



Università degli Studi di Cagliari

DOTTORATO DI RICERCA
PROGETTAZIONE MECCANICA
Ciclo XXVII

**LA SIMULAZIONE TERMOENERGETICA DINAMICA
DEL SISTEMA EDIFICIO-IMPIANTI APPLICATA A UN
CASO STUDIO : L'AZIENDA OSPEDALIERA "G. BROTZU"**

Settore scientifico disciplinare
ING-IND/09

Presentata da:	dott. Ing. Omar Caboni
Coordinatore Dottorato	Prof. Ing. Natalino Mandas
Tutor	Prof. Ing. Natalino Mandas

Esame finale anno accademico 2014 – 2015

INDICE

INTRODUZIONE	I
<i>ABSTRACT</i>	
<i>Ringraziamenti</i>	
1. CONTESTO GENERALE E SATUS QUO NORMATIVO	1-1
1.1. Quadro normativo e legislativo di riferimento	1-2
1.2. Obiettivo della ricerca	1-7
1.3. Struttura della tesi	1-9
2. L'ANALISI TERMO-ENERGETICA CON LA SIMULAZIONE DINAMICA	2-1
2.1. Introduzione alla simulazione delle performance di un edificio	2-2
2.2. I codici di calcolo impiegati per la simulazione dinamica	2-4
2.2.1. Software TRNSYS	2-4
2.2.2. Software DESIGNBUILDER	2-16
2.3. Calibrazione dei codici di calcolo	2-23
2.3.1. BESTest ASHRAE	2-23
2.3.2. UNI EN15265:2008	2-38
3. APPROCCIO ALLA SIMULAZIONE DINAMICA DELL'EDIFICIO OGGETTO DI STUDIO	3-1
3.1. Caso studio: l'Azienda Ospedaliera "G. Brotzu"	3-2
3.1.1. Descrizione del complesso ospedaliero e degli edifici	3-7
3.1.2. Descrizione degli impianti tecnologici	3-9
3.2. Definizione dei dati input del sistema edificio-impianti (AOB)	3-11
3.2.1. Caratteristiche termofisiche dell'involucro opaco e trasparente	3-11
3.2.2. Caratteristiche tecniche degli impianti tecnologici installati	3-14



APPENDICI



- A. *Planimetrie del Corpo Centrale dell'AOB*
- B. *Caratteristiche termo-fisiche delle superfici opache e trasparenti del Corpo Centrale dell'AOB*
- C. *Caratteristiche degli impianti tecnologici installati ed in esercizio presso il Corpo Centrale dell'AOB*

INTRODUZIONE

La presente tesi è stata prodotta durante la frequenza al corso di Dottorato in Progettazione Meccanica dell'Università degli Studi di Cagliari, a.a. 2014/2015 – XXVII ciclo, con il supporto di una borsa di studio finanziata con le risorse del P.O.R. SARDEGNA F.S.E. 2007-2013 - Obiettivo competitività regionale e occupazione, Asse IV Capitale umano, Linea di Attività I.3.1 “Finanziamento di corsi di dottorato finalizzati alla formazione di capitale umano altamente specializzato, in particolare per i settori dell’ICT, delle nanotecnologie e delle biotecnologie, dell’energia e dello sviluppo sostenibile, dell’agroalimentare e dei materiali tradizionali”

A seguito della conclusione del lavoro di ricerca dal titolo “Proposta di un sistema competitivo e flessibile per la riduzione del fabbisogno e l’ottimizzazione della gestione energetica dell’Azienda Ospedaliera G. Brotzu”, finanziato con Legge della Regione Sardegna n. 7/2007 ^[1], portato a compimento dal gruppo di lavoro composto dallo scrivente e dai colleghi Ing. F.V. Caredda e Ing. S. La Croce, sotto il coordinamento scientifico del Prof. Ing. N. Mandas, è stata prodotta una diagnosi energetica strutturata dell’Ospedale. Successivamente agli interessanti esiti ottenuti dal lavoro di ricerca avviato, si è colta l’occasione di proseguire ed approfondire nel presente dottorato di ricerca le tematiche connesse all’analisi termo-energetica con la simulazione dinamica e la sua applicazione coordinata all’attività sperimentale sul campo.

Si è sviluppata una fase di lavoro che ha riguardato la calibrazione e la validazione dei codici di calcolo utilizzati per le simulazioni e si è curata la messa a punto del sistema di monitoraggio degli impianti di climatizzazione installati presso l’Azienda Ospedaliera.

Nel dettaglio, è stato oggetto di studio puntuale il reparto di Medicina Interna 1, sito all’VIII Piano dell’Ospedale, nel quale si è proceduto ad organizzare una campagna di misurazione in situ dei parametri termo-igrometrici ambientali e della domanda di energia termica. Avendo a disposizione un sistema edificio-impianti esistente e dei dati reali sulle prestazioni di riferimento, è stato possibile identificare un modello realistico del reparto analizzato, per mezzo dell’impiego di una modellazione data-driven condotta con l’ausilio del codice DesignBuilder. E’ stato creato, quindi, un modello inverso, con il quale, note le variabili di input e misurate quelle di output, è stato possibile effettuare una simulazione calibrata del reparto in regime dinamico. In questo modo, è stato possibile attivare un processo iterativo di convergenza, dato dalla sequenza di confronto tra valori calcolati e valori reali, che è stato determinante per creare un modello attendibile e realistico del reparto, che fosse, inoltre, un utile ed efficace strumento di supporto operativo, in grado di indirizzare la scelta sulle migliori soluzioni di efficienza energetica.

ABSTRACT

This research has developed a first part that involved the validation test of building energy modeling software, in order to compare calibrate numerical solution to experimental measures of energy demand and thermo-hygrometric parameters. Once installed in the Internal Medicine Department (of the AOB Hospital in Cagliari) a building management system for monitoring that measures, this study has developed the use of a data-driven modeling, for implement numerical models with the aid of DesignBuilder software.

The management of the input variables, the monitoring data and the building performance simulation output, allow to create an effective tool for the design and the operation of buildings. The final aim of this research is to use in current practice that useful and effective tool in operational support, in order to direct the choice of best energy efficiency and energy saving solutions.

RINGRAZIAMENTI

Il primo, sentito e doveroso ringraziamento va a mia moglie Raffaella, la quale mi ha sempre pazientemente supportato, strenuamente incoraggiato e incondizionatamente sostenuto durante questo impegnativo ed intenso lavoro di ricerca e, senza la quale, sarebbe stata un'ardua impresa portare a compimento questo dottorato di ricerca.

Al Prof. Natalino Mandas vorrei riservare un ringraziamento particolare per la fiducia accordata, per la pazienza dimostrata e per l'impegno profuso durante tutto il percorso di dottorato. Il Prof., infatti, dal mio punto di vista, ha ricoperto (e ricopre...) l'impegnativo ruolo di *magister* nella formazione e nella ricerca universitaria, in maniera assolutamente responsabile e sincera, una modalità che, purtroppo, mi pare stia diventando quasi desueta.

Un ringraziamento speciale va al direttore, dott. Massimo Busuoli, ed a tutti i componenti dello staff del Liaison Office dell'ENEA di Bruxelles, che mi hanno affettuosamente accolto presso la loro famiglia, durante la mia esperienza di dottorato all'estero. In particolare vorrei ringraziare l'ex collega ed ormai caro amico Salvatore Amico Roxas (Amico, come *Ami* e Roxas, come *Roxas*...) per la calorosa accoglienza ed il professionale affiancamento ricevuti durante il mio periodo di permanenza a Bruxelles, ma soprattutto per il prezioso e sincero incoraggiamento avuto per lo sviluppo finale del presente lavoro di tesi.

Un ringraziamento particolare va al collega ed amico Francesco Valentino Caredda, con il quale abbiamo condiviso l'intensa esperienza di ricerca applicata sull'AOB e tutta la fase relativa alla modellazione, alla simulazione dinamica ed alla validazione dei codici di calcolo, il quale mi ha offerto un prezioso contributo, condividendo pazientemente la sua esperienza.

Naturalmente ringrazio tutto il personale e lo staff di tecnici (responsabili tecnici, idraulici, caldaisti, elettricisti, etc ...) dell'Ufficio Tecnico dell'AOB coinvolto per il compimento di questo impegnativo lavoro, che si è sempre dimostrato disponibile e gentile ad ogni nostra richiesta di collaborazione. Se soltanto fossero stati coordinati da una guida più illuminata...

Un particolare ringraziamento va al Dr. Roberto Ganga, Primario del reparto di Medicina Interna 1, ed a tutto lo staff medico e paramedico per la gentile disponibilità accordata e la grande pazienza dimostrata, soprattutto durante le nostre assidue visite in reparto (ed in segreteria...) per effettuare la periodica raccolta dei dati.

CAPITOLO 1

CONTESTO GENERALE E SATUS QUO NORMATIVO

Il recente incremento della domanda di energia, dovuto essenzialmente alla crescita economica dei Paesi in via di sviluppo (BRIC) e, quindi, all'espansione demografica mondiale, ha riportato, in maniera importante, l'attenzione di tutti i Paesi sulla disponibilità di approvvigionamento di combustibile fossile e sulla dipendenza dovuta al suo utilizzo intensivo. Questa attenzione, riferita al breve recente periodo, è incentrata su relazioni di equilibrio geo-politico ed interessa inevitabilmente le ricadute di natura sostenibile e ambientale, caratterizzate da un aumento costante delle emissioni di CO₂ e di altri gas climalteranti,. Per questa ragione, quasi tutti i Paesi hanno stretto accordi e ratificato protocolli di intesa col fine di individuare obiettivi di sostenibilità ambientale, da raggiungere e rispettare entro tempi ben definiti, al fine di porre rimedio alla questione dei cambiamenti climatici. Ergo, il 17 dicembre 2008 il Parlamento di Strasburgo ha approvato il "Pacchetto Clima-Energia 20-20-20" per la riduzione delle emissioni di gas serra responsabili del riscaldamento globale e per rafforzare la lotta ai cambiamenti climatici. Il "Pacchetto" (contenuto nella Direttiva 2009/29/CE) è entrato in vigore nel giugno 2009 e sarà valido fino al 2020, è costituito da provvedimenti operativi con cui l'Unione Europea conferma la volontà degli Stati Membri di continuare ad impegnarsi nel processo negoziale per la lotta ai cambiamenti climatici. L'Unione Europea (e quindi i suoi stati membri) ha inizialmente individuato e fissato un obiettivo a medio termine (denominato "Piano 20-20-20") per ridurre le emissioni di CO₂ di almeno il 20%, aumentare del 20% l'energia prodotta da fonti energetiche rinnovabili e ridurre i consumi energetici globali del 20% rispetto ai livelli del 1990 entro il 2020. Oggi i target di sostenibilità da raggiungere sono più ambiziosi (40-27-27) e l'orizzonte temporale individuato dalla programmazione delle azioni prevede un primo traguardo per l'anno 2030, per giungere ad una visione strategica medio-lunga che mira già al 2050.

Per raggiungere questi prefissati ambiziosi obiettivi di sostenibilità è necessario tenere in considerazione nel contempo lo sviluppo delle Smart Grid, ben definite in ambito di scala. Per Smart Grid si intende una rete elettrica "moderna" in grado di integrare intelligentemente le azioni di tutti gli utenti connessi (consumatori e produttori) al fine di distribuire energia in modo efficiente, sostenibile, economicamente vantaggioso e sicuro. Non più, quindi, una rete di distribuzione sostanzialmente passiva che trasporta l'energia in una sola direzione, da poche grandi centrali di generazione a tanti piccoli punti di consumo dislocati presso gli utenti finali. Si tratta, invece, di una rete internet "di energia",

in cui ogni sistema di micro generazione è connesso in rete ed è in grado di comunicare e ricevere dati, dove, in sostanza ogni casa, ogni utente potrebbe divenire un “prosumer”, ossia un consumatore che è anche produttore di energia, in un mercato aperto sia ai grandi distributori che ai piccoli utenti.

1.1 – Quadro normativo e legislativo di riferimento

“Gli edifici sono responsabili del 40 % del consumo globale di energia nell’Unione. Il settore è in espansione, e ciò è destinato ad aumentarne il consumo energetico. Pertanto, la riduzione del consumo energetico e l’utilizzo di energia da fonti rinnovabili nel settore dell’edilizia costituiscono misure importanti necessarie per ridurre la dipendenza energetica dell’Unione e le emissioni di gas a effetto serra. ... La riduzione del consumo energetico e il maggior utilizzo di energia da fonti rinnovabili rappresentano inoltre strumenti importanti per promuovere la sicurezza dell’approvvigionamento energetico e gli sviluppi tecnologici e per creare posti di lavoro ...” e “La gestione del fabbisogno energetico è un importante strumento che consente all’Unione di influenzare il mercato mondiale dell’energia e, quindi, la sicurezza dell’approvvigionamento energetico nel medio e lungo termine...” così cita la Direttiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio sulla prestazione energetica in edilizia. Tale messaggio, contenuto nella normativa europea, recepita ormai anche a livello nazionale, punta l’attenzione in maniera importante sulla necessità di progettare e riprogettare edifici in modo sostenibile, tenendo in considerazione la necessità di conoscere la quantità e la qualità dell’energia necessaria al loro fabbisogno. Si stima, quindi, che un considerevole risparmio energetico può essere ottenuto proprio attraverso un’attenta pianificazione dell’efficienza energetica nell’edilizia.

A livello nazionale, il D.Lgs 192 del 2005, in attuazione della Direttiva 2002/91/CE, e i successivi collegati D.Lgs 311 del 2006 e D.P.R. n. 59 del 2009, fanno riferimento cogente al controllo del fabbisogno di energia del sistema edificio-impianti, introducendo la definizione degli indici di *performance* energetica (EP), espressi sotto forma di energia primaria (kWh/m^2 oppure kWh/m^3 per anno), riferiti alla climatizzazione invernale, alla climatizzazione estiva, alla produzione di acqua calda sanitaria ed all’illuminazione artificiale.

Sul piano normativo troviamo le specifiche tecniche UNI/TS 11300, riferite alle prestazioni

energetiche degli edifici, che, suddivise in 4 parti, definiscono le modalità per l'applicazione nazionale della UNI EN ISO 13790:2008. La Parte 1, con riferimento al metodo mensile per il calcolo dei fabbisogni di energia termica per riscaldamento e per raffrescamento, orienta nella determinazione del fabbisogno di energia dell'edificio con tutte le possibili applicazioni previste: calcolo di progetto (*design rating*), valutazione energetica di edifici attraverso il calcolo in condizioni standard (*asset rating*) o in particolari condizioni climatiche e d'esercizio (*tailored rating*). La Parte 2, invece, fornisce dati e metodi per la determinazione di: il fabbisogno di energia utile per acqua calda sanitaria; i rendimenti e dei fabbisogni di energia elettrica degli ausiliari dei sistemi di riscaldamento e produzione di acqua calda sanitaria; i fabbisogni di energia primaria per la climatizzazione invernale e per la produzione dell'acqua calda sanitaria. La specifica, in questa seconda parte, si applica a sistemi di nuova progettazione, ristrutturati o esistenti per: sistemi per il solo riscaldamento; per sistemi misti o combinati per riscaldamento e produzione acqua calda sanitaria; per sistemi deputati alla sola produzione di acqua calda per usi igienico-sanitari. La Parte 3 della presente specifica, fornisce dati e metodi per la determinazione: dei rendimenti e dei fabbisogni di energia dei sistemi di climatizzazione estiva; dei fabbisogni di energia primaria per la climatizzazione estiva. Si applica unicamente ad impianti fissi di climatizzazione estiva con macchine frigorifere azionate elettricamente o ad assorbimento. La specifica si applica a sistemi di nuova progettazione, ristrutturati o esistenti per il solo raffrescamento o per la climatizzazione estiva. La Parte 4, la ultima, si focalizza sull'utilizzo delle energie rinnovabili e di altri metodi di generazione per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria.

In occasione del presente lavoro di tesi, è stata condotta una ricerca per verificare quale fosse il contesto normativo di riferimento nazionale in materia di climatizzazione negli ospedali. Le norme e le leggi che regolano la progettazione di una struttura sanitaria sono molteplici e riguardano diverse competenze e campi di applicazione. Limitando l'attenzione alle condizioni di benessere ambientale legato alla climatizzazione dei locali, i parametri che è necessario controllare sono la temperatura, l'umidità relativa e la concentrazione di inquinanti (carica batterica, gas medicali, etc. ...). Questi parametri determinano le caratteristiche di qualità dell'aria ed il loro controllo deve avvenire attraverso la definizione dei volumi/ora di ventilazione, delle modalità di filtraggio, di specifiche condizioni di pressione e di temperatura dei locali. La normativa italiana vigente in materia di benessere

termo-igrometrico nelle strutture sanitarie si basa principalmente su questi testi di riferimento:

- ✓ Circolare del Ministero dei Lavori Pubblici del 22/11/1974, n. 13011 ;
- ✓ D.P.R. del 14 Gennaio 1997, “*Ordinamento ed Organizzazione dei Servizi Sanitari ed Assistenziali*” (G.U. 20 Febbraio 1997, n.42, S.O.);
- ✓ Norma UNI 10339.

La Circolare del Ministero dei Lavori Pubblici del 22/11/1974, n. 13011 consiste in un brevissimo documento dal titolo “Requisiti fisico-tecnici per le costruzioni edilizie ospedaliere. Proprietà termiche, igrometriche, di ventilazione e di illuminazione”, che per anni è stato l'unico testo del *corpus* legislativo per strutture sanitarie a disciplinare il settore. Il D.P.R. del 14 Gennaio 1997, “*Ordinamento ed Organizzazione dei Servizi Sanitari ed Assistenziali*”, invece, disciplina i requisiti minimi per l'esercizio dell'attività sanitaria e fornisce indicazioni tecniche un po' più dettagliate necessarie per la progettazione degli impianti e dell'edificio. Vi sono, inoltre, specifiche normative tecniche che disciplinano diversi altri settori come, ad esempio, la citata UNI 10339 - “*Impianti aeraulici ai fini di benessere. Generalità, classificazione e requisiti. Regole per la richiesta d'offerta, l'offerta, l'ordine e la fornitura*” e la UNI 8199 - “*Misura in opera e valutazione del rumore prodotto negli ambienti degli impianti di riscaldamento, condizionamento e ventilazione*”. In particolare, la prima UNI fornisce dati tecnici in riferimento alla Circolare n.13011 in merito alla ventilazione e ai dispositivi atti a garantire una buona qualità dell'aria; la seconda, invece, definisce le modalità di misurazione del livello di rumore conseguente al funzionamento degli impianti di climatizzazione e ventilazione negli ambienti, definendo dei criteri di valutazione per la rumorosità. Il più recente riferimento nazionale in materia sanitaria risulta essere il documento contenente le *Linee guida ISPESL* per la definizione degli standard di sicurezza ed igiene ambientale dei reparti, 23 luglio 1999, contenente *un'ottimizzazione delle misure di sicurezza e degli standard per quanto concerne l'intero reparto operatorio*, con particolare riferimento alle seguenti tematiche: requisiti tecnici, impiantistici e tecnologico-strutturali; requisiti igienico-ambientali; indicatori di organizzazione e gestione .

Per informazioni di riferimento meglio dettagliate è stato opportuno riferirsi anche alle normative vigenti non italiane: in particolare quelle emanate in Germania, come le DIN

1946/87, e negli USA (le indicazioni fornite dall'ASHRAE nei suoi "Standards" e negli "Handbooks").

D.P.R. del 14 Gennaio 1997, "Ordinamento ed Organizzazione dei Servizi Sanitari ed Assistenziali" (sintesi)

Il D.P.R. del 1997, vigente fino ai tardi anni Novanta, definisce i requisiti minimi che devono essere rispettati ed applicati da parte di una struttura sanitaria, in termini di politica, di obiettivi ed attività, di struttura organizzativa, di gestione delle risorse umane e tecnologiche, di valutazione e miglioramento della qualità, di sistema informativo. I requisiti minimi strutturali, tecnologici e organizzativi specifici per le varie strutture, variamente differenziate, sono ulteriormente suddivisi in base alla destinazione d'uso delle varie zone della struttura stessa. La sezione più interessante del decreto riguarda i requisiti minimi impiantistici delle strutture ospedaliere a ciclo continuato o diurno per acuti. Il complesso sanitario viene suddiviso in 13 ambienti funzionali. In particolare per n.6 zone (medicina nucleare, attività di radioterapia, day-hospital, day-surgery, pronto soccorso ospedaliero e area di degenza), non vengono definite delle specifiche condizioni di benessere, ma sussistono soltanto altri obblighi di sicurezza e di igiene (alimentazione da impianto forza motrice, impianto gas medicale, illuminazione di emergenza e altro), per cui molti progettisti si riferiscono alla circolare precedente o a normativa estera. Sono riportati a seguire i principali requisiti termo-igrometrici e di ventilazione, divisi per zone:

Reparto operatorio:

- temperatura interna (stagione invernale ed estiva) compresa tra 20°C - 24°C;
- umidità relativa (stagione invernale ed estiva) compresa tra 40% e 60%;
- ricambi d'aria di 15 volumi/ora con obbligo di rinnovo (esclusivamente aria esterna) senza ricircolo; è ammesso, secondo le Linee Guida dell'ISPESL del 23/7/1999, mantenendo i 15 volumi/ora d'aria di rinnovo (aria esterna), incrementare questo parametro utilizzando volumi di aria di ricircolo in aumento, purché si utilizzi dell'aria proveniente dalla stessa sala operatoria. E' severamente vietato miscelare flussi d'aria provenienti da due diverse sale operatorie. La deroga riportata equipara così la norma italiana con quella vigente negli altri stati europei;
- filtraggio dell'aria del 99.97%.

Punto nascita-blocco parto:

- temperatura interna invernale ed estiva compresa tra 20°C e 24°C;

- umidità relativa invernale ed estiva compresa tra 30% e 60%;
- ricambi d'aria di 6 volumi/ora e obbligo d'aria esterna.

Rianimazione e terapia intensiva:

- temperatura interna invernale ed estiva compresa tra 20°C e 24°C;
- umidità relativa invernale ed estiva compresa tra 30% e 60%;
- ricambi d'aria di 6 volumi/ora e obbligo d'aria esterna.

Gestione farmaci e materiale sanitario:

- temperatura interna invernale ed estiva compresa tra 20°C e 26°C;
- umidità relativa invernale ed estiva compresa tra 45% e 55%;
- ricambi d'aria di 2 volumi/ora e obbligo d'aria esterna;
- classe di purezza del filtraggio dell'aria in conformità a filtri di media efficienza;

Servizio di sterilizzazione e servizio di disinfezione:

- temperatura interna invernale ed estiva compresa tra 20°C e 27°C;
- umidità relativa invernale ed estiva compresa tra 40% e 60%;
- ricambi d'aria di 15 volumi/ora e obbligo d'aria esterna;
- classe di purezza del filtraggio dell'aria in conformità a filtri di media efficienza.

Servizio mortuario:

- temperatura interna invernale ed estiva non superiore a 18°C per i locali con presenza di salme;
- umidità relativa invernale ed estiva compresa tra 55% e 65%;
- ricambi d'aria di 15 volumi/ora e obbligo d'aria esterna.

1.2 – Obiettivo della ricerca

Il lavoro di ricerca sviluppato durante il dottorato ha perseguito, come finalità ambiziosa generale, lo studio di metodi applicativi efficaci, basati sulla simulazione termo-energetica dinamica, in grado di dare soluzioni alle problematiche inerenti la “questione energetica” correlata agli edifici, che la cogente normativa impone di affrontare e risolvere in tutte le fasi di vita dell’edificio, progettazione, costruzione, gestione, recupero e riqualificazione. Vista la particolare complessità e la magnitudo del caso scelto come oggetto di studio, questo lavoro vuole rappresentare un concreto esempio di applicazione di metodologie e criteri scientifici, riproponibili in altre realtà, anche in differenti ambiti e contesti ed aventi dimensioni meno importanti.

L’obiettivo principale della ricerca si è focalizzato, quindi, sull’applicazione di metodi di approccio alla modellazione e sullo sviluppo di questi in ambito sperimentale. Il lavoro di ricerca svolto ha dapprima riguardato l’analisi termo-energetica tramite modellazione dinamica del sistema edificio-impianti dell’Azienda Ospedaliera “G. Brotzu”. Una volta acquisiti i risultati derivanti dalla simulazione effettuata con approccio diretto, il lavoro ha interessato l’analisi di confronto dei risultati ottenuti con i dati misurati derivanti dalla diagnosi energetica effettuata presso l’edificio oggetto di studio. L’esito di questa prima comparazione, ha portato l’ambito di ricerca sul fronte sperimentale: è stato possibile attrezzare il reparto di Medicina Interna 1 del Piano 8° dell’Ospedale con un sistema in grado di monitorare sia l’energia termica utilizzata per la climatizzazione, che i valori di temperatura ed umidità relativa degli ambienti climatizzati. A seguito di una campagna di raccolta delle misure, è stato possibile focalizzare un altro obiettivo fondamentale per la ricerca applicata in questi ambiti, la conduzione della modellazione numerica con l’approccio governato dai dati.

A questo punto, disponendo di un sistema (edificio-impianti) esistente di riferimento e di dati reali sulle prestazioni effettive, è stato possibile identificare un modello realistico del reparto analizzato, per mezzo dell’impiego del software DesignBuilder. E’ stato sviluppato, quindi, un modello inverso: note le variabili di input e misurate quelle di output, l’obiettivo è diventato quello di formulare un modello matematico di descrizione del sistema edificio-impianti. E’ stata condotta, quindi, una simulazione calibrata del reparto, per mezzo del codice DesignBuilder, dopo aver inserito tarati dati di ingresso nel programma, in modo che i risultati relativi al fabbisogno energetico elaborato fossero affini alla domanda di

energia misurata. In questo modo è stato possibile, una volta giunti a convergenza anche con i parametri termo-igrometrici interni, effettuare previsioni molto più affidabili, rispetto agli approcci puramente statistici. Il processo iterativo di convergenza effettuato con scansione oraria, rappresentato dalla sequenza di confronto tra valori calcolati e valori reali, è stato il determinante procedimento perseguito per ottenere la migliore corrispondenza tra calcolo e misura. L'obiettivo ultimo del processo di modellazione inversa è stato quello di creare un modello attendibile e realistico del reparto, che fosse un utile ed efficace strumento operativo di supporto, in grado di indirizzare la scelta sulle migliori soluzioni di efficienza energetica, proprio grazie agli esiti ottenuti dalla simulazione effettuata a seguito della modellazione numerica degli scenari di intervento immaginati.

1.3 – Struttura della tesi

L'impostazione metodologica adottata durante il lavoro di ricerca ha previsto un'importante iniziale fase di ricognizione incentrata sull'acquisizione delle necessarie informazioni sullo stato dell'arte della ricerca e sullo status quo normativo in materia di efficienza energetica e di simulazione termoeconomica, sia in regime stazionario che e dinamico. Nella parte introduttiva della tesi si è riportato, quindi, il contesto generale relativo agli argomenti sopra citati.

A seguito dell'approfondita ricerca effettuata per ottenere la più ampia documentazione sugli standard nazionali ed internazionali esistenti in letteratura in materia di simulazione termoeconomica dinamica, la seconda parte della presente tesi ha visto, dapprima, la descrizione dei codici di calcolo utilizzati e la trattazione delle loro modalità di funzionamento, con un cenno sui loro algoritmi di calcolo e sui modelli matematici adottati. Questa parte si conclude con la presentazione delle due procedure di calibrazione dei codici di calcolo adottate (BESTest dell'ASHRAE e UNI 15265) e con la presentazione dei risultati ottenuti.

La terza parte descrive l'oggetto del caso studio della presente tesi: L'Azienda Ospedaliera "G. Brotzu", della quale è stata riportata una presentazione relativa allo stato dei luoghi ed alle caratteristiche di configurazione geometrica ed impiantistica, restituendo una definizione puntuale del sistema edificio-impianti e delle modalità di gestione ed esercizio attualmente in essere. La fase centrale del lavoro sviluppato in questa parte ha visto la trattazione delle operazioni messe in atto per descrivere il problema fisico reale e per calibrare il modello numerico, utilizzato per poter procedere con la simulazione dinamica del sistema edificio-impianti. La fase conclusiva ha visto lo svolgimento della simulazione con due codici di calcolo (TRNSYS e DesignBuilder) e la presentazione del confronto tra i dati ottenuti in sede di Energy Audit ed i risultati ottenuti dalle simulazioni dinamiche effettuate.

Una quarta parte ha riguardato la descrizione di tutta l'attività sperimentale di monitoraggio e simulazione dinamica portata avanti presso il Piano 8° dell'AOB. Nella prima sezione, estremamente interessante ed impegnativa, è stata descritta la fase di messa a punto del sistema di acquisizione dei dati di energia termica degli impianti di climatizzazione e di temperatura e umidità relativa degli ambienti interni al reparto di Medicina Interna 1. Una seconda sezione ha riguardato l'attività di raccolta ed elaborazione dei dati raccolti durante

la campagna di acquisizione. L'ultima fase ha visto lo sviluppo dell'analisi termico-energetica del reparto di Medicina Interna 1, condotta con la modalità inversa, che ha previsto il confronto puntuale ed iterativo tra le misure rilevate in situ ed i risultati delle simulazioni dinamiche condotte con il software DesignBuilder. La fase conclusiva riporta l'analisi delle criticità e delle problematiche riscontrate durante questa ultima fase di modellazione.

L'ultima parte, infine, analizza in maniera critica e realistica le possibilità di individuare interventi di miglioramento dell'efficienza energetica nel contesto del Piano 8° dell'AOB, valutando il potenziale offerto dalla modellazione *data driven*. Sono presentate, infine, le conclusioni e gli scenari di sviluppo futuro offerti dalla continuazione del lavoro di ricerca prodotto nell'ambito del dottorato di ricerca.

CAPITOLO 2

L'ANALISI TERMO-ENERGETICA CON LA SIMULAZIONE DINAMICA

Progettare edifici sostenibili che soddisfino tutti i requisiti attualmente richiesti è una sfida senza precedenti ai nostri giorni. Ricercatori, professionisti e altri portatori di interesse si confrontano con tale sfida, dovuta alla necessità di riconoscere e considerare i processi dinamici attorno a noi, come il cambiamento climatico globale, la disponibilità limitata di combustibili fossili, la maggior necessità di flessibilità richiesta agli spazi abitativi, la crescente aspettativa di comfort di chi abita un edificio. Gestire tutti questi aspetti al fine di raggiungere soluzioni efficaci di sistemi edificio-impianti, genera ineluttabilmente la necessità di adottare un approccio integrato ed olistico che porta alla strutturazione di un metodo affidabile e dinamico in grado di soddisfare le esigenze, in maniera interattiva ed iterativa.



Figura 1 - Interazione dinamica

In questo scenario, abbiamo la necessità di modelli e strumenti in grado di operare in modo interdisciplinare, interattivo, efficace ed affidabile, in differenti ambiti ed a diverse scale di intervento. Solamente in questo modo, l'ottimizzazione globale della produzione e della domanda di energia, anche nell'ambito degli edifici, diviene una reale necessità operativa, che non può più limitarsi solamente al rispetto dei requisiti minimi di legge o dei parametri termo-fisici calcolati con metodi stazionari. Si può affermare che il tradizionale approccio progettuale ingegneristico è in gran parte inadatto per affrontare la citata sfida perché è tipicamente mono-disciplinare, limitato a determinare soluzioni "causa-effetto", dal campo di azione limitato. Gli strumenti tradizionali utilizzati adottano condizioni al contorno stazionarie (di norma solo estreme) e spesso basate su metodi analitici, che in larga misura sono caratterizzati dal fatto di fornire una soluzione esatta di un modello della realtà molto semplificato. Il lavoro sviluppato in questa tesi di dottorato mira a superare questo approccio tradizionale, adottando un approccio olistico e l'applicazione di un metodo numerico dinamico applicato per la riqualificazione di edifici esistenti ^[9].

^[9] J.L.M. Hensen, R. Lamberts, "Building performance simulation for design and operation", ed. Spon Press, 2011

2.1 – Introduzione alla simulazione delle performance di un edificio

Progettare un edificio nZEB, *nearly Zero Energy Building* o, comunque, avente delle pretese di sostenibilità comprovata, rappresenta sicuramente una questione al centro dell'interesse generale di questo momento storico. Gli aspetti da affrontare, in virtù soprattutto delle prossime imminenti prescrizioni normative in materia, sono molteplici e riguardano l'energia, l'ambiente e l'economia, valutati peraltro sull'intero ciclo di vita (*Life Cycle*), dalla costruzione alla dismissione, passando per la gestione e la manutenzione degli edifici. Aspetti non meno importanti riguardano la maggior necessità di flessibilità richiesta agli spazi abitativi, l'aspettativa di comfort di chi abita un edificio e la crescente consapevolezza della relazione esistente tra ambiente interno, salute, benessere e produttività. Occorre, quindi, saper impiegare delle tecniche progettuali che permettano di effettuare, consapevolmente, delle scelte strategiche e tecnologiche in grado di dare garanzie sul raggiungimento degli obiettivi da raggiungere. Nel dettaglio, si deve poter prevedere il comportamento del sistema edificio-impianti al variare delle condizioni al contorno, quali il clima, la disponibilità (e il costo) delle fonti energetiche, le abitudini degli occupanti e le modalità di gestione degli impianti. Ergo, l'esigenza di dover disporre di strumenti di calcolo avanzato, al fine di poter esaminare in un regime dinamico gli effetti delle scelte progettuali compiute, ci proietta in un contesto dove la progettazione deve essere sempre più integrata e consapevole. Deve, cioè, essere in grado di valutare le interazioni fra i diversi sub-sistemi che intervengono nel sistema edificio-impianti ed essere in grado di prevedere i futuri comportamenti del sistema al variare delle condizioni al contorno. La simulazione numerica delle prestazioni degli edifici (*building performance simulation*) è una disciplina che nell'ultimo periodo sta vivendo importanti evoluzioni, infatti, vede ormai un suo diffuso impiego sia negli ambiti della ricerca, che nel contesto professionale. La disponibilità di un buon codice di simulazione termo-energetica (unitamente all'opportuno *know how...*) permette di fare pressoché qualsiasi tipo di valutazione sull'edificio. E' possibile quantificare gli effetti dell'orientamento, della distribuzione delle masse termiche, dell'isolamento termico, dell'uso di schermatura solare, ed, inoltre, è possibile quantificare gli esiti dell'installazione di un impianto a tutt'aria piuttosto che di un impianto a bassa entalpia, arrivando a considerare i contributi offerti dai sistemi energetici alimentati da fonti energetiche rinnovabili. In sostanza, i codici di calcolo con queste caratteristiche permettono di ottimizzare le prestazioni del sistema edificio-

impianti, consentendo di valutare in maniera attendibile l'impatto di ogni singola scelta attraverso un processo iterativo. ^[11]

L'analisi numerica delle prestazioni degli edifici prevede una fase di modellazione ed una fase di simulazione, con approccio multidisciplinare, orientato alla risoluzione delle problematiche e ad ampio campo di azione, dove si assumono condizioni al contorno dinamiche, ossia che mutano in funzione della variazione del tempo, con lo scopo di fornire una soluzione approssimata di un modello realistico, immagine della complessità del mondo reale. Sarebbe opportuno, perciò, non utilizzare le parole simulazione e modello come sinonimi, in quanto esprimono, in questo campo specifico, dei concetti distinti e complementari. Una simulazione mette in atto o implementa un modello. Un modello è una descrizione di un certo sistema che deve essere simulato, dove il modello è spesso coincidente con un modello matematico, che descrive tale sistema in modo che possa essere compreso da chiunque legga la descrizione. Tenendo presente che, un sistema contiene oggetti che interagiscono tra loro, la simulazione numerica è forse uno dei più potenti strumenti operativi disponibili oggi per la ricerca applicata, quindi è importante non dimenticare che tale simulazione non fornisce "da sola" soluzioni o risposte. Lavorando con questa disciplina si ha a che fare con molteplici pluralità di elementi, che interagendo in modo reciproco e dinamico, rendono molto complessa la natura del compito, rendendo, molto spesso, difficoltoso il controllo della qualità dei risultati elaborati. A seguito dell'esperienza maturata da questi anni di dedizione alla ricerca, è possibile affermare che non sono importanti le sole risposte, ma diventa fondamentale capire e perseguire la comprensione delle logiche che stanno dietro alle risposte. [9]

^[11] M. Filippi – E. Fabrizio, *"Introduzione alla simulazione termoenergetica dinamica degli edifici"*, ed. Delfino – Guida AICARR, 2012

2.2 – I codici di calcolo impiegati per la simulazione delle performance di un edificio

Il modello di calcolo alla base dei software di simulazione energetica, utilizzati nel lavoro di ricerca sviluppato in questa tesi, si fonda sulla conoscenza delle leggi fisiche che regolano il sistema oggetto dell'analisi. Inserendo nel sistema i necessari dati di ingresso e le relative condizioni al contorno, si ottengono i dati di *output* richiesti. Le funzioni di trasferimento sono gli algoritmi essenzialmente utilizzati per il calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici. Una funzione di trasferimento è un algoritmo in grado di collegare le sollecitazioni (ad es. temperature, flussi termici) indotte su un sistema con la risposta del sistema stesso. I codici di calcolo impiegati, TRNSYS e DesignBuilder, utilizzano le funzioni di trasferimento CTF (*Conduction Transfer function*) per la valutazione del flusso termico trasmesso per conduzione attraverso l'involucro in regime dinamico, mentre il bilancio termico sull'aria ambiente viene applicato per valutare il flusso termico che deve essere fornito all'ambiente per mantenere una certa temperatura.

2.2.1 Software TRNSYS



TRNSYS è un programma sviluppato dalla *Solar Energy Laboratory (University of Wisconsin-Madison - USA)*. Il codice di calcolo, completo ma adattabile, è calibrato per la simulazione dinamica di sistemi [*TRaNsient SYstems Simulation*] e si presenta con una struttura modulare. L'utente seleziona ed assembla *ad hoc* gli elementi determinanti e componenti il sistema da elaborare, quindi, crea le opportune interconnessioni tra questi, in modo da modellare una sequenza ordinata di operazioni. Il software contiene, già al suo interno, una libreria di elementi in grado descrivere il comportamento di molti dei componenti che comunemente si trovano all'interno dei sistemi di energia (termica ed elettrica), nonché di componenti (*routine*) per gestire i dati di input al sistema (dati meteo o altre funzioni). E' possibile, per esempio, simulare il comportamento di un sistema edifico-impianti nel suo complesso, avendo una restituzione di risultati ottenuti dalla simulazione dinamica, in coerenza con l'intervallo temporale impostato. La natura modulare del programma TRNSYS offre una grande flessibilità e facilita l'integrazione di altri modelli matematici non inclusi nelle sue

librerie standard, per cui è possibile introdurre e creare modelli personalizzati capaci di descrivere il comportamento di un particolare componente. Ai fini di una corretta e coerente simulazione del sistema oggetto di analisi, all'utente viene richiesto di specificare puntualmente il comportamento di tutti gli elementi che costituiscono il sistema stesso e come tali elementi interagiscano tra di loro. Il cuore del programma è rappresentato dal "*Simulation Studio*", un ambiente di lavoro virtuale che permette di gestire gli elementi, chiamati "*Type*", che ben descrivono il problema fisico-tecnico oggetto della simulazione. Il modello generale che si vuole simulare sarà quindi composto da un insieme di questi "*Type*", interconnessi tra loro attraverso l'interfaccia grafica "IISiBat3" (*Intelligent Interface for the Simulation of Buildings*), che nell'area di lavoro si mostrano, in sostanza, come un diagramma a blocchi, che compendia le impostate relazioni dei vari elementi funzionali del sistema. Attraverso il *Simulation Studio* avviene la gestione vera e propria del codice di calcolo, dove è possibile la selezione di tutti i parametri di controllo, come il periodo di simulazione, la tipologia di solutore numerico, il passo di discretizzazione temporale, etc. ... Un'altra interfaccia fondamentale per la modellazione dei sistemi edificio-impianti è sicuramente l'applicazione TRNBuild, con la quale è stato possibile realizzare il modello dell'edificio dell'AOb, caratterizzato dalle numerose zone termiche individuate al suo interno. Il software TRNSYS è oggi diffusamente utilizzato da ricercatori e professionisti di tutto il mondo, non solamente in ambiente di ricerca, per simulare, testare e validare nuovi *concept* in ambito di energia, ma ormai è largamente impiegato per la progettazione e la simulazione degli edifici, degli impianti tecnologici e dei sistemi ad energia rinnovabile ad essi asserviti, ivi comprendendo la modellazione di eventuali strategie di controllo e gestione (*Building Management System*) dei sistemi edificio-impianti ed il comportamento degli occupanti all'interno degli edifici.

MODELLO MATEMATICO TRNSYS-TRNBUILD

L'elemento di calcolo fondamentale, oggetto di tutte le considerazioni matematiche, è la "zona termica", un'entità non geometrica che descrive il comportamento termico che si vuole modellare. Il modello matematico utilizzato è *a parametri concentrati*, per cui la singola zona termica è descritta come un nodo, caratterizzato dalla capacità termica del

volume d'aria della zona stessa, cui sono applicate le diverse correlazioni di bilancio energetico ^[3].

BILANCIO ENERGETICO - SCAMBIO TERMICO per CONVEZIONE

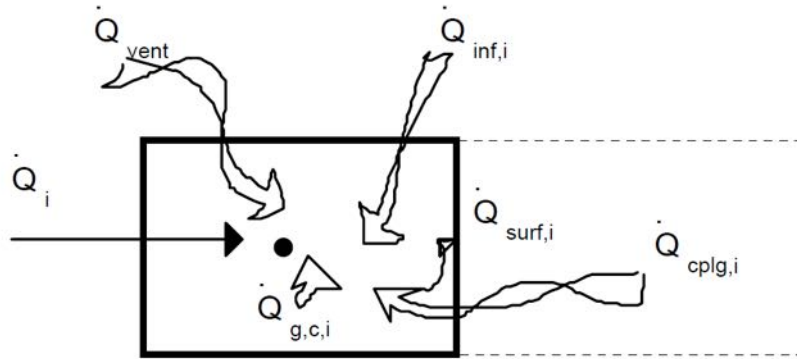


Figura 2 – Schema di bilancio energetico della zona termica (convezione)

Per il generico nodo d'aria i è possibile scrivere il seguente bilancio energetico (figura 2), relativo agli scambi termici per convezione, limitati al solo calore sensibile:

$$\dot{Q}_i = \dot{Q}_{inf,i} + \dot{Q}_{vent} + \dot{Q}_{g,c,i} + \dot{Q}_{cplg,i} + \dot{Q}_{surf,i} \quad (2.1)$$

Il flusso termico $\dot{Q}_i$ verso il nodo d'aria è espresso come somma algebrica delle seguenti quantità:

$\dot{Q}_{inf,i}$ = energia scambiata tra la zona e l'ambiente esterno a causa delle infiltrazioni d'aria.

$$\dot{Q}_{inf,i} = \dot{m}_{inf} \cdot C_p \cdot (T_o - T_i) \quad (2.2)$$

dove

T_i = temperatura del nodo i ,
 T_o = temperatura dell'aria esterna,
 $\dot{m}_{inf}$ = portata massica d'aria esterna che si infiltra nell'ambiente,
 C_p = calore specifico dell'aria.

$\dot{Q}_{vent}$ = apporto termico correlato alla ventilazione forzata (es. impianto HVAC).

$$\dot{Q}_{vent} = \dot{m}_{vent} \cdot C_p \cdot (T_{vent} - T_i) \quad (2.3)$$

dove

T_{vent} = temperatura di immissione nell'ambiente dell'aria di rinnovo,
 $\dot{m}_{vent}$ = portata massica d'aria di rinnovo.

^[3] "TRNSYS 16 Documentation", Volume 5: Mathematical Reference, Solar Energy laboratory, University of Wisconsin-Madison, USA, Gennaio 2006.

$\dot{Q}_{g,c,i}$ = apporti interni gratuiti convettivi (es. persone, illuminazione, apparecchiature, fonti di calore, etc . . .)

$\dot{Q}_{cplg,i}$ = energia scambiata tramite passaggio d'aria da una zona termica a un'altra.

$$\dot{Q}_{cplg,i} = \dot{m}_{coupl} \cdot C_p \cdot (T_{zone,j} - T_i) \quad (2.4)$$

dove

$T_{zone,j}$ = temperatura dell'aria nella zona j ,

$\dot{m}_{coupl}$ = la portata massica d'aria scambiata tra la zona termica i e quella j .

$\dot{Q}_{surf,i}$ = la quantità di calore scambiata, per convezione, tra l'aria all'interno della zona termica e tutte le pareti (opache e trasparenti) che la delimitano.

BILANCIO ENERGETICO – SCAMBIO TERMICO per IRRAGGIAMENTO

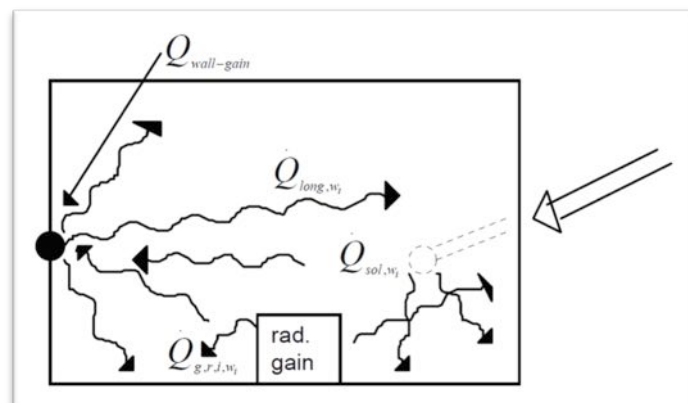


Figura 3 – Schema del bilancio termico per irraggiamento.

Il bilancio energetico relativo allo scambio termico per solo irraggiamento (figura 3), della generica parete i è il seguente:

$$\dot{Q}_{r,wi} = \dot{Q}_{g,r,i,wi} + \dot{Q}_{sol,wi} + \dot{Q}_{long,wi} + \dot{Q}_{wall-gain} \quad (2.5)$$

dove

$\dot{Q}_{r,wi}$ = flusso termico radiativo verso il nodo che rappresenta la parete,

$\dot{Q}_{g,r,i,wi}$ = apporti interni gratuiti radiativi,

$\dot{Q}_{sol,wi}$ = apporto solare verso la parete, causato dalla radiazione solare che attraversa le superfici trasparenti,

$\dot{Q}_{long,wi}$ = radiazione a onde lunghe (infrarosso) scambiata tra la parete i e le altre superfici della zona termica,

$\dot{Q}_{wall-gain}$ = apporto radiante, definito dall'utente, sul nodo che rappresenta la superficie.

BILANCIO ENERGETICO – SCAMBIO TERMICO su una PARETE

Gli scambi termici in una generica superficie, sia essa opaca o trasparente, sono riportati in maniera semplificata nella figura 4. Come si può osservare, si considera la parete come costituita da due strati:

- ✓ uno esterno a temperatura $T_{s,o}$ che si trova a contatto con l'aria esterna alla temperatura $T_{a,o}$ e che scambia calore per convezione ($\dot{q}_{c,s,o}$) e irraggiamento ($\dot{q}_{r,s,o}$);
- ✓ l'altro interno a temperatura $T_{s,i}$ che scambia del calore per convezione ($\dot{q}_{c,s,i}$) e irraggiamento ($\dot{q}_{r,s,i}$) con la zona termica, la quale si trova a temperatura T_i .

Si considerano, inoltre, il flusso termico radiativo costituito dagli apporti solari e/o dagli apporti interni, i quali sono assorbiti dalle due pareti $S_{s,o}$ e $S_{s,i}$, dove in generale $S_s = \dot{Q}_{g,r,i,wi} + \dot{Q}_{sol,wi}$.

Il calore scambiato per conduzione è caratterizzato da due flussi termici:

- ✓ il primo ($\dot{q}_{s,o}$), che dalla superficie esterna procede verso l'interno della parete;
- ✓ l'altro ($\dot{q}_{s,i}$) che dall'interno della parete, al contrario, va verso la superficie interna a contatto con la zona termica i .

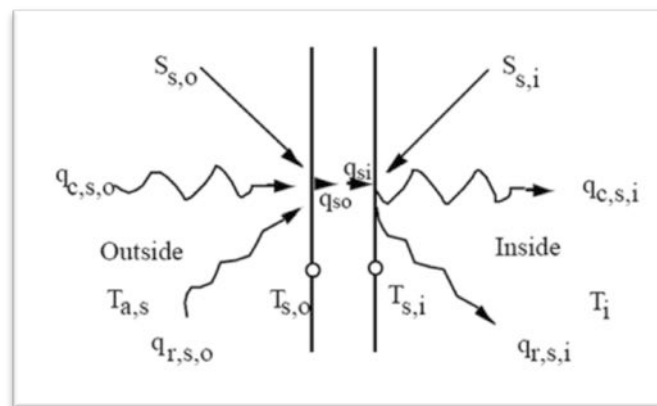


Figura 4 – Schema degli scambi termici di calore attraverso una superficie.

Il modello di parete appena descritto, viene risolto da TRNSYS utilizzando le funzioni di trasferimento CTF (*Conduction Transfer function*), quindi utilizzando un sistema di equazioni che legano lo scambio termico conduttivo con i valori delle temperature di parete, per mezzo di serie di coefficienti numerici ($a_s^k, b_s^k, c_s^k, d_s^k$). In questo modo la parete viene vista come una *black-box*, trascurando il profilo di temperatura nel solido, fornendo una descrizione storica (“all’indietro”) della situazione, in termini di temperatura di parete e

flusso termico, entrante ed uscente. Tali equazioni sono delle serie numeriche, $(\dot{q}_{s,i})$ e $(\dot{q}_{s,o})$, il cui indice k indica l'istante temporale in cui è eseguita la valutazione, dove per $k=0$ si intende l'istante attuale, per $k=1$ l'istante immediatamente precedente, e così via.

$$\dot{q}_{s,i} = \sum_{k=0}^{n_{bs}} b_s^k \cdot T_{s,o}^k - \sum_{k=0}^{n_{cs}} c_s^k \cdot T_{s,i}^k - \sum_{k=0}^{n_{ds}} d_s^k \cdot \dot{q}_{s,i}^k \quad (2.6)$$

$$\dot{q}_{s,o} = \sum_{k=0}^{n_{as}} a_s^k \cdot T_{s,o}^k - \sum_{k=0}^{n_{bs}} b_s^k \cdot T_{s,i}^k - \sum_{k=0}^{n_{ds}} d_s^k \cdot \dot{q}_{s,i}^k \quad (2.7)$$

Questa tecnica è utilizzata sia per le pareti opache che per quelle trasparenti, le quali vengono gestite e modellate come un muro senza massa, parzialmente trasparente alla radiazione solare, ma opaco alle onde lunghe (infrarosso). Nel caso delle superfici vetrate, le equazioni sono sempre valide, ma adottano i valori dei coefficienti differenti:

$$a_s^0 = b_s^0 = c_s^0 = d_s^0 = U_{g,s} \quad (\text{trasmissanza del vetro})$$

$$a_s^k = b_s^k = c_s^k = d_s^k = 0 \quad \text{per tutti } k > 0$$

La risoluzione del problema degli scambi termici (convettivi, radiativi e conduttivi) della zona termica, ossia del nodo i , si ottiene considerando contemporaneamente le informazioni contenute nelle set di equazioni 2.1, 2.5, 2.6 e 2.7 appena illustrate. Il calcolo della quantità $\dot{Q}_{surf,i}$, che compare nella 2.1, può essere risolto con la seguente relazione:

$$\dot{Q}_{surf,i} = \frac{1}{R_{star,i}} \cdot (T_{star,i} - T_i) \quad (2.8)$$

dove

$R_{star,i}$ = resistenza termica interposta tra il nodo i , alla temperatura T_i , e il nodo fittizio $star$, alla temperatura $T_{star,i}$.

L'utilizzo di questo nodo virtuale serve a semplificare notevolmente il problema dello scambio termico convettivo e radiante tra pareti e aria, trasformando il calcolo nella risoluzione di una rete di resistenze a stella, come quella mostrata nell'esempio in figura 5. Dall'analisi dello

schema in figura si evince l'eleganza di risoluzione e, quindi, di modellazione del problema fisico: il nodo i scambia energia termica per sola convezione $(\dot{Q}_{inf,i} + \dot{Q}_{vent} + \dot{Q}_{g,c,i} +$

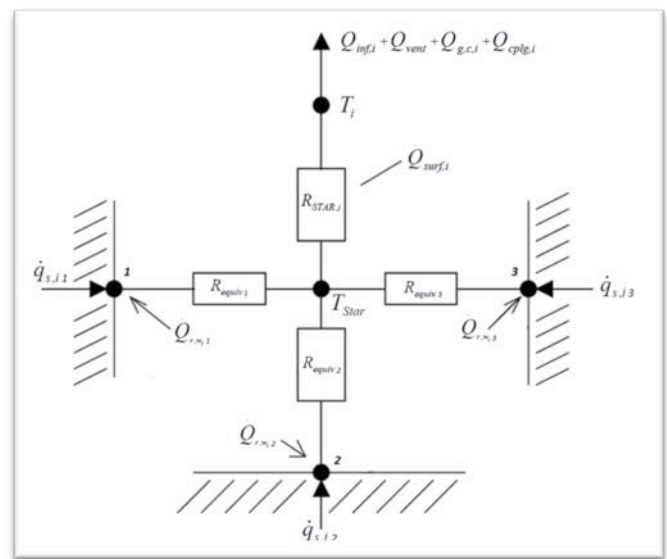


Figura 5 – Schema della rete a stella per una zona termica con tre superfici.

$\dot{Q}_{cplg,i}$) con l'ambiente esterno, con la stessa zona termica oppure con altre zone termiche. Si ha scambio termico convettivo ($\dot{Q}_{surf,i}$), quindi, tra il nodo i e il nodo virtuale alla temperatura T_{star} . A sua volta il nodo virtuale scambia calore per sola convezione e irraggiamento con i nodi di parete alla temperatura T_s , i quali sono interessati da un apporto energetico dovuto all'irraggiamento e alla conduzione di parete, risolta con il metodo delle funzioni di trasferimento. Valutati tutti i fenomeni fisici appena descritti in modo unitario, è possibile riscrivere l'equazione 2.8 in modo da considerare il legame esistente tra le temperature esterne alle pareti della zona termica, lo scambio termico convettivo ed i fenomeni di scambio termico per conduzione e irraggiamento:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{surf,i} = & \sum_{j=1}^{Adj. \text{ surface}} \sum_{i \text{ to } j} A_S \cdot B_{S1} \cdot T_{star,j} + \sum^{ext. surface} A_S \cdot B_S \cdot T_a + \sum^{int. walls} A_S \cdot B_{S1} \cdot T_{star,i} + \\ & + \sum^{known bound} A_S \cdot B_S \cdot T_{b,s} - \sum^{surface in zone i} A_S (C_S \cdot T_{star,i} - D_S - S_{S,i}) \end{aligned} \quad (2.9)$$

dove

A_S = area della generica superficie S ,

$T_{star,j}$ = temperatura del nodo virtuale interno alla zona termica j (zona adiacente alla zona termica i oggetto di studio),

T_a = temperatura dell'aria esterna,

$T_{b,s}$ = temperatura relativa ad una parete a cui sia stata assegnata la temperatura come condizione al contorno (es. pavimento radiante).

I valori degli altri coefficienti presenti nella 2.9 si ricavano tramite le seguenti relazioni:

$$B_S = \frac{e_s \cdot h_{s,o}}{(1-f_s)} \quad (2.10)$$

$$B_{S1} = \frac{e_{s1}}{(1-f_s)} \left(\frac{1}{R_{equiv,i} \cdot A_{S,i}} \right) \quad (2.11)$$

$$C_S = \frac{f_s}{(f_s-1)} \left(\frac{1}{R_{equiv,i} \cdot A_{S,i}} \right) \quad (2.12)$$

$$D_S = \frac{f_s \cdot S_{S,i} + e_s \cdot (S_{s,o} - \dot{q}_{s,o}) + \dot{q}_{s,i}}{(1-f_s)} \quad (2.13)$$

$$e_s = \frac{b_s^o}{a_s^o + h_{s,o}} \quad (2.14)$$

$$e_{s1} = \frac{b_s^o}{a_s^o + \frac{1}{R_{equiv,i} \cdot A_{s,i}}} \quad (2.15)$$

$$f_s = (b_s^o \cdot e_s - c_s^o) R_{equiv,i} \cdot A_{s,i} \quad (2.16)$$

dove

$h_{s,o}$ = coefficiente di scambio termico convettivo della parete esterna,

$R_{equiv,i}$ = resistenza termica tra nodo virtuale *star* e la parete *s* considerata.

