendimento del pannello e  $I_T$  [ $W/m^2$ ] la radiazione solare incidente su una superficie inclinata.

Il rendimento del pannello viene calcolato utilizzando opportuni coefficienti ( $\eta_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ) forniti da catalogo, i quali dipendono dal tipo di pannello:

$$\eta = \eta_0 - a_1 \frac{\Delta T}{I_t} - a_2 \frac{\Delta T^2}{I_t}$$

Nel caso specifico, (Kloben SKY21) essi sono pari, rispettivamente, a 0.718 ( $\eta_0$ ), 0.974 [ $W/m^2K$ ] ( $a_1$ ) e 0.004 [ $W/m^2K^2$ ] ( $a_2$ ).

La radiazione totale incidente su tale superficie può essere espressa come

$$I_T = I_{T,b} + I_{T,d,iso} + I_{T,d,cs} + I_{T,d,hz} + I_{T,refl}$$

in quanto somma di tre contributi:

- la radiazione diretta ;
- radiazione diffusa dal cielo, la quale si suddivide ulteriormente in:
  - *isotropa*: ricevuta in modo uniforme da tutta la volta celeste
  - *circumsolare diffusa*: risultato dell'effetto di scattering sulla radiazione da parte dell'atmosfera; si concentra nelle zone del cielo più vicine al sole
  - *horizon brightening*: concentrata all'orizzonte e più importante per cieli sereni.
- la radiazione riflessa;

Per una superficie inclinata di area  $A_C$ , la radiazione totale incidente può essere espressa in funzione delle radiazioni diretta e diffusa sulla superficie orizzontale e della radiazione totale sulle superfici circostanti che riflettono sulla superficie del collettore:

$$A_c I_T = I_b R_b A_c + I_{d,iso} A_s F_{s-c} + I_{d,cs} R_b A_c + I_{d,hz} A_{hz} F_{hz-c} + \sum_i I_i \rho_i A_i F_{i-c}$$

$$R_b = \frac{\cos \vartheta}{\cos z}$$

$$\cos z = \cos L \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin L \cdot \sin \delta$$

dove  $\vartheta$  rappresenta l'angolo compreso fra la superficie del collettore ed il raggio solare incidente, mentre  $z$  rappresenta l'angolo zenitale,  $L$  la latitudine,  $\delta$  la declinazione,  $\omega$  l'angolo orario.

Il primo termine rappresenta il contributo diretto. Il secondo è il termine isotropo diffusivo che include il prodotto dell'area del cielo  $A_s$  (un'area indefinita) ed il fattore di vista cielo-collettore  $F_{s-c}$ . Il terzo fattore viene considerato come proveniente dalla stessa direzione del termine diretto. Il quarto è il contributo della radiazione diffusa dall'orizzonte da una banda di area indefinita  $A_{hz}$ . Il quinto termine comprende i contributi provenienti dalla radiazione riflessa da costruzioni, campi, cui la superficie inclinata è esposta. Il pedice  $i$  ad ogni flusso riflesso;  $\rho_i$  indica il valore dell'albedo,  $F_{i-c}$  il fattore di vista tra la superficie  $i$ -esima ed il collettore. Si assume che le superfici riflettenti siano riflettori diffusivi.

Data l'impossibilità di calcolare con precisione il termine di energia riflessa, nella pratica si assume la presenza di una sola superficie, orizzontale, molto estesa, che riflette in modo diffuso; in questo caso  $I_i$  viene indicata semplicemente mediante  $I$  e  $\rho_i$  diventa  $\rho_g$ , intendendo con tale valore una riflettanza composita del terreno. A seguito di ulteriori semplificazioni, la radiazione totale incidente viene espressa come

$$I_T = I_b R_b + I_{d,iso} F_{c-s} + I_{d,cs} R_b + I_{d,hz} F_{c-hz} + I \rho_g F_{c-g}$$

tale equazione rappresenta la base per il calcolo di  $I_T$ . Nel *modello isotropo diffusivo* proposto da Liu e Jordan nel 1963, la radiazione su una superficie inclinata è considerata come composta da:

- ❖ radiazione diretta
- ❖ radiazione isotropa diffusa
- ❖ radiazione riflessa dal terreno in modo diffuso;

in pratica il terzo ed il quarto termine della precedente equazione sono considerati nulli, in quanto l'intero termine di radiazione diffusa è considerato isotropo.

Per una superficie inclinata rispetto al terreno di un angolo  $\Sigma$  (angolo di tilt), la radiazione  $I_T$  risulta pari alla somma di tre termini:

$$I_T = I_b R_b + I_d \left( \frac{1 + \cos \Sigma}{2} \right) + I \rho_g \left( \frac{1 - \cos \Sigma}{2} \right)$$

Nota la costante solare, pari a 1361 [W/m<sup>2</sup>] la *clearness index* risulta essere pari a:

$$K_T = \frac{H}{H_0}$$

Che rappresenta il rapporto tra la radiazione di un particolare giorno  $H$  e la radiazione extraterrestre per quel giorno  $H_0$ .

Il valore della radiazione solare diffusa non può essere stimato dalla radiazione totale; a titolo esemplificativo, la radiazione totale giornaliera tipica di una giornata media (tipologia intermedia fra completamente serena e completamente nuvolosa), può dipendere da una tale molteplicità di fattori concomitanti diversi, quali intermittenza delle nuvole, nubi poco consistenti per periodi prolungati, nubi molto fitte per un periodo limitato, ecc, per cui risulta impossibile evincere questa serie di circostanze dai valori totali giornalieri.

Il metodo illustrato di seguito fornisce risultati soddisfacenti per giornate serene, ovvero per quei giorni in cui la produzione di energia tramite l'impiego di pannelli è più consistente. Inoltre il metodo tende a produrre valutazioni conservative sul lungo periodo.

Studi statistici riguardanti la distribuzione della radiazione totale su una superficie orizzontale nel corso della giornata hanno condotto alla deduzione del coefficiente  $r_t$ , rapporto tra la radiazione oraria totale e la giornaliera totale. Tale parametro è funzione della durata del giorno e dell'ora in questione.

La radiazione totale orizzontale può essere quindi espressa come

$$I_{th} = Hr_t$$

dove  $r_t$  è determinato empiricamente:

$$r_t = \frac{\pi}{24} \cdot (a + b \cdot \cos \omega) \cdot \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \frac{\pi \omega_s}{180} \cos \omega_s}$$

$$a = 0.409 + 0.5016 \sin(\omega_s - 60)$$

$$b = 0.6609 + 0.4767 \sin(\omega_s - 60)$$

La radiazione diffusa viene ora calcolata mediante la seguente equazione

$$I_{dh} = H_d r_d$$

dove  $r_d$  è ricavato ancora una volta empiricamente (Liu-Jordan)

$$r_d = \frac{\pi}{24} \cdot \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \frac{\pi \omega_s}{180} \cos \omega_s}$$

in cui  $\omega$  rappresenta l'angolo orario relativo all'ora presa in esame e  $\omega_s$  l'angolo orario relativo all'ora del tramonto del sole nel giorno considerato; si ricorda che:

$$\omega = -(12 - h) \cdot 15$$

$$\cos \omega_s = -\tan L \cdot \tan \delta$$

$$\delta = 23.45 \cdot \sin\left(360 \cdot \frac{284 + n}{365}\right)$$

in cui  $h$  è l'ora esaminata,  $L$  la latitudine del luogo,  $\delta$  la declinazione,  $n$  un parametro variabile in funzione del mese e del numero d'ordine del giorno considerato. In altri termini il coefficiente  $R_d$  rappresenta il rapporto tra la radiazione diffusa oraria e la diffusa giornaliera.

Tabella 1. Grandezze caratteristiche e declinazione relativa al giorno tipo del mese

mese	$n$ per l' $n$ -esimo giorno del mese	data	$n$ , giorno dell'anno	$\delta$ , declinazione
<b>gennaio</b>	$i$	17	17	-20.9
<b>febbraio</b>	$31 + i$	47	47	-13.0
<b>marzo</b>	$59 + i$	16	75	-2.4
<b>aprile</b>	$90 + i$	15	105	9.4
<b>maggio</b>	$120 + i$	15	135	18.8
<b>giugno</b>	$151 + i$	11	162	23.1
<b>luglio</b>	$181 + i$	17	198	21.2
<b>agosto</b>	$212 + i$	16	228	13.5
<b>settembre</b>	$243 + i$	15	258	2.2
<b>ottobre</b>	$273 + i$	15	288	-9.6
<b>novembre</b>	$304 + i$	14	318	-18.9
<b>dicembre</b>	$334 + i$	10	344	-23.0

Il valore di irradianza  $H_d$  è legato all' irradianza media giornaliera mediante il termine

$$H_d = K_d H$$

Studi sui dati relativi alla radiazione giornaliera disponibile hanno mostrato che la frazione media diffusa,  $H_d/H$ , è funzione del *clearness index*  $K_T$ . E' largamente accettata l'ipotesi di una dipendenza quantomeno stagionale; i valori di radiazione diffusa in primavera estate e autunno sono sostanzialmente costanti al variare di  $K_T$ , mentre in inverno i valori della frazione diffusa sono leggermente inferiori per alti valori di  $K_T$ . La stagione è indicata dall'angolo orario relativo al tramonto  $\omega_s$ . Le equazioni che rappresentano queste correlazioni sono riportate di seguito.

