



Dottorato di Ricerca in Ingegneria Civile
Graduate School in Civil Engineering

Sede: Facoltà di Ingegneria - Università di Pavia - via Ferrata 1 - 27100 Pavia - Italy

Dottorato di Ricerca in Ingegneria Civile XXV Ciclo

**Problematiche relative alla definizione e
all'utilizzo di modelli delle prestazioni
energetiche di edifici esistenti**

Tesi di Dottorato
Roberta Perneti

Relatore:
Prof. Anna Magrini

Controrelatore:
Prof. Roberto Sala

Ottobre 2012

Dottorato di Ricerca in Ingegneria Civile

Settore:	Ingegneria
Sede Amministrativa non consortile:	Università degli Studi di PAVIA
Durata del dottorato in anni:	3
Numero studenti:	3 ogni anno
Periodo formativo estero in mesi:	come previsto dal regolamento del Dottorato di Ricerca
Numero minimo di corsi:	6

Recapiti



Dipartimento di Meccanica Strutturale
via Ferrata 1 - 27100 Pavia - Italy
Tel. 0382 / 505450 Fax 0382 / 528422



Dipartimento di Ingegneria Idraulica e Ambientale
via Ferrata 1 - 27100 Pavia - Italy
Tel. 0382 / 505300 Fax 0382 / 505589

Coordinatore

CASCIATI Fabio - Professore Ordinario di Scienza delle Costruzioni (H07A)

Dipartimento di Meccanica Strutturale
via Ferrata 1 - 27100 Pavia – Italy Tel. 0382 / 505458 Fax 0382 / 528422
e-mail: fabio@dipmec.unipv.it

Collegio dei Docenti

- CIAPONI Carlo - Professore Associato di Idraulica (H01A)
- FARAVELLI Lucia - Professore Ordinario di Sicurezza e Affidabilità delle Costruzioni (H07A)
- FUGAZZA Mario - Professore Associato di Sistemazione dei Bacini Idrografici (H01B)
- GOBETTI Armando - Professore Associato di Dinamica delle Strutture (H07A)
- MACCHI Giorgio - Professore Ordinario di Tecnica delle Costruzioni (H07B)
- MOISELLO Ugo - Professore Ordinario di Idrologia (H01B)
- PAPIRI Sergio - Professore Associato di Infrastrutture Idrauliche (H01B)
- SALA Roberto - Professore Associato di Macchine (H04C)

Organizzazione del corso

Il dottorato di ricerca in *Ingegneria Civile* presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di Pavia è stato istituito nell'anno accademico 1994/95 (X ciclo).

Il corso consente al dottorando di scegliere tra due curricula: idraulico o strutturale. Egli svolge la propria attività di ricerca rispettivamente presso il Dipartimento di Ingegneria Idraulica e Ambientale o quello di Meccanica Strutturale.

Durante i primi due anni sono previsti almeno sei corsi, seguiti da rispettivi esami, che il dottorando è tenuto a sostenere. Il Collegio dei Docenti, composto da professori dei due Dipartimenti, organizza i corsi con lo scopo di fornire allo studente di dottorato opportunità di approfondimento su alcune delle discipline di base per entrambe le componenti, idraulica e strutturale. Corsi e seminari vengono tenuti da docenti di Università nazionali ed estere.

Il Collegio dei Docenti, cui spetta la pianificazione della didattica, si è orientato ad attivare ad anni alterni corsi sui seguenti temi:

- Meccanica dei solidi e dei fluidi
- Metodi numerici per la meccanica dei solidi e dei fluidi
- Rischio strutturale e ambientale
- Metodi sperimentali per la meccanica dei solidi e dei fluidi
- Intelligenza artificiale

più corsi specifici di indirizzo.

Al termine dei corsi del primo anno il Collegio dei Docenti assegna al dottorando un tema di ricerca da sviluppare sotto forma di tesina entro la fine del secondo anno; il tema, non necessariamente legato all'argomento della tesi finale, è di norma coerente con il curriculum, scelto dal dottorando (idraulico o strutturale).

All'inizio del secondo anno il dottorando discute con il Coordinatore l'argomento della tesi di dottorato, la cui assegnazione definitiva viene deliberata dal Collegio dei Docenti.

Alla fine di ogni anno i dottorandi devono presentare una relazione particolareggiata (scritta e orale) sull'attività svolta. Sulla base di tale relazione il Collegio dei Docenti, "previa valutazione della assiduità e dell'operosità dimostrata dall'iscritto", ne propone al Rettore l'esclusione dal corso o il passaggio all'anno successivo.

Il dottorando può svolgere attività di ricerca sia di tipo teorico che sperimentale, grazie ai laboratori di cui entrambi i Dipartimenti dispongono, nonché al Laboratorio Numerico di Ingegneria delle Infrastrutture.

Il "Laboratorio didattico sperimentale" del Dipartimento di Meccanica Strutturale dispone di:

1. una tavola vibrante che consente di effettuare prove dinamiche su prototipi strutturali;
2. opportuni sensori e un sistema di acquisizione dati per la misura della risposta strutturale;
3. strumentazione per la progettazione di sistemi di controllo attivo e loro verifica sperimentale;
4. strumentazione per la caratterizzazione dei materiali, attraverso prove statiche e dinamiche.

Il laboratorio del Dipartimento di Ingegneria Idraulica e Ambientale dispone di:

1. un circuito in pressione che consente di effettuare simulazioni di moto vario;
2. un tunnel idrodinamico per lo studio di problemi di cavitazione;
3. canalette per lo studio delle correnti a pelo libero.

A partire dall'anno accademico 1997/98 al dottorando viene data la possibilità di frequentare la "Scuola Avanzata di Formazione Integrata" dell'Istituto Universitario Studi Superiori, che si articola in tre anni e la cui finalità è quella di integrare le attività post-laurea di tipo specialistico con studi a carattere interdisciplinare adatti ad assicurare un più ampio bagaglio culturale.

Elenco delle tesi – Previous PhD Theses

Battaini Marco (X Ciclo)	Sistemi strutturali controllati: progettazione e affidabilità (Novembre 1998).
Mariani Claudia (X Ciclo)	Problemi di ottimizzazione per strutture bidimensionali anisotrope (Novembre 1998).
Negri Antonella (X Ciclo)	Stima delle perdite idrologiche nei bacini di drenaggio urbani (Aprile 1999).
Pisano Aurora Angela (XI Ciclo)	Structural System Identification :Advanced Approaches and Applications (Aprile 1999).
Saltalippi Carla (XI Ciclo)	Preannuncio delle piene in tempo reale nei corsi d'acqua naturali (Aprile 1999).
Barbieri Eugenio (XI Ciclo)	Thermo fluid Dynamics and Topology: Optimization of an Active Thermal Insulation Structure (Aprile 2000).
Barbolini Massimiliano (XII Ciclo)	Dense Snow Avalanches: Computational Models, Hazard Mapping and Related Uncertainties (Aprile 2000).
Espa Paolo (XII Ciclo)	Moti atmosferici generati da forze di galleggiamento: simulazioni numeriche e studio su modello fisico (Aprile 2000).
Petrini Lorenza (XII Ciclo)	Shape Memory Alloys: Modelling the Martensitic Phase Behaviour for Structural Engineering Exploitation (Aprile 2000).

Podestà Stefano (XIII Ciclo)	Risposta sismica di antichi edifici religiosi: una nuova proposta per un modello di vulnerabilità.
Sturla Daniele (XIII Ciclo)	Simulazioni lagrangiane di flussi rapidamente variati nell'approssimazione di acque poco profonde.
Marazzi Francesco (XV Ciclo)	Semi -active Control of Civil Structures: Implementation Aspects (Gennaio 2003).
Nascimbene Roberto (XV Ciclo)	Sail Modelling for Maximal Speed Optimum Design (Gennaio 2003).
Giudici Massimo (XVI Ciclo)	Progettazione in regime non lineare di strutture in CAP a cavi aderenti e non aderenti (Aprile 2004).
Mutti Matteo (XVI Ciclo)	Stability Analysis of Stratified Three-phase Flows in Pipes (Febbraio 2004).
Petaccia Gabriella (XVI Ciclo)	Propagazione di onde a fronte ripido per rottura di sbarramenti in alvei naturali (Febbraio 2004).
D'Amico Tiziana (XVI Ciclo)	Ricerca e sviluppo di metodologie diagnostiche per il recupero di edifici monumentali: prove vibroacustiche sul tufo (Febbraio 2005).
Casciati Sara (XVII Ciclo)	Damage Detection and Localization in the Space of the Observed Variables (Febbraio 2005).
Barco Olga Janet (XVII Ciclo)	Modeling the Quantity and Quality of Storm Water Runoff Using SWMM (Marzo 2006).

Boguniewicz Joanna (XVIII Ciclo)	Integration of Monitoring and Modelling in the Surface Water State Evaluation Process of a Sub-Alpine Lake Watershed (Marzo 2006).
Bornatici Laura (XVIII Ciclo)	L'impiego degli algoritmi generici per la risoluzione dei problemi di progetto di reti di distribuzione idrica (Marzo 2006).
Collivignarelli M Cristina (XVIII Ciclo)	Trattamento di rifiuti liquidi mediante processi biologici aerobici termofili e mesofili e processi avanzati di ossidazione chimica in diversa (Marzo 2006).
Domaneschi Marco (XVIII Ciclo)	Structural Control of Cable-stayed and Suspended Bridges (Febbraio 2006).
Ráduly Botond (XVIII Ciclo)	Artificial Neural Network applications in Urban Water Quality Modeling (Marzo 2006).
Antoci Carla (XVIII Ciclo)	Simulazione numerica dell'interazione fluido-struttura con la tecnica SPH (Luglio 2006).
Cappabianca Federica (XVIII Ciclo)	La valutazione del rischio valanghivo attraverso la modellazione dinamica (Luglio 2006).
Callegari Arianna (XVIII Ciclo)	Applicazione di tecnologie di monitoraggio on-line per la gestione dei processi di trattamento reflui (Luglio 2006).
Gazzola Elisa (XVIII Ciclo)	Applicazione di processi biologici anaerobici al trattamento di acque reflue e fanghi di depurazione: aspetti tecnici ed energetici (Febbraio 2007).

Maranca Federica (XVIII Ciclo)	Valutazione del ciclo di vita (LCA): confronto tra sistemi di trasporto gas via gasdotto (Febbraio 2007).
Giuliano Fabio (XIX Ciclo)	Performance Based Design and Structural Control for Cable Suspension Bridges (Febbraio 2007).
Falappi Stefano (XIX Ciclo)	Simulazioni numeriche di flussi di fluidi viscosi e materiali granulari con la tecnica SPH (Febbraio 2007).
Zanaboni Sabrina (XIX Ciclo)	Pre-trattamento di rifiuti liquidi industriali mediante ossidazione ad umido (Febbraio 2007).
Bruggi Matteo (XX Ciclo)	Topology optimization using mixed finite elements (Febbraio 2008).
Cimellaro Gian Paolo (XX Ciclo)	Passive Control of Industrial Structures for Natural Hazard Mitigation: Analytical Studies and Applications (Febbraio 2008).
Pagliardi Matteo (XX Ciclo)	Application of PIV technique to the study of subaqueous debris flows (Febbraio 2008).
Todeschini Sara (XX Ciclo)	Il controllo degli scarichi fognari in tempo di pioggia mediante vasche di prima pioggia: aspetti progettuali e gestionali (Febbraio 2008).
Alessandro Abbà (XXI Ciclo)	Recupero dei rifiuti speciali nel settore delle costruzioni: studio delle possibilità di recupero e valutazione dei meccanismi di lisciviazione (Febbraio 2009).

Karim Hamdaoui (XXI Ciclo)	Experimental Applications on Cu-based shape Memory Alloys: Retrofitting of Historical Monuments and Base Isolation (Febbraio 2009).
Thomas Messervey (XXI Ciclo)	Integration of Structural Health Monitoring into the Design, Assessment, and Management of Civil Infrastructure (Febbraio 2009).
Filippo Ubertini (XXI Ciclo)	Wind Effects on Bridges: Response, Stability and Control (Febbraio 2009).
Clemente Fuggini (XXII Ciclo)	Using satellites systems for structural monitoring: accuracy, uncertainty and reliability (Febbraio 2010).
Massimo Raboni (XXII Ciclo)	Impiego di tecniche numeriche e sperimentali per l'analisi di fenomeni multiphysics (Luglio 2010).
Alsaleh Raed (XXIII Ciclo)	Verification of wind pressure and wind induced response of a supertall structure using a long-term structural health monitoring system (Ottobre 2010).
Crotti Barbara Marianna (XXIII Ciclo)	Verifiche di funzionalità e criteri di ottimizzazione degli impianti di potabilizzazione: alcuni casi di studio (Gennaio 2011).
Franchioli Luigi (XXIII Ciclo)	Analisi prestazionale dei sistemi di distribuzione idrica e calcolo della loro affidabilità (Marzo 2011).
Marzi Alessandro (XXIII Ciclo)	Impianti in materiale plastico per il trasporto dei fluidi nel settore navale (Febbraio 2011).

Emanuela Torti (XXIV Ciclo)	Experimental and numerical analysis of a confined two-phase turbulent jet system (Ottobre 2011).
Veronica Cornalba (XXIV Ciclo)	Recupero energetico da biomasse: aspetti tecnici e di impatto ambientale (Ottobre 2011).
ZhiCong Chen (XXIV Ciclo)	Structural monitoring and system control using a wireless sensor network (Ottobre 2011).
Sidi Mohammed El-Amine Bourdim (XXIV Ciclo)	Diagnosis and Seismic Analysis of a Historical Monument in Tlemcen (Ottobre 2011).
Paolo Basso (XXIV Ciclo)	Optimal form-finding algorithms for the control of structural (Giugno 2012).

Per aspera ad astra

Indice

INTRODUZIONE	1
Articolazione del lavoro	5
CAPITOLO 1: VALUTAZIONE DELL'INCIDENZA DEI PARAMETRI IN INGRESSO DEI MODELLI DI CALCOLO SEMISTAZIONARI NELLA RIQUALIFICAZIONE ENERGETICA DEGLI EDIFICI	
1.1 Introduzione	7
1.2 Considerazioni generali	8
1.3 Condizioni al contorno: clima e stagione di riscaldamento	10
1.4 Procedura di calcolo	11
1.4.1 Bilancio termico dell'edificio	12
1.4.2 Calcolo del fabbisogno di energia primaria del sistema edificio-impianto	14
1.4.2.1 Calcolo del fabbisogno di energia dovuto agli ausiliari elettrici	15
1.4.2.2 Perdite dei sottosistemi impiantistici	16
1.4.3 Calcolo del fabbisogno di energia primaria per la produzione di acqua calda sanitaria	17
1.5 Casi studio	19
1.5.1 Caso A	20

1.5.2 Caso B	21
1.6 Ipotesi di intervento	22
1.7 Risultati delle simulazioni	24
1.7.1 Risultati dipendenti dalla trasmittanza termica	24
1.7.2 Calcolo forfettario e analitico dei ponti termici: incidenza negli interventi di isolamento dell'involucro	27
1.7.3 Trasmissione di calore verso il terreno: calcoli semplificati e analitici	30
1.7.4 Trasmissione del calore verso spazi non riscaldati	31
1.7.5 Perdite del sistema di generazione	32
1.7.6 perdite del sistema di distribuzione	34
1.7.7 Perdite del sistema di regolazione ed emissione	34
1.7.8. Discussione risultati	36
1.7.9 Effetto della combinazione dei parametri	39
1.7.10 Effetti della combinazione dei parametri in relazione alla zona climatica	42
1.8 Conclusioni	45

CAPITOLO 2: CONSIDERAZIONI RELATIVE AI PARAMETRI IN INGRESSO DEI MODELLI DI SIMULAZIONE

2.1 Introduzione	47
2.2 Valutazione della tramittanza termica	48
2.2.1 Determinazione della trasmittanza e della conduttanza termica attraverso metodi standard	49
2.2.2 Misura della conduttanza in opera: metodi di acquisizione e elaborazione dati	51

2.2.2.1	Caratteristiche dell'apparato strumentale	51
2.2.2.2	Modalità di misura	52
2.2.2.3	Post-elaborazione dei dati rilevati	54
2.2.3	Esempio di valutazione della conduttanza in opera	57
2.2.3.1	Rilievo in opera	57
2.2.3.2	Post elaborazione dati	60
2.3	Considerazioni sui dati climatici	64
2.3.1	Fonti da cui reperire <i>dataset</i> climatici	66
2.3.2	Calcolo dell'anno medio tipo	68
2.3.2.1	Interpolazione dati mancanti	69
2.3.2.2	Scelta dei mesi tipo	70
2.3.3	Analisi di <i>dataset</i> climatici	72
2.4	Conclusioni	81

CAPITOLO 3: METODI DI CALIBRAZIONE DEI MODELLI DI SIMULAZIONE

3.1	Introduzione	83
3.2	Considerazioni preliminari	84
3.3	Il protocollo di calibrazione	87
3.3.1	Operazioni preliminari	88
3.3.2	Raccolta dati	89
3.3.3	Definizione del modello iniziale	90
3.3.4	Criteri di validazione del modello	90
3.3.5	Definizione del modello calibrato	90
3.3.6	Valutazione del risparmio conseguibile e proposta di interventi	91

3.4	Considerazioni sui dati di input dei modelli	91
3.5	Parametri per la calibrazione dei modelli	96
3.5.1	Valutazione dei consumi di combustibile effettivi	97
3.5.1.1	Modalità di valutazione dei consumi	98
3.5.1.2	Esempio di calcolo	101
3.5.1.3	Fonti da cui dedurre i consumi effettivi	103
3.6	Calibrazione mediante rilievo delle temperature interne	105
3.7	Considerazioni sugli indici di valutazione dell'errore	108
3.7.1	Calibrazione mediante l'impiego dei consumi reali dell'edificio	109
3.7.1.1	Errore medio <i>MBE</i>	109
3.7.1.2	Coefficiente di variazione dello scarto quadratico medio CV(RMSE)	110
3.7.2	Calibrazione mediante l'impiego delle temperature	112
3.7.2.1	Errore medio <i>MBE</i>	112
3.7.2.2	Scarto quadratico medio RMSE	112
3.7.2.3	Indice di Pearson	113
3.8	Conclusioni	113

CAPITOLO 4: APPLICAZIONI DEL PROTOCOLLO DI CALIBRAZIONE DEI MODELLI DI SIMULAZIONE DINAMICA: ANALISI DI EDIFICI CAMPIONE

4.1	Introduzione	115
4.2	Caratteristiche e raccolta dati	116
4.3	Definizione dei modelli	119
4.3.1	Metodo di calcolo	119
4.3.2	Data set climatici	121
4.3.3	Ipotesi per il calcolo delle infiltrazioni	127

4.3.4 Ipotesi per la determinazione delle proprietà termo fisiche dell'involucro	129
4.3.5.Indice delle simulazioni	130
4.4 Acquisizione dati per la calibrazione	132
4.5 Analisi e discussione dei risultati	134
4.5.1 Valutazione degli indici di errore	134
4.5.2 Andamento delle temperature nell'ambiente di controllo	139
4.5.2.1 Temperature orarie	139
4.5.2.2 Temperature medie giornaliere e mensili	148
4.6 Analisi multi criterio	150
4.6.1 Analisi di regressione lineare	151
4.7 Analisi di sensibilità	155
4.7.1 Metodo differenziale	155
4.7.2 Metodo fattoriale	157
4.7.3 Risultati delle analisi di sensibilità	158
4.7.3.1 Risultati delle analisi di sensibilità effettuate con il metodo differenziale	159
4.7.3.2 Risultati delle analisi di sensibilità effettuate con il metodo Fattoriale	166
4.8 Conclusioni	169
CONCLUSIONI	171
APPENDICE A	175
BIBLIOGRAFIA	185

Introduzione

L'emanazione della Direttiva Europea 2002/91/CE (*Energy Performance Building Directive*) ha sancito l'importanza della valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici e ha avviato una serie di politiche di risparmio energetico sia a livello comunitario che dei singoli Stati Membri. Infatti la Direttiva EPBD ha evidenziato come il settore civile sia responsabile del 40% della domanda energetica europea, di conseguenza intervenire sulla prestazione energetica degli edifici costituisce un aspetto strategico per il raggiungimento degli obiettivi previsti dal Protocollo di Kyoto che stabilisce una riduzione del 20% dei fabbisogni energetici nazionali entro il 2020.

Per questo motivo, oltre alla certificazione energetica pensata come strumento di informazione per favorire azioni di contenimento dei consumi, la Direttiva 2002/91/CE ha stabilito per gli Stati Membri l'obbligo di introdurre dei requisiti minimi di prestazione sia in caso di nuova costruzione sia per gli edifici soggetti ad interventi di riqualificazione.

In Italia la Direttiva 2002/91/CE è stata resa efficace soltanto nel 2009, in quanto i precedenti decreti D.M. 192/2005 e 311/2006 hanno definito il quadro operativo generale ma non hanno fornito una procedura di calcolo di riferimento. Infatti le norme UNI TS 11300 che traducono ed adattano al contesto italiano gli standard di calcolo europei UNI EN ISO 13790 e UNI EN ISO 15316, rispettivamente relativi al bilancio energetico dell'involucro ed all'efficienza degli impianti termici, sono stati indicati come metodologia ufficiale dal D.P.R. 59/2009. Inoltre per completare il quadro sono state

emanate, attraverso il Decreto del 26 giugno 2009, le Linee Guida per la Certificazione Energetica che stabiliscono gli aspetti principali e applicativi delle valutazioni per gli edifici nuovi ed esistenti.

A livello europeo l'attenzione nei confronti del recupero energetico degli edifici esistenti è stata promossa dalla Direttiva 2010/31/EU che rivede e aggiorna gli obiettivi della precedente direttiva; in particolare viene evidenziato il potenziale di risparmio che caratterizza gli edifici esistenti, generalmente costruiti senza criteri di efficienza energetica. La nuova direttiva introduce anche il concetto di edifici a energia quasi zero, denominati "n-ZEB" (*nearly Zero Energy Buildings*) e stabilisce che gli Stati Membri debbano favorirne la diffusione sul territorio sia introducendo vincoli per le nuove costruzioni (che entro il 2020 dovranno essere progettate con fabbisogni energetici quasi nulli), sia definendo delle linee guida per la riqualificazione degli edifici esistenti che propongano interventi efficaci per raggiungere questo target in relazione alle caratteristiche costruttive del parco immobiliare nazionale.

Sia per raggiungere il target n-ZEB, sia per valutare in maniera accurata il potenziale di risparmio energetico che caratterizza negli edifici esistenti, è necessario definire dei modelli di simulazione rappresentativi del reale comportamento energetico degli edifici. In particolare l'analisi delle prestazioni energetiche delle costruzioni esistenti costituisce un'operazione complessa a causa dell'ingente numero di parametri coinvolti nel calcolo e della difficoltà di definire con esattezza tutti i dati in ingresso che caratterizzano il sistema edificio-impianto ed il suo utilizzo. Infatti un aspetto critico che caratterizza i modelli di edifici esistenti è la difficoltà di reperimento dati, in quanto molto spesso non è disponibile una documentazione progettuale di riferimento né per l'involucro né per i sistemi impiantistici. Inoltre il comportamento energetico degli edifici è influenzato da molteplici variabili che devono essere correttamente tenute in considerazione nella costruzione dei modelli: i profili di occupazione dei locali, le variabili climatiche, gli *schedule* degli impianti e delle apparecchiature, le caratteristiche termofisiche dell'involucro e l'entità degli apporti interni rappresentano i principali fattori che determinano la rappresentatività dei modelli di simulazione.

Dall'analisi di quanto indicato a livello europeo nella norma UNI EN ISO 13790:2008, è emerso che alcuni aspetti relativi alla determinazione dei parametri di calcolo non sono precisati, ma vengono lasciati da definire a livello nazionale dai singoli Stati Membri. D'altra parte la Specifica Tecnica UNI TS 11300-1, completa le indicazioni fornite a livello europeo ma indica anche, sulla base di quanto riportato nelle Linee Guida nazionali per la certificazione energetica, diverse modalità di calcolo della prestazione energetica per gli edifici esistenti. In particolare la valutazione di alcuni parametri può essere effettuata sia in maniera semplificata attraverso l'utilizzo di valori di riferimento, sia in maniera analitica attraverso modalità che tengono conto delle condizioni al contorno dell'edificio.

Sulla base di queste considerazioni la prima parte del lavoro ha riguardato la valutazione dell'incidenza, in termini di prestazione energetica globale del sistema edificio impianto, di alcuni dati per cui la norma lascia differenti possibilità di calcolo nel caso di costruzioni esistenti. In particolare, sono stati considerati alcuni parametri significativi difficili da reperire in opera come, ad esempio, la trasmittanza termica degli elementi di involucro e il rendimento dei sottosistemi impiantistici che vengono determinati attraverso metodi di calcolo analitici oppure mediante una valutazione semplificata sulla base di abachi di riferimento e dati tabellati. In questo modo sono stati elaborati dei *range* di variazione della prestazione energetica in relazione alle differenti modalità di calcolo dei parametri in ingresso dei modelli. Le analisi sono state condotte su due edifici ideali definiti sulla base delle caratteristiche del parco immobiliare esistente, per cui sono stati ipotizzati una serie di interventi di riqualificazione sul sistema edificio-impianto.

Nella seconda parte sono stati analizzati alcuni dati in ingresso dei modelli in relazione ad analisi di tipo sperimentale condotte su un edificio campione oggetto di monitoraggi a lungo termine: il caso studio è costituito dalla manifattura Tabacchi di Rovereto, una costruzione industriale dismessa e priva di impianti termici. In particolare sono stati analizzati sia aspetti relativi alle proprietà termofisiche dell'involucro, valutate in maniera sperimentale e

attraverso riferimenti standard, sia le condizioni climatiche in relazione all'anno medio tipo definito per ciascuna località di riferimento.

Queste analisi preliminari hanno evidenziato significativi *range* di variazione in termini di comportamento energetico dovuti sia ai parametri in ingresso dei modelli acquisiti sperimentalmente o attraverso analisi standard, sia al tipo di valutazione adottata.

Di conseguenza emerge la necessità di stabilire la rappresentatività dei modelli, introducendo dei criteri di attendibilità dei risultati, sulla base di parametri di calibrazione misurati in opera, per garantire un livello adeguato di precisione nella valutazione delle prestazioni energetiche di edifici esistenti.

La parte centrale di questo lavoro è dedicata all'elaborazione di una procedura di calibrazione dei modelli definita sulla base delle indicazioni generali fornite dalle Linee Guida *ASHRAE 14/2002*, dai protocolli standard di riferimento e dalle applicazioni riscontrate in letteratura. Si è cercato di mettere a sistema le indicazioni generali e di adattarle al contesto italiano elaborando un protocollo di calibrazione per gli edifici esistenti che sia riferito sia ai consumi effettivi del sistema edificio impianto, sia alle temperature monitorate all'interno di un ambiente di controllo. In particolare nel protocollo sono state evidenziate le problematiche relative alla raccolta dati, alla definizione dei modelli di simulazione, alla valutazione dell'errore e della verifica di rappresentatività dei risultati rispetto al comportamento reale.

Sulla base di questo schema di indagine, elaborazione e verifica dei modelli di simulazione, nell'ambito di questo lavoro sono state analizzate le prestazioni energetiche di un edificio campione oggetto di monitoraggi a lungo termine; in particolare sono state misurate le temperature interne di un ambiente di controllo per un periodo di 4 mesi (marzo 2012 - giugno 2012).

Le analisi del comportamento energetico degli edifici sono state condotte in regime transitorio, in quanto questi metodi di simulazione consentono di analizzare le interazioni dinamiche fra edificio, occupanti e sistemi energetici in maniera dettagliata. Per ciascun caso studio è stato elaborato un set di simulazioni definite sulla base di differenti condizioni al contorno, valutate attraverso metodi sperimentali e standard. I risultati delle simulazioni sono stati

confrontati con i dati ricavati in fase di monitoraggio e, sulla base degli scostamenti riscontrati tra valori reali e simulati, è stata effettuata un'analisi multi criterio per determinare la simulazione più rappresentativa del comportamento energetico dei sistemi edificio impianto considerati.

I risultati delle analisi hanno permesso di evidenziare una buona correlazione tra comportamento energetico reale e simulato, di conseguenza l'applicazione a casi studio esistenti ha permesso di validare il metodo proposto. Infatti i criteri di acquisizione dati e calibrazione si sono dimostrati adatti alla progressiva riduzione dell'errore tra simulazioni e comportamento reale.

Tuttavia è importante evidenziare come il processo di calibrazione sia caratterizzato da un livello di dettaglio elevato e, di conseguenza, da un ingente impegno in termini di tempo e di risorse. Sulla base della ricerca svolta nell'ambito di questo lavoro, sarà possibile individuare gli aspetti critici del protocollo di calibrazione dei modelli allo scopo di ottimizzarne l'applicazione per favorirne l'utilizzo non solo in ambito accademico.

Articolazione del lavoro

Capitolo 1

Analisi della procedura di calcolo in regime semistazionario indicata nelle norme UNI TS 11300. Verifica del miglioramento delle prestazioni energetiche in caso di riqualificazione energetica di due edifici campione definiti sulla base delle caratteristiche del parco edilizio nazionale. Valutazione dell'incidenza delle modalità di calcolo dei parametri in ingresso dei modelli sulla prestazione energetica dell'edificio: analisi sullo stato di fatto ed in caso di interventi di riqualificazione edilizia

Capitolo 2

Analisi di dati sperimentali ricavati da monitoraggi in opera e confronto con risultati ottenuti attraverso calcoli standard indicati dalle normative di riferimento. In particolare le valutazioni sono relative ai parametri termofisici dell'involucro edilizio, per cui è stata misurata la conduttanza termica mediante

l'utilizzo del termoflussimetro secondo quanto indicato nello standard ISO 9869, e ai *dataset* climatici disponibili per le località di riferimento.

Capitolo 3

Analisi dello stato dell'arte relativo ai protocolli di calibrazione dei modelli di simulazione: protocolli standard ed applicazioni in letteratura. Proposta di una metodologia di calibrazione articolata in diverse fasi, dalla raccolta dati all'analisi dei risultati; definizione degli indici relativi all'errore tra risultati delle simulazioni e misure reali. Proposta di calibrazione mediante l'utilizzo di consumi effettivi e di temperature interne.

Capitolo 4

Analisi del comportamento energetico di un edificio esistente privo di impianto termico (Manifattura Tabacchi - Rovereto): confronto tra le temperature interne di un ambiente di controllo misurate e simulate.

Valutazione dell'incidenza dei parametri di calcolo sul risultato finale: analisi dell'andamento degli indici di errore in relazione ai dati in ingresso del modello. Analisi di sensibilità sull'incidenza di alcuni parametri di calcolo significativi.

Capitolo 1

Valutazione dell'incidenza dei parametri in ingresso dei modelli di calcolo semistazionari nella riqualificazione energetica degli edifici

1.1 Introduzione

La Direttiva Europea 2010/31/EU prevede che gli stati membri definiscano a livello nazionale delle linee guida per l'ottimizzazione energetica degli edifici per realizzare, in relazione al rapporto costi/benefici, il potenziale di risparmio energetico che caratterizza le costruzioni esistenti.

In questa prima fase del lavoro l'attenzione è stata rivolta all'individuazione di strategie economicamente efficaci per ridurre i fabbisogni energetici degli edifici esistenti ed avvicinarsi al target di edifici ad energia quasi zero introdotto dalla Direttiva; per questo motivo sono stati simulati e confrontati una serie di interventi di riqualificazione in riferimento a due casi studio tipici del parco immobiliare italiano degli anni '60-'80. Le analisi permettono di comprendere quali interventi siano maggiormente efficaci in termini di miglioramento delle prestazioni energetiche calcolate; le valutazioni sono state effettuate in relazione ai consumi in regime invernale, che è stato il primo problema su cui la Comunità Europea ha posto l'attenzione

Inoltre, per ciascun intervento, è stata analizzata l'affidabilità dei risultati, in quanto l'applicazione delle diverse modalità di calcolo offerte dalle normative tecniche UNI EN ISO 13790 e UNI TS 11300 per la determinazione dei parametri in ingresso dei modelli permette di operare scelte che portano a un certo range di variazione in termini di risultati.

1.2 Considerazioni generali

Nel corso degli anni la valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici è stata argomento di molteplici studi, che trattano il tema da diversi punti di vista: alcuni riguardano l'analisi delle differenze tra fabbisogni energetici reali e calcolati per valutare l'incidenza delle condizioni meteo e del comportamento dell'utenza (*Fokaides et al. 2011*), altri le modalità di valutazione del fattore di utilizzazione degli apporti interni (*Jokisalo e Kurnitski 2007*) in applicazione della norma UNI EN ISO 13790. Altri studi riguardano la valutazione del miglioramento della prestazione energetica attraverso interventi di riqualificazione, che vengono confrontati in termini di analisi multicriterio (*Entrop et al. 2010*) oppure pianificati mediante strategie di ottimizzazione (*Diakaki et al. 2008*)

Un ulteriore aspetto di interesse è legato al differente grado di accuratezza dei metodi di calcolo proposti dalla UNI EN ISO 13790: la norma infatti permette di effettuare calcoli dettagliati o semplificati su base oraria, ma anche di utilizzare metodi semistazionari su base mensile o stagionale. In particolare il metodo semistazionario sulla base delle temperature medie mensili è stato adottato a livello europeo per le valutazioni di tipo standard su cui si basa la certificazione energetica degli edifici.

Nel caso degli edifici esistenti la raccolta dei dati in ingresso dei modelli può risultare difficoltosa a causa della mancanza o della perdita di informazioni progettuali; per questo motivo per semplificare la valutazione delle prestazioni di questi edifici la norma europea offre la possibilità di stabilire a livello regionale o nazionale eventuali semplificazioni da adottare, in relazione alle caratteristiche dell'edificio da analizzare ed allo scopo delle valutazioni.

Questa possibilità è stata implementata dalle Linee Guida Nazionali che stabiliscono, all'articolo 4, in relazione alle caratteristiche dell'edificio (dimensioni, destinazione d'uso, tipologia ed epoca di costruzione), la possibilità di applicare metodi diversi per la determinazione degli indici di prestazione energetica. In particolare per gli edifici nuovi è sempre richiesta l'applicazione delle norme UNI TS 11300 (parte 1 e 2) che riportano i calcoli più completi previsti dalla normativa italiana; invece per gli edifici esistenti si possono applicare diverse modalità di calcolo:

1. per tutti gli edifici residenziali vale la procedura riportata nelle norme UNI TS 11300, inoltre vi è la possibilità di scegliere se adottare delle modalità semplificate per la determinazione dei parametri in ingresso dei modelli, deducendo i valori da abachi e tabelle di riferimento.
2. per gli edifici residenziali con superficie utile fino a 3000 m² il riferimento è il metodo di calcolo predisposto da CNR ed ENEA basato sulle norme UNI TS 11300
3. per gli edifici residenziali con superficie fino ai 1000 m² il riferimento è la procedura riportata nell'Allegato 2 delle Linee Guida Nazionali (D.M. 26 giugno 2009) basato sulla temperatura media stagionale.

Nel primo capitolo si è deciso di utilizzare per le valutazioni relative agli edifici esistenti in esame, il metodo di analisi riportato nelle norme UNI TS 11300 di cui al punto 1, applicando la possibilità di dedurre i parametri in ingresso da analisi dettagliate oppure attraverso modalità semplificate. Si è deciso di utilizzare questo metodo per evidenziare come l'impiego di modalità analitiche o semplificate possa influire sui risultati in termini di prestazione energetica globale di costruzioni esistenti e sulla valutazione del miglioramento dell'efficienza del sistema edificio-impianto in seguito all'applicazione di interventi di riqualificazione energetica.

1.3 Condizioni al contorno: clima e stagione di riscaldamento

Il territorio italiano è suddiviso in sei zone climatiche sulla base dei gradi giorno corrispondenti; tra di esse la zona E rappresenta quella più significativa per i consumi energetici per il riscaldamento invernale, in relazione sia al numero di edifici sia alla severità delle condizioni meteo. Perciò la parte principale dello studio è stata condotta sull'analisi dei risultati che riguardano queste condizioni climatiche. Infatti gli edifici sono stati idealmente collocati nella città di Milano, caratterizzata da una stagione di riscaldamento della durata di 180 giorni, dal 15 ottobre al 15 aprile e 2404 GG.

Inoltre, per valutare l'influenza delle condizioni climatiche sullo scostamento percentuale in termini di fabbisogni energetici, è stata effettuata una serie di simulazioni per alcune città rappresentative delle altre zone termiche riportate in Tabella 1.2; in particolare le analisi sono state condotte sull'incidenza delle combinazioni dei vari interventi di riqualificazione su involucro e impianto.

Città	Zona climatica	Gradi giorno [°C giorno]	Temperatura di progetto [°C] (UNI 10349)
Lampedusa	A	568	4
Palermo	B	751	5
Napoli	C	1034	2
Roma	D	1415	0
Milano	E	2404	-5
Bressanone	F	3507	-15.5

Tabella 1.1. Località di riferimento

1.4 Procedura di calcolo

La specifica tecnica UNI TS 11300-1 recepisce a livello nazionale le indicazioni fornite dalla normativa europea UNI EN ISO 13790:2008 in riferimento al metodo mensile per il calcolo dei fabbisogni di energia termica per riscaldamento e per raffrescamento. Questo documento contiene la procedura di calcolo dei fabbisogni, indica alcuni valori di riferimento da adottare a livello nazionale non specificati dalla normativa europea e stabilisce le diverse applicazioni:

- *standard rating*: valutazione in condizioni standard per la definizione della prestazione energetica come richiesto per la redazione di attestati di certificazione energetica;
- *tailored rating*: valutazione in condizioni di esercizio in funzione dei dati reali di utilizzo dell'edificio per la diagnosi energetica e l'ottimizzazione delle prestazioni;
- *design rating*: valutazione in fase di progetto.

La procedura di calcolo della norma UNI TS 11300-1 permette il calcolo dei fabbisogni di energia termica dell'edificio per il riscaldamento (pedice H) e per il raffrescamento (pedice C) ed è basata sul bilancio termico dell'edificio effettuato su base mensile. Questo tipo di calcolo è definito in regime "semistazionario" in quanto il bilancio termico viene condotto sulla base di temperature costanti (medie mensili) e i fabbisogni totali vengono calcolati come somma dei fabbisogni di ogni mese; anche gli scambi termici vengono considerati in maniera semplificata: sono ipotizzati flussi attraverso le strutture di tipo mono dimensionale e gli effetti dovuti alla presenza dei ponti termici sono considerati in maniera forfettaria attraverso coefficienti che incrementano il valore della trasmittanza termica delle strutture oppure attraverso l'introduzione della trasmittanza termica lineica che caratterizza il ponte termico. Gli effetti dinamici di accumulo e rilascio termico da parte delle strutture vengono considerati in maniera semplificata attraverso i fattori di utilizzazione degli apporti che dipendono dalla capacità termica interna delle

strutture edilizie e che permette di considerare con maggior dettaglio il comportamento energetico dell'edificio in quanto stabilisce, sulla base delle condizioni esterne medie mensili e delle caratteristiche dell'involucro, quando il contributo degli apporti interni non costituisce una diminuzione del fabbisogno di energia termica utile (stagioni intermedie).

1.4.1 Bilancio termico dell'edificio

La procedura di calcolo della norma UNI TS 11300-1 si può riassumere nei seguenti passaggi:

1. Determinazione delle condizioni al contorno che caratterizzano l'edificio: dati climatici medi mensili, condizioni interne agli ambienti, caratteristiche termo fisiche dell'edificio e durata della stagione di riscaldamento/raffrescamento;
2. Calcolo delle perdite per trasmissione :

$$Q_{H,tr} = H_{tr,adj} \cdot (\theta_{int,set,H/C} - \theta_e) \cdot t + \left[\sum_k F_{r,k} \cdot \Phi_{r,m,k} \right] \cdot t \quad (1.4.1)$$

- $Q_{H,tr}$ perdite per trasmissione [MJ]
- $H_{tr,adj}$ coefficiente globale di scambio termico per trasmissione [W/K]
- $\theta_{int,set,H/C}$ temperature interna di *set point* (H = invernale, C = estiva) [°C]
- θ_e temperature esterna media mensile [°C]
- t durata del mese considerato
- $F_{r,k}$ fattore di forma tra il componente k-esimo e la volta celeste
- $\Phi_{r,m,k}$ extra flusso termico dovuto alla radiazione infrarossa verso la volta celeste per il componente k-esimo [MJ]

3. Calcolo delle perdite per ventilazione:

$$Q_{H,ve} = H_{ve,adj} \cdot (\theta_{int,set,H/C} - \theta_e) \cdot t \quad (1.4.2)$$

- $Q_{H,ve}$ scambio termico per ventilazione
- $H_{ve,adj}$ coefficiente globale di scambio termico per ventilazione

4. Calcolo degli apporti termici interni:

$$Q_{int} = \left[\sum_k \Phi_{int,mn,k} \right] \cdot t + \left[\sum_l (1 - b_{tr,l}) \cdot \Phi_{int,mn,u,l} \right] \cdot t \quad (1.4.3)$$

- Q_{int} apporti termici interni
- $\Phi_{int,mn,k}$ flusso termico prodotto dalla k-esima sorgente di calore interna, mediato sul tempo
- $b_{tr,l}$ fattore di riduzione per l'ambiente non climatizzato avente la sorgente di calore interna
- $\Phi_{int,mn,u,l}$ flusso termico prodotto dalla l-esima sorgente di calore interna nell'ambiente non climatizzato adiacente

5. Calcolo degli apporti solari

$$Q_{sol} = \left[\sum_k \Phi_{sol,mn,k} \right] \cdot t + \left[\sum_l (1 - b_{tr,l}) \cdot \Phi_{sol,mn,u,l} \right] \cdot t \quad (1.4.4)$$

- Q_{sol} apporti solari
- $\Phi_{sol,mn,k}$ flusso termico k-esimo di origine solare
- $b_{tr,l}$ fattore di riduzione per l'ambiente non climatizzato avente il flusso termico l-esimo di origine solare
- $\Phi_{sol,mn,u,l}$ flusso termico l-esimo di origine solare nell'ambiente non climatizzato adiacente u

6. Bilancio energetico dell'edificio:

Invernale:

$$Q_{H,nd} = (Q_{H,tr} + Q_{H,ve}) - \eta_{H,gn} \cdot (Q_{H,int} + Q_{H,sol}) \quad (1.4.5)$$

- $Q_{H,nd}$ fabbisogno di energia termica per la climatizzazione invernale
- $\eta_{H,gn}$ fattore di utilizzazione degli apporti interni

Estivo:

$$Q_{C,nd} = (Q_{C,int} + Q_{C,sol}) - \eta_{C,ls} \cdot (Q_{C,tr} + Q_{C,ve}) \quad (1.4.6)$$

- $Q_{C,nd}$ fabbisogno di energia termica per la climatizzazione estiva
- $\eta_{C,ls}$ fattore di utilizzazione delle dispersioni termiche

1.4.2 Calcolo del fabbisogno di energia primaria del sistema edificio-impianto

Il calcolo del fabbisogno di energia primaria è basato sul valore del fabbisogno di energia termica utile e sul rendimento dell'impianto termico:

$$Q_{H,p} = \frac{Q_{H,nd}}{\eta_{H,sys}} \quad (1.4.7a)$$

Fabbisogno di energia primaria per la climatizzazione invernale

$$Q_{C,p} = \frac{Q_{C,nd}}{\eta_{C,sys}} \quad (1.4.7b)$$

Fabbisogno di energia primaria per la climatizzazione estiva

Per quanto riguarda la climatizzazione invernale la specifica tecnica UNI TS 11300-2 indica le modalità di valutazione del rendimento dell'impianto termico, calcolato come prodotto dei rendimenti dei vari sottosistemi:

- sottosistema di generazione $\eta_{H,gn}$
- sottosistema di distribuzione $\eta_{H,d}$
- sottosistema di regolazione $\eta_{H,rg}$
- sottosistema di emissione $\eta_{H,e}$

Di conseguenza il fabbisogno di energia primaria per il riscaldamento può essere espresso come somma del fabbisogno di energia termica dell'involucro e delle perdite dei vari sottosistemi:

$$Q_{H,p} = Q_{H,nd} + Q_{H,l,e} + Q_{H,l,rg} + Q_{H,l,d} + Q_{H,l,gn} + Q_{H,aux} - Q_{H,aux} \cdot k_e \quad (1.4.8)$$

- $Q_{H,p}$ fabbisogno di energia primaria per la climatizzazione invernale [Wh/anno]
- $Q_{H,nd}$ fabbisogno di energia termica per la climatizzazione invernale [Wh/ anno]
- $Q_{H,l,e}$ perdite del sottosistema di emissione [Wh/ anno]
- $Q_{H,l,rg}$ perdite del sottosistema di regolazione [Wh/ anno]
- $Q_{H,l,d}$ perdite del sottosistema di distribuzione [Wh/ anno]
- $Q_{H,l,gn}$ perdite del sottosistema di generazione [Wh/ anno]

1.4.2.1 Calcolo del fabbisogno di energia dovuto agli ausiliari elettrici

Gli ausiliari elettrici sono costituiti da pompe, valvole, sistemi di regolazione e ventilatori che per il loro funzionamento richiedono l'utilizzo di energia elettrica. Nel bilancio termico dell'impianto rientrano come un incremento del fabbisogno di energia primaria richiesto:

$$Q_{H,aux} = Q_{aux,e} + Q_{aux,d} + Q_{aux,gn} \quad (1.4.9)$$

- $Q_{H,aux}$ fabbisogno totale di energia degli ausiliari [Wh/ anno]
- $Q_{aux,e}$ fabbisogno di energia degli ausiliari di emissione [Wh/anno]
- $Q_{aux,d}$ fabbisogno di energia degli ausiliari di distribuzione [Wh/anno]
- $Q_{aux,gn}$ fabbisogno di energia degli ausiliari di generazione [Wh/anno]

Per essere inseriti nel bilancio dell'impianto i fabbisogni di energia elettrica degli ausiliari devono essere convertiti in energia termica attraverso il fattore di conversione dell'energia elettrica in energia primaria fissato a 2.18 sulla base del rendimento del sistema elettrico nazionale.

L'energia elettrica richiesta dagli ausiliari è in parte recuperata come energia termica utile che viene ceduta al fluido termovettore, con una conseguente riduzione del fabbisogno di energia dell'impianto.

1.4.2.2 Perdite dei sottosistemi impiantistici

Perdite del sottosistema di emissione

Il rendimento del sottosistema di emissione ($\eta_{H,e}$) è legato alla tipologia di terminale installato nei locali ed alle caratteristiche dell'ambiente; le perdite sono legate alla distribuzione non uniforme della temperatura all'interno degli ambienti riscaldati e agli aumenti di dispersioni verso l'esterno determinati dai terminali stessi in relazione al loro tipo e posizionamento all'interno dei locali riscaldati:

$$Q_{H,l,e} = Q_{H,nd} \cdot \frac{1 - \eta_{H,e}}{\eta_{H,e}} \quad (1.4.10)$$

Perdite del sottosistema di regolazione

Il rendimento $\eta_{H,rg}$ è legato alla capacità del regolatore di adeguare il funzionamento dell'impianto alle variazioni delle condizioni all'interno dell'ambiente, in modo da minimizzare gli scostamenti dalle condizioni di *set point*:

$$Q_{H,l,rg} = (Q_{H,nd} + Q_{H,l,e}) \cdot \frac{1 - \eta_{H,rg}}{\eta_{H,rg}} \quad (1.4.11)$$

Perdite del sottosistema di distribuzione

Le perdite di distribuzione sono legate alle dispersioni delle tubazioni in cui scorre il fluido termovettore e dipendono dal grado di isolamento e dalla lunghezza dei condotti:

$$Q_{H,l,d} = (Q_{H,nd} + Q_{H,l,e} + Q_{H,l,rg} - Q_{,aux,e} \cdot k_e) \cdot \frac{1 - \eta_{H,d}}{\eta_{H,d}} \quad (1.4.12)$$

- $Q_{,aux,e} \cdot k_e$ frazione dell'energia degli ausiliari di emissione recuperata dal fluido termovettore [Wh]
- $\eta_{H,d}$ rendimento di distribuzione

Perdite del sottosistema di generazione

La valutazione del rendimento di generazione $\eta_{H,gn}$, da cui dipendono le perdite del sottosistema, costituisce un'operazione complessa che tiene conto di molteplici fattori che caratterizzano il generatore ed il suo funzionamento; la norma UNI TS 11300-2 riporta diversi tipi di calcolo caratterizzati da diversi gradi di approfondimento, da adottare a seconda del tipo di valutazione e dalla disponibilità di dati di input. L'espressione generale delle perdite di generazione è:

$$Q_{H,l,gn} = (Q_{H,nd} + Q_{H,l,e} + Q_{H,l,rg} - Q_{H,aux,e} \cdot k_e + Q_{H,l,d}) \cdot \frac{1 - \eta_{H,gn}}{\eta_{H,gn}} \quad (1.4.13)$$

1.4.3 Calcolo del fabbisogno di energia primaria per la produzione di acqua calda sanitaria

Il calcolo dei fabbisogni per la produzione di ACS è analogo a quanto riportato per la climatizzazione invernale: come prima cosa si procede alla determinazione del fabbisogno di energia utile per la produzione di acqua calda sanitaria per la zona termica:

$$Q_{w,nd} = \sum \rho \cdot c \cdot V_w \cdot (\theta_{er} - \theta_o) \cdot G \quad (1.4.14)$$

- $Q_{w,nd}$ energia termica per riscaldare la quantità di acqua desiderata [Wh]
- ρ densità dell'acqua [kg/m³]
- c calore specifico dell'acqua pari a 1.162 [Wh/kg °C]

- V_w volume di acqua richiesto durante il periodo di calcolo [m^3]
- θ_{er} temperatura di erogazione [$^{\circ}C$]
- θ_o temperatura in ingresso dell'acqua fredda sanitaria [$^{\circ}C$]
- G numero di giorni del periodo di calcolo

Poi si procede con il calcolo delle perdite dovute ai sottosistemi dell'impianto per la produzione di acqua calda sanitaria

Perdite del sottosistema di erogazione

$$Q_{w,l,er} = Q_{w,nd} \cdot \frac{1 - \eta_{w,er}}{\eta_{w,er}} \quad (1.4.15)$$

- $\eta_{w,er}$ rendimento di erogazione

Perdite del sottosistema di distribuzione

$$Q_{w,l,d} = \frac{Q_{w,nd}}{\eta_{w,er}} \cdot f_{w,l,d} \quad (1.4.16)$$

- $f_{w,l,d}$ coefficiente di perdita (da utilizzare nel caso di impianti senza ricircolo)

Perdite del sottosistema di accumulo

$$Q_{w,l,s} = t_s \cdot H_s \cdot (\theta_s - \theta_{int}) \quad (1.4.17)$$

- t_s durata del periodo considerato [h]
- H_s coefficiente di scambio termico del serbatoio [W/K]
- θ_s temperatura media all'interno dell'accumulo [$^{\circ}C$]
- θ_{int} temperatura dell'ambiente in cui è installato l'accumulo [$^{\circ}C$]

Perdite del sottosistema di generazione

$$Q_{W,l,gn} = (Q_{W,nd} + Q_{W,l,er} + Q_{W,l,d} + Q_{W,l,s}) \cdot \frac{1 - \eta_{W,gn}}{\eta_{W,gn}} \quad (1.4.18)$$

Ed infine il fabbisogno di energia primaria per la produzione di acqua calda sanitaria è dato dalla somma del fabbisogno di energia termica utile e delle perdite dei sottosistemi dell'impianto:

$$Q_{W,p} = Q_{W,nd} + Q_{W,ls,sup} + Q_{W,ls,d} + Q_{W,ls,s} + Q_{W,ls,gen} \quad (1.4.19)$$

Anche nel caso dell'impianto di produzione di acqua calda sanitaria è importante la valutazione del contributo dovuto alla presenza di ausiliari elettrici.