CLIMATIZZAZIONE DELLA ZONA TERMICA

La strategia utilizzata da TRNSYS per il controllo della climatizzazione all'interno di una zona termica è esemplificata nello schema riportato in figura 6. La variabile di controllo è la temperatura della zona T_i , il cui valore deve esser compreso all'interno dell'intervallo di *set-point*, individuato dalle temperature $T_{set,i,h}$ e $T_{set,i,c}$. Quando la temperatura rientra nel citato *range*, allora l'impianto non interviene e la temperatura T_i fluttua liberamente (Free-Floating) entro il *range* assegnato. Nel caso, invece, la temperatura della zona T_i si porti al di sotto della $T_{set,i,h}$, interviene l'impianto di riscaldamento che fornisce la potenza termica P_i , necessaria per far innalzare la temperatura della zona fino al valore minimo stabilito di $T_{set,i,h}$. Viceversa, nella stagione estiva, se la T_i assume valori superiori a $T_{set,i,c}$ interviene l'impianto di raffrescamento, che sottrae all'ambiente la potenza termica P_i fino a riportare la temperatura di zona al valore massimo stabilito $T_{set,i,c}$. La convenzione di segno adottata dal codice prevede valori negativi per la potenza in riscaldamento e valori positivi per il raffrescamento. Qualora si voglia considerare la potenza erogata da un impianto reale, è possibile definire i valori delle potenze di riscaldamento e raffrescamento, assegnando gli opportuni valori massimi ($P_{max,i,h}$; $P_{max,i,c}$).

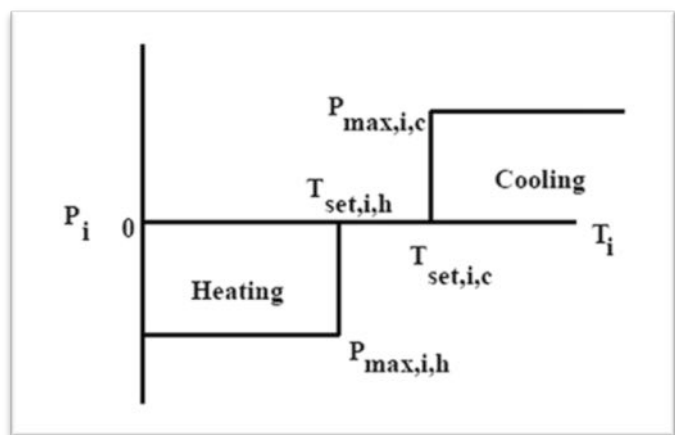


Figura 6 – Schema della strategia di controllo della climatizzazione adottato da TRNSYS.

TEMPERATURA CON FLUTTUAZIONE LIBERA (FREE-FLOATING)

Nel caso di fluttuazione libera della temperatura all'interno della zona termica, è possibile scrivere la seguente relazione:

$$C_i \frac{d}{dt} T_i = \dot{Q}_i \quad (2.17)$$

dove

C_i = capacità termica della zona termica [J/K].

Al fine di passare da una formulazione differenziale a quella alle differenze finite, è possibile metter in relazione il termine T_i con i valori iniziali ($T_{i,\tau-\Delta t}$) e finali ($T_{i,\tau}$) del passo temporale Δt , ipotizzando un andamento delle temperature lineare:

$$T_i = \frac{T_{i,\tau} + T_{i,\tau-\Delta t}}{2} \quad (2.18)$$

Mettendo a sistema le citate equazioni ed estendendo la trattazione a tutte le zone termiche che compongono l'edificio, si perviene ad un set di equazioni lineari, le cui incognite sono i valori medi delle temperature nei nodi della zona $\bar{T}$ e in quelli virtuali $\bar{T}_{star}$. La risoluzione di questo problema si può trattare con la risoluzione di una matrice avente la seguente forma:

$$[X][\bar{T}] = [Z] \Rightarrow \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} \\ X_{21} & X_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{T} \\ \bar{T}_{star} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

dove

$$X_{11,ii} = \left(\sum_{i \text{ to } j}^{surface} \dot{m}_{cplg,s} + \dot{m}_{inf,i} + \sum_k^n \dot{m}_{vent,k,i} \right) \cdot C_p + \frac{2C_i}{\Delta t} + \frac{1}{R_{star,i}} + \sum_{known}^{bound} \dot{m}_{cplg,i} \cdot C_p \quad (2.20)$$

$$X_{11,ij} = - \sum_{j=1}^{Adj. Zones} \sum_{i=1}^{surface} \dot{m}_{cplg,s} \cdot C_p \quad per \ i \neq j \quad (2.21)$$

$$X_{12,ii} = X_{21,ii} = - \frac{1}{R_{star,i}} \quad (2.22)$$

$$X_{12,ij} = X_{21,ij} = 0 \quad per \ i \neq j \quad (2.23)$$

$$X_{22,ii} = - \sum^{int.walls} A_S \cdot B_{S1} - \sum_{in \ zone \ i}^{surface} A_S \cdot C_S + \frac{1}{R_{star,i}} \quad (2.24)$$

$$X_{22,ij} = - \sum_{j=1}^{Adj. Zones} \sum_{i=1}^{walls} A_S \cdot B_{S1} \quad (2.25)$$

$$Z_{1,i} = \dot{m}_{inf,i} \cdot C_p \cdot T_a + \sum^{known}_{bound} \dot{m}_{cplg,i} \cdot C_p \cdot T_{b,s} + \sum_k^{n\ vent} \dot{m}_{vent,k,i} \cdot C_p \cdot T_{v,k} + \frac{2C_i \cdot T_{i,\tau-\Delta t}}{\Delta t} + \dot{Q}_{g,c,i} \quad (2.26)$$

$$Z_{2,i} = (\sum^{ext.surface} A_S \cdot B_S) \cdot T_a + \sum^{known}_{bound} A_S \cdot B_S \cdot T_{b,s} + \sum^{surface}_{in\ zone\ i} A_S (D_S + S_{S,i}) \quad (2.27)$$

La soluzione del problema, ovvero i valori delle temperature fluttuanti nelle varie zone termiche, è data da:

$$[\bar{T}] = [X]^{-1}[Z] \quad (2.28)$$

RISCALDAMENTO E RAFFRESCAMENTO

In occasione di utilizzo dell'impianto di climatizzazione, la 2.17 dev'essere riscritta per tenere conto della potenza necessaria per il riscaldamento o il raffrescamento.

$$C_i \frac{d}{dt} T_i = \dot{Q}_i - P_i \quad (2.29)$$

La soluzione del problema che si ottiene ha una forma simile a quella per il caso di *free-floating*:

$$[\bar{T}'] = [X']^{-1}[Z'] \quad (2.30)$$

occorre in questo caso distinguere due diversi scenari possibili:

- il primo, in cui l'impianto è alla sua potenzialità massima ($P_{max,i,h}$ oppure $P_{max,i,c}$) e la temperatura della zona ha un valore che ricade all'esterno dell'intervallo di *set-point*, dove si verifica una condizione di temperatura fluttuante;
- il secondo scenario, dove l'impianto funziona al di sotto della sua potenza massima e la temperatura di zona è uguale a $T_{set,i,h}$ (fase riscaldamento) oppure $T_{set,i,c}$ (fase raffrescamento).

Nel primo caso, con impianto alla massima potenza e temperatura fluttuante, valgono le seguenti relazioni:

$$X'_{ij} = X_{ij} \quad \text{per tutte le } i \text{ e } j \quad (2.31)$$

$$Z'_i = Z_i + P_{max,i,h} \quad \text{oppure} \quad Z'_i = Z_i - P_{max,i,c} \quad (2.32)$$

Per il secondo caso, con una potenza dell'impianto in esercizio inferiore a quella massima e temperature uguali a quelle di *set-point*, alcuni elementi della matrice subiscono, rispetto al caso con temperatura fluttuante, le seguenti modifiche:

$$[\bar{T}'] = \begin{bmatrix} P_i \\ \bar{T}_{star} \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

$$X'_{11,ii} = 1 \quad (2.34)$$

$$X'_{21,ii} = 0 \quad (2.35)$$

$$Z'_{2,i} = Z_{2,i} - X_{11,ii} \cdot T_{req,i} \quad (2.36)$$

dove il valore $T_{req,i}$ è la temperatura media della zona, calcolata con la seguente relazione:

$$T_{req,i} = \frac{T_{set,i} + T_{i,\tau-\Delta t}}{2} \quad (2.37)$$

La procedura di calcolo utilizzata dal codice prevede un primo calcolo effettuato con la modalità di *free-floating* (set di equazioni dalla 2.19 alla 2.28), al termine del quale si controlla il valore di temperatura T_i . Se il valore ottenuto non rientra nell'intervallo impostato, il codice effettua un secondo calcolo, valutando la quota di calore per riscaldamento e per raffreddamento necessario. Qualora questi valori fossero superiori al limite di potenza dell'impianto, sarebbe necessario un terzo calcolo con temperatura fluttuante, utilizzando le equazioni 2.31 e 2.32. A seconda della strategia di controllo adottata ed impostata dall'utente, sarà quindi il codice a scegliere i valori degli elementi della matrice (X' , Z') che più si adattano al problema modellato.

Oltre ai bilanci di energia termica sensibile, di cui si è trattato in precedenza, il codice effettua una valutazione del carico latente necessario per umidificare o deumidificare l'aria della zona termica. La base per il calcolo è rappresentata dalla seguente equazione differenziale:

$$M_{eff,i} \frac{d\omega_i}{dt} = \dot{m}_{inf,i}(\omega_a - \omega_i) + \sum_k^n \dot{m}_{vent,k,i}(\omega_{vent} - \omega_i) + W_{g,i} + \sum_{i=1}^{surface \ i \ to \ j} \dot{m}_{cplg,s}(\omega_j - \omega_i) \quad (2.38)$$

dove

$M_{eff,i}$ = capacità termica (latente) effettiva della zona,

ω_i = umidità assoluta della zona termica,

ω_a = umidità assoluta dell'aria esterna,

ω_{vent} = umidità assoluta dell'aria utilizzata per effettuare la ventilazione forzata,

$W_{g,i}$ = apporti termici gratuiti di calore latente,

ω_j = umidità assoluta relativa all'aria presente nella zona termica j-esima

La 2.38 viene risolta tramite una sub-routine del codice TRNSYS, chiamata "DIFFEQ", che permette di calcolare il valore dell'umidità assoluta all'interno della zona termica. La gestione dell'umidità relativa è effettuata in modo analogo a quello della temperatura. Se l'umidità relativa è minore del limite inferiore, occorrerà apportare del carico latente umidificando l'aria; nel caso il valore sia compreso nei limiti si ha una situazione di umidità in fluttuazione libera (*free-floating*); infine, se l'umidità relativa è maggiore del limite superiore, si procede alla deumidificazione della zona, sottraendo carico latente. La quantità di calore latente da fornire o sottrarre all'ambiente ($\dot{Q}_{lat,i}$), per convenzione positiva per la deumidificazione e negativa per l'umidificazione, viene calcolata tramite la seguente espressione:

$$\dot{Q}_{lat,i} = h_v \left(\begin{aligned} &\dot{m}_{inf,i}(\omega_a - \omega_{req,i}) + \sum_k^{n_{vent}} \dot{m}_{vent,k,i}(\omega_{vent} - \omega_{req,i}) + W_{g,i} + \\ &\quad \text{surface} \\ &+ \sum_{i=1}^{i \text{ to } j} \dot{m}_{cplg,s}(\omega_{j,\tau-\Delta t} - \omega_{i,\tau-\Delta t}) - \frac{M_{eff,i}(\omega_{req,i} - \omega_{i,\tau-\Delta t})}{\Delta t} \end{aligned} \right) \quad (2.39)$$

dove

h_v = calore latente di vaporizzazione dell'acqua,

$\omega_{req,i}$ = valore percentuale di set-point in umidificazione o deumidificazione.

2.2.2 Software DesignBuilder [11]



Il codice di calcolo DesignBuilder è un software nato dall'evoluzione di un progetto europeo finalizzato all'analisi energetica dinamica dell'edificio, al controllo delle emissioni di CO₂, alla verifica dell'illuminazione (naturale ed artificiale) e delle prestazioni legate al comfort ed all'*indoor quality air*. Il codice è stato sviluppato per semplificare il processo di calcolo e di simulazione e nel contempo, per mezzo dell'interfaccia grafica proprietaria, consentire la restituzione grafica di un modello tridimensionale esportabile. DesignBuilder è stato specificamente sviluppato e calza sul motore di calcolo *EnergyPlus*®, che offre una precisione e un'accuratezza dei calcoli garantita. Questa combinazione ha creato uno strumento di lavoro idoneo alla ricerca e adatto all'esercizio della professione. *EnergyPlus* è il programma gratuito di simulazione energetica realizzato dal DOE, Dipartimento dell'Energia degli USA, per la modellazione dei parametri di riscaldamento, di refrigerazione/raffrescamento, di illuminazione, di ventilazione e di qualsiasi altro flusso energetico presente negli edifici. Il software offre le caratteristiche e le potenzialità del BLAST e del DOE-2, ed in aggiunta presenta innovative possibilità di simulazione, come l'analisi basata su *step* temporali inferiori alla singola ora, la gestione di flussi d'aria in modalità *multi-zone*, la determinazione del comfort termico ed l'integrazione di sistemi energetici solari fotovoltaici^[4]. E' disponibile in libreria un vasto database aggiornato di materiali da costruzione, elementi costruttivi, serramenti, tipologie di gas inerte per vetro camere, pacchetti vetrati, etc. ... e tante soluzioni di impianti-tipo, pre-configurati e completi di caratteristiche tecniche (modificabili). Il software DesignBuilder è basato sull'utilizzo di "*Template*" e di dati di "*default*" che guidano l'utente attraverso il processo di inserimento dei dati. I modelli di dati (*Template*) permettono all'utente di caricare geometrie, elementi (o combinazioni di essi) ed impianti, ottenendo immediatamente calcoli attendibili. E' possibile arricchire la libreria di nuovi *Template*, adottando delle configurazioni e delle combinazioni personalizzate, in modo da poterne disporre nuovamente, una volta creati e configurati. Per i dettagli sulla modellazione applicata, si rimanda al paragrafo 3.3.1 dedicato.

^[4] "*EnergyPlus Engineering Reference - The Reference to EnergyPlus Calculations*", COPYRIGHT © 1996-2011 The Board of Trustees of the University of Illinois and the Regents of the University of California through the Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory

Come nel caso del software TRNSYS, l'elemento di dettaglio, oggetto di tutte le considerazioni matematiche, è la “zona termica”. Una zona termica è la parte di spazio circoscritto, avente sostanzialmente le seguenti caratteristiche: è dotata di un controllo dei parametri termo-igrometrici, effettuato da un unico impianto di climatizzazione, ed è caratterizzata da una nota destinazione d'uso e/o caratterizzata dallo svolgimento di una stessa attività da parte degli occupanti. Affrontando il dettaglio degli algoritmi di simulazione, come

accennato nella premessa del capitolo, DesignBuilder utilizza le funzioni di trasferimento CTF (*Conduction Transfer function*) per la valutazione del flusso termico trasmesso (in regime dinamico) per la conduzione del calore attraverso l'involucro. Lo schema funzionale adottato dal software per la modellazione del bilancio termico dell'edificio è quello riportato in figura 7 ^[10]. Gli strumenti operativi utilizzati per la modellazione del comportamento termo-fisico delle zone termiche sono essenzialmente riferibili al bilancio di massa d'aria, al bilancio di massa di vapore acqueo ed al bilancio di energia.

Il bilancio di massa d'aria di zona può essere rappresentato come:

$$\sum \dot{m}_z^{in} + \sum \dot{m}_z^{out} = \frac{dm_{z,i}}{d\tau} \cong 0$$

dove:

$\dot{m}_z^{in}$ = generica portata d'aria in ingresso di zona [kg/s];

$\dot{m}_z^{out}$ = generica portata d'aria in uscita di zona [kg/s];

$m_{z,i}$ = massa d'aria interna di zona [kg].

La variazione della massa di aria interna considerata nell'unità di tempo ($dm_z/d\tau$) è trascurabile, quindi, dall'equazione di bilancio della massa d'aria, si ricava che la sommatoria delle portate di aria (per ventilazione e infiltrazione) in ingresso di zona è pari alla sommatoria delle portate di aria in uscita (ventilazione e infiltrazione):

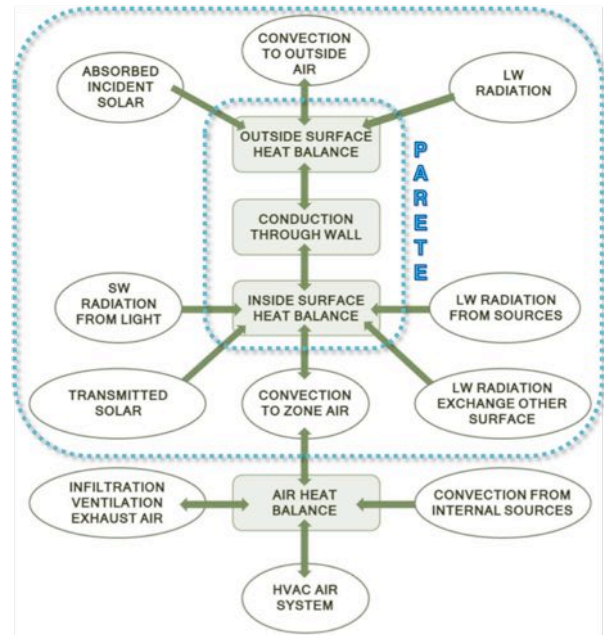


Figura 7 - Diagramma logico del modello di bilancio termico adottato nel software DesignBuilder.

^[10] J.D. Spitler, "Load Calculation Application Manual", ASHRAE, Atlanta, 2009

$$\sum \dot{m}_z^{in} + \sum \dot{m}_z^{out}$$

Il bilancio di massa di vapore acqueo di zona può essere scritto come:

$$\sum \dot{m}_z^{in} x^{in} + \sum \dot{m}_z^{out} x^{out} + \dot{m}_{v,l} + \dot{m}_{v,H} = \frac{dm_{v,i}}{d\tau} = m_{z,i} \frac{dx_i}{d\tau}$$

dove:

$\dot{m}_z^{in} x^{in}$ = generica portata di vapore di zona in ingresso con immissione di una portata d'aria $\dot{m}_a^{in}$ con umidità specifica x^{in} [kg/s];

$\dot{m}_z^{out} x^{out}$ = generica portata di vapore di zona in uscita con estrazione di una portata d'aria $\dot{m}_a^{out}$ con umidità specifica x_i [kg/s];

$\dot{m}_{v,l}$ = portata di vapore complessiva di zona di sorgenti di vapore non intenzionali [kg/s];

$\dot{m}_{v,H}$ = portata di vapore di zona prodotta da umidificatori (valore positivo) oppure sottratta da deumidificatori (valore negativo) [kg/s];

$\dot{m}_{z,i}$ = massa di aria di zona [kg].

Il bilancio di massa di vapore determina l'eventuale necessità di effettuare operazioni di umidificazione e/o deumidificazione (controllo attuato da impianti) oppure semplicemente di calcolare il valore dell'umidità interna di zona.

Il bilancio di energia termica comprende un sistema di equazioni che rappresentano rispettivamente:

- il bilancio di energia termica sensibile sull'*aria*;
- il bilancio di energia termica sulla *superficie interna dell'involucro*;
- il bilancio di energia termica sulla *superficie esterna dell'involucro*;
- la conduzione termica *attraverso l'involucro*;
- l'accumulo di calore delle strutture esterne e interne.

L'equazione che esprime il *bilancio di energia termica sensibile sull'aria* interna può essere scritta come:

$$\Phi_{c,i} + \Phi_v + \Phi_{vz} + \Phi_{i,c} + \Phi_{h,c} = C_{z,i} \frac{\partial t_i}{\partial \tau} = c_a m_{z,i} \frac{\partial t_i}{\partial \tau} \cong 0$$

dove:

$\Phi_{c,i}$ = flusso termico scambiato per convezione [W];

Φ_v = flusso termico scambiato per ventilazione [W];

- Φ_{vz} = flusso termico dovuto all'aria entrante nella zona attraverso intercapedini d'aria interne agli elementi che la racchiudono [W];
 $\Phi_{i,c}$ = flusso termico convettivo ceduto dalle sorgenti termiche interne [W];
 $\Phi_{h,c}$ = flusso termico convettivo dell'impianto di climatizzazione ad acqua [W];
 $C_{z,i}$ = capacità termica dell'aria interna [J/K];
 t_i = temperatura dell'aria interna [K];
 τ = tempo[s];
 c_a = calore specifico dell'aria [J/(kg K)];
 $m_{z,i}$ = massa dell'aria interna [kg].

Il flusso termico scambiato per convezione (superfici che contengono l'aria) è, quindi:

$$\Phi_{c,i} = \sum_{j=1}^N (A\varphi_{c,i})_j = \sum_{j=1}^N h_{c,i,j} A_j (t_{s,j} - t_i)$$

dove:

- N = numero di superfici che delimitano l'aria interna;
 A = area di ciascuna superficie che delimita l'aria interna [m²];
 $\varphi_{c,i}$ = flusso termico areico scambiato per convezione con l'aria interna [W/m²];
 $h_{c,i,j}$ = coefficiente di scambio termico convettivo di ciascun elemento [W/(m²K)];

Il flusso termico scambiato per ventilazione vale:

$$\Phi_v = c_a \dot{m}_z (t_e - t_i)$$

Sostituendo nel bilancio di energia termica sensibile sull'aria, il flusso termico scambiato per convezione e per ventilazione, l'equazione del bilancio di energia termica sensibile sull'aria interna diviene:

$$\sum_{j=1}^N (A\varphi_{c,i})_j + c_a \dot{m}_z (t_e - t_i) + \Phi_{vz} + \Phi_{i,c} + \Phi_{h,c} \cong 0$$

oppure:

$$\sum_{j=1}^N h_{c,j} A_j (t_{s,j} + t_i) + c_a \dot{m}_z (t_e - t_i) + \Phi_{vz} + \Phi_{i,c} + \Phi_{h,c} \cong 0$$

Il *bilancio di energia termica sulla superficie interna* della *j-esimo* superficie può essere scritta come:

$$\varphi_{r,i,j} + \varphi_{sol,i,j} + \varphi_{c,i,j} + \varphi_{cd,j} + \frac{\Phi_{i,r} + \Phi_{h,r}}{\sum_{k=1}^N A_k} = 0$$

dove:

- $\varphi_{r,i,j}$ = flusso termico areico dovuto alla radiazione ad elevata lunghezza d'onda scambiato con le altre superfici interne [W/m²];
- $\varphi_{sol,i,j}$ = flusso termico areico dovuto alla radiazione a bassa lunghezza d'onda assorbito [W/m²];
- $\varphi_{cd,j}$ = flusso termico areico scambiato per conduzione sulla superficie [W/m²];
- $\Phi_{i,r}$ = flusso termico dovuto alla componente radiante degli apporti interni [W];
- $\Phi_{h,r}$ = flusso termico dovuto alla componente radiante degli apporti dell'impianto di riscaldamento [W];
- A_k = area dell'elemento *k-esimo* dell'ambiente [m²].

Le temperatura superficiale esterna di un elemento edilizio è ottenuta dalla risoluzione della seguente equazione:

$$\varphi_{r,e,j} + \varphi_{sol,e,j} + \varphi_{c,e,j} + \varphi_{cd,e,j} = 0$$

dove:

- $\varphi_{r,e}$ = flusso termico areico dovuto alla radiazione ad elevata lunghezza d'onda scambiato dalla superficie [W/m²];
- $\varphi_{sol,e}$ = flusso termico areico dovuto alla radiazione a bassa lunghezza d'onda (solare) assorbito dalla superficie [W/m²];
- $\varphi_{c,e}$ = flusso termico areico scambiato per convezione con l'aria esterna [W/m²];
- $\varphi_{cd,e}$ = flusso termico areico scambiato per conduzione sulla superficie esterna [W/m²].

Il flusso termico trasmesso per conduzione attraverso l'involucro edilizio può essere calcolato con diversi metodi, analitici o numerici, adottando *time-step* anche sub-orari.

I due metodi più diffusi all'interno dei software di simulazione sono quello alle differenze finite, che opera una discretizzazione spaziale del componente, e quello delle funzioni di trasferimento della conduzione (CTF).

Ritornando all'analisi dello schema in figura 7, il blocco logico relativo al bilancio termico sull'aria ambiente (*AHB – Air Heat Balance*) valuta il flusso termico necessario alla zona per mantenere la temperatura di *set-point*. Il comportamento termico dell'edificio viene studiato riferendosi al sistema termodinamico dell'aria presente all'interno dell'ambiente costruito.

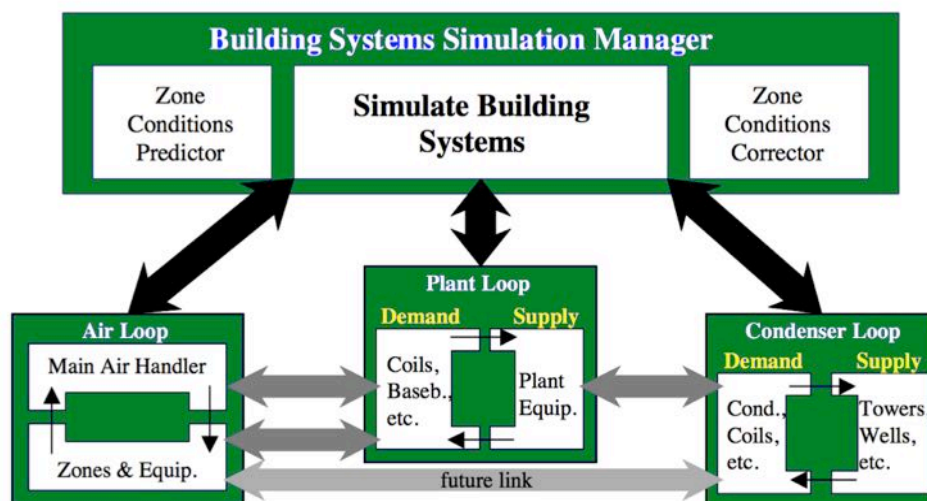


Figura 8 - Schema di connessione logica tra il Building System Simulation Manager principale e i suoi sotto-circuiti di simulazione [4].

Il volume di controllo è rappresentato dall'aria confinante con la superficie interna dell'involucro edilizio e con le superfici degli elementi che si trovano al suo interno (*internal sources*), che rappresentano la superficie di frontiera del sistema. L'*AHB* viene ottenuto, quindi, valutando i flussi convettivi relativi a infiltrazione e ventilazione, agli scambi con le pareti della zona ed al contributo offerto dalle sorgenti di calore interne alla zona. Come si evince dalla struttura logica ubicata nella parte superiore del citato diagramma in figura 2, anche ogni parete è oggetto di bilancio termico. Ciascuna parete ha, quindi, un suo bilancio superficiale relativo alla parte esterna, alla parte interna ed un terzo bilancio di relazione tra le due superfici, che risulta nel nodo interno alla parete.

La simulazione dell'impianto di climatizzazione (HVAC), avviene attraverso la scomposizione del sistema di gestione in tre componenti gerarchicamente controllate (figura 8): l'*Air loop* (circuiti areaulici) il *Plant loop* (circuiti idronici dei fluidi termovettori) ed il *Condenser loop* (circuiti idronici dei fluidi di condensazione). In questi *loop* si individuano i componenti di impianto per il dimensionamento della domanda di energia (batterie di scambio termico) e i componenti relativi alla fornitura di energia (generatori di calore, gruppi frigoriferi, torri evaporative,...). La simulazione degli HVAC può avvenire in due modalità: *Compact* oppure *Detailed*. Nel primo caso, trattasi di una procedura semplificata, dove sono richiesti pochi parametri significativi correlati all'efficienza degli impianti. La modellazione HVAC *Detailed* prevede, invece, oltre che l'eventuale inserimento delle curve caratteristiche e di performance dei componenti d'impianti e delle macchine, una definizione puntuale delle modalità e delle caratteristiche di distribuzione e di erogazione dell'impianto, con interessanti possibilità di personalizzazione.

La simulazione dinamica, affinché riesca a restituire un significato fisico realistico, viene eseguita in modo che tutti gli elementi siano correlati in uno schema di simulazione simultanea (figura 9). L'integrazione eseguita dal software è schematizzata, in figura 10, come una serie di elementi funzionali connessi da circuiti fluidi (*Water Loop* e *Air Loop*) .

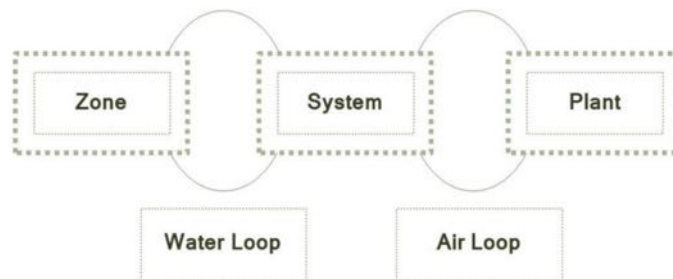


Figura 9 - Schema del metodo di risoluzione simultanea

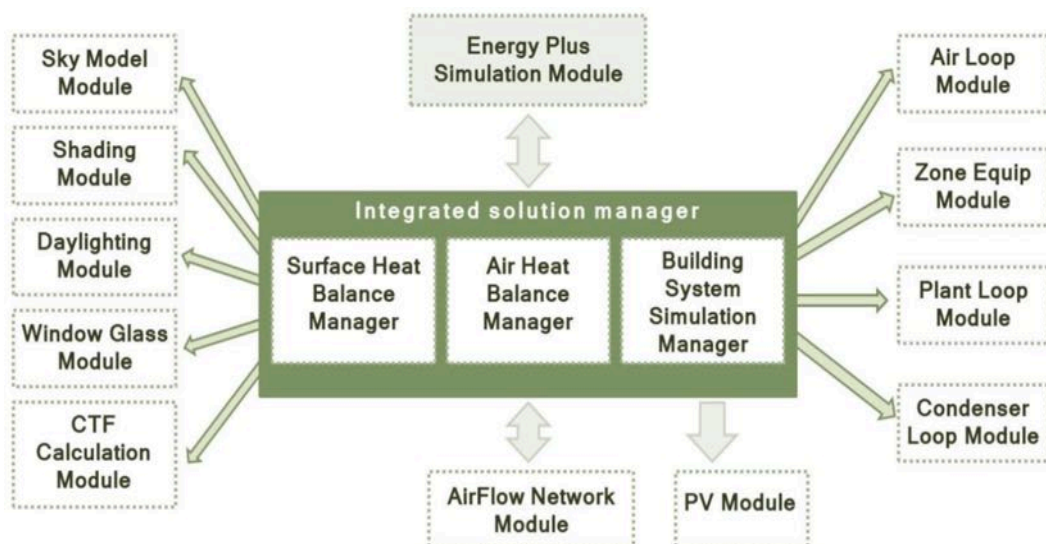


Figura 10 - Schema logico di funzionamento del codice di calcolo EnergyPlus.

All'interno del codice di calcolo, tutti gli elementi sono integrati e controllati dall'*Integrated Solution Manager*. I circuiti, come si diceva in precedenza, sono differenziati secondo lo schema domanda/fornitura di energia. Tale schema di soluzione passa attraverso successive iterazioni sostitutive fino ad avvicinare i valori di domanda e fornitura di energia.

2.3 – Calibrazione dei codici di calcolo

La procedura di calibrazione del codice di calcolo, spesso trascurata, rappresenta una fondamentale parte del lavoro di modellazione, poiché da essa dipendono l'accuratezza e l'affidabilità dei risultati ottenuti. La sottostima di questa fase, sovente, rappresenta la principale causa di errore nell'uso del codice. Il protocollo di calibrazione, oltre a garantire una verifica sull'attendibilità del codice medesimo, è una procedura basilare per la verifica operativa delle reali competenze di padronanza dell'utilizzo del codice da parte dell'operatore. Il team di lavoro ha optato per adottare due diversi metodi di calibrazione, utilizzando in parallelo i codici di calcolo TRNSYS e DesignBuilder, che sono stati illustrati nei successivi paragrafi. La prima metodologia consiste in una simulazione "controllata" di alcuni modelli semplici di edificio, chiamati *test-case*, tratti dal "*Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs*" dell'ASHRAE^{[6] [7]}, la seconda, invece, segue le indicazioni della normativa UNI EN 15265 relativa alla validazione di codici per la simulazione dinamica^{[26] [27]}.

2.3.1 BESTest ASHRAE

Il primo metodo di calibrazione adottato consiste nella simulazione dinamica di diversi modelli semplificati di edificio, denominati *test-case BESTest* (Building Energy Simulation Test), e tratti dal "*Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs*" dell'ASHRAE [6], che è stato il primo metodo codificato di test per costruire software di calcolo per la determinazione dei fabbisogni di energia. Il modello di simulazione valuta l'energia in tutti gli aspetti che influenzano il consumo energetico, il comfort termico ed il comfort visivo per gli occupanti. Una componente essenziale dello sviluppo di tali modelli di simulazione dinamica è un rigoroso programma di validazione e di test atti alla valutazione dell'accuratezza adottata dai programmi per la simulazione

^[6] American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers ASHRAE, "*Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs*", ANSI/ASHRAE Standard 140.

^[7] R. Judkoff – J. Neymark, "*International Energy Agency Building Energy Simulation Test (BESTEST) and Diagnostic Method*", National Renewable Energy Laboratory (NREL), Boulder Colorado, USA, Febbraio 1995.

^[26] UNI EN 15265, "*Calcolo del Fabbisogno di Energia per il Riscaldamento e il Raffrescamento degli Ambienti Mediante Metodi Dinamici, criteri generali e procedimenti di validazione*", Norma Europea, Febbraio 2008.

^[27] UNI EN ISO 13790, "*Prestazione Energetica degli Edifici, Calcolo del Fabbisogno di Energia per il Riscaldamento e il Raffrescamento*", Norma Europea, Giugno 2008.

energetica dell'intero edificio. La metodologia citata è utilizzata anche per identificare e diagnosticare le differenze di previsione di simulazione che possono essere causate da differenti algoritmi, da limiti di modellazione, da errori di codifica, o da errori di immissione. La metodologia adottata da ANSI/ASHRAE è lo standard 140 (ANSI/ASHRAE 2001, 2004), che si può trovare in sintesi nel ASHRAE Handbook of Fundamentals (ASHRAE 2005). I casi test utilizzati sono stati quelli indicati con le seguenti sigle: 195, 600, 620, 640, 650, 900, 920, 940, 950, 960, 600FF, 900FF, 650FF e 950FF. Questi ultimi *case-test* hanno la caratteristica di non essere dotati dell'impianto di riscaldamento e/o raffrescamento, al fine di consentire una libera variazione delle caratteristiche termo-igrometriche all'interno dell'edificio (*Free-Floating*). Il metodo *BESTest* dall'ASHRAE dota ciascun caso test dei dati in ingresso necessari come la geometria dell'edificio oggetto di studio, le sue caratteristiche termofisiche ed i dati climatici, per cui è possibile la replica pedissequa e sistematica dell'esperimento numerico. Dal momento che si hanno a disposizione anche i risultati di ogni singolo test, è possibile controllare facilmente tutto l'iter di simulazione.

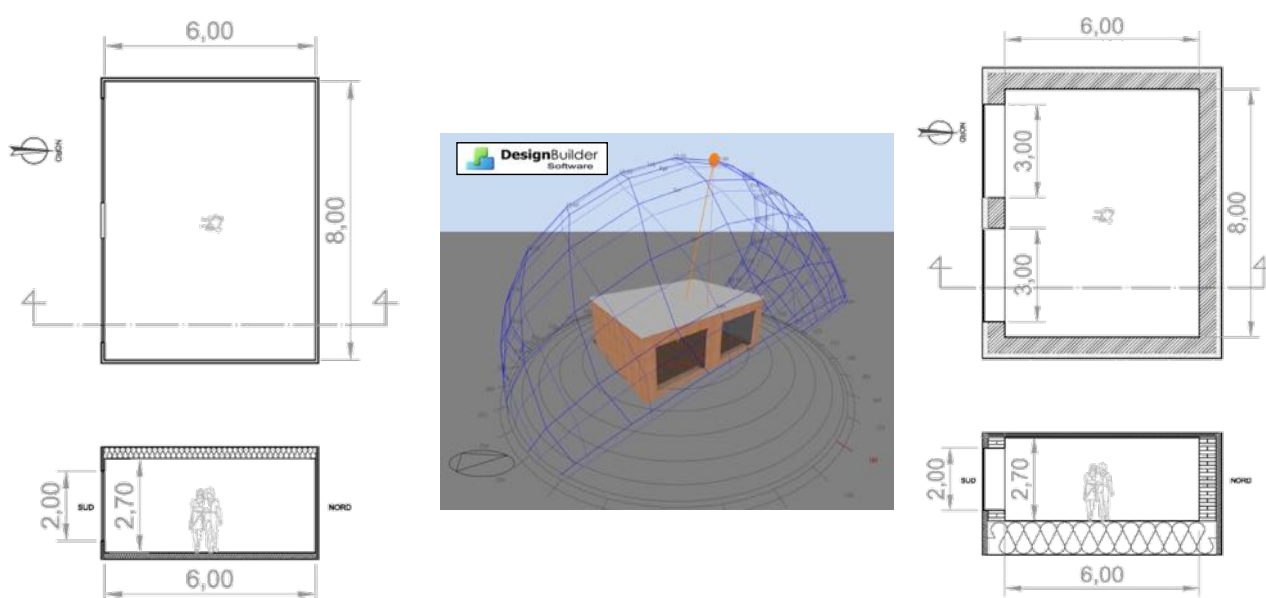


Figura 11 - I BESTest: a sinistra la serie 600 *Lightweight*, a destra la serie 900 *Heavyweight*

L'edificio preso in considerazione in tutti i *test-case* (tranne il 960) presenta una geometria semplice, costituita da un parallelepipedo avente la base di 6,00 x 8,00 metri ed un'altezza di 2,70 metri, che racchiude un'unica zona termica dal volume complessivo di 129,60 m³. Il lato lungo (m. 8,00) è sempre rivolto verso sud. La serie 600 dei test è caratterizzata da murature perimetrali leggere (*Lightweight*), mentre la serie 900 da murature pesanti (*Heavyweight*). I valori di assorbività e trasmittanza della radiazione sono generalmente assunti pari a 0,6 e 0,9, tranne per il caso 195, per il quale si considera il valore 0,1 per

entrambe. I *BESTest* sono dotati di due superfici vetrate, ciascuna di 6,00 m², che per i casi 600, 640, 650, 900, 940 e 950 si trovano nel lato esposto a sud, mentre per i casi 620 e 920, si trovano una nella parete est e l'altra nella parete ovest. Il solo *test-case* 195 non presenta alcuna superficie vetrata.

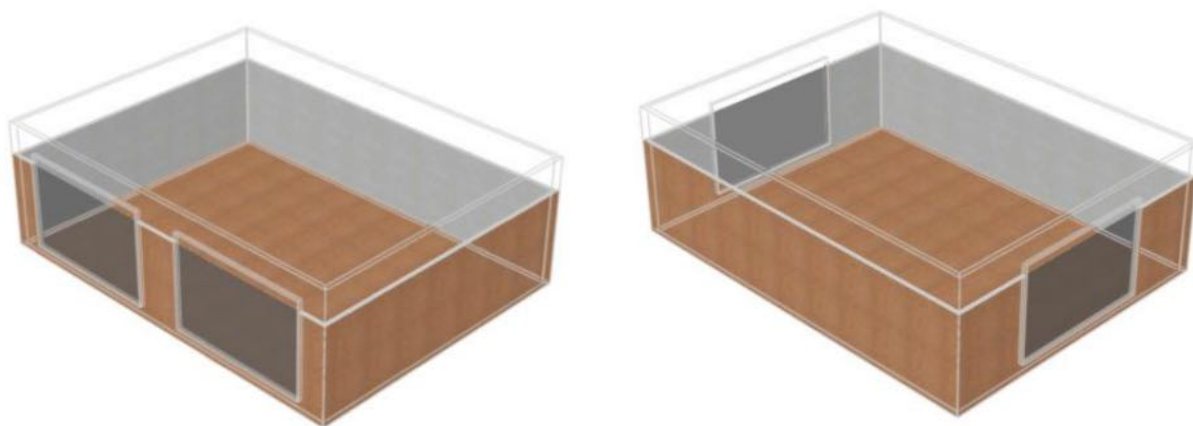


Figura 11 –Edifici dei *test-case* 600, 640, 650, 900, 940, 950 (a sinistra) e dei casi 620 e 920 (a destra).

Nella tabella 1 sono riportate le caratteristiche termofisiche delle pareti leggere *Lightweight* dei casi della serie 600.

LIGHTWEIGHT CASE [195; 600; 620; 640; 650]						
PARETI ESTERNE						
ELEMENTO (dall'interno verso l'esterno)	k [W/mK]	Spessore [m]	U [W/m ² K]	R [m ² K/W]	Densità [kg/m ³]	Cp [J/kgK]
Int Surf Coef			8.290	0.121		
Plasterboard	0.160	0.012	13.333	0.075	950	840
Fiberglas quilt	0.040	0.066	0.606	1.650	12	840
Wood Siding	0.140	0.009	15.556	0.064	530	900
Ext Surf Coef			29.300	0.034		
PAVIMENTO						
ELEMENTO (dall'interno verso l'esterno)	k [W/mK]	Spessore [m]	U [W/m ² K]	R [m ² K/W]	Densità [kg/m ³]	Cp [J/kgK]
Int Surf Coef			8.290	0.121		
Timber flooring	0.140	0.025	5.600	0.179	650	1200
Insulation	0.040	1.003	0.040	25.075		
TETTO						
ELEMENTO (dall'interno verso l'esterno)	k [W/mK]	Spessore [m]	U [W/m ² K]	R [m ² K/W]	Densità [kg/m ³]	Cp [J/kgK]
Int Surf Coef			8.290	0.121		
Plasterboard	0.160	0.010	16.000	0.063	950	840
Fiberglas quilt	0.040	0.1118	0.358	2.794	12	840
Roofdeck	0.140	0.019	7.368	0.136	530	900
Ext Surf Coef			29.300	0.034		

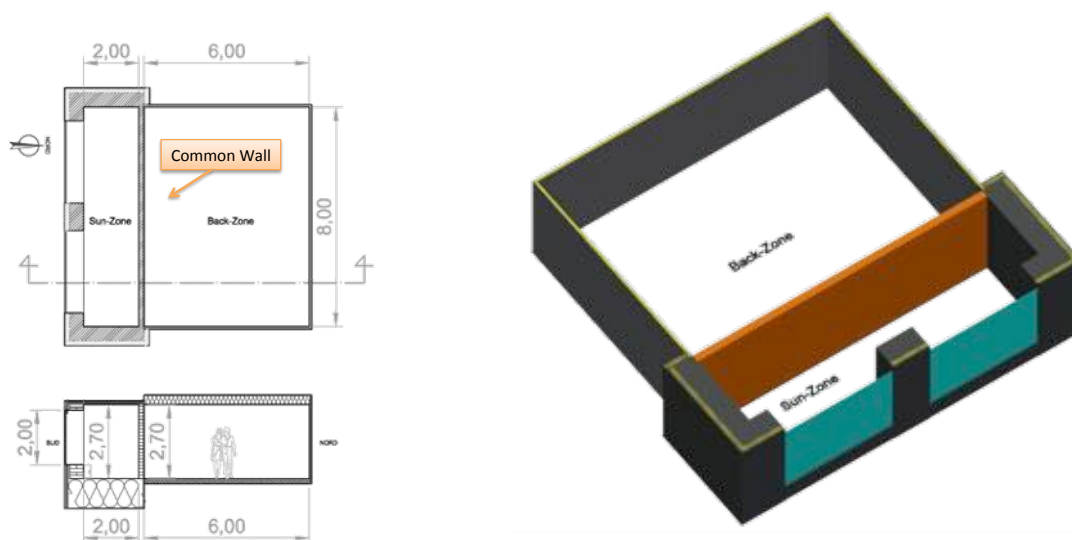
Tabella 1 – Caratteristiche termofisiche degli elementi dei *Lightweight case*.

Nella tabella 2 sono riportate le caratteristiche termofisiche delle pareti leggere *Havyweight* dei casi della serie 900.

HEAVYWEIGHT CASE [900; 920; 940; 950]						
PARETI ESTERNE						
ELEMENTO (dall'interno verso l'esterno)	k [W/mK]	Spessore [m]	U [W/m ² K]	R [m ² K/W]	Densità [kg/m ³]	Cp [J/kgK]
Int Surf Coef			8.290	0.121		
Concrete block	0.510	0.100	5.100	0.196	1400	1000
Foam insulation	0.040	0.0615	0.651	1.537	10	1400
Wood Siding	0.140	0.009	15.556	0.064	530	900
Ext Surf Coef			29.300	0.034		
PAVIMENTO						
ELEMENTO (dall'interno verso l'esterno)	k [W/mK]	Spessore [m]	U [W/m ² K]	R [m ² K/W]	Densità [kg/m ³]	Cp [J/kgK]
Int Surf Coef			8.290	0.121		
Concrete slab	1.130	0.080	14.125	0.071	1400	1000
Insulation	0.040	1.007	0.040	25.175		
TETTO						
ELEMENTO (dall'interno verso l'esterno)	k [W/mK]	Spessore [m]	U [W/m ² K]	R [m ² K/W]	Densità [kg/m ³]	Cp [J/kgK]
Int Surf Coef			8.290	0.121		
Plasterboard	0.160	0.010	16.000	0.063	950	840
Fiberglas quilt	0.040	0.1118	0.358	2.794	12	840
Roofdeck	0.140	0.019	7.368	0.136	530	900
Ext Surf Coef			29.300	0.034		

Tabella 2 - Caratteristiche termofisiche degli elementi dei *Heavyweight case*.

Il caso test 960 differisce dagli altri analizzati perché composto da due zone termiche indentificate come *Back-zone* e *Sun-zone*. La *Back-zone* ha caratteristiche analoghe all'unica zona termica dei test della serie 600, con un'unica differenza rappresentata dalla sostituzione della parete esposta a sud con una parete di confine con la *Sun-zone* le cui caratteristiche sono riportate nella tabella 3. La *Sun-zone* si presenta, invece, come un parallelepipedo con la base di 2,00 x 8,00 m con un'altezza di 2,70 m. ed avente le caratteristiche delle pareti *Heavyweight* della serie di test 900. La parete esposta a sud ospita due finestre di 6,00 m² ciascuna.

Figura 12 - Edifici del *test-case* 960.

CASE 960						
PARETI COMUNE TRA BACK-ZONE E SUN-ZONE						
ELEMENTO	k [W/mK]	Spessore [m]	U [W/m ² K]	R [m ² K/W]	Densità [kg/m ³]	Cp [J/kgK]
Common Wall	0,510	0,20	2,550	0,392	1400	1000

Tabella 3 - Caratteristiche della parete di separazione tra *Back-zone* e *Sun-zone* del *BESTest* 960.

DATI DI INPUT

File meteo

I dati di input relativi alle condizioni climatiche utilizzati nella compilazione dei *BESTest*, in questa fase di calibrazione, sono quelli indicati dallo standard dell'ASHRAE: sono forniti sotto forma oraria e riferiti alla località in cui sono stati rilevati, ossia l'ex aeroporto di Denver-Stapleton (Colorado - USA). I principali parametri del sito sono riepilogati nella seguente tabella 4:

DATI CLIMATICI					
Latitudine	Longitudine	Altitudine	Temperatura minima annuale	Temperatura massima annuale	Temperatura media annuale
39.80° Nord	104.90° Ovest	1609 m	-24,39 °C	35,00 °C	9,71 °C
Irradiazione globale annuale (orizzontale)		Irradiazione diretta annuale (orizzontale)		Irradiazione diffusa annuale (orizzontale)	
1832 kWh/m ²		2354 kWh/m ²		492 kWh/m ²	

Tabella 4 – Caratteristiche meteorologiche della località utilizzata nei *BESTest* (Denver).Infiltrazioni

Le infiltrazioni di aria esterna in tutti i *test-case* sono pari ad un valore di 0,5 volumi/ora, ad eccezione del caso 195.

Apporti interni gratuiti

Gli apporti interni gratuiti sono pari ad un valore di 200 W (solo calore sensibile, suddiviso in 60% radiativo e 40% convettivo). Gli apporti sono presenti in tutti i *test-case* tranne che nel caso 195 e nella *Sun-zone* del test 960.

Coefficienti di scambio termico convettivo

Le superfici opache sono caratterizzate dai seguenti valori: 3,16 W/m²K per l'interno e 24,67 W/m²K per l'esterno.

Le superfici trasparenti hanno invece i seguenti valori: 3,16 W/m²K per l'interno e 16,37 W/m²K per l'esterno.

Finestre

Le caratteristiche delle finestre utilizzate nella simulazione dei *BESTest*, in questa fase di calibrazione, sono quelli indicati dallo standard dell'ASHRAE. La loro definizione prevede un'importante mole di parametri. Si riportano nella tabella 5 le grandezze termofisiche più significative. Le superfici vetrate esposte a sud prevedono il seguente posizionamento: distanza dal bordo parete di 0,5m e altezza da terra pari a 0,20 m. Fa eccezione il solo *test-case* 960, nel quale l'altezza da terra prevista è di 0,5 m. I casi con le finestre ubicate nelle pareti est e ovest, prevedono un posizionamento centrale della finestra nella mezzeria della parete.

CARATTERISTICHE delle SUPERFICI FINESTRATE							
Altezza [m]	Larghezza [m]	Vetri [n°]	k [W/m ² K]	R [m ² K/W]	Densità [kg/m ³]	Cp [J/kgK]	Gas inerte
2,00	3,00	2	1,06	3,00	2500	750	aria

Tabella 5 – Caratteristiche principali delle superfici vetrate.

Sistema di ventilazione meccanica – set up termostati

I sistemi di riscaldamento e raffrescamento utilizzati nella simulazione dei *BESTest*, considerano solamente il contributo dato dal calore sensibile, trascurando la componente latente, hanno un'efficienza massima (100%) e sono dotati di potenza infinita. Il sistema di riscaldamento si assume con un funzionamento ad aria, con scambio termico esclusivamente di tipo convettivo (e non anche radiante, quindi). Il sistema di controllo dei parametri termo-igrometrici di ciascun *test-case* è differenziato secondo le seguenti tipologie di *set up*:

⇒ 20-20 (*BANG-BANG*) [Test Case: 195]

La temperatura della zona è mantenuta costantemente a 20°C per tutte le ore dell'anno.

⇒ 20-27 (*DEADBAND*) [Test Case: 600, 620, 900, 920, 960 - *back-zone*]

La temperatura è mantenuta nella zona in *range* di 20°-27°C.

⇒ *SETBACK* [Test Case: 640; 940]

L'impianto di raffrescamento è sempre acceso per consentire il mantenimento della temperatura interna sotto i 27°C. L'impianto di riscaldamento ha due diversi *set-point* dipendenti dall'ora della giornata: dalle 7:00 alle 23:00 la temperatura

interna va mantenuta sopra i 20°C, mentre dalle 23:00 alle 7:00 non deve scendere sotto i 10°C.

⇒ **VENTING** [Test Case: 650; 950]

L'impianto di riscaldamento è sempre spento. L'impianto di raffrescamento ha due condizioni orarie di *set-point* : dalle 18:00 alle 7:00 l'impianto è sempre spento, mentre dalle 7:00 alle 18:00 l'impianto mantiene la temperatura interna al di sotto dei 27°C.

È presente, inoltre, un impianto di ventilazione forzata che immette dell'aria di rinnovo prelevata dall'esterno all'interno della zona, con i seguenti *settings* : dalle 7:00 alle 18:00 l'impianto è sempre spento, mentre dalle 18:00 alle 7:00 l'impianto è acceso alla sua portata nominale di 13,14 volumi/ora (1'703,16 m³/h).

⇒ **FREE-FLOAT** [Test Case: 600FF, 650FF, 900FF, 950FF, 960 - *Sun-zone*]

Nessun impianto di riscaldamento e/o raffrescamento è presente in questo *test-case*, in modo da consentire alla temperatura interna alla zona termica una libera fluttuazione.

TEST CASE	Massa Superfici Opache	Superfici Vetrate		Apporti Interni	Infiltrazioni	Tipologia Impianto
		Superficie	Orientamento			
195	Leggere	NO	NO	NO	NO	<u>Bang-Bang</u>
600	Leggere	12 m ²	Sud	200 W	0.5 Vol/h	<u>Deadband</u>
620	Leggere	6 + 6 m ²	Est - Ovest	200 W	0.5 Vol/h	<u>Deadband</u>
640	Leggere	12 m ²	Sud	200 W	0.5 Vol/h	<u>Setback</u>
650	Leggere	12 m ²	Sud	200 W	0.5 Vol/h	<u>Venting</u>
900	Pesanti	12 m ²	Sud	200 W	0.5 Vol/h	<u>Deadband</u>
920	Pesanti	6 + 6 m ²	Est - Ovest	200 W	0.5 Vol/h	<u>Deadband</u>
940	Pesanti	12 m ²	Sud	200 W	0.5 Vol/h	<u>Setback</u>
950	Pesanti	12 m ²	Sud	200 W	0.5 Vol/h	<u>Venting</u>
960	Leggere (Backzone) Pesanti (Sunzone)	12 m ² (Sunzone)	Sud	200 W (Backzone)	0.5 Vol/h	<u>Deadband (Backzone) Free-Float (Sunzone)</u>
600FF	Leggere	12 m ²	Sud	200 W	0.5 Vol/h	<u>Free-Float</u>
650FF	Leggere	12 m ²	Sud	200 W	0.5 Vol/h	<u>Free-Float</u>
900FF	Pesanti	12 m ²	Sud	200 W	0.5 Vol/h	<u>Free-Float</u>
950FF	Pesanti	12 m ²	Sud	200 W	0.5 Vol/h	<u>Free-Float</u>

Tabella 6 - Riepilogo dei *test-case* dell'ASHRAE.

RISULTATI SIMULAZIONI

Nelle tabelle e nei grafici a seguire sono riportati i risultati ottenuti dalle simulazioni dinamiche effettuate con i codici di calcolo TRNSYS e DesignBuilder. Questi risultati sono stati confrontati con i valori di riferimento ottenuti e messi a disposizione dal *National*

Renewable Energy Laboratory [7] del DOE (Department of Energy - USA) e pubblicati nel documento: “*International Energy Agency Building Energy Simulation Test (BESTEST) and Diagnostic Method*”. Questi valori di riferimento (*BESTest*), sono stati ottenuti attraverso l’analisi dei risultati provenienti da otto diversi codici di calcolo dinamico, utilizzati in ambito scientifico e professionale. I risultati non sono pertanto da considerarsi come un assoluto riferimento, ma sono funzionali per avere un paradigma di quanto oggi riconosciuto attendibile dalla comunità scientifica e, quindi, per avere idea dello stato dell’arte in materia di simulazione numerica nell’ambito dell’analisi energetica degli edifici. La modalità di validazione sviluppata prevede che i risultati ottenuti dalle simulazioni, eseguite con TRNSYS e DesignBuilder, rientrino (con uno scarto massimo del 10%) entro il *range* minimo-massimo dei risultati dei *BESTest* classificati come riferimento. La prima verifica prevede il controllo della gestione dei dati climatici d’ingresso. Nel dettaglio, si sono confrontati i valori dell’irradiazione incidente sulle superfici esposte a sud e ad ovest per i giorni 5 Marzo e 27 Luglio. I risultati ottenuti sono riportati nelle successive figure 13, 14, 15 e 16.

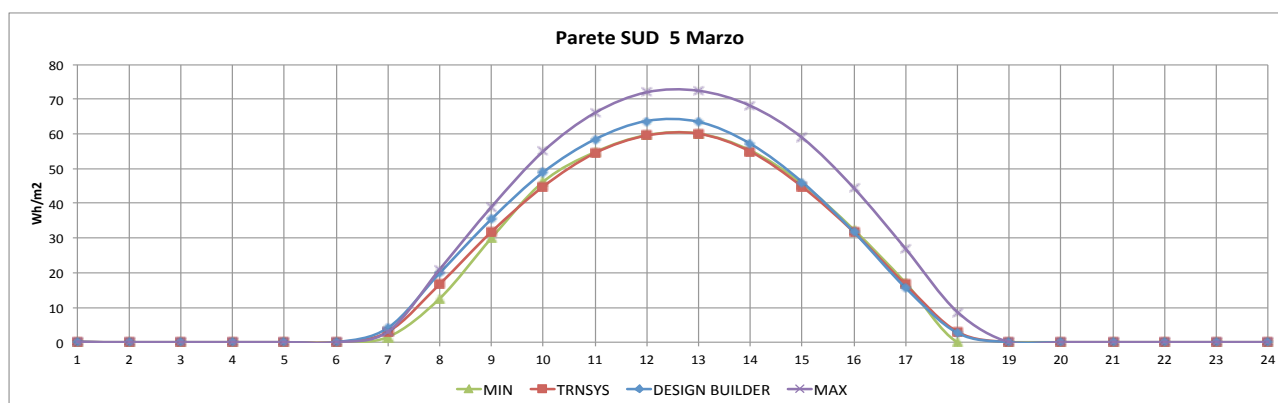


Figura 13 - Irradiazione incidente sulla superficie esposta a Sud il 5 Marzo.