Per  $\omega_s < 81.4^\circ$

$$K_d = 1 - 0.2727K_T + 2.4495K_T^2 - 11.9514K_T^3 + 9.3879K_T^4 \quad \forall K_T < 0.715$$

$$K_d = 0.143 \quad \forall K_T \geq 0.715$$

per  $\omega_s \geq 81.4^\circ$

$$K_d = 1 + 0.2832K_t - 2.5557K_t^2 + 0.8448K_t^3 \forall K_t < 0.722$$

$$K_d = 0.175 \forall K_t \geq 0.722.$$

la radiazione diretta orizzontale può essere calcolata mediante:

$$I_{bh} = I_{th} - I_{dh}$$

A seguito di alcune considerazioni di carattere trigonometrico, si giunge alla valutazione della radiazione solare incidente su una superficie inclinata :

$$I_t = I_{bh} \cdot \cos \vartheta \cdot \frac{1}{\cos z} + I_{dh} \cdot F_{s-c} + \rho \cdot I_{th} \cdot F_{s-t}$$

$$F_{s-c} = \frac{1 + \cos \Sigma}{2}$$

$$F_{s-t} = 1 - F_{s-c}$$

L'atmosfera è responsabile dei fenomeni di scattering e assorbimento della radiazione solare a seconda del momento considerato, delle condizioni atmosferiche e della variazione del parametro  $m$ , rapporto tra la massa di aria che la radiazione attraversa e la massa che attraverserebbe qualora il sole fosse allo zenit

$$m = \frac{1}{\cos z}$$

La prima parte del modello utilizzato per il sistema *solar-cooling* calcola, sulla base dei valori di latitudine e longitudine della località presa in esame, i parametri da utilizzare nella determinazione dell'irradiazione totale: l'ora solare, l'angolo solare, le correzioni rispetto al meridiano di riferimento, gli sfasamenti orari in corrispondenza di ciascun giorno dell'anno

I valori di radiazione diretta e diffusa utilizzati sono stati estratti dall'archivio meteorologico di Energy Plus (Energy Plus Weather Data, Europe WMO, IGDG Italian Climatic data collection "Gianni De Giorgio").

La radiazione totale orizzontale è calcolata ancora come

$$I_{th} = I_{bh} + I_{dh}$$

Tabella.2 . Energy Plus Weather Data, mese di luglio, giorno 27

anno	mese	giorno	ora	temperatura [°C]	UR [%]	radiazione diretta I <sub>bh</sub> [MJ/m <sup>2</sup> ]	radiazione diffusa I <sub>dh</sub> [MJ/m <sup>2</sup> ]
2005	7	27	1	20	63	0	0
2005	7	27	2	19.3	65	0	0
2005	7	27	3	18.4	71	0	0
2005	7	27	4	17.4	80	0	0
2005	7	27	5	17.3	83	0	0
2005	7	27	6	17.7	84	0.1512	0.0468
2005	7	27	7	18.4	83	0.5688	0.1584
2005	7	27	8	20.4	76	1.0764	0.2664
2005	7	27	9	23.2	66	1.6272	0.3672
2005	7	27	10	26.8	52	2.1528	0.45
2005	7	27	11	28.5	47	2.5776	0.5112
2005	7	27	12	29.6	44	2.844	0.5472
2005	7	27	13	30.2	44	2.9016	0.558
2005	7	27	14	30.6	42	2.7468	0.5364
2005	7	27	15	30.6	39	2.4012	0.486
2005	7	27	16	30.2	37	1.9188	0.414
2005	7	27	17	29.4	37	1.3752	0.324
2005	7	27	18	28.1	39	0.8352	0.216
2005	7	27	19	26.4	42	0.3636	0.108
2005	7	27	20	25	49	0.036	0.0108
2005	7	27	21	23.5	58	0	0
2005	7	27	22	22	69	0	0
2005	7	27	23	21.2	74	0	0
2005	7	27	24	20.6	77	0	0

Calcolata l'angolo di declinazione mediante l'equazione di Cooper, la radiazione solare al di fuori dell'atmosfera (*extraterrestrial radiation*) è stata quindi ricavata

$$I_0 = \left(\frac{12 \cdot 3600}{\pi}\right) \cdot G_{sc} \cdot \left(1 + 0.033 \cdot \cos\left(360 \cdot \frac{n}{365}\right)\right) \cdot \left(\cos(\textit{Latitud}) \cdot \cos(\delta) \cdot (\sin(\omega_{\text{post}}) - \sin(\omega)) + \left(\pi \cdot \frac{(\omega_{\text{post}} - \omega)}{180}\right) \cdot \sin(\textit{Latitud}) \cdot \sin(\delta)\right)$$

con G<sub>sc</sub> costante solare pari a 1.347 [kW/m<sup>2</sup>].

Considerato un coefficiente di albedo pari a

$$\rho_g = 0.2$$

Calcolati

$$R_b = \frac{\cos(\textit{latitud} - \beta) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(w) + (\sin(\textit{latitud} - \beta) \cdot \sin(\delta))}{\cos(\textit{latitud}) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(w) + (\sin(\textit{latitud}) \cdot \sin(\delta))}$$

dove

$\beta$  è l'angolo di inclinazione;

$\delta$  è l'angolo di declinazione;

$$k_t = \frac{I_{th}}{I_0}$$

$$A_i = \frac{I_{bh}}{I_0}$$

$$f = \sqrt{\frac{I_{bh}}{I_0}}$$

Il valore di irradianza incidente sul pannello espresso in  $[MJ/m^2]$ , cui contribuiscono sia la radiazione diretta che la radiazione diffusa, risulterà pari a:

$$I_T = (I_{bh} + I_{dh} \cdot A_i) \cdot R_b + (I_{dh} \cdot (1 - A_i) \cdot \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2}\right) \cdot (1 + f \cdot \left(\sin\left(\frac{\beta}{2}\right)\right)^3 + I_{th} \cdot \rho_g \cdot \left(\frac{1 - \cos(\beta)}{2}\right))$$

Il modello è costituito da un primo blocco di calcolo che a fronte di 6 variabili in ingresso ( $T_{est}$ , ora locale, numero del giorno, istante di tempo  $t$ , radiazione diretta e diffusa) restituisce il valore di irradianza totale  $I_T$ ; nel caso in cui  $I_{th}$  o  $I_0$  fossero pari a 0,  $I_T$  e  $f$  sono posti a 0.

Il calcolo del rendimento del pannello viene effettuato come descritto a inizio paragrafo.

Il modello sviluppato impone una portata circolante al pannello (vincolata all'interno di un campo di valori ragionevoli) funzione della richiesta di carico frigorifero da parte dell'utenza, e calcola iterativamente la temperatura di uscita dal pannello e in ingresso al lato caldo dello scambiatore.

La temperatura dell'acqua in uscita dal pannello è così ottenuta:

$$T_{fo} = T_{fi} + \frac{Q_u}{m_f \cdot c_p}$$

La portata di acqua circolante nei pannelli costituisce una delle variabili di controllo del sistema, come sarà illustrato nella sezione che si riferisce al sistema di controllo.

### Serbatoi di accumulo termico

Il sistema di accumulo non può essere trattato utilizzando l'approccio dei sistemi omogenei, come avviene per gli altri componenti, in quanto la temperatura all'interno è una funzione del tempo  $t$  e dello spazio  $s$ . Il comportamento di questo sistema può essere studiato utilizzando l'equazione di conservazione dell'energia, scritta per un corpo continuo:

$$\frac{\rho \cdot c}{k} \cdot \frac{\partial T(s; t)}{\partial t} = \nabla^2 T(s; t) + \frac{q_v}{k} - \frac{c}{k} \cdot \rho \cdot v \cdot (\nabla T)$$

Dove:

- $q_v = 0$  rappresenta la potenza termica per unità di superficie generata internamente al volume di controllo;
- $\rho$  indica la densità dell'acqua;

- $c$  indica il calore specifico;
- $k$  indica la conducibilità termica effettiva dell'acqua. Tale termine è stato calcolato moltiplicando la conducibilità per un termine che tiene conto del potenziamento della stessa dovuta al mescolamento turbolento all'interno del serbatoio. Il fattore correttivo è stato calcolato attraverso una simulazione CFD del serbatoio in alcune condizioni caratteristiche di funzionamento;
- $v$  indica la velocità dell'acqua nel serbatoio;
- 

L'equazione può essere scritta in geometria monodimensionale considerando il serbatoio cilindrico verticale, assumendo l'ipotesi che la temperatura vari spazialmente solo lungo l'asse del serbatoio  $x$ :

$$\rho \cdot c \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - c \cdot \rho \cdot v \cdot \frac{\partial T}{\partial x}$$

L'equazione è alle derivate parziali del secondo ordine. La soluzione è stata ottenuta con il metodo numerico delle differenze finite implicito, il quale prevede una discretizzazione dello spazio e del tempo all'interno del dominio, in modo da approssimare le derivate parziali sfruttando lo sviluppo di Taylor.

Indicando con  $j$  il pedice della discretizzazione spaziale e con  $n$  l'apice della discretizzazione temporale si può riscrivere l'equazione nel modo seguente:

$$\rho \cdot c \frac{T_j^{n+1} - T_j^n}{\Delta t} = k \cdot \frac{T_{j+1}^{n+1} - 2 \cdot T_j^{n+1} + T_{j-1}^{n+1}}{\Delta x^2} - c \cdot \rho \cdot v \cdot \frac{T_{j+1}^{n+1} - T_{j-1}^{n+1}}{2 \cdot \Delta x}$$

per comodità di risoluzione si possono raccogliere i termini simili e l'equazione assume l'aspetto seguente:

$$T_{j+1}^{n+1} \cdot \left( \frac{\Delta t \cdot c \cdot v}{2 \cdot \Delta x \cdot c} - \frac{\Delta t \cdot k}{\Delta x^2 \cdot c} \right) + T_j^{n+1} \cdot \left( 1 + \frac{2 \cdot \Delta t \cdot k}{\Delta x^2 \cdot \rho \cdot c} \right) + T_{j-1}^{n+1} \cdot \left( -\frac{\Delta t \cdot c \cdot v}{2 \cdot \Delta x \cdot c} - \frac{\Delta t \cdot k}{\Delta x^2 \cdot \rho \cdot c} \right) = T_j^n$$

La definizione delle grandezze spaziali fa riferimento allo schema riportato di seguito.