1.5 Casi studio

Le analisi sono state condotte su due edifici che rappresentano esempi di costruzioni caratterizzate da basse prestazioni energetiche, ma ampiamente diffuse sul territorio nazionale, anche se non rappresentative del parco immobiliare italiano nel suo complesso. Infatti, come anche evidenziato nel progetto TABULA (2011) che fornisce una panoramica generale sulle tipologie costruttive esistenti diffuse in 24 paesi dell'Unione Europea, la presenza di differenti zone climatiche in Italia ha causato la diffusione di tipologie edilizie diverse sia per forma che per composizione dell'involucro. Di conseguenza valori diversi di trasmittanza dell'involucro sono ricorrenti solo in alcune zone del territorio e inoltre non si riesce a individuare un'appropriata correlazione tra epoca di costruzione dell'edificio, livello di isolamento e prestazioni energetiche generali.

L'aspetto principale che caratterizza il parco immobiliare italiano è l'elevata percentuale di edifici storici (Figura 1.1). In particolare il 24 % delle abitazioni è stato costruito prima della seconda Guerra Mondiale, mentre il 46% delle abitazioni è stato costruito dopo il 1946 e prima della legge 373/76; gli edifici

costruiti in questo intervallo di tempo sono caratterizzati da consumi energetici elevati, in quanto realizzati in fase di ricostruzione post bellica e senza adeguate misure di contenimento energetico.

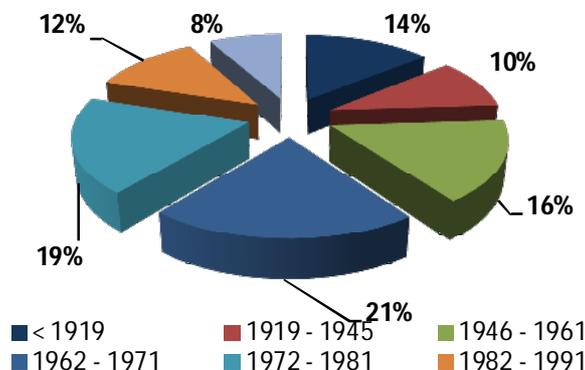


Figura 1.1. Epoca di costruzione delle abitazioni in Italia - ISTAT 2010

Solo l'8% è stato realizzato dopo la legge 10/91 per il contenimento dei consumi energetici delle costruzioni. Inoltre si riscontra la scarsa diffusione di interventi di rinnovamento, soprattutto in relazione agli edifici più datati, che interessano meno della metà del parco immobiliare esistente (Censimento ISTAT 2010).

Questi fattori comportano un potenziale di risparmio energetico molto elevato conseguibile attraverso un'adeguata pianificazione di misure di contenimento. Infatti gran parte delle costruzioni esistenti presenta pareti esterne in pietra o mattoni pieni o blocchi forati con intercapedine e soltanto gli edifici costruiti recentemente hanno l'involucro isolato; di conseguenza questi edifici sono caratterizzati da ampi margini di miglioramento delle prestazioni.

1.5.1 Caso A

Il primo esempio è costituito da un'abitazione singola, collocato in un'area a bassa densità abitativa; l'edificio presenta una pianta rettangolare ed è costituito da un unico piano abitato fuori terra e da un sottotetto non riscaldato.

La struttura è caratterizzata da una muratura portante in mattoni pieni di spessore pari a 35 cm e l'involucro è privo di isolamento termico; il solaio inferiore e quello superiore sono caratterizzati da uno spessore di 30 cm e da una trasmittanza pari a $1.4 \text{ W(m}^2 \text{ K)}$; i serramenti sono in legno con vetri doppi e aria nell'intercapedine.

L'impianto termico è costituito da una caldaia di tipo tradizionale con un sottosistema di distribuzione non isolato e radiatori; la temperatura del fluido termovettore è regolata sulla base delle condizioni esterne attraverso una sonda climatica, di conseguenza l'efficienza globale dell'impianto risulta molto ridotta.

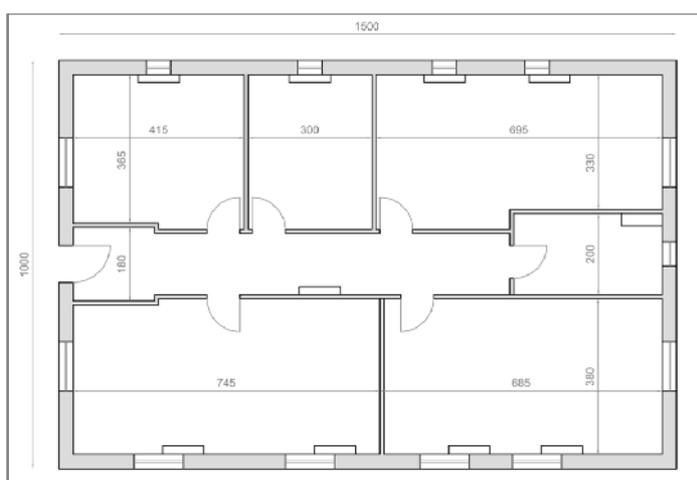


Figura 1.2. Planimetria caso studio A

1.5.2 Caso B

Il caso B è costituito da un appartamento al terzo piano di un condominio che presenta una parete in calcestruzzo confinante con il vano scale, due pareti esterne esposte a Nord e ad Ovest, e una parete adiacente ad un'altra unità riscaldata. La struttura è di tipo a telaio in calcestruzzo armato e l'involucro è realizzato con una parete a cassa vuota non isolata (spessore 36 cm). Sono stati ipotizzati infissi di tipo scadente (telaio in legno e vetri singoli).



Figura 1.3. Planimetria caso studio B

	Caso studio A	Caso studio B
Caratteristiche geometriche		
Superficie netta (m ²)	134.22	53.59
Volume lordo (m ³)	549.00	242.61
Superficie delle pareti esterne (m ²)	160.47	89.22
Superficie vetrata (m ²)	17.64	13.56
Superficie disperdente (m ²)	480.00	102.78
Rapporto S/V	0.89	0.424
Impianto termico		
Potenza termica a focolare (kW)	26	150 (40 unità)
Rendimento globale (%)	80	81

Tabella 1.2. Caratteristiche dei casi studio

1.6 Ipotesi di intervento

In Figura 1.4 e 1.5 sono indicati, rispettivamente per i casi studio A e B, gli interventi ipotizzati in fase di analisi. Per entrambi i casi ciascun intervento è contrassegnato da un codice: le sigle A0 e B0 indicano la prestazione energetica

del caso studio nelle condizioni iniziali, mentre i codici A1, B1, A2, B2, ecc... rappresentano le ipotesi di intervento successive. Inoltre alla fine del codice viene aggiunta l'indicazione dei differenti metodi di calcolo: ad esempio la simulazione B.1.a rappresenta la prima ipotesi di calcolo relativa all'intervento 1 relativo al caso studio B.

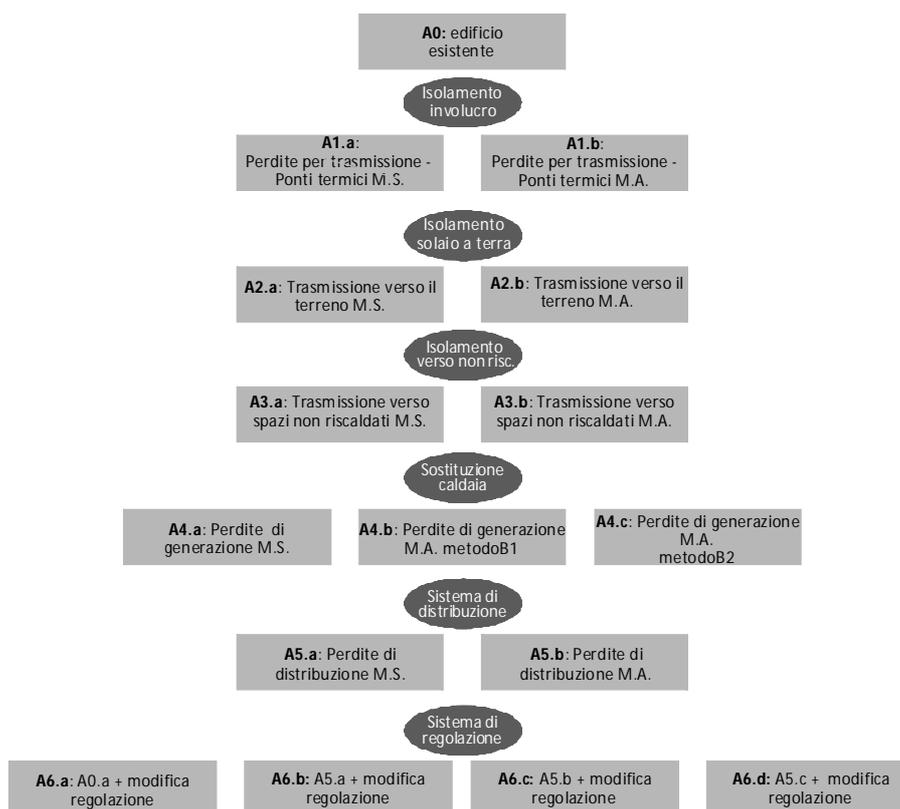


Figura 1.4. Interventi e metodologie di calcolo - Caso A

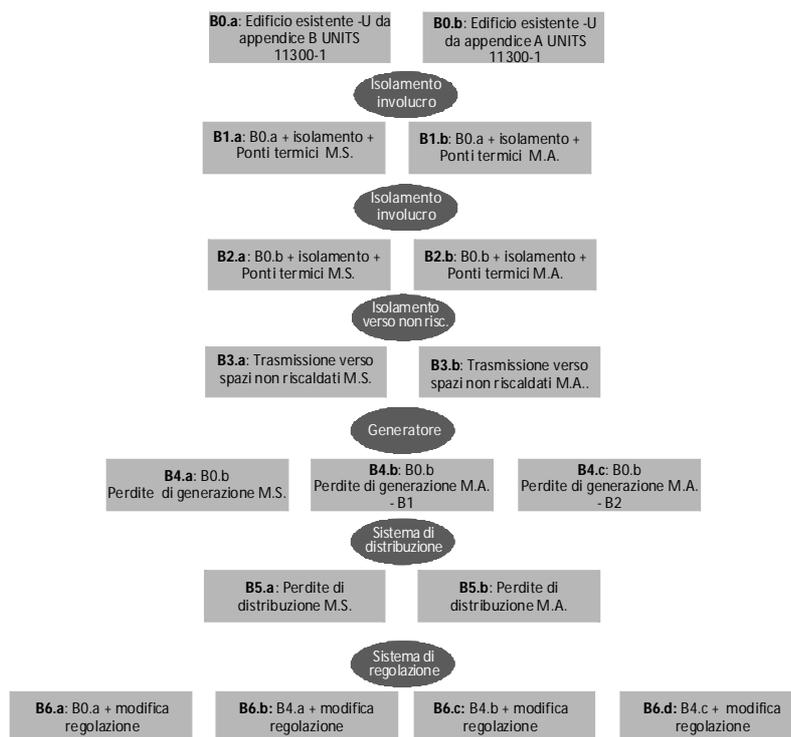


Figura 1.5. Interventi e metodologie di calcolo - Caso B

1.7 Risultati delle simulazioni

1.7.1 Risultati dipendenti dalla trasmittanza termica

La trasmittanza termica dell'involucro edilizio rappresenta un parametro significativo nel calcolo della prestazione energetica, soprattutto durante la stagione invernale; la valutazione della trasmittanza è caratterizzata da diversi gradi di accuratezza in relazione alla conoscenza della composizione della parete, all'attendibilità delle informazioni ed al tipo di calcolo scelto in fase di valutazione.

La norma UNI EN ISO 13790 stabilisce che la trasmittanza termica dell'involucro deve essere valutata sulla base delle indicazioni fornite dalla UNI EN ISO 6946; tuttavia nel caso di edifici esistenti a livello nazionale possono essere utilizzati metodi semplificati o valori di default da attribuire in relazione alle caratteristiche costruttive dell'edificio considerato. Infatti la norma UNI TS 11300-1, che recepisce a livello nazionale la norma UNI EN ISO 13790, indica tre metodi diversi per la stima della trasmittanza termica da effettuare sulla base di:

- proprietà termofisiche reali dei materiali da ricavare attraverso le certificazioni di prodotto,
- proprietà termofisiche standard dei materiali riportate nelle norme UNI 10351, UNI 10355 e UNI EN ISO 6946, oppure nell'Appendice B della norma UNI TS 11300-1
- valori indicati nell'Appendice A della norma UNI TS 11300-1 che, in relazione alla tipologia di edificio, all'anno di costruzione ed agli spessori rilevati in opera, indica una trasmittanza termica standard da utilizzare in caso non siano disponibili indicazioni progettuali precise.

Quest'ultima opzione rappresenta la modalità più approssimata per la stima della trasmittanza termica, perché non considera lo spessore e la conduttività termica dei diversi materiali presenti nella stratigrafia, ma soltanto lo spessore complessivo dell'elemento e la tipologia di edificio.

Risulta evidente come si possano ottenere differenti valori di trasmittanza termica attraverso i vari metodi e, di conseguenza, diversi livelli di prestazione energetica dell'edificio.

Per esempio, in applicazione della norma UNI TS 11300-1 al caso studio B, è possibile ottenere due valori di trasmittanza termica U per la parete esterna:

- $U = 0.90 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$: stima della resistenza termica dei materiali che compongono la stratigrafia attraverso i valori di conduttività riportati nell'Appendice B (caso B0.a);

- $U = 1.1 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$: valore riportato nell'Appendice A per la parete a cassa vuota in mattoni forati di spessore 35 cm (caso B0.b).

Per la parete che caratterizza il caso A, invece, attraverso l'applicazione dei due metodi si ricavano valori di trasmittanza analoghi:

- $U = 1.53 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$: applicazione dell'Appendice B, (caso A0.a);
- $U = 1.56 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ in applicazione dell'Appendice A, parete in mattoni pieni (caso A0.b).

Per questo motivo è trascurato il confronto tra le prestazioni energetiche per il caso studio A basato sui diversi valori di trasmittanza termica, per cui come valore di partenza per i successivi interventi si considerano i risultati relativi al caso A0.a:

- $EP_{H,env} = 282.08 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ anno})$;
- $EP_H = 474.40 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ anno})$;
- $EP_{gl} = 498.40 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ anno})$.

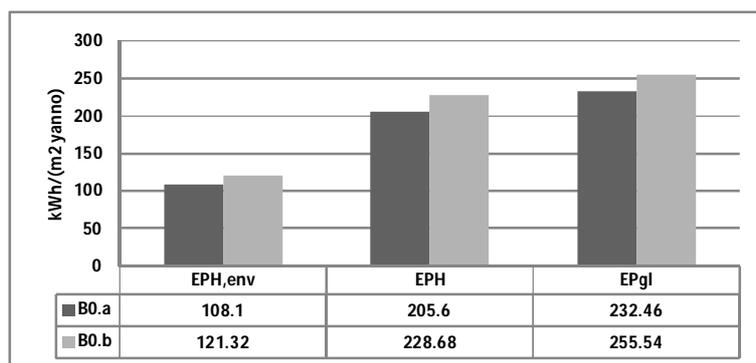


Figura 1.6. Indici di prestazione energetica

Per il caso B0, considerando costanti tutte le altre ipotesi di calcolo relative al sistema edificio-impianto, l'utilizzo del valore di trasmittanza dedotto

dall'Appendice A porta ad un indice $EP_{H,env}$ superiore del 10.9% e, come mostrato in Figura 1.6, lo scostamento rimane significativo anche in termini di prestazione globale. Un calcolo meno dettagliato della trasmittanza termica generalmente introduce una sovrastima della prestazione energetica attraverso l'involucro opaco (Magrini et al. 2010)

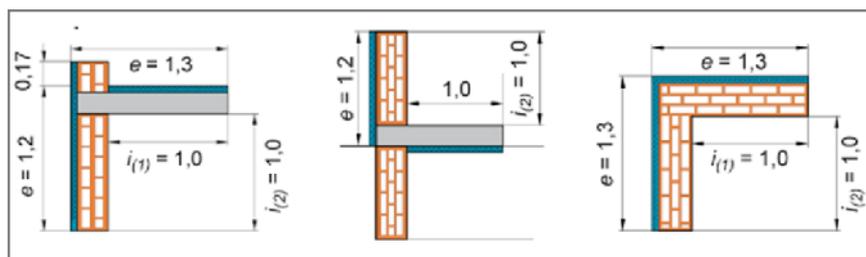
1.7.2 Calcolo forfettario e analitico dei ponti termici: incidenza negli interventi di isolamento dell'involucro

Il primo intervento di miglioramento della prestazione energetica per gli edifici analizzati è costituito dall'isolamento termico dell'involucro esterno: si confrontano i risultati in termini di classe energetica raggiungibile per i due casi studio. Per quanto riguarda il tipo di calcolo, la norma UNI EN ISO 13790 stabilisce che la valutazione dei ponti termici deve essere effettuata secondo quanto indicato nelle norme UNI EN ISO 14683 e UNI EN 10211; nel caso di edifici esistenti, se non sono disponibili informazioni dettagliate sulle caratteristiche dei ponti termici, è possibile valutarne l'influenza adottando un metodo semplificato che prevede l'applicazione di una maggiorazione alla trasmittanza termica del componente. In caso di riqualificazione dell'involucro opaco, la norma UNI TS 11300-1 consente la determinazione dell'incidenza dei ponti termici in edifici esistenti sia con il metodo analitico che con il metodo semplificato: nel primo caso il calcolo puntuale richiede il rilievo della lunghezza e la determinazione della trasmittanza termica lineica sulla base delle configurazioni riportate nella norma UNI EN ISO 14683, nel secondo caso, l'incidenza dei ponti termici è valutata in maniera semplificata, applicando un coefficiente percentuale al valore della trasmittanza della parete sulla base della stratigrafia dell'elemento (Prospetto 4 UNI TS 11300-1).

Il primo intervento ipotizzato è l'applicazione di 10 cm di EPS all'involucro opaco del caso A, che permette di ottenere una trasmittanza termica pari a $U_{wall} = 0.308 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ per le pareti, $U_{u_floor} = 0.310 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ per il solaio superiore e $U_{g_floor} = 0.293 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ per il solaio inferiore.

Mantenendo costanti tutte le variabili ad eccezione dell'incidenza dei ponti termici, sono state simulate due ipotesi di calcolo dei ponti termici:

- caso A1.a - calcolo semplificato: coefficiente maggiorativo della trasmittanza pari al 15% corrispondente all'indicazione "isolamento esterno con aggetti e balconi senza correzione del ponte termico" del Prospetto 4 della UNI TS 11300-1;
- caso A1.b - calcolo analitico: valutazione secondo la norma UNI EN ISO 14683 considerando le giunzioni strutturali (parete-parete, solaio-parete) riportate in Figura 1.7.



• **Figura 1.7.** Connessioni strutturali - caso A

Lo scostamento in termini di prestazione energetica associato alle due ipotesi di calcolo per la climatizzazione invernale è pari al 18.9%, i risultati completi sono riportati in Tabella 1.3. In questo caso l'utilizzo dei due metodi non comporta il passaggio di classe, ma lo scostamento è molto significativo e, in altri casi, potrebbe portare alla definizione di una classe energetica differente.

In conclusione, utilizzare il metodo semplificato può portare ad una sottostima dell'incidenza dei ponti termici che diventa più significativa in relazione al grado di isolamento dell'involucro.

Per il secondo caso studio sono stati previsti due tipi di intervento:

- casi B1.a e B1.b: isolamento in intercapedine che prevede riempimento con schiuma poliuretana della cassa vuota ($U_{\text{wall}} = 0.356 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$)
- casi B2.a e B2.b: isolamento a cappotto con 10 cm di EPS ($U_{\text{wall}} = 0.279 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$)

Caso	Tipo di interventi	Metodo di Calcolo	$EP_{H,env}$	EP_H	EP_{gl}	Classe
A1.a	Isolamento esterno	Semplificato	74.83	139.76	163.83	E
A1.b	dell'involucro (pareti e solai)	Analitico	95.33	172.40	196.44	E
Scostamento [%]			21.5	18.9	16.6	
B1. a	B0.b + air gap	Semplificato	75.61	147.04	173.91	G
B1.b	insulation	Analitico	97.29	185.62	212.48	G
Scostamento [%]			22.2	20.8	18.1	
B2.a	B0.b + external	Semplificato	70.18	137.59	164.46	F
B2.b	insulation	Analitico	79.70	153.81	180.67	G
Scostamento [%]			11.9	10.5	8.9	

Tabella 1.3. Isolamento involucro casi A e B - Influenza dei ponti termici

I casi B1.a e B2.a prevedono il calcolo forfettario dei ponti termici attraverso il coefficiente maggiorativo rispettivamente pari a $b_{tr,x} = 10\%$ (*mattoni forati on isolamento in intercapedine senza correzione del ponte termico*) e $b_{tr,x} = 20\%$ (*isolante esterno con aggetti e balconi senza correzione del ponte termico*).

Per i casi B1.b e B2.b è stato utilizzato il metodo analitico e sono state adottate le configurazioni corrispondenti alla Figura 1.8.

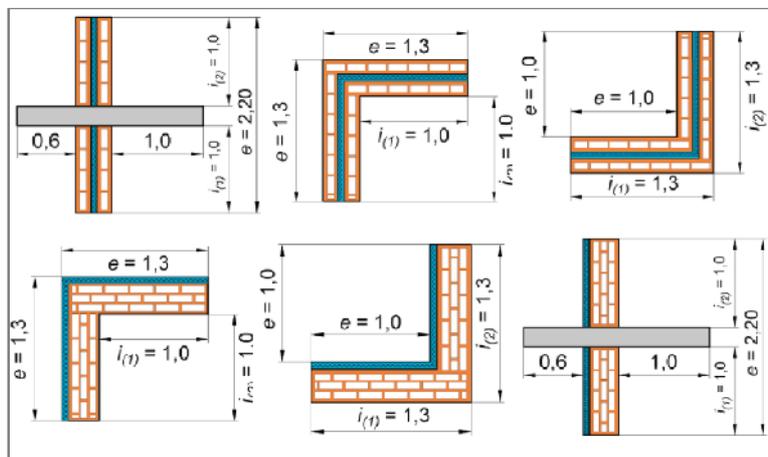


Figura 1.8. Connessioni strutturali caso B

La Tabella 1.3 mostra l'influenza dei ponti termici calcolati con i metodi semplificati e analitici per entrambi i casi: risulta evidente come l'isolamento esterno garantisca le prestazioni migliori in quanto consente l'applicazione di uno strato di isolante spesso 10 cm che determina una trasmittanza pari a $0.279 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$, mentre il riempimento è limitato allo spessore dell'intercapedine.

In relazione ai risultati ottenuti per i casi B1.b e B2.b si nota come l'isolante all'interno della cassa vuota non permetta il miglioramento della classe energetica, anche se il valore di $EP_{H, env}$ è ridotto rispettivamente del 19.8% e del 34.3% rispetto al caso B0.a.

Inoltre l'influenza della metodologia applicata risulta significativa: nel caso B1.a la procedura semplificata porta ad un indice di prestazione dell'involucro che presenta uno scostamento del 22.2% rispetto al caso B1.b

L'influenza della procedura in termini di prestazione energetica risulta ancora maggiore tra i casi B2.a e B2.b: si ottengono due classi differenti determinate dal diverso tipo di valutazione. Lo scostamento è dovuto all'incidenza del ponte termico che aumenta in relazione alla diminuzione della trasmittanza termica degli elementi opachi. Questo è il motivo per cui si raggiunge una classe meno vantaggiosa attraverso il metodo analitico, anche se il calcolo semplificato è stato effettuato scegliendo il coefficiente incrementale più elevato presente nel Prospetto 4 della norma.

Queste analisi evidenziano non soltanto una variabilità dei risultati in relazione al tipo di calcolo, ma mostrano anche come per gli edifici esistenti con elevati valori del fabbisogno energetico per la climatizzazione invernale, l'intervento di isolamento dell'involucro opaco comporta un miglioramento significativo delle prestazioni, tuttavia la classe raggiunta è ancora molto lontana dalla classe A.

1.7.3 Trasmissione di calore verso il terreno: calcoli semplificati e analitici

In caso di calcolo delle dispersioni attraverso un solaio a contatto con il terreno, la normativa italiana recepisce le indicazioni della norma europea UNI EN ISO 13790, che richiede un calcolo accurato della differenza di temperatura

tra ambiente interno e terreno come indicato nella norma UNI EN ISO 13770. In alternativa al calcolo analitico della differenza di temperatura, si può effettuare una valutazione semplificata utilizzando come temperatura del terreno quella dell'ambiente esterno ed applicando un fattore correttivo $b_{tr,x}$ al coefficiente di scambio termico.

La Tabella 1.4 presenta i risultati dell'applicazione di queste due metodologie al caso A per l'intervento di isolamento del solaio con 10 cm di polistirene, che permette di raggiungere un valore di trasmittanza pari a 0.293 W/(m² K). Il modello del caso A2.a è stato definito utilizzando il metodo semplificato e applicando il fattore $b_{tr,x} = 0.45$ al coefficiente di scambio termico del solaio inferiore per la valutazione delle dispersioni verso il terreno; nel caso A2.b è stata calcolata analiticamente la temperatura del terreno secondo quanto stabilito nella norma UNI EN ISO 13370. Si noti come le differenze in termini di indici di prestazione energetica ($EP_{H,env}$, EP_H and EP_{gl}) tra i due casi siano trascurabili.

Caso	Metodo di calcolo	$EP_{H,env}$	EP_H	EP_{gl}	Classe
A2.a	Semplificato ($b_{tr,x} = 0.45$)	220.57	378.46	402.50	G
A2.b	Analitico	222.47	381.43	405.43	G
Scostamento [%]		0.85	0.78	0.72	

Tabella 1.4. Prestazione energetica in relazione alle modalità di valutazione delle dispersioni verso il terreno - caso A

La valutazione non è stata effettuata per il caso B in quanto l'appartamento non confina con il terreno.

1.7.4 Trasmissione del calore verso spazi non riscaldati

La temperatura degli spazi non riscaldati adiacenti al volume da riscaldare influenza le dispersioni termiche, perciò la sua valutazione è molto importante nella determinazione della prestazione energetica. La norma UNI TS 113300-1 indica che la differenza di temperatura tra due ambienti (riscaldato e non) può essere calcolata attraverso una valutazione analitica, che prevede l'applicazione

della norma UNI EN ISO 13789, oppure attraverso il metodo semplificato previsto dalla norma UNI TS 11300-1 mediante l'utilizzo di un fattore correttivo $b_{tr,x}$. (Prospetto 6 UNI TS 11300-1).

Sono stati confrontati i risultati ottenuti attraverso le due modalità di calcolo per entrambi gli edifici analizzati calcolando, per il caso A la temperatura del sottotetto, mentre per il caso B del vano scala adiacente all'appartamento.

In Tabella 1.5 vengono mostrati i risultati delle simulazioni energetiche: si noti come il metodo di calcolo influenza in maniera significativa gli indici di prestazione energetica, soprattutto per l'appartamento.

Caso	Metodo di calcolo	EP _{H,env}	EP _H	EP _{gl}	Classe
A3.a	Semplificato	207.07	357.39	381.40	G
A3.b	Analitico	193.00	335.29	359.30	G
Scostamento [%]		6.79	6.18	5.79	
Case	Metodo di calcolo	EP _{H,env}	EP _H	EP _{gl}	Classe
B3.a	Semplificato	70.18	137.59	164.46	F
B3.b	Analitico	62.00	122.73	149.60	F
Scostamento [%]		11.7	10.8	9.0	

Tabella 1.5. Indici di prestazione energetica in relazione della temperatura degli spazi non riscaldati

1.7.5 Perdite del sistema di generazione

Un tipico intervento per migliorare le prestazioni dell'impianto di riscaldamento è la sostituzione dei generatori tradizionali con la caldaia a condensazione e, se possibile, l'installazione di pannelli radianti e di un sistema di regolazione efficiente (come regolatori basati sulla temperatura del singolo ambiente). Per questo motivo sono state effettuate una serie di simulazioni sul caso A e B per valutare il miglioramento della prestazione energetica che può essere raggiunto attraverso questo tipo di intervento. In particolare la norma UNI TS 11300-2 specifica che la determinazione del rendimento del sottosistema di generazione può essere ricavato:

- in maniera semplificata, attraverso l'adozione di valori standard di riferimento per proposti nel Prospetto 23 della norma per i generatori più comuni.
- attraverso i metodi dettagliati riportati nell'Appendice B della norma (metodi B1 e B2)

In particolare la prima opzione (utilizzo di valori tabellati) è consentita se la tipologia del generatore e le condizioni di esercizio corrispondono a quelle riportate nel Prospetto 23 della norma UNI TS 11300-1; il metodo B2 è di tipo analitico, mentre il metodo B1 è basato sui rendimenti calcolati sulla base della Direttiva 92/42/CE a cui vengono applicati opportuni fattori correttivi in relazione alle reali modalità di funzionamento.

Si noti come la possibilità di scegliere differenti metodi per la valutazione del rendimento del generatore possa portare a differenze significative in termini di indici di prestazione energetica per la stagione invernale, visto che i valori tabellati dei metodi semplificati portano generalmente ad una sovrastima delle perdite di generazione rispetto ai metodi analitici.

La Tabella 1.6 presenta i risultati ottenuti per il caso A utilizzando i tre diversi metodi di calcolo proposti dalla norma; dalla tabella emerge uno scostamento massimo del 32.6% in termini di prestazione energetica invernale tra il metodo B2 che risulta peggiorativo, ed il metodo B1 che porta alla migliore prestazione energetica.

Caso	Metodo di calcolo	EP _H	EP _{gl}	Classe
A4.a	Prospetto 23	397.54	419.81	G
A4.b	B1	316.87	336.06	G
A4.c	B2	420.49	437.00	G
B4.a	Prospetto 23	177.89	205.83	G
B4.b	B1	177.76	206.46	G
B4.c	B2	195.5	223.93	G

Tabella 1.6. Influenza delle perdite del sottosistema di generazione

Un altro aspetto da sottolineare è che la sostituzione del generatore non comporta un miglioramento della classe energetica rispetto allo stato di fatto, anche se il valore di EP_{gl} si riduce del 32.5%.

Nella Tabella 1.6 sono inoltre riportati i risultati per il caso B che confermano come il metodo B2 porti ad un peggiore indice di prestazione energetica che si discosta del 9% circa dagli altri due metodi con cui si ottengono risultati analoghi. Anche in questo caso la classe energetica dopo l'intervento non cambia ma il risparmio conseguito è del 12.3%.

1.7.6 perdite del sistema di distribuzione

La norma UNI TS 11300-2 indica che le perdite per distribuzione possono essere valutate:

- utilizzando valori di rendimento pre-calcolati riportati nel Prospetto 21 della norma sulla base della tipologia di sottosistema e del livello di isolamento;
- applicando il metodo analitico descritto nell'Appendice a della norma.

In Tabella 1.7 sono riportati i risultati ottenuti dall'applicazione delle due diverse metodologie di calcolo: per il caso A lo scostamento è pari al 3% mentre per il caso B risulta trascurabile.

Caso	Metodo di calcolo	EP_H	EP_{gl}	Classe
A5.a	Semplificato	464.47	488.43	G
A5.b	Analitico	481.38	505.37	G
Scostamento [%]		3.5	3	
B5.a	Semplificato	178.60	205.46	G
B5.b	Analitico	177.04	203.91	G
Scostamento [%]		0.8	0.7	

Tabella 1.7 Influenza del rendimento del sottosistema di distribuzione

1.7.7 Perdite del sistema di regolazione ed emissione

Un'ulteriore possibilità di intervento vantaggiosa in termini di rapporto costi/benefici è il miglioramento del sottosistema di regolazione da associare

alla sostituzione del generatore di calore (*Magnani et al. 2011*). Per il caso A è stato installato un termostato caratterizzato da un rendimento del 99% mentre per il caso B si è ipotizzato di applicare delle valvole termostatiche ai radiatori caratterizzate da rendimento del 98%.

La Tabella 1.8 permette di comprendere come un sistema di regolazione efficiente possa influenzare le prestazioni energetiche del sistema edificio-impianto in maniera significativa. Inoltre è evidente che la metodologia adottata per la valutazione delle perdite di generazione può influenzare il rendimento globale dell'impianto η_{gl} : anche se l'edificio rimane comunque in classe G lo scostamento tra il caso A6.d e A6.c è del 23%.

Confrontando i risultati ottenuti per il caso A6.a con la prestazione energetica iniziale di A0.a si nota che l'intervento sul sistema di regolazione può portare ad una riduzione del valore di EP_{gl} pari al 10%, invece dai casi A4.a-b-c e Aa6.a-b-c emerge che accoppiando alla sostituzione del generatore il miglioramento del sistema di regolazione, la prestazione migliora del 10% indipendentemente dal tipo di calcolo delle perdite di generazione.

Caso	Intervento	Metodo di calcolo	EP_H	EP_{gl}	η_{gl}	Classe
A6. a	A0.a + control	Standard	420.23	444.23	0.671	G
A6. b	A5.a + control	Prospetto 23	352.2	374.48	0.801	G
A6. c	A5.b + control	B1	282.76	302.06	0.998	G
A6. d	A5.c + control	B2	372.24	388.97	0.758	G
B6. a	B0.a + control	Standard	179.17	206.03	0.603	G
B6. b	B3.a + control	Prospetto 23	155.19	183.19	0.700	G
B6. c	B3.b + control	B1	155.46	184.26	0.695	G
B6. d	B3.c + control	B2	171.6	200.22	0.630	G

Tabella 1.8. Influenza del sistema di regolazione

Dal confronto tra i casi A6.b e A6.c caratterizzati dallo stesso livello di intervento ma da metodi di calcolo differenti, lo scostamento in termini di risultati è del 22%: la scelta del metodo di calcolo può portare ad una variazione della prestazione energetica più significativa rispetto al miglioramento

raggiungibile con la sostituzione del sistema di regolazione. Analoghe considerazioni sono valide anche per il caso B.

1.7.8. Discussione risultati

Le analisi riportate nei paragrafi precedenti sono utili per definire dei *range* di variazione degli indici di prestazione energetica in relazione al tipo di calcolo utilizzato per valutare i miglioramenti conseguibili a fronte degli interventi di riqualificazione energetica proposti per i casi studio considerati (Tabella 1.9). Infatti, a seconda dell'applicazione di un calcolo semplificato o analitico si possono ottenere risultati che presentano scostamenti anche significativi.

	Caso A	Caso B
Intervento 1	Isolamento parete esterna - cappotto	Isolamento parete esterna - riempimento intercapedine
Intervento 2	Isolamento solaio a terra	Isolamento parete esterna - cappotto
Intervento 3	Isolamento pareti verso spazi non riscaldati	
Intervento 4	Impianto - sostituzione generatore di calore	
Intervento 5	Impianto: adeguamento sistema di distribuzione	
Intervento 6	Impianto: adeguamento sistema di regolazione	

Tabella 1.9. Interventi di riqualificazione ipotizzati

Per ciascun caso studio è stato valutato l'indice EP_{Hmin} , associato alle ipotesi di calcolo che minimizzano il fabbisogno di energia primaria per la climatizzazione invernale ed EP_{Hmax} caratterizzato invece da ipotesi di calcolo che massimizzano tale fabbisogno.

Si osservi come per i casi studio (Figura 1.9 e 1.10) la riduzione del fabbisogno associata ad alcuni interventi sia soggetta a una variazione del 20% a seconda del tipo di valutazione utilizzata (semplificata o analitica); tale percentuale può portare a una valutazione del risparmio energetico non

rappresentativa e a confrontare interventi sulla base di percentuali di risparmio poco attendibili.

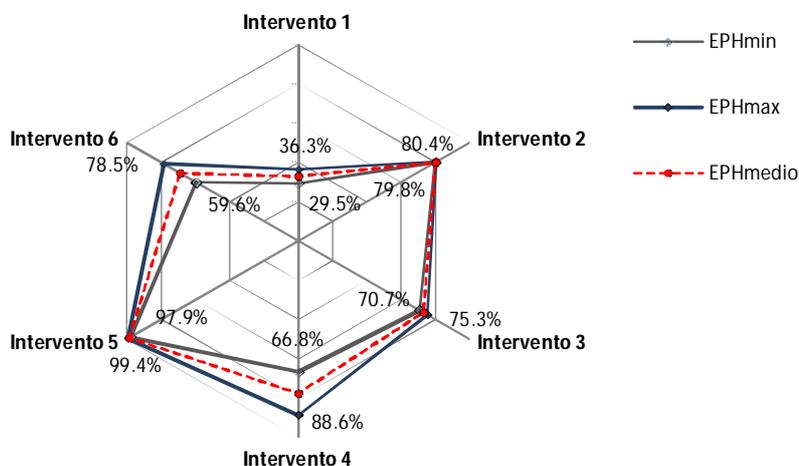


Figura 1.9. Confronto indici EP_H [kWh/(m²anno)] Caso A

Caso A							
Caso base	Int	EP_{Hmin}^*	Confronto caso base [%]**	EP_{Hmax}^*	Confronto caso base [%]**	EP_{Hmedio}^*	Confronto caso base [%]**
474.40	I1	139.76	29.46%	172.4	36.34%	156.08	32.90%
	I2	378.46	79.78%	381.43	80.40%	379.945	80.09%
	I3	335.29	70.68%	357.39	75.34%	346.34	73.01%
	I4	316.87	66.79%	420.49	88.64%	368.68	77.72%
	I5	464.47	97.91%	471.38	99.36%	467.925	98.64%
	I6	282.76	59.60%	372.24	78.47%	327.5	69.03%

*Il risultato è relativo all'indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale espresso in kWh/(m²anno)

**Esprime la percentuale che rappresenta l' EP_H dopo l'intervento rispetto al caso base

Tabella 1.10.. Risultati globali - Caso A Indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale minimo, medio, massimo

Ad esempio in Figura 1.9 si può osservare che l'intervento 4 sia associato a una riduzione del fabbisogno corrispondente all'88% del valore iniziale nel caso di EP_{Hmax} e al 66.8% nel caso di EP_{Hmin} , mentre per l'intervento 3 il range di variazione è compreso tra il 75% ed il 70% del fabbisogno iniziale.

Considerando il valore di EP_{Hmin} per l'intervento 3 e di EP_{Hmax} per l'intervento 4 risulta più vantaggioso in termini di riduzione del fabbisogno iniziale isolare le pareti verso locali non riscaldati rispetto alla sostituzione del generatore; se invece il confronto viene effettuato sulla base di EP_{Hmax} per l'intervento 3 e di EP_{Hmin} per l'intervento 4, la scelta più efficace è costituita dalla sostituzione del generatore di calore.

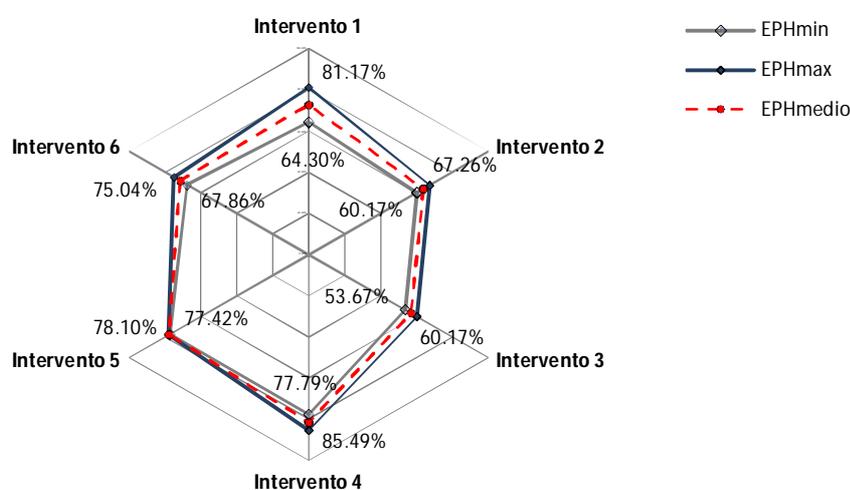


Figura 1.10. Confronto indici EP_H [$kWh/(m^2 \text{anno})$] Caso B

Anche per il caso B (Figura 1.10) si possono effettuare considerazioni analoghe; in particolare si noti come gli interventi relativi all'involucro (Interventi 1-2-3) siano caratterizzati da percentuali di riduzione dei fabbisogni di energia primaria che variano dal 7.09% al 16.87% in relazione al metodo di calcolo (analitico o semplificato), mentre gli interventi sui componenti

dell'impianto sono soggetti a un *range* di variazione più ridotto, compreso tra 0.68% e 7.70%.

Caso B							
Caso base	Int	EP _{Hmin} [*]	Confronto caso base [%] ^{**}	EP _{Hmax} [*]	Confronto caso base [%] ^{**}	EP _{Hmedio} [*]	Confronto caso base [%] ^{**}
228.68	I1	147.04	64.30%	185.62	81.17%	166.33	72.73%
	I2	137.59	60.17%	153.81	67.26%	145.7	63.71%
	I3	122.73	53.67%	137.59	60.17%	130.16	56.92%
	I4	177.89	77.79%	195.5	85.49%	186.695	81.64%
	I5	177.04	77.42%	178.6	78.10%	177.82	77.76%
	I6	155.19	67.86%	171.6	75.04%	163.395	71.45%

* Il risultato è relativo all'indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale espresso in kWh/(m²anno)

**Esprime la percentuale che rappresenta l'EP_H dopo l'intervento rispetto al caso base

Tabella 1.11. Risultati globali - Caso B Indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale minimo, medio, massimo

In conclusione la variazione a cui sono soggetti i fabbisogni energetici di energia primaria in relazione al tipo di calcolo utilizzato per alcuni parametri in ingresso dei modelli può risultare anche significativa e incidere in maniera differente nel caso di interventi su involucro o impianto in funzione delle caratteristiche dell'edificio analizzato. Una possibile soluzione al problema nel caso di valutazioni comparative degli interventi di riqualificazione è quella di definire un fabbisogno energetico medio che può fornire da riferimento per le scelte progettuali.

1.7.9 Effetto della combinazione dei parametri

Sulla base dei risultati precedenti si può dedurre che la variazione di un singolo parametro determinata dall'applicazione di diverse metodologie di

calcolo previste dalle norme UNI TS 11300 può portare a scostamenti significativi in termini di indici di prestazione energetica.

Intervento	Metodo di calcolo	Caso A0.a		Caso B0.b	
		BEST	WORST	BEST	WORST
Combinazione 1 - RIQUALIFICAZIONE DELL'INVOLUCRO-					
Pareti e pavimenti: isolamento esterno + sostituzione delle finestre	Ponti termici	Semplificato	Analitico	Semplificato	Analitico
	Trasmissione del calore verso il terreno	Semplificato	Analitico	-	-
	Calcolo della temperatura - spazi non riscaldati	Analitico	Semplificato	Analitico	Semplificato
Combinazione 2 - MIGLIORAMENTO DELL'IMPIANTO TERMICO -					
Installazione caldaia a condensazione	Perdite di generazione	B1	B2	Prospetto 23	B2
Isolamento del sistema di distribuzione + sostituzione regolazione	Perdite di distribuzione	Semplificato	Analitico	Analitico	Semplificato
	Rendimento di regolazione	Standard	Standard	Standard	Standard
Combinazione 3 = Combinazione 1 + Combinazione 2 - RIQUALIFICAZIONE COMPLESSIVA					

Tabella 1.10 Simulazioni combinate: interventi e metodi di calcolo - casi A e B

Di conseguenza la combinazione di diverse scelte dei parametri in ingresso dei modelli può comportare differenze importanti nei risultati; in particolare è possibile valutare quale metodo di calcolo adottare in modo da minimizzare o

massimizzare il fabbisogno energetico dell'edificio per avvicinarsi alla classe A oppure rimanere distanti da essa in relazione ai tipi di intervento previsti.

Per valutare questa possibilità sono state ipotizzate due diverse combinazioni di calcolo sia per il caso A che per il caso B, scelte in modo da massimizzare lo scostamento tra i risultati: nel primo caso i parametri in ingresso sono stati ricavati attraverso le modalità di calcolo che minimizzano il fabbisogno energetico (BEST), mentre nel secondo caso sono stati utilizzati i valori che massimizzano i consumi dell'edificio (WORST). In Tabella 1.10 sono riassunte le ipotesi di calcolo utilizzate in ciascun caso in modo da massimizzare/minimizzare gli indici di prestazione energetica.

Le configurazioni "BEST" e "WORST" sono state testate per tre diverse ipotesi di combinazione di interventi: la prima riguarda gli interventi sull'involucro opaco e trasparente, la seconda gli interventi sull'impianto e la terza la combinazione degli interventi sul sistema edificio-impianto.

	Caso A			Caso B		
	BEST	WORST	Scostamento	BEST	WORST	Scostamento
Combinazione 1						
$EP_{H,env}$	53.02	90.24	41.25%	23.22	39.12	40.64%
EP_H	101.35	161.87	37.39%	50.72	81.58	37.83%
EP_{gl}	125.46	185.92	32.52%	77.59	108.45	28.46%
Classe	D	D		D	E	
Combinazione 2						
η_A	1.023	0.93	8.80%	0.803	0.630	21.54%
EP_H	275.74	302.44	8.83%	134.63	171.60	21.54%
EP_{gl}	295.73	324.36	8.83%	163.51	220.22	18.33%
Classe	G	G		F	G	
Combinazione 3						
$EP_{H,env}$	53.02	90.24	41.25%	23.22	39.12	40.64%
η_A	0.887	0.89	0.34%	0.777	0.614	26.55%
EP_H	59.8	100.29	40.37%	29.88	63.67	53.07%
EP_{gl}	80.93	122.28	33.82%	59.42	92.27	35.60%
Classe	C	D		C	E	

Tabella 1.11 Risultati dei calcoli combinati

In Tabella 1.11 e Figura 1.11 sono riportati gli indicatori di prestazione energetica ottenuti per entrambi i casi studio e si può notare che la differenza in termini di risultati è molto rilevante: adottando opportuni metodi di calcolo permette in alcuni casi il miglioramento della classe energetica: nel caso A si passa dalla classe D alla C, mentre nel caso B lo scostamento è più evidente e si passa dalla classe E alla C.

I risultati sono molto sensibili alle metodologie di calcolo, pertanto è possibile influenzare la prestazione energetica per ottenere una classe migliore.

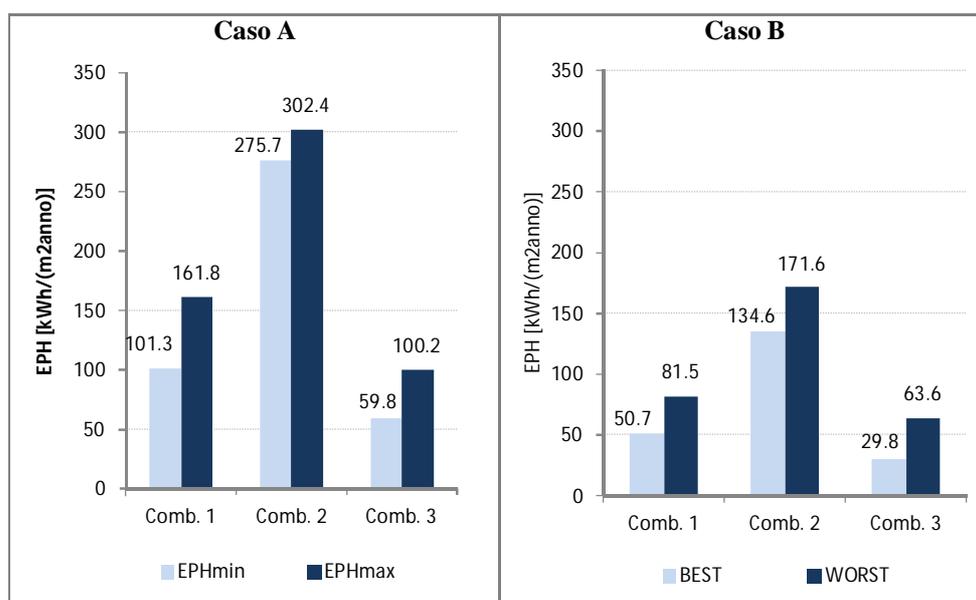


Figura 1.11. Confronto calcoli combinati: interventi sull'involucro (*comb.1*), interventi sull'impianto (*comb. 2*), interventi globali (*comb. 3*)

1.7.10 Effetti della combinazione dei parametri in relazione alla zona climatica

Per valutare l'incidenza delle condizioni climatiche in termini di scostamento ottenuto attraverso l'applicazione di differenti metodologie di calcolo sono state effettuate alcune simulazioni per località rappresentative delle

altre zone climatiche indicate in Tabella 1.2. In particolare sono stati calcolati gli indici di prestazione energetica corrispondenti alle diverse combinazioni per:

- interventi sull'involucro
- interventi sull'impianto di riscaldamento
- interventi sul sistema edificio-impianto

che costituiscono gli esempi più rappresentativi in termini di scostamento.