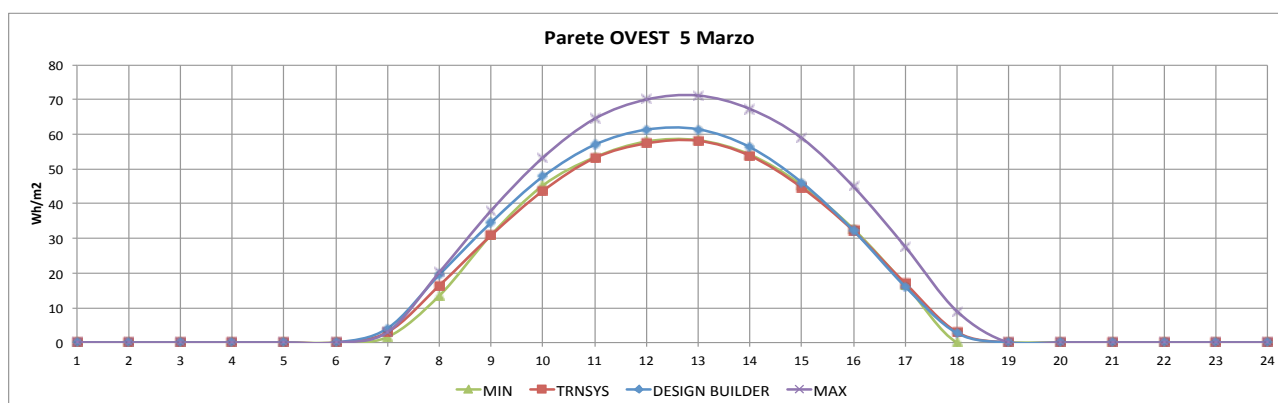


Figura 14 - Irradiazione incidente sulla superficie esposta a Ovest il 5 Marzo.

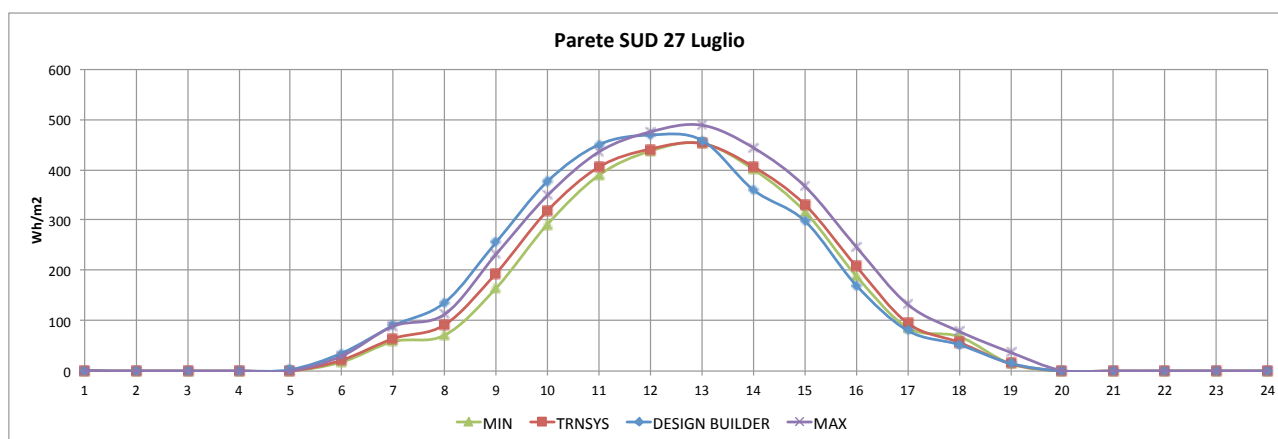


Figura 15 - Irradiazione incidente sulla superficie esposta a Sud il 27 Luglio.

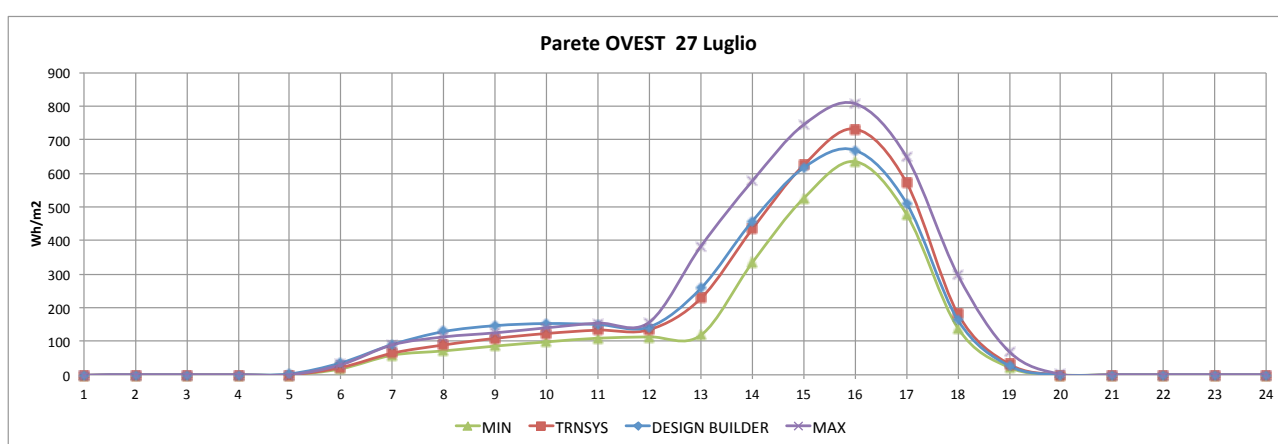


Figura 16 - Irradiazione incidente sulla superficie esposta a Ovest il 27 Luglio.

I risultati sopra riportati mostrano come i codici di calcolo siano in grado di modellare il problema fisico in maniera coerente. I risultati sui valori d'irradiazione rientrano ampiamente nell'intervallo dei valori considerati attendibili nei *BESTest*.

L'analisi successiva ha riguardato i risultati sulla domanda di energia annua necessaria per il riscaldamento e il raffrescamento dei vari *test-case*. Anche questo test di controllo è stato superato, infatti i risultati rientrano ampiamente nell'intervallo dei valori considerati attendibili nei *BESTest*.

RISCALDAMENTO ANNUALE TEST CASE #	BESTEST RANGE			TRNSYS			DESIGN BUILDER		
	MIN [MWh]	MAX [MWh]	RANGE average	Risultati [MWh]	fuori range	PASSA TEST	Risultati [MWh]	fuori range	PASSA TEST
600	4,296	5,709	5,090	5,070	0,00%	SI	4,559	0,00%	SI
620	4,613	5,944	5,407	5,281	0,00%	SI	4,628	0,00%	SI
640	2,751	3,803	3,207	3,280	0,00%	SI	2,834	0,00%	SI
650	0,000	0,000	0,000	0,000	0,00%	SI	0,000	0,00%	SI
900	1,170	2,041	1,745	1,683	0,00%	SI	1,367	0,00%	SI
920	3,313	4,300	3,973	3,944	0,00%	SI	3,086	6,84%	SI
940	0,793	1,411	1,160	1,123	0,00%	SI	0,826	0,00%	SI
950	0,000	0,000	0,000	0,000	0,00%	SI	0,000	0,00%	SI
960	2,311	3,373	2,846	2,909	0,00%	SI	2,263	2,09%	SI
195	4,167	5,871	4,999	5,318	0,00%	SI	4,175	0,00%	SI

Figura 17 – Tabelle dei valori del fabbisogno annuo di energia per il riscaldamento.

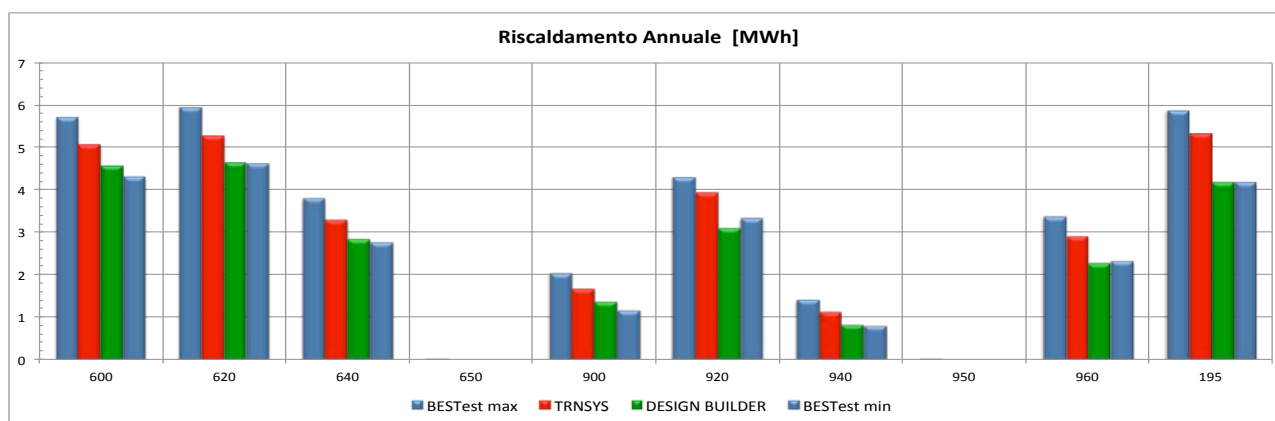


Figura 18 – Grafici dei valori del fabbisogno annuo di energia per il riscaldamento.

RAFFRESCAMENTO ANNUALE TEST CASE #	BESTEST RANGE			TRNSYS			DESIGN BUILDER		
	MIN [MWh]	MAX [MWh]	RANGE average	Risultati [MWh]	fuori range	PASSA TEST	Risultati [MWh]	fuori range	PASSA TEST
600	6,137	7,964	6,832	6,148	0,00%	SI	7,470	0,00%	SI
620	3,417	5,004	4,218	3,652	0,00%	SI	4,703	0,00%	SI
640	5,952	7,811	6,592	5,938	0,24%	SI	7,232	0,00%	SI
650	4,816	6,545	5,482	4,820	0,00%	SI	6,494	0,00%	SI
900	2,132	3,415	2,678	2,016	5,44%	SI	3,221	0,00%	SI
920	1,840	3,092	2,552	2,134	0,00%	SI	2,891	0,00%	SI
940	2,079	3,241	2,578	1,928	7,26%	SI	3,086	0,00%	SI
950	0,387	0,921	0,605	0,375	3,10%	SI	0,826	0,00%	SI
960	0,411	0,803	0,618	0,432	0,00%	SI	0,832	3,59%	SI
195	0,264	0,510	0,436	0,332	0,00%	SI	0,500	0,00%	SI

Figura 19 - Tabelle dei valori del fabbisogno annuo di energia per il raffreddamento.

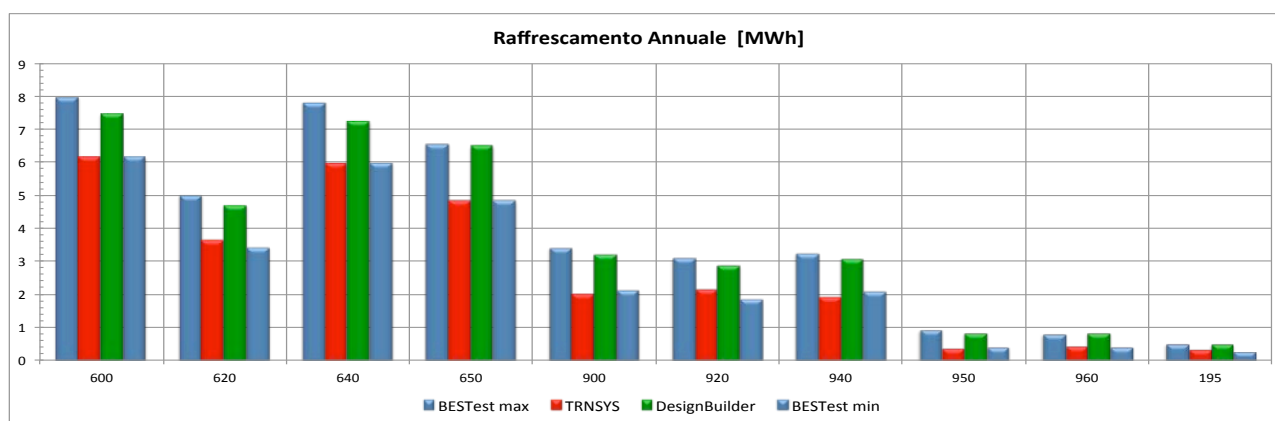


Figura 20 - Grafici dei valori del fabbisogno annuo di energia per il raffreddamento.

A seguire si riportano i grafici dell'analisi delle potenze di picco registrate nei vari casi esaminati, i cui risultati rientrano ampiamente nel *range* di tolleranza ammesso dai *BESTest*.

CARICO DI PICCO ORARIO PER RISCALDAMENTO TEST CASE #	BESTEST RANGE			TRNSYS			DESIGN BUILDER		
	MIN [kW]	MAX [kW]	RANGE average	Risultati [kW]	fuori range	PASSA TEST	Risultati [kW]	fuori range	PASSA TEST
600	3,437	4,354	4,039	3,880	0,00%	SI	3,731	0,00%	SI
620	3,591	4,379	4,092	3,870	0,00%	SI	3,724	0,00%	SI
640	5,232	8,078	6,287	6,038	0,00%	SI	6,234	0,00%	SI
650	0,000	0,000	0,000	0,000	0,00%	SI	0,000	0,00%	SI
900	2,850	4,081	3,578	3,414	0,00%	SI	3,263	0,00%	SI
920	3,308	4,156	3,848	3,624	0,00%	SI	3,483	0,00%	SI
940	3,980	9,923	6,047	5,373	0,00%	SI	5,006	0,00%	SI
950	0,000	0,000	0,000	0,000	0,00%	SI	0,000	0,00%	SI
960	2,410	2,896	2,725	2,717	0,00%	SI	2,689	0,00%	SI
195	2,004	2,385	2,225	2,272	0,00%	SI	2,069	0,00%	SI

Figura 21 - Tabelle comparative relative ai picchi di potenza annuale per il riscaldamento.

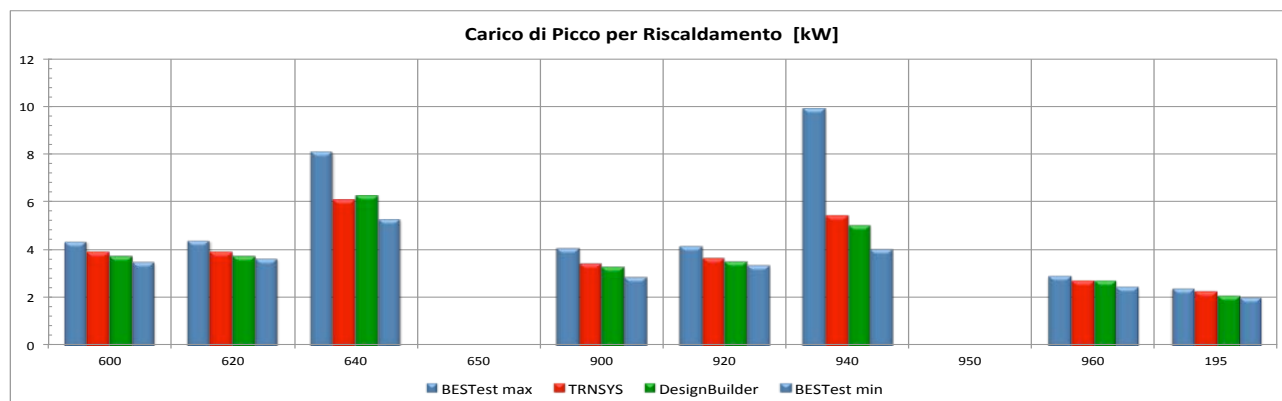


Figura 22 – Grafici comparativi relativi ai picchi di potenza annuale per il riscaldamento.

CARICO DI PICCO ORARIO PER RAFFRESCAMENTO TEST CASE #	BESTEST RANGE			TRNSYS			DESIGN BUILDER		
	MIN [kW]	MAX [kW]	RANGE average	Risultati [kW]	fuori range	PASSA TEST	Risultati [kW]	fuori range	PASSA TEST
600	5,965	7,551	6,597	6,101	0,00%	SI	6,703	0,00%	SI
620	3,634	5,096	4,420	3,933	0,00%	SI	4,237	0,00%	SI
640	5,892	7,537	6,551	6,063	0,00%	SI	6,930	0,00%	SI
650	5,831	7,458	6,463	5,967	0,00%	SI	6,907	0,00%	SI
900	2,888	4,901	3,579	3,101	0,00%	SI	3,877	0,00%	SI
920	2,385	3,777	3,165	2,735	0,00%	SI	3,049	0,00%	SI
940	2,888	4,901	3,579	3,101	0,00%	SI	3,877	0,00%	SI
950	2,033	3,848	2,821	2,325	0,00%	SI	2,897	0,00%	SI
960	0,953	1,403	1,224	1,003	0,00%	SI	1,266	0,00%	SI
195	0,616	0,853	0,754	0,658	0,00%	SI	0,804	0,00%	SI

Figura 23 - Tabelle comparative relative ai picchi di potenza annuale per il raffrescamento.

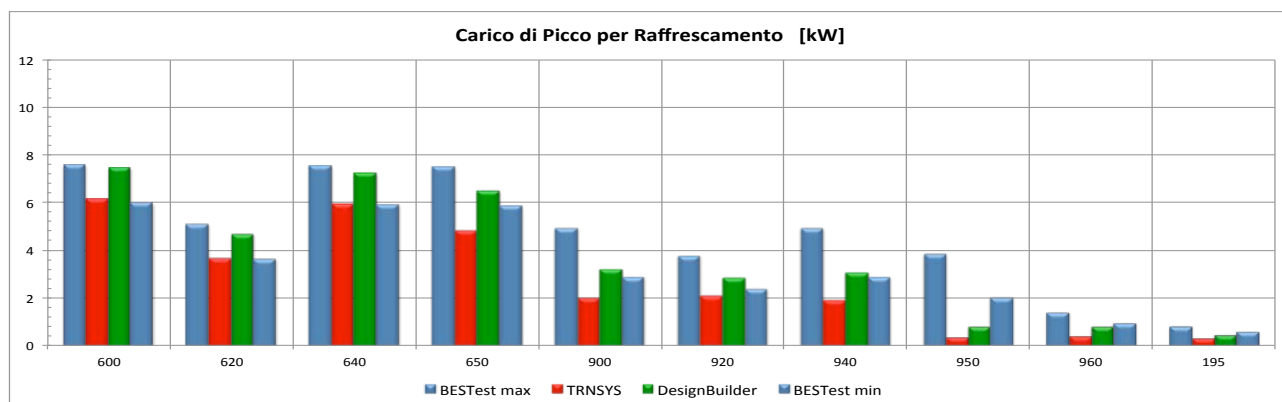


Figura 24 - Grafici comparativi relativi ai picchi di potenza annuale per il raffrescamento.

Le verifiche per i casi test in *Free Floating* prevedono un'analisi sull'andamento delle temperature rilevate all'interno della zona termica. Nelle tabelle successive sono riportati i valori di temperatura minima, massima e media, ottenute con scansione oraria. Anche per questa serie di dati si riscontra una buona omogeneità dei valori ottenuti.

TEMPERATURA ORARIA MASSIMA DI ZONA	BESTEST RANGE			TRNSYS			DESIGN BUILDER		
	MIN [°C]	MAX [°C]	RANGE average	Risultati [°C]	fuori range	PASSA TEST	Risultati [°C]	fuori range	PASSA TEST
TEST CASE #									
600FF	64,90	69,81	66,67	64,51	0,60%	SI	69,91	0,14%	SI
900FF	41,81	44,80	43,10	41,04	1,85%	SI	46,18	3,08%	SI
650FF	63,24	68,49	65,15	63,25	0,00%	SI	68,95	0,67%	SI
950FF	35,54	38,50	36,40	35,11	1,21%	SI	38,87	0,96%	SI

TEMPERATURA ORARIA MINIMA DI ZONA	BESTEST RANGE			TRNSYS			DESIGN BUILDER		
	MIN [°C]	MAX [°C]	RANGE average	Risultati [°C]	fuori range	PASSA TEST	Risultati [°C]	fuori range	PASSA TEST
TEST CASE #									
600FF	-18,80	-9,96	-16,68	-19,10	1,60%	SI	-19,07	1,44%	SI
900FF	-6,38	-1,65	-4,19	-3,85	0,00%	SI	-4,47	0,00%	SI
650FF	-23,00	-9,97	-21,09	-23,18	0,78%	SI	-23,31	1,35%	SI
950FF	-20,20	-9,83	-18,39	-19,90	0,00%	SI	-20,90	3,47%	SI

TEMPERATURA ORARIA MEDIA DI ZONA	BESTEST RANGE			TRNSYS			DESIGN BUILDER		
	MIN [°C]	MAX [°C]	RANGE average	Risultati [°C]	fuori range	PASSA TEST	Risultati [°C]	fuori range	PASSA TEST
TEST CASE #									
600FF	24,22	25,93	25,06	24,26	0,00%	SI	26,47	2,08%	SI
900FF	24,45	25,93	25,18	24,36	0,37%	SI	26,75	3,16%	SI
650FF	17,99	19,62	18,67	17,93	0,33%	SI	19,72	0,51%	SI
950FF	14,00	14,97	14,39	13,92	0,57%	SI	14,91	0,00%	SI

Figura 25 –Temperature Massime, Minime e Medie Annuali registrate nei test-case in Free-Floating.

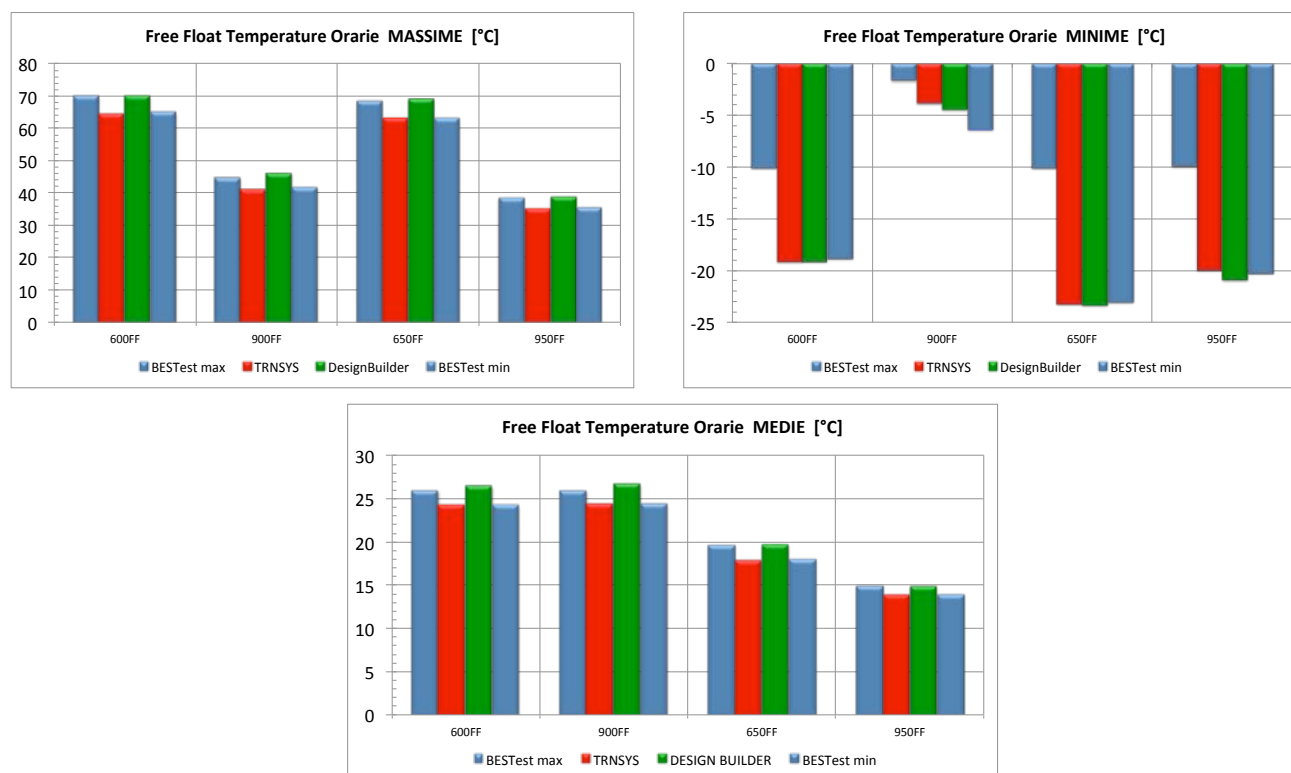


Figura 26 - Grafici relativi alle temperature Massime, Minime e Medie Annuali dei test-case in Free-Floating.

Il vaglio dei risultati ottenuti prosegue con l'analisi delle temperature medie orarie calcolate all'interno dell'edificio dei casi in *Free-Floating*, riportati nei grafici seguenti distinti per diverse giornate campione.

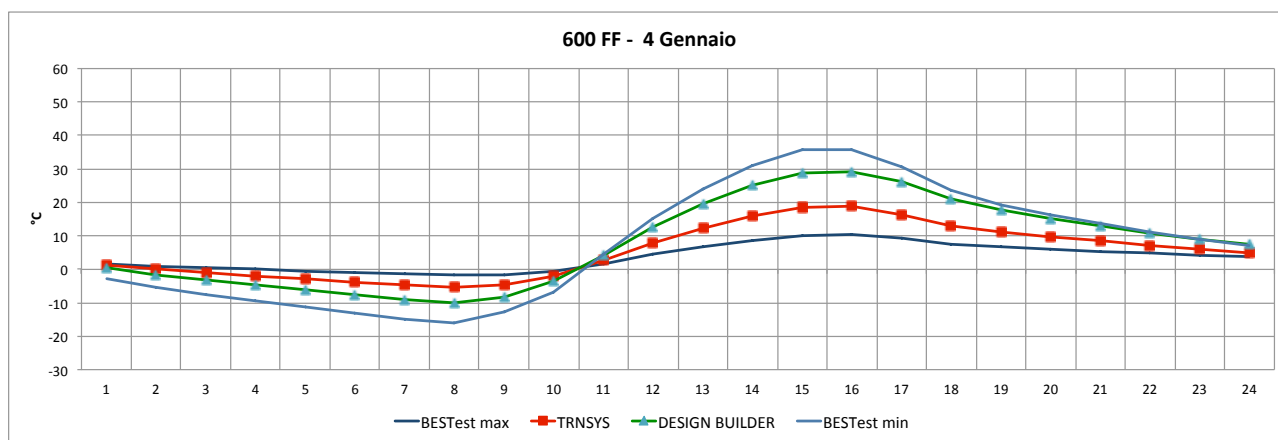


Figura 27 – Grafico delle temperature interne del *test-case* 600FF relative al 4 Gennaio.

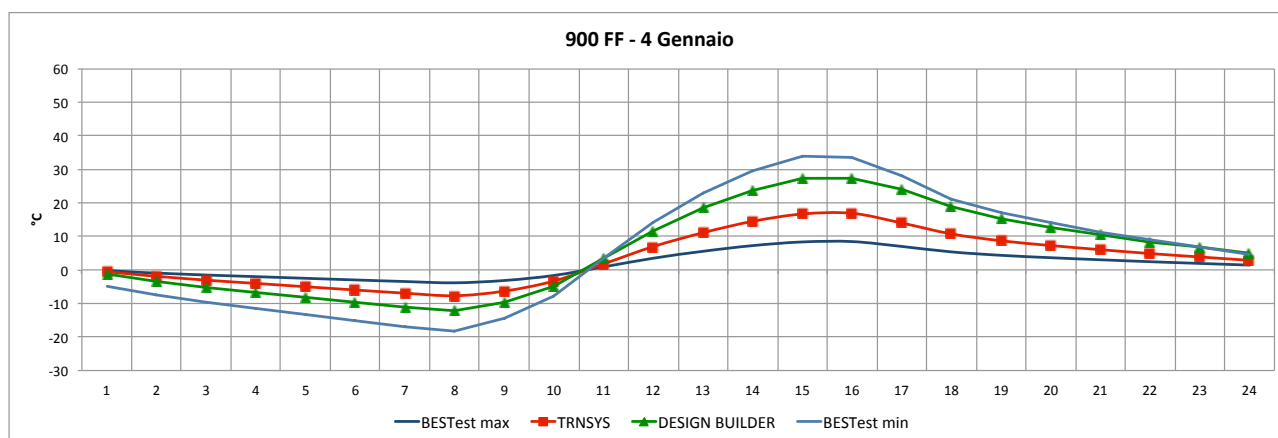


Figura 28 – Grafico delle temperature interne del *test-case* 900FF relative al 4 Gennaio.

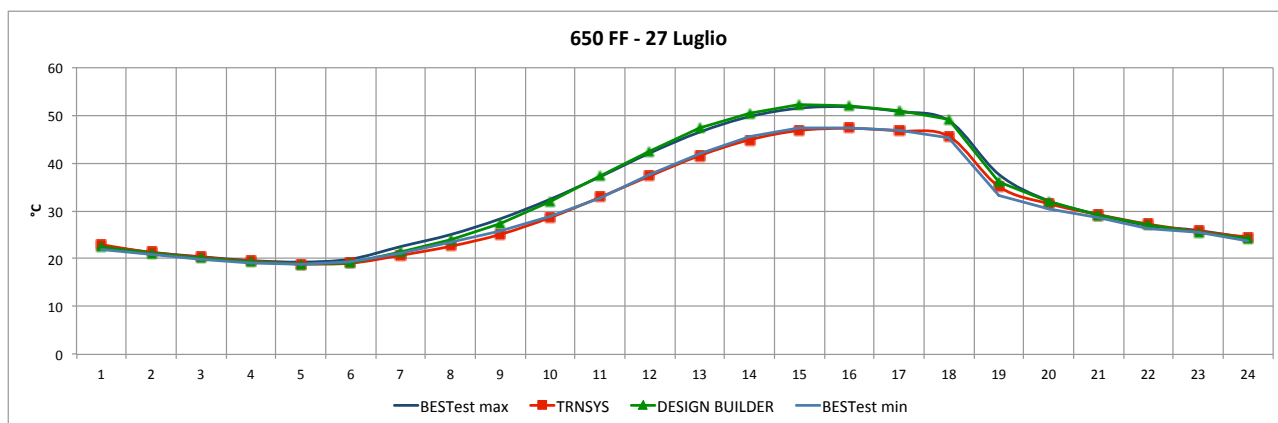


Figura 29 – Grafico delle temperature interne del *test-case* 650FF relative al 27 Luglio.

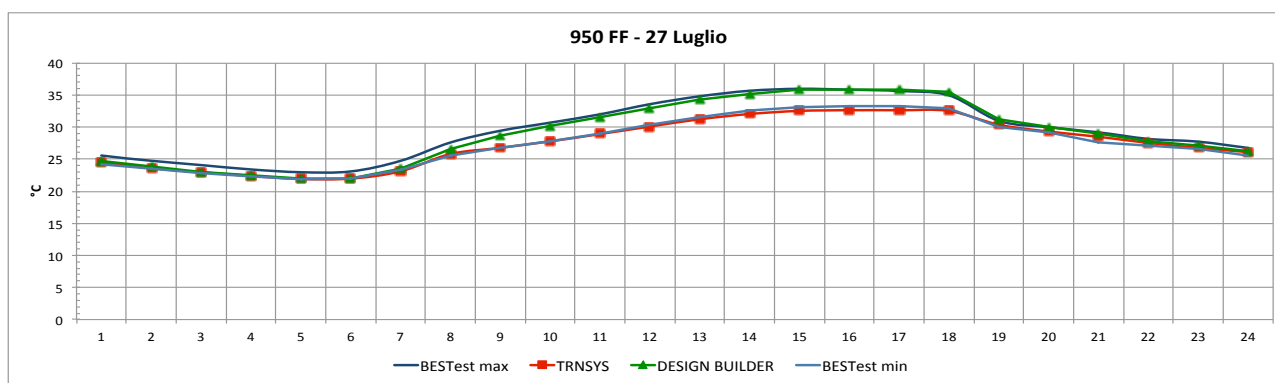


Figura 30 – Grafico delle temperature interne del *test-case* 950FF relative al 27 Luglio.

I risultati delle simulazioni effettuate con entrambi i codici sono rientrati sempre all'interno del *range* previsto per i BESTest, ad eccezione di qualche saltuaria elaborazione che presenta valori con una deviazione comunque contenuta nel limite del 10% previsto. Il valore medio di questa deviazione è intorno all'1-2% che in termini assoluti corrisponde a meno di 1°C. Analizzando le figure 29 e 30 si può notare come i valori ottenuti con il codice TRNSYS durante la stagione estiva si attestano nel limite inferiore del *range* di valutazione. La modalità di calcolo di questi fenomeni è sicuramente la causa principale della minore richiesta di energia frigorifera che il modello fa registrare paragonando i fabbisogni stagionali, riportati alle figure 19 e 20

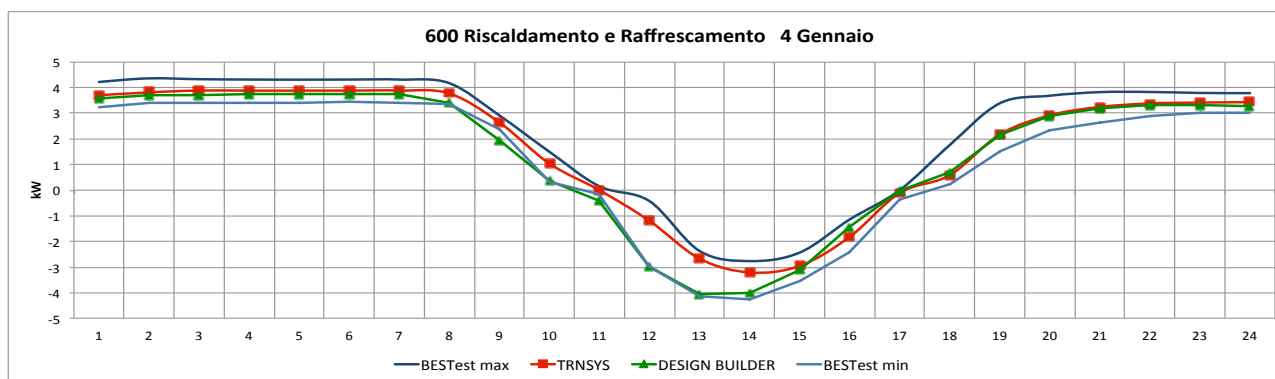


Figura 31 - Grafico dell'energia termica e frigorifera calcolata il 4 Gennaio nel *test-case* 600.

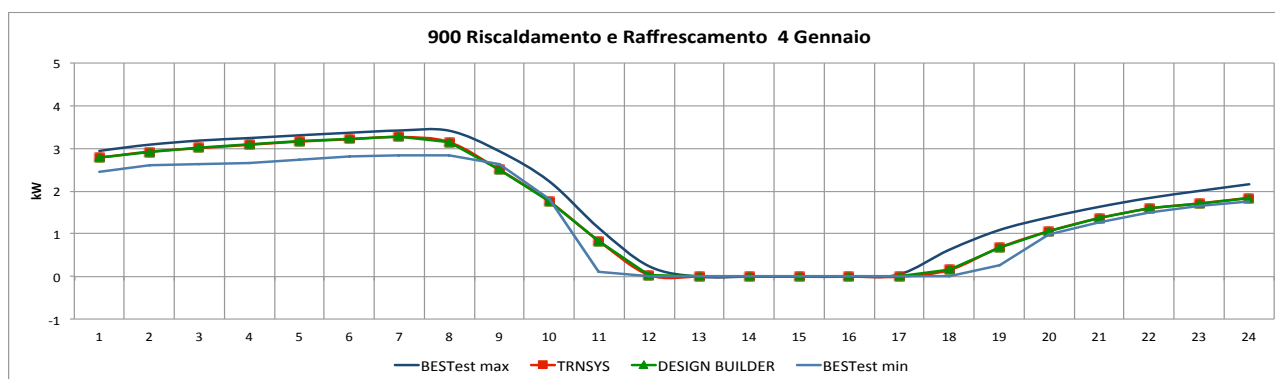


Figura 32 - Grafico dell'energia termica e frigorifera calcolata il 4 Gennaio nel *test-case* 900.

L'ultima verifica di validazione dei codici di calcolo utilizzati consiste nell'analisi comparativa, per il giorno 4 Gennaio, dell'andamento orario della potenza termica necessaria per il riscaldamento (per convenzione positiva) e il raffrescamento (per convenzione negativa) dei *test-case* 600 e 900.

Considerando tutti i risultati ottenuti con entrambi i software, è possibile affermare che le operazioni di validazione e calibrazione, effettuate sui casi test ASHRAE/BESTest, hanno dato esito positivo, dimostrando la buona attendibilità sia del codice TRNSYS, che di DesignBuilder, nel riuscire a restituire un modello coerente rispetto al problema fisico oggetto di indagine e studio.

2.3.2 UNI EN 15265:2008

Il secondo metodo di calibrazione adottato consiste nella simulazione dinamica di diversi casi test tratti dalla norma UNI EN 15265:2008. I *test-case* presi in esame sono indicati con una numerazione progressiva dal n°1 al n°12. Il test numero 6, è stato oggetto di interesse anche della UNI EN ISO 13790:2008, che riporta i risultati ottenuti nel test come riferimento di validazione per testare il comportamento dei codici che eseguono calcoli in regime stazionario ed orario semplificato. Questa fase del lavoro di ricerca ha sviluppato la verifica di coerenza tra i valori ottenuti con i software TRNSYS e DesignBuilder e quelli presi come riferimento dalle normative europee [26][27]

Il test prende in considerazione la stanza di un edificio che ha le seguenti dimensioni:

- lunghezza = 3.6 m;
- profondità = 5.5 m;
- altezza = 2.8 m.

Il tetto, il pavimento e tre pareti (esposizione N-S-E) sono adiacenti ad un ambiente avente la stessa temperatura, con il quale, quindi, gli scambi termici risultano nulli (pareti adiabatiche). Per tutti i test esiste una sola parete, quella esposta ad ovest, che si affaccia verso l'esterno, la quale, della superficie totale di 10,08 m², ospita una finestra di 7,00 m². Solamente i test dal n° 9 al n°12 hanno anche il tetto esposto verso l'esterno. Tutti gli eventuali ponti termici presenti nella struttura devono essere trascurati.

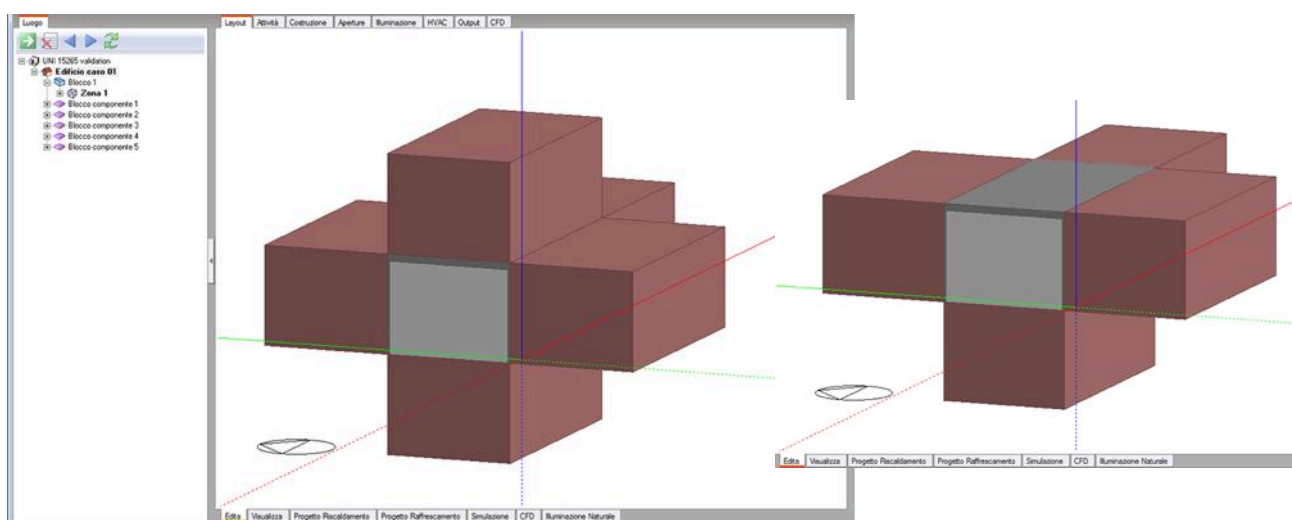


Figura 33 – Schermate in ambiente DesignBuilder dei modello di edificio dei test della norma UNI 15265.

Gli elementi costruttivi della stanza sono caratterizzati secondo la seguente classificazione, a seconda del numero del test considerato:

- pareti esterne = tipologia 1;
- partizioni interne = tipologia 2;
- pavimento interno = tipologia 4f, 3f ;
- copertura = tipologia 3c, 4c, 5.

Le caratteristiche termofisiche delle superfici opache sono descritte nella tabella riportata in figura 35. Il valore di assorbività della radiazione è assunto pari a 0,6 per le pareti perimetrali e pari a 0,9 per il tetto.

Nei *test-case* sono definite due tipologie di finestre, la prima DP (*double pain*) è dotata di doppio vetro, mentre la seconda è chiamata SHADED DP, perché provvista di un sistema di ombreggiamento. I valori di resistenza termica e le caratteristiche termofisiche complessive degli infissi sono riportate nella tabella in figura 35 e nella tabella in figura 36.

Glazing name	layers	U valu	g value
EN 15265 Dbl Pane	EN 15265 Pane	2.930	0.764
	Air 13.6 mm		
	EN 15265 Pane		
EN 15265 Shaded DP	EN 15265 Shade	2.372	0.206
	Air 3 mm		
	EN 15265 Pane		
	Air 13.6 mm		
	EN 15265 Pane		

Figura 35 – Tabella delle caratteristiche termofisiche delle superfici trasparenti.

SUPERFICI OPACHE - TEST UNI 15265				
ELEMENTO (dall'esterno verso l'interno)	Spessore [m]	k [W/mK]	Densità [kg/m ³]	Cp [J/kgK]
PARETE ESTERNA - TIPOLOGIA 1				
Outer layer	0.115	0.99	1800	850
Insulating layer	0.006	0.04	30	850
Masonry	0.175	0.79	1600	850
Internal plastering	0.015	0.70	1400	850
PARETE INTERNA - TIPOLOGIA 2				
Gypsum plaster	0.012	0.21	900	850
Mineral wool	0.100	0.04	30	850
Gypsum plaster	0.012	0.21	900	850
COPERTURA - TIPOLOGIA 3C				
Plastic covering	0.004	0.23	1500	1500
Cement floor	0.060	1.40	2000	850
Mineral wool	0.040	0.04	50	850
Concrete	0.180	2.10	2400	850
PAVIMENTO - TIPOLOGIA 3F				
Concrete	0.180	2.10	2400	850
Mineral wool	0.040	0.04	50	850
Cement floor	0.060	1.40	2000	850
Plastic covering	0.004	0.23	1500	1500
COPERTURA - TIPOLOGIA 4C				
Plastic covering	0.004	0.23	1500	1500
Cement floor	0.060	1.40	2000	850
Mineral wool	0.040	0.04	50	850
Concrete	0.180	2.10	2400	850
Mineral wool	0.100	0.04	50	850
Acoustic board	0.020	0.06	400	840
PAVIMENTO - TIPOLOGIA 4F				
Acoustic board	0.020	0.06	400	840
Mineral wool	0.100	0.04	50	850
Concrete	0.180	2.10	2400	850
Mineral wool	0.040	0.04	50	850
Cement floor	0.060	1.40	2000	850
Plastic covering	0.004	0.23	1500	1500
COPERTURA - TIPOLOGIA 5				
Rain protection	0.004	0.23	1500	1300
Insulating	0.040	0.04	50	850
Concrete	0.180	2.10	2400	850

Figura 34 - Tabella delle caratteristiche termofisiche delle superfici opache.

Glass Name	Thickness [mm]	Conductivity [W/ mK]	Solar Transmittance	Inside/Outside Reflectance	IR Transmittanc e	Inside/Outside Emissivity
EN 15265 Shade	0.10	0.90	0.20	0.50	0.9	0.6
EN 15265 Pane	6.00	1.00	0.84	0.08	0.9	0.6

Figura 36 - Tabella delle caratteristiche termofisiche delle superfici trasparenti.

Per completare la costruzione di ciascun modello è necessario definire le seguenti grandezze in ingresso:

File meteo

Il file di dati meteorologici utilizzato nei codici di calcolo è stato ricavato dal software *Meteonorm*, sulla base delle indicazioni fornite dalla norma UNI 15265. La località di riferimento è la cittadina di *Trappes*, situata non distante da Parigi. Il file meteo di partenza non prende in considerazione l'ora solare bensì quella legale. I principali parametri del sito sono riepilogati nelle tabelle riportate in figura 37:

Latitudine	Longitudine	Altitudine	Temperatura minima annuale	Temperatura massima annuale	Temperatura media annuale
49.00° Nord	2.00° Ovest	159 m	-6.50 °C	33.25 °C	11.41 °C

Irradiazione globale annuale (orizzontale)	Irradiazione normale annuale	Irradiazione diretta annuale (orizzontale)	Irradiazione diffusa annuale (orizzontale)
1100 kWh/m	935 kWh/m ²	477 kWh/m ²	623 kWh/m ²

Figura 37 – Tabelle dei dati relativi alla località ed al clima.

Infiltrazioni e ventilazione

Le infiltrazioni di aria esterna sono da considerarsi sempre nulle. I ricambi d'aria, effettuati con sola aria di rinnovo, sono pari a 1 vol/h. con funzionamento programmato attivo soltanto nei giorni feriali, dalle 8:00 alle 18:00.

Apporti interni gratuiti

Gli apporti interni gratuiti sono di 20 W/m², considerati nella sola componente convettiva, e sono presenti soltanto nei giorni feriali dalle 8:00 alle 18:00. Gli apporti gratuiti sono presenti in tutti i casi test ad eccezione del n°3, n°7 e n°11.

Coefficienti di scambio termico convettivo esterni e interni

I coefficienti di scambio termico convettivo delle superfici opache e trasparenti sono i seguenti: 2,5 W/m²K per le superfici interne e 17,5 W/m²K per le superfici esterne.

Distribuzione irradiazione solare interna

La distribuzione di energia solare, passante attraverso le superfici vetrate verso l'interno dell'ambiente, è così definita: il 23,7% colpisce il pavimento, il 23,7% arriva al soffitto, la parete ovest assorbe il 3,7%, mentre alle restanti pareti perimetrali giunge il 48,9%.

Sistema di ventilazione meccanica e set-point delle temperature

I sistemi di riscaldamento e raffrescamento utilizzati si considerano aventi efficienza massima (100%) e dotati di potenza infinita. La componente latente del calore viene completamente trascurata, considerando nel calcolo solamente quella sensibile. Il riscaldamento è del tipo 100% convettivo con sistemi a tutt'aria. Le temperature di *set-point* impostate sono le seguenti: in riscaldamento si utilizzano 20°C, mentre in raffrescamento 26°C, entrambi senza banda morta. Il periodo di accensione degli impianti varia a seconda del numero di riferimento del caso test: dal n°1 al n°4 l'impianto è sempre acceso, per tutti i giorni della settimana; dal n°5 al n°12, l'impostazione di accensione dell'impianto è dal Lunedì al Venerdì, dalle 8:00 alle 18:00.

DESCRIZIONE DEI TEST-CASE

La UNI EN 15265:2008 non considera obbligatoria la verifica dei test che vanno dal n°1 al n°4, in quanto ritenuti funzionali al controllo delle operazioni preliminari di impostazione della modellazione. I test, invece, che vanno dal n°5 al n°12 sono quelli ritenuti validi ai fini della classificazione della qualità dei codici di simulazione dinamici. Il test n°1 rappresenta il *test-case* di riferimento su cui costruire tutta la successiva sequenza degli altri test. Le differenze esistenti tra i diversi casi test sono riepilogate nella tabella riportata in figura 38.

Test n°	Parete		Copertura	Pavimento	Finestre	Apporti Interni	Funzionamento Impianti
	Esterna	Interna					
1	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 4C	Tipo 4F	Shaded DP	SI	Continuo
2	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3C	Tipo 3F	Shaded DP	SI	Continuo
3	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 4C	Tipo 4F	Shaded DP	NO	Continuo
4	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 4C	Tipo 4F	DP	SI	Continuo
5	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 4C	Tipo 4F	Shaded DP	SI	Intermittente
6	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3C	Tipo 3F	Shaded DP	SI	Intermittente
7	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 4C	Tipo 4F	Shaded DP	NO	Intermittente
8	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 4C	Tipo 4F	DP	SI	Intermittente
9	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 5	Tipo 4F	Shaded DP	SI	Intermittente
10	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 4C	Tipo 3F	Shaded DP	SI	Intermittente
11	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 5	Tipo 4F	Shaded DP	NO	Intermittente
12	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 5	Tipo 4F	DP	SI	Intermittente

Figura 38 – Elenco dei 12 *test-case* previsti dalla UNI 15265 e loro caratteristiche particolari.

RISULTATI SIMULAZIONI

I dati di output dei codici devono essere elaborati in modo da ottenere i consumi mensili e annuali per riscaldamento (Q_H) e raffrescamento (Q_C). I risultati così ottenuti sono, quindi, confrontati con i valori di riferimento riportati nella UNI 15265 ($Q_{H,ref}$ e $Q_{C,ref}$). A questo punto si calcolano i parametri rQ_H ed rQ_C utili alla classificazione dei risultati ottenuti.

I valori rQ_H e rQ_C si calcolano con le seguenti relazioni:

$$rQ_H = | Q_H - Q_{H,ref} | / Q_{tot,ref}$$

$$rQ_C = | Q_C - Q_{C,ref} | / Q_{tot,ref}$$

dove $Q_{tot,ref}$ è la somma, in valore assoluto, di $Q_{H,ref}$ e $Q_{C,ref}$.

I livelli di accuratezza del codice vengono definiti in base ai seguenti criteri:

Level **A** : $rQ_H \leq 0.05$ and $rQ_C \leq 0.05$

Level **B** : $rQ_H \leq 0.10$ and $rQ_C \leq 0.10$

Level **C** : $rQ_H \leq 0.15$ and $rQ_C \leq 0.15$

I risultati ottenuti sono stati riportati nel seguito del paragrafo. L'esito della prova, utilizzando i test di controllo (dal n°6 al n°12), ha fatto registrare per il codice TRNSYS un livello di accuratezza di tipo A e B, mentre con il software DesignBuilder anche qualche C. Considerando un valore medio di rQ_H e rQ_C per tutti i *test-case* esaminati, si ottiene un valore di deviazione globale di circa il 5%.

Test	RIFERIMENTO UNI 15265			TRNSYS							DESIGN BUILDER						
	Q _{H,ref}	Q _{C,ref}	Q _{tot,ref}	QHEAT	QCOOL	rQ _H	Level	rQ _C	Level	Media	QHEAT	QCOOL	rQ _H	Level	rQ _C	Level	Media
N°1	748	234	982	902	280	15,68%	C-D	4,74%	A	10,2%	743	179	0,5%	A	5,6%	B	3,0%
N°2	723	201	923	872	239	16,13%	C-D	4,13%	A	10,1%	762	187	4,3%	A	1,5%	A	2,9%
N°3	1369	43	1412	1496	59	9,05%	B	1,13%	A	5,1%	1.363	13	0,4%	A	2,1%	A	1,3%
N°4	567	1531	2098	717	1485	7,14%	B	2,19%	A	4,7%	513	1.330	2,6%	A	9,6%	B	6,1%
N°5	463	202	665	481	243	2,75%	B	6,23%	B	4,5%	487	165	3,6%	A	5,5%	B	4,6%
N°6	510	185	695	551	222	5,96%	B	5,31%	B	5,6%	502	173	1,1%	A	1,7%	A	1,4%
N°7	1067	20	1087	1062	29	0,46%	A	0,86%	A	0,7%	1.137	4	6,4%	B	1,4%	A	3,9%
N°8	313	1133	1446	355	1102	2,91%	A	2,17%	A	2,5%	328	973	1,0%	A	11,1%	C	6,0%
N°9	747	158	905	716	239	3,44%	B	8,91%	B	6,2%	848	132	11,1%	C	2,9%	A	7,0%
N°10	574	192	767	565	257	1,23%	B	8,37%	B	4,8%	545	180	3,8%	A	1,6%	A	2,7%
N°11	1395	14	1409	1321	31	5,27%	B	1,20%	B	3,2%	1.531	3	9,6%	B	0,8%	A	5,2%
N°12	534	928	1462	545	968	0,76%	A	2,73%	A	1,7%	626	837	6,3%	B	6,2%	B	6,3%
	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh						kWh	kWh					

Figura 39 – Tabella di confronto dei risultati ottenuti dalle simulazioni dinamiche effettuate con i codici di calcolo TRNSYS e DesignBuilder ed i valori di riferimento della UNI 15265

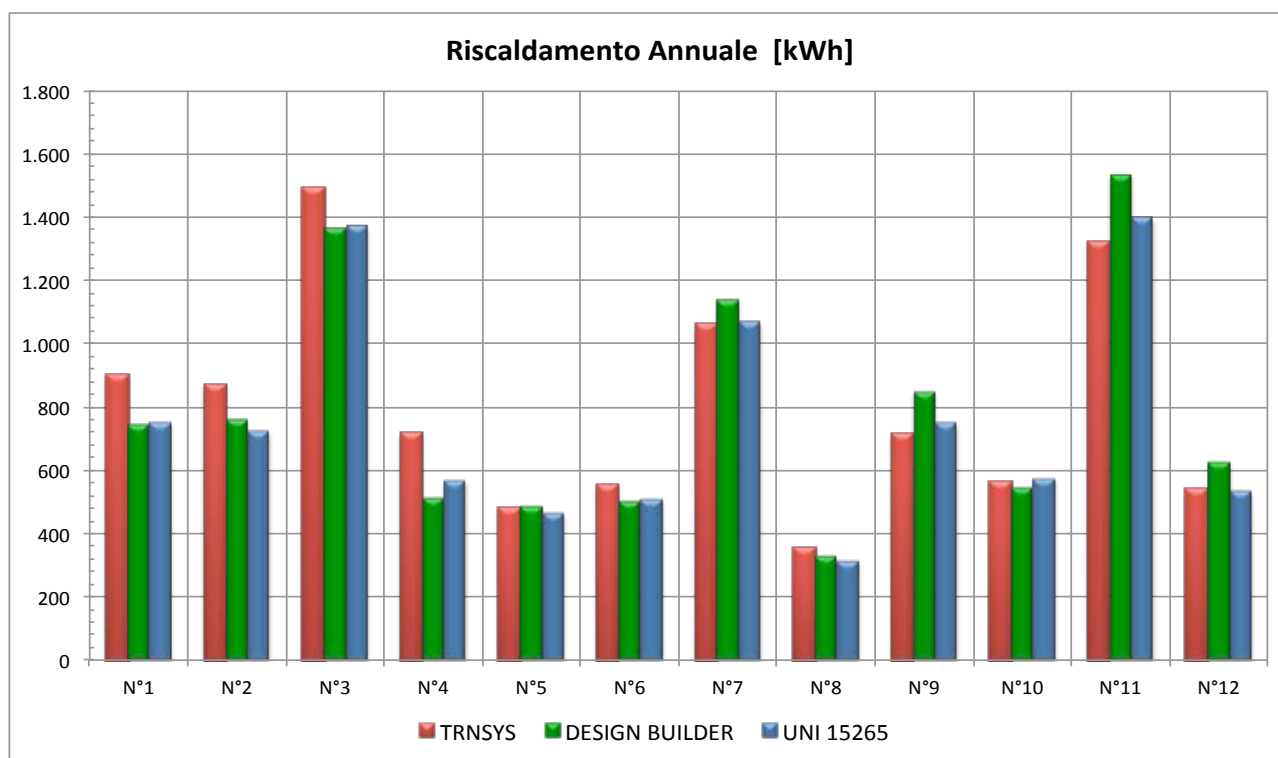


Figura 40- Grafico di confronto dei risultati ottenuti per il riscaldamento annuo con i codici TRNSYS e DesignBulder ed i valori di riferimento della UNI 15265.

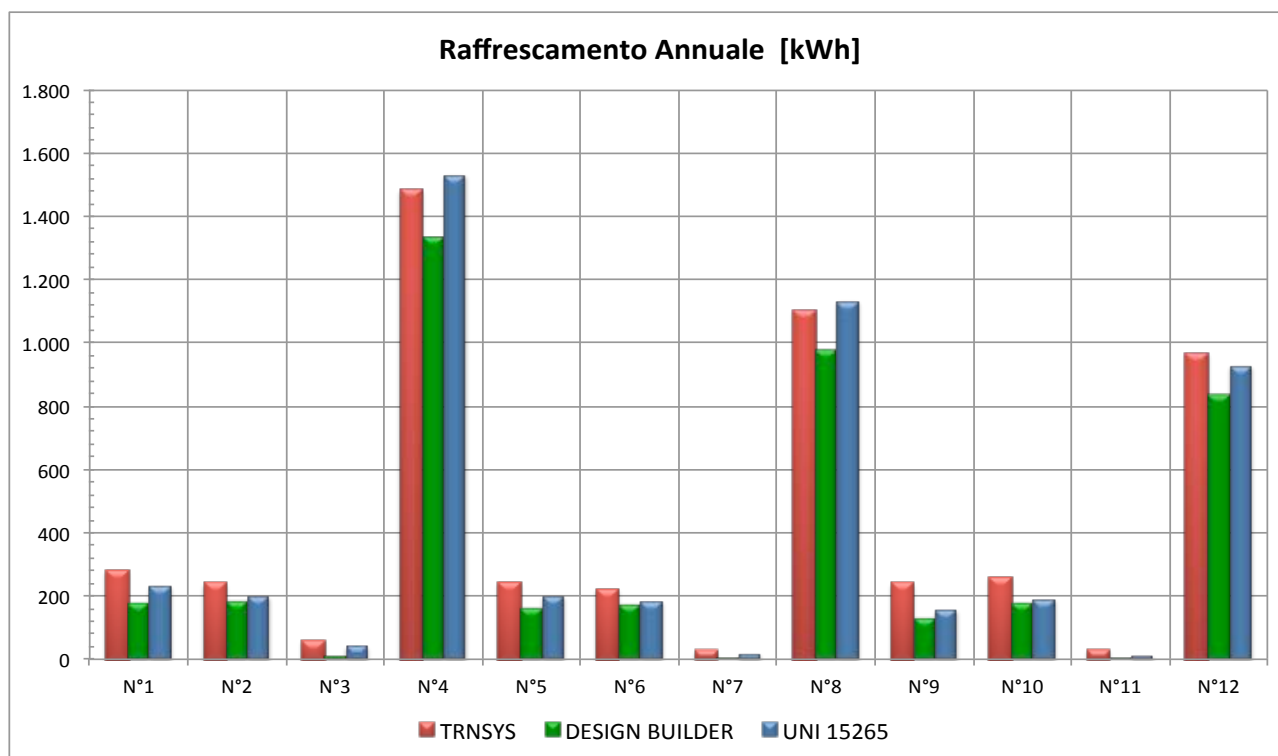


Figura 41 - Grafico di confronto dei risultati ottenuti per il raffrescamento annuo con i codici TRNSYS e DesignBulder ed i valori di riferimento della UNI 15265.