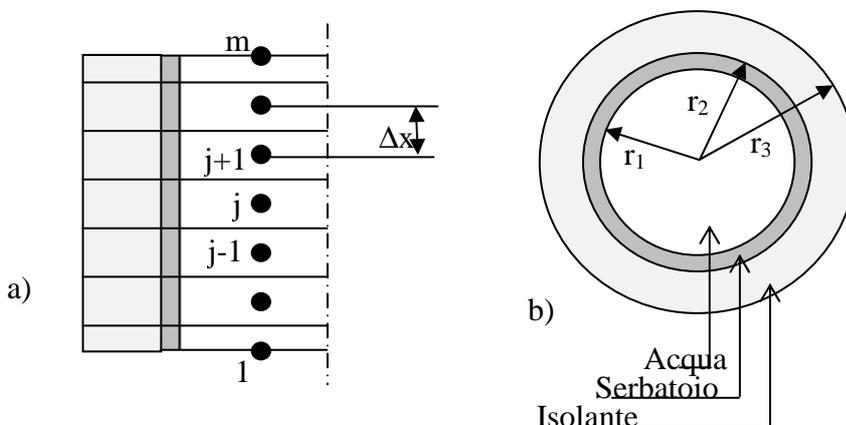


Figura 44. Logica costruttiva del blocco 'accumulo termico'

Considerando tutto il dominio spaziale e temporale, l'equazione precedente può essere rappresentata tramite una scrittura compatta di un sistema di equazioni, che può essere riscritto in forma matriciale come:

$$\langle A \rangle \cdot \langle T_j^{n+1} \rangle = \langle T_j^n \rangle$$

Dove:

- A rappresenta la matrice dei coefficienti;
- $T_j^{n+1}$  rappresenta il vettore delle incognite al tempo  $(n+1)$ ;
- $T_j^n$  rappresenta il vettore dei termini noti al tempo precedente  $n$ .
- 

La matrice A è una matrice quadrata tridiagonale, in cui cioè i coefficienti di  $T_{j+1}^{n+1}$ ,  $T_j^{n+1}$ ,  $T_{j-1}^{n+1}$  sono disposti sulle tre diagonal centrali e tutti gli altri elementi della matrice sono nulli. Il sistema va risolto su tutto il dominio temporale con un metodo iterativo, che a ogni passo di tempo possa calcolare la soluzione avendo come termine noto la soluzione al passo temporale precedente.

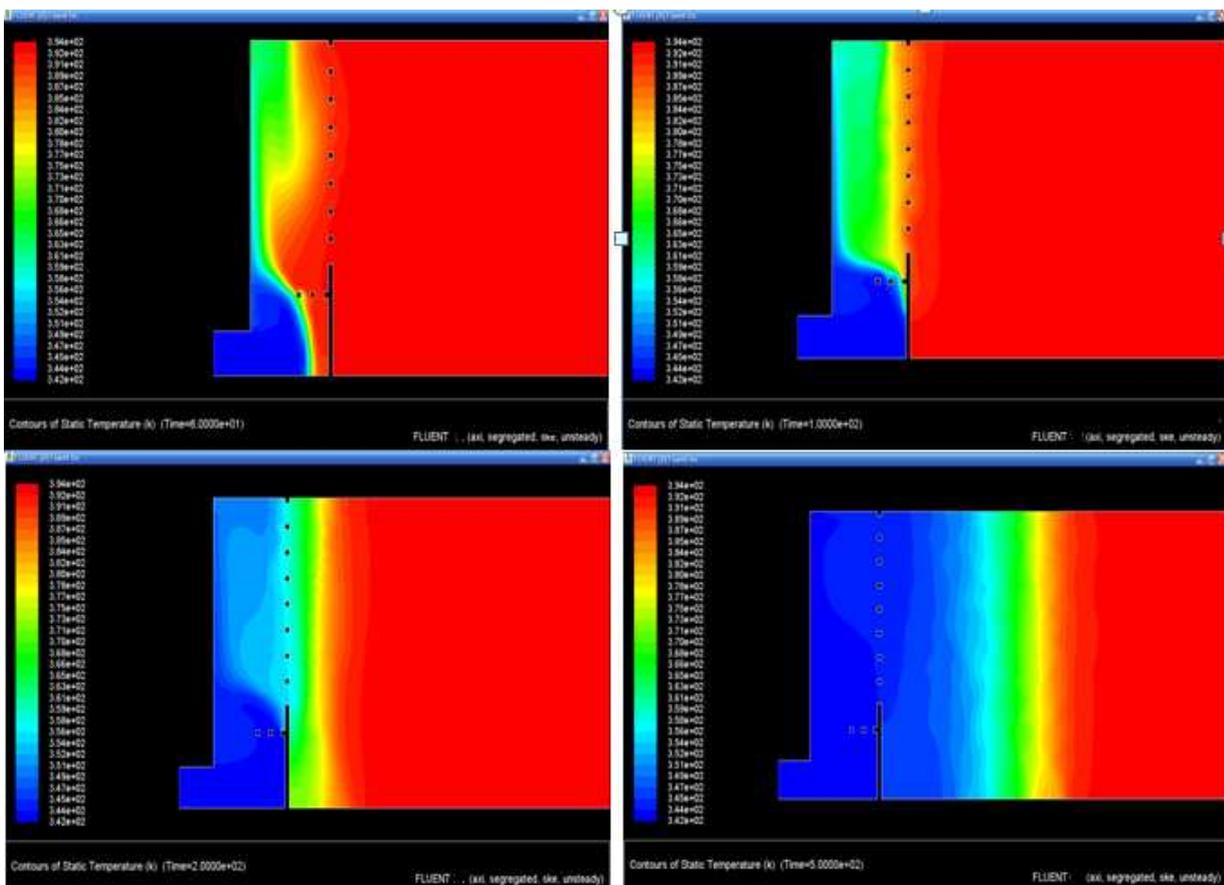
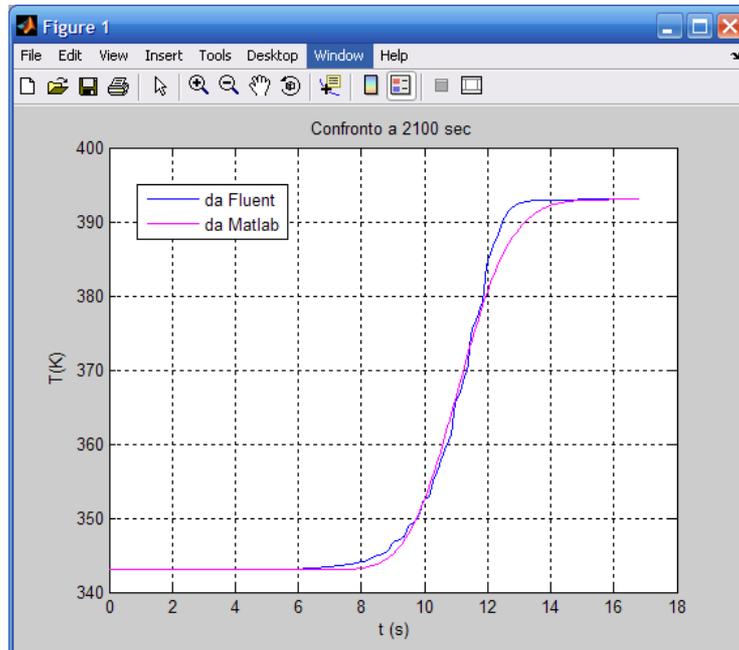


Figura 45. Gradiente termico generato da conduttività termica del fluido, effetti di turbolenza e da moti convettivi.

Tale modello è stato comparato con un modello termo-fluidodinamico assialsimmetrico, al fine di determinare il valore del fattore correttivo della conduttività, come precedentemente indicato, oltre che di verificare la bontà dell'approccio adottato. Le figure seguenti mostrano l'evoluzione della distribuzione di temperatura all'interno di un serbatoio di accumulo ad alta temperatura. La figura mostra la presenza di una zona nella quale si sviluppa un significativo gradiente termico, legato non solo alla conduttività termica del fluido ma anche agli effetti di turbolenza e ai moti convettivi.

La figura seguente mostra invece il confronto tra il modello termo fluidodinamico e il modello alle differenze finite adottato in questa analisi.



**Figura 46.** Confronto tra il modello termo fluidodinamico e il modello alle differenze finite adottato

## Scambiatore di calore

Per la modellazione dello scambiatore di calore si è adottato il metodo  $\epsilon - NTU$ . Tale metodo consente di esprimere la potenza termica trasferita da uno scambiatore in funzione delle capacità termiche delle portate, delle temperature di ingresso dei fluidi, della superficie di scambio termico e del coefficiente globale di scambio termico. Rispetto al metodo della differenza di temperatura media logaritmica, il metodo  $\epsilon - NTU$  è vantaggioso nella soluzione del problema di verifica (cioè quello in cui è nota la superficie di scambio termico dello scambiatore) in quanto permette di evitare forme matematiche indeterminate in fase di soluzione.

Il metodo utilizza i seguenti parametri:

- efficacia  $\epsilon$ , data da:

$$\epsilon = \frac{\Phi}{\dot{C}_{\min} \cdot (T_{ci} - T_{fi})}$$

dove:

$\Phi =$  potenza termica scambiata [W]

$\dot{C}_{\min} =$  capacità termica della portata, minima.

Le due capacità termiche sono ricavate dalle seguenti relazioni:

$\dot{C}_1 = G_c \cdot c_c$  pari al prodotto tra la portata del fluido caldo ed il relativo calore specifico;

$\dot{C}_2 = G_f \cdot c_f$  pari al prodotto tra la portata del fluido freddo ed il relativo calore specifico;

$T_{ci} - T_{fi}$  differenza tra la temperatura del fluido caldo e quella del fluido freddo, entrambe considerate in ingresso allo scambiatore.