Città	EP _{H, env}	EP _H	EP _{gl}	Class	EP _{H, env}	EP _H	EP _{gl}	Class
	[kWh/(m ² year)]				kWh/(m ² year)]			
Combinazione 1 - RIQUALIFICAZIONE DELL'INVOLUCRO -								
	BEST				WORST			
Lampedusa	11.29	28.47	53.22	D	17.13	39.66	64.37	E
Palermo	13.89	34.06	58.69	D	22.08	49.38	73.97	E
Napoli	16.72	39.81	64.33	C	26.98	58.44	82.91	D
Roma	25.76	57.52	81.83	C	44.44	89.95	114.17	E
Milano	53.02	101.35	125.46	D	90.24	161.87	185.92	D
Bressanone	55.51	109.22	133.21	C	98.95	180.74	204.66	E
Combinazione 2 - MIGLIORAMENTO DELL'IMPIANTO TERMICO -								
	BEST				WORST			
Lampedusa	67.97	72.2	93.97	F	67.97	74.59	98.16	F
Palermo	84.86	89.42	110.91	F	84.86	92.81	116.04	F
Napoli	100.91	105.55	126.76	F	100.91	110.17	133.07	F
Roma	155.98	157.91	178.42	F	155.98	168.71	191	F
Milano	280.41	275.74	295.73	G	280.41	302.44	324.36	G
Bressanone	314.53	308.98	328.66	F	314.53	338.99	360.55	G
Combinazione 3 - RIQUALIFICAZIONE COMPLESSIVA -								
	BEST				WORST			
Lampedusa	11.29	14.25	36.47	B	17.13	21.36	45.03	C
Palermo	13.89	17.33	39.38	B	22.08	27.03	50.37	C
Napoli	16.72	20.66	42.53	B	26.98	32.64	55.65	C
Roma	25.76	30.8	52.33	B	44.44	51.64	74.04	C
Milano	53.02	59.8	80.93	C	90.24	100.29	122.28	D
Bressanone	55.51	62.8	83.75	B	98.95	109.96	131.6	C

Tabella 1.13 Risultati principali per le diverse zone climatiche - Caso A

Come mostrato in Tabella 1.13 e come evidenziato nei paragrafi precedenti, scegliendo diverse metodologie di calcolo si possono ottenere classi energetiche differenti; inoltre si può affermare che per le zone termiche caratterizzate da climi più miti l'influenza del metodo di calcolo sugli indici di prestazione energetica risulta inferiore. In particolare si può notare che gli interventi sull'involucro comportano una diminuzione delle perdite per trasmissione che per le zone climatiche caratterizzate da climi freddi costituiscono il contributo principale al fabbisogno energetico invernale. Infatti nei climi miti è maggiore l'incidenza degli apporti interni e solari, la cui valutazione non è influenzata dalla metodologia di calcolo.

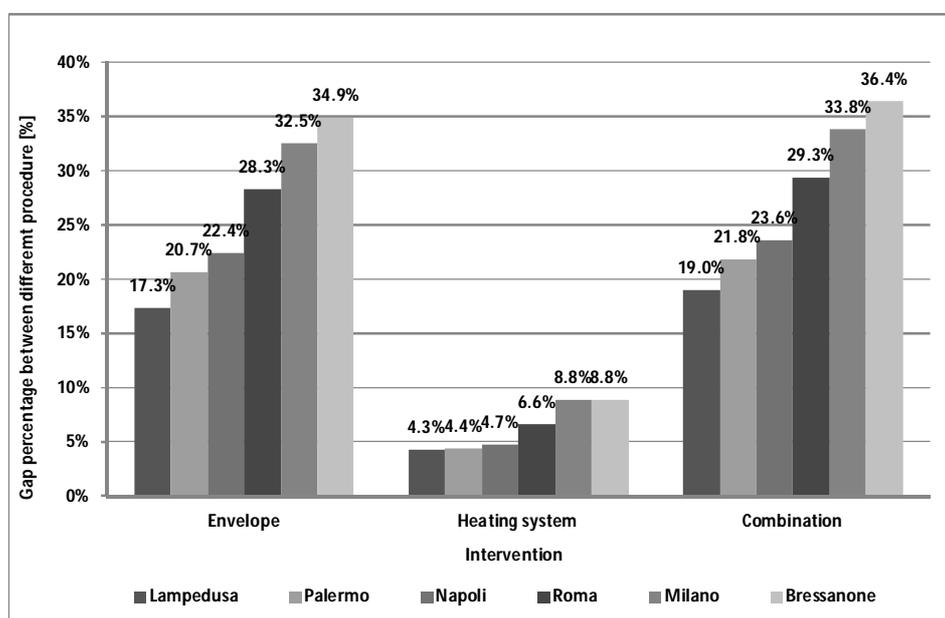


Figura 1.12. Scostamento in funzione della zona climatica

Per la combinazione 2, lo scostamento dovuto alle perdite dei sistemi di generazione, distribuzione e regolazione, comportano differenze meno significative in termini di risultati rispetto alla combinazione 1, comunque vi è una differenziazione in relazione alla zona climatica in quanto i rendimenti

dell'impianto dipendono anche da fattori di tipo climatico e relativi all'involucro che vengono considerati in maniera differente in relazione al metodo di calcolo utilizzato.

1.8 Conclusioni

Le metodologie di calcolo utilizzate per determinare gli indici di prestazione energetica sono caratterizzate da procedure dettagliate e complesse e richiedono un considerevole numero di dati di ingresso. Le norme UNI EN ISO 13790 ed EN ISO 15316 lasciano la possibilità di scegliere tra differenti tipi di calcolo da definire a livello nazionale di tipo analitico e semplificato.

Gli aspetti discussi in questa prima fase del lavoro evidenziano la complessità di applicazione delle diverse metodologie indicate dalle normative europee e italiane in relazione alla determinazione delle prestazioni energetiche degli edifici.

La valutazione di una serie di interventi tipici sul sistema edificio impianto è stata utile per evidenziare come la scelta di diverse modalità di calcolo e di stima dei parametri in ingresso possa portare a scostamenti significativi in termini di fabbisogno di energia primaria del sistema edificio impianto.

Di conseguenza, sulla base delle indicazioni della Direttiva Europea 2010/31/EU che prevede da parte la stesura da parte degli Stati Membri di linee guida per la riqualificazione energetica basate sul "*cost optimal level*" degli interventi, è necessario stabilire dei criteri di validazione dei risultati ottenuti applicando le metodologie di calcolo indicate dalle normative.

In relazione a queste considerazioni, la fase successiva del lavoro riguarda la valutazione delle condizioni al contorno e la definizione di un protocollo di calibrazione delle simulazioni, che permetta il confronto del risultato del modello con un riscontro di tipo reale e che fornisca una procedura univoca basata su criteri rigorosi per la determinazione dei parametri in ingresso dei modelli.

Capitolo 2

Considerazioni relative ai parametri in ingresso dei modelli di simulazione

2.1 Introduzione

In questo capitolo vengono illustrati alcuni aspetti relativi ai dati in ingresso dei modelli di calcolo: in particolare l'attenzione è stata rivolta alla determinazione delle proprietà termiche dell'involucro edilizio e alla valutazione dei dati climatici per la località di riferimento.

La scelta di approfondire gli aspetti legati alle caratteristiche dell'involucro è legata al fatto che, mentre per le nuove costruzioni si può ricavare la resistenza termica direttamente attraverso le proprietà dei materiali dichiarate nelle schede tecniche di prodotto, nel caso di edifici esistenti, le stratigrafie spesso non sono note e, di conseguenza, la stima della conduttanza costituisce una fase critica che merita un approfondimento particolare. Nel capitolo vengono presentati gli aspetti principali della misura in opera della conduttanza termica delle strutture secondo i metodi previsti dalla norma ISO 9869 e si confrontano i risultati di una misura sperimentale con i valori ricavati attraverso le proprietà standard dei materiali da costruzione. Un altro aspetto considerato è costituito dall'analisi dei

dataset climatici che possono essere utilizzati per effettuare calcoli sia di tipo orario sia basati sui valori medi mensili per le località di riferimento.

2.2. Valutazione della trasmittanza termica

La stima del valore della trasmittanza termica U [$W/(m^2 K)$] dell'involucro costituisce un passaggio molto importante nell'ambito della valutazione della prestazione energetica degli edifici. In particolare in caso di regime stazionario e flusso monodimensionale si può scrivere:

$$q = U (t_i - t_e) \quad (2.2.1)$$

dove t_i e t_e rappresentano rispettivamente le temperature degli ambienti interni ed esterni e q il flusso per trasmissione perpendicolare alla parete; in altre parole si può affermare che in regime stazionario ed in caso di flusso monodimensionale la trasmittanza termica sia direttamente proporzionale al flusso attraverso l'elemento e inversamente proporzionale alla differenza di temperatura.

Nel caso quindi di condizioni stazionarie per determinare la trasmittanza in opera è sufficiente misurare il flusso istantaneo passante attraverso una parete e la differenza di temperatura tra gli ambienti. In realtà questo tipo di misura si può effettuare solo in laboratorio dove si riescono a riprodurre condizioni stazionarie attraverso il metodo hot box, che consiste nel posizionamento del campione da misurare come elemento di separazione tra due ambienti, denominati camera calda e fredda, tra cui viene stabilita una differenza di temperatura maggiore di 20°C. La condizione di stazionarietà della camera calda e fredda è verificata, ai sensi della norma UNI EN 1934, se le oscillazioni di temperatura dell'aria sono contenute entro il $\pm 2\%$ della differenza tra la temperatura dell'aria in camera calda e fredda e che la massima deriva di temperatura nel periodo di misura non sia superiore all'1% della differenza di temperatura attraverso il campione. Questo tipo di verifica non è adatto alla misura della conduttanza degli elementi in opera in quanto la condizione di

stazionarietà non è facile da mantenere a causa delle variazioni di temperatura tra gli ambienti esterno ed interno e dei fenomeni di accumulo termico che caratterizzano le strutture. Di conseguenza la valutazione della trasmittanza termica di un elemento in opera risulta problematica.

L'espressione della trasmittanza secondo la norma EN ISO 6946:2008 è la seguente:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{\Lambda} + \frac{1}{h_e}} \quad (2.2.2)$$

Dove h_i e h_e [W/(m² K)] rappresentano i coefficienti liminari di scambio termico interno ed esterno e Λ [W/(m² K)] la conduttanza termica della parete. Questo parametro (Λ) può essere stimato sia utilizzando i valori dei parametri termofisici dei materiali riportati nelle norme di riferimento, sia attraverso indagini di tipo sperimentale che prevedono misure in opera. Nei paragrafi successivi verranno indicate le modalità di valutazione di conduttanza e trasmittanza termica attraverso l'utilizzo di metodi standard e sperimentali.

2.2.1 Determinazione della trasmittanza e della conduttanza termica attraverso metodi standard

Questo metodo prevede il calcolo della conduttanza a partire dalla conoscenza degli spessori s [m] e delle conduttività termiche λ [W/(m K)] dei materiali che compongono la stratigrafia dell'elemento costruttivo secondo la relazione definita nella norma EN ISO 6946:2008:

$$R = \frac{s}{\lambda} = \Lambda^{-1} \quad (2.2.3)$$

L'approccio standard può essere utilizzato nelle valutazioni di progetto, per cui sono noti spessori e materiali utilizzati nella realizzazione dell'involucro e si può fare riferimento alle schede tecniche dei prodotti da costruzione per la determinazione delle proprietà termofisiche dei materiali. Tuttavia questo

metodo può essere impiegato anche per valutazioni che riguardano edifici esistenti, purché siano note le stratigrafie degli elementi di involucro oppure sia possibile effettuare carotaggi per verificarne la composizione.

Per determinare le proprietà termofisiche dei materiali, quando non sono disponibili schede tecniche di prodotto, è possibile utilizzare i numerosi standard di riferimento indicati in Tabella 2.1.

UNI 10351:1994	Materiali da costruzione. Conduttività termica e permeabilità al vapore
UNI 10355:1994	Murature e solai. Valori della resistenza termica e metodo di calcolo
UNI EN 1745:2005	Murature e prodotti per muratura - Metodi per determinare i valori termici di progetto
Appendice A - B norma UNI TS 11300-1	Abaco delle strutture costituenti involucro opaco: stratigrafie e materiali

Tabella 2.1. Riferimenti per le proprietà termo fisiche dei materiali

I valori riportati nelle norme costituiscono il risultato di misure sperimentali effettuate in laboratorio su una serie di campioni di materiali; ad esempio la norma UNI 10351 definisce dei valori di λ_m che rappresentano il limite superiore delle conduttività misurate nelle condizioni di prova a cui bisogna applicare una maggiorazione percentuale (m) che tiene conto della presenza di umidità nei materiali in opera. Inoltre per ciascun materiale vengono forniti dei valori di riferimento differenti in relazione alla densità del campione, di conseguenza risulta difficoltoso determinare in maniera univoca la conduttività della parete qualora non siano note le densità dei materiali che la compongono. In particolare è stato verificato (*Dell'Isola et al. 2010*) che l'utilizzo del metodo standard basato sull'analisi della stratigrafia presenta un livello di incertezza che varia tra il 40 ed il 50%, superiore a quello associato alle misure attraverso il termoflussimetro, che presentano un'incertezza massima del 28%.

Per questi motivi, quando possibile, è consigliabile effettuare una verifica diretta mediante indagini sperimentali in opera che permettono di determinare in maniera realistica le caratteristiche degli elementi costruttivi.

2.2.2 Misura della conduttanza in opera: metodi di acquisizione ed elaborazione dati

La misura in opera permette di determinare la conduttanza termica di un elemento costruttivo quando non sono noti i materiali che lo compongono e quando non è possibile risalire alle stratigrafie attraverso indagini invasive come i carotaggi. Inoltre la misura diretta rappresenta uno strumento per la verifica dell'attendibilità dei valori standard calcolati attraverso i dati di progetto.

La norma ISO 9869:1994 definisce gli aspetti principali relativi all'approccio sperimentale: indica il tipo di strumentazione da impiegare, i metodi di misura e le modalità di acquisizione e post-elaborazione dei dati rilevati. In particolare l'approccio definito dalla norma, valido per elementi opachi piani caratterizzati da flusso termico perpendicolare e con flussi termici laterali trascurabili, permette di valutare sia la conduttanza termica da superficie interna a superficie esterna, sia la trasmittanza termica dell'elemento nel caso in cui le temperature degli ambienti siano definite in maniera accurata.

2.2.2.1. Caratteristiche dell'apparato strumentale

La misura in opera della conduttanza viene effettuata attraverso il posizionamento di due tipi di strumenti, un termoflussimetro posizionato sul lato caldo della parete e due sensori di temperatura, ciascuno posizionato su una superficie dell'elemento.

Il termoflussimetro è lo strumento che viene utilizzato per misurare il flusso termico attraverso gli elementi dell'involucro; è costituito da una piastra sottile di materiale caratterizzato da conduttività nota e da una termopila incorporata al suo interno che misura la differenza di temperatura tra le due facce della piastra.

Infatti quando lo strumento è attraversato da un flusso termico, il materiale plastico esercita una resistenza termica e si crea un gradiente di temperatura agli estremi della piastra; le termocoppie che costituiscono la termopila generano un impulso elettrico che è correlato alla differenza di temperatura a mezzo di un coefficiente che caratterizza uno specifico sensore (questo dato è fornito dal costruttore del fluxsimetro). A partire dalla differenza di temperatura e nota la resistenza della piastra si può ricavare il flusso che lo attraversa che,

trascurando le perturbazioni indotte dalla presenza dello strumento di misura, è uguale al flusso attraverso la parete.

Nel caso in cui la conduttanza della piastra non sia trascurabile rispetto a quella della parete è necessario introdurre dei metodi di correzione del flusso rilevato attraverso i coefficienti forniti dal costruttore del sensore.

Per determinare la temperatura superficiale interna ed esterna vengono impiegate termoresistenze, costituite da un sottile filo di un materiale conduttore, solitamente rame, platino e nichel a seconda dell'applicazione, avvolto da un materiale isolante. Il principio di funzionamento si basa sulla proprietà dei metalli di variare la resistività elettrica con la temperatura secondo leggi prestabilite. In particolare per la misura in opera di materiali da costruzione si utilizza la termo resistenza in platino PT100, caratterizzata da una resistenza a 0°C pari a 100Ω che permette di effettuare delle misure stabili ed accurate nel range 0-100°C.

Un'ulteriore possibilità di valutazione fornita dalla norma prevede l'utilizzo di sensori per il rilievo della temperatura degli ambienti interni, in modo da ricavare direttamente la trasmittanza termica della struttura.

2.2.2.2. Modalità di misura

L'apparato di misura è costituito da un termo flussimetro e da due termoresistenze; la norma ISO 9869:1994 indica che le termoresistenze devono essere collocate sulla superficie interna ed esterna della parete e che il termoflussimetro sia posizionato sul lato caratterizzato dalla temperatura più stabile, di solito in corrispondenza dell'ambiente interno, e perfettamente aderente alla superficie.

Per garantire il contatto termico diretto si può applicare un sottile film di pasta conduttiva nell'interfaccia piastra - parete.

È importante che il sensore di temperatura interna, qualora non direttamente incorporato nel termoflussimetro, sia posizionato nelle sue vicinanze, mentre il sensore esterno sia applicato sulla superficie esterna in corrispondenza del flussimetro.

Inoltre la norma indica una serie di condizioni da rispettare in fase di misura, per cui la posizione della strumentazione deve essere scelta verificando che:

- i sensori non siano soggetti all'influenza di sorgenti di calore dirette o correnti d'aria o sistemi impiantistici che modificano le condizioni al contorno;
- la superficie esterna della parete deve essere protetta dagli agenti atmosferici (pioggia, radiazione solare diretta, neve) anche attraverso l'applicazione di schermi protettivi provvisori;
- i sensori siano applicati in corrispondenza di un punto rappresentativo delle caratteristiche dell'intero elemento costruttivo;
- non vi siano disomogeneità nè ponti termici che causerebbero una perturbazione del flusso causando errori nella misura.

Per verificare il corretto posizionamento della strumentazione la norma suggerisce di effettuare un'indagine termografica preliminare.

La durata e l'intervallo di acquisizione dipendono da:

- caratteristiche dell'elemento costruttivo (presenza di isolamento, densità);
- andamento delle temperature interne ed esterne;
- metodo usato per la post-elaborazione dati raccolti.

La norma precisa che comunque la misura deve essere effettuata in continuo ad intervalli regolari da determinare secondo il metodo di post-elaborazione dati (0.5-1 h per il metodo medie progressive, intervalli più brevi per il metodo dinamico).

In generale la misura deve avere una durata minima di 72 ore, tuttavia nel caso la temperatura in corrispondenza del termoflussimetro abbia un andamento variabile nel tempo, deve essere prolungata per un periodo anche superiore ai 7 giorni, finchè non si ottengono dei risultati stabili.

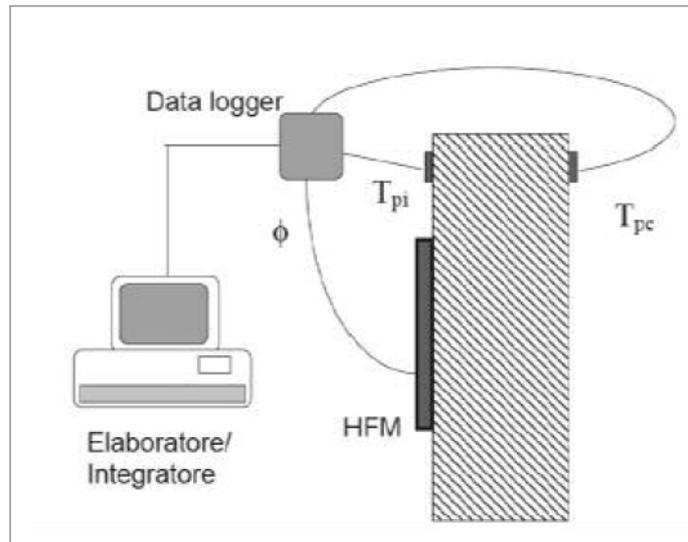


Figura 2.1. Schema del posizionamento della strumentazione per la misura in opera (ISO 9869:1994)

2.2.2.3. Post-elaborazione dei dati rilevati

La norma ISO 9869:1994 fornisce due diversi metodi per l'analisi dei dati rilevati in opera:

- il metodo delle medie progressive;
- metodo dinamico.

Il metodo delle medie progressive consiste nel valutare la conduttanza (o la trasmittanza) termica dell'elemento mediante il rapporto del flusso termico specifico medio attraverso la parete e la differenza di temperatura media tra le superfici; l'equazione deve essere applicata ad ogni intervallo di misura, considerando le medie dei valori misurati fino all'istante precedente:

$$\Lambda = \frac{\sum_{j=1}^n q_j}{\sum_{j=1}^n (\theta_{si,j} - \theta_{se,j})} \quad (2.2.4)$$

- q_j : flusso all'istante j
- $(\theta_{si,j} - \theta_{se,j})$ differenza di temperatura all'istante j

In questo modo il valore della conduttanza misurata converge a un valore asintotico, che può essere considerato rappresentativo del valore reale nel caso in cui, per tutta la durata della misura:

- non ci sia radiazione solare diretta incidente sul termoflussimetro
- la distribuzione della temperatura ed il contenuto di umidità siano costanti
- la conduttanza termica dell'elemento sia costante.

Inoltre per le pareti leggere caratterizzate da capacità termica areica inferiore a $20 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \text{ K})$ si raccomanda che l'analisi venga effettuata soltanto sui dati raccolti nelle ore notturne (a partire da un'ora dopo il tramonto e fino a un'ora prima dell'alba) per evitare gli effetti della radiazione solare. Per questo tipo di pareti la misura si può ritenere conclusa quando i valori di conduttanza rilevati nell'arco di tre notti successive non si discostino più del $\pm 5\%$.

Per le pareti con capacità termica areica superiore a $20 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \text{ K})$ la misura deve essere effettuata per periodi multipli di 24 ore e può essere conclusa se si verificano le seguenti condizioni:

- la durata totale superi le 72 ore;
- il valore della resistenza R finale non si discosti più del $\pm 5\%$ dal valore ottenuto 24 ore prima;
- il valore della resistenza R dei primi $2/3$ dell'intervallo di misura non si discosti più del $\pm 5\%$ del valore rilevato nell'ultima parte del monitoraggio.

Il metodo dinamico è invece riportato nell'Appendice B della norma; questo approccio risulta più complesso, ma garantisce risultati più attendibili per misure più brevi specialmente se si verificano variazioni significative della temperatura e del flusso termico nell'arco del monitoraggio. Inoltre può essere utilizzato in alternativa alla correzione dei risultati (punto 7.2 della norma) se l'accumulo termico è superiore al 5% del valore del flusso attraverso la parete durante tutto il periodo di prova.

Per calcolare la conduttanza Λ attraverso il metodo dinamico deve essere risolto un sistema di n equazioni, dove n rappresenta il numero di acquisizioni dati.

Per un intervallo di misura t_i il flusso termico q_i si calcola come:

$$q_i = \Lambda(\theta_i - \theta_e) + K_1 \dot{\theta}_{i,t} - K_2 \dot{\theta}_{e,t} + \sum_g P_g \sum_{j=i-p}^{i-1} \theta_{i,j} (1 - \beta_g) \beta_g^{i-j} + \sum_g Q_g \sum_{j=i-p}^{i-1} \theta_{e,j} (1 - \beta_g) \beta_g^{i-j} \quad (2.2.5)$$

Dove K_1 , K_2 , P_g e Q_g sono delle caratteristiche dinamiche dell'elemento costruttivo che dipendono dalla costante di tempo τ_g e le variabili β_g sono funzioni esponenziali della costante di tempo:

$$\beta_g = \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau_g}\right) \quad (2.2.6)$$

La derivata della temperatura superficiale è data dalla relazione:

$$\dot{\theta}_{i,t} = \frac{\theta_{i,i} - \theta_{i,i-1}}{\Delta t} \quad (2.2.7)$$

Analogamente si può ricavare anche $\dot{\theta}_{e,t}$

L'equazione (2.2.5) è una funzione delle $2g+3$ incognite, dove g rappresenta il numero delle costanti di tempo. Di conseguenza sono necessari almeno $2g+3$ misure per risolvere il sistema di equazioni lineari. Generalmente, per eliminare le variazioni stocastiche si risolve un sistema di M equazioni, che presenta più equazioni che incognite, attraverso il metodo dei minimi quadrati.

L'accuratezza dei risultati ottenuti attraverso questo metodo dipende dalla quantità di dati analizzati (N), dal numero (g) e dal rapporto (r) delle costanti di tempo e dalla dimensione (M) del sistema.

2.2.3 Esempio di valutazione della conduttanza in opera

Durante il periodo 2 marzo 2012 - 25 maggio 2012 è stata eseguita la misura della conduttanza in opera di una parete esterna della Manifattura Tabacchi di Rovereto, per cui in seguito (Capitolo 4) verranno riportati i risultati dell'analisi del comportamento energetico attraverso simulazioni in regime transitorio.

Le analisi sono state condotte sulla Parete Nord-Ovest di un ambiente al terzo livello fuori terra e la conduttanza è stata valutata attraverso tre metodi differenti:

- *analisi standard*: ipotesi stratigrafia (Tabella 2.2) e calcolo attraverso norma EN ISO 6946
- *analisi standard*: ipotesi stratigrafia (Tabella 2.2) e calcolo attraverso norma EN ISO 1745
- *rilievo in opera*: post-elaborazione con il metodo delle medie progressive (ISO 9869);
- *rilievo in opera*: post-elaborazione con il metodo dinamico (Appendice B ISO 9869).

Strato	Spessore s [cm]	Materiale
1	2	Intonaco
2	61	Materiale composito (mattoni e sassi)
3	2	Intonaco

Tabella 2.2 Stratigrafia della parete

In Tabella 2.2 sono indicati gli strati che compongono la parete analizzata e i relativi spessori.

2.2.3.1 Rilievo in opera

La fase di posizionamento degli strumenti di misura deve essere effettuata con particolare attenzione secondo quanto indicato nel Paragrafo 2.2.2.2; in questo caso, per appurare l'assenza di ponti termici o disomogeneità in corrispondenza del punto di applicazione del flussimetro e della termoresistenza è stata effettuata una verifica termografica (Figura 2.2).

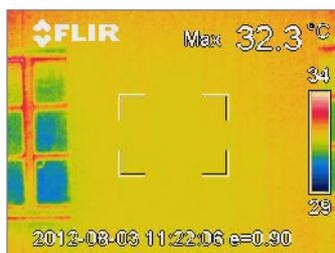


Figura 2.2 Immagine termografica dell'involucro interno

Per l'edificio analizzato, considerata l'assenza di impianto di riscaldamento, non è possibile definire con sicurezza quale sia la superficie caratterizzata dalle temperature più stabili.



Figura 2.3 Posizionamento sensori **a)** lato interno **b)** lato esterno

Di conseguenza, in aggiunta alla strumentazione indicata nella norma ISO 9869 che prevede un flussimetro interno e due termoresistenze per la misura di temperatura della superficie interna ed esterna, è stato installato un flussimetro, opportunamente schermato, anche sulla parete esterna (Figura 2.3a-b).

In Figura 2.4 sono riportati gli andamenti delle temperature superficiali interne ed esterne: si noti che le temperature interne sono più stabili e di conseguenza è preferibile adottare per la post elaborazione con cui si definisce la conduttanza, i risultati forniti dal flussimetro interno.

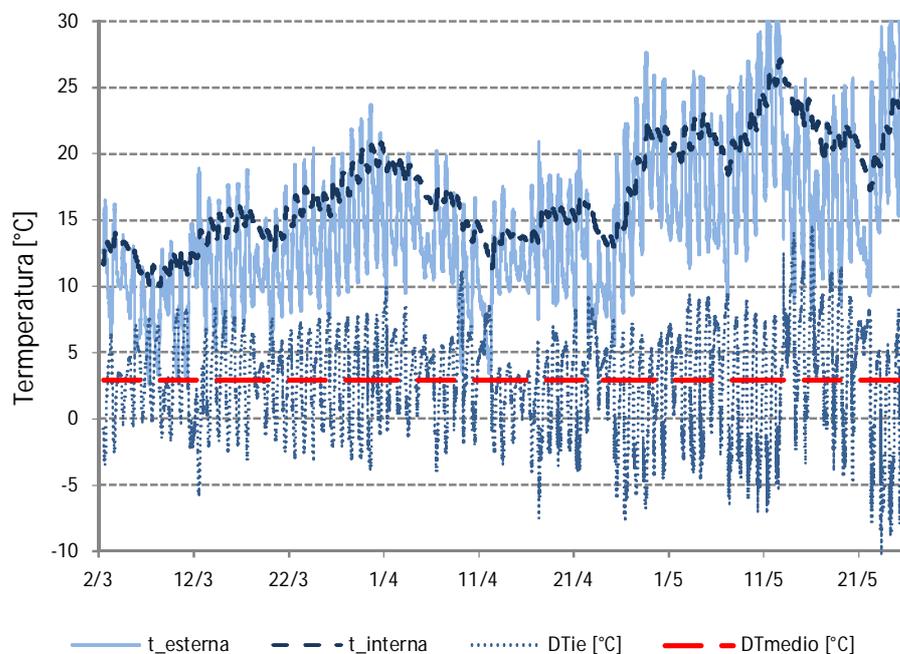


Figura 2.4. Temperature rilevate

Inoltre in Figura 2.4 si riportano anche le differenze di temperatura istantanea e mediata su tutto il periodo: si osservi come, a causa del clima che caratterizza la stagione intermedia in cui si sono svolti i monitoraggi ed alla mancanza di impianto di climatizzazione interna, non vi sia un Δt interno-esterno molto elevato (il valore medio di Δt è pari a 3.2°C). Per questo motivo è necessario effettuare un monitoraggio prolungato rispetto a quanto indicato nella norma, in modo da ottenere un valore di conduttanza stabile e rappresentativo.

In Figura 2.5 sono riportati gli andamenti delle temperature in relazione al flusso termico misurato dal flussimetro interno per tutto il periodo di monitoraggio: i flussi uscenti sono considerati positivi, mentre quelli entranti sono negativi.

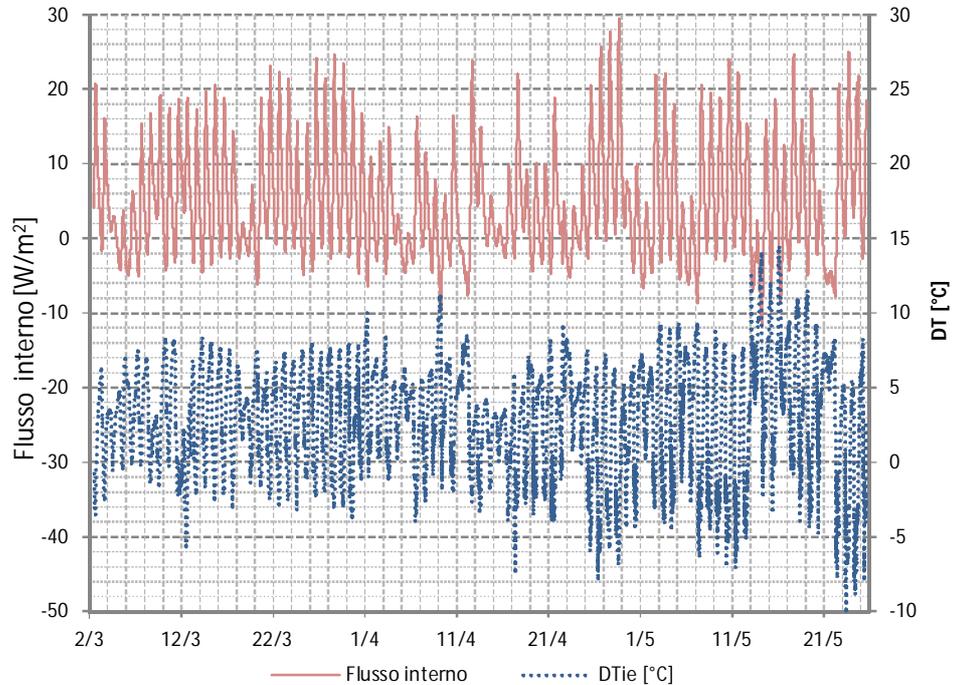


Figura 2.5. Flusso termico in relazione alle temperature

2.2.3.2 Post elaborazione dati

Le prime elaborazioni dati sono state effettuate attraverso l'impiego del metodo delle medie progressive, che risulta correttamente applicato in quanto i risultati relativi al flusso misurato dal flussimetro interno, soddisfano i tre criteri che determinano la completezza delle misure:

- durata del monitoraggio > 72ore;
- $\Lambda_{\text{END}} - \Lambda_{24 \text{ ore}} < 5\% \Lambda_{\text{END}}$;

- $\Lambda_{\text{END}} - \Lambda_{2/3} < 5\% \Lambda_{\text{END}}$; dove
 - Λ_{END} : valore finale della conduttanza
 - $\Lambda_{2/3}$: valore della conduttanza sulla base dell'elaborazione dati a 2/3 del monitoraggio
 - $\Lambda_{24 \text{ ore}}$: valore della conduttanza sulla base dell'elaborazione dati fino a 24 ore prima della fine del monitoraggio

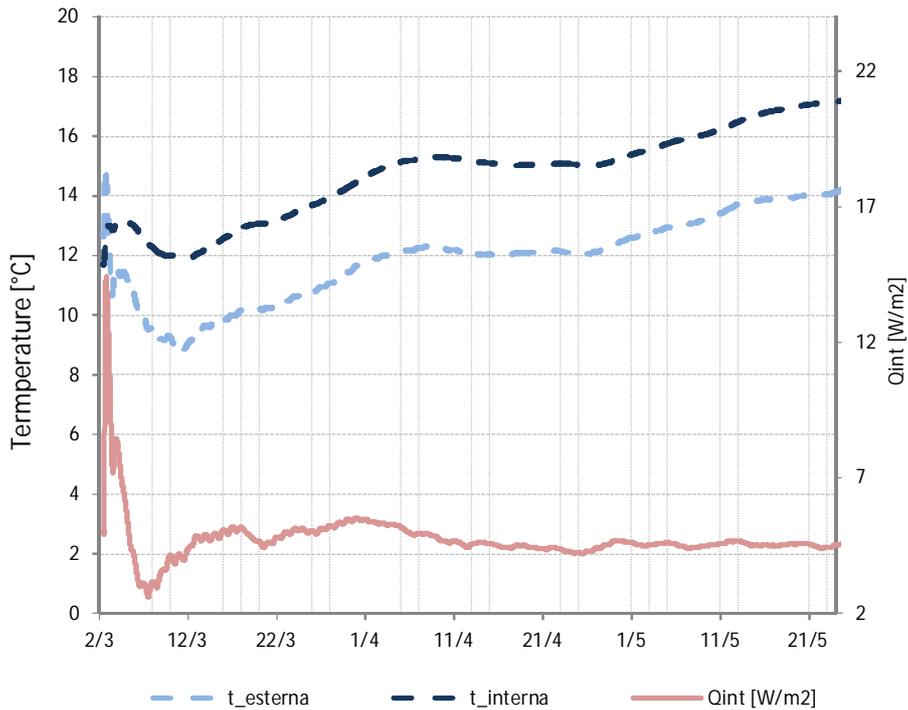


Figura 2.6. Andamento t_e , t_i , q secondo le medie progressive

In Figura 2.6 sono riportati gli andamenti medi progressivi della temperatura esterna, interna e del flusso uscente; si osservi come, alla fine del periodo di misura, il flusso misurato dal flussimetro interno e le temperature si stabilizzino e presentano valori che si possono considerare costanti. Di conseguenza le condizioni di misura possono essere ritenute mediamente stazionarie e si può

ricavare il corrispondente valore della conduttanza che converge a $1.55 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ (Figura 2.7)

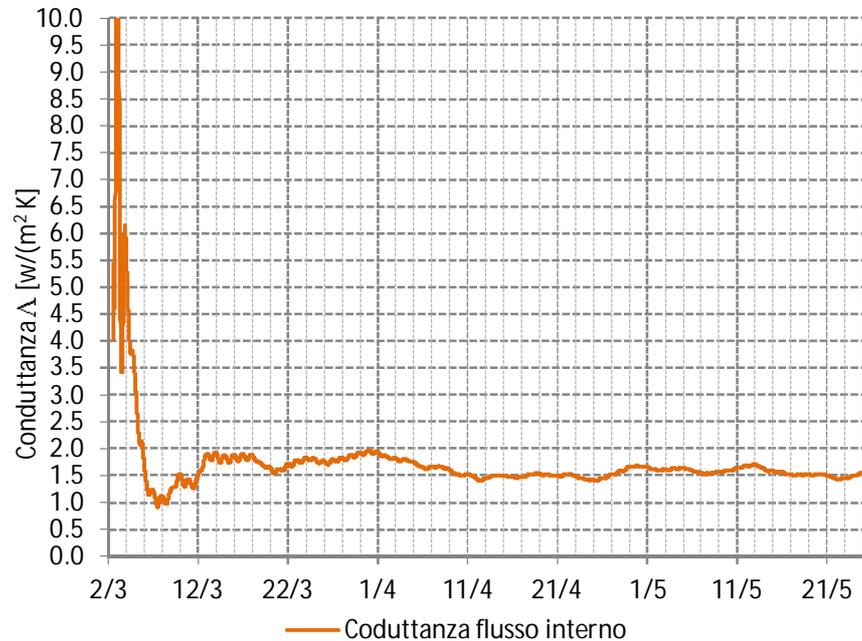


Figura 2.7. Conduttanza ricavata attraverso il metodo delle medie progressive

La seconda modalità di post elaborazione di dati misurati in opera è costituita dal metodo dinamico in Appendice B della norma ISO 9869, che garantisce risultati attendibili anche nel caso in cui non vi siano elevate differenze di temperatura tra interno ed esterno. Il valore di conduttanza che si trova in questo modo è di $0.93 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$.

L'approccio standard è invece stato applicato sulla base della stratigrafia definita in Tabella 2.2; in particolare sono state analizzate le conduttività dei materiali contenuti nella norma UNI 10351 e nella norma UNI EN 1745.

In particolare nella norma UNI EN 1745 sono riportati una serie di valori di conduttività in relazione alla densità della parete: nel caso in esame la densità non è nota, per cui per completezza di analisi si riportano i valori di:

- conduttanza media;
- conduttanza massima;
- conduttanza minima;

calcolati per la parete di riferimento. (Tabella 2.2).

In Tabella 2.3 vengono riportati i risultati ottenuti attraverso le analisi con le conduttività standard dei materiali secondo la stratigrafia ipotizzata.

Tipo di valutazione	Conduttanza [W/(m² K)]
Standard - UNI 10351	1.372
Standard UNI EN 1745 (min)	1.062
Standard UNI EN 1745 (max)	2.228
Standard UNI EN 1745 (medio)	1.607

Tabella 2.3. Conduttanza ricavata attraverso analisi standard

La Figura 2.8 mostra i risultati dell'analisi attraverso i metodi standard e sperimentali; si osservi come il valore ricavato dalla norma UNI 10351, il valore medio ricavato attraverso la UNI 1745 ed il valore sperimentale dedotto attraverso le misure in opera e rielaborato con il metodo delle medie progressive si presentino uno scostamento massimo del 14%, mentre invece risultano più significative le differenze riscontrate con i risultati del metodo dinamico e gli altri metodi standard.

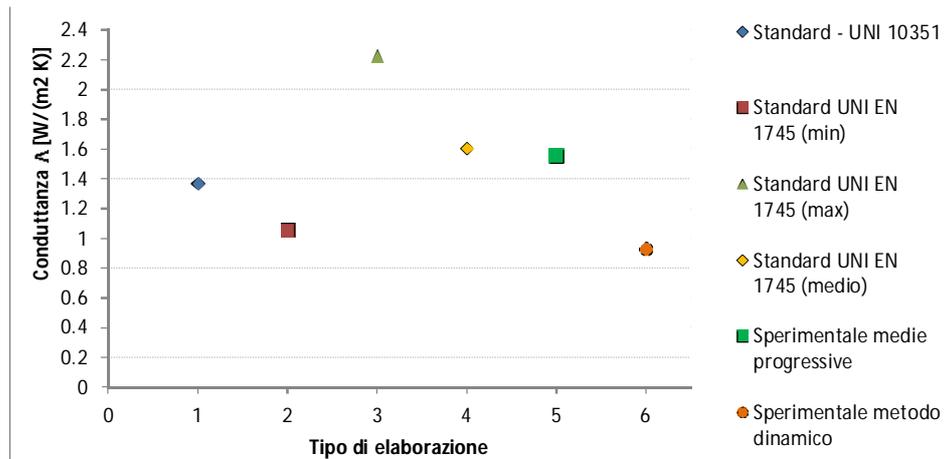


Figura 2.8. Confronto valori di conduttanza

2.3 Considerazioni sui dati climatici

La disponibilità di dati meteo in grado di rappresentare in maniera accurata le condizioni micro climatiche del contesto in cui l'edificio è inserito, che può influenzare in maniera molto significativa il comportamento energetico degli edifici, di conseguenza è necessario verificare l'attendibilità della fonte in relazione alla categoria dei dati climatici a disposizione:

- *dati di tipo standard* → relativi ad una località di riferimento di cui siano disponibili i dati di un periodo sufficientemente lungo per elaborare un *data set* rappresentativo,
- *dati di tipo reale* → rilevati in una posizione specifica, in adiacenza all'edificio analizzato, in un intervallo di tempo corrispondente al periodo di monitoraggio dei dati per la calibrazione.

L'utilizzo di dati climatici reali relativi al periodo di calibrazione e raccolti attraverso monitoraggi in situ costituisce la soluzione migliore in fase di costruzione del modello. Tuttavia il monitoraggio in situ dei parametri climatici può essere molto oneroso, soprattutto in termini di tempo e per questo motivo, in alternativa, è possibile utilizzare i dati che si possono reperire dalle stazioni

meteo presenti sul territorio: queste forniscono valori medi giornalieri o orari e, in alcuni casi, la misura ogni 15'. Inoltre le stazioni meteo sono piuttosto diffuse e costituiscono una fonte generalmente accurata anche perché ad ogni misura è associata un'informazione sul livello di attendibilità. È necessario comunque verificare la rispondenza della misura della stazione meteo con il dato che caratterizza il contesto in cui è inserito l'edificio, in quanto i parametri climatici sono soggetti ad un'elevata variabilità in relazione alla posizione delle centraline. Infatti, soprattutto nelle zone con caratteristiche orografiche particolari come, ad esempio rilievi montuosi o corsi d'acqua, i dati possono discostarsi in maniera significativa anche nel raggio di brevi distanze.

I dati standard sono invece definiti attraverso elaborazioni di valori pluriennali di località di riferimento, generalmente i capoluoghi di provincia. L'impiego delle fonti standard non è consigliabile in fase di calibrazione in quanto può introdurre errori nel modello: la scelta migliore è l'utilizzo di dati corrispondenti al periodo di raccolta del parametro di controllo (temperature interne o consumi).

Un ulteriore aspetto riguarda la coerenza delle misure necessarie per la definizione di modelli di simulazione:

- Temperatura dell'aria [°C]
- Umidità relativa dell'aria [%]
- Radiazione solare incidente sulla superficie orizzontale [W/m²]
- Velocità del vento [m/s]

I dati meteo devono provenire dalla medesima stazione e non possono essere integrati valori mancanti con misure ricavate da una centralina diversa; infatti, sulla base di analisi riportate in letteratura (*Guan, 2007; Bhandari and Shrestha, 2012*), sono state osservate correlazioni significative tra le variabili climatiche (Figura 2.9). Ad esempio la variazione oraria della radiazione solare e la temperatura di bulbo asciutto sono correlate, mentre quest'ultima influenza notevolmente l'umidità relativa: generalmente, quando si verifica un aumento della radiazione solare la temperatura aumenta, mentre l'umidità relativa diminuisce.

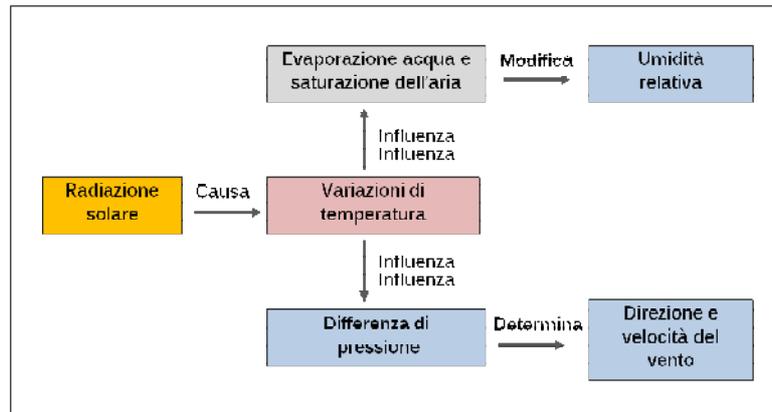


Fig. 2.9. Correlazione tra variabili climatiche (Guan, 2007)

Per questo motivo i parametri meteo devono provenire dalla medesima fonte: infatti nel caso in cui si decida di adottare l'umidità relativa rilevata da una stazione meteo e le temperature registrate da un'altra, viene meno la correlazione tra le variabili, con conseguente perdita di attendibilità del dataset.

2.3.1 Fonti da cui reperire *dataset* climatici

In Italia la prima analisi sistematica che ha previsto la raccolta dei dati climatici e l'elaborazione di un *dataset* di riferimento per le analisi energetiche degli edifici è stata condotta nel 1979 dall'Istituto di Fisica dell'Atmosfera del CNR (Mazzarella, 1979). I dati di riferimento sono stati ricavati dalle stazioni del servizio meteorologico dell'Aeronautica Militare posizionate in corrispondenza di 68 aeroporti distribuiti sul territorio italiano; i valori sono stati acquisiti nell'arco del periodo 1951 -1979 ad intervalli di tre ore, da cui sono stati dedotti i dati orari attraverso interpolazione. L'anno tipo è stato costruito sulla base della temperatura dell'aria: sono state calcolate, per ogni stazione, la media e la varianza della temperatura dell'aria per tutti i mesi dell'intera popolazione. Successivamente, per ogni mese di ogni singolo anno, sono stati calcolati i valori medi e della varianza; attraverso il confronto con i valori complessivi sono stati scelti i mesi più rappresentativi dell'intera

popolazione di dati, cioè quelli caratterizzati dai valori di media e varianza più prossimi a quelli calcolati per l'intero *dataset*, ed è stato definito l'anno tipo come composizione dei mesi tipo. Infine, una volta identificati gli anni di riferimento per ogni stazione sulla base delle temperature, i *dataset* sono stati integrati con i valori delle altre grandezze meteorologiche (umidità relativa, radiazione solare e velocità del vento), relativi ai mesi tipo precedentemente determinati.

Un altro riferimento è la norma UNI 10349:1994 che, per ciascun capoluogo di provincia fornisce:

- Temperature:
 - valori medi mensili della temperatura media giornaliera dell'aria esterna,
 - distribuzione giornaliera della temperatura estiva per un giorno di riferimento sulla base della temperatura e della variazione massima della temperatura
- Irradianza:
 - valore medio mensile della componente diretta e diffusa della radiazione solare media giornaliera sul piano orizzontale,
 - irradiazione globale su superfici verticali in relazione all'orientamento,
 - distribuzione giornaliera dell'irradianza solare estiva massima, angolo di altezza solare e di azimuth massimo estivo, irradianza trasmessa attraverso un vetro semplice verticale in base alla latitudine di riferimento
- Pressione parziale del vapore nell'aria:
 - valore medio mensile della media giornaliera delle pressioni
- Velocità del vento:
 - valore della media giornaliera valido per tutto l'anno.

I dati della norma UNI 10349:1994 sono il risultato di elaborazioni effettuate sulla base di serie decennali raccolte prima degli anni '90, per cui i valori di

riferimento possono risultare poco rappresentativi delle attuali condizioni climatiche; tuttavia è importante sottolineare che la norma è in fase di aggiornamento e i nuovi valori medi mensili verranno calcolati su serie temporali meno vetuste.

Un terzo riferimento basato su dati più recenti, è costituito dai *Test Reference Year (T.R.Y.)* elaborati dal C.T.I. (Comitato Termotecnico Italiano); questi “anni tipo” sono il risultato di elaborazioni di set di rilevazioni orarie di:

- temperatura dell'aria
- umidità relativa
- radiazione solare
- velocità del vento

ricavate dalla medesima stazione meteo, scelta come riferimento per il capoluogo di Provincia sulla base della completezza dei dataset disponibili. Le rilevazioni sono relative ad un periodo di almeno dieci anni e sono state elaborate secondo il metodo previsto dalla UNI EN ISO 15927-4 che permette di definire un *Test Reference Year* di dati orari di riferimento (*Baggio et al. 2010*). Nel paragrafo successivo verranno esplicitati i passaggi per la definizione dell'anno medio tipo secondo la norma UNI EN ISO 15927-4.

2.3.2 Calcolo dell'anno medio tipo

La definizione di un T.R.Y mediante l'applicazione della UNI 15927 permette di ottenere un dataset climatico che riporti i valori realmente misurati in corrispondenza del capoluogo di riferimento, e non i risultati ricavati attraverso un modello statistico che potrebbero non essere altrettanto rappresentativi. L'anno medio tipo viene elaborato a partire da serie temporali almeno decennali, da cui vengono scelti i vari mesi tipo sulla base delle distribuzioni di frequenza cumulate delle medie giornaliere di temperatura, umidità e radiazione solare. In questo modo vengono mantenuti gli andamenti orari caratteristici della località di interesse, i valori medi relativi alle variabili e le interrelazioni tra i parametri climatici che possono influenzare il comportamento energetico degli edifici.

Le fasi in cui si articola la definizione del T.R.Y. sono descritte nei paragrafi successivi.