CAPITOLO 3

APPROCCIO ALLA SIMULAZIONE DINAMICA DELL'EDIFICIO OGGETTO DI STUDIO

Un importante aspetto, emerso durante il presente studio di ricerca, riguarda l'incertezza legata alle variabili di ingresso: i calcoli di termofisica dell'edificio, infatti, vengono effettuati a partire dai dati di ingresso stimati (o provenienti dalla letteratura ufficiale), i quali risultano affetti da una intrinseca incertezza. Adottando raffinati modelli di calcolo, tale incertezza diventa uno tra i maggiori indiziati della causa di risultati (output) fuorvianti o, in alcuni casi, inattendibili. Uno degli obiettivi che si è perseguito nello sviluppo della presente ricerca è di contenere il livello di incertezza a dei limiti accettabili (o perlomeno noti) di errore, cercando di riferirsi, laddove fosse possibile, a dei dati misurati. Nel caso specifico, trattandosi di edifici esistenti, si è adottata una pratica di simulazione “calibrata”, in cui il modello di simulazione non si riferisce ad un edificio virtuale, bensì all'edificio reale in cui detta calibrazione è stata fatta, sulla base dei dati sperimentali rilevati. La problematica principale riscontrata durante i successivi e plurimi step di implementazione ed affinamento del modello, basati sulla fase di confronto e verifica tra le prestazioni energetiche simulate e quelle misurate, è riconducibile sicuramente alla modellazione del comportamento degli occupanti.^[11]

Nel successivo capitolo 4, è riportata la strategia di azione adottata per contrastare e limitare questa problematica. Diviene di prioritaria importanza, quindi necessario, definire all'interno della simulazione il reale comportamento dell'occupante, per quanto attiene al tipo di attività svolta all'interno dei locali, alla gestione dei set-point di temperatura ed alle modalità di conduzione degli ambienti (es. apertura e chiusura delle finestre).

In questo capitolo sarà descritta la metodologia utilizzata per costruire il modello del corpo di fabbrica principale dell'Azienda Ospedaliera “G. Brotzu”, oggetto delle simulazioni dinamiche realizzate durante il presente lavoro di ricerca. Nel primo e nel secondo paragrafo (3.1 e 3.2) è stato descritto il sito dove trova luogo il complesso ospedaliero e, quindi, il funzionamento del suo sistema edificio-impianti, con la definizione di tutti i parametri che costituiscono le condizioni al contorno. Nei successivi due paragrafi (3.3 e 3.4) sono state descritte tutte le operazioni preliminari necessarie per definire il modello termico e la procedura con cui tale modello è stato implementato sui codici di calcolo. Nell'ultimo paragrafo (3.5) sono stati riportati i risultati delle simulazioni.

^[11] M. Filippi – E. Fabrizio, “Introduzione alla simulazione termoenergetica dinamica degli edifici”, ed. Delfino – Guida AICARR, 2012

3.1 Caso studio: l'Azienda Ospedaliera "G. Brotzu" ^[23]

L'Ospedale San Michele di Cagliari è stato inaugurato nel 1982 ed è stato intitolato al Prof. Giuseppe Brotzu (1885 – 1976), insigne scienziato sardo (medico, farmacologo, politico), il cui nome è legato alla scoperta, nel 1948, del *Cephalosporium acremonium*, un fungo appartenente alla famiglia delle *Sporophorinaceae*, il quale è inibitore dello sviluppo dei batteri e costituisce la base degli antibiotici oggi largamente utilizzati. L'Ospedale G. Brotzu è stato pensato, sin dalla sua progettazione, con l'intento di costituire un



centro di alta specializzazione, il quale doveva offrire agli utenti un'assistenza all'avanguardia. Nel 1993 tale ambizione ha avuto un riconoscimento giuridico, infatti, l'Ospedale G. Brotzu è stato riconosciuto come "Ospedale di Alta Specializzazione e di Rilievo Nazionale" attraverso il D.P.C.M. 08/04/1993; nel 1996, inoltre, è stato costituito in Azienda Ospedaliera Autonoma, Azienda Ospedaliera "G. Brotzu" appunto (A.O.B. in acronimo), con decreto del Presidente della Giunta Regionale n°168 del 29/07/1996.

La struttura è dotata di attrezzature tecnologiche all'avanguardia, utilizza metodologie di analisi specialistiche e sofisticate, ed è in grado, inoltre, di espletare procedure diagnostiche innovative e terapie altamente efficaci, al fine di assicurare una assistenza completa in relazione alle diverse patologie. Al fine di essere sempre coerente con i principi fondatori che hanno ispirato la sua nascita: nel 1998, è stato attivato il Centro prelievi e trapianti d'organo; nel 2005, l'Ospedale si è dotato del Centro PET, unico in Sardegna, per la diagnostica tomografica, attrezzato con apparecchiature di elevata precisione; dal 2006, il Centro PET è stato implementato con ciclotrone. Tra le prestazioni offerte ai pazienti, è doveroso citare: Centro prelievi e trapianti d'organo; PET/Ciclotrone; Tomografia computerizzata (TAC); Unità di Tomografia e Risonanza Magnetica (RM); Angiografia Digitale; Gamma Camere; MOC; Mammografia; Cardioangiografia; Ecotomografia tridimensionale. Nell'Azienda Ospedaliera Brotzu sono ricoverati annualmente circa 30.000 pazienti e circa 150.000 usufruiscono ogni anno delle

^[23] Sito Istituzionale Azienda Ospedaliera Brotzu, www.aobrotzu.it

prestazioni ambulatoriali, al suo interno operano circa 1.900 dipendenti, tra personale medico, paramedico, tecnico, amministrativo e collaboratori a progetto. L'insieme dei suddetti servizi sanitari consentono di definire l'AOB la struttura ospedaliera più importante nel contesto regionale, ma anche tra le più rilevanti a livello nazionale, in quanto dotata complessivamente di 20 reparti medici, per un totale di oltre 600 posti letto.

Presenze/ die	
Dipendenti	n° 1'900
Degenti	n° 600
Visitatori	n° 1'000
Varie	n° 500
TOTALE	n° 4'000

Personale interno all'AOB	
Medico	n° 390
Paramedico	n° 1'000
Tecnico	n° 375
Amministrativo	n° 115
Altro	n° 20
TOTALE	n° 1'900

Nella struttura ospedaliera si sono succeduti diversi interventi volti alla sua riqualificazione, l'ultimo intervento rilevante, ai fini della ricerca, si è svolto tra il 1997-2010 ed è stato finalizzato al raggiungimento di differenti obiettivi, innanzitutto l'adeguamento dell'intera struttura secondo le norme di accreditamento vigenti (D.P.R. 14/01/1997); inoltre il raggiungimento di un alto livello di specializzazione, che sia costante nel tempo, mediante l'impiego di apparecchiature e tecnologie sanitarie d'avanguardia; infine consentire, mediante un processo che miri a migliorare la qualità, il comfort e i servizi, la umanizzazione della struttura.

I suddetti interventi riguardano aspetti differenti, tra i quali: l'aggiornamento degli impianti di climatizzazione (1998-1999); i nuovi ambulatori di cardiologia (2000-2002); gli ascensori (2000-2006); l'adeguamento dell'antincendio (2000-2006); le sale operatorie (2002-2006); la sostituzione degli infissi esterni (2003-2007); la costruzione di nuove vie d'emergenza e della Hall d'ingresso (2004-2008); la costruzione del Trauma Center (2005-2009); la Elisuperficie (2008-2010); etc.

Dall'anno 2000 è stato avviato un importante processo che ha visto la nascita dei Dipartimenti all'interno dell'organizzazione, consentendo di far convergere le competenze e le esperienze scientifiche, tecniche ed assistenziali, con il fine di fornire al paziente una risposta diagnostico-terapeutica maggiormente completa, mediante una organizzazione

ospedaliera che miri, sempre di più, a concentrare la sua attenzione sui bisogni dei cittadini-utenti. I Dipartimenti istituiti a seguito del suddetto processo sono:

- ♥ CHIRURGIA
- ♥ SERVIZI SPECIALI DI DIAGNOSI E CURA
- ♥ EMERGENZA
- ♥ DIAGNOSTICA PER IMMAGINI
- ♥ MEDICINA INTERNA
- ♥ PATOLOGIA CARDIO-TORACO-VASCOLARE
- ♥ PATOLOGIA RENALE

Questo processo di riorganizzazione interna è concepito come un agglomerato di Strutture (semplici e complesse), le quali si riconoscono un'interdipendenza, pur mantenendo al tempo stesso una propria autonomia, con lo scopo di raggiungere degli obiettivi comuni in termini di risultati e di utilizzo delle risorse. Queste diverse Strutture, afferenti a ciascun Dipartimento, adottano dei codici di comportamento clinico-assistenziali che sono stati concordati e condivisi d'intesa con la Direzione Sanitaria, tramite l'elaborazione di protocolli atti a conseguire complessivamente linearità ed uniformità di condotta nel corso di tutto il percorso d'assistenza.

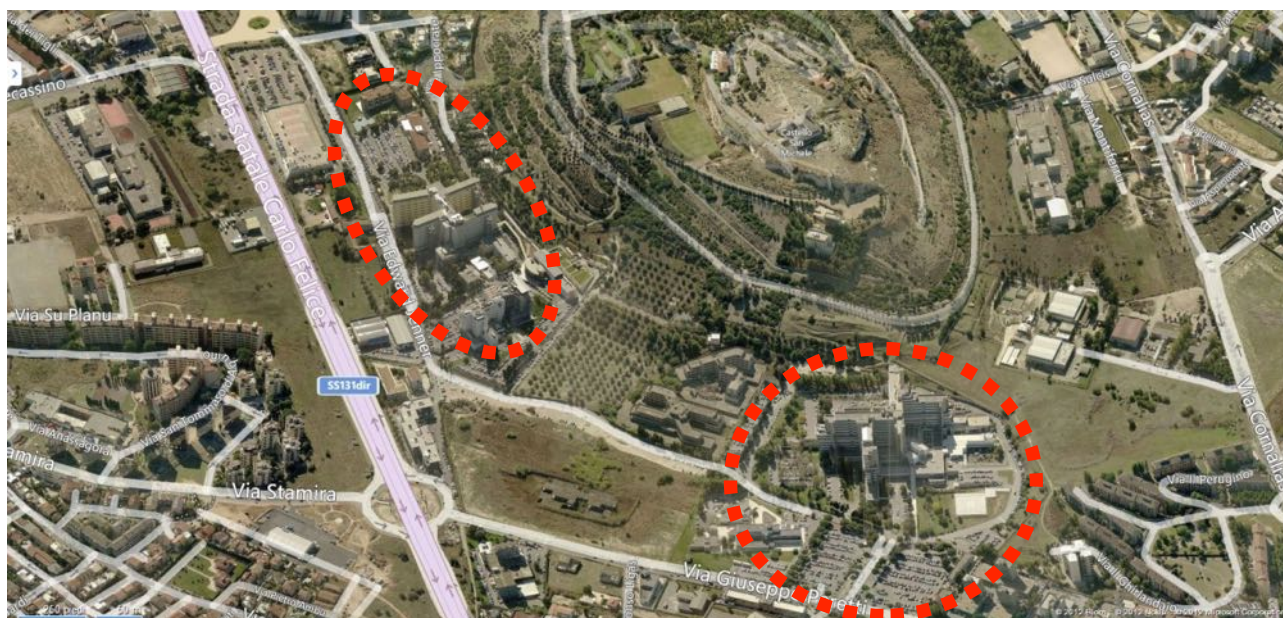


Figura 1 – Vista aerea del polo ospedaliero

L'Azienda Ospedaliera "G. Brotzu" è ubicata a sud del colle di San Michele, in un'area particolare della città, ben collegata e facilmente raggiungibile, con peculiari caratteristiche di quiete e serenità. Nelle immediate vicinanze, inoltre, trovano luogo altre strutture sanitarie, che definiscono, a tutti gli effetti, un interessante e circoscritto polo sanitario.



Figura 2 – Vista aerea (da Nord) del complesso ospedaliero “G. Brotzu”.



Figura 3 - Altra vista aerea (da Nord) del complesso ospedaliero “G. Brotzu”.

Immagini della struttura dell'Azienda Ospedaliera

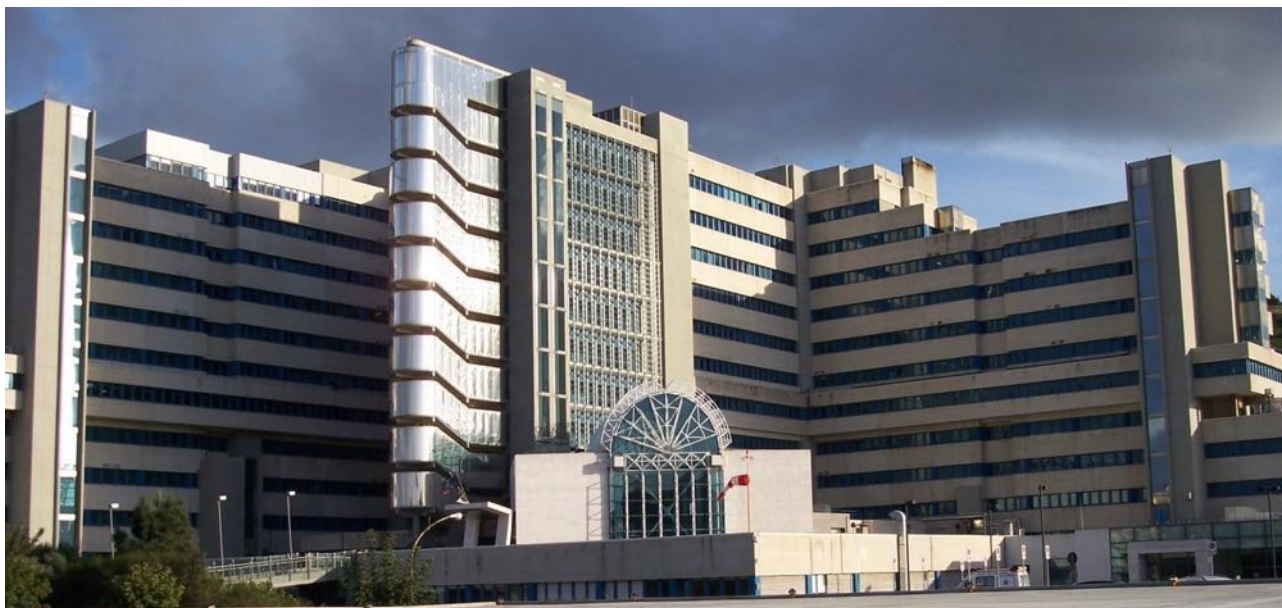


Figura 4 - Vista dall'ingresso Nord del complesso ospedaliero "G. Brotzu".

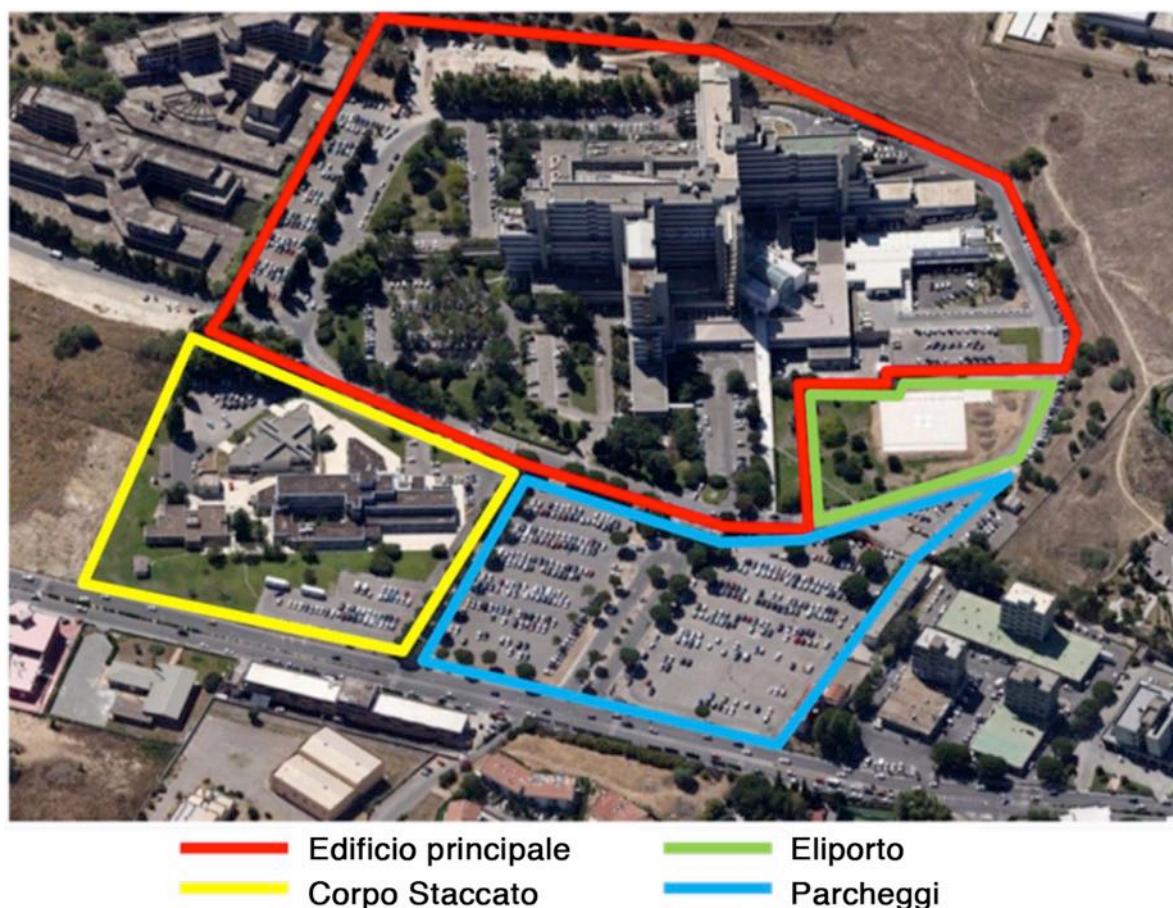


Figura 5 – Vista del prospetto Ovest del complesso ospedaliero "G. Brotzu".

3.1.1 Descrizione del complesso ospedaliero e degli edifici

L'AOB si sviluppa per un'area complessiva di circa 110'000 m², dove trovano luogo diverse aree destinate alla sosta dei veicoli, alcune aeree sistemate a verde, l'eliporto e due corpi di fabbrica. L'edificio principale, il più visibile per le maggiori dimensioni, chiamato il "Corpo centrale" dal personale dell'AOB, è costituito da una struttura in c.a. monoblocco mista, del tipo "*Piastra-Torre*". La torre è articolata su undici piani fuori terra, dove sono collocate tutte le degenze, mentre nel piano piastra, sviluppato orizzontalmente nei due piani inferiori (piano Terra e sotto-piano), sono ospitati i servizi generali e quelli di diagnosi e cura. E' presente, infine, un ulteriore livello, completamente interrato, che accoglie l'impiantistica principale ed il sistema di distribuzione orizzontale del fluido termovettore che viene erogato nelle varie colonne verticali (montanti) principali di adduzione ai piani.

Figura 6 - Vista aerea con perimetrazione delle aree dell'Azienda Ospedaliera



Le planimetrie dei vari livelli dell'Azienda Ospedaliera "G. Brotzu" sono riportate nell'*Appendice A* ^[15]. L'edificio risulta orientato quasi perfettamente sull'asse Nord-Sud.

[15] G. Cabras, "Aggiornamento delle planimetrie e delle caratteristiche geometriche e fisiche delle strutture dell'Azienda Ospedaliera G. Brotzu di Cagliari", Report interno DIMCM - Cagliari, 2011.

Osservando i diversi prospetti dell'edificio, in ciascuno dei bracci nei quali si divide l'edificio, è possibile notare la presenza dei caratteristici volumi dallo sviluppo verticale aggettanti dal corpo di fabbrica principale, i quali, realizzati in c.a. gettato in opera, hanno la funzione di contenere le scale e gli ascensori di collegamento a tutti i piani dell'Ospedale.

Tabella 1 – Dettaglio dei dati di tutti i piani, distinti per reparto specialistico, del Corpo centrale dell'AOB

livello	destinazione d'uso - reparti	posti letto	superficie [m ²]	volume [m ³]
Piano 11°	Oculistica - Chirurgia vascolare	26	2'600	9'100
Piano 10°	Urologia - Gastroenterologia	71	3'200	11'200
Piano 09°	Nefrologia e Dialisi	26	3'615	12'653
Piano 08°	Medicina 1 - Medicina 2	79	3'615	12'653
Piano 07°	Chirurgia generale - Centro ustionati - Neuroriabilitazione	56	3'615	12'653
Piano 06°	Neurologia - Stroke unit - Neurochirurgia	69	3'865	13'528
Piano 05°	Blocco Operatorio	0	4'675	16'363
Piano 04°	Cardiochirurgia - Cardiologia	82	3'845	13'458
Piano 03°	Ostetricia e Ginecologia - Sale parto	50	4'280	14'980
Piano 02°	Pediatria - Cardiologia pediatrica - Studi pervasivi dello sviluppo	44	4'630	16'205
Piano 01°	Uffici - Banca - Bar - Edicola - Cappella -Chirurgia d'urgenza - Ortopedia e Traumatologia	47	7'590	26'565
Piano Terra	Pronto soccorso - Terapia intensiva - Uffici - Terapia antalgica - Endoscopia digestiva - Fisiocinesiterapia - Immunoematologia - Radiologia - Medicina nucleare - Laboratori - Risonanza magnetica - Poliambulatorio - Rianimazione	22	16'480	57'680
Seminterrato	Mensa - Servizio farmacia - Magazzini - Sterilizzazione - Servizio mortuario - Impianti tecnici - Centrale operativa 118 - PET - Centro diabetici	0	16'460	57'610
TOTALE		572	78'470	274'645

Nei successivi paragrafi, dedicati alla descrizione delle caratteristiche termofisiche dell'edificio, sarà riportato anche uno stralcio esaustivo della struttura degli impianti tecnologici del complesso sistema edificio-impianti.

AOBrotzu (Copro centrale)	
Superficie coperta totale ca.	mq. 16.500
Superficie calpestabile complessiva ca.	mq. 78.500
Superficie media del piano-tipo ca.	mq. 3.600
altezza media di interpiano	m. 3,2
Volume complessivo totale	mc. 290.000
livelli fuori terra	12
livelli seminterrati	2
altezza edificio totale ca.	m. 40
posti letto totali ca.	600

Tabella 2 - Numeri riassuntivi significativi dell'AOB

3.1.2 Descrizione degli impianti tecnologici

In questo paragrafo viene illustrato un quadro logico del funzionamento degli impianti tecnologici installati nell'Ospedale, contenete lo schema di approvvigionamento, di produzione, di distribuzione, di erogazione dell'energia all'interno del sistema edificio-impianti, individuando le diverse tipologie impiantistiche presenti, così come da censimento realizzato nell'Energy Audit, redatto in occasione del già citato Progetto di Ricerca ^[1].

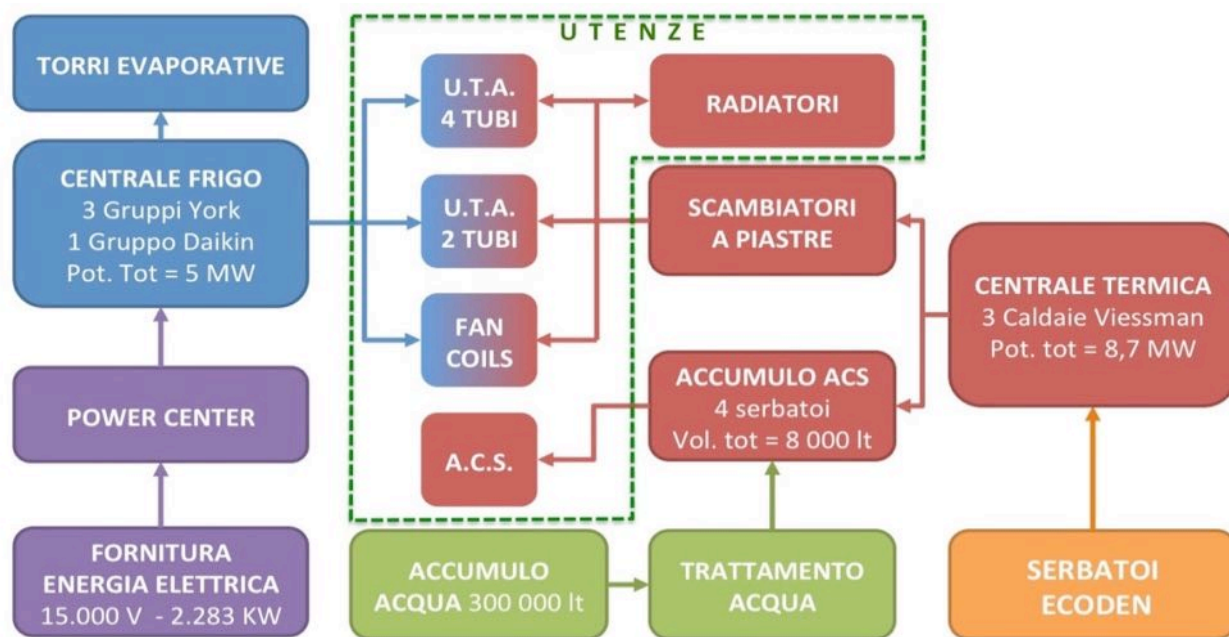


Figura 7 - Schema logico degli impianti tecnologici dell'AOB

Nella Figura 7 è riportato un diagramma a blocchi semplificato e descrittivo dell'assetto degli impianti tecnologici dell'AOB, localizzati nell'Ala Sud in una area circoscritta del piano seminterrato (Figura 8 e 9). L'ingresso e la gestione dell'energia elettrica avviene nel "Power Center", dove trovano luogo i trasformatori per la conversione dalla Media in Bassa tensione e tutti i quadri elettrici per lo smistamento dell'energia alle varie utenze. La produzione di energia termica per riscaldamento e produzione di ACS è realizzata da tre caldaie *Viessman* dalla potenza termica utile complessiva di 8,70 MW, alimentate con olio denso BTZ tipo "Ecoden" e localizzate nella "Centrale Termica". La produzione dell'energia termica per il raffrescamento è generata da quattro gruppi frigoriferi a compressione della potenza massima di picco di circa 5,00 MW, installati nella "Centrale Frigo".

^[1] N. Mandas, F. V. Caredda, O. Caboni, S. La Croce, "Proposta di un sistema competitivo e flessibile per la riduzione del fabbisogno e l'ottimizzazione della gestione energetica dell'Azienda Ospedaliera G. Brotzu", Relazione Scientifica Finale, Progetto finanziato con Legge Regionale n. 7/2007, Università di Cagliari, Dicembre 2012

Nel successivo paragrafo 3.2.2 sono descritte nel dettaglio le caratteristiche tecniche e di funzionamento delle varie centrali tecnologiche atte alla produzione dell'energia necessaria per il funzionamento del sistema edifico-impianti dell'AOB.



Figura 8 - Veduta aerea dell'area Sud-Ovest sede delle varie centrali tecnologiche

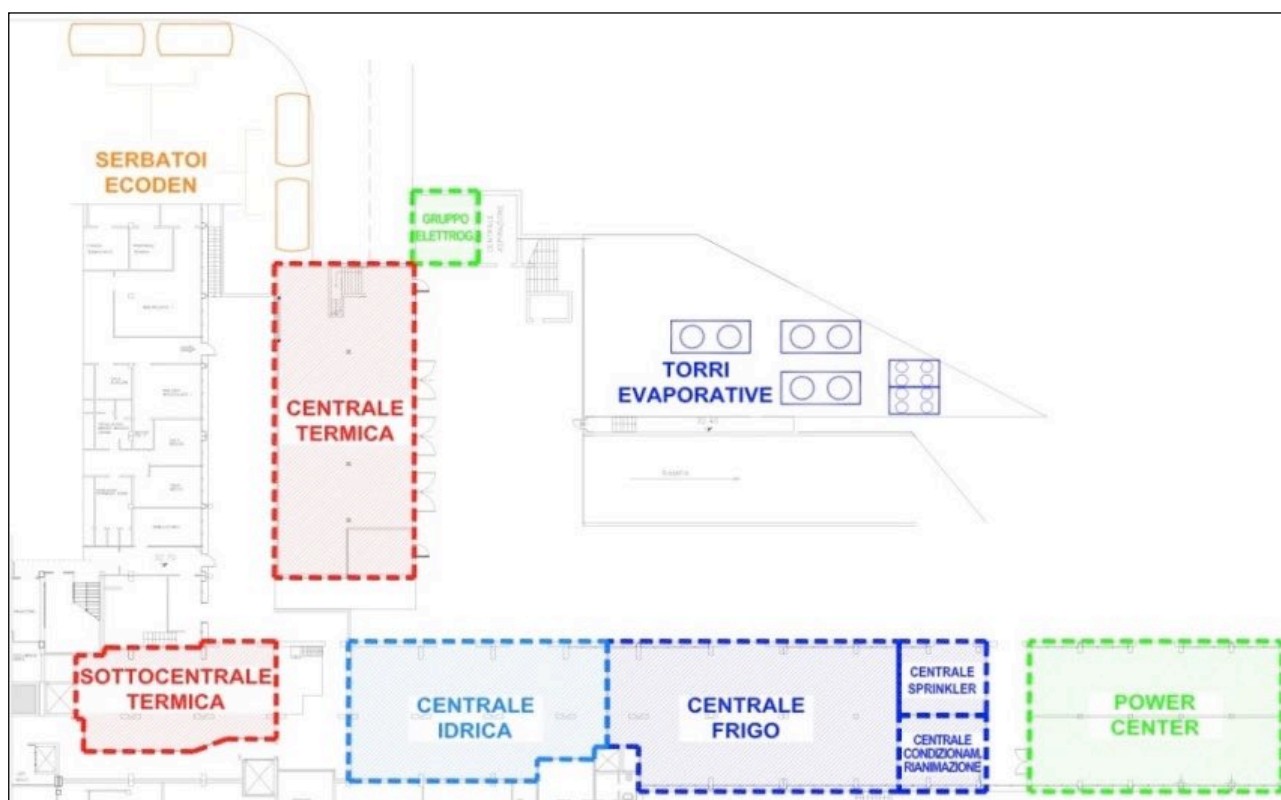


Figura 9 – Inquadramento delle centrali degli impianti tecnologici dell'AOB.

3.2 - Definizione dei dati input del sistema edificio-impianti (AOB)

Nei successivi paragrafi sono stati analizzati gli elementi costruttivi e le caratteristiche fisico-tecniche del sistema edificio impianti dell'AOB.

3.2.1 Caratteristiche termofisiche dell'involucro opaco e trasparente

Involucro opaco dell'edificio

Nell'edificio sono presenti numerose tipologie di involucro opaco e di superfici trasparenti, a causa degli interventi di manutenzione, rinnovo ed ampliamento che si sono succeduti negli anni. Nella tabella 3 a seguire sono state raccolte tutte le tipologie di involucro, distinte per spessore e valori di trasmittanza, alle quali è stato attribuito un codice di classificazione. In *Appendice B* sono stati riportati tutti i dettagli relativi alle stratigrafie ed alle proprietà termofisiche.

CODICE RIFERIMENTO	DENOMINAZIONE	SPESSORE [mm]	TRASMITTANZA [W/(m ² K)]
SO1	Solaio di copertura – terrazze	480	0.298
SO2.a	Solaio intermedio (caso a)	290	1.884
SO2.b	Solaio intermedio (caso b)	290	1.959
SO3	Tamponatura in pannello a sandwich	170	0.666
SO4	Partizioni interne	100	1.928
SO5	Pareti vani scala	210	3.460
SO6	Pannello di copertura Trauma Center	101	2.233
SO7	Tamponatura Trauma Center	430	0.346
SO8	Solaio di copertura Hall	304	0.262
SO9	Tamponatura Hall	442	0.134
SO10	Pannello verticale vano scala – torre ascensori	60	0.559
SO11	Pannello orizzontale vano scala – torre ascensori	51	0.577

Tabella 3 - Caratteristiche delle tipologie di superficie opaca presenti nell'AOB

Nell'immagine a lato si vede il particolare di una delle estremità della facciata dell'Ospedale, nella quale si vedono in scorcio i piani dal 3° all'11° e dove si può notare il citato guscio in c.a., che, continuo per tutta l'altezza dell'edificio, costituisce l'involucro dei vani scala e, talvolta, dei vani ascensore. Questi ambienti sono gli elementi di collegamento verticale tra i piani.



Figura 10 - Dettaglio del guscio in c.a. dei vani scala.

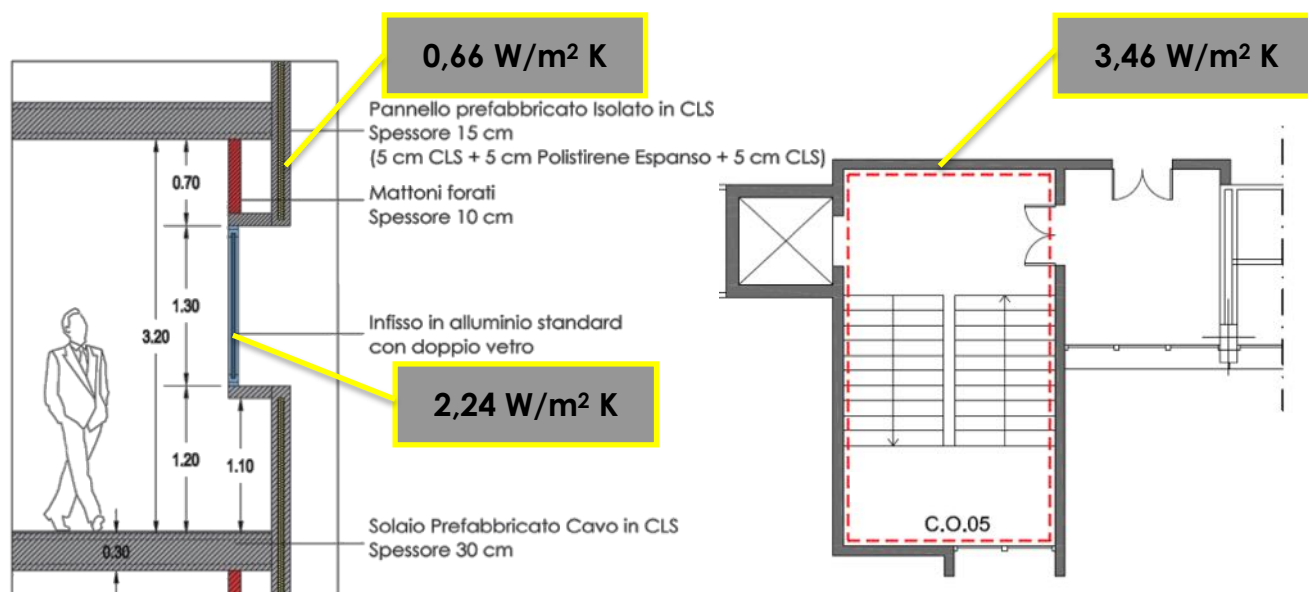


Figura 11 - Sezione del Piano-tipo con indicazione delle caratteristiche delle superfici opache di involucro

Nelle immagini sottostanti si riportano delle sezioni del modello tridimensionale utilizzato per lo studio dell'edificio, che riproduce una restituzione foto-realistica (*rendering*) della "Torre" dell'edificio del Corpo centrale. Nel dettaglio (a destra della Figura 12) è stata evidenziata la sezione trasversale di uno dei vani scala in c.a. e della parte annessa di piano-reparto.

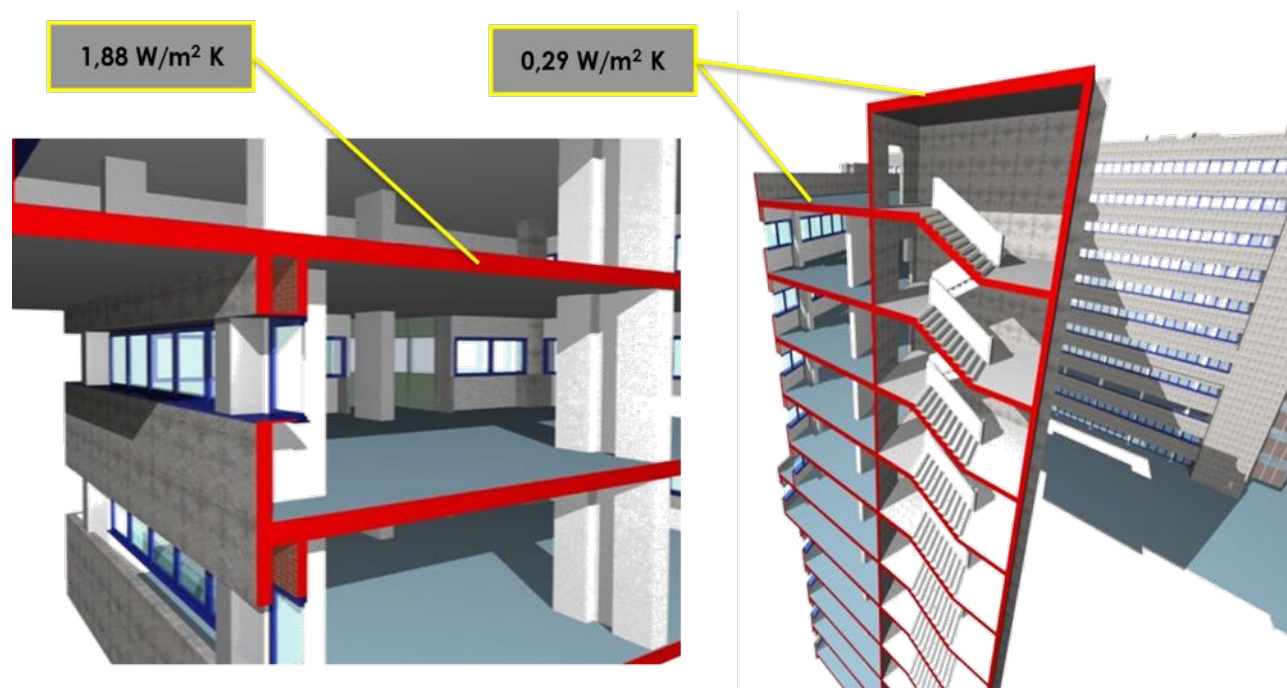


Figura 12 - Sezione nel modello 3D del Piano-tipo e Sezione longitudinale del vano scala.

Involucro trasparente dell'edificio

Per gli analoghi motivi sopra descritti, sono presenti diverse tipologie di infissi installati presso l'AOb, che sono state riportate in elenco nella tabella 4. In tabella sono stati riportati anche i valori significativi di trasmittanza ed il codice di classificazione per mezzo del quale, consultando l'*Appendice B*, è possibile vedere i dettagli relativi alle proprietà termofisiche.

CODICE RIFERIMENTO	DENOMINAZIONE	TRASMITTANZA		
		TELAIO	VETRO	TOTALE
		[W/(m ² K)]	[W/(m ² K)]	[W/(m ² K)]
ST1	Finestre a nastro (corpo principale)	3.00	1.80	1.98
ST2	Facciata terminale corridoi	2.50 - 5.90	1.60	1.99
ST3	Vetrata verticale vani scala	3.35	1.60	2.48
ST4	Vetrata vano scala principale	3.35	1.80	2.58
ST5	Facciata Trauma Center	2.50 – 5.90	1.80	2.10
ST6	Infissi Trauma Center	3.35	1.80	2.00
ST7	Facciata - cupola Hall	2.50 – 5.90	1.80	1.92
ST8	Vetrata ascensori (torre)	-	4.10	4.10
ST9	Infissi torre ascensori	3.40	1.80	2.00

Tabella 4 - Caratteristiche delle tipologie di superficie trasparente presenti nell'AOb



Figura 13 - Finestra "a nastro" in Facciata.



3.2.2 Caratteristiche tecniche degli impianti tecnologici installati

In sede di redazione della Diagnosi Energetica sviluppata in occasione del già citato Progetto di Ricerca [1], con la gentile disponibilità ed il preziosissimo ausilio del personale dell'Ufficio Tecnico dell'AOB coinvolto, è stato realizzato un censimento degli impianti tecnologici in esercizio presso l'Azienda Ospedaliera.

Come già riportato nel paragrafo 3.1.2, sono presenti, in un'area circoscritta, le centrali tecnologiche di tutti gli impianti a servizio dell'Ospedale, le quali si richiamano di seguito in elenco:

- Power Center
- Centrale Idrica
- Centrale Termica
- Centrale Frigorifera

L'interesse specifico di questo lavoro di ricerca ha riguardato la modellazione e la simulazione dinamica del sistema edificio-impianti, per cui si è affrontata nel dettaglio la trattazione degli impianti tecnologici pertinenti al tema trattato. Nello specifico l'attenzione si è focalizzata sulla Centrale Termica e sulla Centrale Frigorifera, trascurando, quindi, le altre centrali tecnologiche.

Nell'*Appendice C* ^[16] della presente tesi, per completezza di informazione, sono stati comunque riportati tutti i dettagli relativi alle caratteristiche tecniche specifiche per ogni impianto censito, distinti per tipologia e modello, e sono stati riportati, inoltre, i riferimenti di asservimento per ciascuno dei livelli dell'AOB.

Nel dettaglio, si è operata una classificazione strumentale degli impianti tecnologici studiati, Centrale termica e Centrale Frigorifera, conseguentemente sono stati individuati tre gruppi, riportati nel seguente elenco:

- Centrali tecnologiche
- Impianti di Distribuzione
- Impianti di Erogazione

^[16] G. Gandolfo, "Aggiornamento delle caratteristiche tecniche e dimensionali relative agli impianti tecnici della struttura ospedaliera AOB di Cagliari", Report interno DIMCM - Cagliari, 2011

Centrali tecnologiche → Centrale Termica

Nella Centrale Termica viene generata l'energia necessaria a coprire la domanda relativa al fabbisogno termico della stagione invernale, alla fase di post-riscaldamento delle UTA durante la stagione estiva e alla produzione dell'acqua calda sanitaria

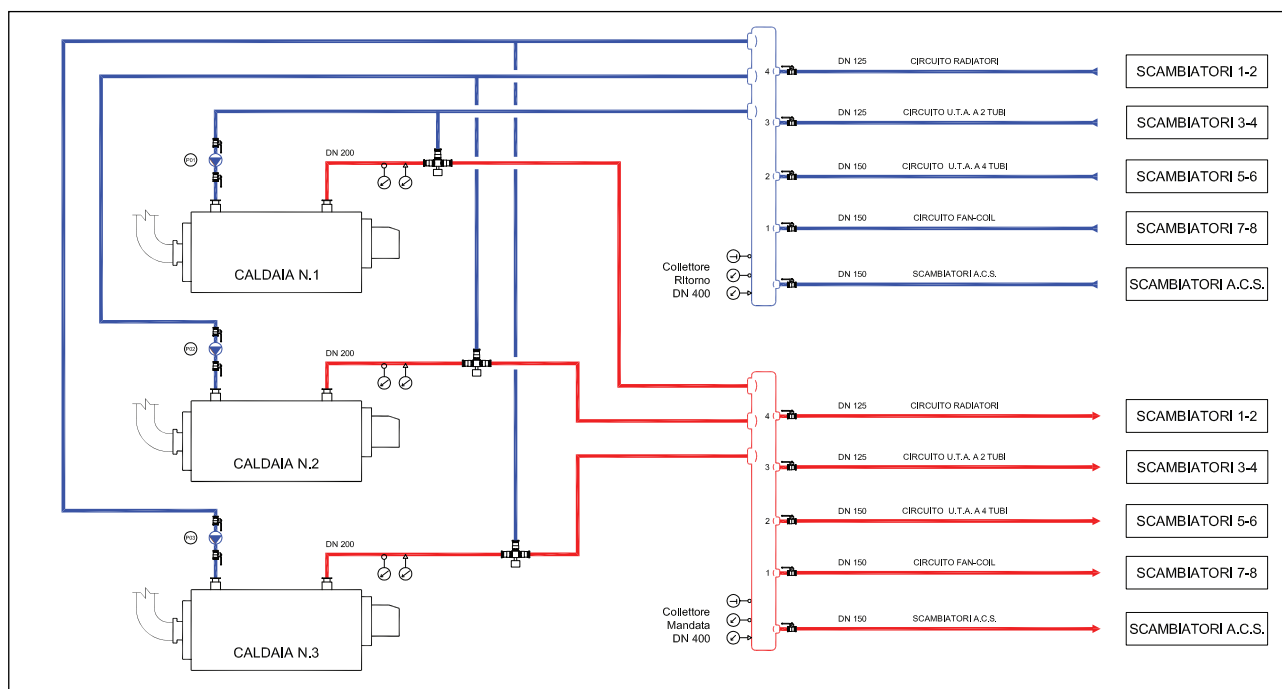


Figura 14 - Schema semplificato della Centrale termica

Nella figura 14 è riportato uno schema semplificato che mostra il funzionamento della Centrale. Il fluido termovettore prodotto da tre caldaie (di cui una di riserva) a una temperatura di circa 80-85°C, è inviato tramite tre pompe (Tipo WILO mod. IPN 200/250) al collettore di mandata, da cui dipartono diverse diramazioni verso una sotto-centrale termica, in cui sono localizzati gli scambiatori di calore ed i serbatoi di accumulo per la produzione di acqua calda sanitaria. Dalla detta sotto-centrale arriva il fluido termovettore freddo (temperatura di circa 70-75°C), che viene convogliato nel collettore di ritorno, e quindi nuovamente alle caldaie, chiudendo così il circuito idraulico. Non avendo riscontrato un corretto funzionamento del sistema di regolazione delle tre valvole a tre vie presenti nel circuito appena descritto, *de facto* le caldaie lavorano sempre in modalità ON-OFF, con l'accensione controllata per mezzo dei valori di temperatura rilevati nel collettore di mandata.

Le tre citate caldaie sono della *Viessman*, modello *Turbomat Duplex RN* (tabella 5 – figura 15), predisposte per il funzionamento ad olio denso BTZ “Ecoden”. Il combustibile viene stoccato in quattro serbatoi dalla capacità di 25’000 litri interrati, realizzati in lamiera e dotati di tutti i dispositivi di sicurezza e protezione previsti dalla normativa vigente.

CALDAIE VISSMAN TURBOMAT DUPLEX RN	
Potenza utile	2’900 kW
Potenza al focolare	3’135 kW
Pressione max d'esercizio	6 bar
Temp. max d'esercizio	120 °C
Rendimento termico utile al (100%)	92.5 %
Rendimento termico utile al (30%)	95.5 %
Temp. fumi a pieno carico	170 °C
Perdite di carico lato fumi	8.5 mbar

Tabella 5 - Dati di targa delle caldaie Viessman



Figura 15 - Scorcio delle tre caldaie Viessman site nella Centrale termica

Centrali tecnologiche → Sotto-Centrale termica

In questo locale il fluido termovettore proveniente dalla Centrale Termica viene inviato ad otto scambiatori di calore a piastre, due per ogni tipologia di utenza di riscaldamento (radiatori, UTA a 2 e 4 tubi, fan-coil), ed a quattro serbatoi ad accumulo per la produzione dell’acqua calda sanitaria, come rappresentato nello schema in figura 14 e16.

In questo paragrafo sono illustrate le caratteristiche delle principali linee di distribuzione del fluido termovettore in uscita dalla sotto-centrale.

Circuito Radiatori – Il fluido termovettore in arrivo dalla centrale termica è inviato ai due scambiatori di calore a piastre n.1 e n.2 (tipo Alfa Laval). L’acqua calda in uscita dagli scambiatori arriva tramite due pompe di circolazione (tipo WILO mod. IPN 50/250), a tutti i reparti dell’Ospedale.

UTA a 2 tubi – Il fluido termovettore arriva dalla centrale termica e viene mandato ad altri due scambiatori di calore a piastre (n.3 e n.4). L’acqua calda è inviata nella rete di distribuzione dell’Ospedale mediante una pompa (tipo WILO mod. IPN 100/250), che alimenta la nuova mensa situata al Piano Seminterrato, diversi reparti al primo piano e l’ex centro ustionati del Piano 7°.

UTA a 4 tubi – Il fluido termovettore in arrivo dalla centrale termica è inviato ad altri due scambiatori di calore a piastre (n.5 e n.6). L'acqua in uscita dagli scambiatori è immessa nella rete di distribuzione dell'Ospedale mediante una pompa (tipo WILO mod. IPN 125/315) ed indirizzata verso tutti i piani ad esclusione dei Piani 6°, 8° e 10°.

FAN COIL – Il fluido termovettore in arrivo dalla centrale termica è inviato ad altri due scambiatori di calore a piastre (n.7 e n.8). L'acqua calda in uscita dagli scambiatori, per mezzo di 2 pompe di circolazione (tipo WILO mod. IPN 150/335), arriva a tutti i piani dell'Ospedale.

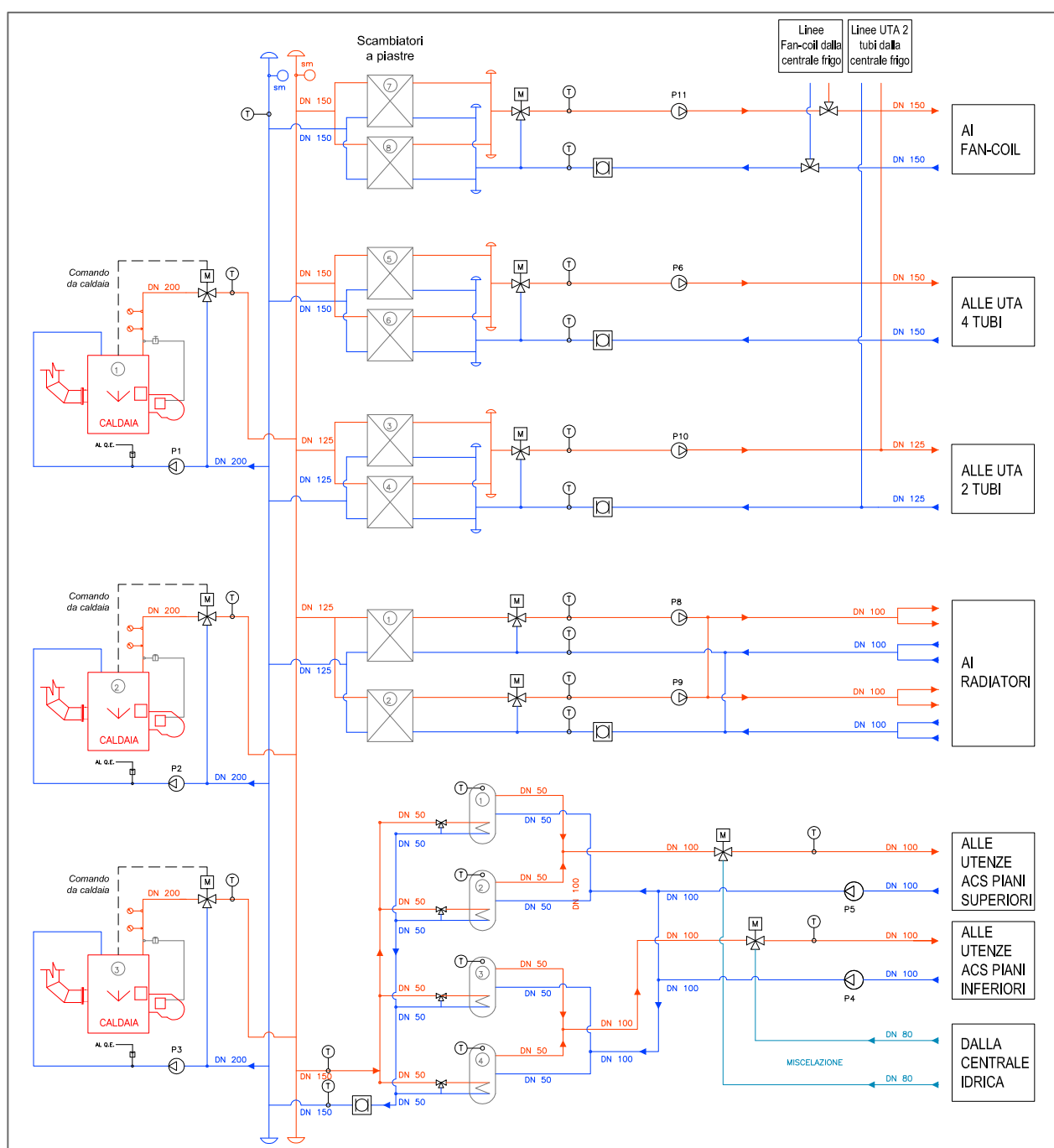


Figura 16 - Schema semplificato della distribuzione della Centrale Termica

Centrali tecnologiche → Centrale Frigorifera

Nella Centrale Frigorifera sono installati due gruppi frigoriferi York con compressore a vite (1'144 kW_f cad.), un gruppo frigorifero York con compressore centrifugo (1'400 kW_f) e un gruppo centrifugo della Daikin, di recentissima acquisizione, avente una potenza frigorifera pari a 1'500 kW (tabella 6). Il fluido termovettore a bassa temperatura in uscita dai gruppi frigo è inviato a un collettore, posizionato nelle immediate vicinanze, dal quale si diramano le mandate verso i vari terminali di utilizzazione.