- rapporto tra le capacità termiche delle portate:

$$C_R = \frac{(G \cdot c)_{\min}}{(G \cdot c)_{\max}} = \frac{\dot{C}_{\min}}{\dot{C}_{\max}}$$

- numero di unità di trasferimento:

$$NTU = \frac{U \cdot A}{\dot{C}_{\min}}$$

dove:

U = coefficiente globale di scambio termico;

A = superficie di scambio termico.

Il termine a numeratore UA esprime la capacità di trasferimento di uno scambiatore, in quanto si riferisce alla potenza scambiata per un valore unitario della differenza media di temperatura; il termine a denominatore rappresenta la potenza trasferita per variazione unitaria della temperatura del fluido a minore capacità termica.

La deduzione analitica dell'efficienza di uno scambiatore mostra che essa può essere espressa in funzione dei parametri CR ed NTU; si ha cioè  $\varepsilon = \varepsilon(CR, NTU)$  dove il legame funzionale dipende dalla tipologia di scambiatore.

Lo scambiatore è stato considerato in configurazione controcorrente, pertanto l'efficacia è esprimibile:

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NTU \cdot (1 - C_R)]}{1 - C_R \cdot \exp[-NTU \cdot (1 - C_R)]}$$

Il prodotto UA è stato determinato sulla base dei valori di temperatura disponibili in ingresso e uscita allo scambiatore e della potenza termica trasferita dal fluido caldo a quello freddo. Il valore di questo parametro, 6000 W/K, è stato ricavato in condizione di progetto e mantenuto costante in tutte le simulazioni.

## Caldia

Per la caldaia è stato utilizzato un modello molto semplice, che consiste nell'adozione di un valore costante del rendimento termico. E' stato inoltre considerato un vincolo sulla massima temperatura dell'acqua in uscita dallo scambiatore di calore. Tale valore è 75 °C per la caldaia attuale.

## Gruppo frigorifero ad assorbimento

Il gruppo frigorifero è stato modellato sulla base di curve caratteristiche fornite dal costruttore. Tali curve riportano la potenza termica assorbita e quella utile, sulla base della temperatura del fluido caldo in ingresso al generatore e della temperatura dell'acqua di raffreddamento. Tali curve sono state rielaborate al fine di determinare due parametri alternativi ai precedenti, più utili ai fini della soluzione del sistema di equazioni complessivo: il COP della macchina e la variazione di temperatura dell'acqua di alimento dal generatore.

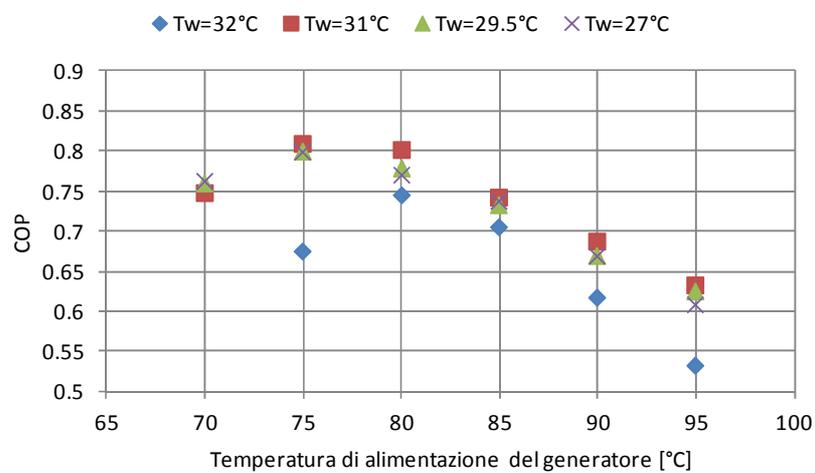


Figura 47. COP in funzione della temperatura di alimentazione del generatore

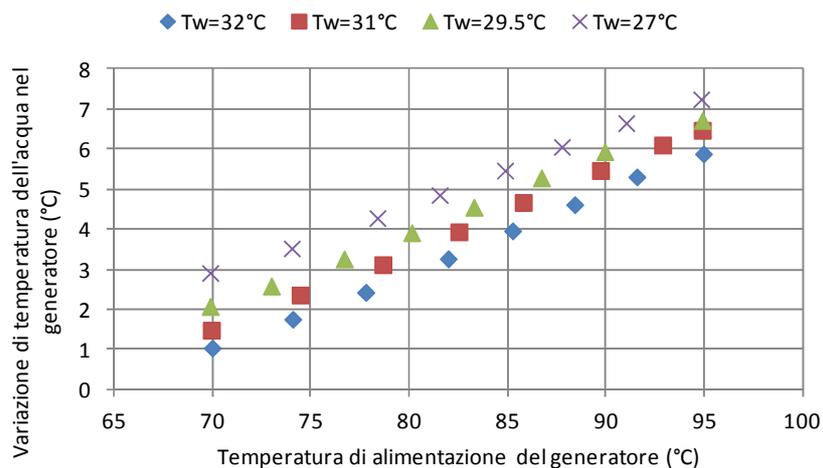


Figura 48. variazione della temperatura dell'acqua nel generatore in funzione della temperatura di alimentazione

La potenza termica scambiata al generatore è espressa in funzione del salto di temperatura dell'acqua di alimentazione come:

$$\Phi_{gen} = m \cdot c \cdot \Delta T_{gen}$$

### Torre evaporativa

Il modello della torre evaporativa è basato sulle ipotesi di *Merkel*, in base alle quali vengono trascurate le perdite d'acqua dovute all'evaporazione e fissato il numero di Lewis a 1.

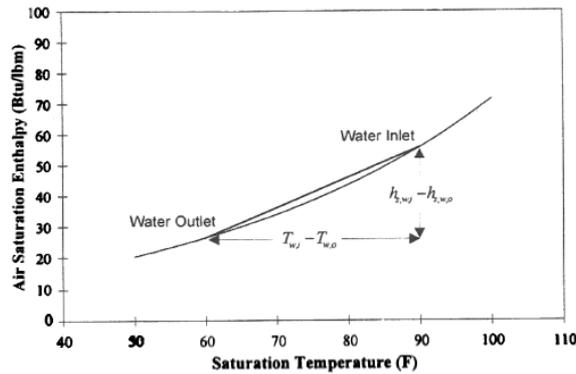


Figura 49. Entalpia di saturazione dell'aria in funzione della temperatura di saturazione

Per quanto il valore di entalpia di saturazione dell'aria non vari linearmente con la temperatura, scegliendo un opportuno intervallo tra condizioni dell'acqua in ingresso e in uscita (figura 7) è possibile scrivere l'efficienza in funzione del valore medio del calore specifico di saturazione  $C_s$ , ricavato a partire dalle condizioni in ingresso e in uscita dell'acqua come:

$$C_s = \frac{h_{si} - h_{so}}{T_{wi} - T_{MT}}$$

dove

$h_{si}$  è l'entalpia dell'aria in ingresso saturata alle condizioni dell'acqua in ingresso ;

$h_{so}$  è l'entalpia dell'aria in uscita saturata alle condizioni dell'acqua in uscita;

$T_{wi}$  è la temperatura dell'acqua di torre in ingresso alla torre evaporativa;

$T_{MT}$  è la temperatura dell'acqua di torre in uscita alla torre evaporativa.

L'efficienza lato aria  $\epsilon_a$  è definita come il rapporto tra il valore corrente di calore trasferito e il valore massimo che ci sarebbe se tutta la portata d'aria in uscita fosse saturata alla temperatura dell'acqua in ingresso.

Per questa ragione il valore di entalpia  $h_{si}$  è calcolato per l'aria umida alla temperatura  $T_{wi}$  (temperatura dell'acqua in ingresso), alla pressione atmosferica e considerando che sia completamente saturata ( $R=1$  equivale a  $UR=100\%$ ):

$$h_{si} = \text{Enthalpy}(\text{AirH}_2\text{O}, T = T_{wi}, P = 101.3, R = 1)$$

Analogamente, l'entalpia dell'aria in uscita saturata è calcolata come

$$h_{so} = \text{Enthalpy}(\text{AirH}_2\text{O}, T = T_{MT}, P = 101.3, R = 1)$$

dove

$T_{MT}$  è la temperatura dell'acqua di torre in uscita alla torre evaporativa.

Alla luce di quanto detto, analogamente per quanto sviluppato per uno scambiatore di calore, l'efficienza lato aria è calcolata come:

$$C_r = \frac{\min(m_a \cdot C_s, m_w \cdot 4.186)}{\max(m_a \cdot C_s, m_w \cdot 4.186)}$$

$$NTU = c_1 \cdot (ratio)^{nt}$$

$$\varepsilon_a = \frac{1 - \exp[-NTU \cdot (1 - C_R)]}{1 - C_R \cdot \exp[-NTU \cdot (1 - C_R)]}$$

La portata d'aria è calcolata in funzione della portata d'acqua, fissato il rapporto tra le due.

$$ratio = \frac{m_w}{m_a}$$

$$ratio = 2.012$$

Il valore di entalpia per l'aria umida in ingresso è calcolata alla temperatura  $T_{est}$  (temperatura di bulbo umido dell'aria esterna) alla pressione atmosferica e con umidità relativa pari a quella esterna.

$$h_i = \text{Enthalpy}(\text{AirH}_2\text{O}, T = T_{est}, P = 101.3, R = R_{est})$$

Il valore di entalpia dell'aria in uscita e il valore di temperatura dell'acqua in uscita può essere quindi determinato dall'equazioni di bilancio del sistema:

$$h_o = h_i + eps \cdot (h_{si} - h_i)$$

$$T_{MT} = T_{wi} - \frac{m_a \cdot (h_o - h_i)}{m_w \cdot 4.186}$$

La potenza richiesta alla torre evaporativa può quindi essere calcolata come

$$\Phi_{torre} = m_w \cdot 4.186 \cdot (T_{wi} - T_{MT})$$

## OTTIMIZZAZIONE MULTI-OBIETTIVO

L'ottimizzazione del sistema ha lo scopo di determinare la combinazione dei parametri di regolazione del sistema che permettano di massimizzare le prestazioni dell'impianto. Le condizioni di funzionamento di questa tipologia di impianto sono fortemente variabili, a causa della variazione della radiazione solare, della temperatura ambiente, della richiesta da parte dell'utenza. Tutte queste variabili incidono notevolmente sul comportamento dei componenti. A titolo di esempio, i pannelli solari hanno un rendimento che dipende dalla radiazione incidente e dalla differenza tra temperatura media del pannello e temperatura ambiente. Questo significa che per una data condizione ambientale (radiazione e temperatura ambiente) è possibile ottenere un rendimento differente modificando la portata di acqua glicolata passante attraverso il pannello. A seconda della portata e della relativa temperatura, si otterrà un comportamento differente dell'assorbitore. L'ottimizzazione deve pertanto essere condotta non in una ben determinata condizione di funzionamento, ma in un insieme sufficientemente ampio di condizioni. Per ciascuna condizione è poi necessario determinare la combinazione dei parametri di regolazione da utilizzare.