2.3.2.1. Interpolazione dati mancanti

Le stazioni meteo forniscono generalmente un'indicazione relativa alla qualità del dato ed effettuano rilievi completi; tuttavia può succedere che, per problemi legati alla strumentazione, si verifichino malfunzionamenti con conseguente perdita di dati. Nel caso in cui la percentuale di dati mancanti sia inferiore al 20% per ogni mese e comunque sia possibile ricostruire il reale andamento dei parametri climatici nel tempo, si può ricorrere all'interpolazione per dedurre i valori mancanti. A seconda del numero di dati da integrare si possono effettuare interpolazioni di tipo lineare o ciclico: nel caso in cui i valori mancanti successivi siano meno di 6 si possono semplicemente interpolare i valori precedenti alla serie da integrare con i dati successivi (Figura 2.10 a), nel caso in cui occorra ricostruire l'andamento relativo ad un intervallo più consistente, è necessario riferirsi all'andamento giornaliero delle variabili, considerando la giornata precedente e successiva alla serie mancante mediante un'interpolazione ciclica (Figura 2.10 b).

In generale l'interpolazione si effettua secondo la relazione:

$$x(t) = x_a + (x_b - x_a) \left(\frac{t - t_a}{t_b - t_a} \right) \quad (2.3.1)$$

Dove x è la variabile da ricavare, t rappresenta l'ora di riferimento e i pedici a e b indicano rispettivamente il valore noto precedente e successivo alla serie mancante; nel caso di interpolazione ciclica si effettua il calcolo considerando come dati precedenti e successivi i valori relativi alle 24 ore precedenti e successive.

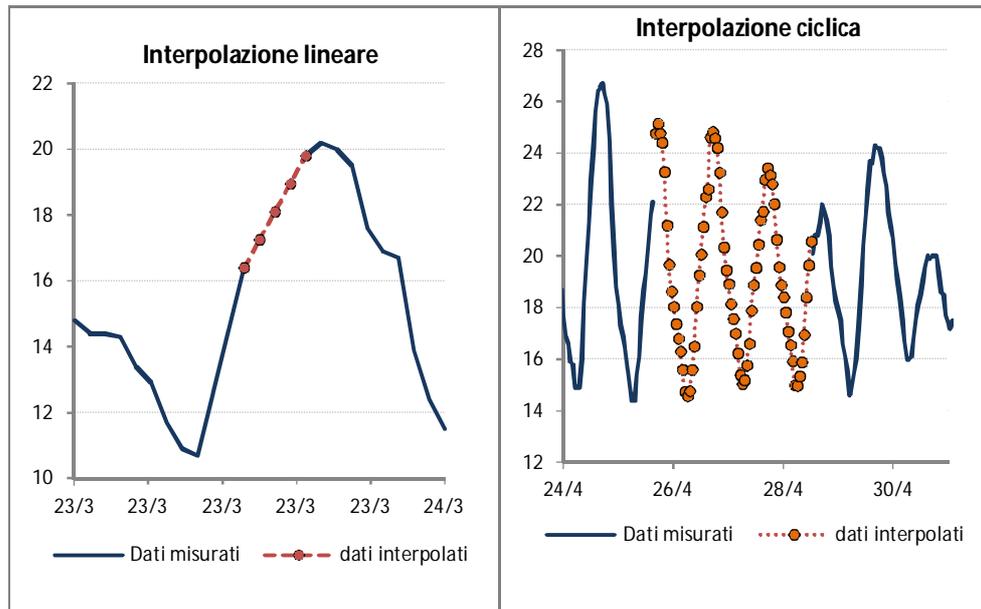


Figura 2.10 a) Interpolazione lineare b) Interpolazione ciclica

2.3.2.2. Scelta dei mesi tipo

I mesi caratteristici vengono scelti sulla base di considerazioni di carattere statistico relative alle medie giornaliere di tre parametri principali: temperatura, radiazione solare, umidità relativa, mentre la velocità del vento influenza la definizione del mese tipo ma come parametro secondario.

La prima operazione da effettuare consiste nel calcolo di una prima curva di distribuzione cumulata empirica, determinata sulla base delle medie giornaliere; in particolare si considerano, per un mese di riferimento, le medie giornaliere relative a tutti gli anni che compongono il dataset, si dispongono in ordine crescente e vi si attribuisce una posizione. A questo punto si determina la funzione Φ che dipende dal parametro analizzato, dal mese e dal valore i -esimo che si considera:

$$\Phi(p,m,i) = \frac{K(i)}{N+1} \quad (2.3.2)$$

Dove K rappresenta la posizione in graduatoria, N il numero di giorni totali di riferimento (in relazione al numero di anni analizzati e al mese). A questo punto i dati devono essere riordinati attribuendo a tutti i giorni del mese di riferimento per ciascun anno la funzione Φ che lo caratterizza.

Successivamente deve essere calcolata una seconda cumulata per il mese di riferimento sulla base dei valori misurati per ogni anno. Si dispongono i dati in ordine crescente e vi si attribuisce una posizione che permette il calcolo della funzione F che dipende dal parametro analizzato, dall'anno e da mese di riferimento e dall' i -esimo valore che si considera:

$$F(p,y,m,i) = \frac{J(i)}{n+1} \quad (2.3.3)$$

Dove n è il numero di giorni del mese e J la posizione attribuita al dato.

A questo punto occorre confrontare le due distribuzioni cumulate mediante la statistica di Finkelstein-Schafer, che consiste nel calcolare la somma degli scarti tra le due funzioni valutate per ogni dato medio giornaliero:

$$FS(p,y,m) = \sum_{i=1}^n |F(p,y,m,i) - \Phi(p,m,i)| \quad (2.3.4)$$

Per ogni mese vengono scelti i tre anni di riferimento caratterizzati dal valore dello scarto FS più ridotto, da cui viene selezionato il mese per l'anno caratteristico in relazione ad un criterio basato sulla velocità del vento; in particolare si sceglie il mese caratterizzato dal valore di velocità medio mensile che meglio approssima la velocità media per il mese di riferimento calcolata per tutto il dataset.

L'ultima operazione per completare la definizione dell'anno tipo è di raffinare i raccordi tra i mesi; infatti può capitare che non ci sia coerenza tra gli ultimi valori del mese precedente e i primi del mese successivo. Per questi motivi la norma indica di eliminare gli ultimi 8 valori orari del mese precedente e i primi 8 del mese successivo (compresi dicembre e gennaio), e di effettuare un'interpolazione tra gli estremi. Tuttavia questa operazione non è sempre necessaria: infatti, nel caso della radiazione solare, la transizione tra i mesi

avviene nelle ore notturne in cui assume valore zero e non ha bisogno di interpolazioni; anche per la velocità del vento, considerata l'elevata variabilità del parametro, non è necessario correggere i raccordi.

2.3.3 Analisi di *dataset* climatici

Si riportano di seguito alcune analisi relative a dati climatici utilizzati per la costruzione di modelli per il calcolo in regime *semistazionario* (dati medi mensili) ed in regime *dinamico* (dati medi orari). In particolare sono stati confrontati i valori ricavati dalle centraline meteo presenti sul territorio di due località di riferimento (Pavia e Rovereto) con i dati standard riportati nella norma 10349 ed i valori contenuti nei T.R.Y. (*Test Reference Year*) elaborati dal Comitato Termo-tecnico Italiano (C.T.I.). Gli anni tipo sono stati definiti sulla base di rilevazioni orarie di un periodo decennale secondo il metodo previsto dalla ISO 15927-4: 2005 *Hygrothermal performance of buildings - Calculation and presentation of climatic data - Part 4: Hourly data for assessing the annual energy use for heating and cooling* per ciascun capoluogo di provincia.

Dati per simulazioni in regime semistazionario

I modelli semi-stazionari sono basati sul bilancio termico mensile e vengono costruiti secondo le indicazioni contenute nella norma UNI EN 13790:2008 recepita in Italia attraverso le norme tecniche UNI TS 11300:2008.

A titolo di esempio si riportano i dati rilevati nell'anno 2011 i per la città di Pavia da tre centraline meteo e dai dati standard disponibili per la città:

- **Stazione 1:** contesto urbano - centralina ARPA Lombardia di via Folperti (Pavia)
- **Stazione 2:** contesto semi-urbano - centralina ARPA Lombardia SS.35 (Pavia)
- **Stazione 3:** contesto urbano - monitoraggio anno 2011
- **T.R.Y. (Test Reference Year):** elaborazione basata sulle medie mensili dell'anno medio tipo costruito con dati climatici della centralina ARPA Lombardia presso Castello d'Agogna (PV)

- **10349:1994**: norma tecnica di riferimento - dati medi mensili

In Figura 2.11 sono riportate le stazioni meteo della città; la centralina da cui sono stati dedotti i dati per il calcolo del *T.R.Y.* non appartiene al comune di Pavia ma è posizionata nel comune di Castello d'Agogna a qualche decina di chilometri dal centro cittadino: questo set di dati climatici è stato scelto per la costruzione del *T.R.Y.* a causa della mancanza di valori completi ed attendibili per un periodo almeno decennale da stazioni meteo più vicine alla città di Pavia.



Fig. 2.11 - Posizione delle stazioni meteo - città di Pavia

In Figura 2.12 sono riportate le temperature medie mensili reali e standard per la città di Pavia: i valori standard tendono generalmente a sottostimare l'andamento delle temperature reali misurate nell'anno 2011. Inoltre l'andamento dei dati misurati nel centro storico si discosta in maniera significativa anche dai dati rilevati dalle altre stazioni meteo della città: questo è dovuto al differente contesto che caratterizza le diverse centraline: le stazioni 1 e 2 sono in un contesto rispettivamente a bassa densità e sub-urbano, di

conseguenza tendono ad essere poco rappresentative delle condizioni rilevate nel centro cittadino. Quindi, nel caso in cui si debba definire il comportamento energetico di un edificio in centro città, è opportuno valutare la rispondenza dei dati meteo disponibili con le reali condizioni climatiche che caratterizzano il contesto in cui è inserito l'edificio.

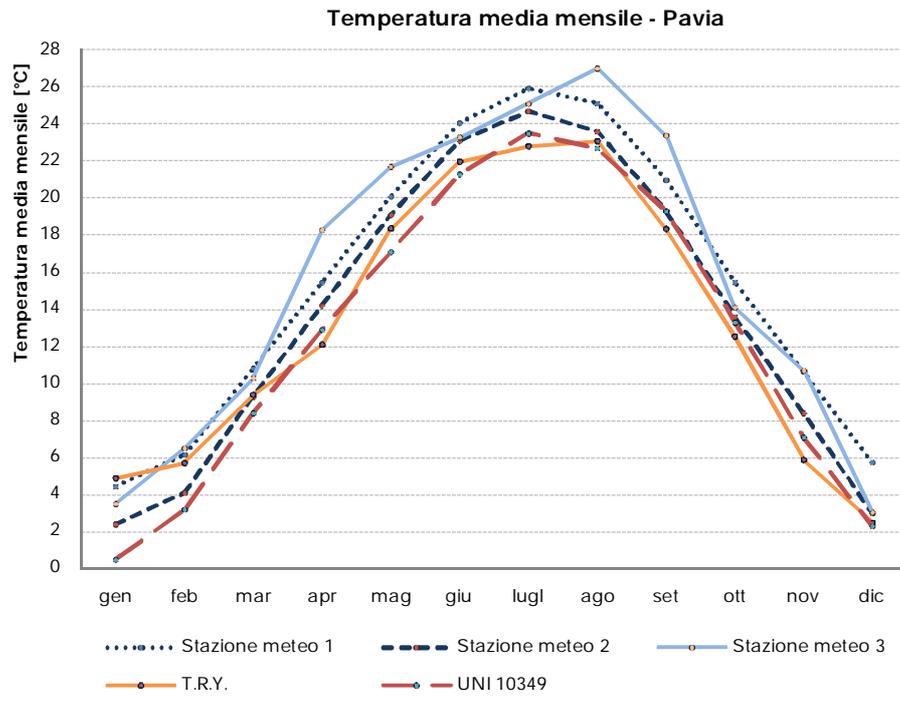


Fig.2.12 - Andamento delle temperature medie mensili - Città di Pavia

Dati per simulazioni in regime dinamico

Le simulazioni condotte in regime dinamico necessitano di data set caratterizzati da un'acquisizione delle variabili climatiche di tipo orario. Esistono diversi data-set di tipo standard, tuttavia non sempre sono rappresentativi delle reali caratteristiche climatiche del luogo, perché poco aggiornati.

I *T.R.Y.* risolvono il problema dell'aggiornamento dei dati e rappresentano un riferimento utile per la costruzione dei modelli, anche se non ideale in fase di calibrazione; infatti, come anticipato in precedenza, la soluzione ottimale è quella di raccogliere i dati meteo attraverso monitoraggi contemporanei al periodo della calibrazione.

Anche nel caso dei dati orari le centraline meteo presenti sul territorio rappresentano una fonte attendibile da cui dedurre i dati. Tuttavia, visto che i modelli dinamici sono finalizzati alla simulazione dettagliata del comportamento energetico dell'edificio, è necessario che i dati utilizzati siano coerenti con l'andamento orario dei parametri reali. In particolare è importante prestare attenzione nel caso delle zone con caratteristiche orografiche specifiche come le aree caratterizzate dalla presenza di rilievi montuosi o corsi d'acqua: a titolo di esempio si riportano i dati rilevati da due centraline meteo nel comune di Rovereto (TN) le cui coordinate sono riportate in Tabella 2 e Figura 2.13.

Tabella 2.4 - Posizione stazioni meteo

Set di dati	Comune	Coordinate stazione meteo	h s.l.m.	Tipo dati
I.A.S.M.A.	Rovereto	45° 52' 53.59" N 11° 01' 02.42" E	204	reali
Meteo Trentino	Rovereto	45° 53' 47.17" N 11° 2' 37.6" E	204	reali



Figura 2.13 - Stazioni meteo città di Rovereto

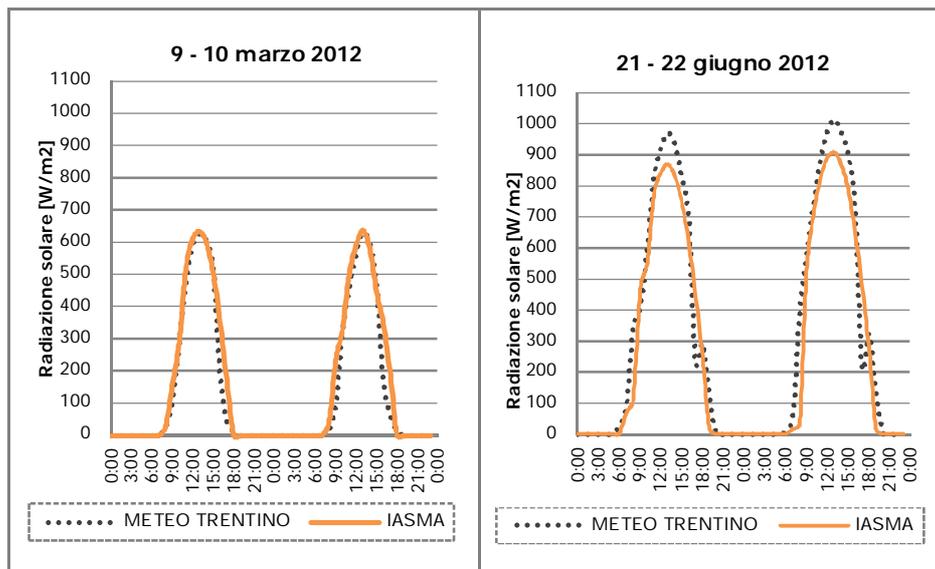


Figura - 2.14 a) Andamento della radiazione solare per le due stazioni meteo della città di Rovereto

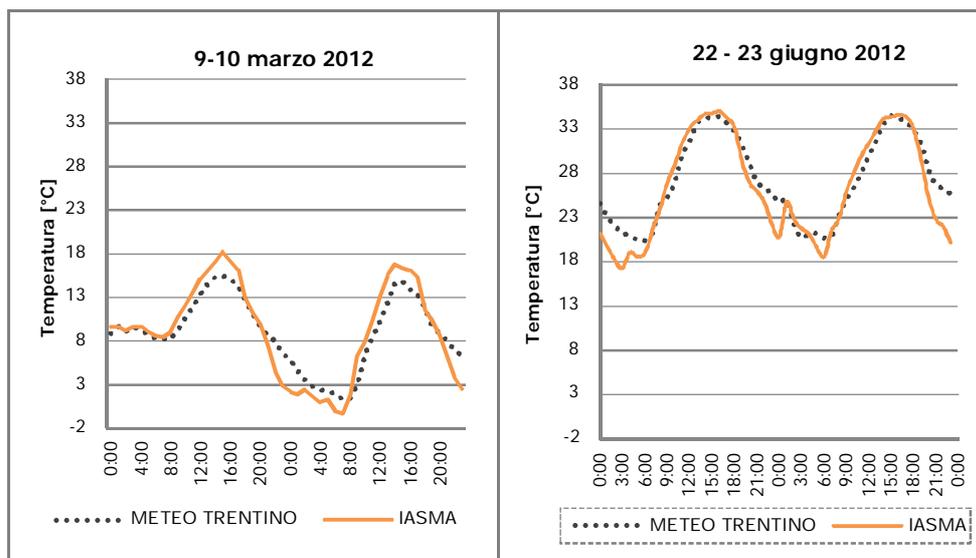


Figura - 2.15 b) Andamento della temperatura esterna per le due stazioni meteo della città di Rovereto

In Figura 2.14 e 2.15 sono riportati gli andamenti della radiazione solare e delle temperature per due giorni di riferimento: una giornata caratteristica per il regime invernale ed una giornata-tipo per il regime estivo. Nel primo caso i due profili sono sostanzialmente sovrapponibili, invece in regime estivo si verificano scostamenti più significativi. Ciò è dovuto alla posizione delle due centraline che si trovano dalla parte opposta della vallata ed in particolare la stazione meteo dello IASMA si trova in prossimità del fiume Adige.

Un altro fattore a cui prestare attenzione in fase di raccolta dati è la modalità di calcolo delle medie orarie da parte delle centraline climatiche di riferimento: solitamente le stazioni meteo misurano infatti i dati con intervalli pari a 15 minuti, per cui il valore relativo alla media oraria è il risultato dell'elaborazione di 4 valori ogni ora, che possono essere stimati con il metodo della media tutta avanti, secondo cui il valore orario è determinato sulla base dei dati registrati nell'arco dell'ora precedente, oppure della media tutta indietro, per cui vengono utilizzati i valori dell'ora successiva (Tabella 2.5).

Media tutta indietro		Media tutta avanti	
Ora misura	Ora valore medio	Ora misura	Ora valore medio
06:00	→ 06:00	06:15	→ 07:00
06:15			
06:30			
06:45			
		07:00	

Tabella 2.5 - Metodi di calcolo delle medie orarie

Per verificare l'effetto dell'applicazione delle due modalità di calcolo è stato selezionato un *data set* campione per cui erano disponibili i dati climatici rilevati con un intervallo di 15 minuti e sono state calcolate le medie orarie per i diversi parametri climatici. Nei grafici in Figura 2.16-2.17 si evidenzia come l'applicazione dei due metodi porti sostanzialmente ad uno sfasamento di un'ora per temperatura, umidità relativa e radiazione solare, mentre invece i profili di velocità del vento presentano uno scostamento più significativo anche in termini di andamento.

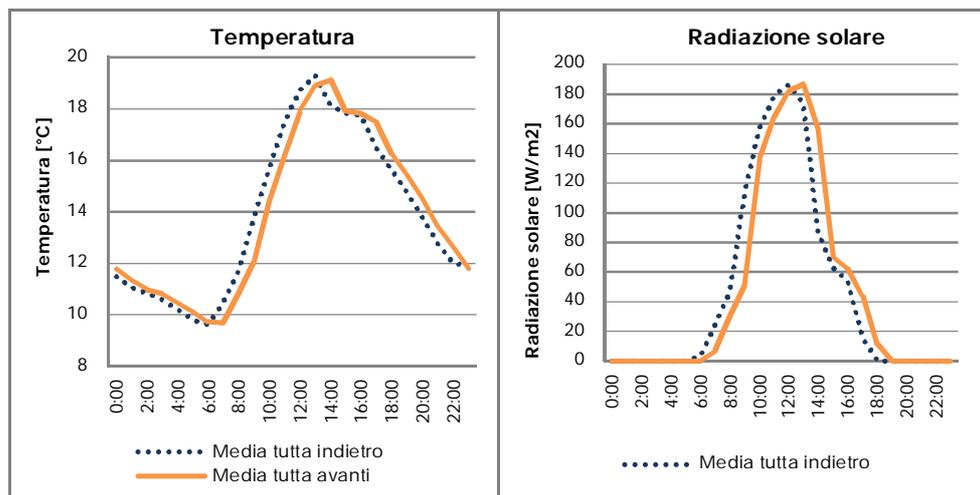


Figura 2.16 - Temperatura e radiazione solare - media tutta avanti/tutta indietro

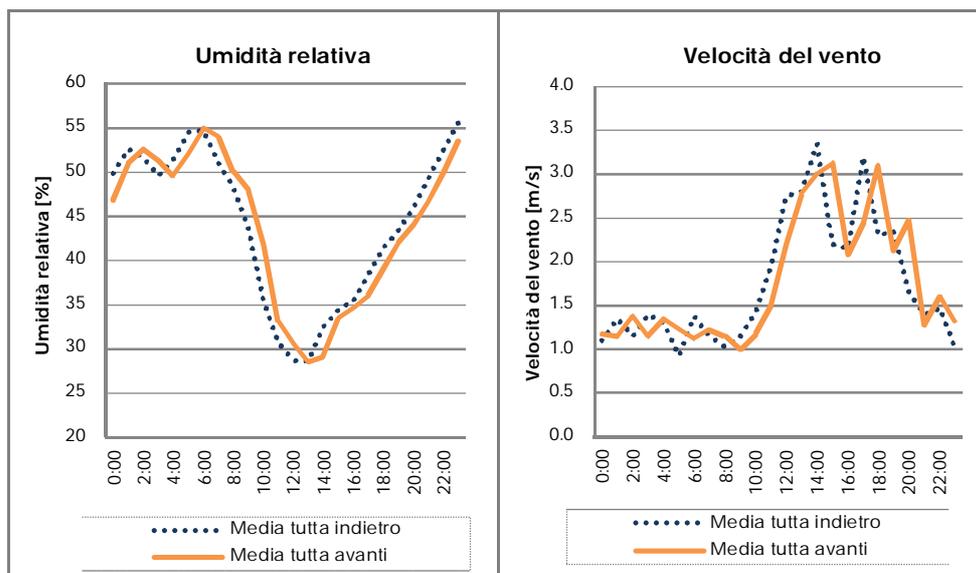


Figura 2.17 - Umidità relativa e velocità del vento - media tutta avanti/tutta indietro

Le considerazioni precedenti sono relative a dati reali misurati dalle stazioni meteo presenti nel comune di Rovereto per cui non sono disponibili dati standard, ma il *T.R.Y.* è stato costruito sulla base delle condizioni climatiche della città di Trento. Mettendo a confronto i profili delle temperature medie giornaliere delle due stazioni meteo di Rovereto e del *T.R.Y.* emergono differenze significative tra dato standard e valori reali. Infatti, mentre i valori reali sono relativi all'anno 2011 e quindi caratteristici delle condizioni climatiche contingenti, il *T.R.Y.* è rappresentativo di un anno medio, inoltre la centralina relativa al *T.R.Y.* si trova nella città di Trento: la presenza di rilievi comporta un'elevata variabilità del dato climatico, per cui non si possono ritenere i valori di Trento adatti alla calibrazione di una simulazione del comportamento energetico di un edificio nel comune di Rovereto.

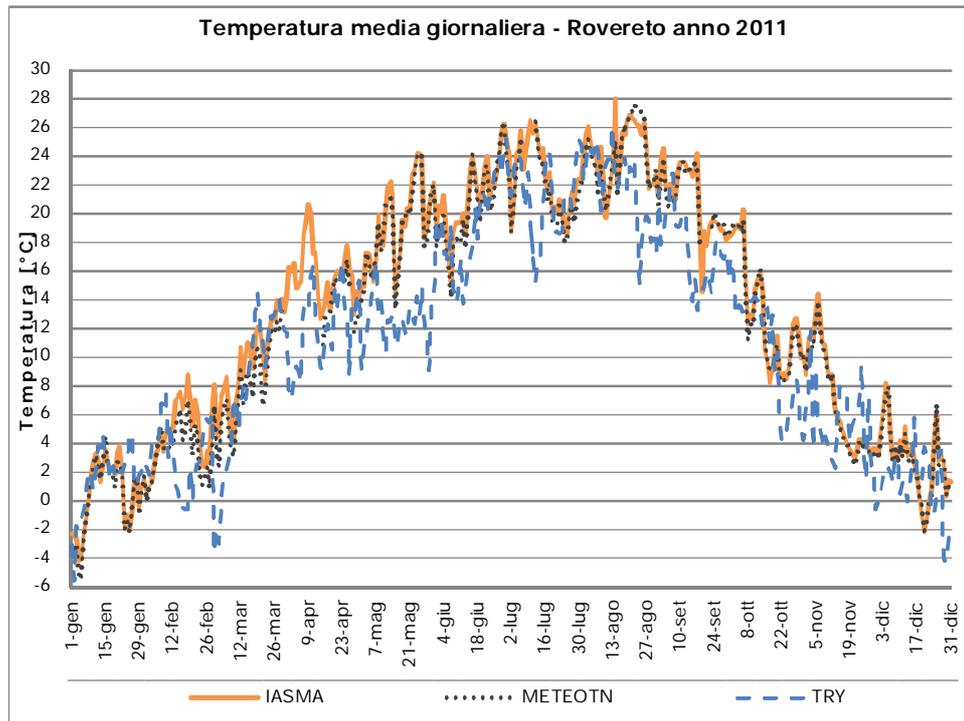


Figura 2.18 - Temperatura media giornaliera - Rovereto

2.4 Conclusioni

Le analisi condotte in questa parte del lavoro hanno permesso di evidenziare i *range* di variazione a cui possono essere soggetti i dati in ingresso dei modelli.

In particolare le valutazioni hanno riguardato la determinazione delle proprietà termofisiche dell'involucro e la raccolta di dati meteo rappresentativi per la definizione di modelli di simulazione del comportamento energetico degli edifici.

Considerando il fatto che le normative tecniche non indicano un riferimento univoco per la scelta del dato più attendibile, è importante stabilire dei criteri di

validazione sia per i dati in ingresso sia per i risultati ottenuti attraverso le simulazioni.

Per questo motivo la fase successiva del lavoro sarà dedicata alla definizione di un protocollo di calibrazione dei modelli che stabilisca standard di acquisizione dati e criteri di rappresentatività dei modelli.

Capitolo 3

Metodi di calibrazione dei modelli di simulazione

3.1 Introduzione

Le simulazioni energetiche costituiscono uno strumento di valutazione molto importante in quanto, se correttamente definite, permettono di rappresentare in maniera efficace il comportamento reale di un edificio. I modelli di simulazione sono utilizzati soprattutto in fase di pianificazione per verificare in via preliminare le prestazioni e ottimizzare l'efficienza energetica di un progetto. Nel corso degli ultimi anni, in relazione all'esigenza di riqualificazione energetica del costruito, è cresciuta l'importanza delle simulazioni di costruzioni esistenti, che vengono applicate per la valutazione del potenziale di risparmio energetico e dell'efficacia delle misure di contenimento dei consumi.

Tuttavia la definizione di un modello accurato, che sia in grado di simulare in maniera corretta il comportamento energetico di un edificio, risulta spesso problematica a causa dell'ingente numero di parametri coinvolti nel calcolo: la difficoltà di definire con esattezza tutti i dati di input, che caratterizzano il sistema edificio-impianto ed il suo utilizzo, costituisce un limite nell'applicazione della simulazione energetica in quanto può causare

l'introduzione di errori significativi nella definizione del modello, con conseguente diminuzione dell'attendibilità dei risultati.

Il processo di calibrazione, grazie al confronto dei risultati delle simulazioni con parametri che caratterizzano il reale comportamento del sistema edificio-impianto, rappresenta una soluzione efficace per la corretta definizione del modello; in questo modo è possibile verificare l'attendibilità dei calcoli sulla base di dati reali ricavati attraverso monitoraggi in situ e/o mediante l'analisi dei consumi energetici.

Questo capitolo è dedicato all'analisi degli aspetti relativi alla calibrazione dei modelli di edifici esistenti: a partire dalle indicazioni contenute nei protocolli standard ed alle applicazioni riscontrate in letteratura è stata definita una procedura organica di raccolta, implementazione dati ed analisi dei risultati.

3.2 Considerazioni preliminari

I consumi energetici degli edifici rappresentano una percentuale considerevole dell'energia totale impiegata sia a livello nazionale (35% secondo il Rapporto Annuale Efficienza Energetica 2011), sia a livello comunitario (40% secondo quanto indicato nella Direttiva Europea 2020/31/EU).

Il settore civile costituisce un comparto molto energivoro a causa della scarsa efficienza generale delle costruzioni esistenti, spesso progettate senza attenzione all'ottimizzazione energetica, ma anche in relazione alle condizioni di esercizio adottate in fase di gestione dell'impianto; infatti, anche in caso di sistemi energeticamente efficienti, la mancanza di un regime di funzionamento ottimale può portare a consumi energetici elevati (*Perez et al. 2008*).

In quest'ottica l'intervento sugli edifici esistenti, come indicato nella Direttiva Europea 2010/31/EU, assume importanza strategica. Per essere in grado di valutare il potenziale di risparmio energetico che caratterizza le costruzioni esistenti, è necessario ottenere dei risultati rappresentativi del reale comportamento energetico degli edifici. Tuttavia, come evidenziato nei capitoli precedenti, i risultati dei modelli possono essere soggetti a un'elevata variabilità in relazione al metodo di calcolo utilizzato per determinare i parametri di input

delle simulazioni. Inoltre la raccolta dati può essere difficoltosa e affetta da incertezze, specialmente se le valutazioni riguardano edifici esistenti (*De Wit and Augenbroe, 2002; Domínguez et al. 2010*).

Per risolvere questo problema sono stati introdotti dei riferimenti standard che riportano protocolli di calibrazione delle simulazioni, e indicano i criteri e le metodologie per la definizione di un modello attendibile:

- *ASHRAE Guidelines 14/2002 “Measure of energy and demand savings”*;
- *Measurement and Verification - M&V Guidelines 2008*;
- *International Performance Measurement and Verification Protocol - IPMVP 2012*.

Questi documenti indicano i principi generali per la calibrazione dei modelli e i criteri per valutare le tolleranze e gli scostamenti ritenuti accettabili tra le simulazioni e le prestazioni reali; tuttavia non sono ancora stati resi operativi dei protocolli rigorosi per la determinazione dei dati di input dei modelli e non ci sono indicazioni specifiche sulle modalità di monitoraggio e valutazione dei parametri di controllo. Un futuro riferimento verrà dal progetto di norma europea in via di definizione (*Thermal insulation - Construction products, building elements and structures - In situ measurement of thermal performance - Part 4 Testing of Structures*) per la determinazione delle prestazioni termiche degli elementi strutturali: questo documento fornirà indicazioni sulla strumentazione da utilizzare, sulle modalità di calibrazione dei sensori e di analisi dei parametri monitorati.

In letteratura si trovano diversi articoli che forniscono le indicazioni necessarie per rendere operativi i protocolli proposti nelle Linee Guida precedenti, attraverso l'utilizzo dei consumi dell'edificio.

In particolare *Pan et al. 2009* basano la calibrazione sull'andamento storico dei consumi ricavati dalle bollette, mentre *Yoon et al 2009* analizzano il comportamento di un edificio per uffici in Corea sulla base di una analisi integrata di consumi effettivi e misurati. Gli esempi in letteratura di monitoraggi orari a lungo termine non sono molti in quanto, pur rappresentando il riferimento più efficace per la calibrazione, il rilievo puntuale dei consumi

effettivi è molto oneroso sia in termini economici sia in termini di tempo. Questo tipo di misura può essere effettuato quando nell'edificio vengono integrati dei sistemi di monitoraggio dettagliato per l'ottimizzazione energetica, come nel caso di un edificio per uffici analizzato da *Raftery et al. 2011*.

Generalmente gli studi sono basati su monitoraggi mensili dei consumi effettivi (*Reddy, 2006*) talvolta completati da misure a breve termine più dettagliate effettuate su base giornaliera (*Yoon et al. 2003*) e oraria (*Soebarto 1997, Pedrini et al. 2002*).

Liu and Liu 2012 evidenziano come, attraverso un monitoraggio orario dei consumi effettivi di un edificio per uffici della durata di due settimane, si riescano a ridurre in maniera significativa gli indici relativi all'errore tra simulazione e comportamento reale.

Un altro approccio è quello introdotto da *Tian and Love, 2009* che utilizzano per la calibrazione le temperature interne di un ambiente per verificare l'effetto di un sistema a pannelli radianti. Questo metodo può rappresentare una valida alternativa al monitoraggio dei consumi effettivi, tuttavia è necessario scegliere con particolare attenzione l'ambiente di controllo: i parametri climatici interni possono essere affetti da fattori difficilmente controllabili, come gli apporti dovuti alle apparecchiature elettriche ed alla presenza degli occupanti (*Norford et al. 1994*). Questi fattori comportano una maggiore attenzione durante la fase di posizionamento della strumentazione per l'acquisizione dei dati, per evitare di introdurre errori nella definizione del modello.

Nell'ambito di questo lavoro si valutano gli aspetti principali della calibrazione dei modelli sia in caso di utilizzo dei consumi reali sia delle temperature interne dell'ambiente di controllo, per cui definiscono modalità di raccolta e i criteri di calibrazione. Nei capitoli successivi verranno presentati i risultati delle analisi relative a due casi studio per cui sono stati effettuati monitoraggi a lungo termine delle temperature interne.

3.3 Il protocollo di calibrazione

La calibrazione è un processo iterativo che consiste nell'elaborare una serie di simulazioni di calcolo con lo scopo di minimizzare lo scostamento tra risultati derivanti dal modello e i dati misurati impiegati come parametro di controllo. Per garantire oggettività e riproducibilità e ridurre i fattori di incertezza dei modelli è necessario stabilire delle procedure di riferimento che stabiliscano le operazioni da effettuare ed i criteri di valutazione delle caratteristiche del sistema edificio-impianto.

Il protocollo proposto è stato pensato per l'applicazione a edifici esistenti in relazione all'esigenza di pianificazione di interventi di riqualificazione energetica e prevede una serie di fasi operative indicate in Figura 3.1:

- operazioni preliminari;
- raccolta dati (monitoraggio dati di input del modello, misure dei parametri di controllo per la calibrazione)
- definizione del modello iniziale;
- definizione dei criteri di validazione dei modelli;
- definizione del modello calibrato (verifica dell'attendibilità del modello calibrato);
- valutazione del potenziale di risparmio energetico;
- proposta di interventi migliorativi.

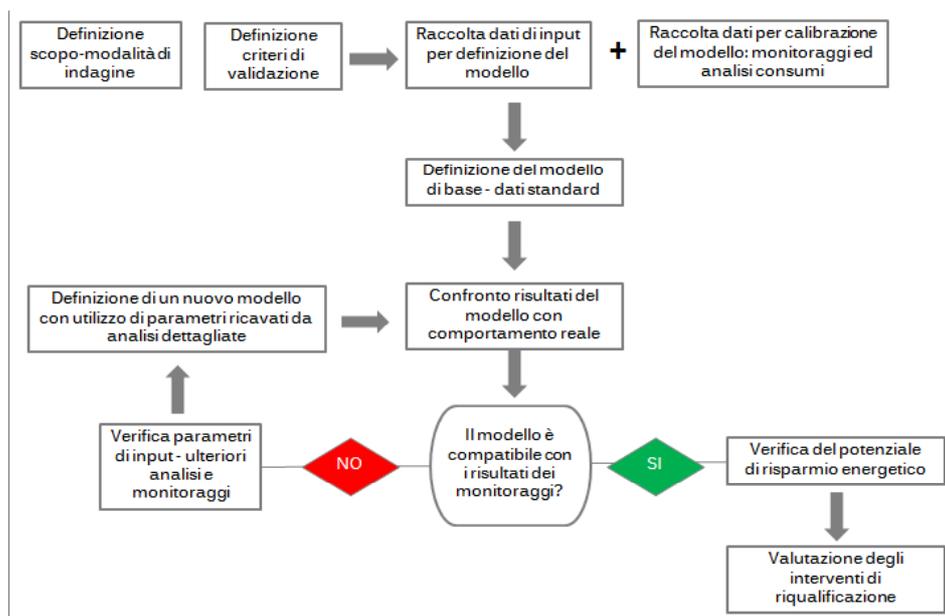


Figura 3.1. Schema del processo di calibrazione

Nei paragrafi successivi si analizzano gli aspetti principali che caratterizzano le fasi del processo di calibrazione e si forniscono una serie di considerazioni relative alle fasi di raccolta dati e di interpretazione dei risultati.

3.3.1 Operazioni preliminari

Il primo passaggio per elaborare un modello è definirne scopo e ambito di applicazione; in questo manuale vengono fornite delle linee guida per la costruzione di modelli di edifici esistenti, finalizzati alla pianificazione di interventi di riqualificazione del sistema edificio - impianto.

Inoltre in fase preliminare è necessario verificare se sono presenti in situ dispositivi per la misurazione dei consumi di combustibile dell'impianto, oppure se è possibile installarli per monitoraggi a breve e lungo termine; nel caso in cui non sia possibile una misura diretta, i fabbisogni energetici reali degli edifici possono essere dedotti, anche se in maniera meno precisa,

attraverso i consumi fatturati periodicamente dalle società di fornitura di combustibile (metano, pellets o gasolio, ecc...). Se non fossero disponibili fonti attendibili per la verifica dei consumi di combustibile, come ad esempio nel caso di costruzioni prive di impianto termico oppure nel caso di contratti di fornitura calore per cui non sia consentita la verifica dei reali consumi dell'edificio, si può adottare come parametro di calibrazione la temperatura degli ambienti interni. Il modello viene definito e calibrato sulla base dell'andamento della temperatura di uno o più ambienti di controllo per cui sono stati monitorati i parametri interni; si possono anche utilizzare le temperature superficiali dell'involucro edilizio rilevate in situ attraverso opportuni dispositivi secondo le modalità indicate nel Capitolo 4.

3.3.2 Raccolta dati

La fase di raccolta dati rappresenta il punto principale per la definizione di un modello di simulazione in quanto l'attendibilità dei risultati è direttamente collegata all'accuratezza del rilievo. Questa fase riguarda due categorie di parametri: i dati per definire il modello e i valori di controllo per la calibrazione. Per quanto riguarda gli input della simulazione è necessario raccogliere:

- *dati relativi all'edificio*: geometria dell'involucro, proprietà termigrometriche dei materiali da costruzione;
- *parametri dell'impianto*: tipologie e caratteristiche tecniche dei sottosistemi impiantistici, *schedule* di funzionamento;
- *condizioni di esercizio*: apporti interni dovuti alla presenza di apparecchiature, illuminazione ed occupanti, profili di occupazione degli ambienti.
- *parametri climatici*: condizioni meteorologiche di riferimento.

Per quanto riguarda i dati per la calibrazione nel Paragrafo 2.5 verranno fornite indicazioni per una corretta acquisizione dei parametri, sia nel caso del rilievo dei consumi reali sia nel caso della misura delle temperature all'interno dell'edificio.

3.3.3 Definizione del modello iniziale

Il processo di calibrazione avviene per approssimazioni successive, pertanto occorre definire un modello di base da raffinare progressivamente. In particolare la simulazione iniziale è definita attraverso le caratteristiche geometriche ricavate dal progetto o dal rilievo diretto dell'edificio *as build* invece, per gli altri parametri di input si adottano valori di tipo standard dedotti da normative ed abachi di riferimento. La simulazione iniziale costituisce un punto di partenza per individuare gli aspetti che possono essere approfonditi nelle successive simulazioni.

3.3.4 Criteri di validazione del modello

Lo scopo della procedura di calibrazione è la ricerca della soluzione in grado di minimizzare lo scostamento tra risultati della simulazione e dati reali. Per valutare l'affidabilità di un modello, si definiscono dei requisiti di calibrazione e degli indici statistici per la stima dell'errore in base ai quali si decide se un modello è correttamente calibrato o meno. Se una simulazione non raggiunge dei valori accettabili in termini di errore è necessario aggiornare il modello sulla base di informazioni più dettagliate.

La scelta degli indici da adottare è legata ai parametri che si utilizzano per la calibrazione; infatti nel caso delle temperature degli ambienti è importante verificare anche la correttezza dell'andamento nell'arco della giornata, mentre se vengono impiegati i consumi di combustibile l'introduzione di indici legati ai valori medi mensili permette di attribuire il giusto peso all'errore. Nel Paragrafo 2.7 verranno indicati i principali indici di valutazione dell'errore e gli scostamenti ammissibili tra risultati del modello e monitoraggi.

3.3.5 Definizione del modello calibrato

I risultati del modello di base precedentemente definito vengono confrontati con i parametri di controllo ricavati dai monitoraggi e vengono calcolati gli indici di riferimento: se l'errore rientra in un intervallo di tolleranza ritenuto accettabile secondo i criteri di validazione adottati, allora il modello è calibrato,

altrimenti occorrono ulteriori indagini per reperire dati di input più attendibili. La valutazione dell'errore deve essere effettuata attraverso grafici, diagrammi, identificazione degli scostamenti giornalieri o mensili, analisi delle variabili per identificare gli aspetti da rivedere nel modello. Le modifiche devono essere effettuate in maniera rigorosa in base a criteri legati alla gerarchia delle fonti (Raftery *et al.* 2011) definita nel Paragrafo 2.4: è opportuno aggiornare il modello modificando un parametro solo se si dispone di una fonte di livello superiore rispetto a quella da cui era stato ricavato il dato precedentemente inserito. In questo modo viene seguito un criterio standardizzato per la determinazione accurata dei parametri di input; questo aspetto è molto importante in quanto permette di razionalizzare la fase di aggiornamento dei modelli e garantisce la riproducibilità delle simulazioni.

3.3.6 Valutazione del risparmio conseguibile e proposta di interventi

Quando il modello è correttamente calibrato e fornisce risultati attendibili è possibile passare alla fase di valutazione del potenziale di risparmio energetico che caratterizza l'edificio. Devono essere individuati gli aspetti che possono essere migliorati sia in termini di gestione dell'impianto sia in termini di prestazione energetica globale in relazione a criteri di valutazione di carattere economico.

3.4 Considerazioni sui dati di input dei modelli

Il rilievo dei dati necessari alla definizione del modello rappresenta un passaggio fondamentale e, al tempo stesso, molto complesso; la raccolta dati prevede la determinazione di una grande quantità di parametri talvolta difficili da dedurre e di conseguenza il numero di dati mancanti o non attendibili può essere elevato. Per questi motivi ogni raccolta dati è soggetta ad approssimazioni, da effettuare in relazione allo standard di accuratezza globale della valutazione che deve essere stabilito nell'ambito delle fasi preliminari del rilievo in relazione ai costi sostenibili. Il livello di approfondimento della fase di

rilevato dipende anche dal tipo di modello che si intende definire: le simulazioni in regime transitorio restituiscono risultati dettagliati, ma richiedono diversi tipi di monitoraggi anche a lungo termine in quanto è necessario definire l'andamento nel tempo dei parametri; i modelli in regime semistazionario sono meno complessi in quanto richiedono di definire i valori medi dei parametri nel periodo di riferimento (temperature medie mensili, occupazione media giornaliera, ecc...). In generale è opportuno utilizzare i metodi di misura meno complessi che garantiscano lo standard di accuratezza richiesto.

Una buona strategia per un'organizzazione sistematica della fase di raccolta dati è quella di indicare, insieme al valore del parametro rilevato, la fonte da cui è stato dedotto; in questo modo è possibile attribuire un livello di attendibilità a ciascun dato, in relazione al criterio della gerarchia delle fonti (*Raftery et. al. 2011*); in particolare i parametri coinvolti nel calcolo possono essere dedotti da analisi e rilievi di diverso genere associati a¹:

- *Fonti di tipo diretto:*
 1. Monitoraggi a lungo termine
 2. Monitoraggi a breve termine
 3. Misure puntuali
 4. Osservazione e rilievo degli ambienti
 5. Interviste agli utenti
- *Fonti di tipo indiretto:*
 6. Documentazione progettuale
 7. Schede tecniche dei materiali/ manuali di funzionamento e manutenzione dell'impianto
- *Fonti di tipo standard:*
 8. Norme tecniche
 9. Linee Guida ed abachi di riferimento.

¹ Le fonti dell'elenco sono ordinate in base al grado di attendibilità.

Quando si decide di ricorrere alla fonte di livello inferiore e si fa riferimento a indagini di tipo indiretto, è sempre opportuno verificarne la rispondenza con la reale configurazione dell'edificio attraverso verifiche puntuali; se non è possibile effettuare un rilievo diretto e non è disponibile documentazione di riferimento, si può ricorrere a riferimenti di tipo standard che però forniscono informazioni di carattere generale e possono anche non essere rappresentative dell'edificio analizzato; di conseguenza costituiscono una potenziale causa di errori nel modello. Nell'ambito di un processo di calibrazione il criterio della gerarchia delle fonti costituisce un riferimento utile per raffinare il modello in maniera razionale: la modifica di un parametro di input deve essere effettuata nel caso si disponga di un dato proveniente da una fonte di livello superiore, in modo da garantire un maggior grado di attendibilità dei risultati rispetto a quanto ottenuto attraverso simulazioni precedenti.

Anche la scelta della fonte da cui dedurre il dato dipende dal livello di attendibilità che deve garantire il modello; tuttavia come criterio generale è preferibile dare la priorità alle fonti di tipo diretto che permettono un controllo sul campo del dato rilevato.

Le indagini in situ vengono classificate a seconda del periodo di acquisizione dati, da cui dipende la rappresentatività della misura. I monitoraggi puntuali sono associati ad un livello di attendibilità ridotto, in quanto riportano le condizioni relative al momento di acquisizione del dato, e di conseguenza possono non essere rappresentative delle reali condizioni di esercizio; sono invece utili per la verifica della correttezza di parametri misurati con monitoraggi più dettagliati. Le misure derivanti dai monitoraggi a breve termine sono invece associate ad un livello di rappresentatività dipendente dalla lunghezza del periodo di misura: una misura giornaliera non è sufficiente a definire le condizioni di esercizio di un sistema edificio-impianto, mentre una misura di tipo stagionale è più significativa. I monitoraggi a lungo termine forniscono risultati attendibili ed utili a definire le condizioni di esercizio, ma sono molto onerosi sia in termini di costi che di tempo (Tabella 3.1).

Tipologia di verifica	Durata misura	Strumentazione	Impiego
Misure spot	Puntuale - 1 ora	Di tipo portatile, misura immediata	Controllo parametri derivanti da altre misure, valutazione puntuale
Monitoraggi a breve termine	1 giorno - 6 mesi	Strumenti - installazione temporanea	Valutazione parametri con livello di attendibilità crescente a seconda della durata della misura
Monitoraggi a lungo termine	> 6 mesi	Strumenti installazione permanente	Identificazione dell'andamento del parametro in modo stabile

Tabella 3.1. - Tipologie di misure in situ

Nell'ambito di ciascun rilievo in situ le misure devono essere effettuate sulla base di un protocollo stabilito in fase preliminare che definisca: i tipi di misura in relazione al periodo ed al tempo di acquisizione, le caratteristiche degli strumenti impiegati ed il posizionamento durante la misura, gli intervalli di valori attesi per il parametro rilevato, il minimo livello di accuratezza e completezza dei dati ed i metodi per l'integrazione dei dati mancanti e la correzione degli errori, in modo da garantire l'attendibilità dei valori misurati ed utilizzati nel modello (ASHRAE 14, 2002).

Tipicamente una campagna di raccolta dati si articola nelle seguenti fasi:

- **Raccolta documenti:** in questa fase si esaminano i disegni architettonici dell'edificio, gli schemi e i manuali di funzionamento degli impianti
- **Rilievi diretti:** si effettuano indagini in situ e si raccolgono dati relativi a:
 - *sistema di illuminazione:* numero e tipologie di lampade e sistemi di controllo, *schedule* (giorni lavorativi, weekend, vacanze) per le diverse zone termiche
 - *carichi termici ed elettrici:* entità e *schedule*
 - *sistema di climatizzazione:* caratteristiche del sottosistema di generazione, curve di rendimento dell'impianto, caratteristiche

- dei terminali di emissione e di regolazione, tipologie e potenze elettriche di ventilatori e ausiliari elettrici, verifica del posizionamento di pompe e motori (se in ambienti riscaldati o meno), portate di progetto e tipologie di condotti e tubazioni, temperatura di *set point* e *schedule*
- *involucro*: dimensioni e caratteristiche termo fisiche dell'involucro esterno e delle superfici tra zone, orientamento pareti esterne, massa termica, caratteristiche dei materiali da costruzione, caratteristiche serramenti (vetri e telaio)
 - *occupazione dell'edificio*: numero di utenti, *schedule*, livello di attività e presenza nelle varie zone termiche
 - *Identificazione di eventuali carichi termici/elettrici particolari*: speciali processi produttivi, ascensore, boiler acs...
- **Interviste ad operatori ed occupanti**: sono utili per confermare gli *schedule* di occupazione e di funzionamento dell'impianto e per individuare eventuali problemi o condizioni operative da riportare nel modello.
 - **Misure spot o a breve termine**: prevedono una misura puntuale con strumenti di rilievo diretto, o *datalogger* da lasciare in situ per brevi periodi. Sono poco costosi e validi per avere informazioni sullo *schedule*. La lunghezza della misura dipende dall'accuratezza del risultato che si ricerca. Possono riguardare:
 - *Schedule*: per la verifica del funzionamento del sistema di illuminazione, dei carichi termici, del funzionamento dell'impianto
 - *Sistema di climatizzazione*: si misurano temperatura e umidità relativa di ambienti di controllo, portate di aria o di acqua nell'impianto, pressioni e temperature del fluido circolante nell'impianto.
 - *Ventilazione ed infiltrazioni attraverso l'involucro*: valutazione delle portate di ventilazione attraverso condotti d'aria o discontinuità dell'involucro.

- **Raccolta dati climatici:** nell'ambito di un processo di riqualificazione è necessario individuare due data set climatici, per calibrare il modello è necessario raccogliere i dati relativi al periodo, per ottenere un risparmio normalizzato che rappresenti un anno-tipo devono essere utilizzati i dati dell'anno medio tipo per la località di riferimento.