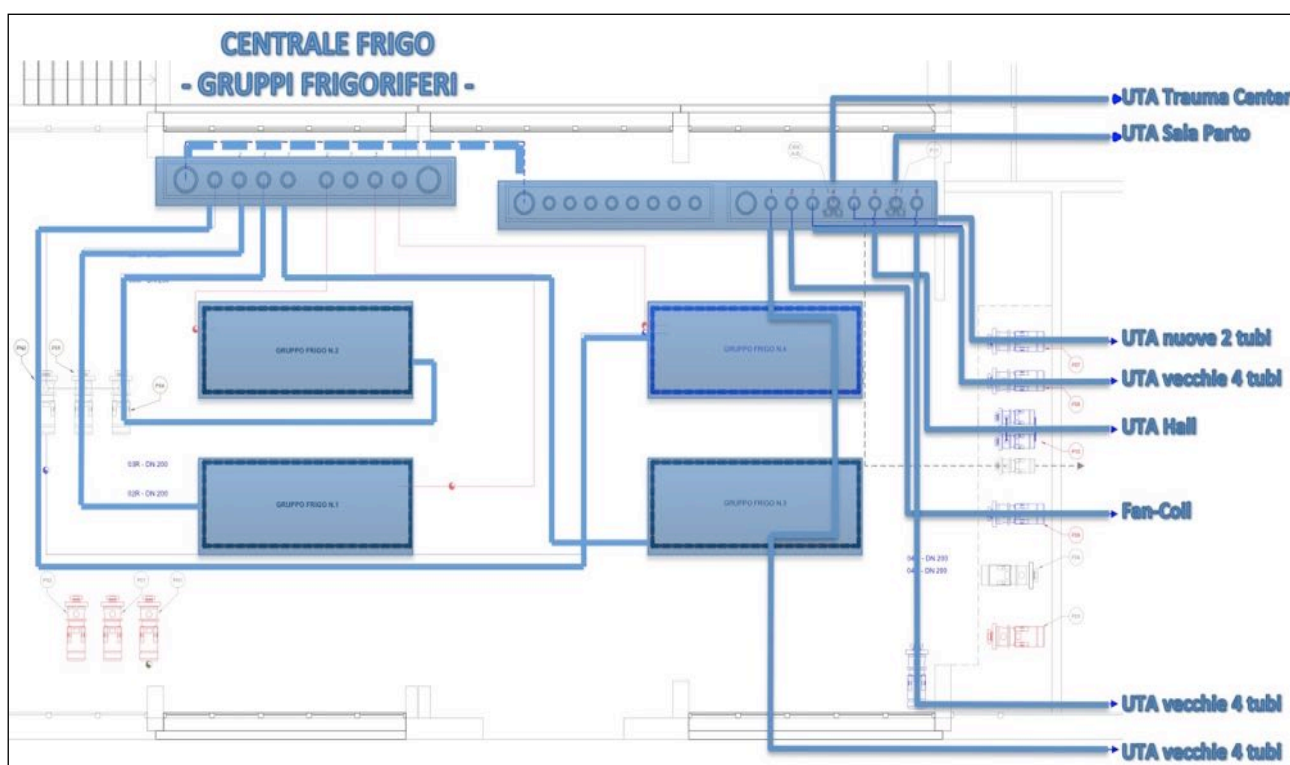
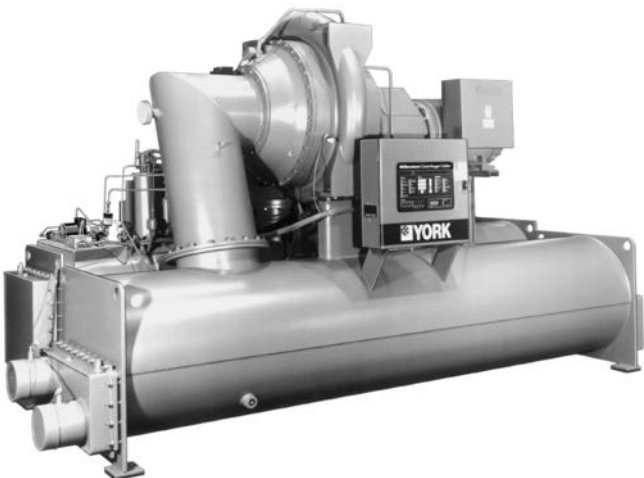
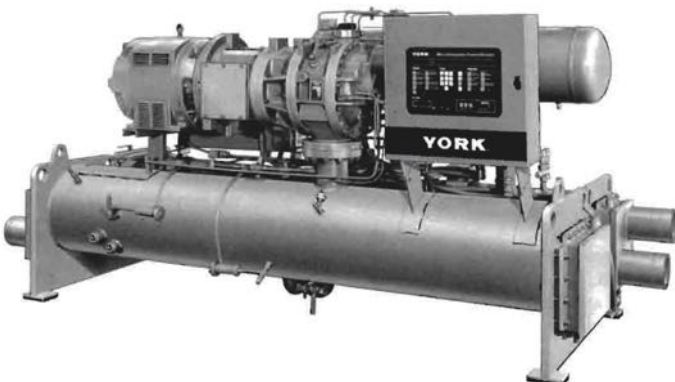
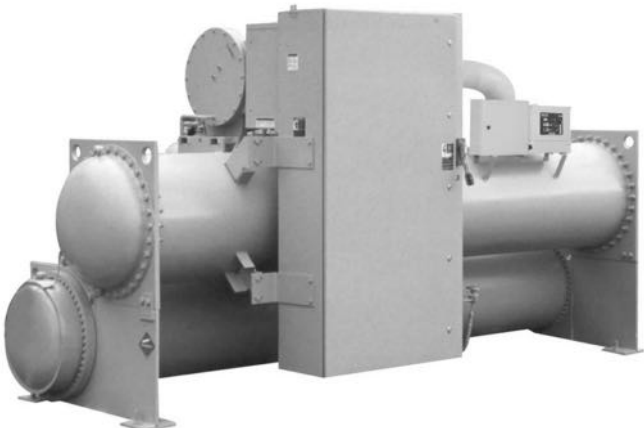


Figura 17 - Schema planimetrico semplificato della Centrale Frigorifera dell'A.O.B.

Le tubazioni di mandata e di ritorno dei quattro gruppi frigo sono convogliate in un collettore e connesse ai collettori di mandata e ritorno dalle utenze, in modo da costituire un separatore idraulico (figura 18). Questo separatore idraulico consente all'impianto di lavorare costantemente senza differenze di pressione tra i collettori di mandata e di ritorno, sia del circuito primario che del secondario, in modo da evitare, in condizioni ottimali e con pompe e collettori adeguatamente dimensionati, fenomeni di interferenza tra le pompe. Quando le portate del circuito primario e di quello secondario sono perfettamente bilanciate, la temperatura di mandata dal generatore è prossima a quella in ingresso all'impianto secondario e così, in tali condizioni, l'impianto lavora con la migliore efficienza possibile e con il minimo dispendio di energia.

Tabella 6 - Dati di targa dei gruppi frigoriferi installati presso l'AOB

GRUPPO FRIGO N. 1		
	Anno installazione	1994
	Marca	YORK
	Modello	YT C3 C3 C3 5 CL F
	Tipologia compressore	Centrifugo
	Alimentazione	Trifase
	Tensione [V]	400
	Potenza Frigorifera [kW]	1'400
	C.O.P.	4.53
	Potenza Assorbita [kW]	309
	Corrente-Avviam.(LRA) [A]	3'050
	Corren.Carico.Nom.(RLA) [A]	494
GRUPPI FRIGO NN. 2 e 3		
	Anno installazione	1997
	Marca	YORK
	Modello	YS DBCAS35CHB
	Tipologia compressore	A vite
	Alimentazione	Trifase
	Tensione [V]	400
	Potenza Frigorifera [kW]	1'144
	C.O.P.	5.50
	Potenza Assorbita [kW]	204
	Corrente-Avviam.(LRA) [A]	1'010
	Corren.Carico.Nom.(RLA) [A]	361
GRUPPO FRIGO N. 4		
	Anno installazione	2010
	Marca	Mc QUAY-DAIKIN
	Modello	DWSC087L003
	Tipologia compressore	Centrifugo
	Alimentazione	Trifase
	Tensione [V]	400
	Potenza Frigorifera [kW]	1'500
	C.O.P.	6.08
	Potenza Assorbita [kW]	247
	Corrente-Avviam.(LRA) [A]	3'500
	Corren.Carico.Nom.(RLA) [A]	419

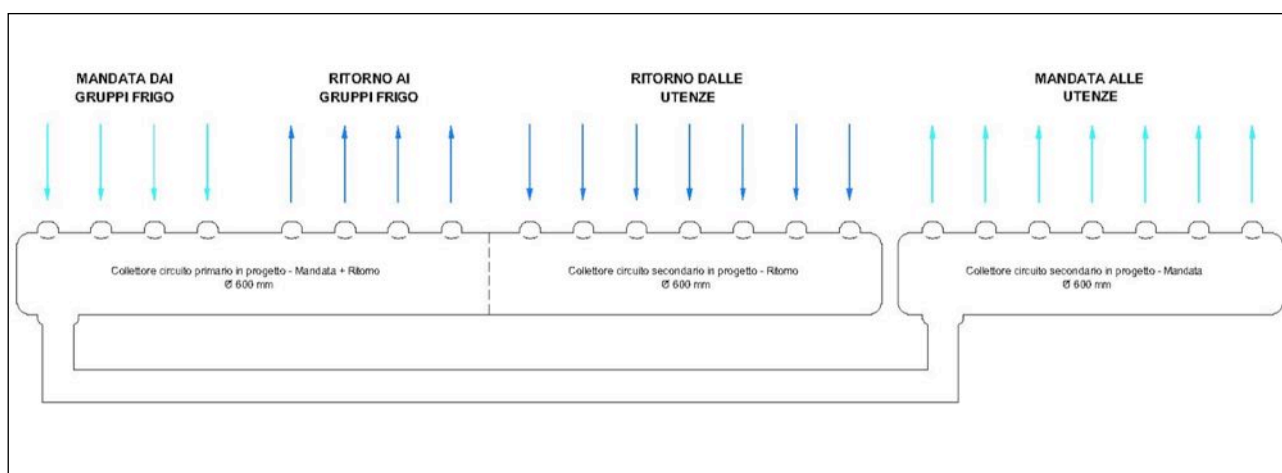


Figura 18 - Schema del separatore idraulico del circuito primario e secondario, installato in Centrale Frigo

Il separatore idraulico, in questo caso, dovrebbe essere in grado di far lavorare ogni pompa solo ed esclusivamente per il suo circuito di appartenenza, consentendo così di evitare azioni di reciproco disturbo tra le pompe operanti su circuiti diversi.

I condensatori dei gruppi frigo sono del tipo a raffreddamento evaporativo, ottenuto mediante la circolazione forzata dell'aria (due ventilatori assiali montati su scambiatori a lamine). Ogni gruppo frigo è collegato ad una singola torre di raffreddamento. Si ha, quindi, un totale di quattro torri, collocate nell'area antistante la Centrale Termica (figura 19).

Le specifiche tecniche delle torri installate sono riportate in seguito nella Tabella 7.



Figura 19 - Vista aerea delle torri evaporative nell'area delle centrali tecnologiche dell'A.O.B.

Tabella 7 - Dati di targa delle torri di raffreddamento dell'AOB

TORRE DI RAFFREDDAMENTO GRUPPO FRIGO N. 1		
	Anno installazione	1994
	Marca	DECISA
	Modello	TMA 240 CT
	Alimentazione	Trifase
	Tensione [V]	400
	Numero motori	2
	Potenza elettrica motori [kW]	11
	Potenza termica [kW]	2'400
	Portata aria [m ³ /s]	43 – 48
	Dimensioni [mm]	6150 x 1870 x 3715
TORRI DI RAFFREDDAMENTO GRUPPI FRIGO NN. 2 e 3		
	Anno installazione	1997
	Marca	DECISA
	Modello	TMA 270 CT
	Alimentazione	Trifase
	Tensione [V]	400
	Numero motori	2
	Potenza elettrica motori [kW]	11
	Potenza termica [kW]	2'700
	Portata aria [m ³ /s]	53 – 55
	Dimensioni [mm]	7350 x 2170 x 3715
TORRE DI RAFFREDDAMENTO GRUPPO FRIGO N. 4		
	Anno installazione	2010
	Marca	MITA
	Modello	N.D.
	Alimentazione	Trifase
	Tensione [V]	400
	Numero motori	2
	Potenza elettrica motori [kW]	11
	Potenza termica [kW]	2'700
	Portata aria [m ³ /s]	53 – 55
	Dimensioni [mm]	N.D.

Impianti di distribuzione dell'energia termica

Le centrali tecnologiche risultano ubicate tutte al piano seminterrato dell'edificio, per cui, il fluido termovettore, parte da questa posizione per arrivare a tutti i reparti e, quindi, a tutti i piani dell'Ospedale. La rete di distribuzione del fluido termovettore installata presso l'AOB è in generale del tipo verticale.

Nella fase di riscaldamento dell'AOB, le tubazioni della distribuzione lasciano la sotto-centrale termica e percorrono in orizzontale il locale adibito a vuoto tecnico, situato al di sotto del piano seminterrato, giungendo a ricollegarsi con le colonne di distribuzione verticali, le quali hanno un percorso misto, interno ed esterno all'edificio.

Nella fase di raffrescamento dell'AOB, il fluido vettore freddo proviene dal collettore di mandata della centrale frigo ed è inviato per mezzo di otto diverse linee di adduzione alle utenze: 3 linee alimentano le UTA a 2 tubi della Hall di ingresso, del reparto di Ginecologia e del Trauma Center; 1 linea è dedicata alle altre UTA a 2 tubi; 1 linea serve i Fan-Coil; 3 linee sono a disposizione per le UTA a 4 tubi. Le sole UTA a 4 tubi utilizzano delle colonne di distribuzione verticale dedicate, mentre le altre colonne di distribuzione (UTA a 2 tubi e Fan-Coil) condividono le medesime linee utilizzate dal fluido vettore caldo, agendo su valvole a tre vie con un'azione di commutazione (*switch* caldo/freddo).

Circuito Radiatori

La rete di distribuzione del fluido termovettore dedicata ai radiatori fornisce energia termica dal Piano 1° fino al Piano 11°, per mezzo di sei colonne verticali, collocate in appositi cavedi, realizzati all'interno dell'edificio. Le colonne verticali sono collocate in maniera da coprire in modo uniforme tutta la superficie dei piani: le colonne A, B ed F servono i reparti dell'Ala Nord, mentre le colonne D, E ed H quelli dell'Ala Sud (figura 20).

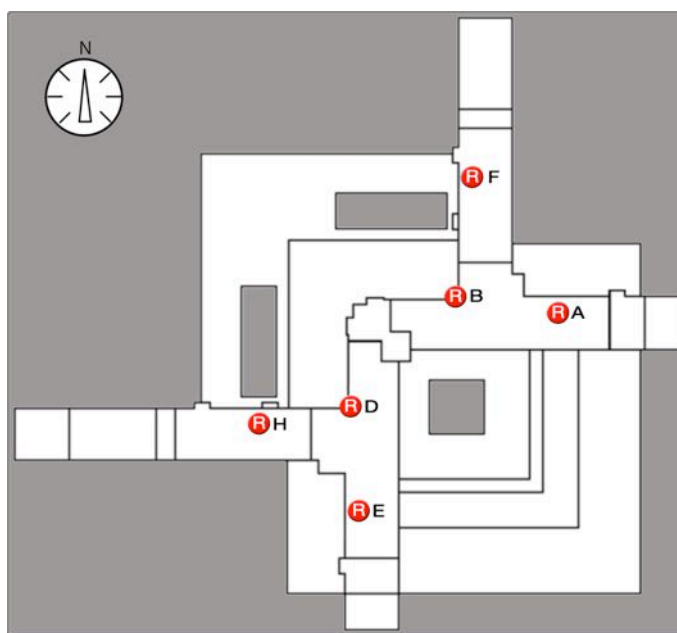


Figura 20 - Ubicazione delle colonne verticali di distribuzione del circuito Radiatori

Circuito UTA a 2 tubi

La distribuzione del fluido termovettore alle UTA a 2 tubi (ed ai sistemi di recupero di calore laddove presenti) avviene attraverso tre colonne verticali che arrivano dal Piano Seminterrato al Piano 11°: le colonne A e D, ubicate in prossimità dei vani scala a servizio dei visitatori e la colonna E, che attraversa l'intero corpo di fabbrica all'interno di un cavedio realizzato presso un vano scala dell'Ala Sud (figura 21).

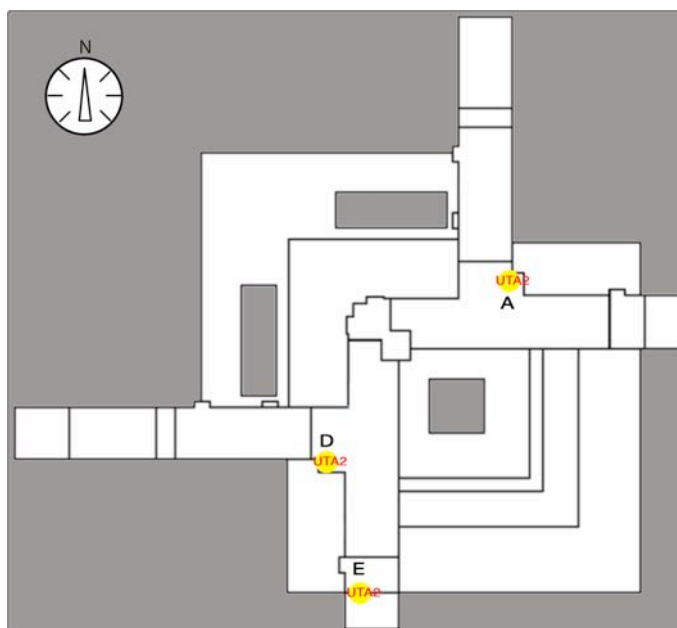


Figura 21 - Ubicazione delle colonne verticali di distribuzione del circuito UTA a 2 tubi

Circuito UTA a 4 tubi

La distribuzione del fluido termovettore alle UTA a 4 tubi avviene attraverso quattro colonne verticali che arrivano a tutti i reparti classificati critici: le colonne n.1 e n.2 sono situate nell'Ala Nord, mentre le colonne n.3 e n.4 sono situate nell'Ala Sud (figura 22).

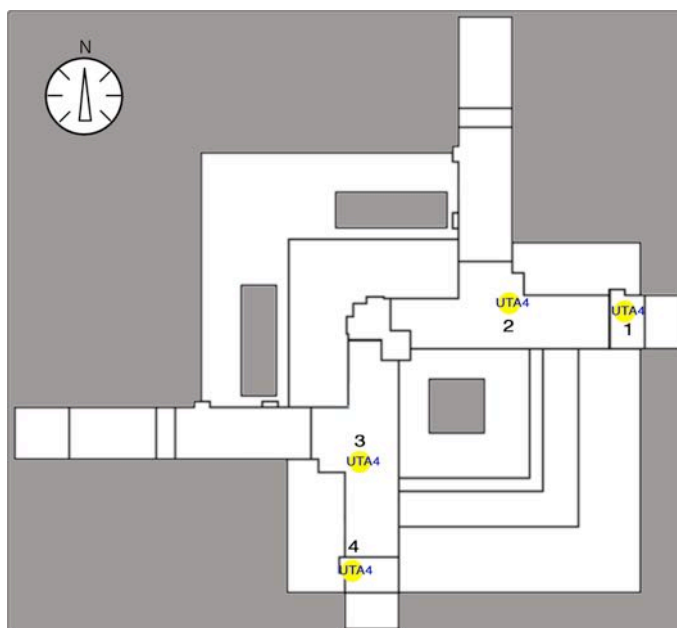


Figura 22 - Ubicazione delle colonne verticali di distribuzione del circuito UTA a 4 tubi

Circuito Fan-Coil

La distribuzione del fluido termovettore ai Fan-Coil avviene attraverso quattro colonne verticali che arrivano a tutti i piani del corpo centrale dell'AOB: le colonne A e B sono situate nell'Ala Nord e servono i reparti ivi ubicati, mentre le colonne C e D sono situate nell'Ala Sud e servono i reparti restanti (figura 23).

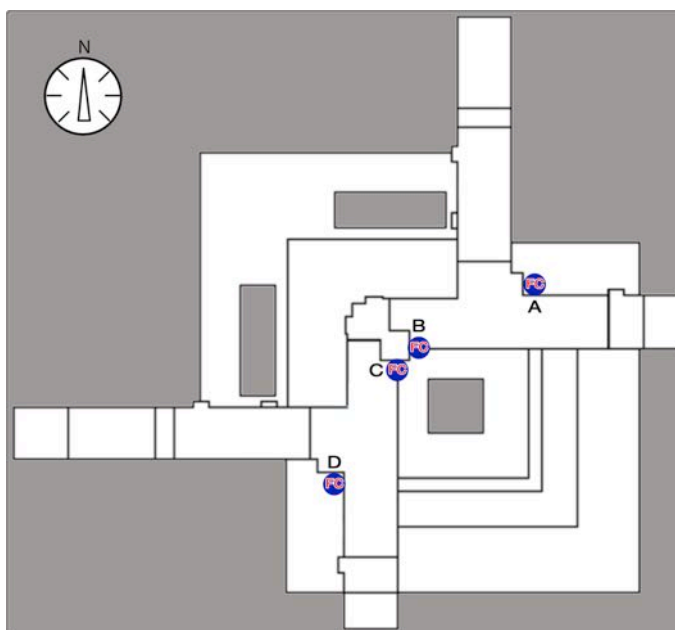


Figura 23 - Ubicazione delle colonne verticali di distribuzione del circuito Fan-Coil

Impianti di erogazione dell'energia termica

All'interno dell'edificio del corpo centrale dell'AOB sono state rilevate le tipologie di terminali d'erogazione di energia termica sotto elencati [16]:

- ✓ Radiatori
- ✓ Unità di Trattamento Aria a 2 tubi
- ✓ Unità di Trattamento Aria a 4 tubi
- ✓ Recuperatori di calore
- ✓ Fan-Coil

La scelta delle tipologie di terminale di erogazione dipende dalla classificazione del reparto, in base alla criticità delle attività sanitarie svolte: nei reparti classificati "critici" (vedi tabella 8), sono installati ed in esercizio solamente impianti di climatizzazione a tutt'aria (UTA a 4 tubi). All'interno degli altri reparti è stato rilevato l'impiego di impianti di condizionamento misti aria-acqua. Il trattamento dell'aria primaria di rinnovo è fatto da una UTA (a 2 o 4 tubi) o da sistemi a recupero di calore, mentre la regolazione delle condizioni termigrometriche interne avviene tramite fan-coil, radiatori o pompe di calore di piccola potenza.

La differente configurazione impiantistica riscontrata nei diversi reparti è originata dalle particolari esigenze di controllo delle condizioni termo-igrometriche interne e della qualità dell'aria (temperatura, umidità relativa, rinnovo dell'aria). In sede di analisi degli impianti, si è verificato quanto previsto dalla normativa vigente ^[25], la quale dà indicazioni prescrittive in merito all'utilizzo di appositi sistemi di filtraggio dell'aria.

PIANO	REPARTI CRITICI
IX	NEFROLOGIA –TRAPIANTATI – DIALISI
VII	EX-CENTRO USTIONATI – CHIRURGIA GENERALE – INTENSIVA
VI	BLOCCO OPERATORIO NEUROCHIRURGIA
V	BLOCCO OPERATORIO CHIRURGIA TORACO-VASCOLARE, TRAPIANTI, CARDIO-CHIRURGIA, UROLOGIA, EMODINAMICA-PACEMAKER
IV	TERAPIA INTENSIVA CARDIOLOGIA e CARDIO-CHIRURGIA
III	SALE PARTO – NEONATOLOGIA
I	BLOCCO OPERATORIO CHIRURGIA D'URGENZA
Piastra	RIANIMAZIONE
Seminterrato	SALA SETTORIA, CAMERE MORTUARIE, CENTRO DIABETOLOGICO, AMBULATORIO CARDIOLOGIA, MEDICINA LAVORO – LABORATORIO MICROBIOLOGIA

Tabella 8 - Elenco dei reparti classificati critici dell'AOB

I *Radiatori* e i *Fan-Coil* sono generalmente installati in tutti i livelli della struttura: negli uffici, negli studi medici, nelle degenze e nei servizi. Questi sistemi di erogazione permettono la regolazione della sola temperatura dell'aria interna agli ambienti, senza aver la possibilità di agire sulla quantità di umidità relativa e sul rinnovo dell'aria. Una prima regolazione di questi dispositivi avviene direttamente in sotto-centrale termica, come descritto nei paragrafi precedenti, tramite il controllo della temperatura di mandata ai terminali. Una seconda regolazione può essere effettuata, all'interno degli ambienti, soltanto dai fan-coil, i quali agiscono sulla velocità dei ventilatori che li equipaggiano. Questo secondo tipo di regolazione è lasciata alla sensibilità degli occupanti (degenti, medici, personale, visitatori, etc. ...) degli ambienti climatizzati, per cui non risulta controllata dal personale dell'Ufficio Tecnico dell'AOB.

Le *UTA a 4 tubi* si trovano installate prevalentemente nei reparti classificati critici, come già detto in precedenza, e sono caratterizzate dalla possibilità di disporre di due circuiti di alimentazione, uno caldo ed uno freddo, alimentati dalle centrali termiche. Queste unità di trattamento dell'aria sono caratterizzate dalla presenza di due batterie di scambio termico, una dedicata al preriscaldamento dell'aria ed una seconda di post-riscaldamento,

^[25] Decreto del Presidente della Repubblica, "Ordinamento ed Organizzazione dei Servizi Sanitari ed Assistenziali", 14 Gennaio 1997 (G.U. 20 febbraio 1997, n. 42, S.O.).

alloggiata in prossimità delle bocchette di mandata dell'aria. In alcune delle macchine installate, è stata rilevata la presenza di un'ulteriore batteria destinata al recupero dell'energia termica dall'aria di ripresa (Figura 24). Un sistema così strutturato è

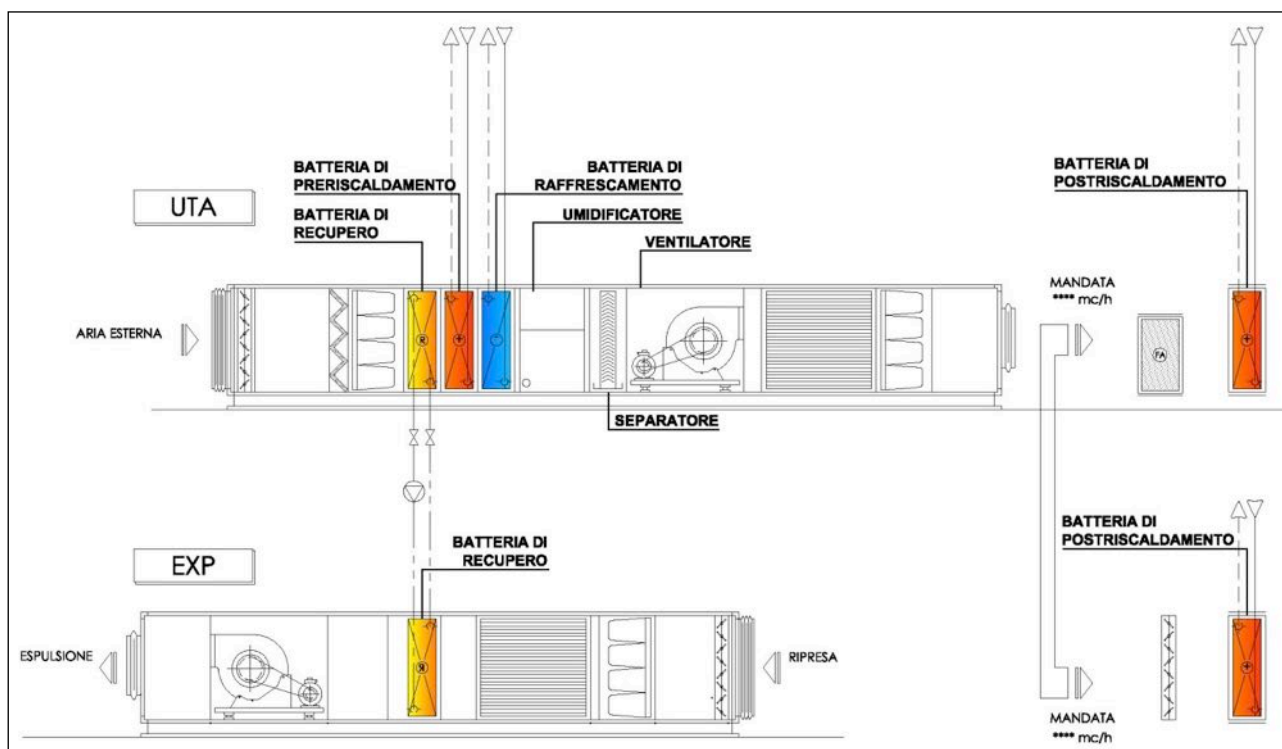


Figura 24 - Schema configurazione di UTA a 4 tubi (tipologia installata nel Trauma-Center)

necessario al fine di garantire, come detto in precedenza, il rispetto dei parametri microclimatici prescritti dalle normative vigenti [25]. Le caratteristiche termo-igrometriche dell'aria di mandata verso gli ambienti da climatizzare sono regolate da una centralina elettronica di controllo, la quale aziona varie valvole a tre vie motorizzate, disposte nei circuiti del fluido termovettore. Il controllo della regolazione dell'UTA, da parte della centralina, avviene attraverso la lettura di segnali provenienti dalle sonde localizzate all'interno degli ambienti e all'interno delle canalizzazioni dell'aria di ripresa, in funzione dei valori di temperatura e di umidità relativa rilevati.

Le UTA a 2 tubi sono state rilevate nelle seguenti zone dell'ospedale: nell'ex-centro uestionati al 7° piano, negli uffici e nei laboratori del piano piastra, negli ambulatori e nella zona adibita a cucina e mensa. Le macchine sono alimentate con il fluido termovettore proveniente dalla sotto-centrale termica oppure dalla centrale frigorifera. La selezione del tipo di servizio da erogare (riscaldamento o raffrescamento) avviene tramite un'apposita valvola a tre vie, localizzata in sotto-centrale termica. Questa valvola viene manovrata manualmente dal personale referente delegato dell'Ufficio Tecnico, ad ogni cambio di

stagione: indicativamente da maggio ad ottobre si ha la stagione di raffrescamento con fluido vettore freddo, mentre orientativamente da novembre ad aprile si ha la stagione di riscaldamento con fluido vettore caldo, salvo esigenze differenti dettate dal clima.

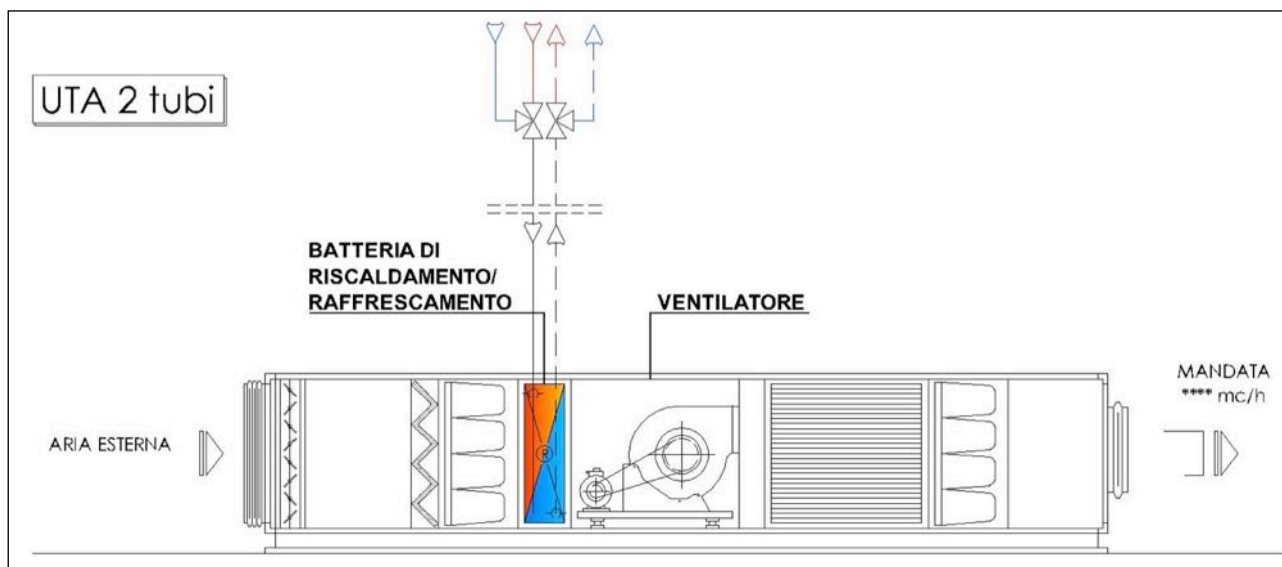


Figura 25 - Schema configurazione di UTA a 2 tubi

Le UTA a 2 tubi garantiscono il rinnovo dell'aria all'intero degli ambienti ed offrono una limitata regolazione delle temperature interne, lasciando agli altri impianti presenti, radiatori e ventilconvettori, il compito di soddisfare la quota rimanente di fabbisogno e/o carico termico rimanente. La temperatura dell'aria di mandata ha un valore costante impostato dal personale dell'Ufficio Tecnico dell'AOB, tramite il pannello di controllo delle singole macchine, a seconda della tipologia di zona servita e della stagione. Il controllo della regolazione dell'UTA, avviene attraverso un software di gestione, dal quale è possibile controllare la temperatura di mandata dell'aria agendo sull'apertura della valvola motorizzata a tre vie, il cui segnale di controllo è funzione dei valori di temperatura rilevati da un'apposita sonda, posizionata nella canalizzazione dell'aria di mandata.

I sistemi a recupero di calore MP3 sono installati dal Piano 3° fino al Piano 11°, con l'esclusione del 5° piano (blocchi operatori) in cui operano le UTA a 4 tubi sopra descritte. La differenza rispetto ai precedenti sistemi analizzati, consiste nella presenza di una batteria di scambio termico, che consente il recupero di parte del calore sensibile presente nell'aria di espulsione (vedi figura 26). A valle del recuperatore di calore e a monte del canale di mandata è situata una batteria di riscaldamento/raffrescamento, alimentata tramite lo stesso circuito che porta il fluido termovettore alle UTA a 2 tubi, che consente di

regolare la temperatura dell'aria immessa negli ambienti. Le caratteristiche di funzionamento dell'impianto descritto sono affini a quelle delle UTA a 2 tubi, per cui questo sistema di recupero viene utilizzato soltanto per il rinnovo dell'aria all'intero degli ambienti, lasciando agli altri impianti presenti, radiatori e ventilconvettori, il compito di soddisfare la quota rimanente di fabbisogno e/o carico termico rimanente. Il sistema di regolazione della temperatura di mandata dell'aria di questi sistemi è identico a quello presente nelle UTA a 2 tubi, descritto in precedenza.

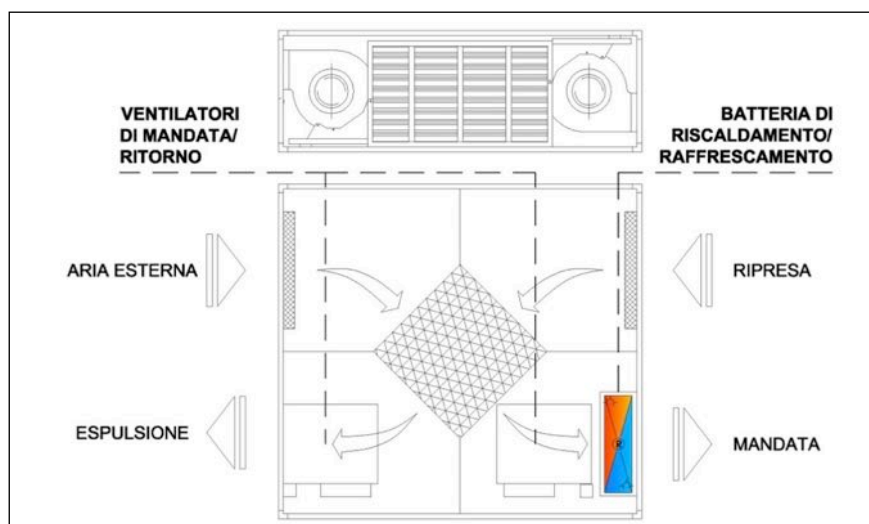


Figura 26 - Schema configurazione dei sistemi a recupero di calore MP3

Nella seguente tabella 9 è presentata una sintesi delle potenze termiche installate in ciascuno dei piani dell'AOb, suddivise per tipologia d'impianto di erogazione. Ulteriori dettagli sulle caratteristiche tecniche principali di tutti i sistemi di erogazione dell'energia termica presenti nell'AOb sono riportati nell'Appendice C.

POTENZA DEI TERMINALI DI EROGAZIONE DELL'ENERGIA TERMICA [KW]										
PIANO	UTA A 4 TUBI			UTA A 2 TUBI		RECUPERATORI MP3 XRC*		FAN COIL		RADIATORI
	Potenza freddo	Potenza caldo	Controllo Umidità	Potenza freddo	Potenza caldo	Potenza caldo	Potenza freddo	Potenza caldo	Potenza freddo	Potenza caldo
XI	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	41.8	18.5	269.7	112.6	2.5
X	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	55.6	27.2	423.2	177.3	7.9
IX	177.7	171.8	37.0	n.p.	n.p.	27.7	12.0	319.9	484.5	10.4
VIII	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	69.6	30.5	452.3	191.8	9.6
VII	20.9	35.0	10.0	78.5	61.7	52.0	22.6	374.5	158.9	3.9
VI	122.7	148.6	67.0	n.p.	n.p.	69.7	30.7	449.5	191.7	11.7
V	512.9	1027.9	157.0	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	285.3	125.9	3.2
IV	242.7	235.8	81.0	n.p.	n.p.	52.3	22.6	177.8	115.1	3.2
III	74.8	110.9	32.0	n.p.	n.p.	41.6	18.0	341.2	141.4	9.9
II	127	54.5	0	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	476.7	199.3	8.7
I	145.0	78.7	n.d.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	781.4	325.7	4.6
Piastra	361.2	291.1	n.d.	182.8	169.5	n.p.	n.p.	946.9	404.4	n.p.
Seminterrato	844.0	695.6	n.d.	296.5	244.7	n.p.	n.p.	347.8	159.8	n.p.
TOTALE	2'629	2'647	364	558	476	417	183	5'740	2'788	76
Legenda										
	Dati parziali									
*	Dati comprensivi della potenza del recuperatore									
n.d.	Dati non disponibili									
n.p.	Tipologia di terminale non presente									

Tabella 9 - Quadro sinottico delle potenze termiche installate nei piani dell'AOb, distinte per tipo di impianto e di erogazione.

3.3 - Definizione della strategia di implementazione della modellazione

La modalità di sviluppo ed implementazione della modellazione è stata una delicata fase della ricerca che ha impegnato una discreta quantità di risorse, in termini di impegno e di tempo. Dinanzi ad un sistema edificio-impianti di siffatta natura [1], si è proceduto dapprima alla definizione di un modello in grado di riprodurre “fedelmente” lo stato dei luoghi e delle cose, ma ci si è immediatamente resi conto della necessità di una semplificazione funzionale, data la magnitudo del sistema. Si è proceduto per *step* di approssimazione successivi e, quindi, si è deciso di definire in prima istanza un “*piano-tipo*”, scelto in modo che avesse caratteristiche geometriche, distributive e funzionali tali, da poter rappresentare un archetipo per tutti gli altri. La scelta, all’uopo, è ricaduta sul Piano VIII, dove trovano luogo i reparti di Medicina Interna 1 (Ala Nord-Est) e di Medicina 2 (Ala Sud-Ovest). Avendo a disposizione tutte le informazioni relative alle caratteristiche geometriche e termofisiche degli elementi costruttivi dell’edificio [1] costituito dal Corpo

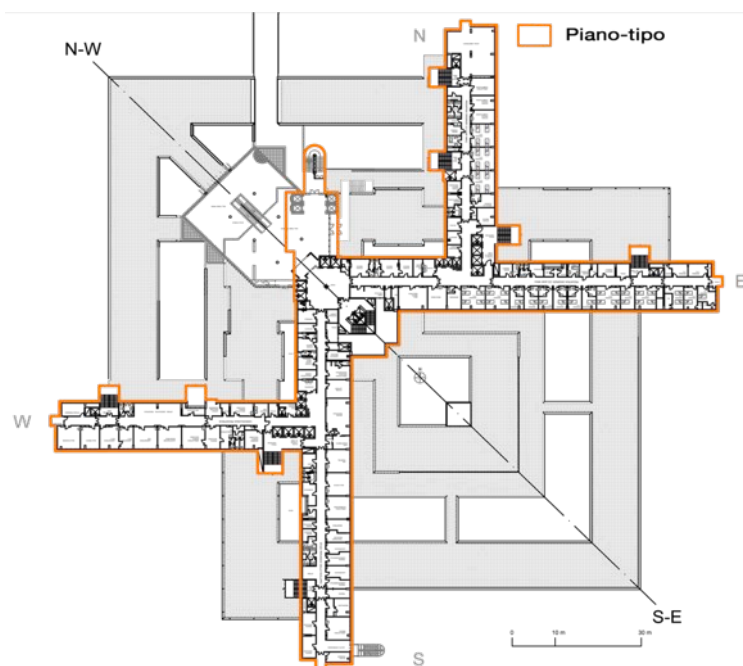


Figura 27 - Perimetrazione iniziale “*Piano-tipo*”

centrale dell’Azienda Ospedaliera, si è proceduto alla definizione dell’involucro nel modello. A questo punto della modellazione occorre determinare quali siano i parametri di temperatura e di ricambio dell’aria (parametri di *set-point*) che si ha la necessità di mantenere all’interno degli ambienti. In generale, accade di avere la necessità di impostare differenti parametri di *set-point* in diversi ambienti individuati all’interno del medesimo volume climatizzato, racchiuso dall’involucro esterno, come peraltro accade nell’Ospedale oggetto del presente lavoro di ricerca. Diventa necessario, quindi, introdurre ed individuare un altro elemento di dettaglio, definito nell’ambito della modellazione e della simulazione, come lo spazio racchiuso da un involucro edilizio riscaldato/raffrescato ad una temperatura uniforme (con uniformi parametri di *set-point*) ed avente la stessa destinazione d’uso: la

“zona termica”. La zona termica, quindi, è l’unità di simulazione utilizzata nei codici di calcolo, in grado di definire in maniera puntuale e precisa la zona-ambiente nella quale adottare particolari parametri di comfort (*indoor air quality*). E’ da sottolineare che questa caratterizzazione delle grandezze termo-igrometriche di qualità dell’aria interna, ha degli indirizzi ben definiti dalla normativa di riferimento. Al momento della trattazione di questa ricerca, si è optato per adottare come standard di riferimento i valori previsti dal D.P.R. del 14 Gennaio 1997, “*Ordinamento ed Organizzazione dei Servizi Sanitari ed Assistenziali*” (vedi Capitolo 1.2.), in materia di edifici sanitari, individuati a loro volta dalla classificazione E.3 (Edifici adibiti a ospedali, cliniche o case di cura e assimilabili ivi compresi quelli adibiti a ricovero o cura di minori o anziani nonché le strutture protette per l’assistenza ed il recupero dei tossico-dipendenti e di altri soggetti affidati a servizi sociali pubblici), come da D.P.R. 26 agosto 1993, n°412.

Le grandezze termo-igrometriche normate per le diverse destinazioni d’uso e considerate, quindi, in questa fase sono:

- Temperatura minima della zona [°C]
- Temperatura massima della zona [°C]
- Umidità relativa minima [%]
- Umidità relativa massima [%]
- Ventilazione (ricambi d’aria) [vol/h]

È importante notare che nel D.P.R. 14/01/97 non è prevista la definizione di una temperatura di progetto invernale ed estiva di riferimento, così come già previsto per gli edifici adibiti a residenza e assimilabili (categoria E.1 - DPR 26 agosto 1993, n°412), ma si prescrive un intervallo di variazione dei parametri di *set-point* (con indicazione di valori di *range* minimo-massimo) entro cui la zona si deve sempre mantenere. Le peculiari e specifiche esigenze richieste all’interno delle strutture ospedaliero-sanitarie, nelle quali si devono garantire ai degenti elevati standard di comfort, con caratteristiche controllate di qualità e di benessere ambientale, devono essere mantenute per tutto il giorno e durante tutto l’anno. A seguito di attenta analisi delle planimetrie, realizzate a corredo della diagnosi energetica [1] effettuata presso l’Azienda Ospedaliera, si è potuta determinare la destinazione d’uso di ogni ambiente presente all’interno del Corpo centrale dell’Ospedale e, adottando le prescrizioni previste dal D.P.R. del 14/01/1997, sono state individuate diverse tipologie di zona termica, caratterizzate ognuna da un nome ed un colore identificativo e

relativi parametri termo-igrometrici. All'atto di tale identificazione termica nel modello, è stato necessario adottare delle semplificazioni per contenere sia il numero di tipologie di zona termica (come da D.P.R. del 14/01/1997), che il numero delle zone termiche perimetrare nel modello, in maniera compatibile con le potenzialità dei codici di calcolo utilizzati. Nella seguente Tabella 10 sono riportati i valori delle grandezze termo-igrometriche utilizzate nella modellazione, distinti per destinazioni d'uso individuate (circa una ventina) e, quindi, per zona termica.

Destinazione d'uso	retino	parametri termo-igrometrici					Volumi modello	
		temperatura Minima [°C]	temperatura Massima [°C]	umidità relativa [%]	ventilazione [vol/h]	apporti interni	volume / destinazione d'uso [m³]	percentuale incidenza [%]
Degenze Dialisi Pubblico		20 - 22 ^(*)	27	40 - 60	2	si	18.816	9,1%
Terapia intensiva		20	24	40 - 60	6	si	956	0,5%
Servizi		20	28	40 - 60	12	si	9.146	4,4%
Farmacie Laboratori		20	26	45 - 55	2	si	5.256	2,5%
Usi medici		21	28	40 - 60	3	si	44.497	21,5%
Diagnostica		20	27	40 - 60	4	si	4.790	2,3%
Preparazione interventi		20	28	40 - 60	8	si	3.095	1,5%
Sale Operatorie		20	24	40 - 60	15	si	1.887	0,9%
Sale Parto		22	26	30 - 60	6	si	257	0,1%
Morgue		20	25	40 - 60	8	si	901	0,4%
Sale con salme		8 ^(**)	18	55 - 65	15	si	718	0,3%
Depositi Magazzini		18	-	-	3	no	12.096	5,9%
Cucina		18	30 ^(**)	-	5	si	1.824	0,9%
Uffici Mensa		20	26	40 - 60	1	si	13.190	6,4%
Sterilizzazione		20	27	40 - 60	6	si	1.359	0,7%
Officine		18	30	-	4	si	1.172	0,6%
Vani tecnici Locali di servizio		-	-	-	-	no	5.266	2,5%
Ascensori		-	-	-	-	no	5.931	2,9%
Hall		20	28	40 - 60	1	si (½)	3.642	1,8%
Corridoi Scale		20	29 - 27 ^(****)	40 - 60 ^(*)	2	si	71.891	34,8%
(*) Degenze Periatriche		(**) valori indicativi non obbligatori			(****) Corridoio Morgue		206.690	100%

Tabella 10 –Parametri di set-point adottati nel modello distinti per destinazione d'uso come da D.P.R. 14/01/97

Si sono adottate altre semplificazioni anche nel considerare gli apporti interni gratuiti dei macchinari e delle persone presenti e/o operanti nelle varie zone termiche. Vista la complessità riscontrata del sistema edificio-impianti, di una struttura come l'Azienda Ospedaliera oggetto di studio, si è deciso di utilizzare per definire i valori relativi agli apporti gratuiti interni, quelli previsti ed indicati dalla norma UNI 11300 per le strutture ospedaliere. Per quanto riguarda il calore sensibile, il valore impostato è pari a $8,0 \text{ W/m}^2$ ripartito equamente (50%-50%) tra parte convettiva e radiativa. In base ai dati di occupazione degli ambienti, ricavato dal numero di persone (pazienti, personale, visitatori) che ogni giorno affollano la struttura, è stato possibile stimare, sempre in osservanza della norma UNI 11300, l'apporto gratuito del calore latente corrisponde a circa $7,7 \text{ W/m}^2$.

Nella Figura 28 è riportato un esempio d'individuazione delle zone termiche. A seguito dell'analisi delle planimetrie di rilievo dei vari reparti (è riportato in stralcio alla sinistra della Figura 28 l'es. del reparto di Medicina Interna 2, situato all'VIII piano, Ala Sud-Est), si sono verificate tutte le destinazioni d'uso di ogni singolo ambiente e, fatto ciò, si sono individuate graficamente le suddette sulle planimetrie. Si è proceduto, in sostanza, attribuendo ad ogni singolo ambiente un particolare retino colorato relativo al tipo di attività svolta, seguendo la classificazione come da Tabella 10, sopra riportata. Il risultato di detta attività è una mappa sinottica (per ogni piano) che riporta, geometricamente e cromaticamente, l'individuazione di tutte le zone termiche e delle relative dimensioni.

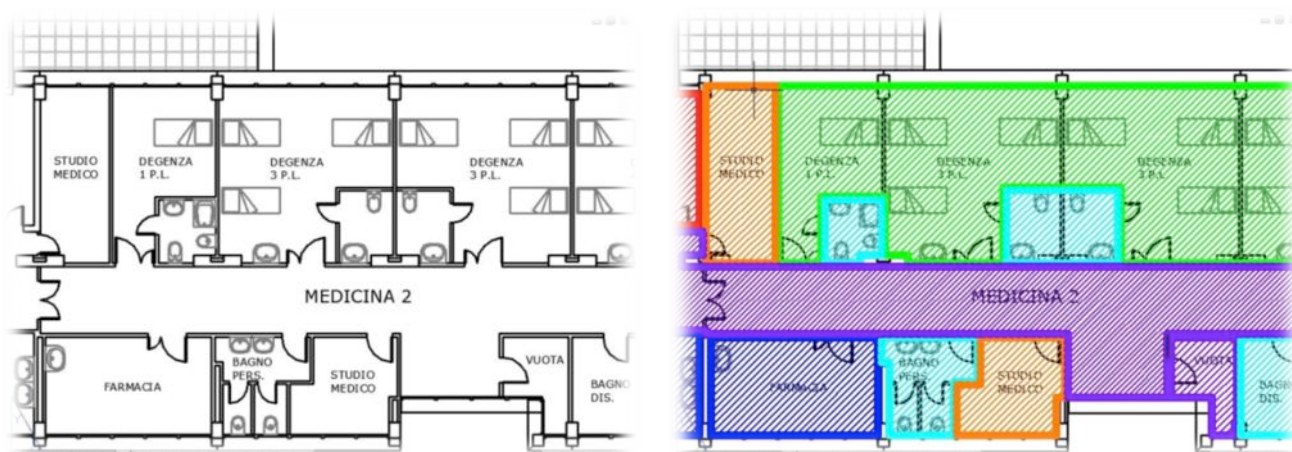


Figura 28 - Planimetria con individuazione delle destinazioni d'uso e delle relative zone termiche

Nella Tabella 10 sono riportate, quindi, le tipologie di zone termiche ed i parametri di *set-point* utilizzati nella modellazione, ivi compresi i volumi riferiti agli ambienti delle diverse tipologie di zone termiche, con indicata l'incidenza percentuale sul volume totale oggetto di modellazione. Come si diceva ad inizio paragrafo, data la dimensione e la natura complessa dell'edificio oggetto di studio, si è proceduto inserendo nel modello, per gradi, tutti gli elementi caratterizzanti e funzionali per la definizione del comportamento dell'edificio reale. Il modello è stato inizialmente costruito inserendo puntualmente tutti i parametri caratteristici dell'involucro esterno, così come definito nel paragrafo 3.2.1. Avendo provveduto a dare una corretta e coerente definizione al "contenitore", considerando indivisa, in questa prima fase, l'intera superficie (di piano) "contenuta" all'interno dell'involucro contenitore, si è definita una unica zona termica indifferenziata. Si è proceduto all'implementazione del modello, seguendo le modalità sopra descritte, identificando le diverse specifiche destinazioni d'uso, come individuate nella precedente Tabella 10, e perimetrando le relative zone termiche negli ambienti del modello dell'A.O.B. L'esito di questa azione, dato il numero delle zone termiche individuate, ha richiesto l'adozione repentina di una strategia di semplificazione efficace. Le condizioni al contorno relative alle realistiche possibilità (da parte del sistema edificio-impianti esistente) di mantenimento dei parametri termo-igrometrici, differenziati ambiente per ambiente così come prescritto dalla norma, e la non fondata necessità di mantenere un così elevato numero di zone termiche nel modello, hanno permesso di adottare una semplificazione. Si è deciso di procedere accorpendo le diverse categorie di utilizzo previste nel D.P.R. 14/01/97, generando sostanzialmente delle macro zone termiche. Dal momento che per mantenere questi standard termo-igrometrici è necessaria la presenza di un adeguato sistema di impianti tecnologici, in grado di differenziare le regolazioni ambiente per ambiente, si è deciso di definire queste macro zone termiche in funzione, non solamente al tipo di modalità di servizio degli impianti tecnologici esistenti, ma anche in relazione al tipo di attività effettivamente svolta all'interno degli ambienti dell'A.O.B. Mettendo a sistema, quindi, la distribuzione spaziale degli ambienti, la relativa destinazione d'uso e la configurazione degli impianti, così come attualmente risultano in esercizio presso l'A.O.B, si è giunti alla individuazione di cinque macro-categorie, utilizzate per individuare le zone termiche all'interno del modello dell'A.O.B:

- a) DEGENZE/SERVIZI – nella categoria rientrano sia tutte quelle zone destinate all'accoglienza ed al soggiorno dei degenti, agli studi medici e, in generale, ai locali

- occupati dal personale medico e paramedico, sia tutti gli ambienti destinati ai bagni, antibagni, docce e servizi di toilette in generale. Queste zone sono caratterizzate da una domanda energetica medio-alta, con consumi energetici legati prevalentemente ai ricambi d'aria orari degli ambienti, aventi picchi significativi rilevati negli ambienti destinati della terapia intensiva ;
- b) **UTILIZZI MEDICALI** – nell'insieme sono ricompresi tutti gli ambienti dedicati alle attività mediche di diagnosi e di cura, ivi comprendendo le farmacie, i laboratori, le sale operatorie e gli studi di diagnostica (radiografia, TAC, PET, etc. ...), le quali rappresentano le utenze più energivore dell'intero Ospedale, sia in termini di energia elettrica, che termica ;
- c) **DEPOSITI/MAGAZZINI** – questo tipo di zone sono caratterizzate, in generale, da richieste energetiche molto basse ;
- d) **COLLEGAMENTI** – in questa categoria, che rappresenta più di un terzo del volume totale del modello, trovano luogo gli atri di piano, i corridoi, gli ascensori e, in generale, tutti quegli ambienti destinati al collegamento orizzontale e verticale (atti a garantire l'accesso ai vari ambienti di tutti i livelli dell'Ospedale), che risultano richiedere una quantità medio-bassa di energia ;
- e) **UFFICI/USI TECNICI** – in questo gruppo afferiscono tutti gli ambienti, caratterizzati da una domanda energetica medio-bassa, che sono risultati occupati dal personale tecnico ed amministrativo dell'AOB.

Osservando la distribuzione e l'ubicazione delle diverse attività svolte all'interno dell'AOB (vedi Figura 29), si può notare che i piani dal 2° all'11° si presentano con una configurazione geometrica molto affine, dove trovano luogo i diversi reparti specialistici medici, i quali si presentano

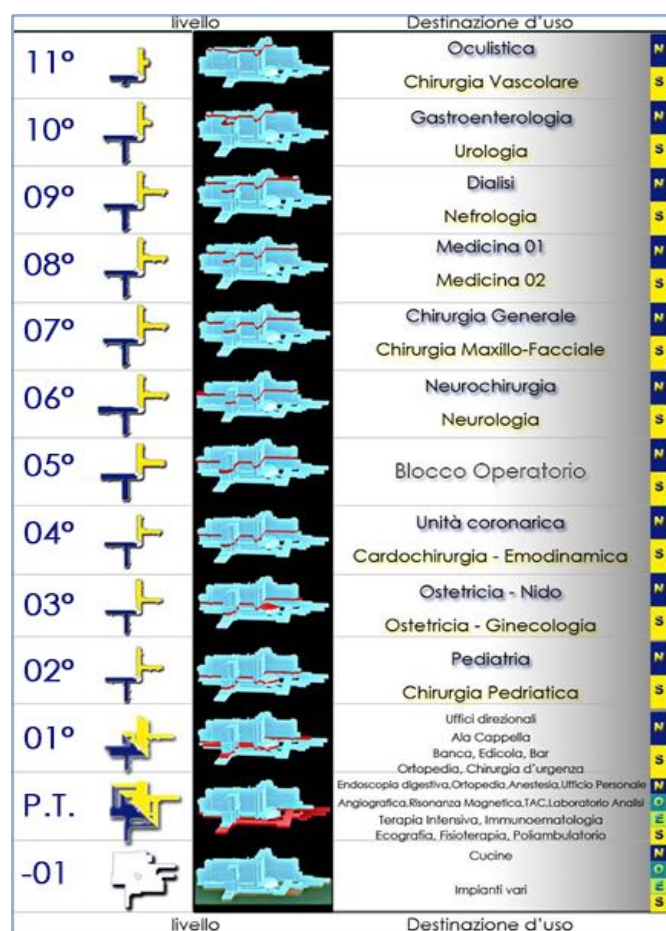


Figura 29 - schema destinazioni d'uso dell'AOB

con una distribuzione ai piani non dissimile e, quindi, con destinazione d'uso delle volumetrie analoga, caratterizzata dalla prevalente presenza delle individuate categorie di “Degenze/Servizi” e “Collegamenti”. Unica eccezione si rileva al Piano 5°, nel quale trova luogo il blocco operatorio dell'AOB, dove si riscontra lo svolgimento di attività afferenti alla categoria “Utilizzi medicali”, le quali, anche in sede di diagnosi energetica, hanno confermato avere una ingente domanda di energia. Ai piani dal 1° a quello seminterrato, si è rilevata una configurazione geometrica abbastanza eterogenea, differente dagli altri livelli citati, che ha fatto registrare una classificazione dei volumi per destinazione d'uso significativamente differenziata.

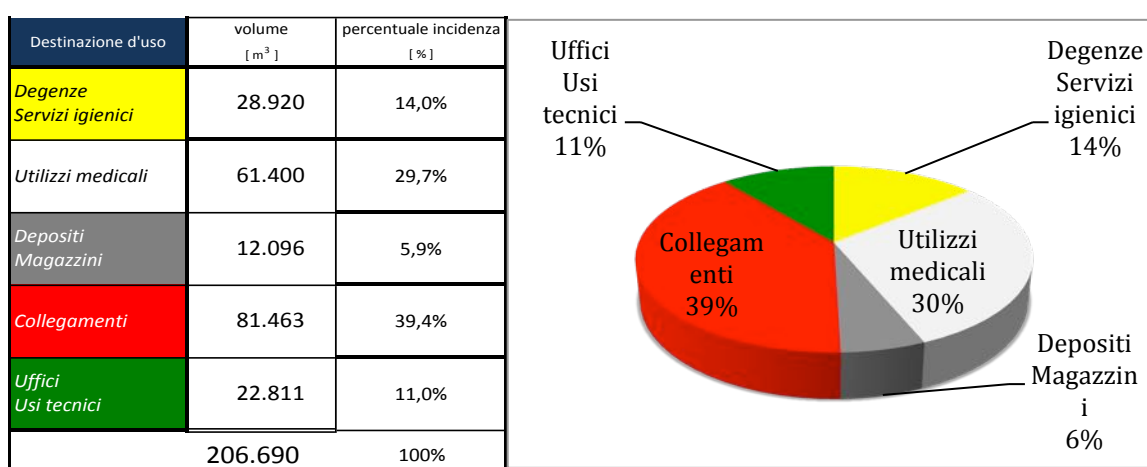


Tabella 11 – Incidenza dei volumi dell'AOB distinti per destinazione d'uso

	Incidenza percentuale volumetria AOB distinta per destinazione d'uso e per piano													
	Torre - Hall	XI	X	IX	VIII	VII	VI	V	IV	III	II	I	PT	S
Degenze Servizi igienici	-	20%	32%	28%	36%	27%	29%	2%	36%	22%	18%	14%	7%	3%
Utilizzi medicali	13%	31%	22%	25%	22%	30%	26%	48%	19%	35%	41%	10%	41%	30%
Depositi Magazzini	-	2%	3%	3%	2%	3%	5%	5%	3%	1%	3%	1%	3%	16%
Collegamenti	87%	47%	43%	42%	40%	39%	40%	40%	41%	40%	38%	53%	40%	23%
Uffici Usi tecnici	-	-	-	2%	-	1%	-	4%	1%	1%	1%	23%	9%	28%

Tabella 12 - Incidenza percentuale della volumetria dell'AOB distinta per destinazione d'uso e per piano.