In questo lavoro sono state selezionate 100 condizioni di funzionamento, scelte casualmente sulla base di valori differenti di radiazione e temperatura ambiente, scelti tra quelli rilevati a Roma nei mesi di potenziale funzionamento dell'impianto. Dovendo ottimizzare il sistema in tutte queste condizioni è stata adottata l'ipotesi di impianto funzionante in condizioni stazionarie. Questa ipotesi non comporta una particolare approssimazione. Infatti, i componenti che più incidono sulla dinamica del sistema, i serbatoi di accumulo, hanno un tempo di carica/scarica dell'ordine di pochi minuti e quindi decisamente minore rispetto al passo temporale adottato nella simulazione dinamica.

L'ottimizzazione multi-obiettivo è stata condotta considerando come funzioni obiettivo la differenza di fabbisogno di energia primaria fossile rispetto alla produzione di freddo attraverso una macchina frigorifera a compressione di vapore e la potenza frigorifera prodotta dalla macchina ad assorbimento. La scelta di quest'ultima funzione è stata effettuata con la finalità di tenere conto degli aspetti di comfort, ma anche di quelli economici della gestione del sistema. Il mantenimento di condizioni ideali all'interno dell'edificio richiede nel periodo estivo la fornitura di una determinata potenza frigorifera, dipendente dalle condizioni ambientali. In determinate condizioni, il raggiungimento di condizioni di comfort ideale va a scapito di un maggiore fabbisogno di energia primaria, in corrispondenza dell'utilizzo della caldaia di integrazione. E' pertanto interessante analizzare le condizioni ottimali che consentono un trade-off tra comfort ed efficienza del sistema. Per contro la potenza prodotta dalla macchina ad assorbimento può essere facilmente ricondotta a una valutazione economica. L'utilizzo di una variabile termodinamica come funzione obiettivo rispetto a una variabile economica (per esempio, il minimo costo per l'utente) consente di determinare un algoritmo di controllo che non dipenda da grandezze che possono essere soggette a sensibile variazione nel tempo, quali il costo dell'energia elettrica e del gas. L'approccio utilizzato è tuttavia assolutamente generale e quindi è possibile sostituire facilmente la funzione obiettivo scelta con una alternativa.

La differenza di energia primaria fossile (di seguito indicata come risparmio di energia primaria) è stata calcolata tenendo conto del contributo che sarebbe stato richiesto dal gruppo frigorifero a compressione di vapore (è stato considerato un COP nominale di 2.8, dipendente dalla temperatura ambiente sulla base delle curve di correzione tipiche di queste macchine), del combustibile utilizzato dalla caldaia di integrazione e dell'energia elettrica richiesta dalle pompe di circolazione dei fluidi di processo e per l'azionamento delle ventole della torre evaporativa. L'energia elettrica è riportata a energia primaria tenendo conto del rendimento medio del parco elettrico nazionale.

Le due funzioni obiettivo scelte sono tra loro in competizione, almeno in un ampio intervallo di condizioni ambientali. Infatti l'utilizzo della caldaia di integrazione consente di aumentare la potenza frigorifera prodotta, ma questo va a discapito del fabbisogno di energia primaria dell'impianto.

Dal punto di vista della soluzione del problema di ottimizzazione, l'approccio scelto consiste nella identificazione di una unica funzione obiettivo; in particolare è stato scelto di esprimere il fabbisogno di

energia primaria del sistema. Tale funzione è poi corretta con un termine di penalità, il cui valore dipende dal valore della seconda funzione obiettivo. Quando la potenza frigorifera prodotta è superiore a un certo valore limite, il termine di penalità è nullo. Quando invece la potenza è inferiore, la funzione di penalità diventa molto grande, aumentando così in modo fittizio il fabbisogno di energia primaria. In questo modo, il risultato dell'ottimizzazione sarà tale da minimizzare il fabbisogno di energia primaria, garantendo però il minimo valore specificato della potenza frigorifera prodotta. La curva di Pareto è determinata ripetendo l'ottimizzazione per differenti valori della minima potenza frigorifera accettabile.

Le variabili di gestione adottate nell'ottimizzazione sono costituite dalla temperatura massima in uscita dai pannelli solari (o, in alternativa, la portata circolante all'interno dei pannelli stessi), la portata di acqua in uscita dagli accumulatori termici, la potenza richiesta dalla caldaia di integrazione. Tali variabili possono essere agevolmente sostituite con altre variabili libere. Questa sostituzione è ottenuta grazie all'approccio modellistico utilizzato dal software EES, che di fatto è costituito da un sistema con un numero di equazioni pari al numero di variabili del sistema meno le variabili libere nel processo di ottimizzazione.

L'ottimizzazione è condotta in primo luogo utilizzando un algoritmo genetico, al fine di evitare problemi legati alla possibile presenza di punti di ottimo locale, ed è poi raffinata nell'intorno della soluzione trovata con un metodo diretto.

Il diagramma riportato nella figura 8 mostra la curva corrispondente all'ottimizzazione multi obiettivo relativa ad una radiazione incidente di 2.8 MJ/m<sup>2</sup> e una temperatura esterna di 30 °C. La figura mostra che il massimo valore del risparmio di energia primaria è di circa 26.5 kW, a fronte di una potenza frigorifera prodotta di circa 35 kW. Una produzione inferiore in queste condizioni corrisponde a un mancato utilizzo della risorsa solare. Un incremento della produzione necessita l'integrazione da parte della caldaia e pertanto un incremento di utilizzo di energia primaria. Poiché la produzione con il gruppo frigorifero a compressione di vapore comporta un fabbisogno di energia primaria minore della produzione marginale determinata dall'utilizzo della caldaia, il risparmio di energia primaria tende a diminuire. Fino a una produzione di 60 kW, il termine di risparmio di energia primaria si mantiene positivo. Questo significa che la produzione dell'intera quota di potenza frigorifera con la macchina ad assorbimento è conveniente rispetto alla produzione della stessa potenza con una macchina frigorifera a compressione di vapore con COP nominale di 2.8. Questa informazione da un lato è utile nel caso in cui non si disponga di una unità di backup a compressione di vapore. Inoltre può essere facilmente tradotta in una valutazione economica, come precedentemente ricordato.

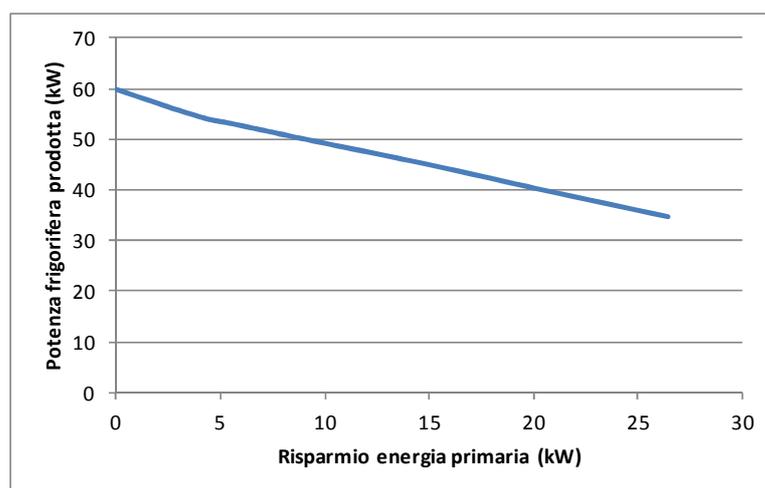


Figura 50. Potenza frigorifera prodotta in funzione del risparmio di energia primaria

A titolo di esempio si riporta la curva di Pareto corrispondente alla sostituzione della funzione obiettivo relativa alla massima potenza frigorifera prodotta con il gruppo ad assorbimento, quella relativa al massimo risparmio economico. Tale curva è stata ricavata considerando costi medi dell'energia elettrica e del gas relativi alla stagione 2010 e nell'ipotesi che la richiesta di freddo dell'utenza sia di 60 kW. Nella valutazione

sono stati considerati unicamente costi di gestione in quanto l'impianto è esistente e l'obiettivo è quello di determinarne la gestione ottimale. Non è pertanto incluso l'ammortamento dell'impianto.

Si osserva come all'aumentare della frazione prodotta attraverso la macchina ad assorbimento aumenti il risparmio in termini monetari. Questo è legato al rapporto favorevole tra il costo del gas naturale e dell'energia elettrica, che compensa il minore costo energetico marginale relativo alla produzione con macchina a compressione di vapore rispetto a quello con macchina ad assorbimento alimentata con la caldaia.

Tale curva può essere determinata anche a partire dalla curva precedente. Proprio per questa ragione si è detto che la potenza frigorifera prodotta può essere interpretata in chiave economica.