3.5 Parametri per la calibrazione dei modelli

Per verificare la rappresentatività dei modelli è necessario fare riferimento a parametri di controllo in grado di descrivere il comportamento energetico reale degli edifici: generalmente i protocolli e le normative indicano come dato di confronto i consumi effettivi di combustibile dell'edificio. Tuttavia si possono verificare casi in cui non sia possibile risalire ai consumi effettivi:

- edifici dismessi: l'impianto termico non è in funzione e quindi non è possibile dedurre un fabbisogno energetico di riferimento,
- edifici privi di impianto termico,
- edifici in cui la fornitura di combustibile è gestita sulla base di contratti forfettari: la fatturazione è relativa ad un consumo fittizio connesso alle caratteristiche dell'edificio (volume riscaldato, potenza dell'impianto, tipologia di combustibile)

In questi casi è necessario adottare un diverso tipo di parametro per la calibrazione; si possono utilizzare delle temperature rilevate all'interno di un ambiente di controllo come i valori relativi alla temperatura dell'aria oppure delle superfici di involucro.

La condizione necessaria per l'adozione di un parametro di calibrazione è che sia riferito allo stesso periodo di tempo per cui è stato definito il modello, in modo che i risultati siano confrontabili e gli scostamenti non siano dovuti a particolari condizioni al contorno contingenti: ad esempio, se per la costruzione del modello si adottano i dati meteo dell'anno corrente e per la calibrazione si utilizzano i consumi effettivi dell'anno precedente, si possono riscontrare errori dovuti alle differenti condizioni climatiche che non dipendono dalla generale

affidabilità del modello. Nei paragrafi seguenti verranno fornite indicazioni sulle modalità di raccolta dei parametri per la calibrazione.

3.5.1 Valutazione dei consumi di combustibile effettivi

I consumi effettivi rappresentano un riferimento per la calibrazione che permette di confrontare il comportamento reale con i risultati del modello in termini di fabbisogno di energia primaria del sistema edificio-impianto; la norma UNI TS 11300-2 riporta alcune indicazioni sui metodi di rilievo dei consumi e sulle modalità di interpretazione dei dati.

In particolare i consumi effettivi vengono dedotti sulla base delle quantità di combustibile consumato (esprese in volume o in peso) che devono essere convertiti in energia primaria sulla base del potere calorifico inferiore secondo la seguente relazione:

$$Q_{\text{reale}} = V_{\text{comb}} \cdot \text{P.C.I.} \quad (3.5.1)$$

- Q_{reale} → consumo effettivo
- V_{comb} → volume di combustibile
- P.C.I. → potere calorifico inferiore (i valori di riferimento sono riportati in Tabella 3.2)

Combustibile	Potere calorifico inferiore (P.C.I.)
Gas G20*	9.940 kWh/Nm ³
Propano	28.988 kWh/Nm ³
Butano	36.779 kWh/Nm ³
Gasolio	11.870 kWh/kg

Tenuto conto della molteplicità delle fonti di approvvigionamento di gas naturale distribuito in Italia, si assumono come riferimento i dati del metano

Tabella 3.2. Poteri calorifici di riferimento per i combustibili (Prospetto B.23 UNI TS 11300-2)

L'equivalenza tra consumi di energia elettrica e energia primaria avviene sulla base del fattore di conversione stabilito dall'Autorità dell'energia per l'anno corrente, pari a 2.18.

3.5.1.1 Modalità di valutazione dei consumi

In generale i consumi energetici totali di un edificio sono caratterizzati dalla somma di diversi contributi:

$$Co_{\text{rilevato}} = Co_h + Co_w + Co_{\text{cottura}} + Co_{\text{altri}} \quad (3.5.2)$$

- Co_{rilevato} : consumi effettivi rilevati
- Co_h : consumi effettivi per il riscaldamento ($Co_h = 0$ nel periodo di inattività del riscaldamento)
- Co_w : consumi effettivi per la produzione di acqua calda sanitaria
- Co_{cottura} : consumi effettivi per uso cottura
- Co_{altri} : consumi effettivi per altri usi.

Tuttavia non tutti i contributi rientrano nel calcolo del fabbisogno di energia primaria dell'edificio: infatti i consumi di combustibile per uso cottura e destinati ad altri impieghi devono essere scorporati dai consumi totali in quanto non contribuiscono alla determinazione della prestazione energetica del sistema edificio-impianto, che si valuta in termini di fabbisogni per il riscaldamento e per la produzione di acqua calda sanitaria.

La norma UNI TS 11300-2 riporta dei valori di riferimento per i consumi di energia per uso cottura in edifici residenziali che devono essere sottratti dai consumi effettivi raccolti in fase di analisi (Tabella 3.3); questi valori sono ipotizzati costanti per tutto il periodo di riferimento.

Superficie dell'abitazione [m ²]	Fabbisogno specifico [kWh/G]
Fino a 50 m ²	4
Oltre 50 m ² e fino a 120 m ²	5
Oltre 120 m ²	6

Tabella 3.3. - Fabbisogni standard di energia per uso cottura (Prospetto 14 UNI TS 11300-2)

Per quanto riguarda il contributo ai consumi effettivi dovuto ad altri usi, la norma indica che generalmente tale valore è pari a 0; comunque nel caso di incidenza di questo parametro è necessario provvedere allo scorporo dai consumi totali.

Inoltre, per una corretta calibrazione, è importante la distinzione tra consumi effettivi per la produzione di acqua calda sanitaria e per il riscaldamento degli ambienti; i consumi per la produzione di ACS possono essere dedotti attraverso i consumi estivi, al netto dei fabbisogni per uso cottura. In buona approssimazione i fabbisogni di ACS si possono considerare costanti lungo tutto l'anno, per cui occorre proiettare il consumo giornaliero dedotto per la stagione estiva lungo il periodo invernale in modo da avere i consumi effettivi per la produzione di acqua calda per tutto l'anno e ricavare per differenza i consumi effettivi per il riscaldamento invernale.

Un'altra strategia è quella proposta da *Yoon e Lee (2008)*, che mette in relazione i fabbisogni energetici per la climatizzazione invernale ed estiva con gli andamenti delle temperature esterne. Il grafico in Figura 3.2 riporta i valori dei fabbisogni mensili di energia primaria per 4 anni di riferimento ed i risultati dei modelli in funzione delle temperature medie mensili esterne: si noti come a temperature esterne minori corrispondano consumi effettivi di combustibile maggiori e viceversa; con l'aumento delle temperature la retta che interpola i fabbisogni mensili assume pendenza orizzontale e rappresenta la porzione di consumi energetici indipendente dalla temperatura esterna. In questo caso il valore costante è pari a zero perché non vi sono consumi di gas indipendenti dalla variabile climatica; se invece l'edificio fosse stato caratterizzato da un sistema di produzione di acqua calda sanitaria alimentato a gas, la retta

orizzontale avrebbe assunto un valore diverso da 0 corrispondente al fabbisogno energetico mensile per la produzione di ACS.

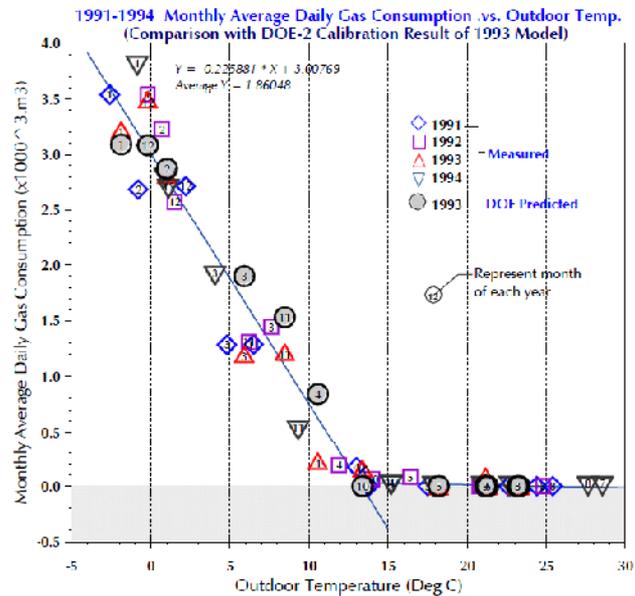


Figura 3.2. Curva caratteristica fabbisogni energetici per riscaldamento in funzione della temperatura esterna (Yoon and Lee, 2008)

3.5.1.2 Esempio di calcolo

Si considerino i consumi effettivi ricavati dalle fatturazioni annuali per il gas metano relative a un'abitazione isolata di circa 120 m² dotata di un generatore con produzione combinata (Riscaldamento + ACS) alimentato a metano:

Periodo di fatturazione		n. giorni	Consumi totali [m ³]	Consumi effettivi [kWh]
01-gen	31-gen	30	651.00	6470.94
01-feb	31-mar	59	1078.00	10715.32
01-apr	31-mag	60	413.00	4105.22
01-giu	31-ago	91	169.00	1679.86
01-set	30-nov	90	1175.00	11679.50
01-dic	31-dic	30	215.00	2137.10

Tabella 3.4. Consumi effettivi abitazione

Nelle bollette i consumi sono espressi in base alla quantità di combustibile utilizzato dall'utenza; questo valore può essere convertito in energia mediante il potere calorifico inferiore che, nel caso del metano, è pari a 9.940 kWh/m³:

$$Co(\text{kWh}) = Co(\text{m}^3) \cdot 9.940 \text{ kWh/m}^3 \quad (3.5.3)$$

Applicando questa relazione ai consumi fatturati si ottengono i valori espressi nell'ultima colonna della Tabella 3.4; questi consumi effettivi sono comprensivi di contributo per usi cottura e produzione di acqua calda sanitaria.

Considerando una superficie di 120 m² il prospetto 14 della norma UNI TS 11300-2 indica un fabbisogno per uso cucina pari a 6 kWh/giorno che, moltiplicato per i giorni di fatturazione permette di determinare il contributo da scorporare ai consumi effettivi (Tabella 3.5).

Periodo di fatturazione		n. giorni	Consumi effettivi [kWh]	Consumi per uso cottura [kWh]	Consumi effettivi al netto di uso cottura [kWh]
01-gen	31-gen	30	6470.94	180	6290.94
01-feb	31-mar	59	10715.32	354	10361.32
01-apr	31-mag	60	4105.22	360	3745.22
01-giu	31-ago	91	1679.86	546	1133.86
01-set	30-nov	90	11679.50	540	11139.5
01-dic	31-dic	30	2137.10	180	1957.1

Tabella 3.5 - Consumi effettivi al netto degli usi cottura

A partire dai risultati in Tabella 3.5 si possono distinguere i consumi effettivi per la produzione di acqua calda sanitaria e per il riscaldamento: i consumi relativi al periodo giugno-agosto, al netto dei consumi per uso cottura, sono destinati alla produzione di ACS per cui, sulla base di quanto indicato dalla norma UNI TS 11300-2 si possono estrapolare i consumi giornalieri del periodo estivo lungo tutto l'anno.

Il consumo giornaliero per la produzione di acqua calda sanitaria si ricava:

$$\frac{1679 \text{ kWh}}{91 \text{ g}} = 12.46 \text{ kWh/giorno}$$

Ed estrapolando i risultati lungo l'arco dell'anno si ottengono i valori in Figura 3.3.

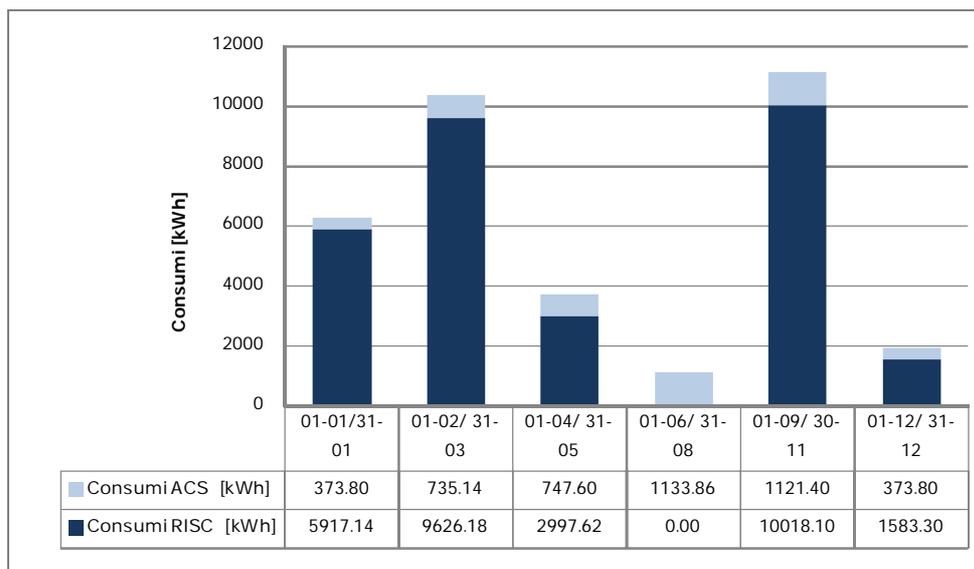


Figura 3.3. Consumi per il riscaldamento e per la produzione di ACS

3.5.1.3 Fonti da cui dedurre i consumi effettivi

Sulla base del vettore energetico che alimenta l'impianto i consumi effettivi possono essere ricavati da fonti di diverso genere.

Gli impianti che utilizzano gas di rete sono associati a misuratori della quantità di combustibile utilizzato per ogni singola utenza, che vengono direttamente installati dalla società che fornisce il servizio.

In questo la norma UNI TS 11300-2 indica due modalità di riferimento per la raccolta dati:

- *Indiretto*
- *diretto*

Nel primo caso la ricostruzione dei consumi effettivi avviene attraverso i valori riportati nelle bollette di fornitura energetica, per il periodo di tempo corrispondente alla definizione del modello di calcolo. Un aspetto a cui prestare attenzione è relativo alle modalità di stima dei valori indicati nella bolletta: nel caso di letture effettive, il dato può essere impiegato nella determinazione dei consumi, mentre invece la lettura stimata dal fornitore non è significativa ai fini

della calibrazione perché non dipende dai consumi reali dell'edificio ma da approssimazioni relative ai consumi storici dell'utenza. Pertanto in fase di calibrazione si devono considerare i dati che derivano da letture effettive.

Nel secondo caso, invece, il rilievo avviene attraverso letture dirette del contatore durante il periodo di interesse; è opportuno effettuare una serie di letture, anche ad intervalli di tempo ravvicinati per comprendere meglio il comportamento energetico dell'edificio. La norma indica che si possono effettuare rilievi anche con intervalli di tempo brevi (10 minuti) finalizzati alla verifica della regolazione della portata termica del generatore. La misura diretta può avvenire anche nel caso di sistemi alimentati da serbatoi dotati di un misuratore della quantità di combustibile utilizzata, previa verifica delle caratteristiche e delle tolleranze del contatore.

Tuttavia generalmente gli impianti alimentati da serbatoi sono privi di misuratore, e per riuscire a stimare la quantità di combustibile consumata è necessario fare riferimento alla relazione indicata dalla norma UNI TS 11300-2:

$$CQ = (CQ_I - CQ_F) + CQ_A \quad (3.5.4)$$

CQ: quantità presente nel serbatoio

- CQ_I : quantità iniziale
- CQ_F : quantità finale
- CQ_A : quantità immessa nel serbatoio durante il periodo intercorso tra verifica iniziale e verifica finale.

Nel caso in cui i rilievi avvengano al di fuori del periodo di riscaldamento i consumi rilevati, al netto dell'uso cottura, sono impiegati per la produzione di acqua calda sanitaria; nel caso di rilievi per periodi che interessano anche la stagione invernale è opportuno distinguere i consumi per ACS e per il riscaldamento secondo quanto indicato nei paragrafi precedenti.

3.6 Calibrazione mediante rilievo delle temperature interne

Il rilievo delle temperature interne ad un ambiente di controllo rappresenta una soluzione da adottare nel caso in cui non sia possibile risalire ai consumi effettivi del sistema edificio-impianto; questo tipo di valutazione è anche adatto nel caso di analisi relative all'ottimizzazione delle condizioni di esercizio degli impianti: infatti è necessaria una verifica del comfort degli occupanti per poter definire interventi sul funzionamento dell'impianto ed è importante conoscere le condizioni interne degli ambienti.

Tuttavia è importante sottolineare che questo tipo di calibrazione può essere adottato soltanto nel caso di definizione di modelli in regime dinamico che siano in grado di riprodurre il comportamento energetico del sistema edificio impianto anche in termini di temperature interne. Infatti questi modelli tengono conto degli effetti di accumulo e rilascio termico delle strutture e, sulla base delle temperature esterne, delle caratteristiche termofisiche dell'involucro e del funzionamento dell'impianto, possono determinare l'andamento delle temperature interne dei locali come output delle elaborazioni.

I modelli semi-stazionari effettuano invece un bilancio termico sulla base delle temperature medie mensili esterne e i valori relativi agli ambienti interni costituiscono un parametro di input del modello, che non può essere utilizzato per la verifica di rappresentatività delle simulazioni. Inoltre è necessario ricavare dal modello i profili orari di temperatura per l'ambiente di controllo, in quanto un confronto sulla base di valori medi mensili risulterebbe poco significativo in termini di rappresentatività della simulazione. Per questo motivo i monitoraggi delle temperature richiedono un'acquisizione oraria e per tempi molto lunghi che garantisca una quantità di dati significativa e che permetta di verificare il comportamento dell'edificio sia in regime invernale che estivo; di conseguenza l'impiego di questo parametro è consigliabile nel caso di modelli di valutazione avanzati per cui siano disponibili tempo e risorse economiche ingenti.

Gli strumenti per il rilievo delle temperature degli ambienti interni sono molteplici, alcuni presentano sistemi di acquisizione e memorizzazione dati interni (*termistore, minidatalogger*), alcuni necessitano di un collegamento ad un *datataker* esterno, come nel caso di termocoppie e termoresistenze. Qualunque sia il tipo di sensore utilizzato è importante il posizionamento della strumentazione in fase di acquisizione: è opportuno scegliere gli ambienti di controllo in modo che siano rappresentativi delle condizioni di esercizio dell'intero edificio, sia in termini di occupazione, che di apporti interni, che in relazione alle strutture di involucro. Inoltre particolari condizioni al contorno non devono influenzare la misura, per questo motivo è opportuno che gli strumenti non siano posizionati in corrispondenza di sorgenti di calore o fonti di radiazione solare diretta o correnti d'aria. Inoltre, nel caso di rilievo delle temperature superficiali, la scelta della posizione deve essere fatta in modo da eliminare effetti di bordo dovuti alla presenza di ponti termici.

Si riportano di seguito i risultati di un monitoraggio annuale in un ufficio: a seconda dell'intervallo considerato (annuale o settimanale) si possono evidenziare aspetti diversi in relazione alle condizioni interne dei locali ed al funzionamento dell'impianto. In Figura 3.4 sono riportati i risultati di un monitoraggio annuale di un edificio per uffici: si possono notare i periodi di spegnimento dell'impianto durante la stagione invernale (vacanze di Natale ed altre festività), ed il passaggio dal periodo di riscaldamento a quello di raffrescamento.

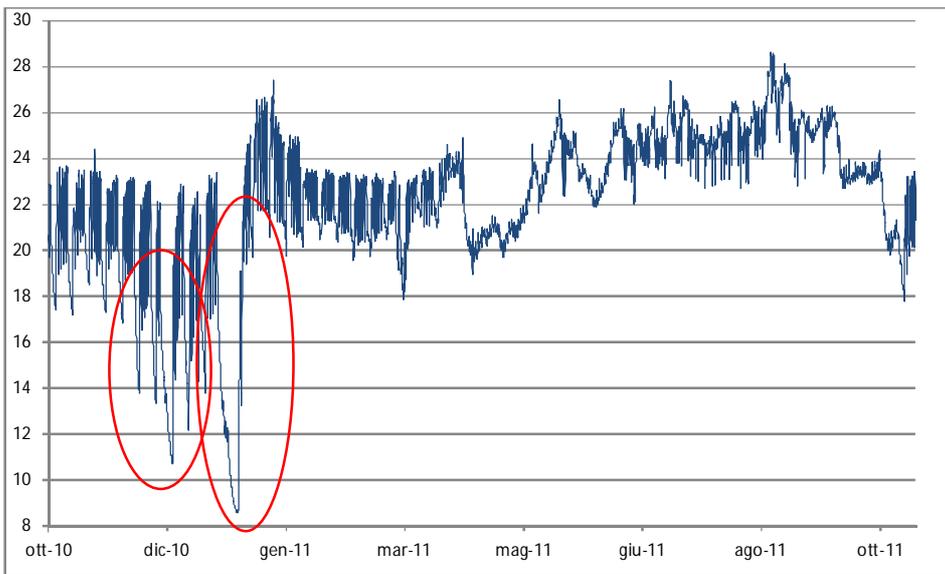


Figura 3.4. Temperature interne: rilievo annuale

In Figura 3.5 sono state riportate due settimane-tipo del periodo invernale: si possono notare i cicli giornalieri di accensione e spegnimento dell'impianto e, in corrispondenza dei giorni non lavorativi, la diminuzione della temperatura interna.

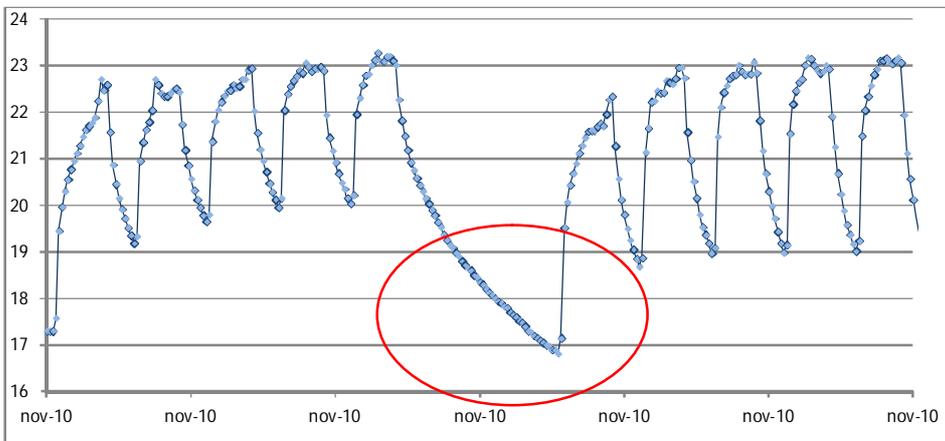


Figura 3.5. Temperature interne: rilievo settimanale

3.7 Considerazioni sugli indici di valutazione dell'errore

Il modello relativo allo stato di fatto deve essere calibrato attraverso il confronto dei risultati delle simulazioni con i dati reali misurati in situ. La calibrazione rappresenta un processo iterativo che consiste nell'elaborare una serie di modelli con lo scopo di minimizzare lo scostamento tra risultati del calcolo e comportamento reale dell'edificio. A seconda del tipo di valutazione da effettuare e alla disponibilità di dati relativi al sistema edificio impianto possono essere adottati differenti livelli di calibrazione del modello associati a diversi parametri di controllo:

- Calibrazione attraverso consumi energetici mensili
- Calibrazione attraverso consumi energetici orari
- Calibrazione attraverso temperature orarie di un ambiente di controllo.

Un modello si definisce calibrato se soddisfa i requisiti di calibrazione stabiliti nell'ambito delle fasi preliminari della valutazione, da verificare attraverso metodi di tipo grafico e di tipo statistico.

I metodi grafici forniscono un'informazione immediata sulla rappresentatività dei modelli e permettono di ottenere un'indicazione diretta degli errori, in quanto graficamente si possono individuare in maniera diretta gli intervalli di tempo (giornalieri, settimanali, mensili) in cui i *dataset* reali e calcolati divergono in maniera significativa e quindi si può procedere a raffinare il modello.

Per ottenere informazioni dettagliate e complete il modello deve essere verificato anche attraverso i metodi statistici che permettono di quantificare in maniera oggettiva gli scostamenti tra comportamento reale e simulato dell'edificio e determinare se le differenze tra i *dataset* rientrano all'interno dei criteri di tolleranza stabiliti.

Le verifiche di attendibilità del modello devono essere condotte lungo tutto il periodo interessato dalla valutazione e, secondo quanto stabilito dal protocollo

ASHRAE, è consigliabile effettuare valutazioni dell'errore giornaliere in corrispondenza di:

- giornata lavorativa invernale di picco
- giornata lavorativa invernale media
- giornata non lavorativa invernale media
- giornata lavorativa estiva di picco
- giornata lavorativa estiva media
- giornata non lavorativa estiva media
- giornata media primaverile
- giornata media autunnale

da identificare sulla base dei dati climatici reali rilevati nel periodo di interesse.

A seconda del parametro di calibrazione utilizzato è opportuno adottare indici statistici di riferimento differenti secondo quanto indicato nei paragrafi successivi.

3.7.1 Calibrazione mediante l'impiego dei consumi reali dell'edificio

Nel caso in cui i modelli vengano calibrati mediante l'utilizzo dei fabbisogni energetici effettivi dell'edificio, sia in termini di consumi elettrici che di domanda di combustibile, gli indici statistici di riferimento sono indicati nelle Linee Guida ASHRAE 14: errore medio, coefficiente di variazione dello scarto quadratico medio.

3.7.1.1 Errore medio *MBE*

L'errore medio si valuta sommando gli scostamenti tra fabbisogni simulati (S) ed i consumi misurati (M) lungo l'intervallo di tempo considerato e dividendo ciascuna differenza per il corrispondente valore misurato per ottenere un risultato espresso in percentuale:

$$MBE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - M_i)}{\sum_{i=1}^n (M_i)} \right] \quad (3.7.1)$$

L'errore medio fornisce un'indicazione diretta e generale sull'attendibilità della simulazione in relazione al comportamento reale misurato durante i monitoraggi in situ, e permette di valutare se il modello tende a sovrastimare o meno i fabbisogni energetici reali. L'errore medio non è però un indice sufficiente per validare una simulazione in quanto errori di segno opposto tendono a compensarsi e non vengono evidenziati nel risultato finale. Per questo motivo è necessario calcolare anche ulteriori indicatori.

3.7.1.2 Coefficiente di variazione dello scarto quadratico medio CV(RMSE)

Per valutare questo indice è necessario calcolare lo scarto quadratico medio tra comportamento reale (M) e simulato (S):

$$RSME_{periodo} = \sqrt{\frac{\sum_{periodo} (M-S)_{periodo}^2}{N_{periodo}}} \quad (3.7.2)$$

Lo scarto quadratico medio (*Root Mean Square Error*), permette di valutare in termini assoluti lo scostamento tra due parametri e fornisce un'indicazione quantitativa della rispondenza del modello in relazione al comportamento reale: maggiore il valore di questo indice, minore la rappresentatività del modello. Tuttavia lo scarto quadratico medio, nel caso di calibrazione attraverso i fabbisogni energetici effettivi, non è sufficiente per descrivere correttamente l'accuratezza della simulazione: infatti lo stesso valore di *RMSE* può risultare da modelli accurati di edifici caratterizzati da consumi elevati o da modelli poco accurati nel caso di consumi limitati. Per questo motivo si consiglia di adottare il coefficiente di variazione dello scarto quadratico medio, che esprime lo

scostamento in percentuale in relazione ad un valore medio dei consumi misurati:

$$CV(RSME_{\text{periodo}}) = \left[\frac{RMSE_{\text{periodo}}}{A_{\text{periodo}}} \right] \times 100 \% \quad (3.7.3)$$

Dove A_{periodo} esprime un valore medio dei consumi misurati calcolato sulla base del numero di intervalli di acquisizione che caratterizzano il periodo di misura:

$$A_{\text{periodo}} = \left[\frac{\sum(M_{\text{periodo}})}{N_{\text{periodo}}} \right] \quad (3.7.4)$$

Nel caso della calibrazione mediante i consumi effettivi, si possono definire modelli in regime semistazionario sulla base di confronti su dati mensili e modelli in regime dinamico attraverso l'utilizzo di dati orari. I limiti di tolleranza accettabili devono essere stabiliti in fase preliminare sulla base della disponibilità di dati, della complessità e del tipo di modello e del grado di approfondimento a cui è associata la valutazione del comportamento energetico dell'edificio. I protocolli di valutazione riportano valori differenti a seconda del tipo di modello che viene definito: per le simulazioni orarie sono ritenuti accettabili errori anche dell'ordine del 30% in termini di CV(RMSE) e del 15% in termini di MBE, mentre invece per le simulazioni calibrate su base mensile la percentuale di errore ammissibile è dimezzata.

INDICE	IPMVP	M&V	ASHRAE 14
MBE _{mensile}	± 5 %	± 7 %	± 5 %
CV (RMSE _{mensile})	20 %	15 %	15 %
MBE _{orario}	± 10 %-	± 15 %-	± 10 %
CV(RMSE _{orario})	30 %	25 %	30 %

Tabella 3.6. Errori ammissibili

3.7.2 Calibrazione mediante l'impiego delle temperature

Nel caso in cui il modello venga calibrato attraverso le temperature rilevate all'interno di un ambiente di controllo, è opportuno adottare dei coefficienti di stima dell'errore che forniscano indicazione significative in termini di differenze di temperature tra risultati del modello e valori misurati. Nell'ambito di questo studio di è deciso di adottare per le valutazioni: errore medio, scarto quadratico medio, indice di Pearson

3.7.2.1 Errore medio MBE

$$MBE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - M_i)}{N} \right] \quad (3.7.5)$$

L'errore medio MBE [°C] viene calcolato sommando gli scostamenti tra temperature simulate (S) e misurate (M) lungo il periodo di tempo considerato e dividendo per il numero di intervalli di acquisizione. Un valore positivo di MBE indica che il modello tende a sovrastimare le temperature, mentre un valore di MBE negativo significa che il modello sottostima le temperature interne all'ambiente di controllo; tuttavia non è sufficiente a determinare il grado di rappresentatività del modello in quanto differenze di temperatura di segno opposto tendono a compensarsi. Per questo motivo è opportuno effettuare una valutazione anche in termini di scarto quadratico medio.

3.7.2.2 Scarto quadratico medio RMSE

$$RSME = \sqrt{\left[\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - S_i)^2}{N} \right]} \quad (3.7.6)$$

Questo indice fornisce un'indicazione del valore assoluto dello scostamento medio tra temperature interne simulate e misurate.

3.7.2.3 Indice di Pearson

Nel caso i modelli calibrati con le temperature è necessario introdurre l'indice di Pearson (r), definito come:

$$r = \frac{\sum(M \cdot S) - \sum M \cdot \sum S / N}{\sqrt{\left(\sum M^2 - \frac{(\sum M)^2}{N}\right) \cdot \left(\sum S^2 - \frac{(\sum S)^2}{N}\right)}} \quad (3.7.7)$$

Dove:

- M temperature misurate [°C]
 S temperature simulate [°C]
 N numero di intervalli di acquisizione

L'indice di Pearson è un numero puro che rappresenta la correlazione tra due variabili, in questo caso i risultati dei monitoraggi e della simulazione e permette di verificare l'attendibilità delle temperature del modello in relazione a quelle realmente misurate all'interno dei locali. Il parametro r è compreso tra -1 e 1:

- $r < 0$: le grandezze sono correlate negativamente, ovvero ad un aumento della temperatura del modello corrisponde una diminuzione della temperatura monitorata e viceversa, quindi il modello non è rappresentativo del reale comportamento dell'edificio;
- $r = 0$ non esiste correlazione tra le variabili;
- $r > 0$ le grandezze sono correlate positivamente, ovvero le temperature del modello variano in maniera analoga a quelle misurate all'interno degli ambienti; la correlazione tra modello e dato reale è ritenuta rappresentativa per valori di $r > 0.5$ (Guan. 2007).

3.8 Conclusioni

Dall'analisi della letteratura sono stati riscontrati soprattutto articoli che riportano procedure di calibrazione basate sui consumi effettivi. Nell'ambito di questo capitolo è stata proposta una calibrazione mediante l'impiego di

temperature rilevate all'interno di un ambiente di controllo e sono state definite le strategie per la raccolta dati e l'analisi dei risultati delle simulazioni.

Nei successivi capitoli verrà presentata l'analisi del comportamento energetico di un edificio esistente effettuata applicando il protocollo di calibrazione; in questo modo si potrà verificarne l'attendibilità.

Capitolo 4

Applicazioni del protocollo di calibrazione dei modelli di simulazione dinamica: analisi di edifici campione

4.1 Introduzione

In questa parte vengono riportati i risultati ottenuti mediante l'applicazione della procedura di calibrazione descritta nel precedente capitolo per l'analisi del comportamento energetico di un edificio esistente. Il caso studio è costituito da un edificio dismesso e privo di impianto termico, pertanto la calibrazione del modello è stata effettuata sulla base delle temperature rilevate all'interno di un ambiente di controllo. Lo scopo dell'analisi è di fornire un quadro generale degli aspetti che caratterizzano le fasi di raccolta, implementazione dati e di interpretazione dei risultati che si ottengono attraverso l'impiego di uno strumento di simulazione dinamica dell'edificio. Le analisi sono state condotte mediante l'utilizzo del software TRNSYS.

In particolare nell'ambito del capitolo si analizza la variabilità dei principali dati in ingresso dei modelli, vengono elaborate una serie di simulazioni e si quantifica lo scostamento tra i risultati per identificare la simulazione più rappresentativa del comportamento reale attraverso un'analisi multi criterio.

4.2 Caratteristiche e raccolta dati

Il caso studio è costituito da un edificio appartenente al complesso della Manifattura Tabacchi di Rovereto in provincia di Trento; la costruzione, attualmente dismessa, è stata realizzata nel 1854 come spazio per lo stoccaggio del prodotto alla fine della lavorazione.

L'edificio presenta una superficie di circa 3650 m² distribuita su quattro livelli, di cui il primo parzialmente interrato e l'ultimo delimitato da una copertura piana. La struttura è caratterizzata da un telaio travi e pilastri e da un involucro di tipo massivo costituito da pareti in laterizio e pietra di spessore decrescente dall'interrato (90 cm) all'ultimo livello (65 cm). Ad eccezione del livello seminterrato che presenta aperture tipo bocca di lupo, i piani fuori terra sono caratterizzati da un rapporto tra superficie trasparente e opaca omogeneo pari a 0.3; gli infissi sono costituiti da telai in legno con vetri singoli ed in fase di rilievo si sono riscontrate diverse discontinuità e lacune negli elementi vetrati, che causano infiltrazioni significative.



Figura 4.1a. Prospetto Nord-Est



Figura 4.1b. Prospetto Nord-Ovest

La pianta è di forma rettangolare e presenta un blocco servizi realizzato in epoca successiva alla costruzione dell'edificio lungo la parete Nord-Est, in

corrispondenza del vano scala interno; l'edificio, attualmente dismesso, risulta privo di impianto termico funzionante.

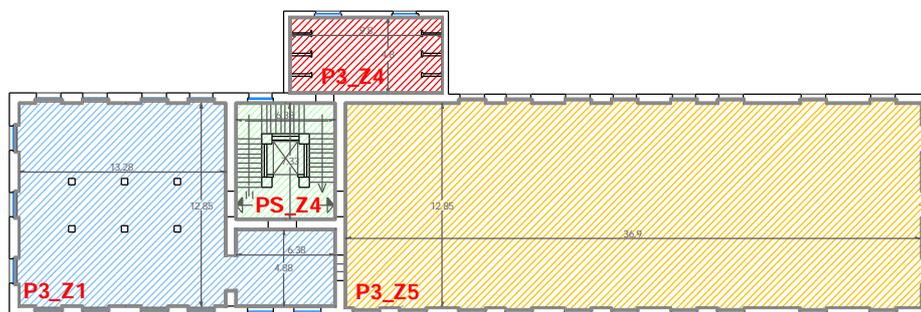


Figura 4.2. Planimetria dell'edificio - suddivisione in zone termiche

In fase di rilievo la zonizzazione dell'edificio è stata effettuata considerando l'elevata capacità termica dei divisori interni, per cui sostanzialmente a ciascun ambiente è stata attribuita una singola zona termica, come mostrato in Figura 4 per un piano tipo (Figura 4.2).

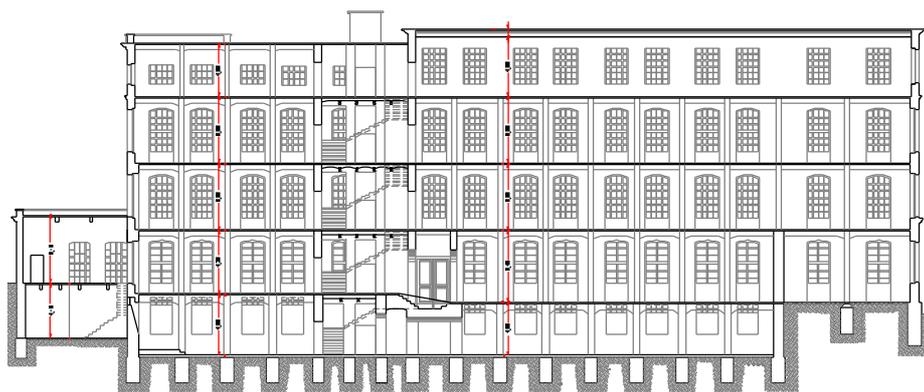


Figura 4.3. Sezione longitudinale dell'edificio

Le stratigrafie degli elementi di involucro non sono note, e non sono state rinvenute fonti progettuali attendibili; pertanto la composizione delle pareti è stata dedotta per analogia dall'abaco contenuto nell'Appendice della norma UNI TS 11300-1 sulla base dell'epoca di costruzione, delle informazioni ricavate in fase di rilievo, degli spessori misurati in opera e della tipologia costruttiva dell'edificio

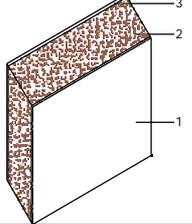
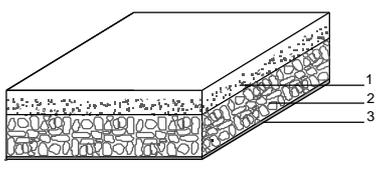
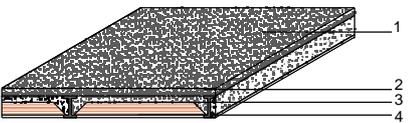
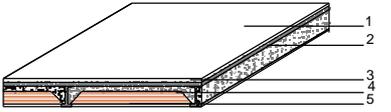
Muratura mattoni e sassi (Rif.A)					Solaio contro-terra in calcestruzzo				
									
Strato	d [cm]	ρ [kg/m ³]	λ [W/m K]	R [m ² K/W]	Strato	d [cm]	ρ [kg/m ³]	λ [W/m K]	R [m ² K/W]
1 Intonaco interno	2	1400	0.700		1 Malta di cemento	3	2000	1.470	
2 Mattoni e sassi	30-65	1500	0.900		2 CLS ordinario	10	2000	1.400	
3 Intonaco esterno	2	1800	0.900		3 Ciottoli di fiume	20-40	1700	1.160	
Solaio interpiano a profilati in acciaio e tavelloni in laterizio					Solaio di copertura a profilati in acciaio e tavelloni in laterizio				
									
Strato	d [cm]	ρ [kg/m ³]	λ [W/m K]	R [m ² K/W]	Strato	d [cm]	ρ [kg/m ³]	λ [W/m K]	R [m ² K/W]
1 Malta di cemento	2	2000	1.400	-	1 Guaina bitume	1.5	1200	0.170	-
2 CLS alleggerito	9	400	0.150	-	2 Malta di cemento	2	2000	1.400	-
3 Tavelle in laterizio	6	600	-	0.250	3 CLS alleggerito	9	400	0.150	-
4 Intonaco	2	1800	0.900	-	4 Tavelle in laterizio	6	600	-	0.250
					5 Intonaco	2	1800	0.900	-

Figura 4.4. Stratigrafie dell'involucro

4.3 Definizione dei modelli

La procedura di calibrazione descritta nel Capitolo 3 è stata applicata all'edificio della Manifattura Tabacchi; in particolare è stata definita una serie di simulazioni mediante l'uso del software TRNSYS, caratterizzate da diverse combinazioni di alcuni parametri di input determinati sulla base di valori standard, oppure attraverso valutazioni più accurate (calcoli dettagliati e misure in situ) in termini di dati climatici, calcolo delle infiltrazioni, determinazione dei parametri termofisici dell'involucro.

4.3.1 Metodo di calcolo

Il modello di calcolo implementato nel programma TRNSYS è caratterizzato da un bilancio di tipo orario per ciascuna zona termica che si può riassumere mediante la seguente equazione:

$$\dot{q}_c + \dot{q}_v + \dot{q}_i + \dot{q}_{sys} = C_i \frac{\delta\theta}{\delta\tau}$$

Dove

- \dot{q}_c rappresenta gli scambi termici convettivi della zona con l'involucro
- \dot{q}_v rappresenta le perdite per ventilazione
- \dot{q}_i rappresenta gli apporti termici interni
- \dot{q}_{sys} rappresenta i flussi entranti o uscenti dovuti all'impianto termico
- C_i rappresenta la capacità termica della zona
- $\frac{\delta\theta}{\delta\tau}$ indica la variazione della temperatura interna della zona in funzione del tempo.

Per quanto riguarda i componenti opachi, viene applicato il metodo delle funzioni di trasferimento introdotto da Mitalas e Stephenson negli anni '70, che propongono di risolvere l'equazione di Fourier sulla base di condizioni al contorno (temperatura e flussi termici) discrete. I flussi termici vengono espressi con le seguenti equazioni:

$$\varphi_e(\tau) = - \sum_{j=0}^{N_t} a_i \cdot T_{i,\tau-j\delta} + \sum_{j=0}^{N_t} b_i \cdot T_{e,\tau-j\delta} + \sum_{j=0}^{N_\varphi} c_j \cdot \varphi_{e\tau-j\delta}$$

$$\varphi_i(\tau) = - \sum_{j=0}^{N_t} d_i \cdot T_{i,\tau-j\delta} + \sum_{j=0}^{N_t} a_i \cdot T_{e,\tau-j\delta} + \sum_{j=0}^{N_\varphi} c_j \cdot \varphi_{i\tau-j\delta}$$

Dove:

- φ_e, φ_i flusso attraverso la superficie esterna e interna
- a_i, b_i, c_i rappresentano i coefficienti di trasferimento esterno, interno e attraverso la parete
- τ è la variabile temporale
- δ rappresenta il time-step della simulazione
- T_e, T_i sono le temperature misurate sulla superficie esterna e interna delle parete

Il flusso è espresso come funzione del valore assunto negli istanti precedenti, delle temperature sulle superfici, valutate anch'esse nell'istante precedente e di opportuni coefficienti determinati sulla base delle caratteristiche geometriche e termofisiche del componente considerato; i coefficienti di trasferimento vengono quindi assegnati sulla base del tipo di struttura che si considera.

Attraverso il metodo delle Z-trasformate si possono ottenere flussi termici attraverso l'involucro:

$$\begin{bmatrix} \varphi_i \\ \varphi_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{D(z)}{B(z)} & -\frac{1}{B(z)} \\ \frac{1}{B(z)} & -\frac{A(z)}{B(z)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_i(z) \\ T_o(z) \end{bmatrix}$$

Dove:

- $T_i(z)$ e $T_o(z)$ rappresentano le temperature sulla superficie interna ed esterna nel dominio delle Z-trasformate
- φ_i e φ_e sono i flussi termici

- $A(z)$, $B(z)$, $D(z)$ sono le matrici di trasferimento, i cui coefficienti sono determinati sulla base delle caratteristiche dei materiali che compongono la parete:

- $A_i(z) = \cosh(l_i \cdot \sqrt{\frac{s \cdot \rho_i c_{p,i}}{\lambda_i}})$

- $B_i(z) = \frac{1}{\lambda_i \sqrt{\frac{s \cdot \rho_i c_{p,i}}{\lambda_i}}} \sinh(l_i \cdot \sqrt{\frac{s \cdot \rho_i c_{p,i}}{\lambda_i}})$

- $D_i(z) = \sinh(l_i \cdot \sqrt{\frac{s \cdot \rho_i c_{p,i}}{\lambda_i}})$

- l_i è lo spessore dell'i-esimo strato
- λ_i è la conduttività dell'i-esimo strato
- ρ_i è la densità dell'i-esimo strato
- $c_{p,i}$ è il calore specifico dell'i-esimo layer

4.3.2 Data set climatici

I dati climatici (temperatura aria esterna [°C], radiazione solare globale [W/m²], umidità relativa [%], velocità del vento [m/s]) costituiscono un aspetto molto importante per la calibrazione del modello in quanto possono influenzare, in maniera anche significativa, il comportamento energetico dell'edificio (*Bhandari, Shrestha, 2012*). In particolare per l'edificio analizzato sono disponibili tre set di dati climatici riportati in Tabella 4.1.

Cod. Modello	Set di dati	Comune	Coordinate stazione meteo	h s.l.m.	Tipo dati
IAS	I.A.S.M.A.	Rovereto	45° 53' 47" N 11° 2' 37" E	204	reali
TN	Meteo Trentino	Rovereto	45° 52' 53" N 11° 01' 02" E	204	reali
TRY	C.T.I.	Trento	46° 61' 23" N 11° 07' 37" E	265	standard

Tabella 4.1. Centraline Meteo

I dati reali sono stati ricavati dalle stazioni meteo della città di Rovereto: in particolare la centralina meteorologica dello IASMA è collocata in

corrispondenza dell'edificio analizzato, per cui si è deciso di non effettuare ulteriori monitoraggi in situ ma di utilizzare i dati delle stazioni di rilevamento disponibili. Le stazioni meteo si trovano nel fondo della valle dell'Adige, ed in Tabella 4.1 sono riportate le coordinate geografiche di riferimento. I dati standard sono rappresentati dal *Test Reference Year* definito per la Provincia di Trento.

In Figura 4.5, 4.6, 4.7 sono riportate le temperature orarie e la radiazione solare per il periodo di riferimento (2 marzo - 26 giugno) considerato nel monitoraggio.

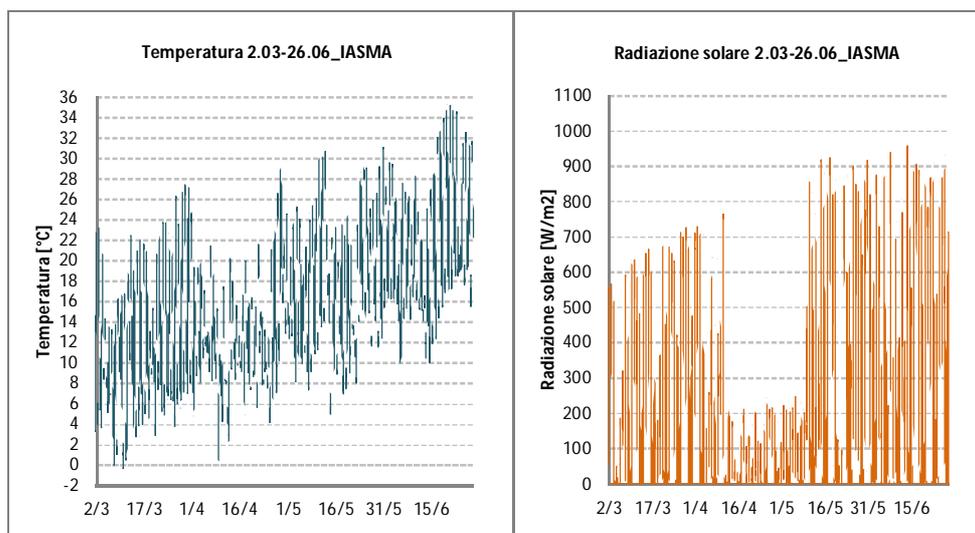


Figura 4.5 a) Temperatura aria b) Radiazione solare dataset IASMA

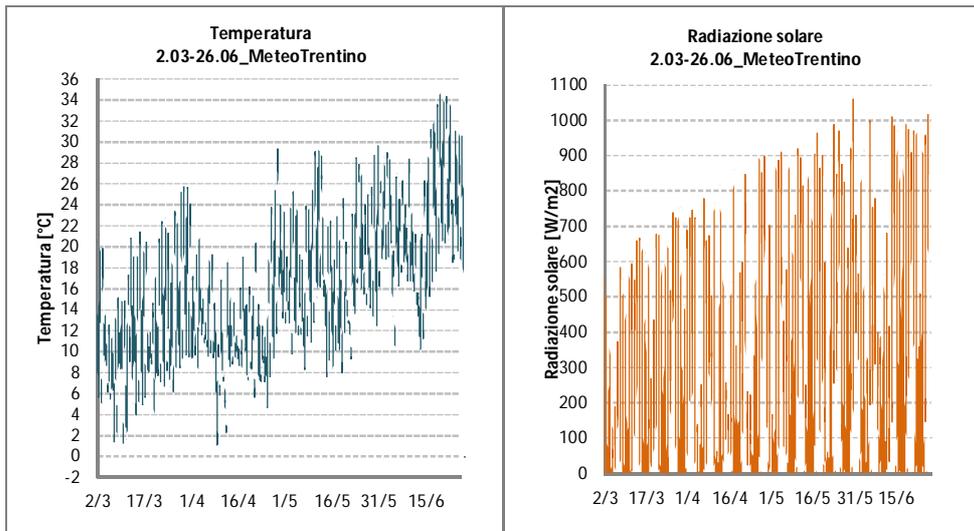


Figura 4.6 a) Temperatura aria b) Radiazione solare dataset Meteo Trentino

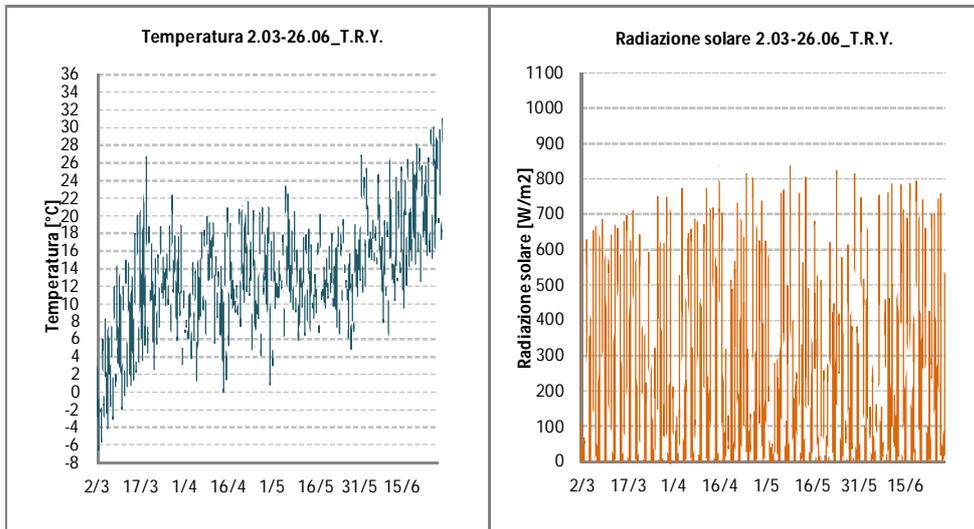


Figura 4.7 a) Temperatura aria esterna b) Radiazione solare Test Reference Year

In fase di analisi è stata riscontrata un'incongruenza nei dati meteo ricavati dalla centralina IASMA; infatti, come si può vedere dalla Figura 4.5 b) la

radiazione solare rilevata dalla stazione meteo assume mediamente un valore pari a $600-700 \text{ W/m}^2$, mentre nel periodo 8.04 - 10.05 la media non raggiunge i 200 W/m^2 . Inoltre, i dati rilevati dalla stazione di Meteo Trentino (Figura 4.6 b) non presentano particolari riduzioni della radiazione solare, che anzi aumenta costantemente nel passaggio dalla stagione invernale a quella estiva; di conseguenza si può concludere che il dato rilevato dalla stazione IASMA nel periodo 08.04 - 10.05 non è corretto.