In questi tre piani (PS, PT e P1°) si svolgono tutte le attività ricomprese nelle categorie classificate, con differenze significative di incidenza ad ogni piano, come è possibile verificare nella Tabella 12, quadro sinottico del dettaglio delle incidenze per tutti i piani

dell'AOb. In sede di implementazione del modello, data la configurazione del sistema edificio-impianti, si è optato per separare la zona atrio, corrispondente all'ingresso Nord (al pubblico) di più recente realizzazione, identificata come "Hall di ingresso", dalla perimetrazione afferente al Piano 1°. Questa distinzione, effettuata anche per tutti gli altri livelli, ha portato alla genesi di un'ulteriore zona termica, in corrispondenza del blocco di nuova costruzione, denominato "Torre-Hall", dove trovano luogo i nuovi ascensori e le scale di emergenza. Nel passaggio dalla modellazione della parte strettamente connessa all' "edificio", a quella più funzionale alla parte "impianti" del sistema edificio-impianti, data la complessità dello stesso, per non appesantire eccessivamente la fase di simulazione, è stato ritenuto opportuno trascurare la modellazione puntuale della parte di erogazione realmente in esercizio nell'AOb. In sostanza è stato modellato un impianto di climatizzazione "generico" avente un comportamento ideale e con potenza termica senza limite, le cui *performance* non sono funzione della tipologia di impianto e di regolazione. Per fare un esempio, se ci troviamo in regime stagionale estivo, con il parametro di temperatura impostato a 27 °C, il codice di calcolo calcolerà quanta energia è necessaria al mantenimento di tale *set-point*, trascurando che tale energia alimenti un impianto a pompa di calore, a fan coil, etc. ...

3.3.1 Analisi della costruzione ed implementazione del modello dell' "AOb"

Il corpo centrale dell'AOb è stato modellato e simulato utilizzando due codici di calcolo, TRNSYS e DesignBuilder, utilizzando la medesima strategia di approccio. Questa fase del lavoro, vista la complessità e la dimensione del sistema studiato, è stata portata avanti in team: per mezzo del software DesignBuilder è stata totalmente sviluppata dallo scrivente sia la parte di modellazione che di simulazione, mentre la parte relativa al software TRNSYS è stata condivisa con il collega Ing. Francesco Valentino Caredda [34], il quale, grazie alla sua preziosa esperienza, ha anche coordinato la strategia di approccio. Questa scelta di adoperare due "mezzi" differenti è stata dettata dalla volontà di creare un lavoro che avesse un contraddittorio dei risultati ottenuti. Nel Capitolo 3.4 sono riportate le tabelle contenenti i risultati delle simulazioni dei due codici e le differenze percentuali ottenute dal loro confronto. Le assunzioni di cui al precedente paragrafo, relativamente alla semplificazione della modellazione del lato impianti, implicano ovviamente che i risultati ottenuti saranno strettamente funzionali alle caratteristiche termofisiche della struttura

edilizia, alle forzanti esterne definite come condizioni al contorno del sistema (es. parametri climatici) ed alle impostazioni di *set-point* delle varie zone termiche. Non potendo trascurare, da un lato, la dimensione dell'edificio oggetto di analisi e, dall'altro, i limiti "fisici" che i codici di calcolo (TRNSYS e DesignBuilder) manifestano nella gestione di un gran numero di zone termiche (peraltro ricche di condizioni al contorno), è stato necessario suddividere la simulazione in diverse *tranche*. La strategia adottata è stata quella, quindi, di procedere (con TRNSYS) alla simulazione separata dei 40 blocchi (di zone termiche) in cui è stato diviso l'AOB. In ciascuno dei 13 livelli (Piano Seminterrato, Piano Terra, Piano dal 1° all'11°) del corpo centrale dell'Ospedale sono state individuate tre macro-aree definite *Ala Nord*, *Ala Sud* e *Atrio di Piano*, tenendo in considerazione l'asse di simmetria Nord-Ovest/Sud-Est, riportato in Figura 30. Per i livelli del corpo centrale che vanno dal piano secondo al piano undicesimo, le individuate *Ala Nord* e *Ala Sud* corrispondono in modo perfettamente calzante ai reparti specialistici in cui è suddiviso ogni piano dell'AOB, ai quali si accede per mezzo dell'atrio principale, crocevia dei collegamenti orizzontali, presente anch'esso ad ogni piano, il quale consente anche il collegamento verticale ai piani (individuato al centro della Figura 30 con il retino *Atrio di Piano*). Per le ragioni già menzionate in precedenza, un blocco a se è stato destinato alla Hall di ingresso ed alla Torre ascensori (retino giallo in Figura 30) di recente costruzione, che si sviluppa dal Piano 1° all'11°. Un'altra importante scelta adottata ha riguardato la selezione di un profilo temporale (*time step*) di 15 minuti (4 in un'ora) del solutore numerico in regime dinamico, frutto di considerazioni di compromesso tra esigenze di accuratezza e velocità di calcolo. In ultima istanza, i risultati ottenuti dalle simulazioni effettuate con il software TRNSYS sono stati integrati su base oraria, per mezzo di un codice elaborato sul codice Matlab, in modo da ottenere una matrice avente un numero di righe pari a 8'760, numero di ore totali in un anno. Il medesimo approccio è stato adottato, quindi, nelle simulazioni effettuate con DesignBuilder, come si potrà vedere meglio e nel dettaglio nel seguito della trattazione.

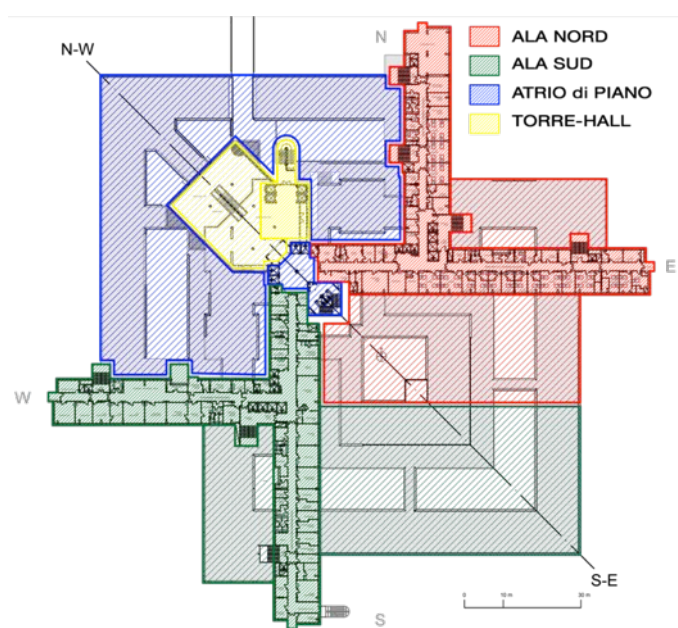


Figura 30 - Individuazione delle quattro macro-aree.

TRNSYS

In ambiente TRNSYS si è proceduto alla predisposizione del primo modello e si è provveduto, inizialmente, alla selezione delle routine funzionali per la modellazione ed all'inserimento di tutti i dati di input. All'interno del modulo di interfaccia denominato *Simulation Studio*, il quale costituisce il *core* del codice di calcolo, si è potuto costruire e gestire il modello del sistema edificio-impianti dell'AOB: è stato possibile, infatti, selezionare i *Type* in grado di contenere tutte le informazioni necessarie per descrivere gli oggetti di studio dal punto di vista termo-fisico, al fine di poter eseguire successivamente la simulazione dei fenomeni di interazione.

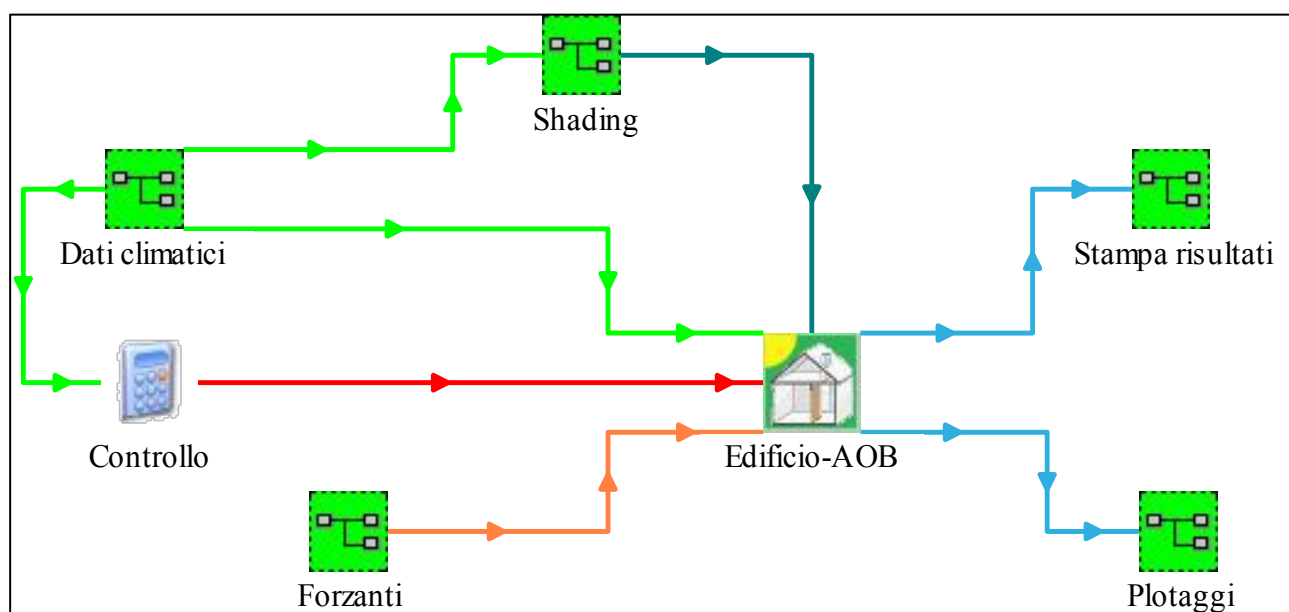


Figura 31 - Vista dell'area di lavoro del "Simulation Studio"

Sono state create tre *macro* contenenti i dati di input, ossia quella relativa ai "Dati climatici", quella per la gestione delle ombre ("Shading") e quella delle "Forzanti", necessaria per l'inserimento di tutte le necessarie condizioni al contorno.

Gli strumenti di gestione e controllo della simulazione, garanti del corretto funzionamento del modello sono contenuti nell'elemento "Controllo".

Infine, la gestione dei dati di output è demandata a due *macro*: una "Stampa risultati", che consente l'elaborazione dei risultati delle simulazioni e il loro

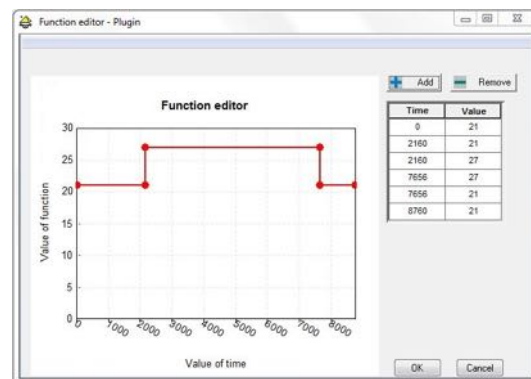


Figura 32 - Schermate delle macro "Dati climatici" (sopra) e "Forzanti" (sotto).

salvataggio su file, l'altra denominata "*Plottaggi*", che permette la visualizzazione a monitor di detti risultati.

La seconda fondamentale fase, eseguita con il modulo *TRNBuild*, è consistita nella modellazione del comportamento termo-fisico dell'edificio, la quale è possibile con l'utilizzo della *Type 56*, che consente di operare con delle interfacce grafiche, per l'inserimento nel modello delle caratteristiche dell'involucro (opaco e trasparente) e per la definizione delle zone termiche e dei suoi parametri di set-point. Una volta applicate le opportune connessioni logiche agli elementi preparati in precedenza, come si può vedere in Figura 31, si sono "puntate" le informazioni di input ed applicate le funzioni necessarie per procedere alla modellazione dell' "Edificio-AOB".

In ambiente *TRNBuild* si è proceduto all'inserimento del dettaglio delle caratteristiche termo-fisiche delle strutture opache ("*Wall Type Manager*") e degli elementi trasparenti ("*Window Type Manager*"),

Sempre rimanendo in ambiente *TRNBuild*, per mezzo del "*TRNBuild Manager*" si è proceduto all'inserimento di tutte le zone termiche, così come definite nel dettaglio nei precedenti passaggi. Con l'ausilio delle altre interfacce di *management*

No.	Layer	Thickness	Type
1	L_2	0.020	massive
2	L_3_5	0.050	massive
3	L_4	0.050	massive
4	L_3_5	0.050	massive

Figura 33 - Wall Type Manager

Figura 34 - Window Type Manager

all'uopo richiamate, è stato possibile l'inserimento di tutti i parametri termo-igrometrici di *set-point*, di ricambio d'aria e quelli relativi agli apporti interni gratuiti.

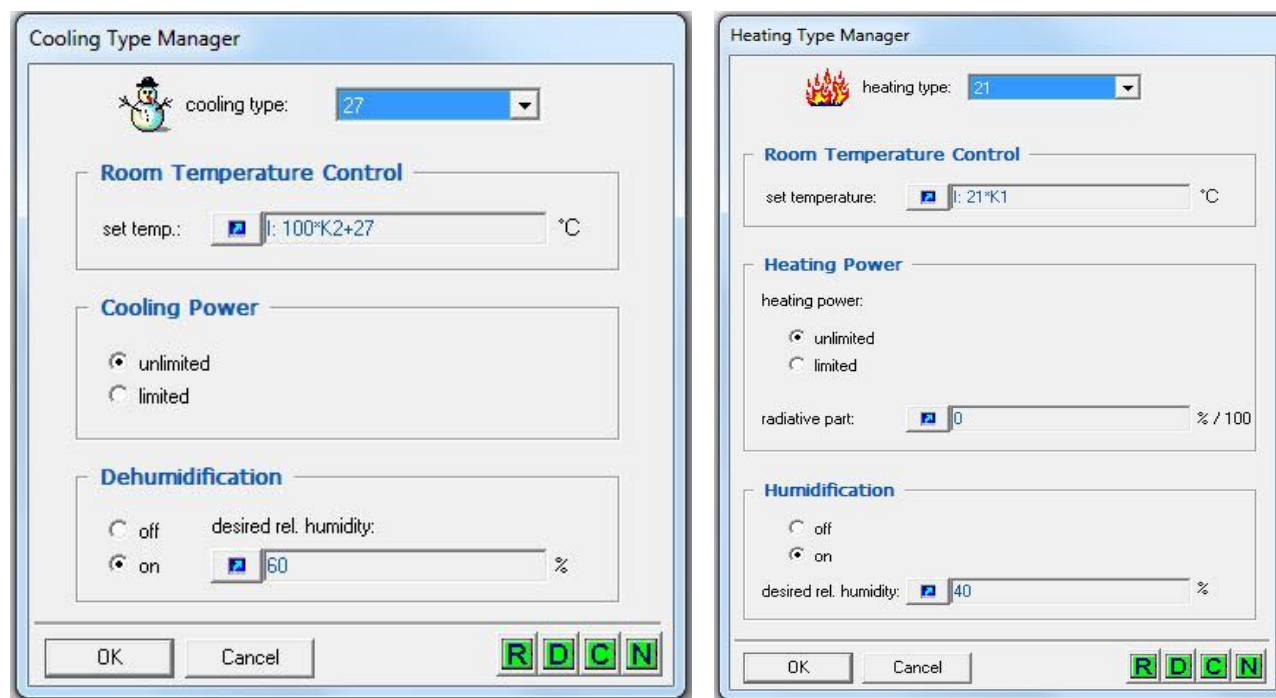


Figura 36 - Interfaccia per la gestione del "Type Manager" per l'impostazione dei parametri di set-point

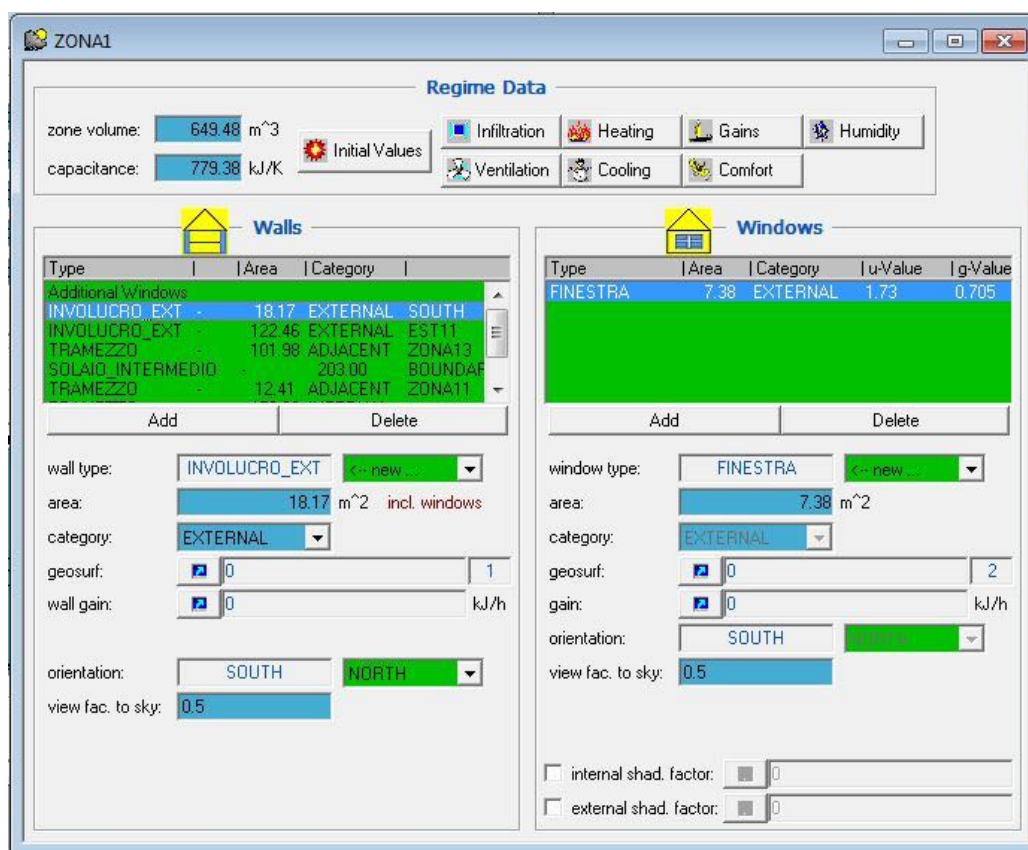


Figura 35 - Interfaccia per l'inserimento delle caratteristiche della zona termica

DesignBuilder

A seguito dell'esperienza maturata con la modellazione iniziata in ambiente TRNSYS, si è proceduto a creare un modello dell'AOB con il codice DesignBuilder. Il modello di simulazione energetica è organizzato secondo una gerarchia semplice di livelli, riportata in Figura 37. Le impostazioni fornite al modello sono ereditate a cascata dal precedente livello. In questo modo, implementando il modello al livello *edificio*, le impostazioni si ritrovano analoghe al successivo livello *Blocco*, dal quale vengono passate al livello *Zona*, che le trasmette così a cascata fino all'ultimo livello *Aperture*. Una volta creato il nuovo progetto, si è proceduto all'inserimento dei dati di ingresso, iniziando dalla

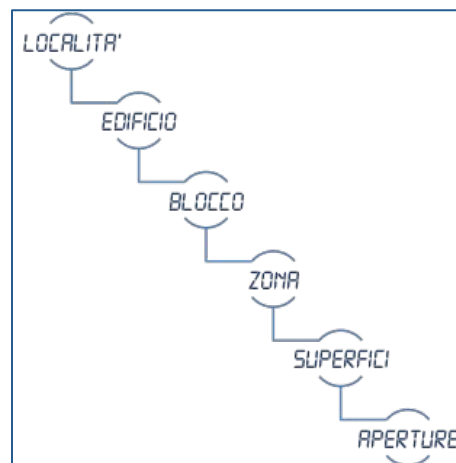


Figura 37 - Diagramma della gerarchia del software DesignBuilder

corretta definizione dei parametri climatici. Il codice, a questo punto, attraverso finestre di dialogo *pop-up*, richiede la definizione del tipo di edificio attraverso l'inserimento di *Template* (modelli). Il codice si presenta con una suddivisione del suo ambiente di lavoro in tre finestre verticali (*Navigazione*, *Progetto-Edificio* e *Info-Dati*), di cui la principale è quella centrale. La finestra *Progetto-Edificio* si presenta coronata da etichette, le quali individuano i “fogli di lavoro”, per mezzo dei quali è stato possibile definire le due fondamentali componenti necessarie per la costruzione del modello energetico: la definizione delle caratteristiche del sistema edificio e le specifiche del sistema impianti. I fogli di lavoro interessati dalle prime operazioni di compilazione sono quelli distinti con le etichette elencate di seguito, dei quali si riassumono le principali funzioni:

- *Layout*, interfaccia grafica per la modellazione 3D dell'edificio;
- *Attività*, dove è definito il tipo di destinazione d'uso, utilizzato dal livello *Zona*;
- *Costruzione*, dove sono definite le caratteristiche termo-fisiche degli elementi costruttivi opachi dell'edificio, utilizzato dal livello *Superfici*;
- *Aperture*, dove sono definite le caratteristiche termo-fisiche degli elementi costruttivi trasparenti dell'edificio, utilizzato dal livello *Superfici*;
- *HVAC*, dove sono definite le caratteristiche tecniche riferite agli impianti di riscaldamento, raffrescamento e ventilazione, utilizzato dal livello *Zona*.

All'interno dei vari fogli di lavoro, quindi, si è provveduto all'inserimento dei parametri di

input, attraverso la definizione dei *Template* e dei loro *Component*. Per procedere con la definizione del modello, è stato necessario dapprima determinare i *Template* contenuti in tutti i citati fogli di lavoro (*Layout, Attività, Costruzione, Aperture, HVAC, etc. ...*). All'interno delle finestre di dialogo del software, per mezzo di menù a tendina, è stato possibile effettuare una selezione tra le voci presenti nel vasto archivio interno al software, che individuano modelli pronti e pre-configurati. E' accaduto spesso di aver avuto necessità di apportare delle modifiche alle specifiche della voce individuata, per cui, dopo aver preso confidenza con il codice, si è optato per generare comunque delle nuove voci *ad hoc*, per mezzo di ulteriori finestre di dialogo. Queste nuove voci sono dei nuovi *Template* personalizzati, che di fatto si vanno ad aggiungere alla libreria del software e che contengono tutti i dati di input inseriti dall'operatore.

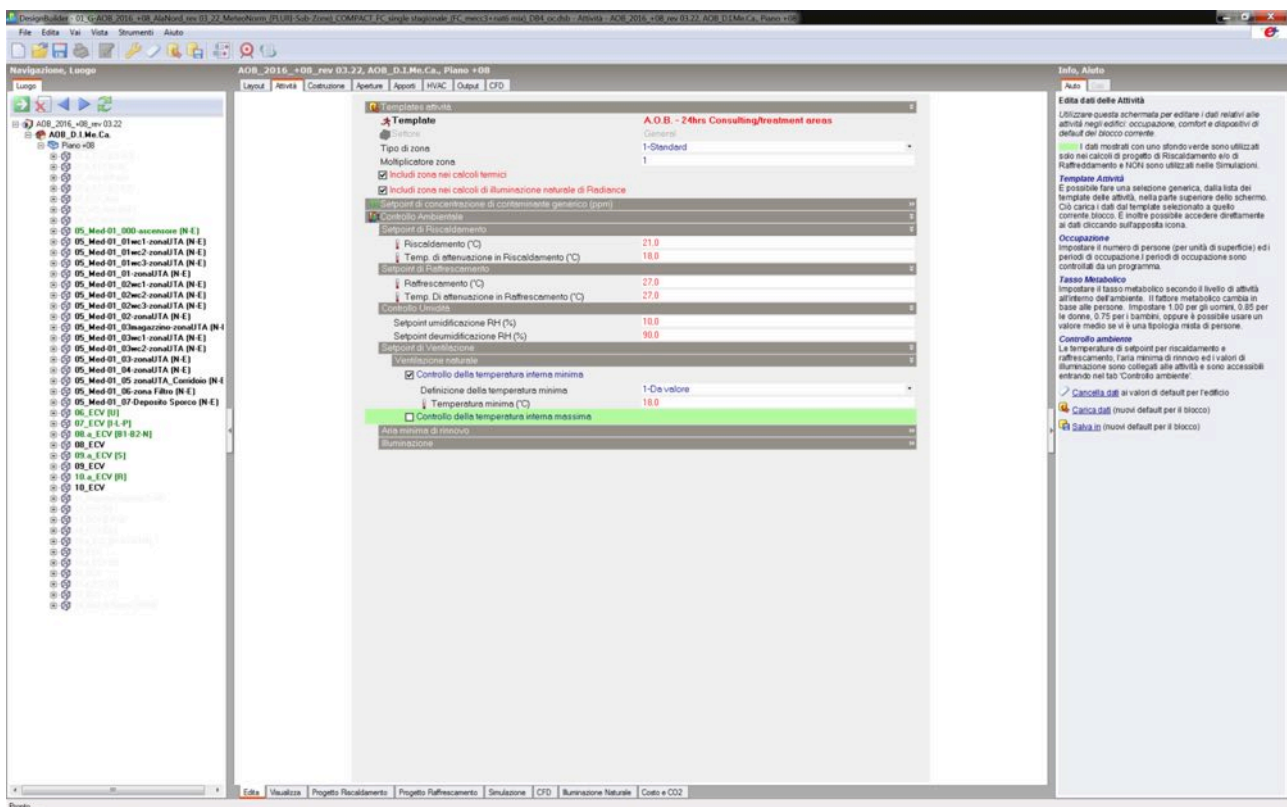


Figura 38 - Schermata del software DesignBuilder - "Attività"

A questo punto, accedendo al foglio di lavoro desiderato (*Layout, Attività, Costruzione, Aperture, HVAC, etc. ...*), si procede alla selezione del *Template* personalizzato ed al suo caricamento sul modello. Si assiste all'assegnazione automatica dei dati personalizzati di input a tutti i *Component* presenti nel foglio di lavoro. Si è proceduto in questa maniera per tutti i fogli di lavoro, implementando in questo modo il modello in ogni sua componente. Il primo foglio di lavoro utilizzato è stato quello *Layout*, attraverso il quale è stato possibile

aggiungere il *Blocco* contenente la definizione geometrica dell'edificio. Nella finestra di navigazione, che occupa il lato sinistro dello spazio di lavoro, compare la gerarchia di livelli sopra descritta, dove è possibile distinguere e interagire con quattro voci in cascata: Località, Edificio, Blocco e Zona.

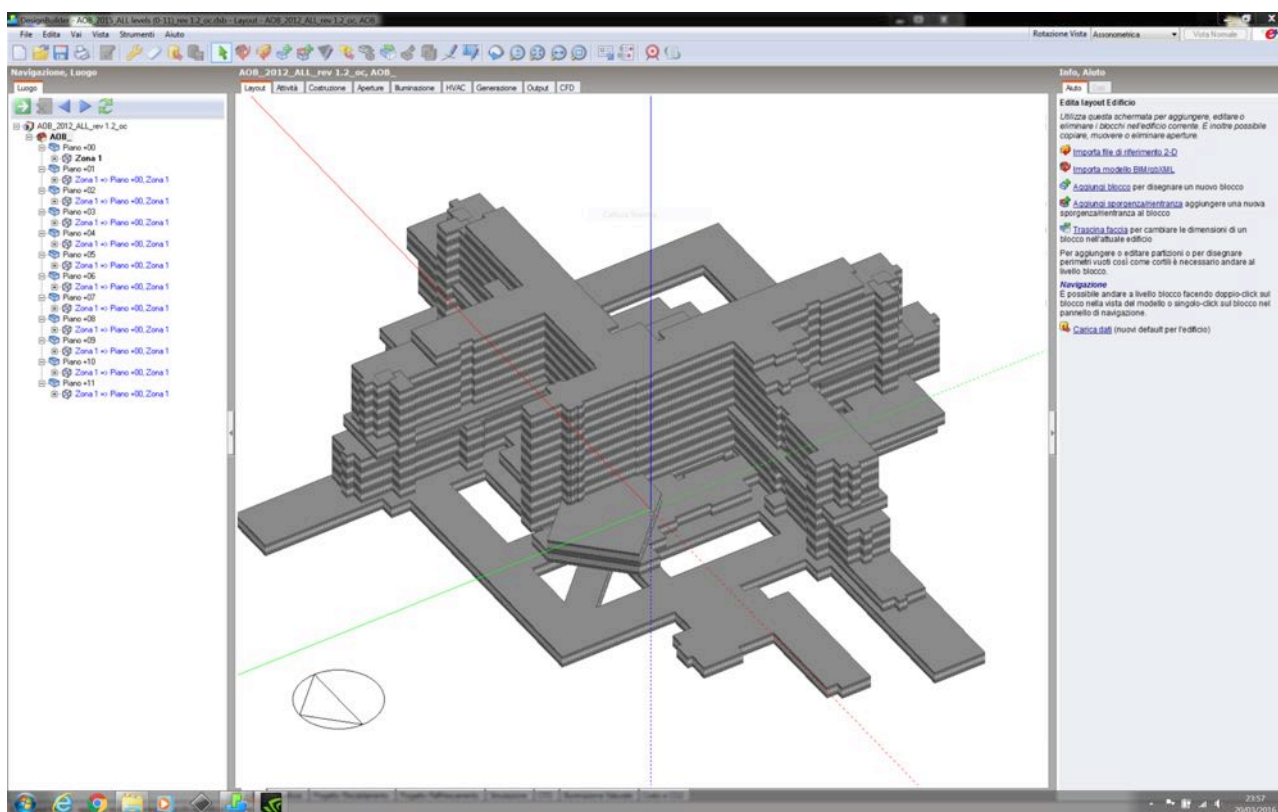


Figura 39 – Schermata del software DesignBuilder - “Layout”

La Zona contiene a sua volta delle voci in cascata che identificano gli elementi di involucro dell'edificio (copertura, pavimento e pareti laterali) che delimitano il volume del Blocco. Ciascun elemento di involucro contiene a cascata le voci corrispondenti ad ogni elemento opaco e trasparente. La selezione di ciascuna di queste voci elencate presenti nella finestra Navigatore, permette di interagire nella finestra centrale con i *Template* e con i relativi *Component*. Una volta terminata la fase di inserimento dei dati di input, è stato possibile interagire con la sezione del codice deputata alla simulazione energetica. Il foglio di lavoro avente l'etichetta *Simulazione* è quello dedicato alla simulazione dinamica, per mezzo del quale, una volta selezionato, è stato possibile interagire con la finestra di pop-up delle opzioni di calcolo. Questa finestra contiene al suo interno altri tre fogli elettronici: *Generale*, *Opzioni* e *Output*. Il primo, *Generale*, permette di selezionare il periodo di simulazione (per es. una settimana, un mese, un anno, ...) e l'intervallo per la generazione dei risultati (mensile, giornaliero, orario o sub-orario). Il secondo foglio, *Opzioni*, consente

di selezionare i *time step* orari di simulazione, di impostare le opzioni sul controllo della temperatura (ambiente, operante, altro), di selezionare diverse opzioni sul calcolo delle ombre e delle riflessioni. Da questa finestra è possibile, inoltre, operare delle selezioni sulle impostazioni avanzate di calcolo, come ad esempio sulla scelta dell'algoritmo di soluzione generale, sui parametri di convergenza, sulla scelta degli algoritmi di calcolo di dettaglio ed altri ancora. L'ultimo foglio, *Output*, è dedicato alla gestione dei dati di output (grafici, risultati, rapporti, ...).

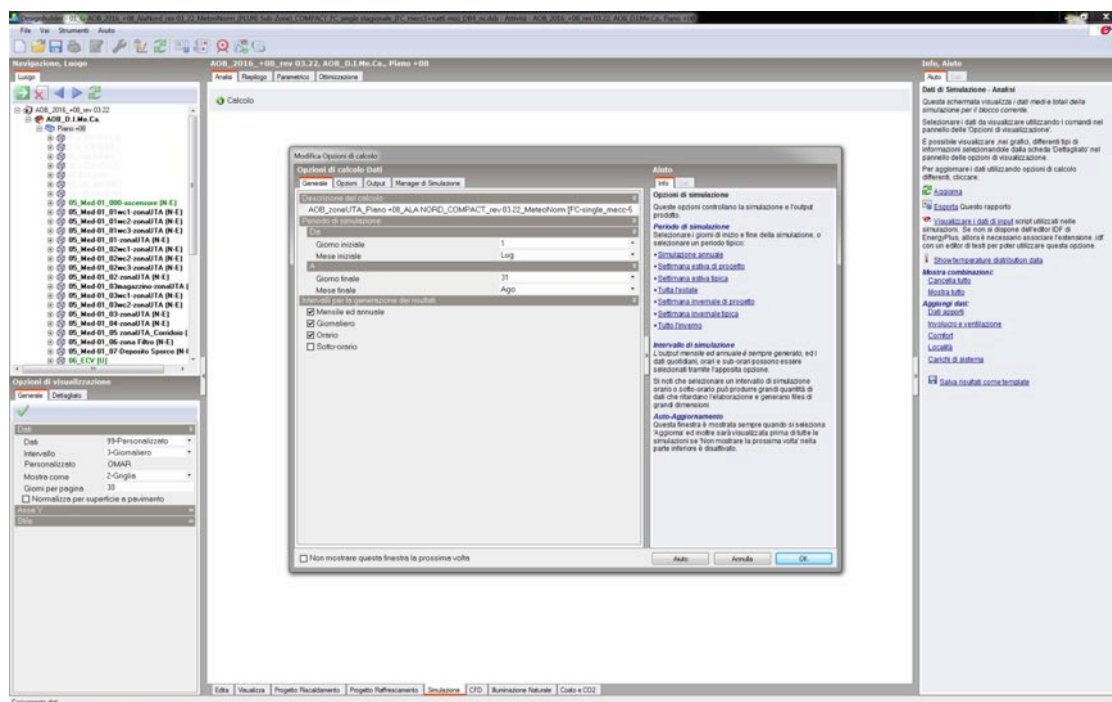


Figura 40 - Schermate del software DesignBuilder - “Simulazione”

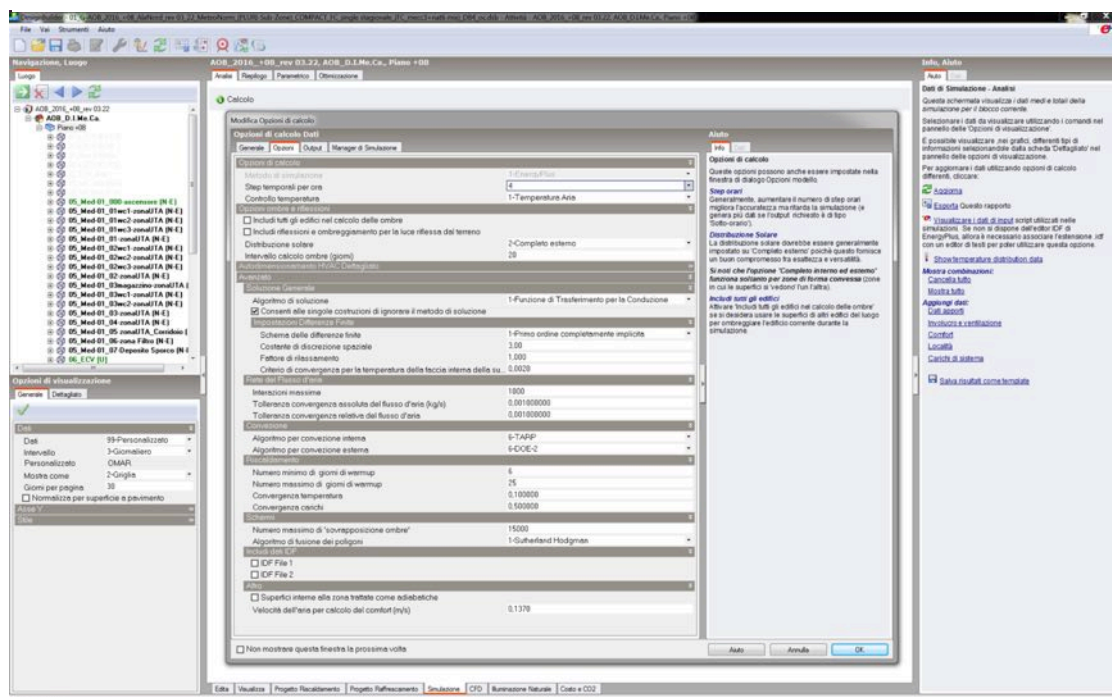
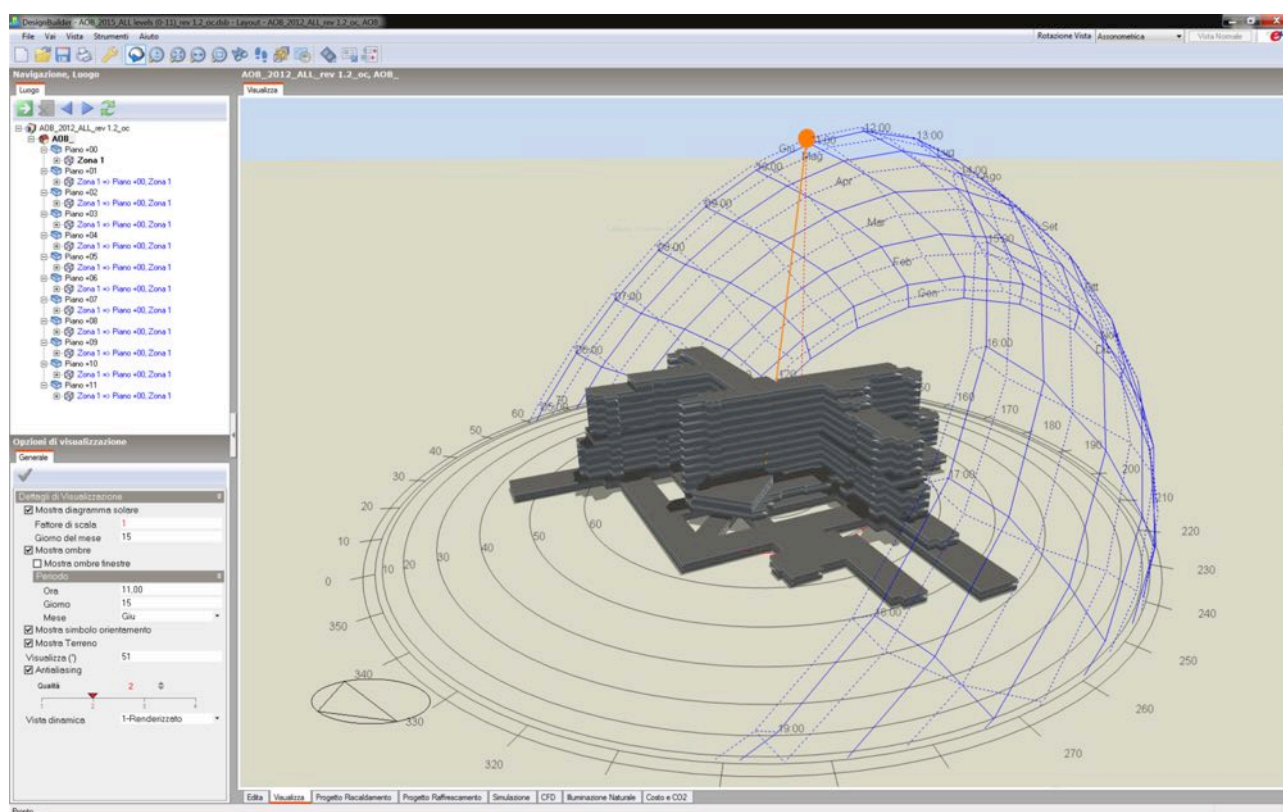


Figura 41 - Schermate del software DesignBuilder - “Simulazione”

Dopo aver inserito tutte le impostazioni relative alle opzioni di calcolo ed agli output desiderati, si è lanciata la simulazione. Dopo aver atteso l'elaborazione dei dati per un discreto arco di tempo, proporzionale non solamente alle richieste impostate in questa ultima fase di compilazione, ma, soprattutto, alla potenza di calcolo del PC utilizzato (a causa della complessità dell'edificio oggetto di studio), si sono ottenuti i risultati delle simulazioni dinamiche dell'A.O.B.



3.3.2 Parametri di input

In questo paragrafo sono definite le variabili di ingresso adottate, le quali sono necessarie per completare il modello e procedere con la simulazione:

1) File meteo

Condizioni meteo inserite nel modello con l'aiuto del software *Meteonorm*, il quale genera un file orario annuale basato su uno storico pluriennale.

2) Parametri relativi all'aria di rinnovo

Quantità dei volumi/ora (vol/h) di aria trattata con solo rinnovo (senza ricircolo), contemplando sia quella trattata con ventilazione naturale, che forzata. Il parametro in input utilizzato è stato desunto dalla Tabella 10, contenente i parametri di input della categoria di appartenenza della zona termica.

3) Parametri relativi ai set-point dei termostati ambiente (di zona)

Individuazione della massima escursione di temperatura prevista all'interno dell'ambiente. In questo modo non si distinguono delle impostazioni stagionali, legate al periodo invernale o estivo, ma si imposta un controllo sulle 24 ore per tutta la durata dell'anno. Si imposta, quindi, un *range* di temperatura nel modello, assegnando una minima temperatura di riscaldamento ed una massima temperatura in raffrescamento. La forbice di valori in input utilizzato è quello desunto dalla Tabella 10, contenente i parametri distinti per categoria di appartenenza della zona termica.

4) Parametri relativi ai set-point di umidità relativa di zona

Individuazione della massima escursione di umidità relativa prescritta all'interno dell'ambiente. In analogia alle impostazioni di temperatura di cui sopra, si imposta un controllo sulle 24 ore per tutta la durata dell'anno, individuando un *range* di valori di umidità, assegnando il valore di minimo in umidificazione, mentre il valore massimo in deumidificazione. La forbice di valori in input è quello desunto sempre dalla Tabella 10.

5) Parametri relativi agli apporti interni gratuiti

Per ciascuna zona termica, laddove previsto, si sono inseriti i valori relativi agli apporti gratuiti, definiti nella loro componente sensibile, convettiva, radiativa e latente, di cui si riportano i parametri nella tabella sottostante:

Apporti Interni	
equipment	persone
8,0 W/m ² (50% convettivo + 50% radiativo)	7,7 W/m ² (calore latente)

3.4 – Risultati delle simulazioni

Per poter rendere efficace il confronto tra i dati desunti dell'Energy Audit ed i risultati ottenuti dalle simulazioni dinamiche è stato necessario ri-elaborare ulteriormente entrambi i dati, in modo che il confronto fosse fatto con le medesime ipotesi di modellazione.

Nel modello implementato su TRNSYS, il calcolo del calore latente non considera le operazioni di sotto-raffreddamento e post-riscaldamento necessarie agli impianti reali per effettuare la deumidificazione degli ambienti. Questa quantità di calore (e di energia) è presente nei dati di diagnosi energetica, pertanto, è necessario effettuare una compensazione. Si è proceduto valutando quanta energia fosse necessaria per il post-riscaldamento non simulato, prendendo come riferimento il valore di riscaldamento rilevato nel mese di agosto (94'289 kWh). Su questa quantità di energia si è, quindi, calcolata la quantità di calore da sottrarre ai carichi di riscaldamento e raffrescamento nel periodo di raffrescamento (da Maggio a Ottobre), pesando opportunamente i valori ottenuti per non trascurare le variazioni mensili di carico frigorifero. Una nota importante è che l'umidificazione degli ambienti viene effettuata esclusivamente nei reparti critici dell'AOb, con sistemi alimentati ad energia elettrica, il cui consumo preciso non è stato possibile quantificare e scorporare. Pertanto, si è proceduto a sottrarre questa quota di calore latente, necessaria per l'umidificazione degli ambienti, dai valori ottenuti con le simulazioni dinamiche. Altra nota che occorre considerare è che nell'AOb sono presenti diversi sistemi di recupero del calore, i quali agiscono su diversi degli impianti di trattamento dell'aria primaria. Avendo riscontrato un utilizzo parziale di questi sistemi, si è stimata una prestazione di questi impianti considerando una quota di recupero pari a 1/10 del calore sensibile proveniente dalla ventilazione degli ambienti. Il calore recuperato è stato, quindi, sottratto al fabbisogno termico invernale ed al carico termico estivo, escludendo dal computo i mesi che vanno da Maggio a Ottobre per la stagione di riscaldamento ed i mesi da Novembre a Maggio per la stagione di raffrescamento.

I risultati delle simulazioni non tengono conto del funzionamento degli impianti e conseguentemente dei rendimenti di distribuzione, emissione e regolazione. Le misurazioni sono state effettuate a valle degli impianti di produzione dell'energia termica, per cui il rendimento di generazione è stato trascurato. Considerando le tipologie d'impianti

utilizzati nell'AOB ed i dati di letteratura utilizzati ^[6], sono stati ipotizzati i seguenti valori di rendimento:

- RENDIMENTO DI DISTRIBUZIONE: 90-95%
- RENDIMENTO DI EMISSIONE: 90-95%
- RENDIMENTO DI REGOLAZIONE: 94-98%

da cui deriva un rendimento globale che varia tra il 76-88%. Nello sviluppo dei calcoli è stato adottato il valore intermedio dell'82%. Tenendo conto di questo parametro, di conseguenza, è stata applicata una maggiorazione ai risultati ottenuti dalle simulazioni. A seguito di questa operazione, si può ritenere che il confronto tra i dati della Diagnosi Energetica ed i risultati ri-elaborati delle simulazioni siano più realistici e attendibili.

Confronto tra Energy Audit e Simulazione dinamica						
	RISCALDAMENTO			RAFFRESCAMENTO		
mese	Energy Audit	TRNSYS	DesignBuilder	Energy Audit	TRNSYS	DesignBuilder
Gennaio	1.058.870	1.456.302	1.169.576,32	78.081	15.083	19.726,76
Febbraio	953.676	1.272.398	1.029.499,20	58.600	14.928	12.376,72
Marzo	809.073	895.820	786.049,25	86.800	27.543	30.082,23
Aprile	501.257	484.260	542.978,62	177.802	90.223	117.491,20
Maggio	178.980	116.233	204.385,06	280.657	230.756	390.904,05
Giugno	54.789	5.493	56.922,36	780.172	461.040	980.024,85
Luglio	21.183	18	12.968,35	1.218.998	878.404	1.553.110,65
Agosto	-	9	462,24	1.361.680	1.104.374	1.645.523,20
Settembre	43.376	5.283	15.404,34	811.157	494.384	939.548,50
Ottobre	156.734	73.457	110.215,69	399.724	370.153	382.246,13
Novembre	441.674	612.503	713.509,56	230.473	150.693	275.235,40
Dicembre	954.006	1.265.800	1.186.258,86	76.587	34.980	53.505,50
TOTALE	5.173.618	6.187.576	5.828.229,85	5.560.731	3.872.561	6.399.775,18
differenza		16%	11%		30%	13%

Tabella 13 - Confronto tra Energy Audit e Simulazione dinamica.

Nel modello realizzato in ambiente DesignBuilder, la parte relativa ai sistemi HVAC (acronimo inglese per *Heating, Ventilation e Air Conditioning*, ovvero riscaldamento,

^[6] American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers ASHRAE, "Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs", ANSI/ASHRAE Standard 140.

ventilazione e condizionamento dell'aria) è stata gestita in maniera semplificata. In analogia con la logica adoperata nella modellazione con TRNSYS, si è scelto di adoperare, in questa fase del lavoro, la metodologia chiamata “*HVAC Compact*”, dove gli impianti tecnologici del sistema studiato sono stati calcolati in modo parametrico, ossia senza impostare dettagli sulle caratteristiche tecniche specifiche degli impianti, utilizzando un processo di *autosizing* (auto-dimensionamento).

A seguire sono riportati i grafici di confronto tra i dati dell'Energy Audit ed i risultati delle simulazioni dinamiche effettuate con i codici di calcolo TRNSYS e DesignBuilder.

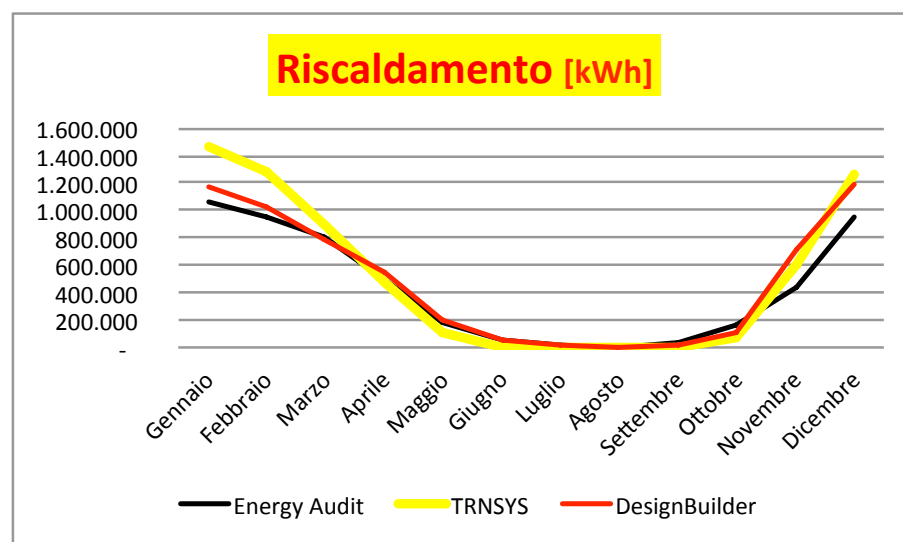


Grafico 1 - Confronto dell'andamento dei valori nella stagione di riscaldamento.

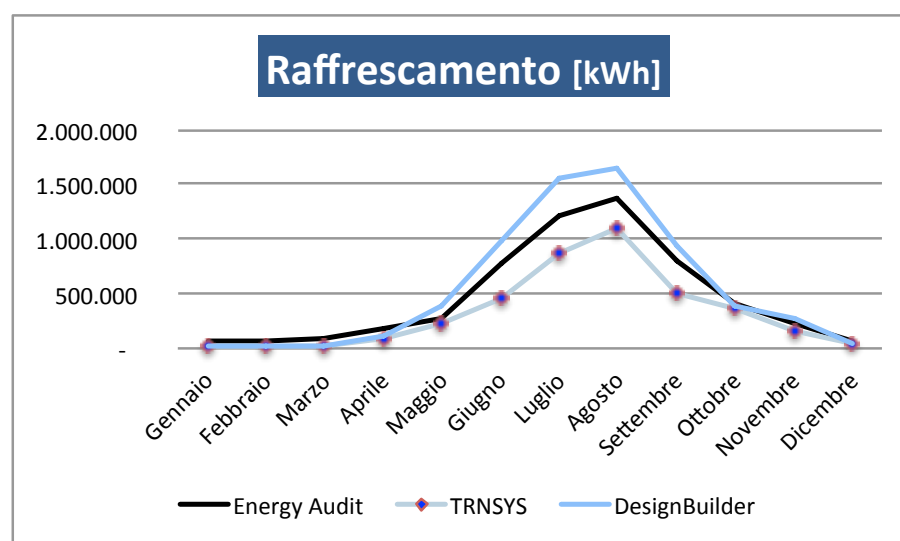


Grafico 2 - Confronto dell'andamento dei valori nella stagione di raffrescamento.

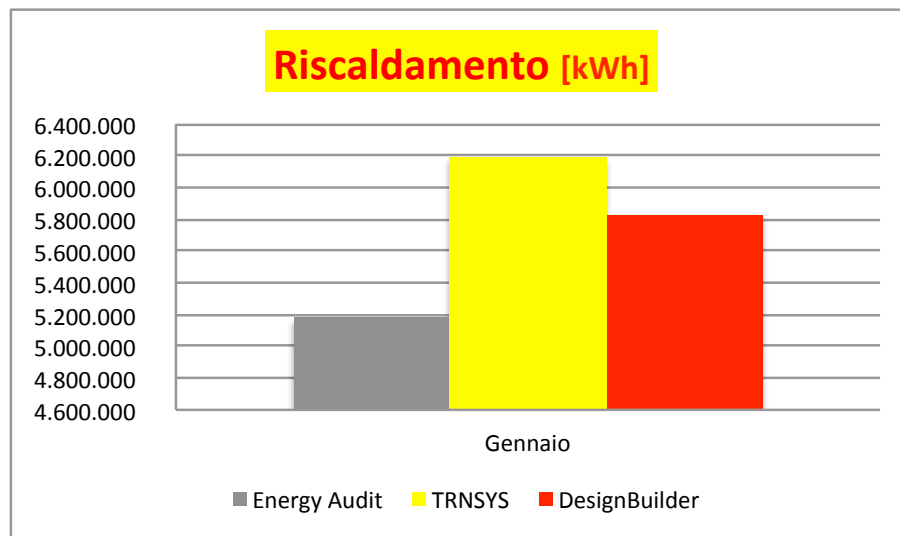


Grafico 3 - Confronto dei consumi termici annuali nella stagione di riscaldamento.

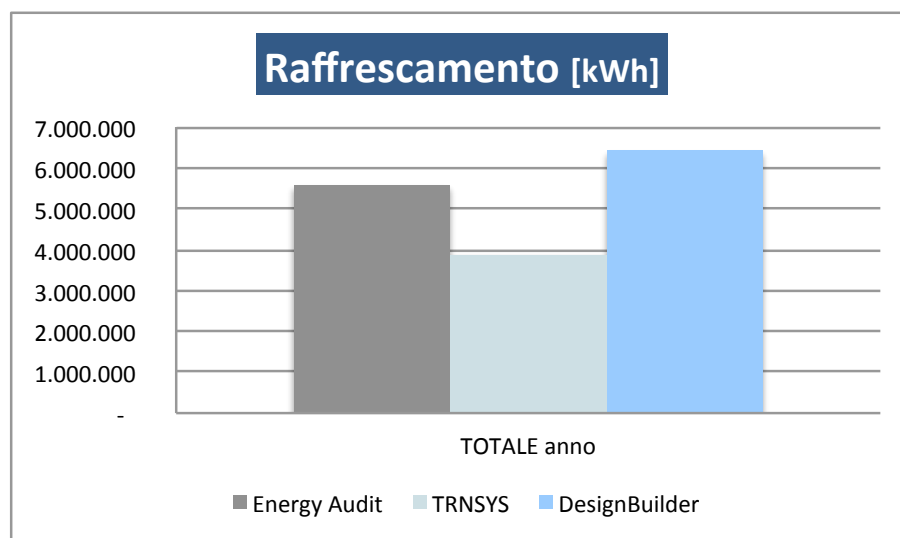


Grafico 4 - Confronto dei consumi termici annuali nella stagione di raffrescamento

3.4.1 Problematiche e considerazioni

Durante lo svolgimento delle attività oggetto della Diagnosi Energetica [1] si sono riscontrate diverse problematiche strettamente correlate all'assenza di un Energy Manager, che peraltro risultano ancora sussistenti. Tra le criticità ritenute importanti e significative ai fini della simulazione dinamica, sicuramente si annovera la effettiva pressoché totale assenza di sistemi di controllo dei parametri termo-igrometrici ambientali e di regolazione degli impianti tecnologici. I suddetti sistemi di controllo, quando presenti, sono risultati in molti casi non funzionanti, almeno nei reparti classificati "non critici". In base a quanto dichiarato dal personale strutturato dell'AOb, risultano invece installati dei sistemi di *building management* nei "reparti critici", anche se non è stato permesso un accesso *in situ* per effettuare una verifica dell'efficacia delle soluzioni esistenti. Avendo rilevato, inoltre, la mancanza di un sistema di monitoraggio dei consumi nella centrale frigorifera, in occasione del citato Progetto di Ricerca [1], si è provveduto all'installazione di un sistema ex novo, attualmente in esercizio. Pur avendo verificato la presenza di un sistema di contabilizzazione dell'energia termica, installato nella sotto-centrale termica, questo ha fornito dei dati estremamente frammentari, che hanno presentato diverse anomalie e carenze. La loro fruibilità ed utilità, quindi, si è dimostrata poco pratica ed efficace, poiché caratterizzata da una necessaria impegnativa analisi ed una inevitabile post-elaborazione, onerosa in termini di risorse e di tempo.