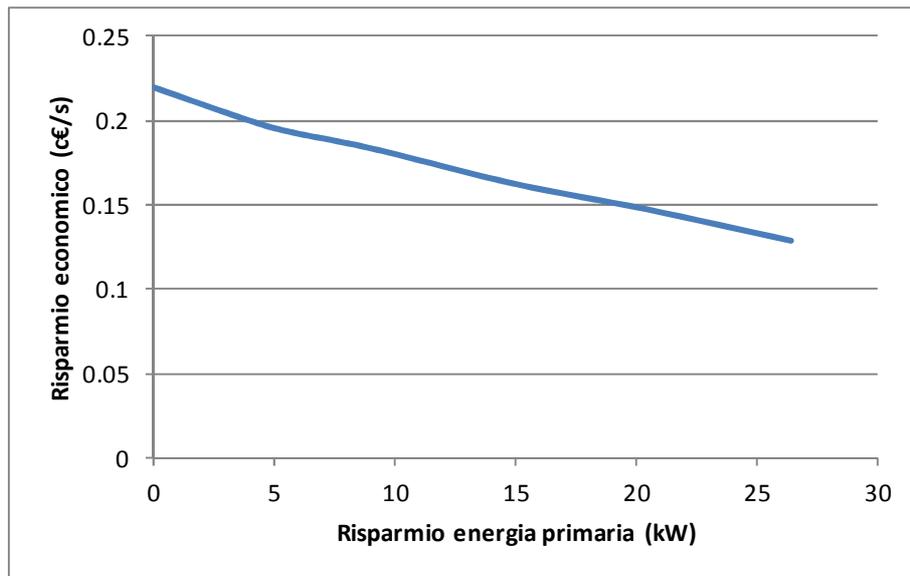


Figura 51. Risparmio economico in funzione del risparmio di energia primaria

I valori delle variabili libere necessari per ottenere le prestazioni corrispondenti ai punti di ottimo (cioè i punti relativi alla curva di Pareto) sono diagrammati nelle figure successive in funzione del risparmio di energia primaria ottenuto. La temperatura di uscita dai pannelli (curva a tratto pieno) in un primo tratto decresce con il diminuire del risparmio di energia primaria (cioè all'aumentare della potenza complessiva fornita dall'assorbitore). Questo comportamento è legato al fatto che la corrispondente temperatura del fluido in uscita allo scambiatore diminuisce e quindi la caldaia fornisce il riscaldamento dell'acqua nel tratto a temperatura superiore. Nel tratto corrispondente alla maggiore potenza frigorifera fornita dall'assorbitore, la temperatura massima aumenta. Questo corrisponde al raggiungimento del valore massimo di portata circolante, come si osserva anche dall'andamento della seconda variabile libera.

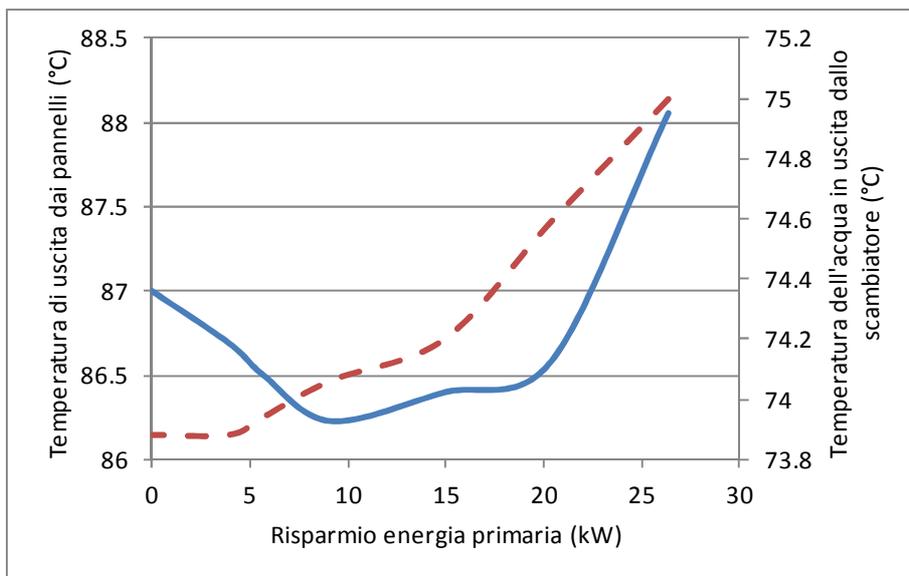


Figura 52. Temperatura di uscita dai pannelli e temperatura dell'acqua in uscita dallo scambiatore in funzione del risparmio di energia primaria

La portata in ingresso all'assorbitore presenta un andamento crescente all'aumentare della potenza fornita dall'assorbitore.

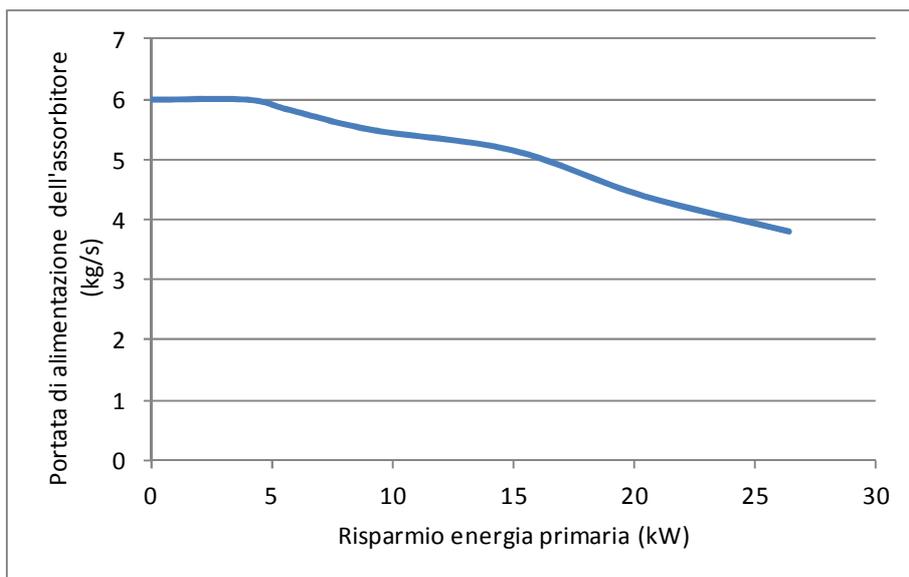


Figura 53. Portata di alimentazione dell'assorbitore in funzione del risparmio di energia primaria

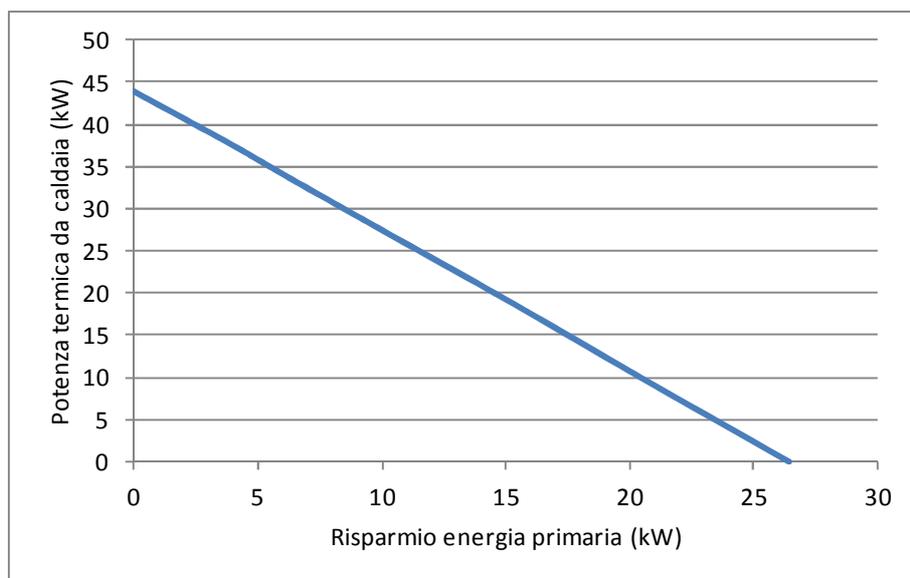


Figura 54. Potenza termica data dalla caldaia in funzione del risparmio di energia primaria

## LOGICA DI REGOLAZIONE

L'ottimizzazione della gestione del sistema presuppone la modifica della regolazione dell'impianto al fine di migliorarne le prestazioni. Il riferimento, rispetto al quale questa ottimizzazione è svolta, è costituito dalla logica di controllo attualmente adottata dal sistema. Quest'ultima è stata derivata sulla base delle informazioni disponibili in bibliografia e dai dati di funzionamento dell'impianto. La prima delle variabili di controllo è attualmente costituita dalla temperatura dell'acqua in ingresso all'assorbitore. La caldaia entra in funzione quando la temperatura è inferiore a 80 °C. La seconda variabile di controllo può essere associata alla portata circolante nei pannelli. Tale portata è stata calcolata sulla base della potenza termica letta dal contacalorie e delle temperature di ingresso e uscita agli accumulatori (lato pannelli solari). Sulla base dei dati disponibili si è potuto osservare che la portata dipende dalla radiazione solare incidente. Quest'ultima grandezza non è nota, ma è stata ricavata sulla base della potenza utile resa dai pannelli e dalle curve di rendimento. Il legame tra portata e radiazione incidente viene riportato di seguito in figura 13.