Per non introdurre un errore nel modello si è deciso di sostituire i valori scorretti con le misure corrispondenti rilevate dalla centralina di Meteo Trentino (Figura 4.8).

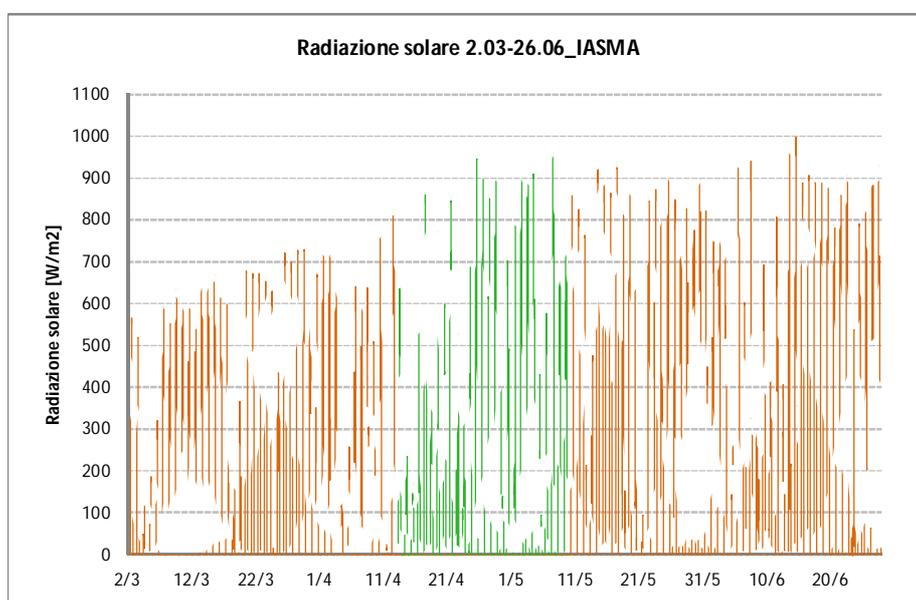


Figura 4.8. Radiazione solare IASMA - corretta

In Figura sono riportati gli andamenti di temperatura dell'aria esterna e la radiazione solare incidente sul piano orizzontali per alcuni giorni scelti come riferimento e per cui verranno riportati i risultati dei modelli di simulazione:

- 9.03 - 11.03 → giorno invernale soleggiato

- 18.03 - 20.03 → giorno invernale nuvoloso
- 21.06 - 23.06 → giorno estivo nuvoloso
- 23.06 - 24.06 → giorno estivo soleggiato

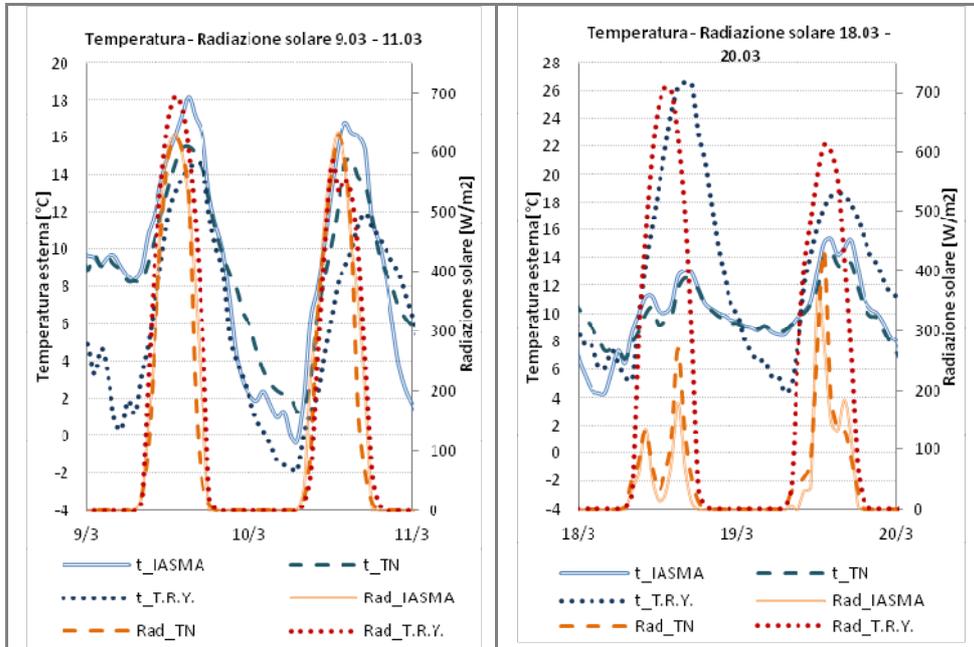


Figura 4.9a). Confronto parametri climatici - dataset analizzati - regime invernale

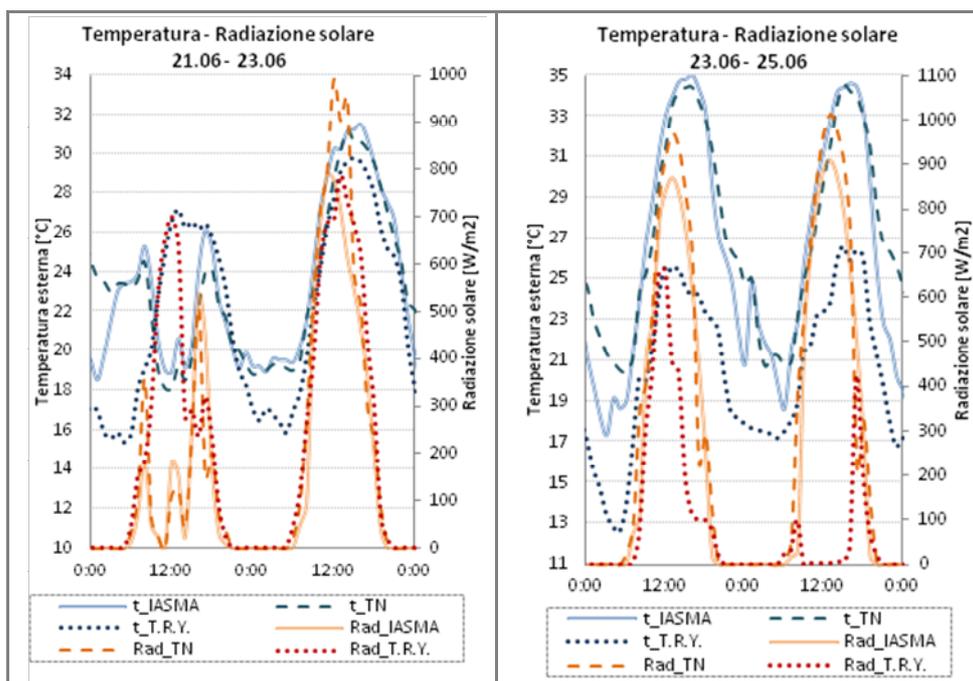


Figura 4.9b). Confronto parametri climatici - dataset analizzati - regime estivo

Dall'analisi dei dati climatici rilevati dalle tre stazioni durante il periodo di misura è emerso che l'anno tipo presenta un andamento notevolmente differente rispetto ai dati delle centraline di Rovereto, specialmente in termini di temperatura e radiazione solare; questo è dovuto al fatto che la centralina climatica da cui è stato ricavato il *test reference year* (T.R.Y.) è collocata nella città di Trento ed inoltre le elaborazioni su base decennale permettono di valutare il trend medio delle variabili climatiche. Tale andamento però può non rappresentare correttamente le particolari condizioni climatiche di un singolo anno.

Si noti come i dati rilevati dalla stazione di Meteo Trentino e di IASMA siano caratterizzati da un andamento pressoché analogo; tuttavia è importante sottolineare che le due centraline si trovano dalla parte opposta della valle e, mentre in regime invernale non si registrano differenze significative, durante il

periodo estivo gli effetti orografici causano scostamenti più significativi in termini di temperatura e radiazione solare soprattutto nelle ore vicine all'alba e al tramonto. Inoltre si noti inoltre come, in alcune giornate di misura come il 9.03, i dati dell'anno tipo siano caratterizzati da un andamento coerente a quello misurato dalle centraline meteo, mentre per il 18.03 le condizioni climatiche contingenti sono completamente diverse da quelle standard. L'impiego di tali dati porterà dunque ad una valutazione non corretta degli apporti solari aumentando quindi, come si vedrà nei paragrafi successivi, lo scostamento fra le previsioni del modello e i dati misurati.

4.3.3 Ipotesi per il calcolo delle infiltrazioni

Per stimare in maniera corretta le dispersioni per ventilazione è necessario determinare la portata di ventilazione, in questo caso, di tipo naturale. In particolare, dato che l'edificio del complesso Manifattura Tabacchi non presenta alcun tipo di impianto termico funzionante, questo parametro costituisce un punto fondamentale per una corretta calibrazione del modello che influenza in maniera significativa la temperatura degli ambienti interni. Nella stima del numero di ricambi orari bisogna considerare le infiltrazioni, l'aerazione diretta degli ambienti e la ventilazione naturale attraverso appositi dispositivi: nel caso dell'edificio analizzato non sono presenti aperture specifiche per la ventilazione naturale, come canali o griglie, e generalmente le finestre rimangono sempre chiuse. Pertanto l'unico contributo da considerare è dato dalle infiltrazioni attraverso l'involucro. Come fonte di tipo standard sono stati considerati i ricambi orari proposti dalla specifica UNI/TS 11300-1. Infatti sebbene essi comprendano anche il contributo dovuto all'aerazione, sono ritenuti una buona stima delle infiltrazioni dell'involucro che, in fase di analisi, mostra la presenza di infissi scadenti, spesso danneggiati e di punti di discontinuità dell'involucro che contribuiscono all'aumento della portata d'aria entrante. Inoltre è stato introdotto anche un ipotesi caratterizzata da un valore costante pari a 0.5 h^{-1} , valido per gli edifici con infissi scadenti ai sensi della D.G.R. 8745/2009. Oltre ai ricambi standard sono state introdotte due procedure che prevedono il calcolo dettagliato sulla base delle caratteristiche dell'edificio e delle condizioni

climatiche: la prima è il metodo diretto per il calcolo delle infiltrazioni proposto dalla norma UNI EN 15242:2008 (Figura 4.10 a), che tiene in considerazione la differenza di temperatura tra ambiente interno ed esterno e la velocità del vento del sito; la seconda è la procedura proposta dall'ultima versione dell' ASHRAE handbook 2009 (Figura 4.10 b). I diversi ricambi orari utilizzati sono riportati in Tabella 3.

Codice simulazione	Numero di ricambi orari [h^{-1}]	Fonte normativa
0.3	0.3	UNI TS 11300-1
0.5	0.5	D.G.R. 8745/2009
EN	variabile	UNI EN 15242: 2008
ASH	variabile	ASHRAE

Tabella 4.2. Numero di ricambi d'aria orari

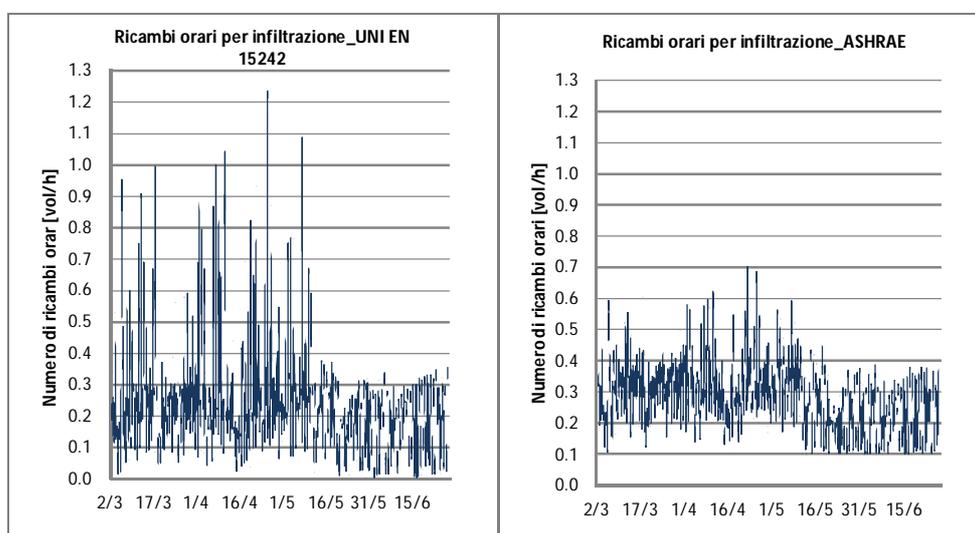


Figura 4.10. Ricambi orari per infiltrazione **a)** Calcolo UNI EN 15242
b) Valutazione Standard ASHRAE 2009

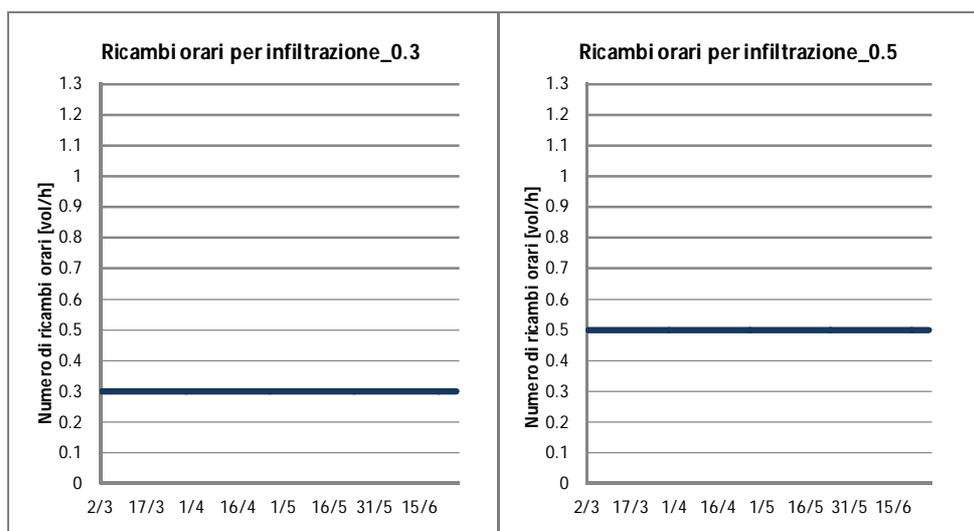


Figura 4.11. Ricambi orari per infiltrazione a) 0.3 vol/h b) 0.5 vol/h

4.3.4 Ipotesi per la determinazione delle proprietà termo fisiche dell'involucro

Come evidenziato nel Capitolo 3, la determinazione della trasmittanza termica dell'involucro negli edifici esistenti risulta spesso difficoltosa a causa della mancanza di informazioni precise sulla reale composizione degli elementi e sulle proprietà termofisiche dei materiali. Inoltre, qualora fossero presenti riferimenti progettuali che permettano di definire una stratigrafia, possono verificarsi errori anche significativi se non si tengono adeguatamente in considerazione gli effetti dovuti alla presenza di umidità nelle muratura sulla conduttività termica dei materiali. Per questi motivi l'analisi sperimentale basata su misure in situ rappresenta la procedura ottimale per la stima della trasmittanza termica dell'involucro edilizio.

In questo lavoro le caratteristiche dell'involucro sono state dedotte sulla base di due approcci:

- *Standard* → la determinazione della trasmittanza termica è stata effettuata per analogia sulla base dell'abaco contenuto nell'Appendice B della specifica UNI/TS 11300-. Codice simulazione "STD"

- *Sperimentale* → indagini in situ sulla base alle indicazioni fornite dallo standard ISO 9869 Codice simulazione “MS” condotte su una parete tipo dell'involucro esterno.

Per quanto riguarda l'utilizzo delle strutture standard proposte dalla specifica tecnica UNI/TS 11300-1, è stata ipotizzata una composizione delle pareti di involucro in muratura mista con mattoni e sassi come mostrato in Figura 7, considerata l'elevata variabilità degli spessori rilevati in opera, la tipologia di manufatto, l'epoca di costruzione e le informazioni progettuali a disposizione. Questa parete, di spessore 65 cm (2cm - 61cm - 2cm), è caratterizzata da una conduttanza standard pari a $\Lambda = 1.372 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$.

Per quanto riguarda la valutazione sperimentale della conduttanza della parete, sono state eseguite le misure secondo la metodologia di acquisizione ed elaborazione dati fornita dalla norma ISO 9869:1994. Dalle analisi è stato ricavato un valore di conduttanza che caratterizza la parete di involucro esterno $\Lambda = 1.55 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$.

4.3.5. Indice delle simulazioni

Nell'ambito di questo studio è stata definita una serie di simulazioni mediante l'uso del software TRNSYS (Figura 4.12); i modelli sono caratterizzati da diverse combinazioni dei parametri definiti nei precedenti paragrafi, che sono stati determinati in base a valori standard, oppure attraverso valutazioni più accurate (calcoli dettagliati e misure in situ).

Ciascuna simulazione è caratterizzata da un codice che la identifica in maniera univoca e che ne definisce le ipotesi di calcolo secondo quanto riportato in Tabella 4.4.

Dal confronto con i dati del monitoraggio è possibile individuare quale simulazione approssimi in maniera più accurata il comportamento reale dell'edificio, determinando l'incidenza dei diversi parametri sul risultato finale, per definire il fattore più rappresentativo per il tipo di costruzione analizzata.

	Dati Climatici			Ventilazione			Conduttanza involucro		
	IASMA	MeteoTn	T.R.Y.	0.3	0.5	UNI EN 15242:2008	ASHRAE	Standard	Misurata
IAS_03_STD	X			X				X	
TN_03_STD		X		X				X	
TRY_03_STD			X	X				X	
IAS_05_STD	X				X			X	
TN_05_STD		X			X			X	
TRY_05_STD			X		X			X	
IAS_EN_STD	X					X		X	
TN_EN_STD		X				X		X	
TRY_EN_STD			X			X		X	
IAS_ASH_STD	X						X	X	
TN_ASH_STD		X					X	X	
TRY_ASH_STD			X				X	X	
IAS_03_MS	X			X					X
TN_03_MS		X		X					X
TRY_03_MS			X	X					X
IAS_05_MS	X				X				X
TN_05_MS		X			X				X
TRY_05_MS			X		X				X
IAS_EN_MS	X					X			X
TN_EN_MS		X				X			X
TRY_EN_MS			X			X			X
IAS_ASH_MS	X						X		X
TN_ASH_MS		X					X		X
TRY_ASH_MS			X				X		X

Tabella 4.4. Indice delle simulazioni

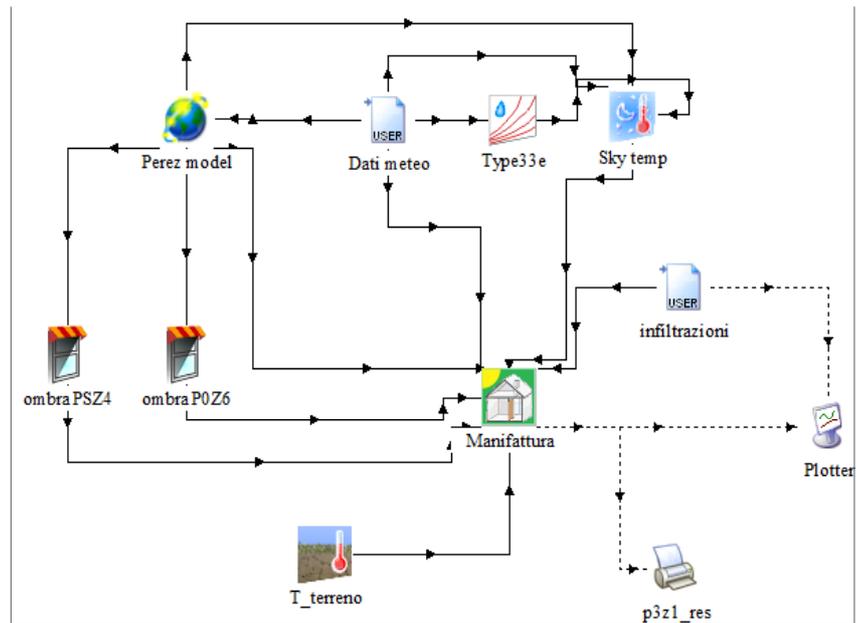


Figura 4.14 - Schema del modello in TRNSYS

4.4 Acquisizione dati per la calibrazione

Come anticipato nei paragrafi precedenti, l'edificio analizzato è privo di impianti di climatizzazione, di conseguenza la calibrazione è stata effettuata attraverso l'impiego delle temperature misurate ad intervalli orari all'interno di un ambiente di controllo, la zona P3_Z1.

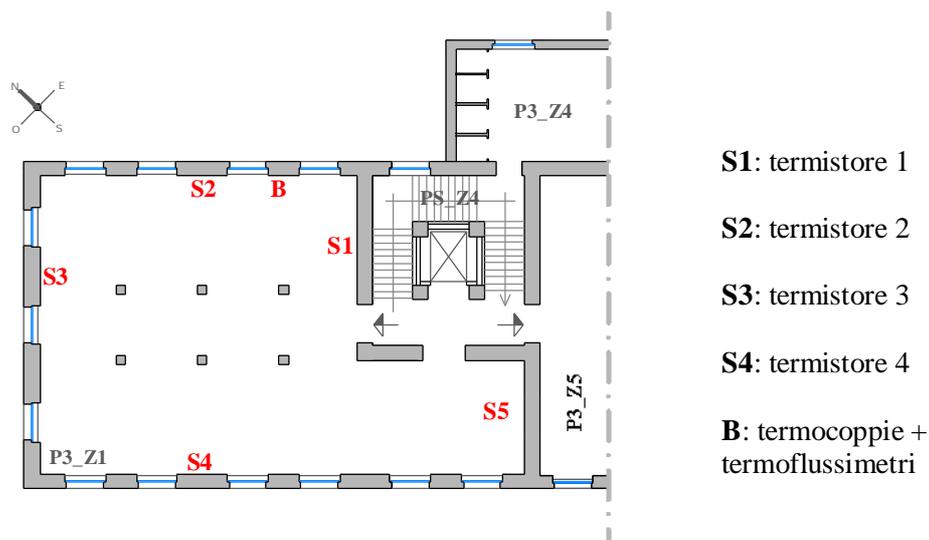


Figura 4.12. Posizionamento della strumentazione

In particolare, come mostrato in Figura 4.12 è stata posizionata in corrispondenza del punto B in Figura 3 una termoresistenza per la misura della temperatura dell'aria all'interno dell'ambiente, ed in corrispondenza dei punti S1, S2, S3, S4 sono stati installati dei dispositivi termistore che registrano la temperatura delle superfici del locale P3_Z1;



Figura 4.13 Dispositivo termistore

Le misure sono state condotte nell'arco di periodo differenti, a seconda delle capacità di acquisizione degli strumenti: infatti i termistore sono caratterizzati da una capacità limitata e vengono utilizzati per brevi intervalli di tempo. In particolare, come mostrato in Tabella 4.3 le misure della temperatura della superficie S2 e dell'aria all'interno dell'ambiente sono state acquisite sia in regime invernale che estivo.

Cod. rilievo	Temperatura rilevata	Periodo di rilevamento
Tambiente	Temperatura aria ambiente	02.03.2012 - 26.06.2012
T_S1	Temperatura superficie S1	02.03.2012 - 14.04.2012
T_S2	Temperatura superficie S2	02.03.2012 - 26.06.2012
T_S3	Temperatura superficie S3	02.03.2012 - 14.04.2012
T_S4	Temperatura superficie S4	02.03.2012 - 14.04.2012
T_S5	Temperatura superficie S5	02.03.2012 - 14.04.2012

Tabella 4.5. Periodo di monitoraggio

4.5 Analisi e discussione dei risultati

4.5.1 Valutazione degli indici di errore

I risultati e gli indici riportati nel testo sono relativi agli intervalli di misura delle temperature reali dell'edificio; in particolare sono stati valutati:

- errore medio (*MBE*);
- scarto quadratico medio (*RMSE*);
- indice di Pearson (*r*).

tra i dati ricavati dai monitoraggi (*goal standard*) e i risultati delle simulazioni, sia in relazione alla temperatura della zona P3_Z1 sia alla temperatura superficiale misurata in corrispondenza dei punto S1, S2, S3, S4, S5 (Figura 4.12).

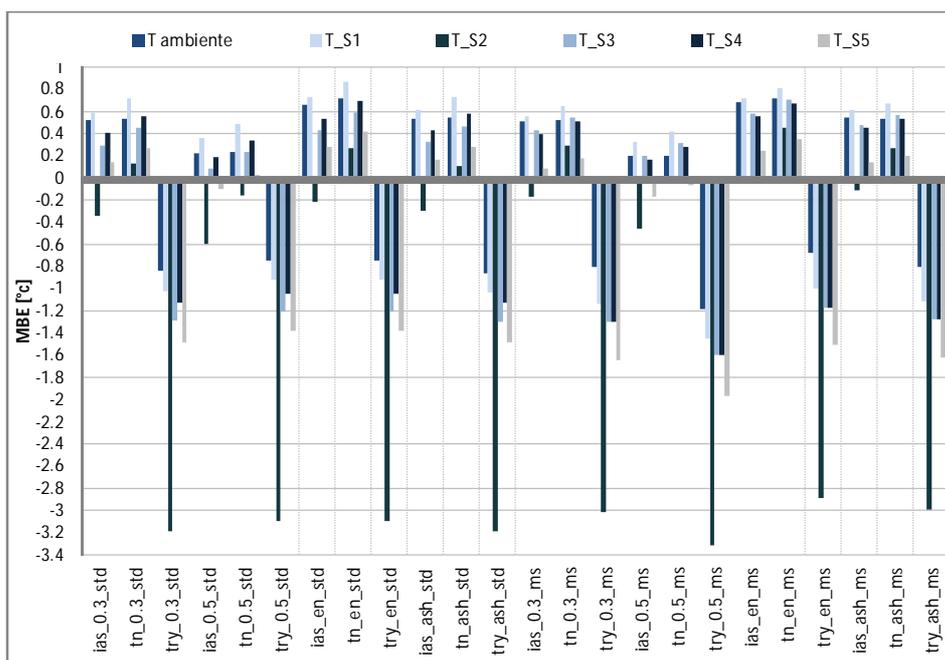


Figura 4.14. Errore medio - MBE (orario)

Nel grafico in Figura 4.15 sono riportati gli indici di errore medio associati alle simulazioni calcolati sulla base dello scostamento orario tra simulazioni e misure reali. Per prima cosa emerge che le simulazioni effettuate con il dataset TRY sottostimano le temperature reali e si contraddistinguono per un errore medio generalmente superiore ad 1°C , con errori molto più significativi per la temperatura della superficie S2 che è caratterizzata da valori di *MBE* superiori a 3°C , mentre le simulazioni associate agli altri dati climatici sono caratterizzate da un errore prevalentemente positivo, cioè sovrastimano le temperature reali misurate con scostamenti piuttosto ridotti dell'ordine di 0.5°C , e sempre inferiori ad 1°C . Inoltre la temperatura S2, contrariamente a tutte le altre superfici, è generalmente sottostimata da tutte le simulazioni; questo può essere dovuto a due fattori: il tipo di strumentazione impiegato e il periodo di monitoraggio considerato.

Infatti per la misura delle temperature della superficie S2 è stata impiegata una termoresistenza, mentre per le altre superfici dei dispositivi termistore, caratterizzati da una tolleranza di 0.5°C ed associati ad un livello di precisione inferiore. Inoltre l'indice MBE è dello stesso ordine di grandezza della sensibilità dei termistore, per cui è possibile che lo scostamento che caratterizza le temperature delle superfici, ad eccezione di S2, sia in parte dovuto alla minor precisione della misura dello strumento.

Inoltre il periodo di monitoraggio della temperatura di S2 comprende sia il regime invernale che quello estivo mentre le altre superfici sono state monitorate solo durante la stagione invernale, di conseguenza l'errore può essere di natura differente. Per comprendere in maniera più completa questi aspetti è necessario approfondire verificando anche andamenti orari e giornalieri.

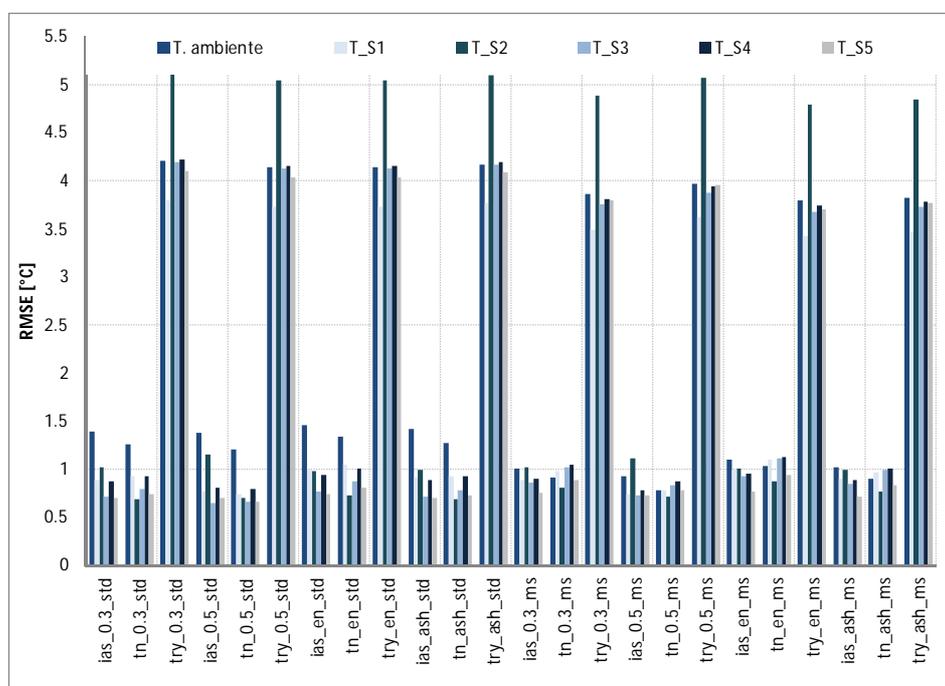


Figura 4.16. Scarto quadratico medio - RMSE (orario)

Dal grafico di *MBE* emerge inoltre che le simulazioni effettuate con il dataset climatico IASMA sono caratterizzate da un errore medio inferiore rispetto a quelle definite con i dati ricavati dalle centraline di Meteo Trentino, tuttavia come detto in precedenza l'indice *MBE* non è un indicatore di validità assoluta in quanto gli errori di segno opposto si compensano. È necessario quindi introdurre l'indice *RMSE*, riportato in Figura 4.16 che conferma la scarsa rappresentatività dei dati TRY, che sono caratterizzati da *RMSE* superiori a 4°C con valori di 5°C per la superficie S2; per le simulazioni definite con i dati meteo reali *RMSE* è sempre inferiore a 1.5°C.

Riguardo agli altri due dataset climatici, l'analisi del grafico evidenzia come, a parità di tutte le altre condizioni, le simulazioni definite con i dati Meteo Trentino sono caratterizzate da un valore di *RMSE* generalmente inferiore di 0.25°C rispetto alle corrispondenti simulazioni con dati IASMA; quindi contrariamente a quanto concluso dall'analisi dell'andamento di *MBE*, i dati climatici Meteo Trentino sono quindi più rappresentativi delle condizioni reali.

Un altro aspetto da sottolineare è la diminuzione del valore di *RMSE* delle simulazioni definite con le caratteristiche reali dell'involucro (MS) rispetto alle simulazioni standard (STD). In particolare le differenze più significative si osservano per la temperatura della superficie S2 e dell'aria all'interno dell'ambiente: lo scarto quadratico medio delle simulazioni "MS" rispetto a quelle "STD" è inferiore di 0.5°C per l'aria e di 0.2°C per la superficie S2. La differenza è dovuta alla maggiore attendibilità della misura in opera della trasmittanza della parete ed alla valutazione della più approfondita della capacità termica della copertura.

Considerando gli indici *RMSE* riportati nel grafico si nota che lo scarto quadratico medio associato alla temperatura della superficie S4 è maggiore rispetto a quello che caratterizza le altre superfici; la parete S4 è esposta a Sud-Ovest, di conseguenza la radiazione solare influenza in maniera significativa la temperatura della superficie interna della parete. Uno scostamento più marcato tra simulazioni e dato reale è dovuto a una valutazione non corretta della radiazione solare incidente sulla superficie della parete Sud-Ovest.

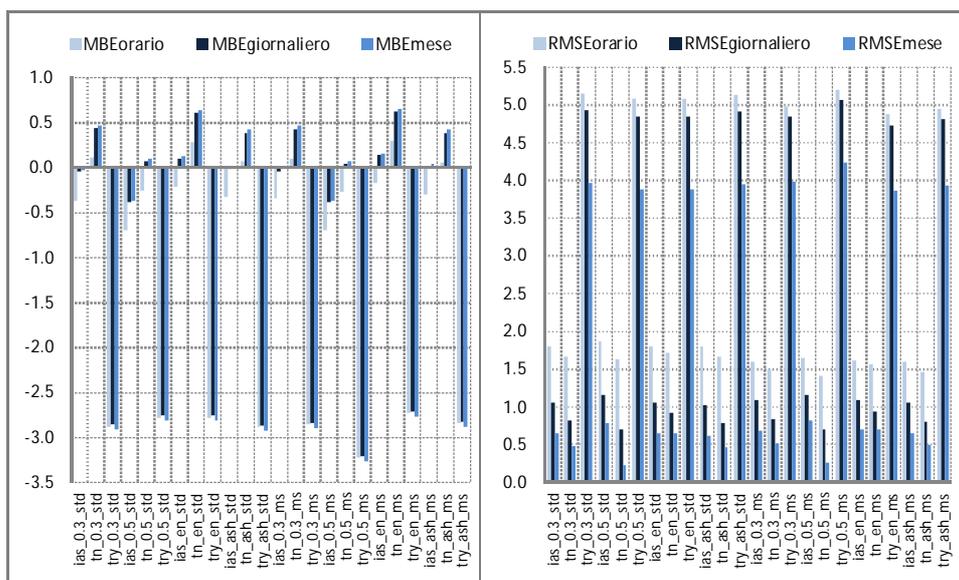


Figura 4.17. a) MBE temperatura superficie S2 b) RMSE temperatura superficie S2

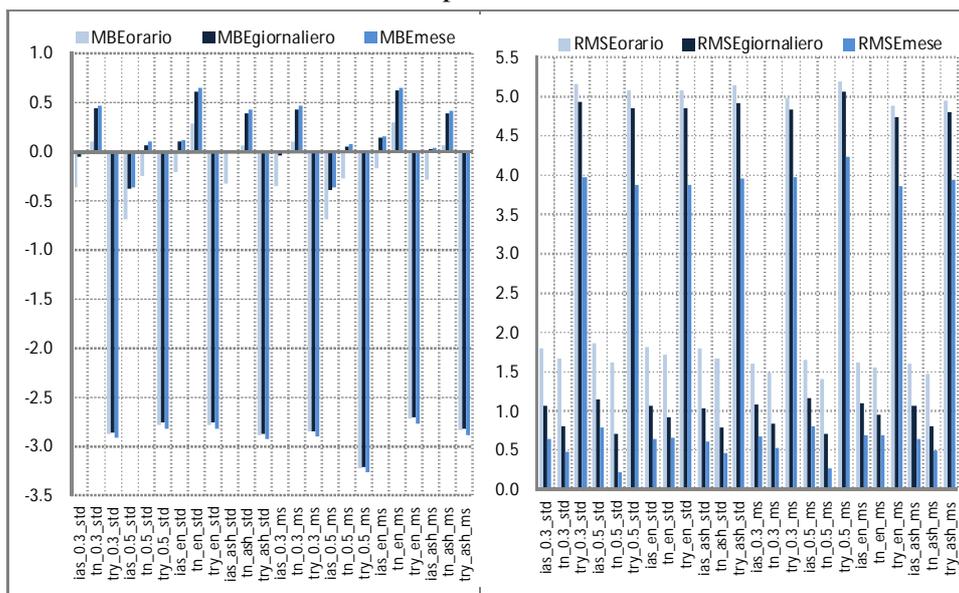


Figura 4.18 a) MBE temperatura aria b) RMSE temperatura aria

Per una valutazione più completa dell'errore è opportuno confrontare gli indici *MBE* e *RMSE* calcolati sulla base delle temperature medie giornaliere e delle temperature medie mensili con i valori associati alle valutazioni orarie. I grafici in Figura 4.17 e 4.18 riportano l'errore medio e lo scarto quadratico medio della temperatura dell'aria interna e della superficie S2 calcolati su base oraria, mensile e giornaliera, espressi in °C. Si noti che passando dal calcolo dell'errore medio orario a quello giornaliero e mensile non ci sono variazioni significative, in quanto anche per il calcolo dell'indice stesso viene fatta una media dei valori simulati per cui l'errore dovuto agli scostamenti nei momenti di picco positivo e negativo vengono compensati anche nel caso di valutazioni orarie.

In Figura 4.17b e 4.18b si può osservare una progressiva riduzione del valore di *RMSE* al passaggio dalle medie orarie a quelle giornaliere e mensili, che risulta molto evidente nel grafico relativo alla temperatura dell'aria. Questo dipende dal fatto che gli elevati valori di *RMSE* per la temperatura interna sono dovuti ad oscillazioni significative durante il corso della giornata (come si vedrà nei grafici relativi agli andamenti riportati nel paragrafo 4.4) e a scostamenti importanti nei momenti di picco positivo e negativo tra temperature misurate e simulate, che si compensano nel computo della media giornaliera. Anche nel caso della temperatura delle superfici si possono fare analoghe considerazioni, nonostante la variazione tra *RMSE* orario e giornaliero sia meno evidente in quanto, come si vedrà nei grafici successivi, l'andamento delle temperature simulate nell'arco della giornata risulta più regolare (risultati completi in Appendice A).

4.5.1 Andamento delle temperature nell'ambiente di controllo

4.5.1.1 Temperature orarie

Per un'interpretazione corretta dell'errore è necessario confrontare gli andamenti delle temperature misurate all'interno della zona P3_Z1 con i risultati dei modelli di simulazione. Per chiarezza nei grafici successivi sono stati riportati gli andamenti delle due simulazioni che forniscono i valori superiori ed

inferiori dell'intervallo in cui sono comprese gli altri risultati per ciascun dataset climatico.

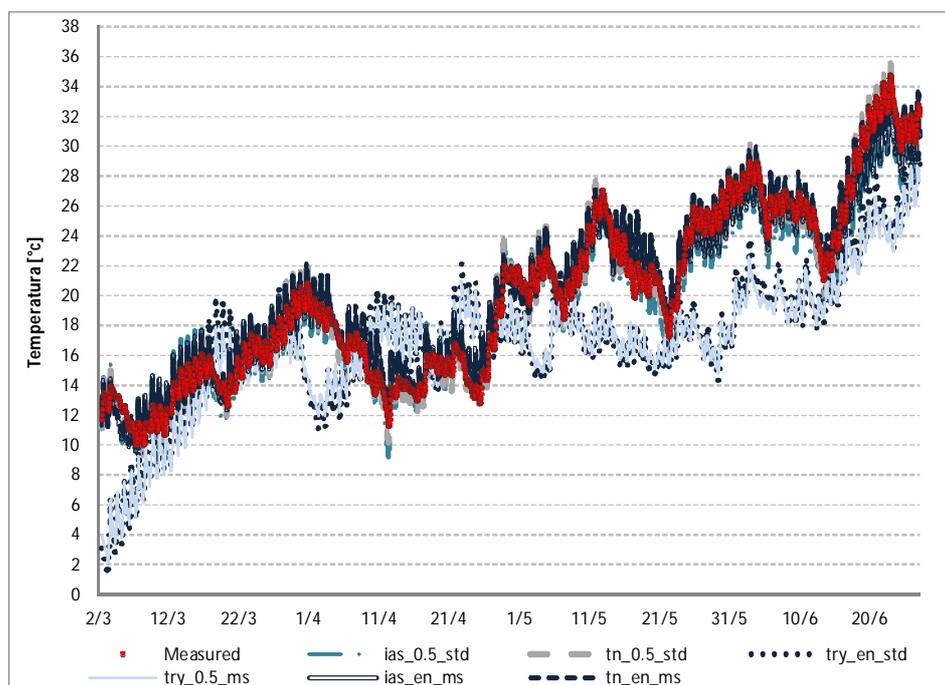


Figura 4.19. Temperatura superficiale interna S2 2.03 - 26.06

In Figura 4.19 sono riportate le temperature medie orarie misurate e simulate in corrispondenza del punto S2, mentre la Figura 4.20 mostra gli andamenti della temperatura dell'aria per il periodo di monitoraggio.

Dall'analisi generale dei grafici si può confermare che le simulazioni meno rappresentative siano quelle definite attraverso l'uso del *Test Reference Year*: per un numero di giorni significativo i dati meteo standard non sono adatti a riprodurre il comportamento dell'edificio, in quanto non corrispondono alle reali condizioni climatiche che si sono verificate durante il monitoraggio.

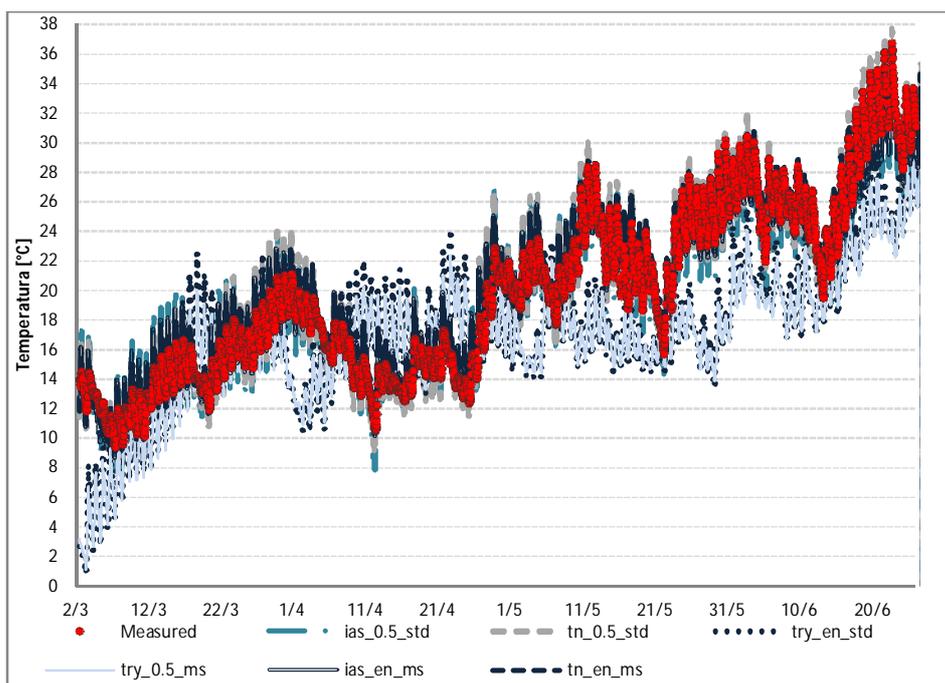


Figura 4.20. Temperatura dell'aria interna alla zone P3_Z1

Le simulazioni associate agli altri *dataset* climatici, invece, riproducono l'andamento generale della temperatura reale in maniera corretta, tuttavia si può osservare una generale sovrastima dei picchi positivi e negativi, che risulta più marcata per le condizioni dell'aria interna, soggette a variazioni più significative nell'arco della giornata. Per valutare in maniera accurata questi aspetti sono stati analizzati nel dettaglio gli andamenti di temperatura per alcune giornate tipo:

- 9.03 - 11.03: giornata invernale soleggiata
- 18.03 - 20.03: giornata invernale nuvolosa
- 21.06 - 23.06: giornata estiva nuvolosa
- 23.06 - 24.06: giornata estiva soleggiata

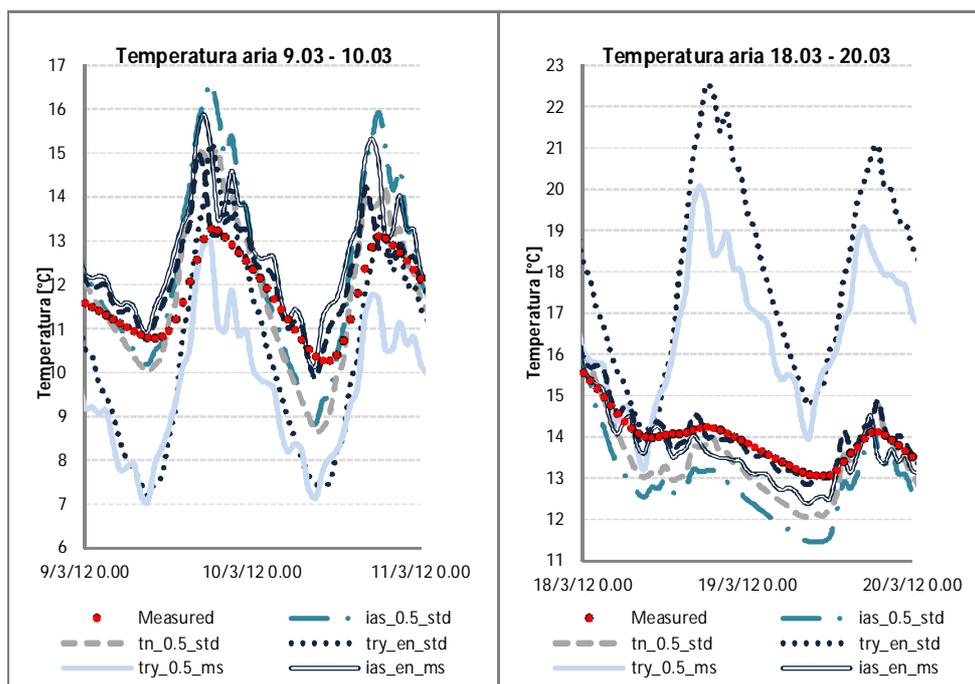


Figura 4.21. Andamenti temperatura dell'aria, regime invernale **a)** giornata soleggiata **b)** giornata nuvolosa

In regime invernale si osserva che il modello non riproduce in maniera corretta il comportamento nei momenti di picco delle giornate soleggiate (Figura 4.21a): si verifica uno scostamento di 2-3°C per il picco positivo e di 3°C per il picco negativo delle simulazioni con TRY, le simulazioni IASMA invece sono caratterizzate da un errore in corrispondenza del picco positivo compreso tra 2-3°C, mentre per il picco negativo 1°C. Le simulazioni caratterizzate da un andamento più prossimo a quello misurato sono quelle definite con il dataset di Meteo Trentino, caratterizzate da una differenza tra reale e simulato di 1°C, per il picco positivo, mentre nelle fasi di picco negativo l'errore è trascurabile. Un ulteriore aspetto da sottolineare è la migliore rappresentatività delle simulazioni "MS", in virtù di una buona corrispondenza tra le caratteristiche dell'involucro reali e simulate.

Infatti in inverno i modelli sovrastimano sempre in maniera significativa i picchi positivi, mentre i picchi negativi sono riprodotti correttamente dai modelli “MS” che sono più stabili, e sono sovrastimati dalle simulazioni “STD”.

Invece nelle giornate invernali nuvolose i modelli sono riproducono in maniera più attendibile l’andamento delle temperature (Figura 4.21b): si osserva un assenza di picchi di temperatura dovuti alla radiazione solare, di conseguenza lo scostamento tra comportamento reale e simulato è molto ridotto, e gli andamenti sono fortemente correlati, in particolare per i modelli caratterizzati dal dataset di Meteo Trentino. I modelli IASMA, invece, si discostano di 0.5°C per la simulazione “MS” e di 1.5°C per la simulazione “STD”, confermando le considerazioni relative alla giornata soleggiata.

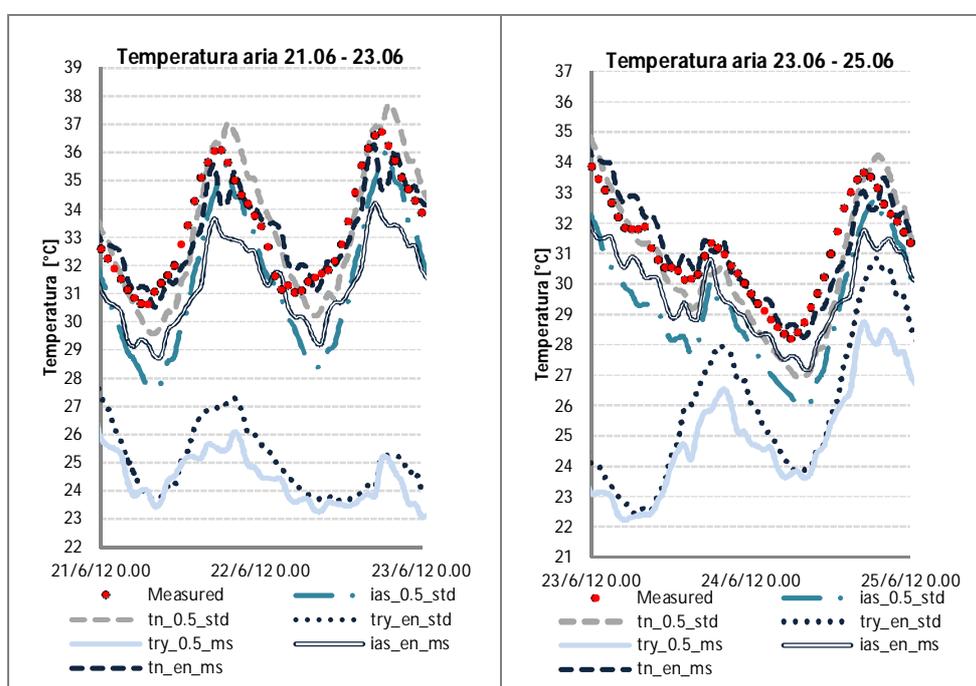


Figura 4.22. Andamenti temperatura dell’aria, regime estivo **a)** giornata soleggiata **b)** giornata nuvolosa

I valori ricavati dalle simulazioni con il Try sono completamente inattendibili, in quanto le condizioni della giornata reale non corrispondono a quelle standard contenute nel dataset, che riporta un andamento della radiazione solare tipico di una giornata di sole. In regime estivo il modello è in grado di riprodurre in maniera più efficace il comportamento reale dell'edificio: a parte i modelli costruiti con il TRY che sono caratterizzati dal problema già riscontrato in precedenza, cioè che le condizioni dell'anno standard non corrispondono a quelle reali, i modelli IASMA e Meteo Trentino forniscono risultati rappresentativi: in particolare i modelli Meteo Trentino sono caratterizzati da un errore massimo di circa 1°C e, per la maggior parte della giornata, lo scostamento è mediamente di 0.5°C.