Data la complessità del sistema edificio-impianti dell'AOb e vista la difficoltà riscontrata nella sua modellazione e rappresentazione numerica, i risultati ottenuti con la simulazione dinamica possono considerarsi soddisfacenti. Il confronto tra i dati reali (Energy Audit) ed i risultati delle simulazioni ha mostrato comunque una differenza di circa il 30% sul totale complessivo, per cui, tra le principali cause responsabili, si riportano le seguenti:

- Le simulazioni dinamiche sono svolte imponendo per ogni zona termica le condizioni termo-igrometriche prescritte e contenute nel D.P.R. 14/01/97. Gli impianti tecnologici installati nell'AOb, al momento, non sono sempre in grado di garantire il mantenimento controllato di detti parametri termo-igrometrici: per esempio, la regolazione dei parametri di *set-point* è gestita manualmente (e non con un sistema automatizzato) in modo da garantire il servizio riferendosi all'utenza più gravosa, fornendo di conseguenza maggior energia anche nelle zone dove, magari, non è necessaria.

-
- La regolazione automatica delle condizioni termo-igrometriche ambientali è operativa solamente per gli ambienti classificati “critici”, ossia il blocco operatorio, la terapia intensiva, etc. ...
 - Una regolazione centralizzata, calibrata e strutturata per il sistema edificio-impianti dell’AOB non è al momento disponibile, per cui l’utenza regola localmente le temperature operando sui termostati dei ventilconvettori oppure agendo sui ricambi d’aria (di sovente con l’apertura delle finestre *ad libitum*).
 - La domanda di energia termica è quindi caratterizzata da fenomeni di sovrariscaldamento o sotto-raffrescamento, la cui causa è prevalentemente da imputare alla percezione soggettiva degli utenti.
 - Non è possibile stabilire quali siano le reali condizioni termo-igrometriche presenti nella quasi totalità degli edifici dell’Azienda Ospedaliera, rendendo molto critica la fase di modellazione e di simulazione dinamica (necessità di monitorare gli ambienti climatizzati).
 - In sede di Energy Audit si è rilevato un elevato numero di pompe di calore, *monosplit* di piccola potenza, installate senza un apparente criterio progettuale generale, le cui modalità di funzionamento sono fuori dal controllo dei referenti responsabili dell’Ufficio Tecnico, organo deputato al controllo della corretta gestione e manutenzione di tutti gli impianti tecnologici. Ciò influisce in modo significativo, quindi, sulla regolazione degli impianti, la quale è operata dall’Ufficio tecnico, che allo stato delle cose, rimane ignaro sulla condizione di funzionamento di dette pompe di calore.
 - Non avendo la possibilità di monitorare in modo globale ed integrato sia la quantità di energia (termica ed elettrica) utilizzata, che i parametri di *set-point* delle zone termiche come previsto dalla normativa vigente, si ritiene che la conduzione degli ambienti nelle modalità sopra descritte e l’utilizzo localizzato (abbastanza diffuso) di sistemi di climatizzazione, non coordinato con il sistema di climatizzazione centrale, siano tra le principali cause delle differenze riscontrate dal confronto tra l’energia misurata in sede di Audit e quella calcolata nelle simulazioni.

CAPITOLO 4

L'ATTIVITA' SPERIMENTALE E DI SIMULAZIONE SULL'VIII PIANO

In occasione del Progetto di Ricerca finanziato con Legge Regionale n. 7 del 2007 ^[1], è stata finanziata anche l'installazione di alcuni sistemi di monitoraggio dei flussi di energia dell'VIII piano dell'Azienda Ospedaliera e di diversi sensori in grado di rilevare e registrare i valori di temperatura e di umidità relativa in alcuni ambienti del reparto di Medicina Interna 1. Tale sistema di monitoraggio è stato posizionato in modo ponderato e strategico ai fini del lavoro di ricerca. Allo stato delle cose, si avrebbe la necessità di un ampliamento funzionale del sistema, ossia di poter disporre di ulteriori dispositivi per estendere le aree monitorate, e di un collegamento funzionale alla rete ethernet dell'Azienda a garanzia di una fruizione delle informazioni più duttile e meno soggetta a discontinuità di funzionamento. Il sistema di monitoraggio installato è stato oggetto fondamentale per condurre l'attività sperimentale sviluppata ed è stato un elemento importante e funzionale al lavoro svolto per la validazione dei risultati di simulazione dinamica.

Nel seguito di questo capitolo è illustrata la fase di modellazione eseguita sull'Ala Nord del Piano 8°, la quale, attrezzata per il monitoraggio dei dati termo-igrometrici degli ambienti e della domanda di energia termica di zona, ospita il reparto di Medicina Interna 1 dell'AOB. Nel paragrafo conclusivo del capitolo sono stati riportati ed illustrati i risultati ed i grafici del confronto tra i dati misurati ed i risultati delle simulazioni sviluppate in questa parte della ricerca.

Il lavoro eseguito in questa fase ha prodotto incoraggianti risultati ed interessanti spunti per il proseguo della ricerca, frutto del lavoro di comparazione iterativa tra i risultati ottenuti dalle diverse serie di simulazioni dinamiche sviluppate ed i dati monitorati al piano.

^[1] N. Mandas, F. V. Caredda, O. Caboni, S. La Croce, "Proposta di un sistema competitivo e flessibile per la riduzione del fabbisogno e l'ottimizzazione della gestione energetica dell'Azienda Ospedaliera G. Brotzu", Relazione Scientifica Finale, Progetto finanziato con Legge Regionale n. 7/2007, Università di Cagliari, Dicembre 2012

4.1 – Il monitoraggio dei dati energetici del reparto di “Medicina Interna 1”

A seguito di opportune analisi e valutazioni sulle possibili cause che stanno alla base delle differenze riscontrate tra l'Energy Audit ed i risultati ottenuti dalle simulazioni dinamiche, effettuate con il codice TRNSYS e con il software DesignBuilder, si è deciso di organizzare il monitoraggio dei dati energetici significativi di uno dei “Piano-tipo” individuati dell'AOb, in modo da poter disporre di misure che fossero funzionali all'ottenimento di una ottimale convergenza tra dati sperimentali e risultati delle simulazioni. Dato il limite di budget a disposizione e la particolare configurazione degli impianti di climatizzazione in esercizio, non si è potuto dotare di strumenti di misura tutto un piano dell'AOb, per cui si sono passati al vaglio tutti i reparti specialistici e le relative condizioni al contorno (non ultima, il nulla osta da parte del Primario, Responsabile di Unità Operativa). La scelta è ricaduta sul reparto di Medicina Interna 1 del Piano 8°.

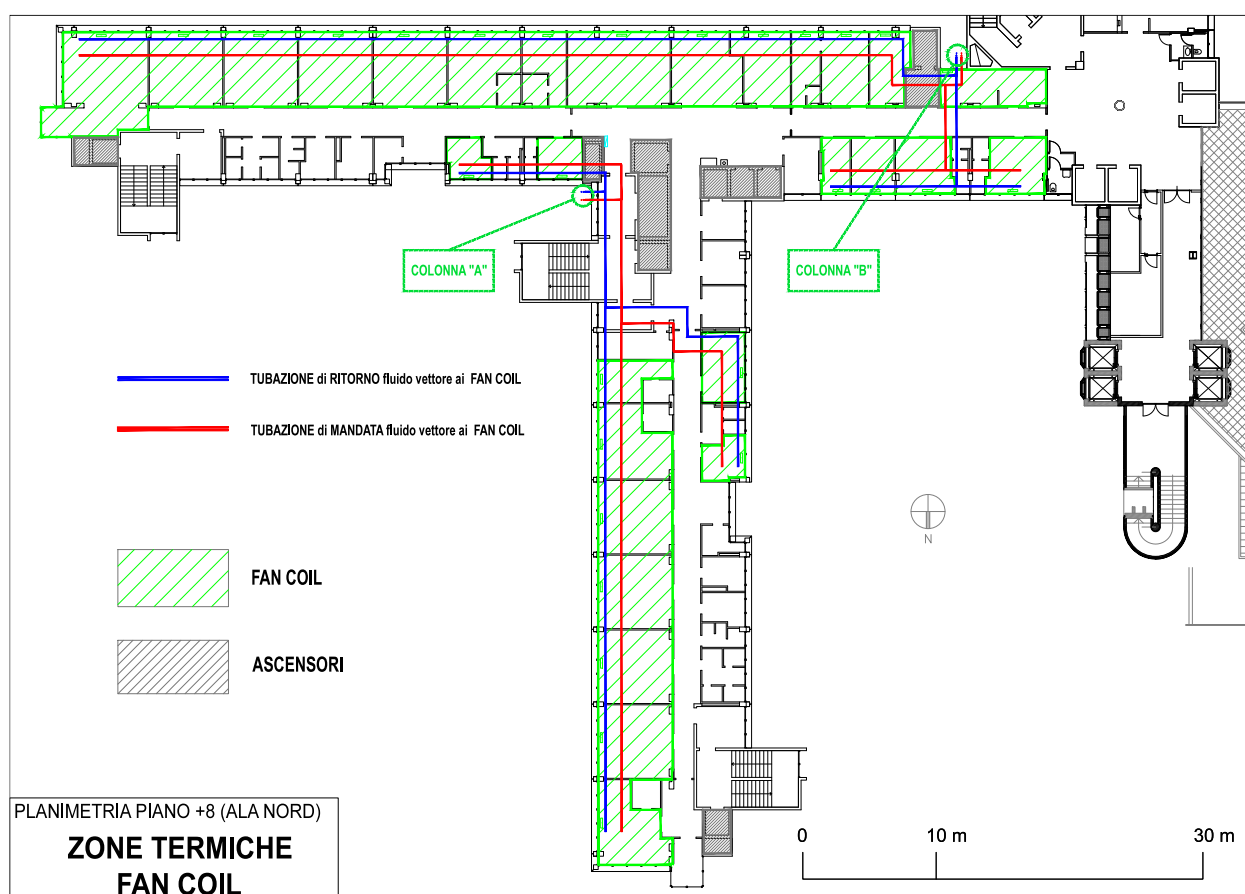


Figura 1 - Schema con individuazione degli ambienti asserviti dal sistema a Fan Coil

Una delle attività portate avanti durante il lavoro di ricerca del dottorato, quindi, è stata proprio la cura della corretta installazione dei misuratori di energia termica e la opportuna ubicazione dei sensori di temperatura e umidità relativa installati presso il reparto di

Medicina Interna 1, situato nell'Ala Nord del Piano 8° dell'edificio principale dell'Azienda Ospedaliera. Da quanto rilevato in sede di Diagnosi Energetica, infatti, il Piano 8° è asservito, in maniera simmetrica per ogni Ala del Piano, da due linee di adduzione di fluido vettore che alimentano i Fan Coil, da una linea per alimentare le UTA a 2 tubi e, inoltre, da tre colonne di adduzione destinate ad alimentare i radiatori. In realtà a questo piano risultano installati dei sistemi a recupero di calore MP3 della serie XRC (vedi Capitolo 3.2.2, Impianti di Erogazione), i quali dispongono di uno scambiatore aria-aria ad alta efficienza che consente un recupero di una frazione consistente del calore sensibile dell'aria estratta.

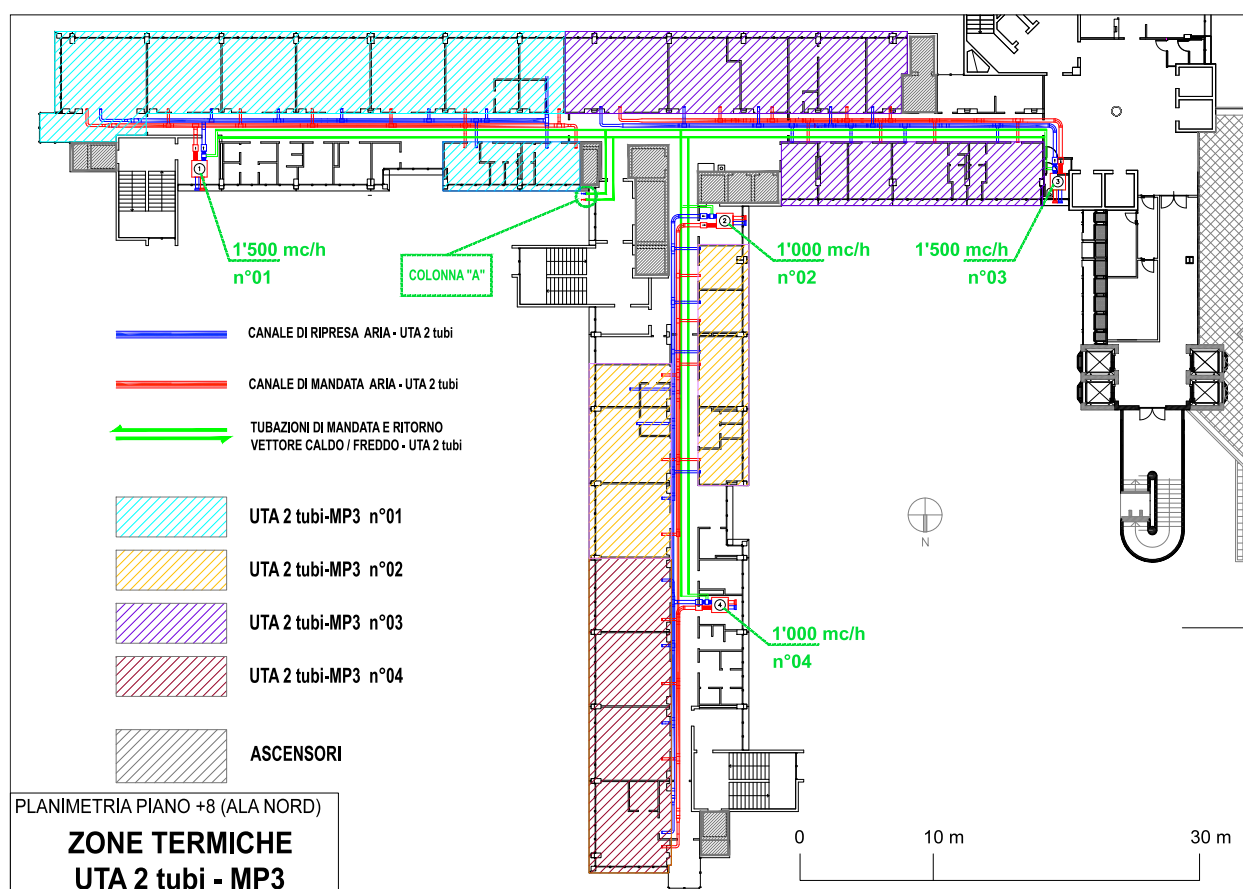


Figura 2 - Schema con individuazione degli ambienti asserviti dal sistema delle UTA a 2 tubi (MP3)

A seguito delle valutazioni fatte a valle della redazione della diagnosi energetica svolta ed a causa del già citato tetto di budget a disposizione, si è deciso di trascurare il monitoraggio delle colonne dei radiatori, provvedendo, quindi, a dotare ciascuna linea per Fan Coil e per UTA a 2 tubi di un misuratore volumetrico di portata e di un misuratore di energia. Per garantire un efficace supporto all'attività di simulazione dinamica, in sede di pianificazione strategica di questa attività di monitoraggio, è stato necessario valutare quale fosse la migliore ubicazione dei sensori di temperatura e di umidità relativa negli

ambienti asserviti da questi impianti, al fine di garantire l'acquisizione di tutti i dati relativi agli ambienti perimetrati come "zone termiche" nelle simulazioni dinamiche. La scelta è stata determinata, innanzitutto, dalle modalità di distribuzione e di funzionamento degli impianti rilevati in sede di audit (due tubazioni, una mandata e un ritorno), che comportano, allo stato delle cose, una gestione di tipo stagionale, con *switch* manuale per l'attivazione del servizio di riscaldamento oppure di raffreddamento. In ultima istanza, le modalità di erogazione del servizio di climatizzazione rilevato negli ambienti all'interno del reparto, hanno contribuito alla definizione della configurazione di installazione dei sensori, riportata nella seguente figura n°03. Una delle scelte strategiche citate in precedenza ha interessato, per esempio, il posizionamento dei sensori 174H della Testo, destinati alle misure di temperatura ed umidità relativa all'interno dei Servizi. La configurazione degli impianti in questi locali, infatti, non consente di poter garantire un controllo sui ricambi d'aria, come in realtà prescritto dalla vigente normativa.

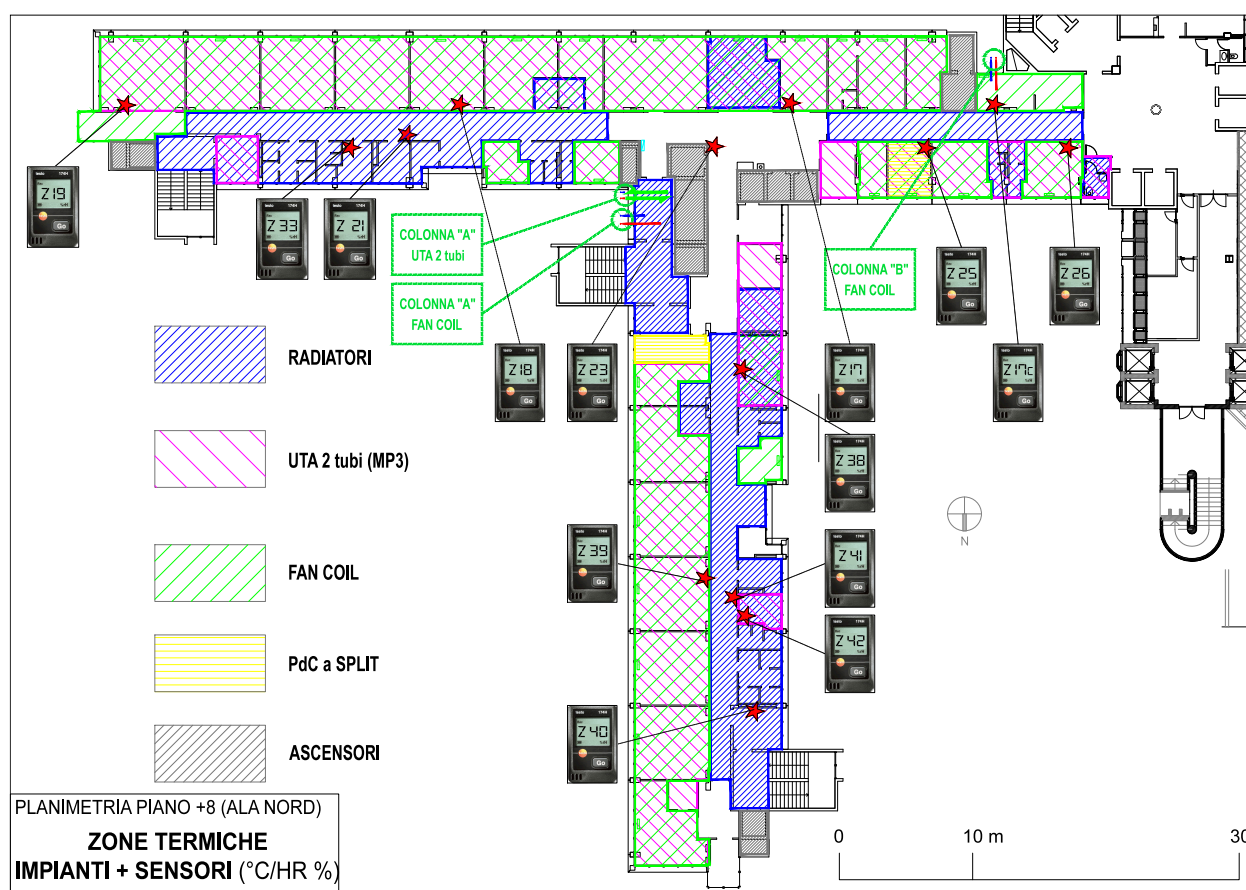


Figura 3 – Schema con individuazione delle zone termiche distinte per sistema di impianto, con ubicazione dei sensori di temperatura ed umidità relativa installati

L'ubicazione delle colonne di adduzione del fluido vettore e gli accorgimenti che è stato necessario prendere in sede di installazione dei misuratori di portata e temperatura, hanno

fatto sì che si optasse per l'installazione del *data-logger* e del misuratore di energia termica della "Colonna B" (una delle due linee di Fan Coil) all'interno della segreteria del reparto, mentre gli altri due misuratori di energia termica delle due "Colonne A" (altra linea Fan Coil e UTA a 2 tubi-MP3) sono stati installati nel vano dove trovano luogo gli ascensori e una delle scale dell'ala donne. Una volta installato e collaudato il sistema di monitoraggio così come appena descritto, un'altra importante fase di lavoro è stata quella di curare il *setting* del *data-logger* per coordinare l'acquisizione dei dati relativi alla domanda di energia proveniente dai tre diversi misuratori di energia termica installati nelle tre colonne di distribuzione (Fan Coil A e B, UTA a 2 tubi). Il *data-logger* è impostato per immagazzinare una lettura effettuata ogni 10 minuti e proveniente da ciascuno dei tre misuratori di energia termica della Watts.



Figura 4 – Immagini del Data-logger e del misuratore di energia termica installati presso la segreteria di reparto



Figura 5 – Immagini dell'ubicazione del *data-logger* e della modalità di accesso per la lettura dei dati.



Figura 6 - Immagini dei misuratori di portata e della scatola contenete i misuratori di energia termica.

Questa modalità di acquisizione causa, nell'arco di una decina di giorni, l'esaurimento della sua capacità di registrazione, dando come opzione la cancellazione del primo dato registrato in luogo dell'inserimento in memoria dell'ultima più recente lettura oppure il blocco della registrazione dei dati.

I sensori di temperatura e umidità relativa, invece, si sono dimostrati degli strumenti molto duttili e di facile gestione: una volta dotati di batteria ed avviata la fase di registrazione dei dati, avendo impostato una frequenza di acquisizione di 30 minuti, hanno la capacità di memorizzare fino ad 8'000 registrazioni, garantendo una continuità di esercizio di più di 160 giorni.



Figura 7 – Dettaglio della Figura 6.

4.1.1 Caratteristiche della strumentazione utilizzata per le campagne di misura

MISURATORI DI ENERGIA TERMICA

I misuratori installati sono della Watts Water Technologies EMEA, modello CAMICAL della serie CAM tipo compatto, completo di ingressi impulsivi per la lettura delle misure effettuate dai contatori volumici esterni e dotati di n°2 sonde di temperatura Pt500, PN25, filettate M10x1, effettuano la trasmissione dei dati mediante protocollo M-Bus, conforme alla normativa Europea EN1434-4.



Questi misuratori, adatti alla misura dell'energia termica in impianti (di riscaldamento e condizionamento) che utilizzano l'acqua come liquido termo-vettore, sono conformi MID (*Measuring Instruments Directive*) 2004/22/CE recepita in Italia con D.Lgs 22-02-2007 ed alla direttiva 2004/108/CE. I misuratori CAMICAL CAM2 sono dotati di display multifunzione (energia termica totalizzata, portata istantanea, temperatura di mandata e ritorno, segnalazioni diagnostiche, etc. ...) per la lettura dei consumi e dei parametri istantanei di funzionamento e misurano la differenza fra la temperatura di mandata e la temperatura di ritorno, moltiplicando questa differenza per la portata, in modo da ottenere la misura dell'energia ceduta e, quindi, utilizzata dall'utenza.

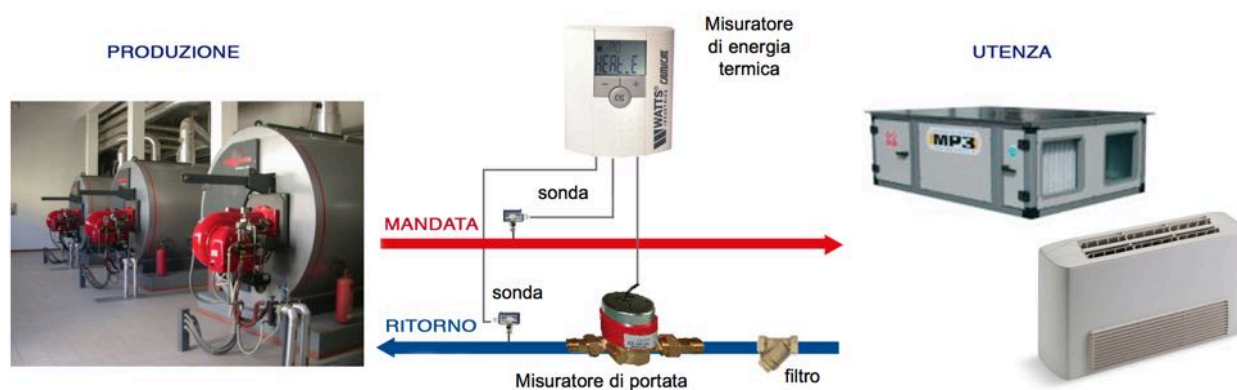


Figura 8 - Schema logico di collegamento dei dispositivi di misura dell'energia termica.

CONVERTITORE DI SEGNALE / REGISTRATORE DI DATI (DATA-LOGGER)

Il convertitore di segnale, concentratore e registratore di dati (*data-logger*) installato al Piano 8° è della azienda tedesca RELAY, specializzata nella realizzazione di dispositivi che utilizzano il sistema di trasmissione via cavo M-Bus (*Meter-Bus*), per la raccolta e la trasmissione a distanza dei dati forniti da contatori (acqua, gas, elettricità e calore). Il sistema M-Bus è un sistema *master-slave*, dove la comunicazione è controllata da un dispositivo centrale (*master*) per mezzo del quale si possono interrogare da 3 (come nel nostro caso) a 60 dispositivi contatori (*slave*) per raccogliere le informazioni richieste. Nello specifico, il sistema è regolamentato dalla norma europea EN 1434 (contatori di calore) - Parte 3: Scambio dati e interfacce, per cui i contatori dotati di protocollo M-Bus vengono rilevati e memorizzati automaticamente in una lista nella EEPROM installata sull'unità centrale.



Questo dispositivo *RELAY M-Bus Master W60 Datalogger* svolge, quindi, diverse funzioni in automatico: interroga in maniera ciclica i contatori memorizzati, una volta impostato l'intervallo di campionamento; memorizza i dati di lettura (*data-logger*); essendo dotato di display a cristalli liquidi e tastierino *on board* può essere interrogato in loco, senza altri dispositivi ausiliari. Mediante l'utilizzo dell'interfaccia RS232 è possibile, inoltre, sia la lettura diretta di tutti i contatori (*slave*), sia scaricare lo storico

Dati tecnici	Relay M-Bus Datalogger
Operating voltage	230VAC (opt. 110VAC), 50/60Hz
Power input	12W
Temperature range	0 .. 55 °C
M-Bus voltage	39V (mark, without load)
M-Bus quiescent current	max. 90mA (60 unit loads)
Overcurrent threshold	140mA
Internalbus resistance	approx. 15 ohm
Transmission speed	300 .. 9600 baud
Galvanic isolation	2.5kV (to the M-Bus)
Dimensioni	60x38x18,5mm
Housing	light-grey plastic protection type IP52 HxWxD: 71x165x175mm wall mounted, sealable
LED-state indicators	power, maximum load M-Bus, short circuit M-Bus
Control panel	4 key plastic-foil keyboard LCD with 2 lines a. 16 columns, illuminated
Interfaces	M-Bus, RS232, RS485
Screw terminals	M-Bus (3-times), RS485, RS232 (GND, TXD, RXD) power supply (L1, N, E)
Plug-in terminals	RS232 as 9-pin. DSUB-socket
Data memory	minimum 2000 telegrams

dei dati (letture) registrati in formato “.csv”, utilizzando una connessione ethernet oppure una connessione in remoto e un PC.

SENSORI DI TEMPERATURA E UMIDITÀ RELATIVA

I sensori di temperatura ed umidità relativa, installati nei diversi ambienti del reparto, sono della TESTO, modello 174H. Questi dispositivi compatti, in realtà, sono anche dei *data-logger* per temperatura e umidità a 2 canali, con sensore interno (NTC/sensore igrometrico capacitivo). Dispongono di un display ed un tasto *on board* al fine di consentire una rapida consultazione delle informazioni registrate dallo strumento, con la possibilità di fruire di una facile lettura dei dati e del loro trasferimento a PC attraverso l'interfaccia USB Testo in dotazione.

Dati tecnici	testo 174H
Sensore	NTC/ sen. igrometrico capacitivo
Canali	2 interni
Unità di misura	°C, °F, %UR
Campo di misura	da -20 a +70 °C interno da 0 a 100 %UR
Precisione ± 1 cifra	±0,5 °C (da -20 a +70 °C) ±3%UR(da2a98%UR)a+25°C +0,03 %UR/K
Risoluzione	0,1 °C, 0,1 %UR
Durata batteria (a +25 °C)	1 anno con misura ogni 15 min.
Temperatura funzionamento	da -20 a +70 °C
Temperatura stoccaggio	da -40 a +70 °C
Dimensioni	60x38x18,5mm
Tipo batteria	2 x CR 2032 Litio
Classe di protezione	IP 20
Ciclo di misura	1 min - 24 h
Memoria	16,000 letture
Software	ComSoft Basic 5 ComSoft Professional 4



Figura 9 - Installazione dei sensori 174H all'interno del corridoio del reparto di Medicina Interna 1 dell'A.OB.



Figura 10 - Installazione dei sensori 174H all'interno del bagno disabili del reparto di Medicina Interna 1 dell'A.OB.

4.1.2 Analisi ed elaborazione dei dati acquisiti. Problematiche e criticità.

Una volta entrati nel vivo dell'attività sperimentale, a seguito dell'installazione e del collaudo del sistema di monitoraggio, dopo aver effettuato la taratura delle impostazioni di lettura dei misuratori di energia e impostato la corretta acquisizione dei dati nel *data-logger*, è partita la campagna di misure dei dati di energia, temperatura ed umidità del reparto di Medicina Interna 1 dell'AOB. Rimane, però, un'importante operazione ancora da compiere per poter ritenere conclusa la partita delle installazioni, ossia la connessione del sistema di monitoraggio alla rete ethernet aziendale. A tutt'oggi l'operazione di raccolta dei dati



Figura 12 - Vista delle operazioni propedeutiche alla raccolta dei dati registrati dal *data-logger* installato nella segreteria del reparto.

è possibile solamente accedendo fisicamente presso la segreteria del reparto ed eseguendo le seguenti operazioni: chiedere la cortesia all'infermiera di turno di spostarsi dalla sua postazione di lavoro per almeno 20/25 minuti, posizionare una scala al posto della seduta della postazione di lavoro dell'infermiera di cui sopra, salire sulla scala per accedere alla scatola che alloggia il *data-logger* (e il misuratore di energia della "Colonna B" dei Fan Coil) posizionata a circa 3 metri di altezza, aprire (e mantenere aperta) detta scatola per consentire la connessione tra PC e *data-logger* per mezzo di un cavo seriale, di un dispositivo di interfaccia RS232 (*serial device server per ethernet*) e un cavo ethernet, scaricare nel PC i dati registrati dal *data-logger*, disconnettere la catena di cavi necessari per far dialogare *data-logger*, interfaccia RS232 e PC, richiudere la scatola che alloggia il *data-logger*, rimettere a posto la scala utilizzata per accedere alla citata scatola e riposizionare la seduta davanti alla scrivania dell'infermiera, che, quindi, può



Figura 11 – immagine del dispositivo di interfaccia RS232

riprendere possesso della sua postazione. Il rituale appena descritto, risulta un po' invasivo e poco agile, per cui ha comportato la necessità di concordare una programmazione delle nostre visite con il personale di reparto, che si è sempre dimostrato molto paziente, assolutamente disponibile e comprensivo nei nostri confronti. L'operazione di connessione del sistema di monitoraggio alla rete ethernet aziendale, pur non essendo stata ancora consentita, in quanto ritenuta non indispensabile, è da considerarsi, invece, di prioritaria importanza per le seguenti ragioni: si consentirebbe un agile ed efficace accesso in remoto alle informazioni monitorate per il proseguo dell'attività di ricerca, ma soprattutto si doterebbe anche il personale strutturato ed i referenti responsabili dell'Ufficio Tecnico dell'AOB (deputati al controllo della corretta gestione e manutenzione di tutti gli impianti tecnologici), di importanti e preziose informazioni sul funzionamento operativo di detti impianti. Nonostante le ripetute richieste, formali ed informali, di porre in essere la connessione del sistema di monitoraggio alla rete ethernet aziendale, pur avendo ricevuto rassicurazioni sulla fattibilità dell'operazione in tempi relativamente brevi, ad oggi ancora si deve procedere seguendo il rituale di raccolta dei dati sopra descritto, sperando di non abusare troppo della pazienza del Primario e del personale della segreteria del reparto. L'attività di monitoraggio e, quindi, di raccolta periodica *in situ* dei dati energetici e dei dati termo-igrometrici degli ambienti del reparto, è proseguita per diversi mesi, rilevando purtroppo molti inconvenienti. Avendo la necessità di rispettare il programma degli accessi al reparto per la raccolta dei dati, agli orari e con la frequenza concordata (salvo imprevisti e contrattempi non improbabili in un reparto specialistico di un ospedale), in occasione di anomalie di funzionamento del sistema di monitoraggio oppure di acquisizioni di dati non attendibili, ci si accorgeva tardivamente di dette singolarità. La suddetta situazione, le non poco frequenti anomalie di funzionamento degli impianti termici e/o elettrici, i numerosi interventi di manutenzione straordinaria effettuati sugli stessi in questo periodo di acquisizione dei dati, i ripetuti furti riscontrati, dapprima delle sole batterie, in seguito direttamente di alcuni dei dispositivi di misura di temperatura ed umidità relativa (modello 174H), hanno generato di sovente delle serie di dati incompleti, corrotti o danneggiati. Considerando di avere la necessità di disporre, per il medesimo periodo analizzato, di dati attendibili provenienti sia dal *data-logger* che dai sensori di temperatura ed umidità, ci si è trovati, sovente, nella situazione di disporre degli uni, ma non degli altri, purtroppo. Detto ciò, preso atto delle criticità generali esistenti nella gestione degli impianti deputati alla climatizzazione e nel controllo degli ambienti climatizzati (vedi paragrafo 3.4.1), vista la

situazione in essere sopra descritta (rituale per la collezione dei dati, accesso non frequente al reparto per il controllo del corretto svolgimento della campagna di monitoraggio, rilievo di serie anomale di dati, etc. ...), si è optato per individuare quelle serie di dati rilevati che potessero essere considerati attendibili. Si è valutato, inoltre, di cercare di disporre di dati misurati affidabili riferiti almeno ai mesi considerati significativi, ai fini del confronto con i risultati delle simulazioni. Ergo, avendo deciso di utilizzare dati reali rilevati in campo e non ricostruiti via software (a causa di lacune di registrazione o di anomalie), preso atto degli interventi di manutenzione straordinaria avvenuti presso l'AOB in occasione della stagione invernale, tenuto conto che il tempo a disposizione per il monitoraggio dei dati si stava contraendo in maniera significativa (e che sono avvenuti accadimenti imprevisti e imprevedibili presso l'AOB), a seguito di attente considerazioni fatte sugli impianti termici in esercizio presso il Piano 8° e sul loro sistema di

```
Data,Ora,Indir.Prim.,ID,Fabbr.,Nr,Valore,Unità,Descrizione,Tipo,Modulo,Posiz.,Tariffa
02.01.16.13:02,2,11000018,WAT,1,0.017,KWh,energy,instant.,0,0,0
02.01.16.13:02,2,11000018,WAT,2,0.05,m³,volume,instant.,0,0,0
02.01.16.13:02,2,11000018,WAT,3,0.05,m³,volume,instant.,1,0,0
02.01.16.13:02,2,11000018,WAT,4,23,°C,flow temperature,instant.,0,0,0
02.01.16.13:02,2,11000018,WAT,5,19,°C,return temperature,instant.,0,0,0
02.01.16.13:02,2,11000018,WAT,6,3.7,K,temperature difference,instant.,0,0,0
02.01.16.13:02,2,11000018,WAT,7,2164,hours,on time,instant.,0,0,0
02.01.16.13:02,2,11000018,WAT,8,1615,hours,operating time,instant.,0,0,0
02.01.16.13:02,2,11000018,WAT,9,0,l/h,volume flow,instant.,0,0,0
02.01.16.13:02,2,11000018,WAT,10,0.00,Kw,power,instant.,0,0,0
02.01.16.13:02,2,11000018,WAT,11,02.01.13 13:50 Win V,time point,instant.,0,0,0
02.01.16.13:02,2,11000018,WAT,12,2,HCA,HCA-Unit,instant.,1,0,0
02.01.16.13:02,2,11000018,WAT,13,0,HCA,HCA-Unit,instant.,2,0,0
02.01.16.13:02,2,11000018,WAT,14,0,HCA,HCA-Unit,instant.,3,0,0
02.01.16.13:02,2,11000018,WAT,15,0.111,KWh,energy,instant.,1,0,0
02.01.16.13:02,2,11000018,WAT,15,500,"",State M-Bus,"",0,0,0
02.01.16.13:02,3,11000028,WAT,1,4672.984,KWh,energy,instant.,0,0,0
02.01.16.13:02,3,11000028,WAT,2,3153.95,m³,volume,instant.,0,0,0
02.01.16.13:02,3,11000028,WAT,3,3153.88,m³,volume,instant.,1,0,0
02.01.16.13:02,3,11000028,WAT,4,46,°C,flow temperature,instant.,0,0,0
02.01.16.13:02,3,11000028,WAT,5,45,°C,return temperature,instant.,0,0,0
02.01.16.13:02,3,11000028,WAT,6,2.5,K,temperature difference,instant.,0,0,0
02.01.16.13:02,3,11000028,WAT,7,2164,hours,on time,instant.,0,0,0
02.01.16.13:02,3,11000028,WAT,8,1540,hours,operating time,instant.,0,0,0
02.01.16.13:02,3,11000028,WAT,9,2070,l/h,volume flow,instant.,0,0,0
02.01.16.13:02,3,11000028,WAT,10,1.11,Kw,power,instant.,0,0,0
02.01.16.13:02,3,11000028,WAT,11,02.01.13 13:50 Win V,time point,instant.,0,0,0
02.01.16.13:02,3,11000028,WAT,12,262,HCA,HCA-Unit,instant.,1,0,0
02.01.16.13:02,3,11000028,WAT,13,0,HCA,HCA-Unit,instant.,2,0,0
02.01.16.13:02,3,11000028,WAT,14,0,HCA,HCA-Unit,instant.,3,0,0
02.01.16.13:02,3,11000028,WAT,15,0.006,KWh,energy,instant.,1,0,0
02.01.16.13:02,3,11000028,WAT,15,500,"",State M-Bus,"",0,0,0
02.01.16.13:02,1,11000033,WAT,1,6978.576,KWh,energy,instant.,0,0,0
02.01.16.13:02,1,11000033,WAT,2,2746.83,m³,volume,instant.,0,0,0
02.01.16.13:02,1,11000033,WAT,3,2745.87,m³,volume,instant.,1,0,0
02.01.16.13:02,1,11000033,WAT,4,46,°C,flow temperature,instant.,0,0,0
02.01.16.13:02,1,11000033,WAT,5,45,°C,return temperature,instant.,0,0,0
02.01.16.13:02,1,11000033,WAT,6,1.2,K,temperature difference,instant.,0,0,0
02.01.16.13:02,1,11000033,WAT,7,2164,hours,on time,instant.,0,0,0
02.01.16.13:02,1,11000033,WAT,8,1614,hours,operating time,instant.,0,0,0
02.01.16.13:02,1,11000033,WAT,9,1765,l/h,volume flow,instant.,0,0,0
02.01.16.13:02,1,11000033,WAT,10,2.65,Kw,power,instant.,0,0,0
02.01.16.13:02,1,11000033,WAT,11,02.01.13 13:50 Win V,time point,instant.,0,0,0
02.01.16.13:02,1,11000033,WAT,12,2582,HCA,HCA-Unit,instant.,1,0,0
02.01.16.13:02,1,11000033,WAT,13,0,HCA,HCA-Unit,instant.,2,0,0
02.01.16.13:02,1,11000033,WAT,14,0,HCA,HCA-Unit,instant.,3,0,0
02.01.16.13:02,1,11000033,WAT,15,0.009,KWh,energy,instant.,1,0,0
```

Figura 13 - Esempio file di output del data-logger

distribuzione e di erogazione, si è deciso di prendere in considerazione, per il successivo confronto con i risultati delle simulazioni, i dati registrati relativi ai mesi di Luglio e Agosto.

Accertata la disponibilità e la validità delle serie di dati dei mesi selezionati, si è proceduto all'armonizzazione degli stessi. Le informazioni registrate dal dispositivo *Relay M-Bus data-logger*, infatti, hanno una frequenza di campionamento di 6 *time step* e sono le seguenti: temperatura di mandata e di ritorno del fluido vettore, portata volumica ed energia termica erogata. I dati termometrici rilevati dai sensori di temperatura e di umidità relativa, *modello 174H* della *Testo*, invece, hanno una frequenza di campionamento di 2 *time step*. Questa

id	Data/Ora	ZONA 17C [°C]	ZONA 17C [%HR]
1	16/08/15 - 8.00.00	23.00	52.10
2	16/08/15 - 8.15.00	23.80	57.50
3	16/08/15 - 8.30.00	24.70	59.20
4	16/08/15 - 8.45.00	25.00	57.60
5	16/08/15 - 9.00.00	25.60	65.20
6	16/08/15 - 9.15.00	25.00	58.90
7	16/08/15 - 9.30.00	24.70	57.10
8	16/08/15 - 9.45.00	25.90	67.80
9	16/08/15 - 10.00.00	25.50	63.10
10	16/08/15 - 10.15.00	24.80	64.70
11	16/08/15 - 10.30.00	24.70	65.10
12	16/08/15 - 10.45.00	24.70	65.50
13	16/08/15 - 11.00.00	24.70	63.90
14	16/08/15 - 11.15.00	24.70	62.80
15	16/08/15 - 11.30.00	24.80	61.80
16	16/08/15 - 11.45.00	24.80	60.70
17	16/08/15 - 12.00.00	24.80	60.20
18	16/08/15 - 12.15.00	24.90	59.50
19	16/08/15 - 12.30.00	25.10	58.40
20	16/08/15 - 12.45.00	25.30	58.60
21	16/08/15 - 13.00.00	25.50	58.80
22	16/08/15 - 13.15.00	25.70	63.30
23	16/08/15 - 13.30.00	25.60	58.90
24	16/08/15 - 13.45.00	25.50	60.80
25	16/08/15 - 14.00.00	25.50	61.70
26	16/08/15 - 14.15.00	25.30	61.20
27	16/08/15 - 14.30.00	25.20	60.40
28	16/08/15 - 14.45.00	25.10	60.50
29	16/08/15 - 15.00.00	25.00	61.00
30	16/08/15 - 15.15.00	24.90	61.80

Figura 14 - Esempio file di output dei sensori Testo -174H.

disarmonia di frequenze di campionamento, ha reso necessario costruire un programma in ambiente Matlab, in grado di effettuare una integrazione oraria dei dati misurati, al fine di poter disporre di dati omogenei da confrontare con gli output orari delle simulazioni.

4.1.3 Grafici degli output ottenuti dalle integrazioni orarie dei dati del monitoraggio

In questo paragrafo sono riportati i grafici restituiti utilizzando le serie complete di dati raccolte nei mesi monitorati ed elaborate con integrazione oraria per mezzo dell'utilizzo del codice realizzato in ambiente Matlab.

Mese di Luglio

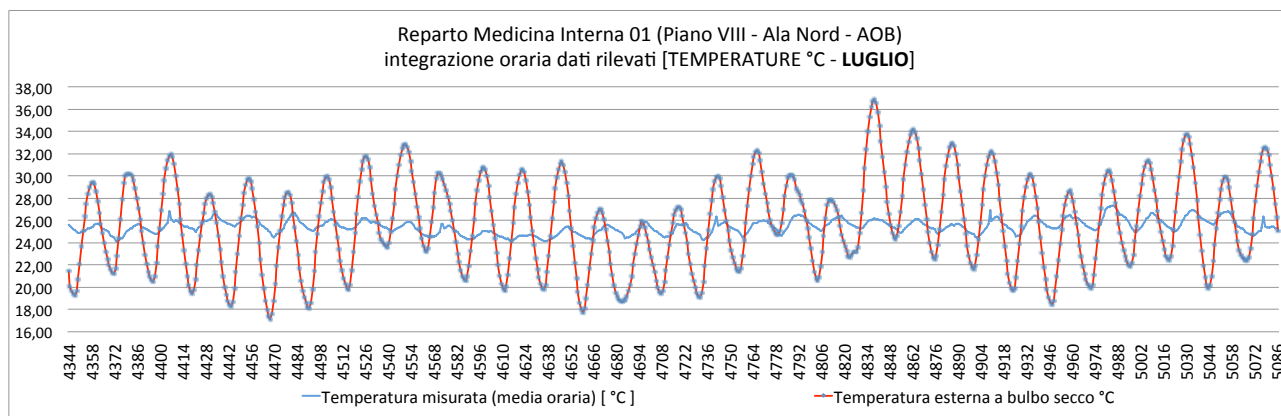


Figura 15 - Grafico della temperatura media oraria rilevata.

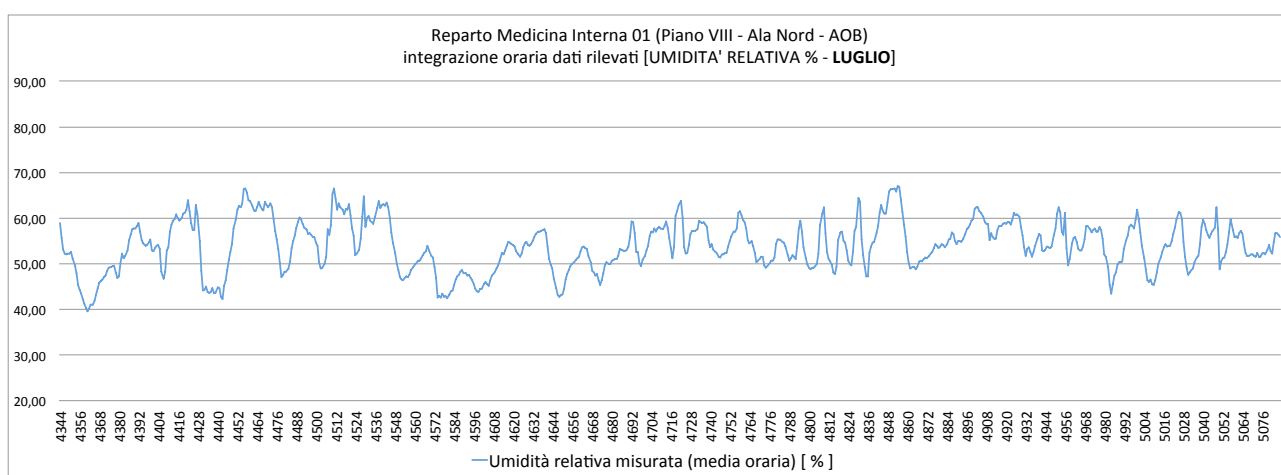


Figura 16 - Grafico dell'umidità relativa media oraria rilevata.

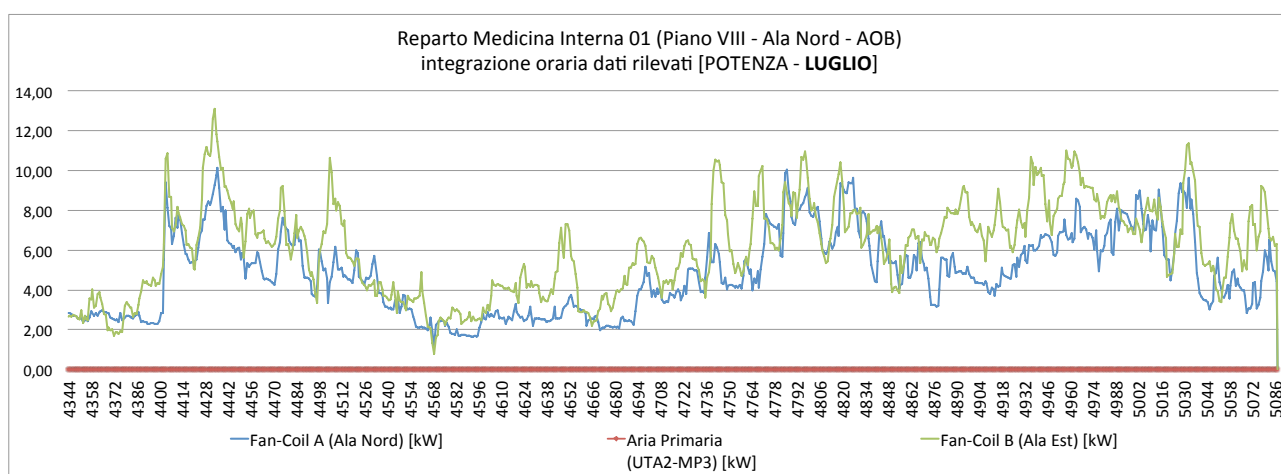


Figura 17 - Grafico della potenza media oraria rilevata.

LUGLIO		Time	Fan-Coil A (Ala Nord)	Aria Primaria (UTA2-MP3)	Fan-Coil B (Ala Est)	Potenza misurata (media oraria)
giorno	ora	n°	[kW]	[kW]	[kW]	[kW]
1	1	4344	2,84	0,00	2,63	5,47
	2	4345	2,82	0,00	2,69	5,51
	3	4346	2,79	0,00	2,65	5,44
	4	4347	2,68	0,00	2,75	5,43
	5	4348	2,69	0,00	2,71	5,40
	6	4349	2,64	0,00	2,64	5,28
	7	4350	2,54	0,00	2,55	5,09
	8	4351	2,56	0,00	2,53	5,09
	9	4352	2,58	0,00	2,98	5,56
	10	4353	2,37	0,00	2,35	4,71
	11	4354	2,48	0,00	2,68	5,16
	12	4355	2,67	0,00	2,57	5,25
	13	4356	2,44	0,00	2,48	4,92
	14	4357	2,62	0,00	3,55	6,17
	15	4358	2,91	0,00	3,50	6,40
	16	4359	2,86	0,00	4,02	6,87
	17	4360	2,68	0,00	3,12	5,81
	18	4361	2,86	0,00	3,19	6,05
	19	4362	2,68	0,00	3,80	6,48
	20	4363	2,88	0,00	3,90	6,77
	21	4364	2,92	0,00	3,60	6,52
	22	4365	2,96	0,00	3,28	6,24
	23	4366	2,89	0,00	2,77	5,66
	24	4367	2,90	0,00	2,76	5,66
2	1	4368	2,84	0,00	1,98	4,81
	2	4369	2,83	0,00	2,10	4,93
	3	4370	2,62	0,00	1,97	4,59
	4	4371	2,56	0,00	2,02	4,58
	5	4372	2,51	0,00	1,71	4,22
	6	4373	2,47	0,00	1,87	4,34
	7	4374	2,52	0,00	1,87	4,39
	8	4375	2,37	0,00	1,79	4,16
	9	4376	2,85	0,00	1,94	4,79
	10	4377	2,49	0,00	1,88	4,36
	11	4378	2,58	0,00	2,80	5,38
	12	4379	2,63	0,00	3,19	5,82
	13	4380	2,70	0,00	3,37	6,07
	14	4381	2,72	0,00	3,25	5,96
	15	4382	2,66	0,00	3,10	5,76
	16	4383	2,60	0,00	3,12	5,72
	17	4384	2,55	0,00	2,67	5,22
	18	4385	2,68	0,00	2,82	5,49
	19	4386	2,76	0,00	2,77	5,53
	20	4387	2,88	0,00	3,23	6,11
	21	4388	2,72	0,00	3,55	6,27
	22	4389	2,40	0,00	3,95	6,36
	23	4390	2,42	0,00	4,46	6,88
	24	4391	2,37	0,00	4,34	6,71
3	1	4392	2,40	0,00	4,45	6,85
	2	4393	2,27	0,00	4,31	6,58
	3	4394	2,30	0,00	4,24	6,53
	4	4395	2,34	0,00	4,22	6,56
	5	4396	2,35	0,00	4,63	6,98
	6	4397	2,30	0,00	4,46	6,76
	7	4398	2,29	0,00	4,20	6,49
	8	4399	2,27	0,00	4,34	6,61
	9	4400	2,44	0,00	4,29	6,73
	10	4401	2,86	0,00	4,80	7,66
	11	4402	2,83	0,00	5,15	7,99
	12	4403	5,55	0,00	6,31	11,86
	13	4404	9,40	0,00	10,61	20,00
	14	4405	8,15	0,00	10,88	19,03
	15	4406	7,22	0,00	8,68	15,91
	16	4407	7,06	0,00	8,66	15,73
	17	4408	6,31	0,00	7,14	13,45
	18	4409	6,70	0,00	6,93	13,63
	19	4410	7,62	0,00	7,27	14,89
	20	4411	7,14	0,00	8,19	15,32
	21	4412	7,79	0,00	7,90	15,68
	22	4413	7,52	0,00	7,62	15,14
	23	4414	6,85	0,00	7,29	14,13
	24	4415	6,24	0,00	7,22	13,46

29	1	5016	8,18	0,00	8,17	16,36
	2	5017	7,15	0,00	7,43	14,58
	3	5018	5,74	0,00	6,96	12,70
	4	5019	5,57	0,00	6,58	12,14
	5	5020	5,52	0,00	4,64	10,16
	6	5021	5,55	0,00	4,76	10,30
	7	5022	4,48	0,00	4,81	9,28
	8	5023	5,01	0,00	4,85	9,86
	9	5024	5,84	0,00	5,79	11,63
	10	5025	6,80	0,00	6,79	13,60
	11	5026	7,48	0,00	6,15	13,63
	12	5027	8,87	0,00	6,15	15,02
	13	5028	9,36	0,00	7,04	16,40
	14	5029	8,90	0,00	6,81	15,71
	15	5030	8,99	0,00	9,37	18,35
	16	5031	8,84	0,00	10,02	18,86
	17	5032	8,15	0,00	11,27	19,42
	18	5033	9,64	0,00	11,39	21,03
	19	5034	8,08	0,00	10,32	18,40
	20	5035	8,56	0,00	10,40	18,96
	21	5036	7,79	0,00	9,95	17,75
	22	5037	6,44	0,00	9,48	15,92
	23	5038	4,85	0,00	7,75	12,60
	24	5039	4,58	0,00	7,24	11,81
30	1	5040	3,84	0,00	7,16	11,00
	2	5041	3,65	0,00	5,86	9,51
	3	5042	3,50	0,00	5,31	8,81
	4	5043	3,49	0,00	5,23	8,72
	5	5044	3,46	0,00	5,24	8,70
	6	5045	3,40	0,00	5,31	8,71
	7	5046	3,02	0,00	5,46	8,47
	8	5047	3,29	0,00	4,93	8,22
	9	5048	3,44	0,00	5,20	8,64
	10	5049	4,71	0,00	5,01	9,72
	11	5050	4,84	0,00	4,09	8,93
	12	5051	5,60	0,00	3,92	9,52
	13	5052	4,38	0,00	3,43	7,80
	14	5053	4,06	0,00	3,41	7,47
	15	5054	3,65	0,00	3,95	7,60
	16	5055	3,61	0,00	4,63	8,24
	17	5056	3,86	0,00	4,61	8,47
	18	5057	4,25	0,00	5,69	9,94
	19	5058	3,59	0,00	6,64	10,23
	20	5059	4,21	0,00	7,35	11,56
	21	5060	4,88	0,00	7,80	12,67
	22	5061	5,02	0,00	6,99	12,01
	23	5062	4,21	0,00	6,57	10,78
	24	5063	4,56	0,00	6,57	11,13
31	1	5064	4,26	0,00	6,33	10,59
	2	5065	4,10	0,00	5,94	10,03
	3	5066	3,97	0,00	4,94	8,90
	4	5067	3,97	0,00	5,47	9,44
	5	5068	3,71	0,00	5,23	8,94
	6	5069	2,82	0,00	5,01	7,83
	7	5070	3,08	0,00	7,44	10,52
	8	5071	3,08	0,00	8,19	11,26
	9	5072	3,28	0,00	8,28	11,56
	10	5073	4,36	0,00	7,29	11,64
	11	5074	4,38	0,00	7,30	11,68
	12	5075	3,06	0,00	5,98	9,04
	13	5076	3,25	0,00	6,65	9,90
	14	5077	3,61	0,00	6,93	10,54
	15	5078	4,44	0,00	9,23	13,66
	16	5079	4,95	0,00	9,16	14,10
	17	5080	5,96	0,00	8,89	14,85
	18	5081	5,68	0,00	8,01	13,69
	19	5082	5,00	0,00	7,08	12,09
	20	5083	6,54	0,00	6,60	13,14
	21	5084	5,42	0,00	6,50	11,92
	22	5085	4,98	0,00	6,67	11,65
	23	5086	4,92	0,00	6,20	11,12
	24	5087	4,45	0,00	6,32	10,77

LUGLIO		Time	Fan-Coil A (Ala Nord)	Aria Primaria (UTA2-MP3)	Fan-Coil B (Ala Est)	Potenza misurata (media oraria)
giorno	ora	n°	[kW]	[kW]	[kW]	[kW]

Figura 18 - Esempio di elaborazione dei dati di potenza, distinti per misuratore di energia.