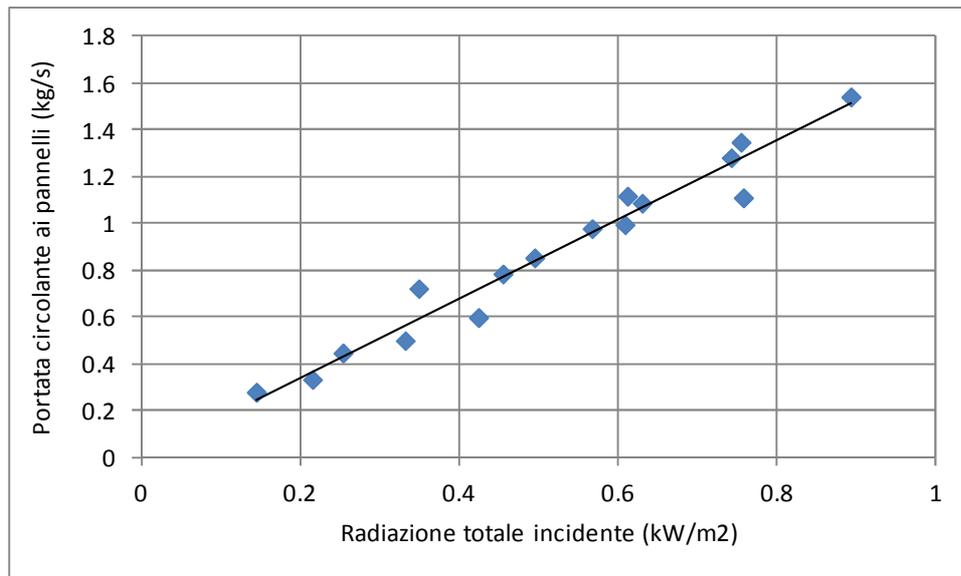


Figura 55. Portata circolante ai pannelli in funzione della radiazione totale incidente

L'ultima grandezza, la portata in ingresso all'assorbitore è fatta variare in modo da ottenere la potenza utile desiderata.

La logica proposta si pone l'obiettivo di determinare la combinazione dei parametri di regolazione da utilizzare per ciascuno scenario (identificato da temperatura ambiente, radiazione solare incidente e richiesta da parte dell'utenza), in modo da ottenere il punto desiderato sulla curva di Pareto corrispondente allo scenario stesso. Nella analisi presentata di seguito si considererà come punto ottimale quello corrispondente alla massima energia primaria risparmiata. Questo implica il fatto che il sistema ad assorbimento fornirà in genere soltanto una porzione del fabbisogno di freddo, mentre la restante parte sarà fornita dal gruppo frigorifero a compressione di vapore. Una scelta differente, sia essa corrispondente al minimo costo di gestione oppure a un qualunque compromesso tra minimo costo e massima efficienza, può essere operata mantenendo lo stesso approccio.

L'analisi dei valori assunti variabili di controllo al variare di temperatura ambiente e radiazione solare evidenzia una difficoltà a identificare un legame semplice che possa essere facilmente implementato in un sistema di controllo. Per questa ragione si è ricorso alle reti neurali al fine di esprimere questo legame. I vantaggi di questo approccio sono la semplice implementazione in sistemi di controllo e la generalità di impiego rispetto alla funzione obiettivo che si intende adottare.

Le reti scelte sono del tipo "feedforward", costituite da uno strato nascosto costituito da 7 neuroni a funzione sigmoideale e uno strato lineare. Le reti sono allenate con un algoritmo Levenberg-Marquardt. La figura 14 mostra il confronto tra valori di allenamento e test e i valori predetti dalla rete neurale per quanto riguarda il risparmio di energia primaria. Tale variabile non è strettamente una variabile di controllo ma è una variabile decisionale in quanto nei casi in cui il risparmio di energia primaria sia nullo la macchina frigorifera ad assorbimento è lasciata inattiva ed è utilizzato il gruppo frigorifero a compressione di vapore.

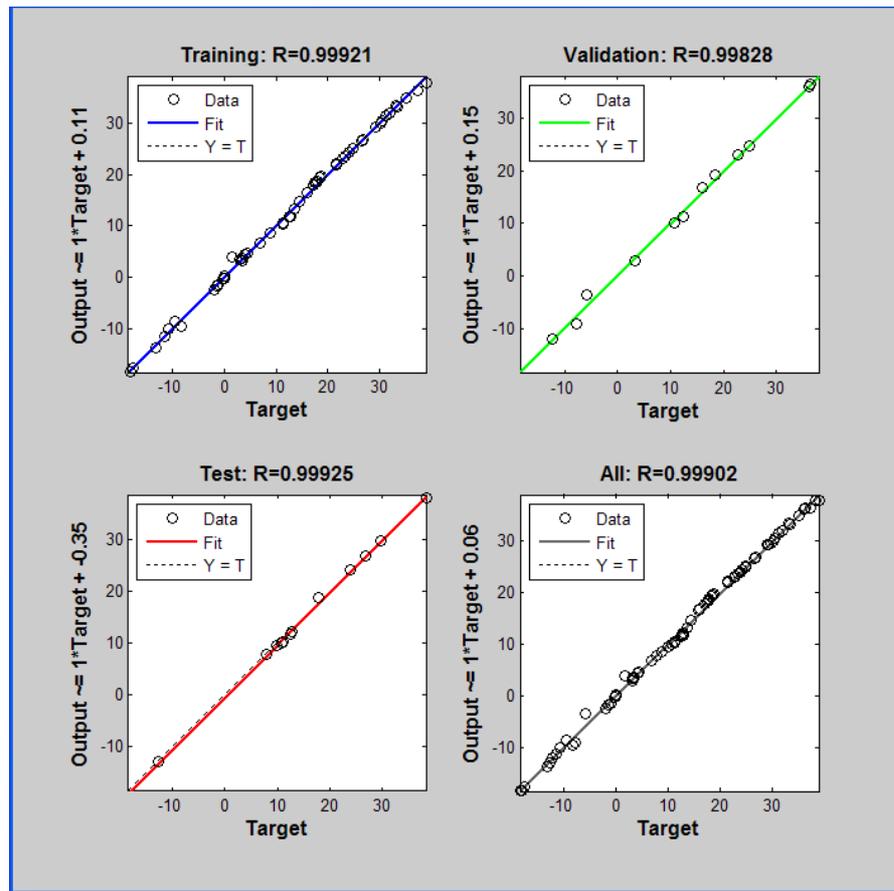


Figura 56. Confronto tra valori di allenamento e test e i valori predetti dalla rete neurale per quanto riguarda il risparmio di energia primaria

Di seguito è proposto il confronto tra le due logiche di controllo in alcuni scenari corrispondenti a diversa radiazione solare e diversa richiesta da parte dell'utenza. Gli scenari analizzati corrispondono a una radiazione variabile nel campo tra 0.1 kW/m<sup>2</sup> e 1 kW/m<sup>2</sup> e due valori di richiesta da parte dell'utenza: 25 kW e 50 kW. In questi scenari la temperatura ambiente è mantenuta costante e pari a 30 °C.

Nel caso di richiesta di freddo pari a 25 kW, le due strategie forniscono risultati molto simili nel caso di radiazione superiore a 0.6 kW/m<sup>2</sup>. Per questi valori di radiazione, la produzione di freddo da parte del gruppo ad assorbimento soddisfa completamente il fabbisogno utilizzando la sola acqua proveniente dai pannelli solari, senza che sia necessaria una integrazione.

Per radiazione inferiore la strategia proposta (linea continua) permette un migliore risultato. La ragione è legata a vari fattori: 1) una differente ripartizione della produzione tra gruppo ad assorbimento e gruppo frigorifero a compressione di vapore. Nel caso della strategia attuale, il gruppo ad assorbimento consente di soddisfare sempre l'intero fabbisogno, mentre nella strategia proposta anche il gruppo frigorifero a compressione di vapore interviene; 2) un differente utilizzo della caldaia, che nel caso della strategia proposta è utilizzata unicamente al disotto di una radiazione di 0.2 kW/m<sup>2</sup>, allo scopo di mantenere la minima temperatura accettabile di ingresso dell'acqua all'assorbitore; 3) una differente gestione dei parametri di regolazione della macchina (questo si nota principalmente nelle differenze che si riscontrano a radiazione compresa tra 0.6 kW/m<sup>2</sup> e 1 kW/m<sup>2</sup>).

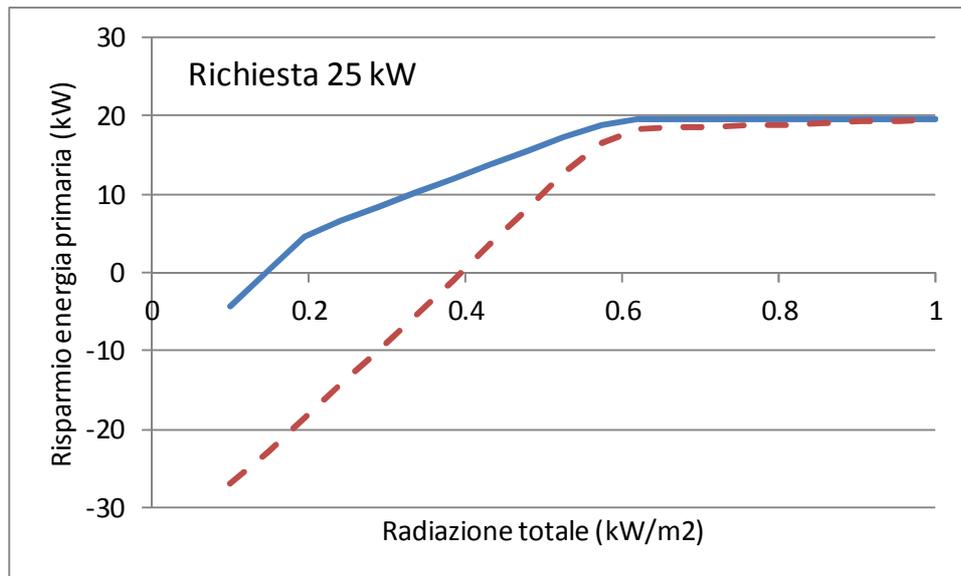


Figura 57. Risparmio di energia primaria in funzione della radiazione totale incidente – caso richiesta 25 kW

Nel caso di richiesta di 50 kW (figura 16), la curva relativa alla strategia proposta è superiore rispetto al caso della strategia attuale. Quest'ultima risulta conveniente rispetto alla produzione con impianto a compressione di vapore unicamente per una radiazione totale superiore a 0.7 kW/m². Nel caso della strategia proposta, anche in questo caso la caldaia è utilizzata unicamente per una radiazione totale inferiore a 0.2 kW/m².