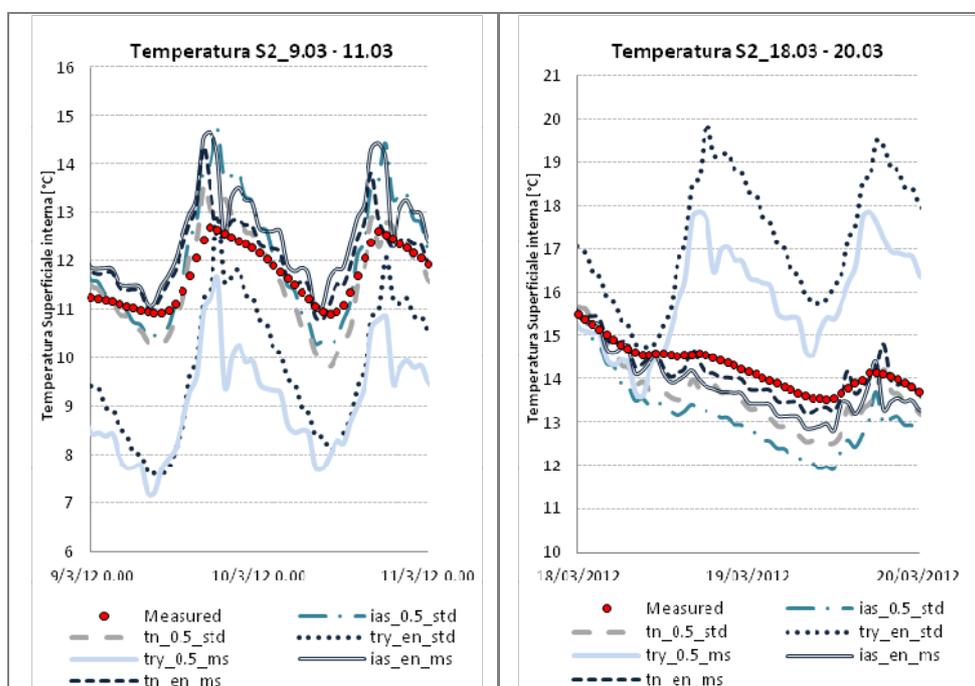


Figura 4.23. Andamenti temperatura superficie S2, regime invernale a) giornata soleggiata b) giornata nuvolosa

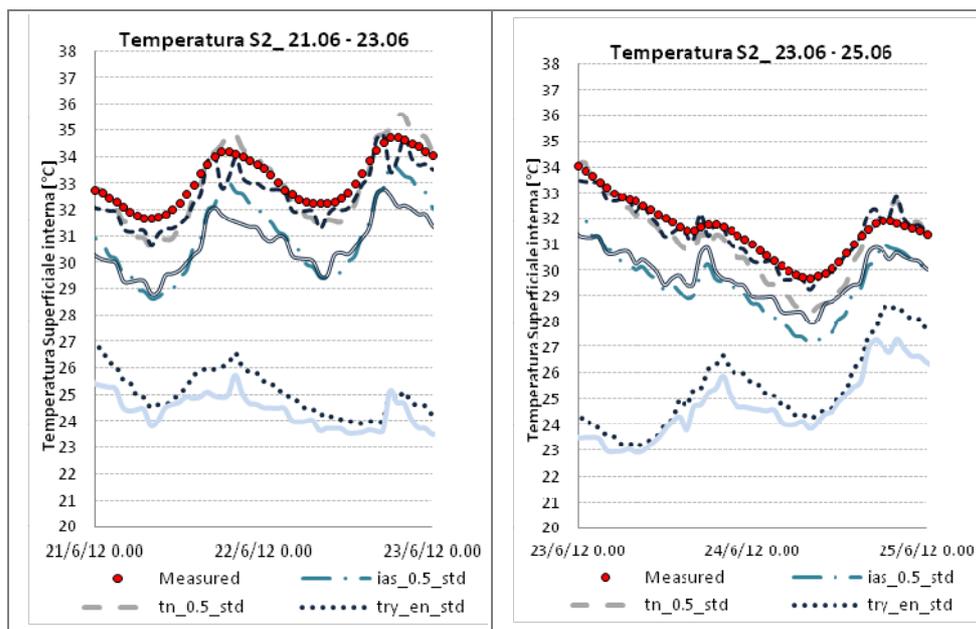


Figura 4.24. Andamenti temperatura superficie S2, regime estivo **a)** giornata soleggiata **b)** giornata nuvolosa

Contrariamente al regime invernale i picchi positivi sono generalmente ben riprodotti dai modelli, solo alcune simulazioni (tn_0.5_std e tn_en_ms) sovrastimano i picchi. In questo caso le temperature reali sono caratterizzate da oscillazioni più significative.

Per la giornata estiva nuvolosa in Figura 4.22 b questo caso si osserva stratificazione degli andamenti in relazione al dataset climatico di riferimento: i modelli TRY sono caratterizzati da temperature inferiori di circa 3-5°C nel corso delle giornate analizzate. I modelli IASMA invece tendono a sottostimare la temperatura reale, in particolare l'inizio della giornata di osservazione che presenta uno scostamento di circa 2°C, che nel corso della giornata si riduce a 0.5°C: in regime estivo è più significativa l'influenza del vicino corso d'acqua.

Le simulazioni Meteo Trentino invece sono caratterizzate da uno scostamento massimo di 0.5°C e in alcuni momenti della giornata la simulazione tn_en_ms riproduce correttamente la temperatura reale.

In Figura 4.23 - 4.24 sono riportati gli andamenti delle temperature misurate e simulate in corrispondenza della superficie S2: le considerazioni generali sono analoghe a quelle relative alla temperatura dell'aria. Tuttavia è importante notare come, rispetto ai grafici precedenti (Figura 4.20a, b - Figura 4.21a, b), le temperature reali e simulate siano soggette a minori oscillazioni ed i modelli si discostano in corrispondenza dei picchi di temperatura, ma in maniera meno marcata. Infatti, ad eccezione delle simulazioni con il TRY che sono soggette allo stesso errore riscontrato in precedenza dovuto ai dati meteo, lo scostamento massimo non supera i 2°C sia nelle giornate soleggiate che nelle giornate nuvolose.

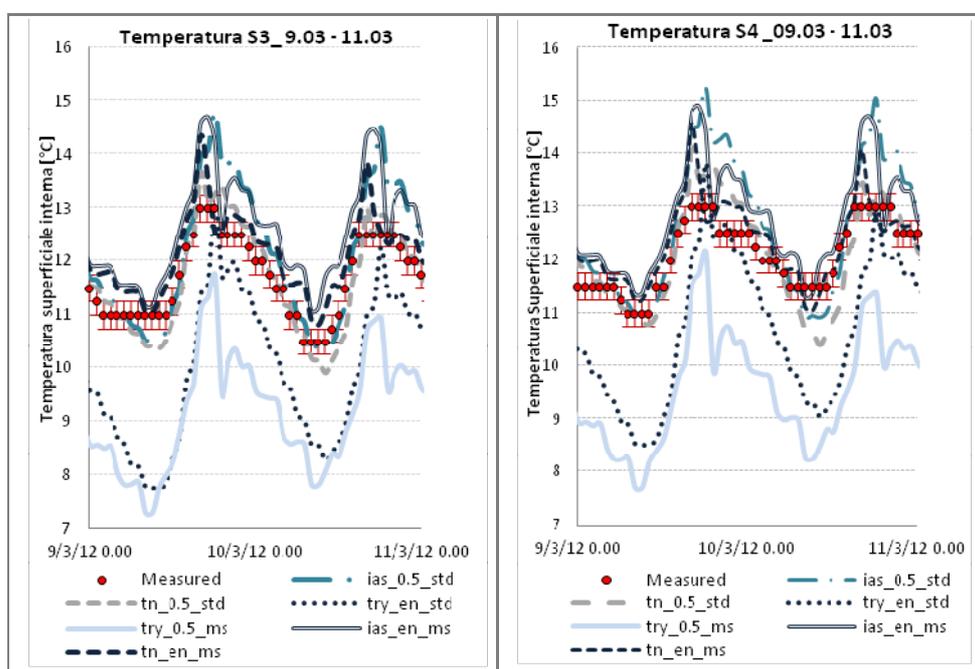


Figura 4.24. Andamenti temperatura superficie S3-S4, regime invernale a) S3 giornata soleggiata b) S4 giornata soleggiata

In regime estivo (Figura 4.24) i modelli definiti con i dati climatici di Meteo Trentino riproducono con uno scostamento massimo di 0.5°C, sempre in

corrispondenza dei picchi di temperatura, l'andamento sia nella giornata soleggiata che nuvolosa; in particolare si osservi come la simulazione *tn_en_ms*, in cui sono modellate le caratteristiche dell'involucro rilevate in opera, sia associata ad un errore trascurabile rispetto all'andamento reale.

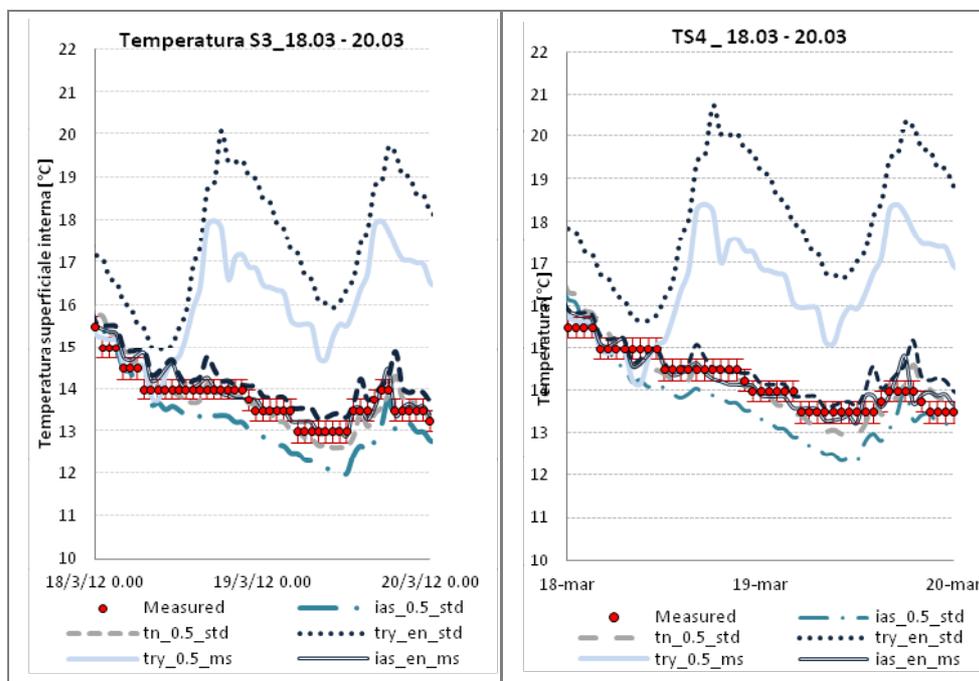


Figura 4.25. Andamenti temperatura superficie S3-S4, regime invernale a) S3 giornata nuvolosa b) S4 giornata nuvolosa

I grafici in Figura 4.25 a-d sono relativi alle superfici S3 e S4 per cui le temperature sono state registrate per il periodo invernale con uno strumento caratterizzato da una sensibilità di 0.5°C . Per questo motivo la misura indicata dallo strumento è rappresentata con un punto, mentre le barre verticali rappresentano l'intervallo in cui può ricadere il valore reale della temperatura. È significativo notare come nella giornata soleggiata (Figura 4.25 a,b), a parità di temperatura misurata per entrambe le superfici, nei momenti di picco i modelli sono associati ad un errore maggiore di 0.5°C per la superficie S4, esposta a

Sud Ovest rispetto alla superficie S3 esposta a Nord Ovest. Questo risultato dimostra che la radiazione solare utilizzata nei modelli si discosta da quella reale ed influenza maggiormente la temperatura della parete esposta a Sud Ovest.

4.5.1.2 Temperature medie giornaliere e mensili

Si analizzano gli andamenti giornalieri e mensili relativi al periodo di monitoraggio della temperatura dell'aria interna misurata e ricavata attraverso le simulazioni.

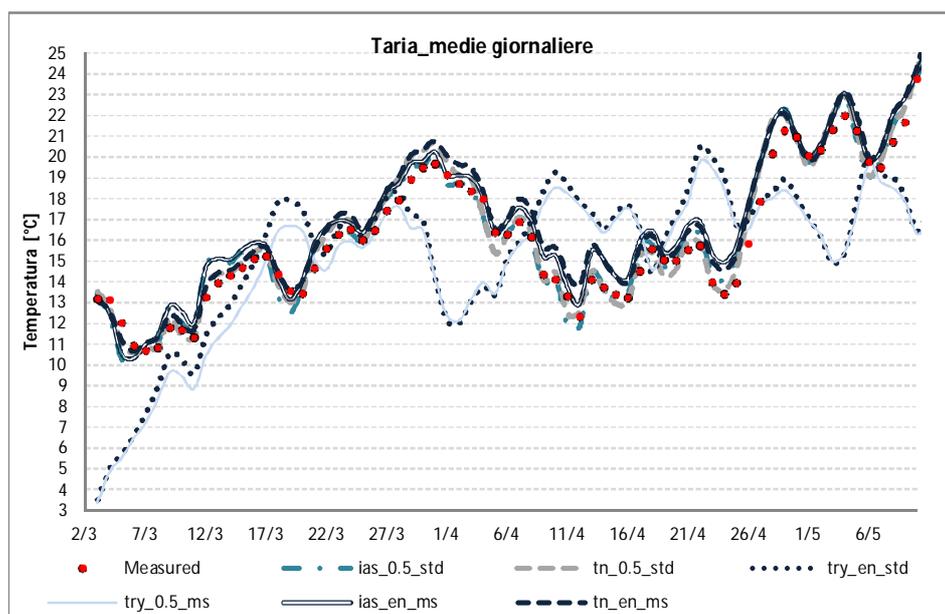


Figura 4.26. Andamento giornaliero della temperatura dell'aria interna

In termini di temperature medie giornaliere i modelli TRY non sono in grado di riprodurre il comportamento reale dell'edificio, confermando le tendenze riscontrate dall'analisi degli andamenti orari.

Invece per le simulazioni effettuate con gli altri due dataset, le medie giornaliere sono caratterizzate da uno scostamento generalmente inferiore a 0.5°C lungo tutto l'intervallo di monitoraggio; in particolare la simulazione

tn_0.5_std è caratterizzata da un andamento coerente con i valori reali di temperatura per la maggior parte dell'intervallo considerato.

Questo andamento conferma le ipotesi avanzate dall'analisi dei grafici relativi allo scarto quadratico medio orario, giornaliero e mensile: considerando i valori medi della giornata i picchi di temperatura positivi si compensano con quelli negativi e lo scostamento globale si riduce. Inoltre la media giornaliera della temperatura risente meno della risposta dell'involucro, soprattutto in termini di sfasamento, di conseguenza la diminuzione dei valori di *RMSE* indica che i modelli non riproducono in maniera corretta la risposta dinamica delle strutture.

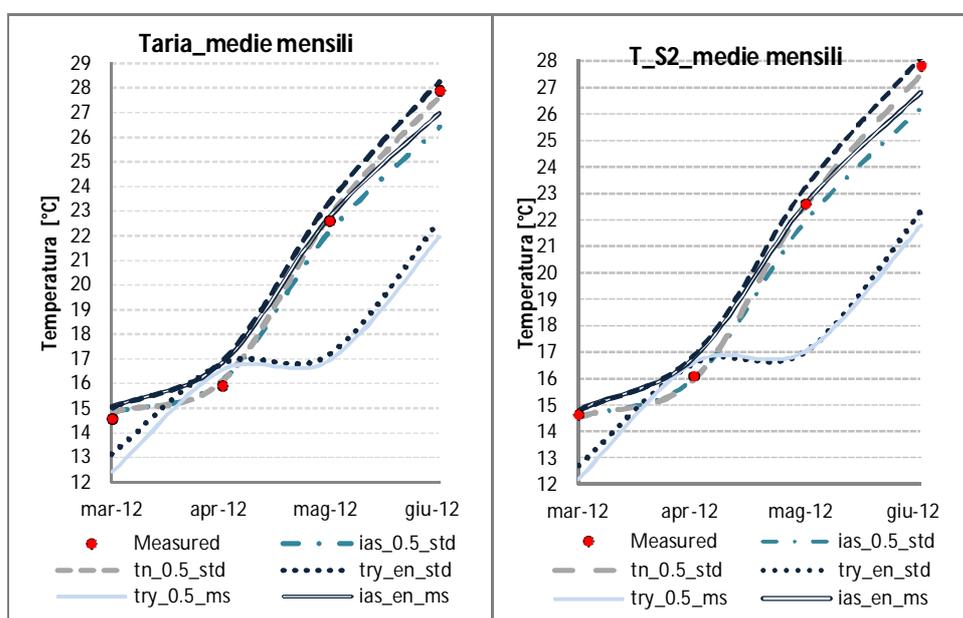


Figura 4.27 Temperature medie mensili a) ambiente interno b) superficie S2

In termini di medie mensili (Figura 4.27) si possono evidenziare alcuni aspetti riscontrati in precedenza: i modelli TRY non permettono di ricostruire correttamente l'andamento delle temperature, nemmeno nel caso di una maggiore approssimazione; i modelli IASMA sono caratterizzati da una

sottostima delle temperature reali dei mesi di maggio e giugno a causa della maggiore influenza delle condizioni orografiche sulle condizioni microclimatiche. Il modello che meglio approssima il comportamento reale dell'edificio in termini di medie mensili è la simulazione *tn_0.5_std*, che implementa il dataset climatico di Meteo Trentino, le caratteristiche standard dell'involucro e un numero di ricambi per infiltrazione pari a 0.5 vol/h.

4.6 Analisi multicriterio

Dal confronto in termini di errore medio, scarto quadratico medio e indice di Pearson calcolati tra i risultati delle simulazioni e i dati raccolti nei monitoraggi è emerso che il modello che meglio approssima il comportamento orario dell'edificio è il *tn_en_ms*, cioè il modello costruito con i dati climatici rilevati da Meteo Trentino, caratterizzato dalla trasmittanza della parete determinata sperimentalmente e dal numero di ricambi orari per infiltrazione calcolati mediante la norma UNI EN 15242:2008.

In Figura 4.28 - 4.29 sono riportati alcuni grafici radar che riassumono gli indicatori dell'errore associato alle simulazioni rispetto alle misure:

- valore assoluto dell'errore medio relativo alle temperatura superficiali (*MBE_t SUP1-4*) e alla temperatura dell'ambiente di riferimento (*MBE_t AMB*);
- scarto quadratico medio (*RMSE_t SUP 1-4* e *RMSE_t AMB*);
- $1-r$ ($1-r_t SUP1-4$ e $1-r_t AMB$).

L'indice di Pearson r è riportato nel grafico come $1-r$. per rappresentare la lontananza dalla correlazione tra il modello e le misure; di conseguenza un valore di $1-r$ prossimo all'unità caratterizza un modello con una bassa correlazione con i dati misurati in situ, viceversa un valore prossimo a 0 rappresenta un modello fortemente correlato con il comportamento reale dell'edificio. Anche l'errore medio è espresso in termini di valore assoluto per esigenze grafiche.

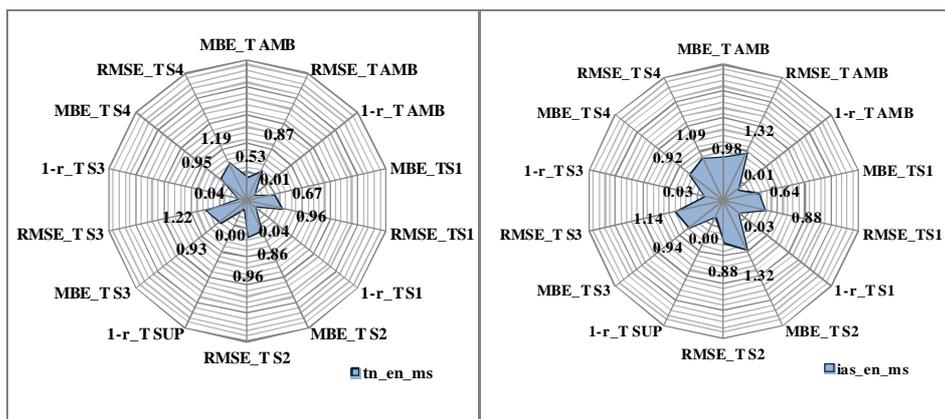


Figura 4.28. Grafici radar a) tn_en_ms b) ias_en_ms

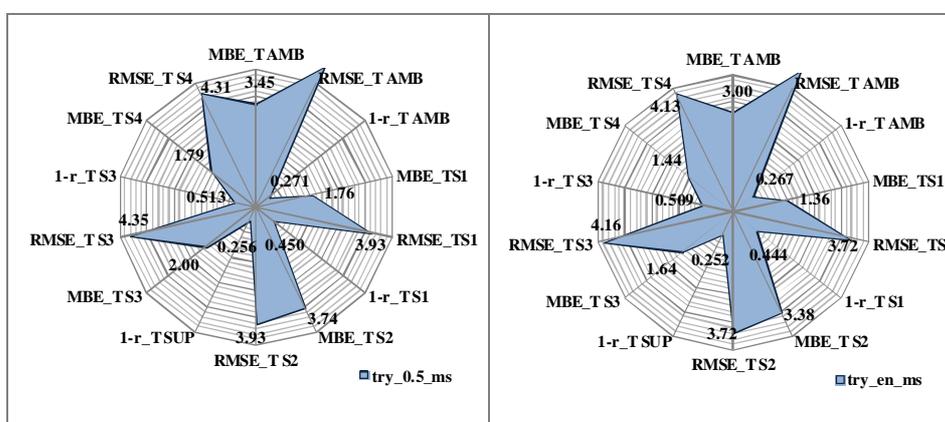


Figura 4.29. Grafici radar a) try_0.5_ms b) try_0.3_std

4.6.1 Analisi di regressione lineare

In Figura 4.30 - 4.31 - 4.32 sono riportate le regressioni lineari delle temperature simulate all'interno dell'ambiente di controllo in relazione alle temperature misurate. Questa rappresentazione permette di valutare graficamente quale sia la correlazione tra dato reale e risultato del modello di simulazione. In figura è riportato anche l'indice R^2 che indica quanto la variazione della temperatura simulata sia legata alla variazione reale della

temperatura dell'aria nell'ambiente. Per un modello di simulazione preciso una modifica della temperatura misurata è direttamente correlata a una modifica della temperatura simulata.

Per il caso studio analizzato sono riportate le regressioni relative a 6 simulazioni ritenute significative che sono state definite in relazione ai tre dataset climatici disponibili, alle caratteristiche standard e reali dei materiali e a un tasso di ricambi d'aria calcolati mediante l'applicazione della norma UNI EN 15242(2008):

- TN_en_std (Figura 4.30 a)
- IAS_en_std (Figura 4.30 b)
- TRY_en_std (Figura 4.30 c)
- TN_en_ms (Figura 4.31 a)
- IAS_en_ms (Figura 4.31 b)
- TRY_en_ms (Figura 4.31 c)

A conferma di quanto evidenziato in precedenza emerge come, per i dataset IASMA e MeteoTrentino (Figure 4.30 a - b e 4.31 a-b), quasi tutta la variazione della temperatura simulata è direttamente correlata alla temperatura misurata. Inoltre in Figura si nota come i modelli di simulazione definiti con dati meteo reali forniscano risultati stabili, in quanto i punti che rappresentano le temperature si dispongono a manicotto intorno alla retta di regressione, vi è una limitata dispersione dei valori e l'indice R^2 è prossimo all'unità.

Un altro aspetto da sottolineare è che passando dalle simulazioni caratterizzate da dati standard per l'involucro a quelle definite mediante dati misurati, si verifica un aumento dell'indice R^2 e una distribuzione più regolare delle temperature intorno alla retta di regressione: questi due fattori indicano una migliore rappresentatività dei modelli di simulazione "MS".

Per quanto riguarda i modelli definiti con il TRY (Figura 4.30c - 4.31c) risulta evidente la minore corrispondenza tra dati simulati e reali: l'indice R^2 varia da 0.5107 a 0.5365 a seconda delle caratteristiche dell'involucro e si può osservare una maggiore dispersione delle temperature intorno alla retta di regressione.

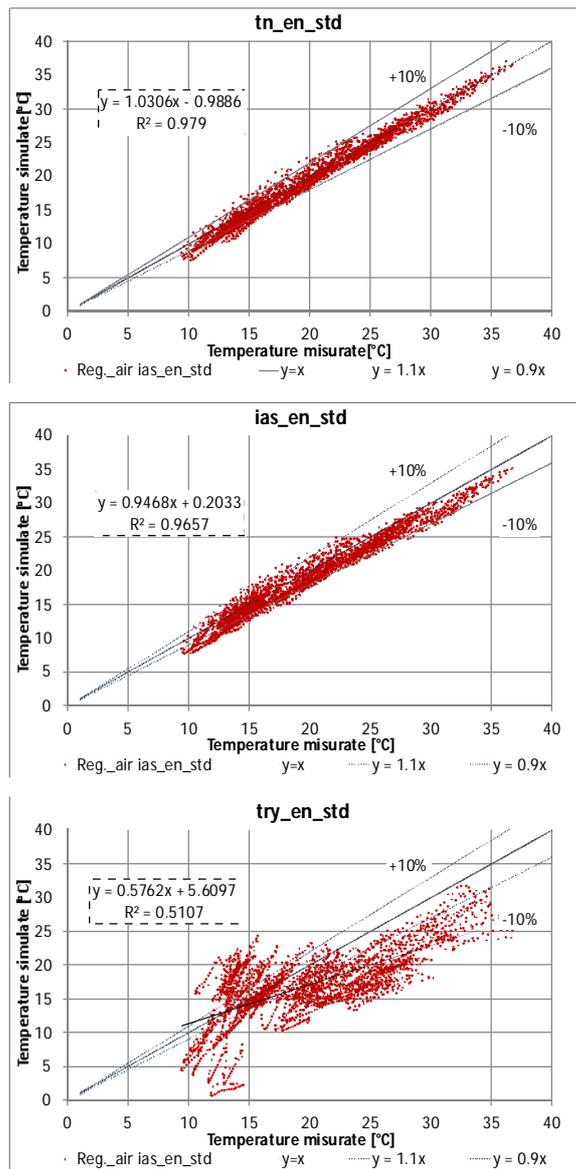


Figura 4.30 Risultati analisi di regressione - proprietà dei materiali standard a) Meteo Trentino b) IASMA c) T.R.Y.

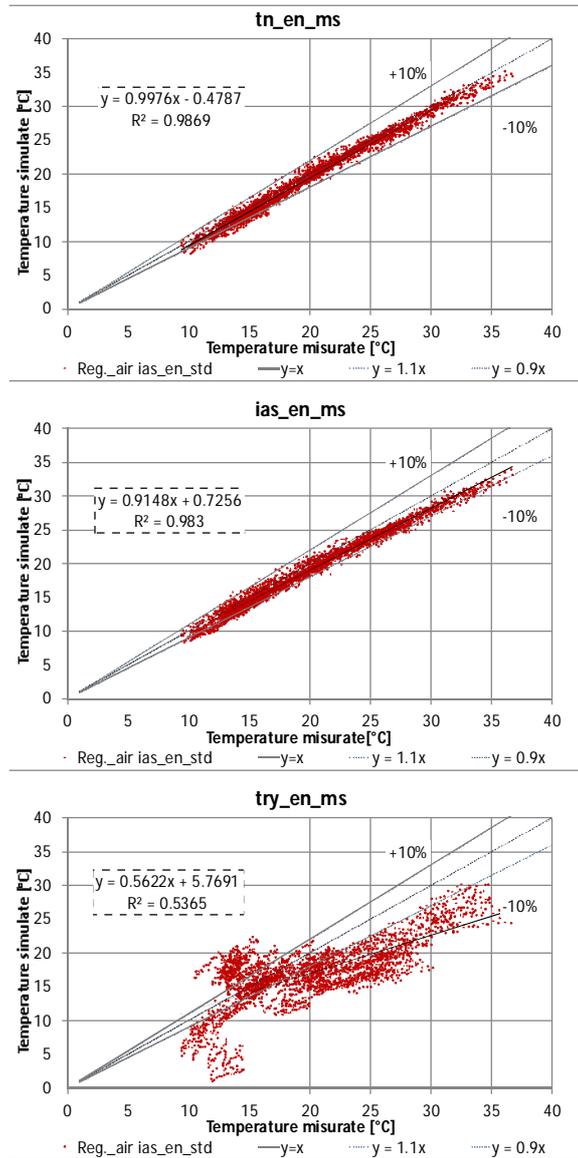


Figura 4.31 Risultati analisi di regressione - proprietà dei materiali misurate a) Meteo Trentino b) IASMA c) T.R.Y.

4.7 Analisi di sensibilità

Come già evidenziato dai risultati delle analisi precedenti, la variazione di alcuni parametri in ingresso incide in maniera più significativa sui risultati finali e sull'attendibilità dei modelli di simulazione delle prestazioni energetiche degli edifici. Il metodo per identificare quali siano gli input che influenzano maggiormente i risultati è l'analisi di sensibilità. Questa tecnica permette di determinare quanto la modifica di un parametro A incida sul parametro B dipendente da A attraverso un valore: l'indice di sensibilità.

In letteratura esistono vari approcci per il calcolo di questo indice, in quanto non sono ancora codificati metodi standardizzati per questo tipo di analisi in applicazione alle simulazioni energetiche degli edifici.

In particolare Lam e Hui hanno indicato i criteri di scelta sia degli input da perturbare sia degli output da verificare e hanno analizzato l'incidenza in termini di differenti tipologie di indici di sensibilità, dimensionali e adimensionali (*Lam e Hui 1996*).

La trattazione più dettagliata è riportata nel lavoro di MacDonald che analizza in maniera sistematica le diverse tecniche per elaborare analisi di sensibilità applicate all'analisi delle prestazioni energetiche del sistema edificio-impianto. In particolare MacDonald identifica i metodi di analisi di tipo esterno come i più adatti per le valutazioni relative agli edifici, e le distingue in metodologie locali, che comportano la variazione di uno o più parametri in ingresso, e metodologie globali, che prevedono una variazione simultanea di tutti i dati di input del modello.

Nei paragrafi successivi verranno riportate le metodologie e i risultati ottenuti attraverso l'applicazione di due metodi di analisi di tipo locale al caso studio della Manifattura Tabacchi di Rovereto: il metodo differenziale e il metodo fattoriale.

4.7.1 Metodo differenziale

Il metodo differenziale permette di valutare in maniera diretta l'incidenza di un dato sul comportamento energetico del sistema edificio-impianto. Esso consiste nel far variare un singolo input di una quantità nota rispetto al valore

che caratterizza il modello di base e verificarne l'effetto in termini di risultato finale: per ogni parametro analizzato si definisce una simulazione e si verifica lo scostamento rispetto al caso base.

Questo approccio è molto diffuso in quanto il metodo è di facile applicazione e fornisce risultati chiari e direttamente verificabili; infatti l'indice di sensibilità è definito come attraverso il rapporto tra la variazione dell'output rispetto alla variazione dell'input.

Una prima espressione per il calcolo dell'indice di sensibilità s può essere espresso secondo l'equazione:

$$s = \frac{\Delta O}{\Delta I} \quad (4.7.1)$$

ΔO è pari a $O_{\text{base}} - O_{\text{var}}$, dove O_{var} esprime l'output del modello a cui è stata applicata la variazione del dato in ingresso e O_{base} rappresenta il risultato del modello di base

ΔI è pari a $I_{\text{base}} - I_{\text{var}}$, che esprime la differenza tra l'input del modello di base e del modello perturbato. L'indice calcolato attraverso questa espressione è caratterizzato da un'unità di misura che dipende dall'input e dall'output presi in considerazione. Un'altra formulazione dell'indice di sensibilità, indicato come $s\%$, e calcolato attraverso il metodo differenziale è riportata in *Lam et Hui (1996)*:

$$s\% = \frac{\Delta O / O_{\text{base}}}{\Delta I / I_{\text{base}}} \quad (4.7.2)$$

In questo caso l'indice di sensibilità è un numero adimensionale espresso in relazione al valore dell'output (O_{base}) e dell'input di base (I_{base}), in questo modo possono essere confrontati direttamente gli indici calcolati per parametri in ingresso che presentano unità di misura differenti.

4.7.2 Metodo fattoriale

Il metodo fattoriale permette di superare il principale limite che caratterizza il metodo differenziale, in quanto consente di verificare l'effetto sul risultato finale dovuto all'interazione di due o più parametri perturbati simultaneamente. In questo modo è possibile valutare quanto incida la combinazione di variazioni positive e negative di due o più dati in ingresso in termini di comportamento energetico dell'edificio. Il limite principale dell'applicazione di questo metodo nel caso di analisi di più input considerati in contemporanea è l'elevata quantità di simulazioni da effettuare che è pari a 2^n , dove n rappresenta il numero di parametri perturbati. Il metodo consiste nello scegliere due o più parametri e applicarvi una variazione positiva (+) e negativa (-) secondo quanto indicato nello schema in Tabella 4 che riporta il caso relativo a tre parametri (A B C).

Simulazione	A	B	C	A-B	A-C	B-C	A-B-C
1	-	-	-	+	+	+	-
2	+	-	-	-	-	+	+
3	-	+	-	-	+	-	+
4	+	+	-	+	-	-	-
5	-	-	+	+	-	-	+
6	+	-	+	-	+	-	-
7	-	+	+	-	-	+	-
8	+	+	+	+	+	+	+

Tabella 4.6 Schema di analisi fattoriale per valutazioni con tre parametri

Come indicato da MacDonald (2002), una volta scelta la sequenza di variazioni negative e positive, si determinano i segni per individuare gli effetti del secondo ordine riportati nella quarta colonna della Tabella 4.6, ottenuti moltiplicando i delle colonne 3 e 4.

Sulla base dei risultati delle simulazioni si calcolano gli effetti del 1° ordine:

$$F_A = \frac{(Z_2 + Z_4 + Z_6 + Z_8) - (Z_1 + Z_3 + Z_5 + Z_7)}{4} \quad (4.7.3)$$

$$F_B = \frac{(Z_3 + Z_4 + Z_7 + Z_8) - (Z_1 + Z_2 + Z_5 + Z_6)}{4} \quad (4.7.4)$$

$$F_C = \frac{(Z_5 + Z_6 + Z_7 + Z_8) - (Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4)}{4} \quad (4.7.5)$$

e del 2° ordine

$$F_{A-B} = \frac{(Z_1 + Z_4 + Z_5 + Z_8) - (Z_2 + Z_3 + Z_6 + Z_7)}{4} \quad (4.7.6)$$

$$F_{A-C} = \frac{(Z_1 + Z_3 + Z_6 + Z_8) - (Z_2 + Z_4 + Z_5 + Z_7)}{4} \quad (4.7.7)$$

$$F_{B-C} = \frac{(Z_1 + Z_2 + Z_7 + Z_8) - (Z_3 + Z_4 + Z_5 + Z_6)}{4} \quad (4.7.8)$$

$$F_{A-B-C} = \frac{(Z_2 + Z_3 + Z_5 + Z_8) - (Z_1 + Z_4 + Z_6 + Z_7)}{4} \quad (4.7.9)$$

Dove

- F_A esprime gli effetti del primo ordine dovuti alla variazione del parametro A
- F_B esprime gli effetti del primo ordine dovuti alla variazione del parametro B
- F_C esprime gli effetti del primo ordine dovuti alla variazione del parametro B
- F_{AB} esprime gli effetti del secondo ordine dovuti alla variazione dei parametri A e B
- F_{AC} esprime gli effetti del secondo ordine dovuti alla variazione dei parametri A e C
- F_{BC} esprime gli effetti del secondo ordine dovuti alla variazione dei parametri B e C
- F_{ABC} esprime gli effetti del secondo ordine dovuti alla variazione dei parametri A, B e C
- Z_i rappresenta il risultato ottenuto attraverso l'la i-esima simulazione

4.7.3 Risultati dell'analisi di sensibilità

Sulla base dei risultati delle analisi multi criterio riportati nel paragrafo 4.6 si è deciso di condurre l'analisi di sensibilità adottando come caso base la simulazione tn_en_ms, in quanto è caratterizzata da scostamenti minimi in

termini di temperatura dell'aria rispetto ai dati misurati e quindi risulta rappresentativa del reale comportamento dell'edificio.

Considerata l'assenza di impianti termici funzionanti, l'analisi di sensibilità del modello di simulazione è stata effettuata su output relativi alle temperature dell'aria all'interno dell'ambiente di controllo P3_Z1:

- temperatura dell'aria minima t_{\min}
- temperatura dell'aria massima t_{\max}
- Gradi ora per la stagione di riscaldamento HDH_{18}
- Gradi ora per la stagione di raffrescamento CDH_{26}

Questi ultimi due indici rappresentano lo scostamento tra la temperatura di *set-point* invernale ed estiva e le temperature interne ottenute attraverso le simulazioni e vengono calcolati attraverso le seguenti equazioni:

$$HDH_{18} = \sum_{i=1}^n (\theta_{i,H, \text{setpoint}} - \theta_{i,H, \text{sim}}) \quad (4.7.10)$$

$$CDH_{26} = \sum_{i=1}^n (\theta_{i,C, \text{sim}} - \theta_{i,C, \text{setpoint}}) \quad (4.7.11)$$

dove:

- n rappresenta il numero di ore della simulazione
- $\theta_{i,H, \text{sim}}$ è la temperatura interna della zona P3_Z1 ottenuta attraverso le simulazioni
- $\theta_{i,H, \text{setpoint}}$ è la temperatura di *set-point* invernale fissata a 18°C
- $\theta_{i,C, \text{setpoint}}$ è la temperatura di *set-point* estiva fissata pari a 26°C.

4.7.3.1 Risultati delle analisi di sensibilità con il metodo differenziale

Le analisi attraverso il metodo differenziale sono state condotte su una serie di parametri relativi all'involucro ritenuti significativi in termini di comportamento energetico dell'edificio analizzato:

- Capacità termica della copertura C_{cop}
- Capacità termica della parete C_{par}
- Capacità termica del solaio inferiore C_{sol}
- Ricambi orari per infiltrazione, in termini del parametro Q4Pa

- Trasmittanza della copertura U_{cop}
- Trasmittanza della parete U_{par}
- Trasmittanza del solaio inferiore U_{sol}
- Trasmittanza solare delle finestre $U_{\text{sol,fin}}$

A ciascun parametro in ingresso è stata applicata una variazione positiva del 10% e sono stati calcolati gli indici di sensibilità s e $s\%$ rispettivamente sulla base delle equazioni 4.7.1 e 4.7.2; in Tabella 4.7 sono riportati i risultati completi dell'analisi. Si osservi come un indice di segno negativo esprima una correlazione inversa, ovvero ad un aumento del dato di input corrisponde una diminuzione del parametro di output esaminato, mentre indici di segno positivo esprimono una correlazione diretta.

Caso Base					
	t_{max}	36.270		HDH_{18}	8568.080
	t_{min}	-2.710		CDH_{26}	26316.800
Capacità termica copertura +10%					
	<i>Risultati</i>	<i>scostamento output</i>	<i>s%</i>	<i>s</i>	
t_{max}	35.685	-0.585	-0.161	-0.070	$^{\circ}\text{C}/[\text{kJ}/(\text{m}^2\text{^{\circ}\text{C}})]$
t_{min}	-2.405	0.303	1.120	0.037	$^{\circ}\text{C}/[\text{kJ}/(\text{m}^2\text{^{\circ}\text{C}})]$
HDH_{18}	8392.129	-175.949	-0.205	-21.173	$^{\circ}\text{Ch}/[\text{kJ}/(\text{m}^2\text{^{\circ}\text{C}})]$
CDH_{26}	26342.063	25.263	0.010	3.040	$^{\circ}\text{Ch}/[\text{kJ}/(\text{m}^2\text{^{\circ}\text{C}})]$
Capacità termica parete +10%					
	<i>Risultati</i>	<i>scostamento output</i>	<i>s%</i>	<i>s</i>	
t_{max}	35.984	-0.286	-0.079	-0.044	$^{\circ}\text{C}/[\text{kJ}/(\text{m}^2\text{^{\circ}\text{C}})]$
t_{min}	-2.458	0.250	0.922	0.038	$^{\circ}\text{C}/[\text{kJ}/(\text{m}^2\text{^{\circ}\text{C}})]$
HDH_{18}	8438.741	-129.337	-0.151	-19.867	$^{\circ}\text{Ch}/[\text{kJ}/(\text{m}^2\text{^{\circ}\text{C}})]$
CDH_{26}	26241.894	-74.906	-0.028	-11.506	$^{\circ}\text{Ch}/[\text{kJ}/(\text{m}^2\text{^{\circ}\text{C}})]$
Capacità termica solaio +10%					
	<i>Risultati</i>	<i>scostamento output</i>	<i>s%</i>	<i>s</i>	
t_{max}	35.959	-0.312	-0.086	-0.065	$^{\circ}\text{C}/[\text{kJ}/(\text{m}^2\text{^{\circ}\text{C}})]$
t_{min}	-2.458	0.250	0.922	0.052	$^{\circ}\text{C}/[\text{kJ}/(\text{m}^2\text{^{\circ}\text{C}})]$
HDH_{18}	8485.578	-82.500	-0.096	-17.296	$^{\circ}\text{Ch}/[\text{kJ}/(\text{m}^2\text{^{\circ}\text{C}})]$
CDH_{26}	26280.895	-35.905	-0.014	-7.527	$^{\circ}\text{Ch}/[\text{kJ}/(\text{m}^2\text{^{\circ}\text{C}})]$

Numero di ricambi per infiltrazione (Q4Pa) +10%					
	<i>Risultati</i>	<i>scostamento output</i>	<i>s%</i>	<i>s</i>	
t_{max}	36.241	-0.029	-0.008	-0.048	°C/(m ³ /h)
t_{min}	-2.740	-0.032	-0.118	-0.053	°C/(m ³ /h)
HDH_{18}	8449.345	-118.732	-0.139	-197.887	°Ch/(m ³ /h)
CDH_{26}	26362.46	45.663	0.017	76.106	°Ch/(m ³ /h)
Trasmittanza termica copertura +10%					
	<i>Risultati</i>	<i>scostamento output</i>	<i>s%</i>	<i>s</i>	
t_{max}	36.568	0.298	0.082	2.303	°C/[W/(m ² °C)]
t_{min}	-2.851	-0.142	-0.526	-1.102	°C/[W/(m ² °C)]
HDH_{18}	8783.909	215.831	0.252	1670.518	°Ch/[W/(m ² °C)]
CDH_{26}	26375.41	58.612	0.022	453.657	°Ch/[W/(m ² °C)]
Trasmittanza Parete +10%					
	<i>Risultati</i>	<i>scostamento output</i>	<i>s%</i>	<i>s</i>	
t_{max}	36.250	-0.020	-0.006	-0.169	°C/[W/(m ² °C)]
t_{min}	-2.702	0.006	0.021	0.048	°C/[W/(m ² °C)]
HDH_{18}	8535.452	-32.626	-0.038	-269.857	°Ch/[W/(m ² °C)]
CDH_{26}	26301.60	-15.198	-0.006	-125.705	°Ch/[W/(m ² °C)]
Trasmittanza Solaio +10%					
	<i>Risultati</i>	<i>scostamento output</i>	<i>s%</i>	<i>s</i>	
t_{max}	36.250	-0.020	-0.006	-0.132	°C/[W/(m ² °C)]
t_{min}	-2.702	0.006	0.021	0.037	°C/[W/(m ² °C)]
HDH_{18}	8535.452	-32.626	-0.038	-211.581	°Ch/[W/(m ² °C)]
CDH_{26}	26301.60	-15.198	-0.006	-98.559	°Ch/[W/(m ² °C)]
Trasmittanza solare finestre +10%					
	<i>Risultati</i>	<i>scostamento output</i>	<i>s%</i>	<i>s</i>	
t_{max}	36.500	0.229	0.063	2.829	°C
t_{min}	-2.672	0.036	0.133	0.443	°C
HDH_{18}	8843.937	275.860	0.322	3401.476	°Ch
CDH_{26}	26118.07	-198.731	-0.076	-2450.447	°Ch

• **Tabella 4.7** Risultati dell'analisi di sensibilità - metodo differenziale

Per confrontare tra loro gli scostamenti dovuti alla variazione dati in ingresso caratterizzati da unità di misura differenti è opportuno ricorrere all'indice $s\%$, che esprime lo scostamento in termini assoluti in relazione ai valori degli output e degli input non perturbati. (Lam et Hou 1996).

In Figura 4.32 sono riportati i valori di $s\%$ relativi alle temperature minime e massime, mentre in Figura 4.33 sono riportati i valori di $s\%$ per i gradi ora HDH_{18} e CDH_{26} .

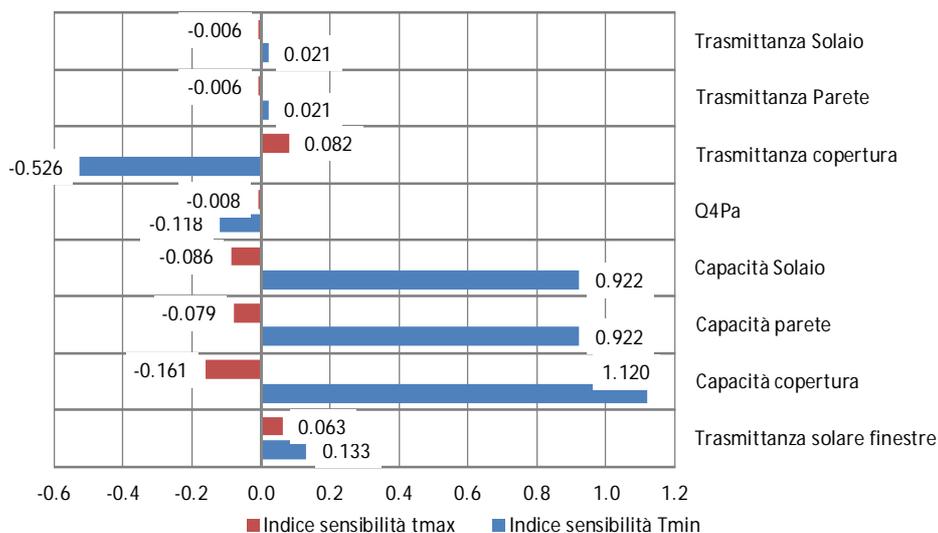


Figura 4.32 Indici di sensibilità $s_{\%}$ per la temperatura minima e massima

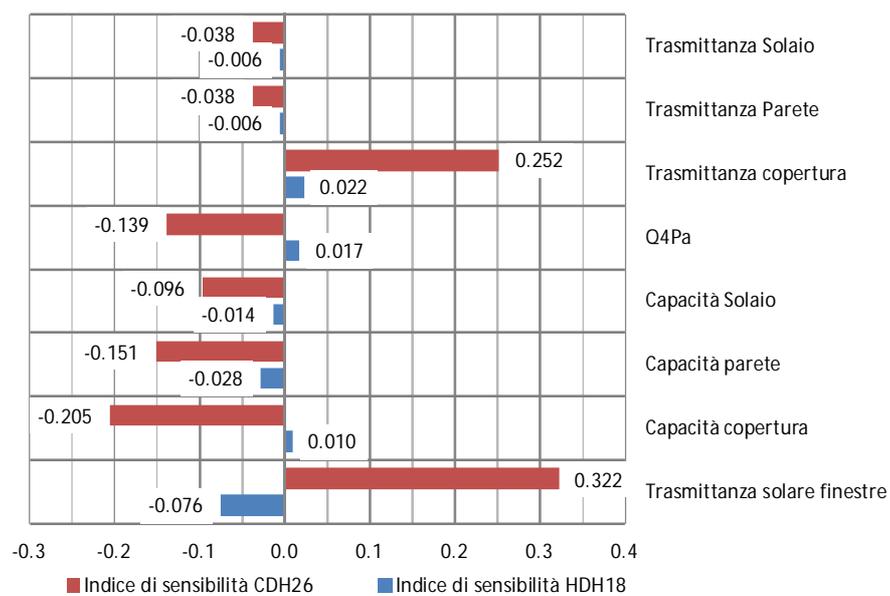


Figura 4.33 Indici di sensibilità $s_{\%}$ per CDH_{26} e HDH_{18}

In generale si osservi come i parametri in ingresso influiscano in maniera differente a seconda del risultato considerato; infatti la capacità termica degli elementi di involucro incide in maniera evidente sui picchi di temperatura che si verificano all'interno dell'ambiente, mentre ha un'influenza minore sui gradi ora sia estivi che invernali. In particolare la copertura risulta il componente che incide maggiormente sia sulle temperature massime e minima sia sui gradi ora estivi e invernali, mentre il solaio inferiore è l'elemento caratterizzato da indici di sensibilità minori.