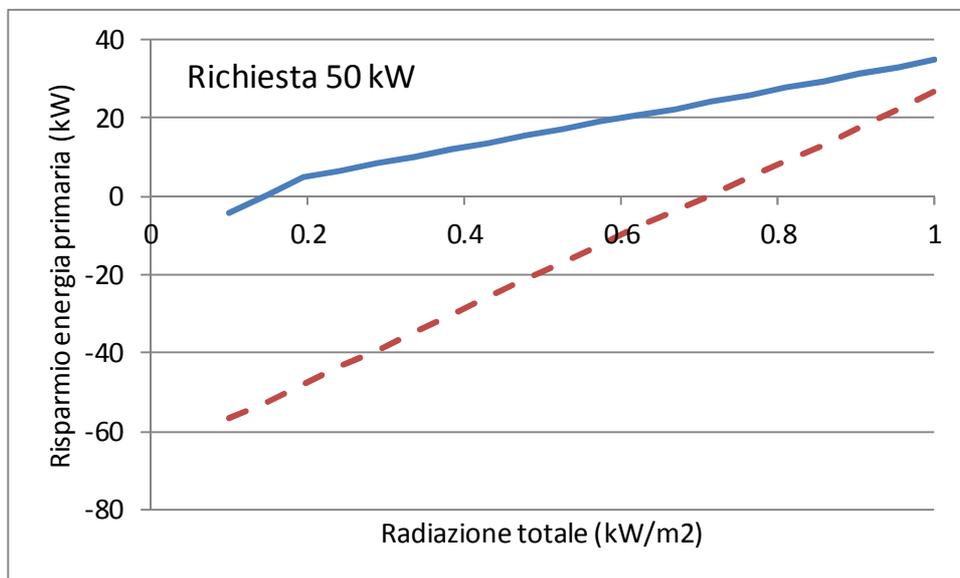


Figura 58. Risparmio di energia primaria in funzione della radiazione totale incidente – caso richiesta 50 kW

## RISULTATI

In questa sezione sono mostrati i risultati ottenuti simulando le condizioni di funzionamento dell'impianto con le due logiche di regolazione, considerando dati di temperatura e radiazione solare relativi alla città di Roma. Per il fabbisogno dell'utenza è stato utilizzato un modello estremamente semplice che ha lo scopo di testare la logica proposta e compararla con quella attuale. La richiesta è ipotizzata solo diurna e calcolata sulla base della differenza di temperatura tra l'esterno e 20 °C. Per il coefficiente di proporzionalità è stato considerato un termine tale da ottenere il fabbisogno massimo di 59 kW, nel caso di temperatura esterna di 35 °C.

Il fabbisogno calcolato è riportato nella figura 17

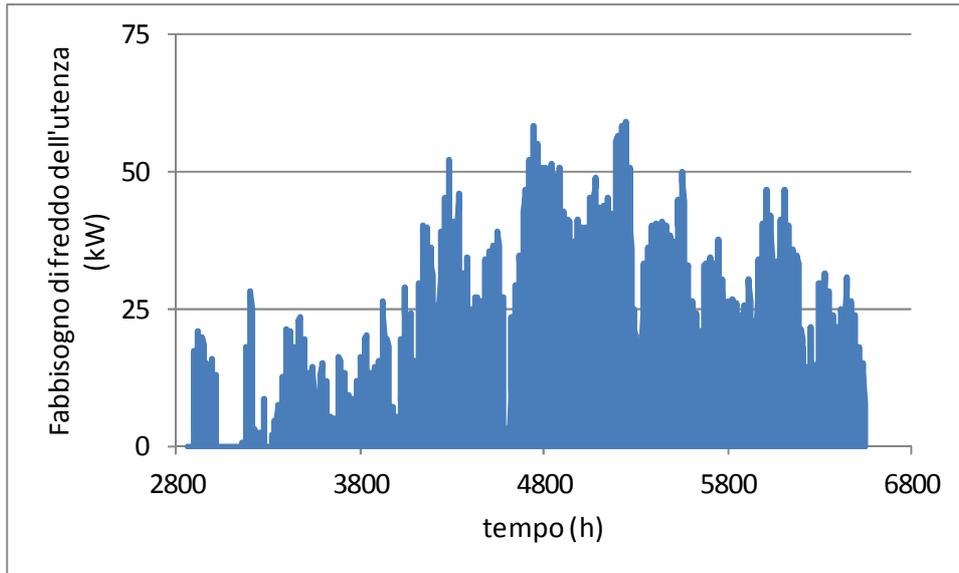


Figura 59. Fabbisogno di energia frigorifera dell'utenza

L'applicazione della logica di controllo attualmente prevista determina il fabbisogno di energia primaria riportato in figura 18. Si osserva un picco di richiesta di circa 75 kW.

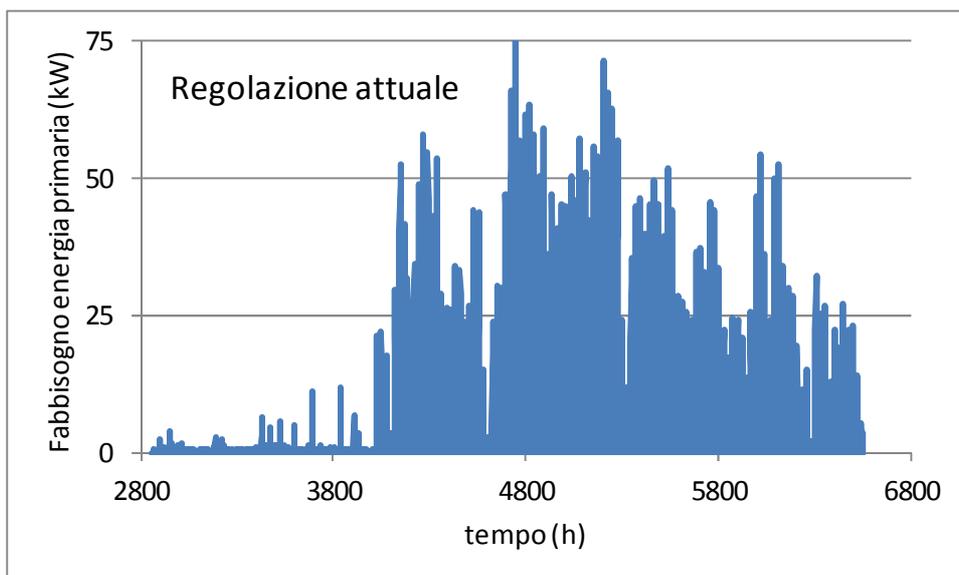


Figura 60. Fabbisogno di energia primaria, regolazione attuale

L'applicazione della logica proposta determina una riduzione significativa del fabbisogno, come riportato nella figura 19. Il picco di richiesta si riduce a circa 40 kW.

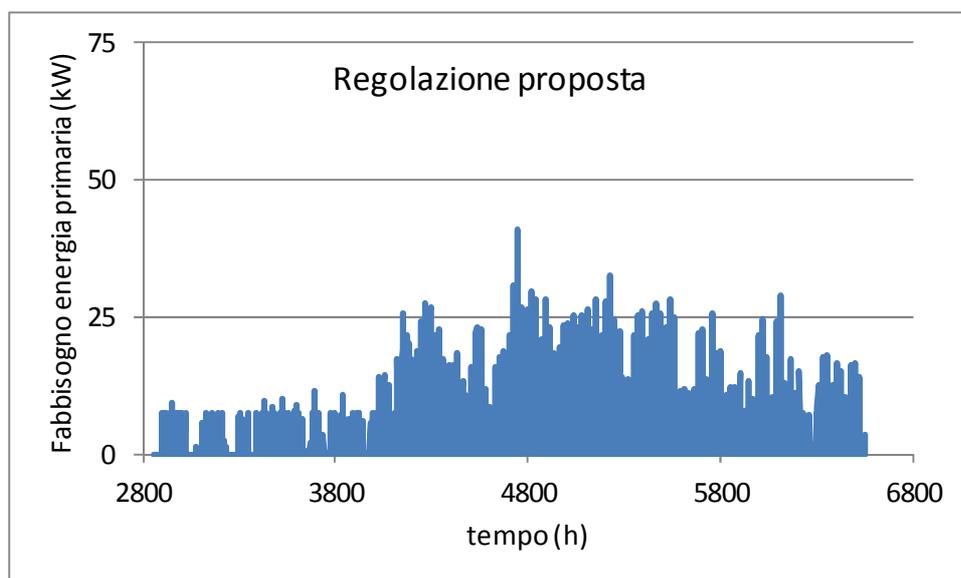


Figura 61. Fabbisogno di energia primaria, regolazione suggerita

## CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

I risultati ottenuti con questa attività consentono di delineare una metodologia di ottimizzazione della gestione di un impianto solar cooling. La metodologia è stata sviluppata considerando come funzioni obiettivo il fabbisogno di energia primaria e la potenza frigorifera prodotta dal sistema. La metodologia è del tutto generale, in quanto le funzioni obiettivo possono essere modificate e combinate in modo agevole, e può essere facilmente implementata su un impianto funzionante.

Tale metodologia è stata applicata al modello dinamico per la simulazione del sistema di solar cooling, permettendo di valutare le prestazioni effettive del sistema nel tempo. In particolare si è mostrato come la logica proposta consenta di ridurre il fabbisogno di energia primaria dell'impianto di circa il 40% rispetto ad una logica tradizionale. Questa valutazione è stata fatta sulla base di una ipotesi di fabbisogno dell'utenza che tende a premiare dal punto di vista energetico il funzionamento dell'impianto con la logica proposta, tuttavia mostra come i benefici ottenibili siano significativi.

Gli sviluppi futuri di questa attività consistono nella validazione del modello di calcolo sviluppato e nell'implementazione della logica proposta.