Per quanto riguarda la trasmittanza termica, nel caso di pareti e solai si evidenzia un'incidenza trascurabile in termini di temperature di picco, mentre in termini di gradi ora l'indice di sensibilità è negativo ed esprime una debole correlazione inversa.

Nel caso della trasmittanza della copertura, invece, l'indice di sensibilità è positivo sia per HDH_{18} che per CDH_{26} , ed esprime una maggiore influenza di questo parametro in termini di prestazione estiva; riguardo alle temperature si può evidenziare un'influenza significativa sui valori minimi rispetto a quanto ottenuto per la trasmittanza degli altri elementi di involucro.

Il parametro Q4Pa presenta indici di sensibilità trascurabili in termini di temperature minime e massime e di gradi giorno invernali, mentre le infiltrazioni hanno un'incidenza significativa sui gradi ora estivi.

L'ultimo parametro considerato nell'analisi di sensibilità con il metodo differenziale è la trasmittanza solare dei componenti vetrati, che presenta un ridotto indice s per le temperature minime e massime, mentre incide in maniera evidente sui gradi ora, in particolare sui gradi ora estivi CDH_{26} .

In generale si può affermare che i parametri più influenti siano le capacità termiche, in particolare della copertura, che incidono in maniera più evidente sulle temperature di picco dell'ambiente, e le trasmittanze termiche, il cui effetto influisce significativamente sui gradi ora. Questo aspetto è confermato nelle Figure 4.34 (a-b-c-d) che riportano gli andamenti della temperatura interna della zona termica P3_Z1 rispettivamente nel caso di:

a) *regime invernale*: variazione di $\pm 5\%$ e $\pm 10\%$ della trasmittanza termica della copertura;

b) *regime invernale*: variazione di $\pm 5\%$ e $\pm 10\%$ della capacità termica della copertura;

c) *regime estivo*: variazione di $\pm 5\%$ e $\pm 10\%$ della trasmittanza termica della copertura;

d) *regime estivo*: variazione di $\pm 5\%$ e $\pm 10\%$ della capacità termica della copertura.

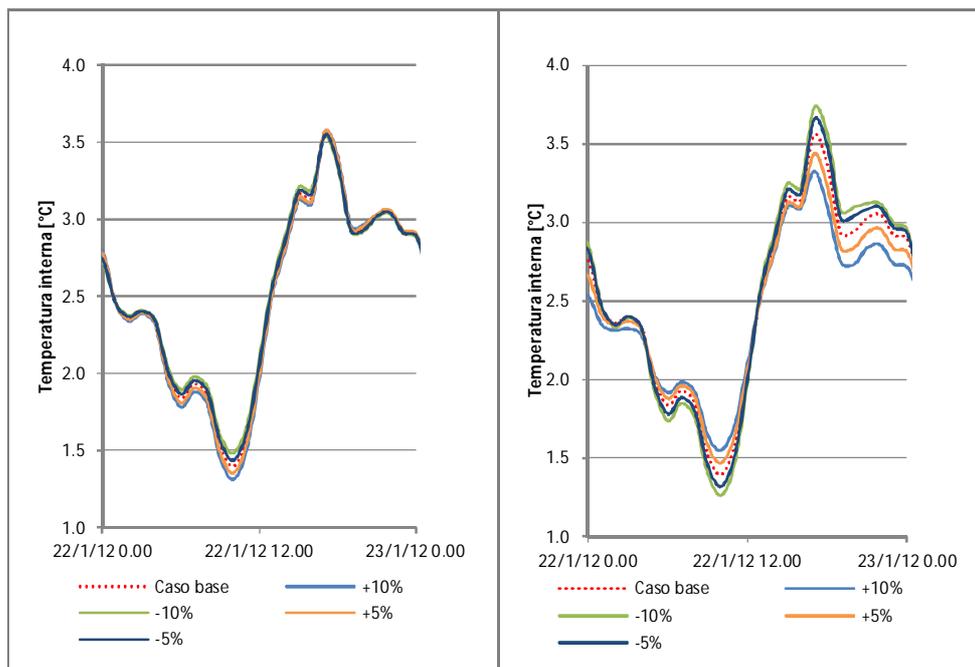


Figura 4.34a) Andamento t interna in relazione alla trasmittanza termica della copertura (regime invernale)

Figura 4.34b) Andamento t interna in relazione alla capacità termica della copertura (regime invernale)

In regime invernale, la modifica della trasmittanza termica della copertura non comporta variazioni significative delle temperature interne dell'ambiente considerato rispetto al caso base; nel caso della diminuzione della capacità

termica, la temperatura dell'ambiente è soggetta ad un incremento delle oscillazioni nell'arco della giornata, mentre aumentando questo parametro l'ambiente è caratterizzato da temperature più stabili. Inoltre lo scostamento tra gli andamenti relativi al $\pm 10\%$ della capacità termica è di circa 0.5°C sia sui picchi positivi sia su quelli negativi registrati nell'arco della giornata, mentre è trascurabile per la trasmittanza termica.

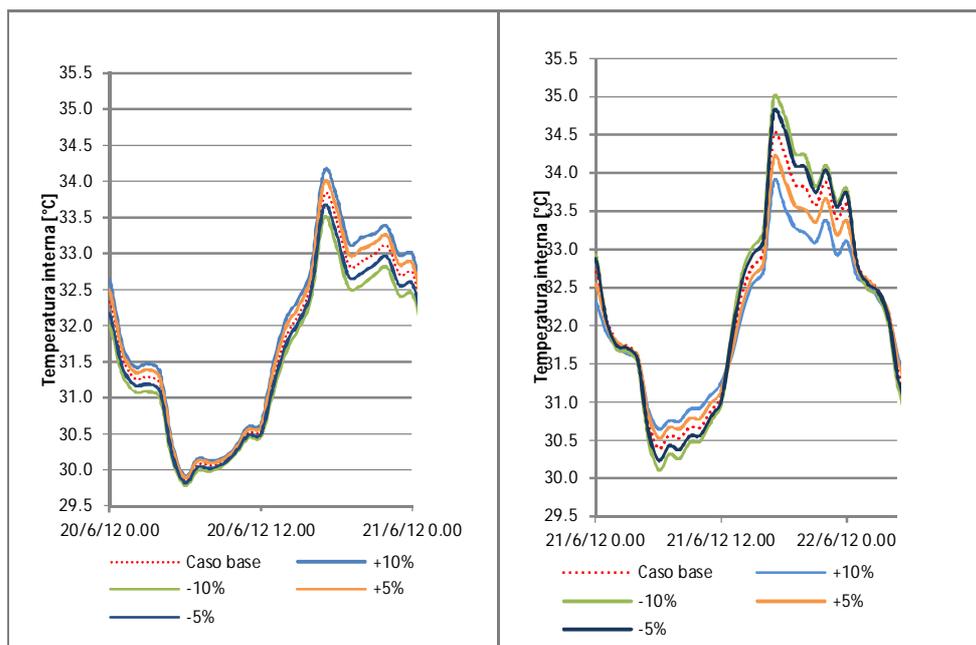


Figura 4.34c) Andamento t interna in relazione alla trasmittanza termica della copertura (regime estivo)

Figura 4.34d) Andamento t interna in relazione alla capacità termica della copertura (regime estivo)

Anche per il regime estivo la capacità termica risulta il parametro più influente in termini di temperatura interna, con scostamenti di circa 1°C sulle temperature massime e di 0.5°C sulle minime della giornata; tuttavia anche la

trasmissione termica incide in maniera non trascurabile, specialmente sulle temperature massime soggette a una variabilità di 0.5°C.

4.7.3.2 Risultati dell'analisi di sensibilità con il metodo fattoriale

Le analisi di sensibilità con il metodo fattoriale sono state condotte per verificare gli effetti del secondo ordine dovuti all'interazione tra tre parametri ritenuti significativi in termini di comportamento energetico dell'edificio analizzato. In particolare le valutazioni sono state condotte sulla base dello schema riportato in Tabella 4.6, in cui i parametri A,B e C corrispondono rispettivamente a:

- **A** → Capacità termica della parete C_{par}
- **B** → Capacità termica del solaio inferiore C_{sol}
- **C** → Trasmissione solare delle finestre T_{sol}

A partire dal caso base considerato anche nell'analisi differenziale (tn_en_ms), sono state definite 8 simulazioni, applicando alternativamente variazioni del ±5% ai parametri in ingresso considerati.

Inoltre, per il calcolo degli indici di sensibilità, sono stati adottati i medesimi output utilizzati nelle analisi precedenti, e i risultati delle simulazioni sono riportati in Tabella 4.8.

	$HDH_{18}[^{\circ}C_h]$	$CDH_{26}[^{\circ}C_h]$	$t_{min}[^{\circ}C]$	$t_{max}[^{\circ}C]$
S1	26605.32	8371.97	-3.02	36.25
S2	26578.15	8335.81	-2.96	36.20
S3	26495.54	8115.62	-2.53	35.74
S4	26473.67	8086.25	-2.47	35.69
S5	26164.21	8990.73	-2.94	36.77
S6	26138.30	8954.13	-2.88	36.71
S7	26048.63	8722.81	-2.44	36.23
S8	26025.28	8693.49	-2.38	36.17

Tabella 4.8 Risultati delle simulazioni

Per il calcolo degli indici di sensibilità sono state utilizzate le equazioni 4.7.3-4.7.9 e i risultati sono riportati in Tabella 4.9.

	$CDH_{26}[^{\circ}C_h]$	$HDH_{18}[^{\circ}C_h]$	$t_{max}[^{\circ}C]$	$t_{min}[^{\circ}C]$
$F(C_{sol})$	-32.865	-24.579	-0.055	0.060
$F(C_{par})$	-258.618	-110.716	-0.525	0.495
$F(U_{sol})$	612.877	-444.064	0.500	0.085
$F(C_{sol}-C_{par})$	3.515	1.966	0.000	0.000
$F(C_{sol}-U_{sol})$	-0.102	-0.056	-0.005	0.000
$F(C_{par}U_{sol})$	-5.663	-3.586	-0.015	0.005
$F(C_{sol}-C_{par}-U_{sol})$	0.123	-0.686	0.000	0.000

Tabella 4.9 indici di sensibilità

Le analisi confermano i risultati ottenuti applicando il metodo differenziale: i fattori calcolati esprimono infatti correlazioni coerenti tra le variazioni degli input e il comportamento energetico dell'edificio.

Per quanto riguarda i gradi ora, viene confermata la minore incidenza della capacità termica del solaio sui risultati finali, infatti gli indici di sensibilità differiscono di un ordine di grandezza rispetto a quelli calcolati per gli altri parametri analizzati.

La capacità termica della parete è caratterizzata da una correlazione negativa con i gradi ora, che risulta molto più significativa in regime estivo rispetto a quanto valutato per il regime invernale, e anche l'indice della trasmittanza solare è coerente con quanto calcolato nelle analisi differenziali, ed esprime un legame inverso nel caso di HDH_{18} , mentre per CDH_{26} l'indice assume un valore positivo e più elevato rispetto al regime invernale, sottolineando la maggiore influenza di questo parametro sul regime estivo.

Gli effetti del secondo ordine sui gradi ora sono trascurabili, ad eccezione dell'interazione tra la capacità termica della parete e la trasmittanza solare dei componenti vetrati, che sono caratterizzati da un indice $F(C_{par}U_{sol})$ negativo che esprime un effetto opposto legato alla combinazione delle variazioni applicate ai due parametri.

Anche per quanto riguarda le temperature di picco, gli indici calcolati con il metodo fattoriale sono coerenti con i risultati delle analisi precedenti.

Infatti la capacità termica del solaio è caratterizzata da un indice di sensibilità inferiore di un ordine di grandezza rispetto agli altri parametri, che sono caratterizzati da fattori pari a circa 0.5°C . In particolare sia la capacità termica della parete e la trasmittanza solare dei componenti vetrati, presentano un indice positivo per la temperatura minima e negativo per la temperatura massima.

Nel caso delle temperature di picco, gli indici di sensibilità evidenziano effetti del secondo ordine sono nulli, ad eccezione dell'interazione tra la capacità termica della parete e della trasmittanza termica del solaio inferiore.

Conclusioni

Dall'analisi degli andamenti emerge che l'anno medio tipo (TRY) non è adatto alla fase di calibrazione: infatti gli elevati indici di errore riscontrati dall'analisi dei grafici di MBE e RMSE associati alle simulazioni definite con il TRY sono confermati dall'analisi degli andamenti di temperatura relativi ad alcune giornate tipo. Infatti ci sono gironi in cui l'anno tipo non riproduce le condizioni meteo reali e contingenti, per cui i risultati dei modelli sono del tutto inattendibili.

Un altro aspetto che emerge è che le temperature delle superfici e dell'aria riprodotte dai modelli sono caratterizzate da picchi nelle ore centrali della giornata che sovrastimano il reale comportamento dell'ambiente di controllo, soprattutto nei giorni soleggiati. Nelle giornate nuvolose i modelli riproducono in maniera più attendibile il reale comportamento dell'edificio. Questo aspetto evidenzia come la radiazione solare dei *dataset* utilizzati potrebbe non essere attendibile per una corretta descrizione delle reali condizioni microclimatiche che caratterizzano l'edificio analizzato. Tale ipotesi è confermata dal fatto che la parete Sud - Ovest, il cui comportamento è fortemente influenzato dalla radiazione solare, è soggetta ad errori più marcati rispetto alla parete Nord-Ovest che risente meno di tali sollecitazioni.

In generale caratteristiche misurate dell'involucro che caratterizzano i modelli "ms" permettono una maggiore attendibilità in termini di temperature orarie simulate; invece per quanto riguarda le medie giornaliere e mensili la differenza non è così significativa, anzi nel caso della temperatura dell'aria interna il modello più attendibile è definito attraverso caratteristiche standard sia per i materiali che per la ventilazione.

In conclusione emerge la necessità di ulteriori approfondimenti nella rilevazione dei parametri che caratterizzano l'involucro edilizio, in particolare le finestre e la copertura, che incidono in maniera significativa in termini di dispersioni per trasmissione.

Tuttavia la calibrazione basata sulle temperature interne di un ambiente di controllo si è dimostrata una strategia efficace che ha permesso di definire un modello di simulazione attendibile; inoltre è stata anche verificata l'efficacia del criterio della gerarchia delle fonti introdotto nella procedura. Infatti i modelli di simulazione caratterizzati da dati in ingresso verificati sulla base di fonti di livello superiore come *tn_0.3_ms* e *tn_en_ms*, definiti mediante dati meteo reali e proprietà dell'involucro misurate sperimentalmente, si sono dimostrati più attendibili.

L'ultimo aspetto trattato in questo capitolo è relativo all'analisi di sensibilità del modello dell'edificio della manifattura ad alcuni input dell'involucro per verificarne gli effetti in termini di temperature interne (andamenti, gradi ora e valori di picco); le analisi hanno dimostrato come, a seconda dell'output considerato, gli indici assumono valori differenti in relazione ai diversi tipi di parametri perturbati. In particolare la capacità termica della copertura rappresenta il dato che influisce maggiormente sia sulle temperature di picco che sui gradi ora della stagione di riscaldamento e di raffrescamento. Di conseguenza per ottimizzare ulteriormente il modello dell'edificio della Manifattura sarà opportuno approfondire le analisi relative a questo elemento costruttivo.

Conclusioni

Il questo lavoro sono stati analizzati diversi aspetti relativi alla valutazione dei fabbisogni energetici di edifici esistenti. In particolare la prima parte ha riguardato l'analisi delle procedure di calcolo in regime semistazionario riportate dalle norme europee UNI EN ISO 13790 per il bilancio termico dell'edificio e EN ISO 15316 per l'impianto e recepite a livello italiano con le specifiche tecniche UNI TS 11300 (parte 1 e 2 rispettivamente per involucro e sistemi impiantistici).

L'analisi approfondita delle normative ha permesso di evidenziare alcuni aspetti critici dell'applicazione delle metodologie di calcolo a edifici esistenti, in quanto è stata riscontrata la possibilità di definire le prestazioni energetiche attraverso approcci di tipo standard e quindi più semplificati o di tipo analitico, e quindi caratterizzati da un livello di dettaglio maggiore. In particolare nella prima parte del lavoro sono stati evidenziati, attraverso una serie di simulazioni energetiche effettuate su due casi studio rappresentativi delle reali caratteristiche del parco immobiliare residenziale italiano, gli scostamenti associati all'utilizzo di un calcolo standard o dettagliato di alcuni parametri in ingresso dei modelli (trasmittanza termica delle strutture, incidenza ponti termici, efficienza dei sottosistemi impiantistici). Le valutazioni sono state associate a una serie di interventi di riqualificazione proposti per il sistema edificio impianto e hanno evidenziato come la scelta di un metodo semplificato o dettagliato possa portare a uno scostamento significativo che, in alcuni casi,

può portare a un'errata valutazione della convenienza degli interventi di riqualificazione.

Nel Capitolo 2 sono riportati i risultati di alcune analisi sperimentali relative al rilievo dei *dataset* climatici e alla valutazione in opera della conduttanza termica delle pareti. Sulla base dei risultati ottenuti da queste elaborazioni è emersa la difficoltà di reperimento dei dati in ingresso dei modelli, anche se le indagini sono supportate da misure di tipo sperimentale. In particolare per la misura della conduttanza termica delle strutture la norma ISO 9869 indica due modalità di post-elaborazione dati che, nel caso delle valutazioni effettuate, portano a risultati significativamente differenti.

Partendo da queste considerazioni è emersa la necessità di definire un benchmark di riferimento con cui stabilire la validità di un modello di simulazione delle prestazioni energetiche del sistema edificio-impianto. Sulla base di un'analisi degli strumenti di riferimento e di applicazioni a casi reali riscontrate in letteratura, è stato elaborato un protocollo di calibrazione dei modelli che definisce le fasi del processo, a partire dalle modalità di raccolta dati ai criteri di validazione dei risultati.

In particolare è stato definito un criterio di validazione basato sul confronto delle temperature misurate all'interno di un ambiente di controllo e i valori simulati nella corrispondente zona termica definita nel modello. La calibrazione mediante le temperature misurate in un ambiente di controllo può costituire un riferimento utile per la definizione di modelli rappresentativi qualora i dati relativi ai consumi energetici non siano disponibili, o l'edificio sia privo di impianto funzionante.

Questo metodo è stato impiegato nella valutazione del comportamento energetico di un edificio reale oggetto di monitoraggi a lungo termine per cui è stato definito un modello di simulazione in regime transitorio. Le analisi hanno dimostrato la validità del protocollo di calibrazione in quanto le informazioni a cui è stato attribuito un maggiore livello di attendibilità hanno portato a definire un modello più rappresentativo e caratterizzato da uno scostamento minore sia in termini di errore medio che di scarto quadratico medio tra temperature reali e simulate.

Da questo studio emerge la difficoltà di calibrare in maniera efficace un modello di simulazione dinamica, a causa della molteplicità dei dati di input che caratterizzano il bilancio energetico; tuttavia è possibile evidenziare come i modelli basati su dati climatici misurati in contemporanea al monitoraggio dei consumi, siano in grado di raggiungere un livello di approssimazione soddisfacente, in particolare se associati a un rilievo in opera delle proprietà termo-igrometriche dell'involucro.

La ricerca portata avanti nell'ambito di questa tesi di dottorato costituisce una base metodologica per indagini più approfondite che riguarderanno due principali ambiti di interesse.

Il primo filone sarà relativo alla definizione dei parametri di ingresso più significativi per diverse tipologie di edifici in relazione alle caratteristiche costruttive, all'epoca di realizzazione, al contesto in cui sono inseriti, al rapporto superficie disperdente/volume riscaldato sulla base di analisi di sensibilità approfondite su diverse tipologie di edifici. In questo modo sarà possibile definire delle linee guida generali per la definizione dei modelli di simulazione delle prestazioni energetiche di edifici esistenti che raccolgano le strategie di calibrazione adeguate a seconda del tipo di edificio.

Il secondo filone di ricerca riguarderà l'applicazione del protocollo di calibrazione a un prototipo sperimentale caratterizzato da un elevato livello di isolamento di involucro e sistemi impiantistici efficienti. L'utilizzo del protocollo per il modello edificio test di cui si controllano le condizioni al contorno permetterà di valutare in maniera dettagliata quali parametri incidono in maniera più significativa sul comportamento energetico di edifici ad elevate prestazioni.

Appendice A

Indici di calibrazione dei modelli: risultati complessivi

Considerando:

- M temperature misurate [°C]
- S temperature simulate [°C]
- N numero di intervalli di acquisizione

Vengono riportati i valori dei seguenti indici di calibrazione:

✓ Errore medio MBE = $\left[\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - M_i)}{N} \right]$

✓ Scarto quadratico medio RMSE = $\sqrt{\left[\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - S_i)^2}{N} \right]}$

✓ Indice di Pearson $r = \frac{\sum(M \cdot S) - \sum M \cdot \sum S / N}{\sqrt{\left(\sum M^2 - \frac{(\sum M)^2}{N} \right) \cdot \left(\sum S^2 - \frac{(\sum S)^2}{N} \right)}}$

Tabella A.1. MBE - RMSE e indice di Pearson calcolati sulla temperatura oraria dell'aria e della superficie S1 della- zona P3_Z1

	AMBIENTE			S1		
	MBE_T AMB	RMSE_ T AMB	r	MBE_TS 1	RMSE_TS 1	r
ias_0.3_std	1.047	1.532	0.982	0.723	0.918	0.976
tn_0.3_std	0.593	1.100	0.988	0.721	0.907	0.980
try_0.3_std	2.990	5.212	0.711	1.292	3.816	0.542
ias_0.5_std	1.277	1.750	0.979	0.850	1.020	0.976
tn_0.5_std	0.853	1.286	0.987	0.844	0.985	0.982
try_0.5_std	3.313	5.406	0.711	1.560	3.934	0.540
ias_en_std	0.862	1.413	0.982	0.539	0.768	0.978
tn_en_std	0.376	0.998	0.989	0.547	0.777	0.980
try_en_std	2.877	5.122	0.715	1.169	3.744	0.545
ias_ash_std	0.989	1.514	0.981	0.615	0.824	0.978
tn_ash_std	0.549	1.082	0.988	0.640	0.830	0.981
try_ash_std	2.981	5.183	0.715	1.273	3.790	0.543
ias_0.3_ms	1.184	1.489	0.988	0.827	1.030	0.943
tn_0.3_ms	0.737	1.011	0.990	0.830	1.071	0.937
try_0.3_ms	3.149	5.190	0.742	1.513	3.800	0.603
ias_0.5_ms	1.400	1.686	0.988	0.943	1.109	0.950
tn_0.5_ms	0.982	1.190	0.991	0.942	1.126	0.946
try_0.5_ms	3.455	5.380	0.742	1.763	3.929	0.601
ias_en_ms	0.981	1.321	0.989	0.645	0.881	0.945
tn_en_ms	0.526	0.869	0.990	0.672	0.964	0.935
try_en_ms	2.998	5.075	0.746	1.358	3.719	0.606
ias_ash_ms	1.098	1.422	0.989	0.705	0.919	0.948
tn_ash_ms	0.687	0.959	0.991	0.746	0.994	0.940
try_ash_ms	3.100	5.136	0.746	1.461	3.769	0.604

Tabella A.2. MBE - RMSE e indice di Pearson calcolati sulla temperatura delle superfici S2 e S3 per la zona P3_Z1

	S2			S3		
	MBE_T AMB	RMSE_ T AMB	r	MBE_TS 1	RMSE_TS 1	r
ias_0.3_std	-1.338	0.918	0.993	0.996	1.161	0.974
tn_0.3_std	0.882	0.907	0.995	0.972	1.164	0.972
try_0.3_std	3.322	3.816	0.734	1.549	4.226	0.480
ias_0.5_std	1.515	1.020	0.992	1.119	1.261	0.975
tn_0.5_std	0.844	0.985	0.995	1.093	1.243	0.976
try_0.5_std	3.574	3.934	0.734	1.790	4.333	0.478
ias_en_std	1.174	0.768	0.993	0.825	1.002	0.977
tn_en_std	0.693	0.777	0.995	0.802	1.028	0.972
try_en_std	3.219	3.744	0.737	1.445	4.155	0.483
ias_ash_std	1.274	0.824	0.993	0.894	1.059	0.976
tn_ash_std	0.828	0.830	0.995	0.891	1.084	0.974
try_ash_std	3.305	3.790	0.737	1.533	4.198	0.480
ias_0.3_ms	1.494	1.030	0.990	1.109	1.298	0.934
tn_0.3_ms	1.045	1.071	0.991	1.088	1.333	0.924
try_0.3_ms	3.506	3.800	0.763	1.774	4.235	0.549
ias_0.5_ms	1.657	1.109	0.991	1.222	1.378	0.942
tn_0.5_ms	1.230	1.126	0.992	1.198	1.393	0.934
try_0.5_ms	3.742	3.929	0.763	1.996	4.348	0.546
ias_en_ms	1.315	0.881	0.990	0.938	1.145	0.937
tn_en_ms	0.860	0.964	0.990	0.934	1.218	0.922
try_en_ms	3.375	3.719	0.766	1.639	4.155	0.551
ias_ash_ms	1.405	0.919	0.990	0.993	1.184	0.940
tn_ash_ms	0.983	0.994	0.991	1.004	1.254	0.927
try_ash_ms	3.455	3.769	0.766	1.724	4.202	0.549

Tabella A.3. MBE - RMSE e indice di Pearson calcolati sulla temperatura delle superfici S4 e S5 per la zona P3_Z1

	S4			S5		
	MBE_T AMB	RMSE_ T AMB	r	MBE_TS 1	RMSE_TS 1	r
ias_0.3_std	1.003	1.208	0.967	1.156	1.303	0.974
tn_0.3_std	1.016	1.234	0.968	1.156	1.338	0.971
try_0.3_std	1.380	4.232	0.428	1.752	4.158	0.502
ias_0.5_std	1.126	1.311	0.967	1.298	1.426	0.975
tn_0.5_std	1.137	1.316	0.971	1.296	1.438	0.975
try_0.5_std	1.621	4.330	0.427	2.022	4.294	0.499
ias_en_std	0.832	1.061	0.969	0.967	1.128	0.977
tn_en_std	0.837	1.092	0.968	0.966	1.180	0.971
try_en_std	1.282	4.167	0.432	1.635	4.074	0.505
ias_ash_std	0.902	1.117	0.968	1.048	1.195	0.976
tn_ash_std	0.929	1.151	0.970	1.070	1.252	0.973
try_ash_std	1.369	4.207	0.429	1.733	4.128	0.502
ias_0.3_ms	1.095	1.249	0.939	1.243	1.387	0.935
tn_0.3_ms	1.115	1.322	0.926	1.248	1.462	0.921
try_0.3_ms	1.569	4.202	0.508	1.967	4.156	0.573
ias_0.5_ms	1.208	1.335	0.945	1.375	1.490	0.942
tn_0.5_ms	1.225	1.387	0.935	1.377	1.541	0.931
try_0.5_ms	1.791	4.307	0.505	2.218	4.299	0.571
ias_en_ms	0.923	1.095	0.940	1.056	1.216	0.938
tn_en_ms	0.946	1.189	0.924	1.074	1.325	0.919
try_en_ms	1.443	4.133	0.511	1.815	4.061	0.577
ias_ash_ms	0.980	1.137	0.943	1.121	1.265	0.940
tn_ash_ms	1.019	1.229	0.929	1.158	1.374	0.925
try_ash_ms	1.528	4.175	0.509	1.912	4.118	0.574

Tabella A.4. MBE - RMSE calcolati sui valori medi giornalieri e mensili della temperatura dell'aria all'interno della zona P3_Z1

Temperatura dell'aria zona P3_Z1				
	Errori valori medi giornalieri		Errori valori medi mensili	
	MBEg_t air	RMSEg_T AMB	MBEm_T AMB	RMSEm_T AMB
ias_0.3_std	-1.052	1.274	-1.069	1.161
tn_0.3_std	-0.593	0.767	-0.597	0.641
try_0.3_std	-2.992	4.977	-3.044	4.048
ias_0.5_std	-1.285	1.494	-1.302	1.397
tn_0.5_std	-0.856	0.982	-0.860	0.878
try_0.5_std	-3.314	5.172	-3.365	4.285
ias_en_std	-0.868	1.123	-0.883	0.992
tn_en_std	-0.376	0.618	-0.380	0.454
try_en_std	-2.878	4.886	-2.929	3.947
ias_ash_std	-0.996	1.238	-1.011	1.118
tn_ash_std	-0.551	0.730	-0.554	0.592
try_ash_std	-2.982	4.947	-3.034	4.022
ias_0.3_ms	-1.184	1.366	-1.207	1.295
tn_0.3_ms	-0.731	0.843	-0.742	0.783
try_0.3_ms	-3.158	5.052	-3.205	4.170
ias_0.5_ms	-1.402	1.570	-1.424	1.517
tn_0.5_ms	-0.979	1.050	-0.989	1.010
try_0.5_ms	-3.463	5.245	-3.509	4.399
ias_en_ms	-0.981	1.184	-1.003	1.105
tn_en_ms	-0.519	0.671	-0.530	0.596
try_en_ms	-3.006	4.933	-3.052	4.035
ias_ash_ms	-1.099	1.295	-1.121	1.225
tn_ash_ms	-0.682	0.787	-0.693	0.731
try_ash_ms	-3.108	4.996	-3.154	4.108

Tabella A.5. MBE - RMSE calcolati sui valori medi giornalieri e mensili della temperatura della superficie S1 - zona P3_Z1

Temperatura superficie S1 zona P3_Z1				
	Errori valori medi giornalieri		Errori valori medi mensili	
	MBEg_t air	RMSEg_T AMB	MBEm_T AMB	RMSEm_T AMB
ias_0.3_std	-0.720	0.840	-0.662	0.683
tn_0.3_std	-0.710	0.842	-0.657	0.717
try_0.3_std	-1.127	3.592	-0.453	1.415
ias_0.5_std	-0.849	0.942	-0.796	0.805
tn_0.5_std	-0.837	0.924	-0.797	0.827
try_0.5_std	-1.398	3.697	-0.740	1.507
ias_en_std	-0.538	0.676	-0.475	0.499
tn_en_std	-0.535	0.705	-0.471	0.563
try_en_std	-1.011	3.518	-0.339	1.334
ias_ash_std	-0.614	0.736	-0.560	0.574
tn_ash_std	-0.630	0.760	-0.576	0.635
try_ash_std	-1.113	3.559	-0.448	1.371
ias_0.3_ms	-0.819	0.934	-0.795	0.819
tn_0.3_ms	-0.812	0.974	-0.793	0.856
try_0.3_ms	-1.353	3.632	-0.642	1.538
ias_0.5_ms	-0.937	1.022	-0.917	0.930
tn_0.5_ms	-0.928	1.038	-0.921	0.956
try_0.5_ms	-1.605	3.749	-0.912	1.643
ias_en_ms	-0.638	0.770	-0.603	0.637
tn_en_ms	-0.653	0.856	-0.617	0.712
try_en_ms	-1.204	3.548	-0.502	1.434
ias_ash_ms	-0.699	0.814	-0.674	0.696
tn_ash_ms	-0.729	0.891	-0.704	0.769
try_ash_ms	-1.306	3.594	-0.609	1.479

Tabella A.6. MBE - RMSE calcolati sui valori medi giornalieri e mensili della temperatura della superficie S2 - zona P3_Z1

Temperatura superficie S2 zona P3_Z1				
	Errori valori medi giornalieri		Errori valori medi mensili	
	MBEg_t air	RMSEg_T AMB	MBEm_T AMB	RMSEm_T AMB
ias_0.3_std	-1.344	1.482	-1.357	1.409
tn_0.3_std	-0.881	0.989	-0.882	0.924
try_0.3_std	-3.341	5.097	-3.375	4.230
ias_0.5_std	-1.521	1.652	-1.536	1.591
tn_0.5_std	-1.082	1.156	-1.083	1.103
try_0.5_std	-3.593	5.262	-3.625	4.425
ias_en_std	-1.180	1.328	-1.193	1.249
tn_en_std	-0.693	0.828	-0.693	0.752
try_en_std	-3.238	5.013	-3.270	4.137
ias_ash_std	-1.281	1.425	-1.293	1.351
tn_ash_std	-0.828	0.931	-0.829	0.866
try_ash_std	-3.323	5.068	-3.356	4.202
ias_0.3_ms	-1.497	1.625	-1.513	1.565
tn_0.3_ms	-1.042	1.127	-1.046	1.082
try_0.3_ms	-3.530	5.201	-3.561	4.377
ias_0.5_ms	-1.661	1.779	-1.677	1.732
tn_0.5_ms	-1.228	1.282	-1.232	1.251
try_0.5_ms	-3.766	5.362	-3.795	4.563
ias_en_ms	-1.318	1.452	-1.334	1.390
tn_en_ms	-0.856	0.962	-0.861	0.911
try_en_ms	-3.399	5.095	-3.428	4.256
ias_ash_ms	-1.408	1.540	-1.424	1.482
tn_ash_ms	-0.980	1.058	-0.985	1.018
try_ash_ms	-3.479	5.148	-3.508	4.317

Tabella A.7. MBE - RMSE calcolati sui valori medi giornalieri e mensili della temperatura della superficie S3 - zona P3_Z1

Temperatura superficie S3 zona P3_Z1				
	Errori valori medi giornalieri		Errori valori medi mensili	
	MBEg_t air	RMSEg_T AMB	MBEm_T AMB	RMSEm_T AMB
ias_0.3_std	-0.987	1.114	-0.837	0.905
tn_0.3_std	-0.956	1.118	-0.820	0.930
try_0.3_std	-1.369	3.965	-0.630	1.679
ias_0.5_std	-1.112	1.214	-0.963	1.011
tn_0.5_std	-1.080	1.200	-0.952	1.027
try_0.5_std	-1.613	4.060	-0.887	1.771
ias_en_std	-0.819	0.950	-0.664	0.741
tn_en_std	-0.786	0.977	-0.642	0.786
try_en_std	-1.271	3.891	-0.533	1.598
ias_ash_std	-0.888	1.008	-0.739	0.801
tn_ash_std	-0.876	1.036	-0.739	0.851
try_ash_std	-1.358	3.932	-0.627	1.637
ias_0.3_ms	-1.095	1.233	-0.975	1.042
tn_0.3_ms	-1.066	1.259	-0.959	1.067
try_0.3_ms	-1.598	4.030	-0.824	1.809
ias_0.5_ms	-1.210	1.320	-1.090	1.140
tn_0.5_ms	-1.179	1.328	-1.080	1.157
try_0.5_ms	-1.822	4.133	-1.063	1.909
ias_en_ms	-0.925	1.073	-0.796	0.879
tn_en_ms	-0.910	1.137	-0.791	0.932
try_en_ms	-1.470	3.947	-0.704	1.708
ias_ash_ms	-0.981	1.117	-0.858	0.927
tn_ash_ms	-0.982	1.177	-0.870	0.984
try_ash_ms	-1.554	3.991	-0.793	1.751

Tabella A.8. MBE - RMSE calcolati sui valori medi giornalieri e mensili della temperatura della superficie S4 - zona P3_Z1

Temperatura superficie S4 zona P3_Z1				
	Errori valori medi giornalieri		Errori valori medi mensili	
	MBEg_t air	RMSEg_T AMB	MBEm_T AMB	RMSEm_T AMB
ias_0.3_std	-0.990	1.117	-0.860	0.917
tn_0.3_std	-0.993	1.150	-0.864	0.978
try_0.3_std	-1.191	3.980	-0.493	1.553
ias_0.5_std	-1.115	1.219	-0.985	1.026
tn_0.5_std	-1.117	1.233	-0.996	1.075
try_0.5_std	-1.435	4.064	-0.750	1.632
ias_en_std	-0.821	0.958	-0.685	0.751
tn_en_std	-0.814	0.999	-0.679	0.825
try_en_std	-1.099	3.913	-0.399	1.484
ias_ash_std	-0.892	1.017	-0.762	0.814
tn_ash_std	-0.907	1.061	-0.778	0.893
try_ash_std	-1.185	3.949	-0.493	1.517
ias_0.3_ms	-1.078	1.197	-0.980	1.036
tn_0.3_ms	-1.086	1.260	-0.987	1.099
try_0.3_ms	-1.385	4.018	-0.657	1.652
ias_0.5_ms	-1.193	1.287	-1.095	1.136
tn_0.5_ms	-1.199	1.330	-1.108	1.188
try_0.5_ms	-1.609	4.110	-0.895	1.739
ias_en_ms	-0.907	1.039	-0.798	0.869
tn_en_ms	-0.916	1.123	-0.808	0.952
try_en_ms	-1.265	3.946	-0.542	1.566
ias_ash_ms	-0.965	1.084	-0.861	0.920
tn_ash_ms	-0.991	1.166	-0.889	1.005
try_ash_ms	-1.349	3.985	-0.631	1.604

Tabella A.9. MBE - RMSE calcolati sui valori medi giornalieri e mensili della temperatura della superficie S5 - zona P3_Z1

Temperatura superficie S5 zona P3_Z1				
	Errori valori medi giornalieri		Errori valori medi mensili	
	MBEg_t air	RMSEg_T AMB	MBEm_T AMB	RMSEm_T AMB
ias_0.3_std	-1.142	1.237	-1.048	1.095
tn_0.3_std	-1.134	1.273	-1.044	1.133
try_0.3_std	-1.565	3.916	-0.844	1.728
ias_0.5_std	-1.286	1.359	-1.193	1.225
tn_0.5_std	-1.276	1.376	-1.195	1.255
try_0.5_std	-1.838	4.039	-1.132	1.865
ias_en_std	-0.956	1.054	-0.858	0.909
tn_en_std	-0.942	1.109	-0.845	0.961
try_en_std	-1.454	3.829	-0.734	1.631
ias_ash_std	-1.036	1.124	-0.945	0.985
tn_ash_std	-1.048	1.184	-0.957	1.046
try_ash_std	-1.552	3.880	-0.838	1.686
ias_0.3_ms	-1.224	1.329	-1.167	1.216
tn_0.3_ms	-1.219	1.392	-1.165	1.258
try_0.3_ms	-1.783	3.979	-1.026	1.872
ias_0.5_ms	-1.358	1.437	-1.301	1.336
tn_0.5_ms	-1.351	1.479	-1.305	1.369
try_0.5_ms	-2.037	4.109	-1.296	2.011
ias_en_ms	-1.038	1.153	-0.971	1.031
tn_en_ms	-1.043	1.250	-0.976	1.098
try_en_ms	-1.639	3.881	-0.888	1.752
ias_ash_ms	-1.104	1.205	-1.044	1.092
tn_ash_ms	-1.129	1.303	-1.070	1.166
try_ash_ms	-1.735	3.934	-0.990	1.810

Bibliografia

Andaloro P.F., Salomone RE., Ioppolo G., Andaloro L. (2010). “Energy certification of buildings: A comparative analysis of progress towards implementation in European countries”, *Energy Policy*; vol 38, 5840-5866.

Baggio P., Corrado V., Murano G., Riva G. (2010). “Definizione degli anni tipo climatici delle provincie del Nord Italia”, *La Termotecnica* vol.11, 61-68.

Balaras C., Gaglia A., Georgopoulou E., Mirasgedis S., Sarafidis Y., Lalas D. (2007). “European residential buildings and empirical assessment of the Hellenic building stock, energy consumption, emissions and potential energy savings”, *Building and Environment*; vol. 42, 1298-1314.

Ballarini I., Corrado V. (2009). “Application of energy rating methods to the existing building stock: Analysis of some residential buildings in Turin”, *Energy and Buildings*; vol. 41, 790-800.

Bhandari M., Shrestha S., New J. “Evaluation of weather datasets for building energy simulation”, *Energy and Buildings*, vol. 49, 109-118.

Corrado V., Ballarini I., Corgnati S., Talà N.(2010). “Use of building typologies for energy performance assessment of national building stocks, existent experiences in European countries and common approach, First TABULA Synthesis Report”, Available from: <http://www.building-typology.eu/existent-concepts.html>.

Corrado V., Mechri H.E. (2009). “Uncertainty and sensitivity analysis for building energy rating”. *Journal of building physics*, vol. 33, 125 – 156.

De Wit S., Augenbroe G. (2002) “Analysis of uncertainty in building design evaluations and its implications”, *Energy and Buildings*, vol. 34(9), 951–958.

Dell’Isola M., d’Ambrosio F.R., Ficco G., Ianniello E.(2010) “Problematiche di misura in campo della trasmittanza termica nella diagnosi energetic degli edifici”, 65 Congresso ATI (Associazione Termotecnica Italiana), Cagliari 2010.

Diakaki C., Grigoroudis E., Kolokotsa D. (2008).” Towards a multiobjective optimization approach for improving energy efficiency in buildings”, *Energy and Buildings*, vol. 40, 1747-1754.

Domínguez-Muñoz F., Anderson B., Cejudo-López J. M., Carrillo A. (2010). “Uncertainty in the thermal conductivity of insulation materials.” *Energy and Buildings*, vol. 42(11). 2159–2168.

Entrop A. G., Brouwers H.J.H, Reinders A.H.M.E.(2010). “Evaluation of energy performance indicators and financial aspects of energy saving techniques in residential estate”, *Energy and Buildings*, vol. 42, 618-629.

Fokaides P., Maxoulis C., Panayiotou G., Neophytou M., Kalogirou S.(2011).” Comparison between measured and calculated energy performance for dwellings in a summer dominant environment”, *Energy and Buildings*; vol. 43, 3099-3105.

Garcia Casals X.(2006). “Analysis of building energy regulation and certification in Europe: Their role, limitations and differences”, *Energy and Buildings*; vol. 38, 381-392.

Guan L., Yang v, Bell J.M. (2007). “Cross correlations between weather variables in Australia”, *Building and environment*, vol. 42, 1054-1070.

Hopfe C., Struck C., Kotek P.(2007). “Uncertainty analysisfor building performance simulation- a comparison of four tools”, *IBPSA Building Simulation*, 1383–1388, Beijing (China).

Jokisalo J., Kurnitski J.(2007). “Performance of EN ISO 13790 utilisation factor heat demand calculation method in a cold climate”, *Energy and Buildings*; vol. 39, 236-247.

Lam J., Hui S. (1996). “Sensitivity analysis of energy performance of office buildings”, *Building and environment*, vol 31, 27-39.

Lam J., Wan K., Yang L.(2008). “Sensitivity analysis and energy conservation measures implications”, *Energy and conversion management*, vol. 49, 3170-3177.

Liu G., Liu M. (2011). “A rapid calibration procedure and case study for simplified simulation models of commonly used HVAC systems”, *Building and Environment* vol. 46, 409-420.

Lomas K. J., Eppel H. (1992).”Sensitivity analysis techniques for building thermal simulation programs. *Energy and Buildings*, 19(1):21 – 44.

Macdonald I.A. (2002) “Uncertainty in building simulation”. *Ph.d. dissertation*, University of Strathclyde, Glasgow.

Magrini A., d’Ambrosio F.R., Magnani L., Pernetti R. (2010). “Various approaches to the evaluation of the energy performance of buildings in Italy - Some results of calculation procedures application on residential buildings”, *CESB Central Europe toward Sustainable Building*, Prague.

Mazzarella L. (1997) Dati climatici g. de giorgio. Technical standard, Politecnico di Milano.

Mitalas G.P., Stephenson D.G (1967). “Room thermal response factors”. *ASHRAE Transaction*, 73.

Norford L.K., Socolow R.H., Hsieh E.S., Spadaro G.V. (1994). “Two-to-one discrepancy between measured and predicted performance of a ‘low-energy’ office building: insights from a reconciliation based on the DOE-2 model”, *Energy and Buildings*, vol. 21, 121-131.

Pan Y., Huang Z., Wu G., Chen C. (2009). “The application of building energy simulation and calibration in two high-rise commercial building in

Shanghai”, *IBPSA Conference (International Building Performance Simulation Association)* Glasgow.

Pedrini A., Westphal F.S, Lamberts R. (2002). “A methodology for building energy modelling and calibration in warm climates”, *Building and Environment* vol. 37, 903–912.

Perez-Lombard L., Ortiz J., Pout C. (2008). “A review on buildings energy consumption information”, *Energy and Buildings*, vol. 40, 394–398

Poel B., Van Cruchten G., Balaras C. (2007). “Energy performance assessment of existing dwellings”. *Energy and Buildings*, vol. 39, 393-403.

Prada A. (2012). “Energy Performance of Buildings: Modeling of Dynamic Summer Behavior”, *Ph.d. dissertation*, Doctoral School in Environmental Engineering University of Trento.

Raftery P., Keane M., Costa A. (2011). “Calibrating whole building energy models: Detailed case study using hourly measured data”, *Energy and Buildings*, vol. 43, 3666-3679.

Raftery P., Keane M., O’Donnell J. (2011). “Calibrating whole building energy models: An evidence-based methodology”, *Energy and Buildings*, vol. 43, 2356–2364.

Reddy T. (2006). “Literature review on calibration of building energy simulation programs: uses, problems, procedures, uncertainty and tools”, *ASHRAE Transactions* vol. 112, 226–240.

Soebarto V.I. (1997). “Calibration of hourly energy simulations using hourly monitored data and monthly utility records for two case study buildings”, *5th International Building Performance Simulation Association Conference*, Madison, WI, USA.

Sun J., Reddy A. (2005). “Optimal control of building HVAC&R systems using complete simulation-based sequential quadratic programming (CSB-SQP)”, *Building and Environment*, vol. 40, no. 5, 657-669.

Tian Z., Love J.A. (2009). "Energy performance optimization of radiant slab cooling using building simulation and field measurements", *Energy and Buildings*, vol. 41, no. 3, 320-330.

Tronchin L., Fabbri K. (2008). "Energy performance building evaluation in Mediterranean countries: comparison between software simulations and operating rating simulation", *Energy and Buildings*, vol. 40, 1176-1187.

Tronchin L., Fabbri K. (2010). "A round Robin test for building energy performance in Italy", *Energy and Buildings*, vol. 42, 1862-1877.

Yoon J., Lee E.J., Claridge D.E. (2003). "Calibration procedure for energy performance simulation of a commercial building", *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 125, 251-257.

Legislazione e normative di riferimento

ASHRAE. 2009 *ASHRAE Handbook Fundamentals*. 2009.

ASHRAE Standard Committee (2002), *ASHRAE Guideline 14-2002: Measurement of Energy and Demand Savings*, ASHRAE.

CEN, *Thermal insulation - Construction products, building elements and structures - In situ measurement of thermal performance - Part 4 Testing of Structures*, progetto di norma.

Decreto del Ministero dello sviluppo economico 26.06.2009: *Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici*.

Decreto del Presidente della Repubblica 59/2009 *Regolamento di attuazione dell'articolo 4, comma 1, lettere a) e b), del D. Lgs 19 agosto 2005, n. 192, concernente attuazione della direttiva 2002/91/CE sul rendimento energetico in edilizia*.

Decreto legislativo 192/2005 *Attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia*.

Decreto legislativo 311/2006 *Disposizioni correttive ed integrative al decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, recante attuazione della direttiva 2002/91/CE, relativa al rendimento energetico nell'edilizia.*

Direttiva 2002/91/CE *Direttiva del Parlamento Europeo e del Consiglio, 16 dicembre 2002, sul rendimento energetico nell'edilizia.*

Direttiva 2010/31/EU *Direttiva del Parlamento Europeo e del Consiglio, 19 maggio 2010, sulla prestazione energetica nell'edilizia (rifusione).*

Efficiency Valuation Organisation (2007), *International Performance Measurement and Verification Protocol*, Efficiency Valuation Organisation.

Implementing the Energy Performance of Buildings Directive (EPBD) - Featuring Country Reports, 2010, www.epbd-ca.eu.

ISO 1592:2005 - *Prestazione termoigrometrica degli edifici - Calcolo e presentazione dei dati climatici:*

ISO 9869:1994 - *Thermal Insulation - Building Elements - In situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance:*

ISO, *Thermal Insulation - Building Elements - In situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance*, ISO 9869:1994

Istat, Censimento Italiano 2001, <http://www.istat.it>.

- Parte 1: *Medie mensili dei singoli elementi meteorologici*
- Parte 4: *Dati orari per la valutazione del fabbisogno annuale di energia per il riscaldamento e il raffrescamento*
- Parte 6: *Differenze di temperatura cumulate (gradi giorno).*

UNI 10339 - *Impianti aeraulici per il benessere - Generalità, classificazione e requisiti. Regole per la richiesta d'offerta, l'offerta, l'ordine e la fornitura.*

UNI 10349:1994 - *Riscaldamento e raffrescamento degli edifici: dati climatici (indicazione dati medi mensili).*

UNI 10351:2008: *Materiali da costruzione. Conduttività termica e permeabilità al vapore.*

UNI 10355:2008: *Murature e solai. Valori della resistenza termica e metodo di calcolo.*

UNI EN 15242:2008: *Ventilazione degli edifici - Metodi di calcolo per la determinazione delle portate d'aria negli edifici, comprese le infiltrazioni.*

UNI EN 15316:2008 - *Impianti di riscaldamento negli edifici - Metodo di calcolo dei requisiti energetici e dei rendimenti dell'impianto*

UNI EN ISO 10211: 2008 *Ponti termici in edilizia - Flussi termici e temperature superficiali - Calcoli dettagliati.*

UNI EN ISO 13770: *Prestazione termica degli edifici - Trasferimento di calore attraverso il terreno - Metodi di calcolo.*

UNI EN ISO 13786 - *Prestazione termica dei componenti per l'edilizia - Caratteristiche termiche dinamiche - Metodi di calcolo.*

UNI EN ISO 13789: 2008: *Prestazione termica degli edifici - Coefficiente di perdita di calore per trasmissione - Metodi di calcolo.*

UNI EN ISO 13790: 2008: *Prestazione energetica degli edifici - Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento e il raffrescamento.*

UNI EN ISO 14683:2008; *Ponti termici in edilizia - Coefficiente di trasmissione termica lineica - Metodi semplificati e valori di riferimento.*

UNI EN ISO 6946: 2008: *Componenti ed elementi per edilizia - Resistenza termica e trasmittanza termica - Metodo di calcolo.*

UNI EN ISO 7345:1999: *Isolamento termico – Grandezze fisiche e definizioni.*

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

UNI/TS 11300-2: 2008 *Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 2: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria.*

US Department Of Energy (2008), *M&V Guidelines: Measurement and Verification for Federal Energy Projects* US Department Of Energy, <http://mnv.lbl.gov/keyMnVDocs/femp>.