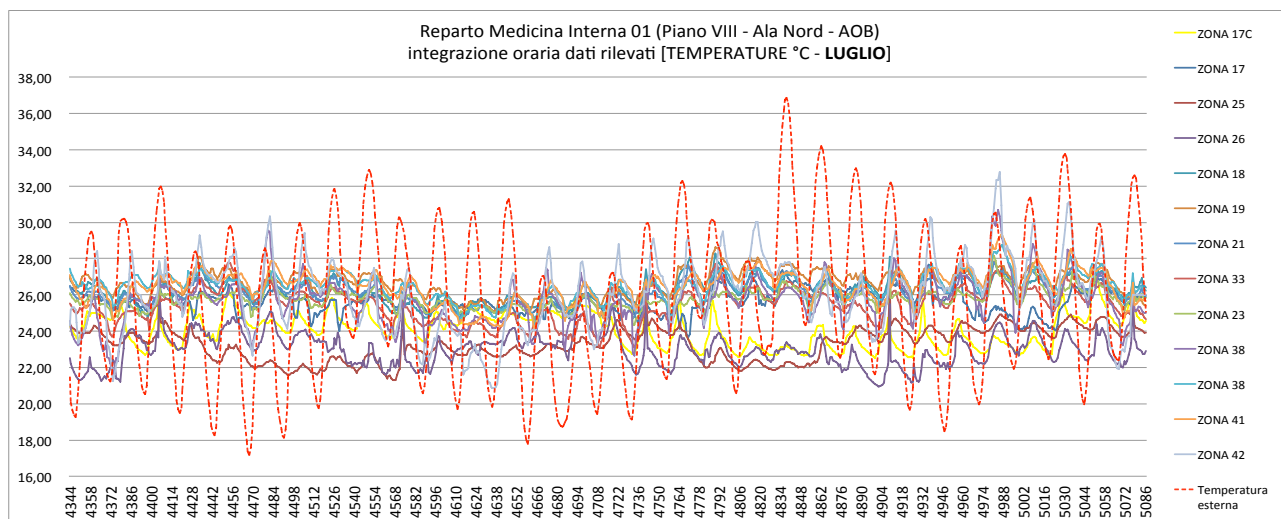


Figura 19 - Grafico delle temperature medie orarie rilevate da ogni sensore di zona.

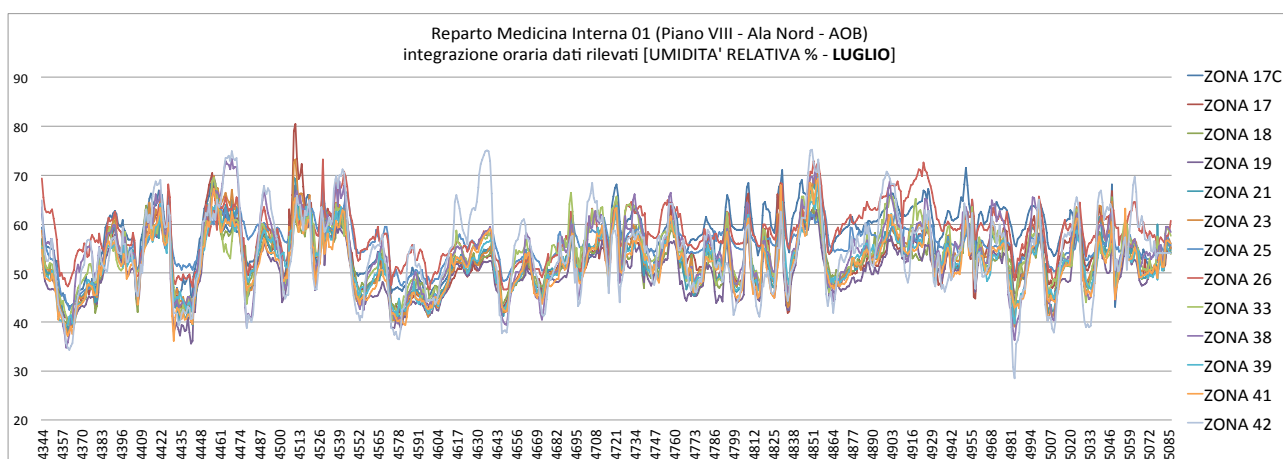


Figura 20 - Grafico delle umidità relative medie orarie rilevate da ogni sensore di zona.

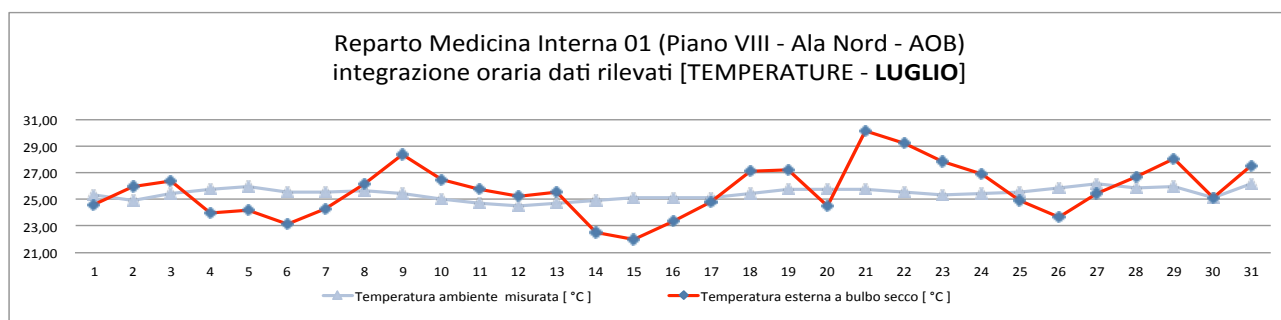


Figura 21 - Grafico della temperatura media giornaliera rilevata.

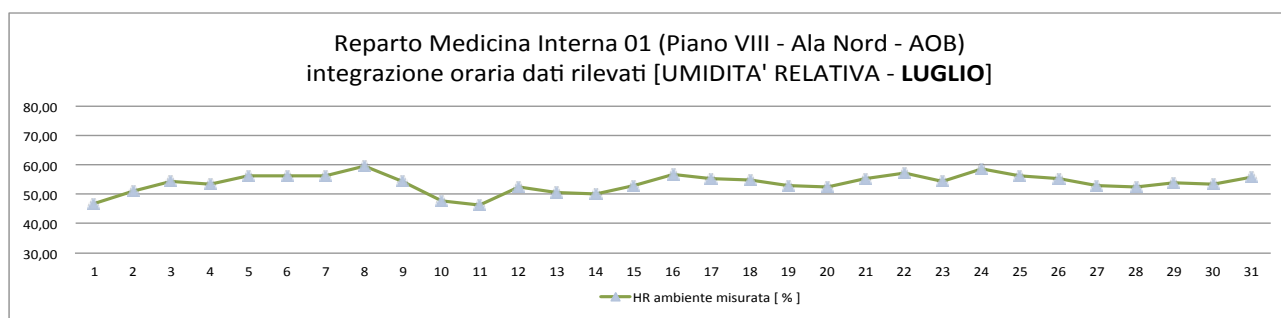


Figura 22 - Grafico dell'umidità relativa media giornaliera rilevata.

LUGLIO		time step	ZONA 17C	ZONA 17	ZONA 25	ZONA 26	ZONA 18	ZONA 19	ZONA 21	ZONA 33	ZONA 23	ZONA 38	ZONA 39	ZONA 41	ZONA 42	Temperatura misurata (media oraria)
giorno	ora	n°	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
1	1	4344	24,35	26,50	24,40	22,50	26,95	27,00	26,50	25,55	26,10	24,55	27,45	27,10	24,30	25,63
	2	4345	24,20	26,40	24,30	22,20	26,75	26,85	26,30	25,45	26,00	24,15	27,25	26,90	25,20	25,53
	3	4346	24,05	26,35	24,20	21,95	26,65	26,65	26,15	25,25	25,85	23,80	27,05	26,70	25,30	25,38
	4	4347	23,85	26,25	24,15	21,75	26,45	26,55	26,00	25,10	25,75	23,55	26,85	26,45	25,30	25,23
	5	4348	23,75	26,20	24,05	21,55	26,35	26,45	25,90	25,00	25,60	23,40	26,70	26,30	25,20	25,11
	6	4349	23,60	26,15	24,00	21,45	26,25	26,40	25,85	24,95	25,70	23,35	26,60	26,15	24,50	25,00
	7	4350	23,55	26,10	23,90	21,35	26,20	26,40	25,80	25,05	25,65	23,20	26,45	26,10	23,35	24,85
	8	4351	23,70	26,10	23,90	21,30	26,10	26,60	25,80	25,25	25,45	23,30	26,50	25,80	23,45	24,87
	9	4352	24,05	26,10	23,90	21,35	26,05	26,90	25,85	25,20	25,55	23,60	26,50	25,80	24,20	25,00
	10	4353	24,35	26,05	23,85	21,40	26,15	27,00	25,90	25,25	25,70	23,65	26,70	25,60	24,10	25,05
	11	4354	23,95	25,95	23,90	21,45	26,25	27,05	25,90	25,30	25,55	23,90	26,60	25,55	23,95	25,02
	12	4355	24,75	26,00	23,90	21,65	26,35	27,15	26,00	25,40	25,65	24,20	26,55	25,25	24,20	25,16
	13	4356	25,10	26,00	23,90	21,75	26,60	27,10	26,20	25,40	25,75	24,55	26,30	25,30	24,55	25,27
	14	4357	25,05	25,80	23,90	21,80	26,70	27,10	26,20	25,40	25,85	24,75	26,30	25,60	24,75	25,32
	15	4358	24,85	25,70	23,90	22,55	26,65	26,95	26,20	25,45	25,95	25,10	26,35	25,70	25,10	25,42
	16	4359	25,00	25,60	24,05	22,00	26,60	26,85	26,15	25,50	25,85	25,55	26,40	25,75	25,75	25,47
	17	4360	25,00	25,80	24,20	21,90	26,60	26,85	26,20	25,50	25,80	26,00	26,55	26,00	26,65	25,62
	18	4361	25,00	25,85	24,30	21,90	26,50	26,80	26,15	25,40	25,90	26,15	26,65	26,25	27,60	25,73
	19	4362	25,00	25,90	24,25	21,80	26,50	26,80	26,20	25,25	25,80	25,55	26,85	26,50	28,25	25,74
	20	4363	24,95	25,85	24,20	21,70	26,55	26,80	26,20	25,20	25,80	24,75	26,95	26,60	28,40	25,69
	21	4364	24,90	26,00	24,10	21,60	26,45	26,80	26,15	25,20	25,80	24,45	26,90	26,65	27,40	25,57
	22	4365	24,90	25,80	23,95	21,45	26,30	26,65	25,95	25,05	25,45	23,75	26,85	26,40	26,25	25,29
	23	4366	24,85	25,65	23,90	21,25	26,15	26,70	25,90	25,00	25,50	23,25	26,75	26,45	26,15	25,19
	24	4367	24,80	25,75	23,80	21,40	26,05	26,50	25,80	24,90	25,50	22,90	26,65	26,35	25,95	25,10

Figura 23 - Esempio di elaborazione dei dati di temperatura, distinti per zona termica rilevata.

LUGLIO	Energia termica misurata	Temperatura ambiente misurata	HR ambiente misurata	Temperatura esterna a bulbo secco
giorno	kWh	[°C]	[%]	[°C]
01	136,91	25,30	46,93	24,63
02	128,43	24,96	50,93	25,97
03	273,96	25,48	54,57	26,34
04	390,84	25,80	53,61	24,00
05	322,76	25,94	56,32	24,15
06	306,59	25,56	56,58	23,10
07	277,11	25,59	56,48	24,31
08	237,65	25,68	59,56	26,17
09	160,78	25,44	54,64	28,36
10	112,89	25,01	47,78	26,54
11	121,07	24,72	46,28	25,77
12	165,70	24,51	52,58	25,28
13	186,53	24,72	50,59	25,58
14	134,68	24,95	50,03	22,56
15	199,79	25,11	53,13	21,96
16	215,20	25,12	57,08	23,39
17	284,89	25,16	55,24	24,79
18	284,30	25,43	54,86	27,11
19	385,80	25,74	53,21	27,22
20	359,25	25,78	52,80	24,50
21	337,73	25,76	55,64	30,09
22	263,43	25,56	57,09	29,25
23	288,56	25,37	54,30	27,80
24	280,97	25,42	58,73	26,91
25	327,68	25,56	56,22	24,95
26	384,70	25,86	55,37	23,70
27	366,21	26,21	52,92	25,42
28	363,92	25,90	52,80	26,73
29	354,48	25,98	53,97	28,07
30	226,80	25,18	53,29	25,13
31	268,86	26,14	55,98	27,48
TOTALE	8.148,44	25,45	53,86	

AGOSTO	Energia termica misurata	Temperatura ambiente misurata	HR ambiente misurata	Temperatura esterna a bulbo secco
giorno	kWh	°C	%	°C
01	258,34	25,33	62,87	25,65
02	258,95	25,62	65,98	25,04
03	338,86	25,59	64,93	23,41
04	346,63	25,68	63,78	22,45
05	299,64	25,73	62,50	24,48
06	257,80	25,86	62,96	24,14
07	214,19	25,96	67,98	22,96
08	297,57	25,87	82,39	24,45
09	377,38	25,99	72,38	23,79
10	430,69	25,60	62,10	25,34
11	547,77	25,48	64,90	27,32
12	378,88	25,60	67,18	27,77
13	458,31	25,47	65,13	25,78
14	343,73	25,60	64,05	27,91
15	316,03	25,28	54,72	26,54
16	249,98	24,79	64,21	26,29
17	242,87	24,61	63,06	28,62
18	323,70	24,35	61,10	29,83
19	390,02	24,35	59,51	30,50
20	444,41	24,89	62,70	29,22
21	425,52	25,09	65,40	26,96
22	449,66	24,91	61,72	24,88
23	251,90	24,97	61,12	25,19
24	231,66	25,08	58,20	26,08
25	265,79	24,60	61,76	28,34
26	250,24	24,66	63,00	26,74
27	266,65	25,13	64,89	28,13
28	417,66	25,55	61,70	27,58
29	391,66	25,80	63,01	25,95
30	321,34	25,33	67,68	28,93
31	330,45	25,35	68,02	27,08
TOTALE	10.378,27	25,29	64,22	

Figura 24 – Tabelle riassuntive dei dati monitorati nel mese di Luglio e Agosto.

Mese di Agosto

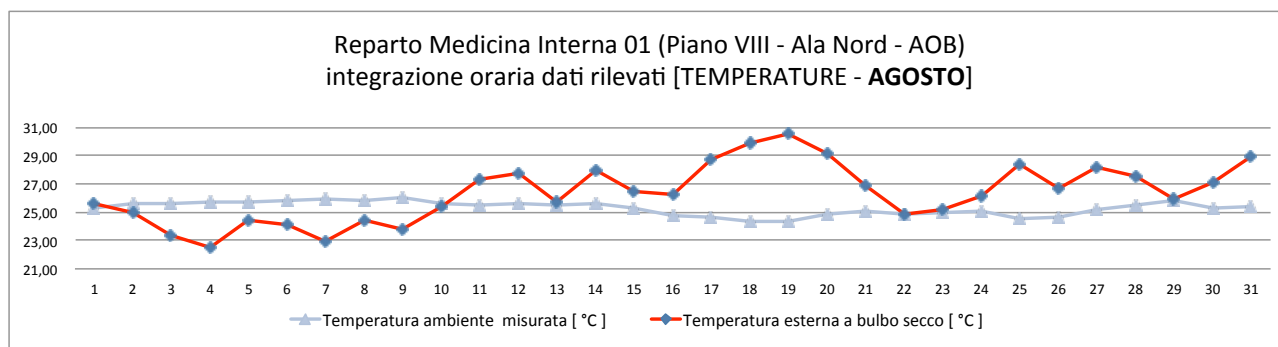


Figura 25 - Grafico della temperatura media oraria rilevata

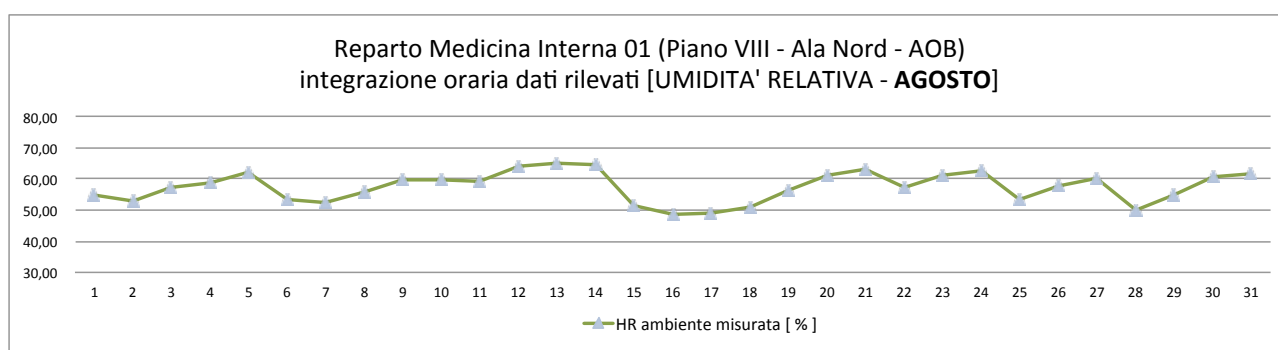


Figura 26 - Grafico della umidità relativa media oraria rilevata

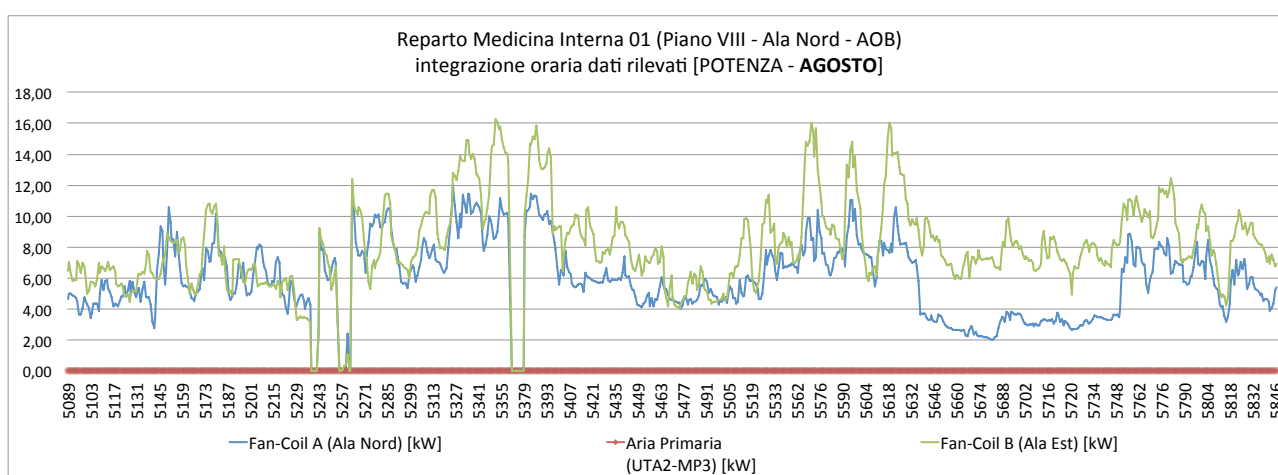


Figura 27 - Grafico della potenza media oraria rilevata

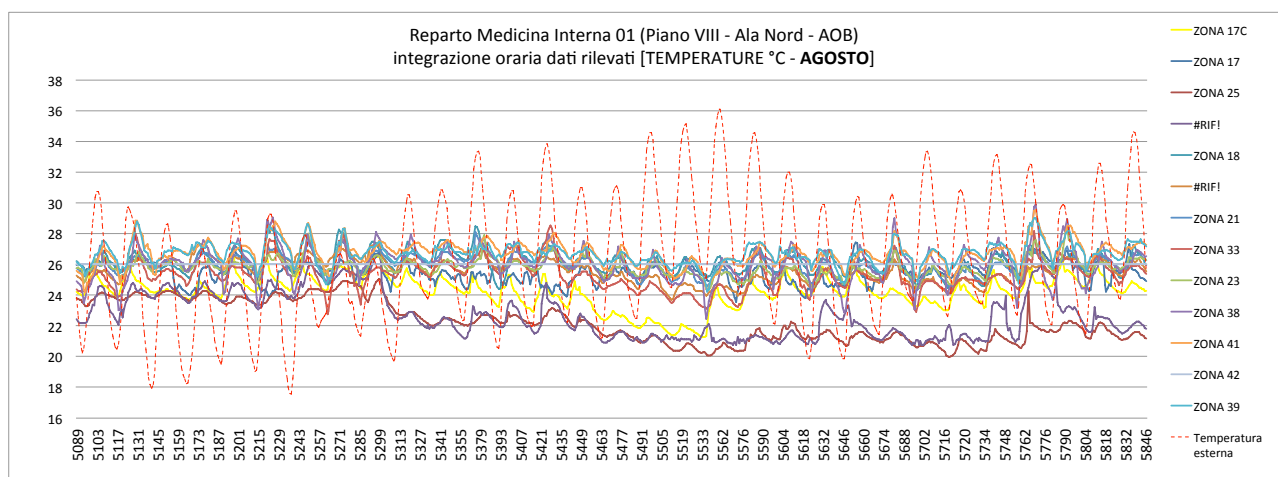


Figura 28 - Grafico delle temperature medie orarie rilevate da ogni sensore di zona.

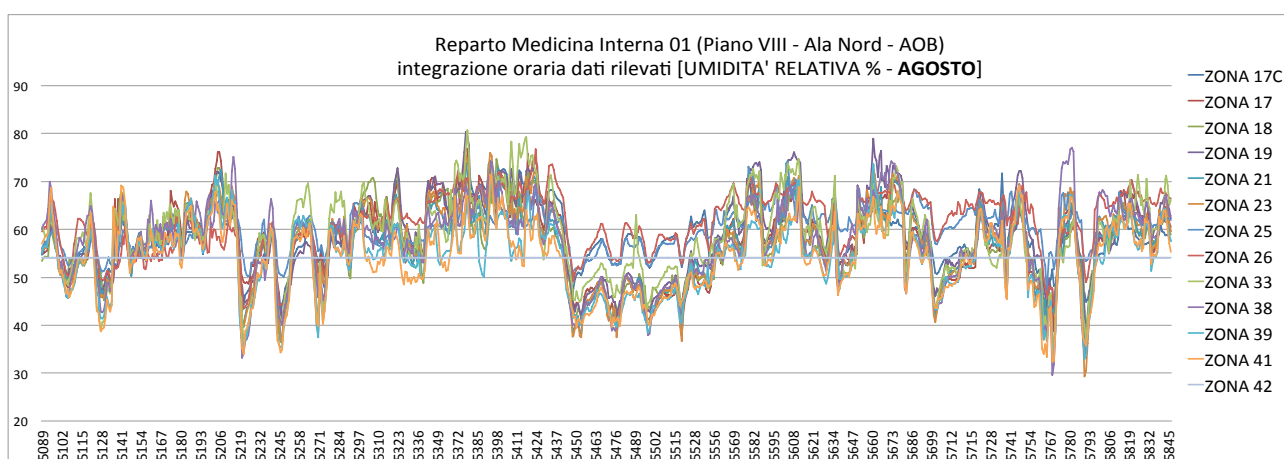


Figura 29 - Grafico delle umidità relative medie orarie rilevate da ogni sensore di zona.

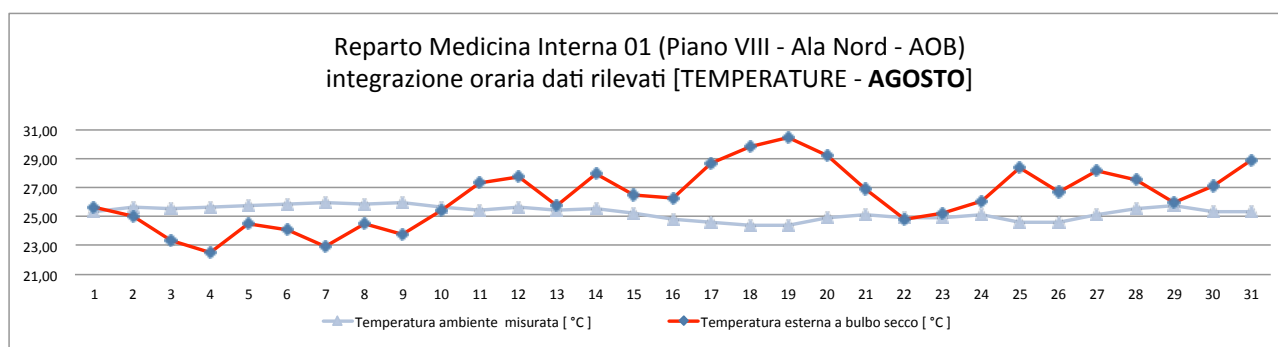


Figura 30 Grafico della temperatura media giornaliera rilevata.

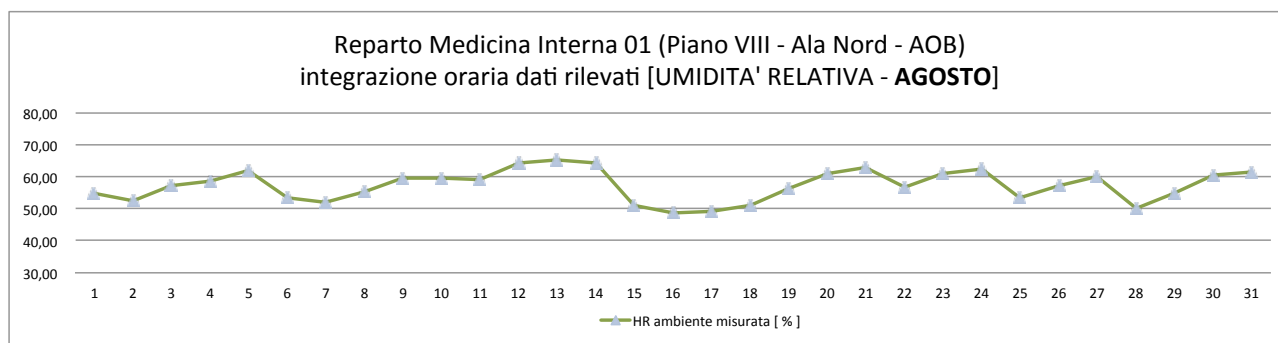


Figura 31 - Grafico della umidità relativa media giornaliera rilevata.

Si riporta di seguito un esempio delle schermate dei grafici restituiti con Matlab, dei dati riferiti ai mesi di Luglio e Agosto 2014, scaricati dal *data-logger M-Bus* della *Relay*, provenienti dai tre misuratori di energia termica modello *CAMICAL* della *Watts*, installati nelle colonne di distribuzione del reparto di Medicina Interna 1, sito all'VIII piano:

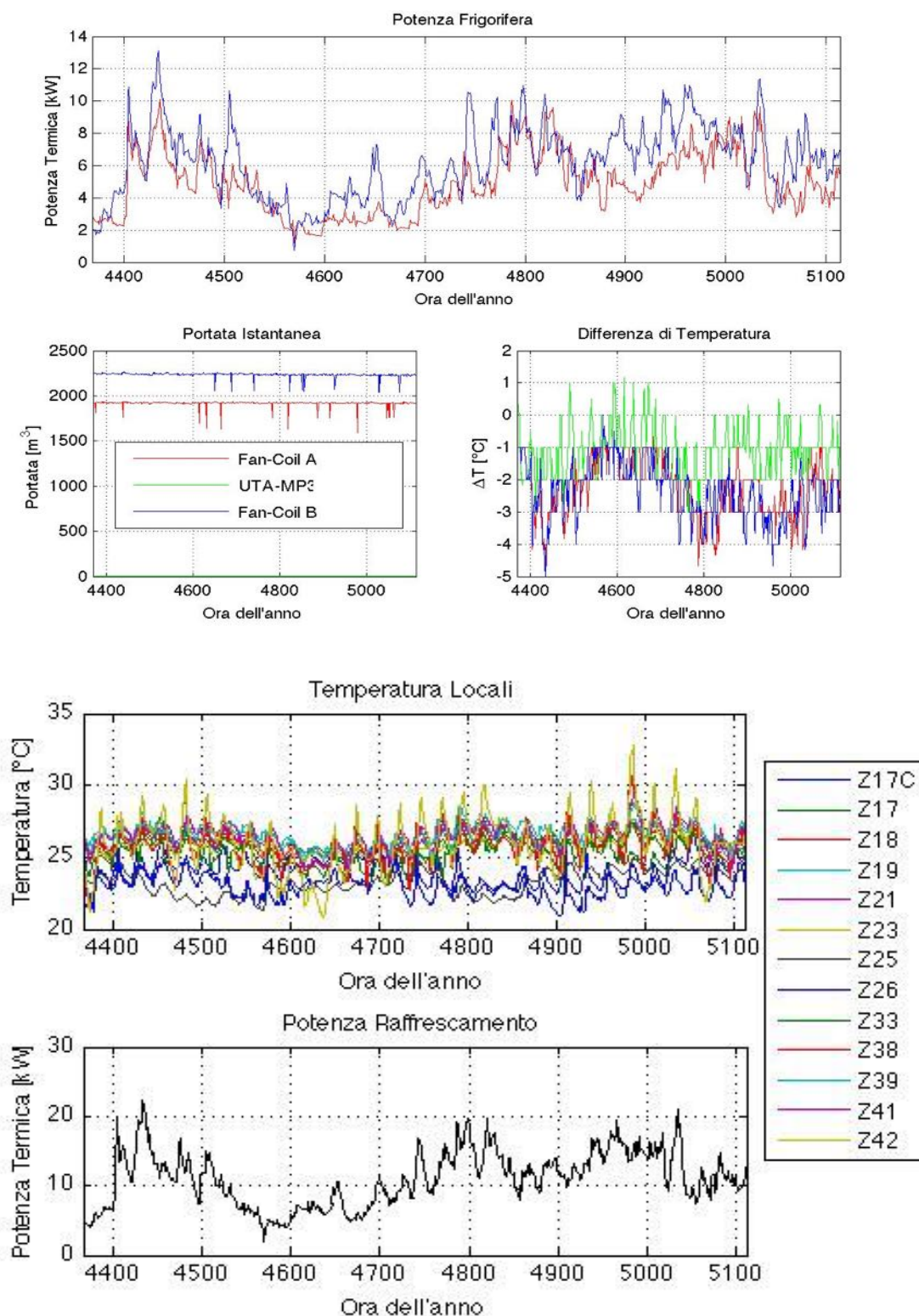


Figura 32 – Esempio di output grafico delle elaborazioni dei dati effettuate in ambiente Matlab

4.2 – Implementazione del modello di simulazione del Piano VIII

Una volta ordinati, elaborati ed analizzati i dati relativi sia ai parametri termigrometrici di zona, sia alle misure di energia termica del reparto di Medicina Interna 1, ci si è preoccupati di come implementare in maniera efficace il modello già realizzato, al fine di ottenere dei risultati dalle simulazioni dinamiche, che fossero coerenti con i dati rilevati in nostro possesso. Questa fase della modellazione è stata caratterizzata da un approccio alla simulazione molto più vicino a quello definibile *data driven*, ossia governato dai dati. Le variabili di input e di output, a questo punto, sono note e misurate, per cui l'obiettivo perseguito è stato quello di riuscire a derivare un modello matematico del sistema edificio-impianti del reparto di Medicina Interna 1 (Ala Nord – VIII piano) per mezzo del codice di calcolo *DesignBuilder*. La principale problematica riscontrata durante i successivi e molteplici step di affinamento del modello, è riconducibile prevalentemente alla difficile gestione della modellazione del comportamento degli occupanti. L'implementazione del modello è stata condotta, comunque, focalizzando l'utilità dello studio nella genesi di un modello affidabile e molto realistico, che fosse funzionale all'accrescimento delle potenzialità di performance del sistema edificio-impianti, ma allo stesso tempo un utile strumento per un futuro utilizzo in fase di gestione e manutenzione.

4.2.1 Definizione del modello di simulazione calibrato sull'analisi dell'attività sperimentale

Conclusa la parte di simulazione eseguita in parallelo con il codice TRNSYS, consapevoli della disponibilità dei dati di monitoraggio del reparto, si è proceduto alla fase di implementazione del modello con il software *DesignBuilder*. L'adozione di un rigoroso approccio *data driven* ha richiesto un notevole impegno per la calibrazione del modello. L'utilizzo di una simulazione dinamica calibrata, alla fine, ha portato allo sviluppo di un

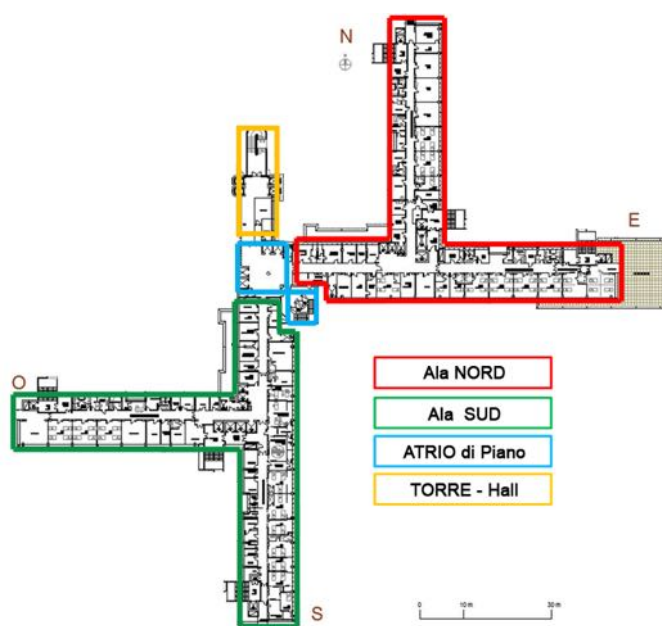


Figura 33 - Individuazione delle quattro macro-aree al Piano VIII.

modello “inverso”, ossia in grado di descrivere il sistema grazie alle interattive serie di iterazioni eseguite fra implementazione del modello e confronto puntuale tra risultati ottenuti e dati misurati. Avendo originariamente adottato la convenzione di suddividere ogni piano in quattro macro-aree di studio, in occasione dello studio di dettaglio del reparto di Medicina Interna 1, si è proceduto trascurando nelle simulazioni, in questa fase, le aree etichettate come “Torre-Hall”, “Atrio di Piano” e “Ala Sud”, focalizzando l’attenzione sull’ “Ala Nord” del piano. (Figura 34). Partendo dal modello del Piano 8° costruito per la simulazione di tutti i livelli dell’AOB, in questo secondo *step* di modellazione, il solo blocco riguardante l’Ala Nord del modello è stato oggetto di implementazione.

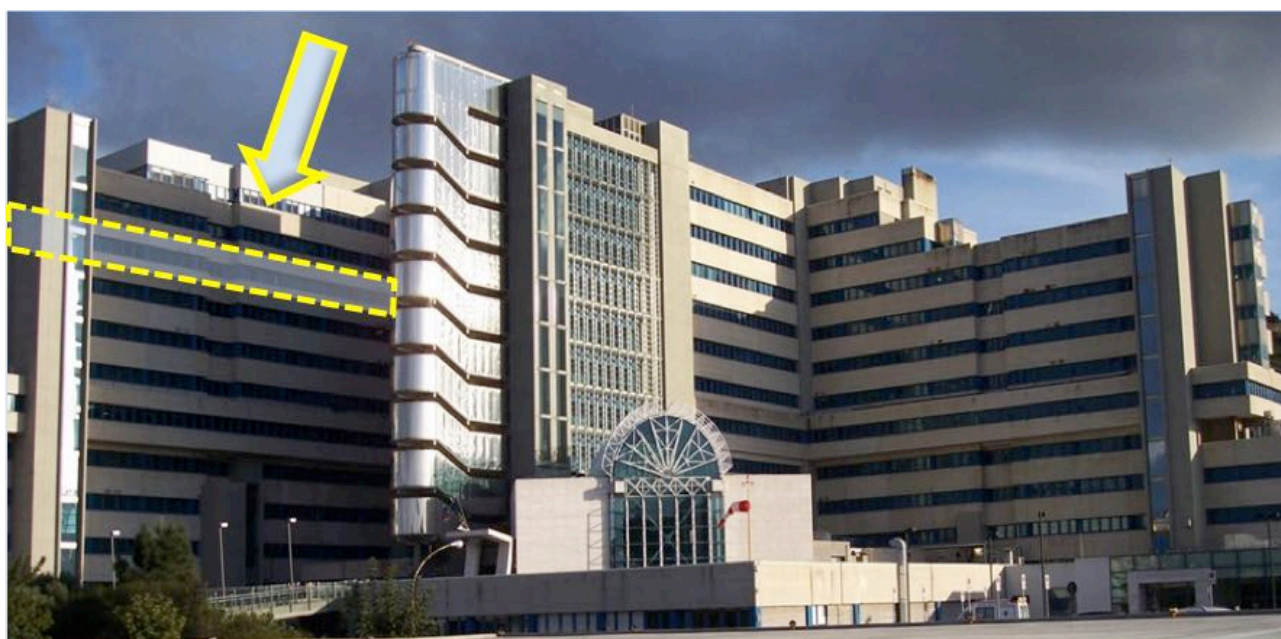


Figura 34 – Vista dell’AOB dall’ingresso Nord, con localizzazione del Piano VIII.

Il modello dell’AOB, in origine, prevedeva una compartimentazione puntuale del piano, individuando le zone termiche, definite in base alla loro destinazione d’uso, in ciascuno degli ambienti del reparto, come prescritto dal D.P.R. 14/01/1997[25]. L’ultima evoluzione del modello, creato in parallelo con i codici di calcolo TRNSYS e DesignBuilder, prevedeva, invece, l’individuazione

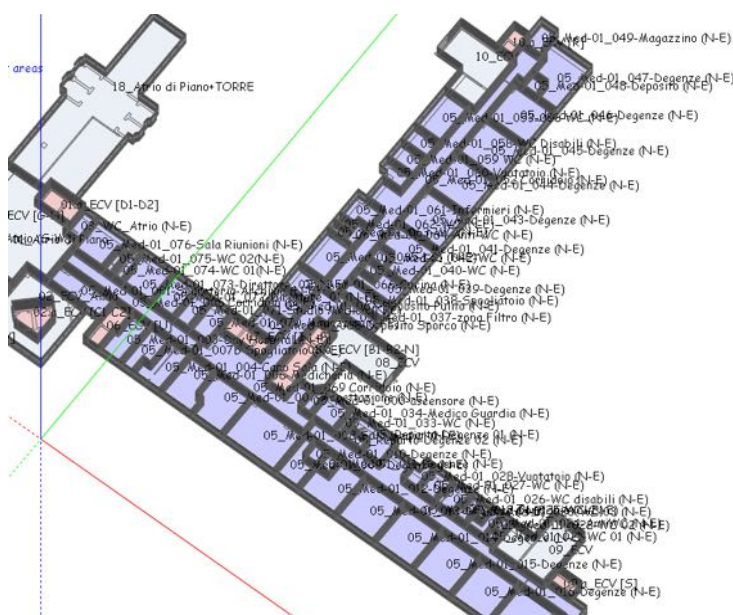


Figura 35 – Schermata di DesignBuilder della originaria suddivisione del Ala Nord del Piano VIII in zone termiche.

BIBLIOGRAFIA

- [1] - N. Mandas, F. V. Caredda, O. Caboni, S. La Croce, *“Proposta di un sistema competitivo e flessibile per la riduzione del fabbisogno e l’ottimizzazione della gestione energetica dell’Azienda Ospedaliera G. Brotzu”*, Relazione Scientifica Finale, Progetto finanziato con L.R. n.7 Agosto 2007, Università di Cagliari, Dicembre 2012.
- [2] - *“TRNSYS 16 Documentation”*, Volumi 1-8, Solar Energy laboratory, University of Wisconsin-Madison, USA, Gennaio 2006.
- [3] - *“TRNSYS 16 Documentation”*, Volume 5: Mathematical Reference, Solar Energy laboratory, University of Wisconsin- Madison, USA, Gennaio 2006.
- [4] - *“EnergyPlus Engineering Reference - The Reference to EnergyPlus Calculations”*, COPYRIGHT © 1996-2011 The Board of Trustees of the University of Illinois and the Regents of the University of California through the Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory
- [5] - *“DesignBuilder EnergyPlus Simulation - Documentation (DB v.3.1)”* - DesignBuilder © 2008-2011
- [6] - American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers ASHRAE, *“Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs”*, ANSI/ASHRAE Standard 140.
- [7] - R. Judkoff – J. Neymark, *“International Energy Agency Building Energy Simulation Test (BESTEST) and Diagnostic Method”*, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Boulder Colorado, USA, Febbraio 1995.
- [8] - Meteotest, *“Meteonorm Version 6.0, Part II:Theory”*, Handbook, Aprile 2010.
- [9] - J.L.M. Hensen – R. Lamberts, *“Building performance simulation for design and operation”*, ed. Spon Press, 2011
- [10] - J.D. Spitler, *“Load Calculation Application Manual”*, ASHRAE, Atlanta, 2009
- [11] - M. Filippi – E. Fabrizio, *“Introduzione alla simulazione termoenergetica dinamica degli edifici”*, ed. Delfino – Guida AICARR, 2012
- [12] - Duffie J.A., Beckman W. A. (2006), *“Solar Engineering of Thermal Processes”*, JOHN WILEY & SONS, INC., Third Edition, 2006
- [13] - M. A. Cucumo, V. Marinelli, G. Oliveti, *“Ingegneria Solare. Principi ed applicazioni”* (Cap. 06, Sistemi Solari Passivi)
- [14] - AA.VV. *“Caratterizzazione energetica dell’Azienda Ospedaliera G. Brotzu, Ospedale San Michele – Cagliari”*, Rapporto intermedio, ENEA, Settembre 2007.
- [15] - G. Cabras, *“Aggiornamento delle planimetrie e delle caratteristiche geometriche e fisiche delle strutture dell’Azienda Ospedaliera G. Brotzu di Cagliari”*, Report interno DIMCM - Cagliari, 2011.
- [16] - G. Gandolfo, *“Aggiornamento delle caratteristiche tecniche e dimensionali relative agli impianti tecnici della struttura ospedaliera AOB di Cagliari”*, Report interno DIMCM - Cagliari, 2011.
- [17] - F. Leonardi, *“Rilievo ed elaborazione dei dati termoigrometrici nel reparto di Medicina 1 dell’Azienda Ospedaliera “G. Brotzu” di Cagliari”*, Tesi di Laurea Triennale in Ingegneria

Meccanica, relatore Prof. Ing. N. Mandas, correlatore O. Caboni, D.I.M.C.M. Università degli Studi di Cagliari, 2014.

- [18] - M. Bandini – L. Niccoli, *“Analisi Dinamica delle Prestazioni energetiche di un Complesso Ospedaliero di Grandi Dimensioni Mediante i Codici di Calcolo MC4 Suite e TRNSYS 16”*, Tesi di Laurea Specialistica, Università di Pisa, 2008.
- [19] - E. Fabrizio, *“Feasibility of polygeneration in energy supply systems for health-care facilities under the Italian climate and boundary conditions”*, Energy for Sustainable Development, 15 (2011) 92-103
- [20] - E. Fabrizio, M. Filippi, J. Virgone, *“An hourly modeling framework for the assessment of energy exploitation and energy converters selection and sizing in buildings”*, Energy and Buildings, 41 (2009) 1037-1050
- [21] - AA. VV. *“RICERCA SISTEMA ELETTRICO. Valutazione dei consumi nell’edilizia esistente e benchmark mediante codici semplificati: analisi di edifici ospedalieri”*, Report RSE/2009/117 ENEA, Marzo 2009.
- [22] - G. Pisano, F. Floris *“Termografia generale dell’edificio “Azienda Ospedaliera Brotzu” ed analisi termografica di dettaglio del piano ottavo dello stesso edificio al fine di verificare il grado di isolamento dell’involucro edilizio e pianificare interventi di miglioramento dell’efficienza energetica.”*, Associazione Termotecnica Italiana, Cagliari 2013

Web

- [23] - Sito Istituzionale Azienda Ospedaliera Brotzu, www.aobrotzu.it
- [24] - http://it.wikipedia.org/wiki/Giuseppe_Brotzu

Normativa

- [25] - Decreto del Presidente della Repubblica, *“Ordinamento ed Organizzazione dei Servizi Sanitari ed Assistenziali”*, 14 Gennaio 1997 (G.U. 20 febbraio 1997, n. 42, S.O.).
- [26] - UNI EN 15265, *“Calcolo del Fabbisogno di Energia per il Riscaldamento e il Raffrescamento degli Ambienti Mediante Metodi Dinamici, criteri generali e procedimenti di validazione”*, Norma Europea, Febbraio 2008.
- [27] - UNI EN ISO 13790, *“Prestazione Energetica degli Edifici, Calcolo del Fabbisogno di Energia per il Riscaldamento e il Raffrescamento”*, Norma Europea, Giugno 2008.
- [28] - UNI/TS 11300-1:2014, *“Prestazione Energetica degli Edifici - Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell’edificio per la climatizzazione estiva ed invernale”*
- [29] - UNI/TS 11300-2:2014, *“Prestazione Energetica degli Edifici - Parte 2: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale, per la produzione di acqua calda sanitaria, per la ventilazione e per l’illuminazione in edifici non residenziali”*.
- [30] - UNI/TS 11300-3:2010, *“Prestazione Energetica degli Edifici - Parte 3: Determinazione del Fabbisogno di Energia Primaria e dei Rendimenti per la Climatizzazione Estiva”*.

- [31] - UNI/TS 11300-4:2012, *“Prestazione Energetica degli Edifici - Parte 4: Utilizzo di energie rinnovabili e di altri metodi di generazione per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria”*.
- [32] - Decreto Ministero dello Sviluppo Economico 11 marzo 2008 coordinato con Decreto 26 gennaio 2010, (G.U. n. 35 del 12-02-2010).
- [33] - Decreto Ministero dello Sviluppo Economico 5 luglio 2012, (G.U. n. 159 del 10-07-2010).

Altre tesi consultate

- [34] - F. V. Caredda, *“Diagnosi energetica dell’Azienda Ospedaliera G. Brotzu”*, Tesi di dottorato di ricerca in Progettazione Meccanica, UniCA - a.a. 2012.
- [35] - C. Pacchiega, *“Simulazione termo-energetica dinamica di edifici ad elevate prestazioni: procedure di validazione dei modelli, applicazioni progettuali e casi studio.”*, Tesi di dottorato di ricerca in Scienze dell’Ingegneria, UniFE - a.a. 2014.

Questa riconfigurazione della classificazione delle zone termiche, ha previsto una nuova individuazione sul modello, della perimetrazione di quattro zone termiche:

- 1) Elementi di collegamento verticale - vano scala ;
- 2) Degenze, Utilizzi Medicali e Corridoi ;
- 3) Elementi di collegamento verticale - vano ascensore ;
- 4) Servizi igienici – bagni.

La zona individuata come “*Elementi di collegamento verticale – vano scala*” contiene essenzialmente tutti i vani scala dell’AOB, i quali risultano diffusamente dotati nell’intero edificio di impianto di riscaldamento a radiatori, come evinto dal rilievo effettuato in sede di audit energetico [1].

La zona classificata come “*Degenze, Utilizzi Medicali e Corridoio*” accorpa in sintesi, in una unica zona termica, gli ambienti aventi le destinazioni d’uso citate, data la configurazione degli impianti a servizio del piano.

La zona definita come “*Elementi di collegamento verticale – vano ascensore*”, individua nel modello tutti i vani ascensore, i quali non sono climatizzati e presentano delle caratteristiche termo-fisiche di involucro analoghe a quelle dei vani scala, ma differenti rispetto a quelle dell’involucro presente nel resto degli ambienti del reparto (vedi paragrafo 3.2.1 - Figura 11).

L’ultima zona è quella dei “*Servizi igienici – bagni*”, la quale è servita dal solo impianto di riscaldamento a radiatori e necessita, come da prescrizione normativa, di un elevato numero di ricambi d’aria oraria. In sede di modellazione inversa, dall’osservazione dei risultati ottenuti dalle ripetute simulazioni e dei dati ottenuti dal monitoraggio, questa zona termica ha riservato spunti di riflessione importanti per l’ottimizzazione del modello durante l’attività svolta nel lavoro di ricerca.

A seguito di questa nuova configurazione del modello, quindi, è stata condotta un’analisi del confronto iterativo tra i risultati ottenuti da varie serie di simulazioni ed i dati monitorati del reparto. Avendo osservato in quale modalità i locali del reparto siano realmente asserviti dagli impianti UTA, dai Fan Coil e dai radiatori installati al piano, si è optato per una nuova implementazione del modello. La “unica” zona termica che ospita Degenze, Utilizzi Medicali e Corridoi è stata suddivisa funzionalmente in quattro sub-Zone. Questa divisione è stata determinata dal fatto che ciascuna sub-Zona è servita da un impianto UTA dedicato (Figura 37).

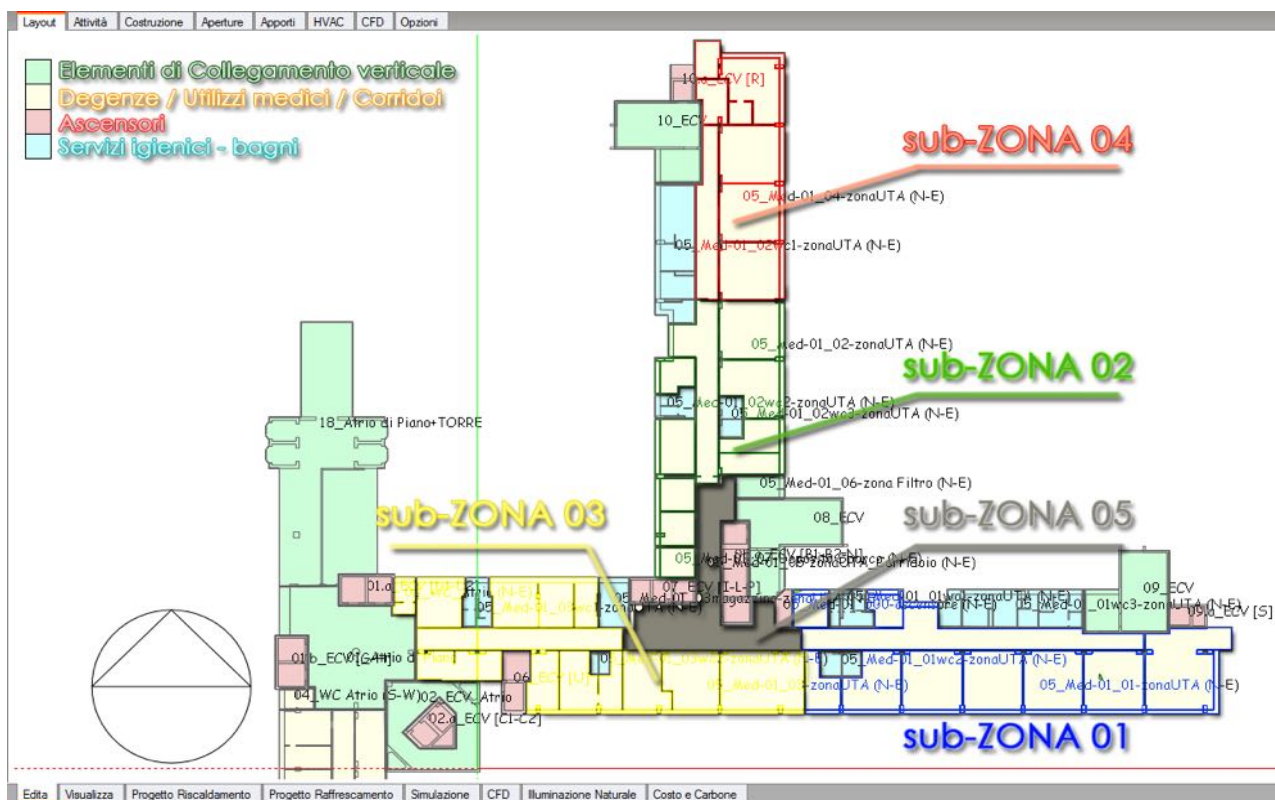


Figura 37 –Schermata di DesignBuilder con indicazione delle sub-ZONE individuate nel modello.

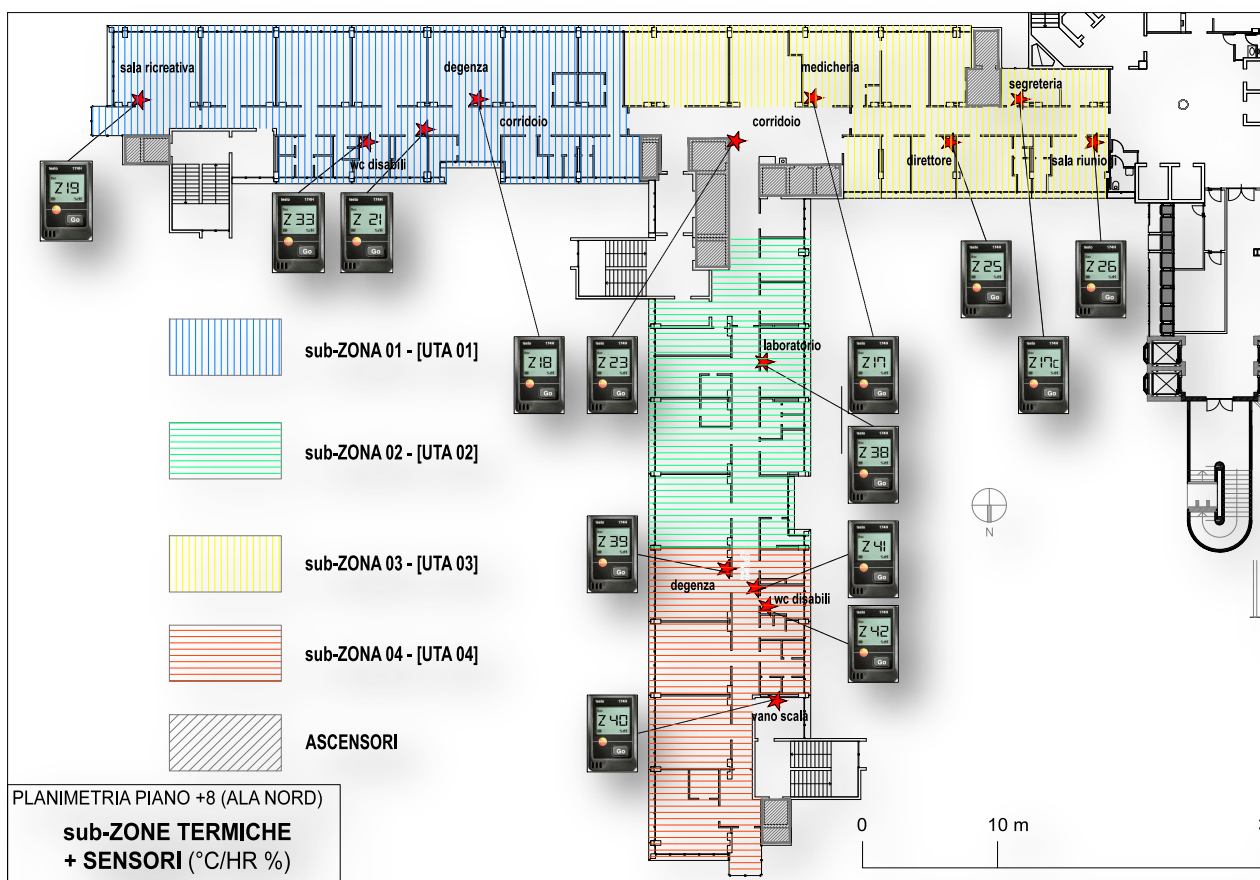


Figura 38 - Planimetria con indicazione delle sub-ZONE individuate nel modello ed ubicazione dei sensori 174H.

Una volta delimitate le sub-Zone nel modello, è stata circoscritta un'altra sub-Zona, interclusa tra le quattro individuate, risultato della perimetrazione. E' stata caratterizzata nel modello, quindi, una quinta sub-Zona, sebbene non asservita da nessun impianto.

A questo punto, avendo individuato un'ottimale gestione delle zone termiche nel modello del reparto, disponendo già di una calibrata configurazione dell'involucro (opaco e trasparente) del sistema edificio, rimaneva solamente da dedicarsi al miglior settaggio del sistema impianti, rispetto alla nuova struttura delle (sub-)zone termiche.

Il codice DesignBuilder, nella sessione dedicata alle impostazioni relative agli HVAC, localizzata all'interno delle "Opzioni del modello", permette una plurima selezione del metodo di simulazione, prevedendo tre livelli di complessità: *Semplice*, *Compatto* o *Dettagliato*. In questa fase della simulazione, è stata impostata la scelta su *Compatto*, che prevede una calcolazione parametrica degli impianti, modellati per mezzo del motore di calcolo *EnergyPlus*. E' stata mantenuta invariata l'impostazione "autosize", già adottata nel primo *step* di modellazione, sull'auto-dimensionamento dell'impianto. Per quanto riguarda i *settings* degli impianti tecnologici, si è inizialmente optato per utilizzare il *Template* (presente in libreria) del sistema HVAC a tutt'aria CAV (*Constant Air Volume*) e di impostare i diversi *Component* (vedi paragrafo 3.3.1 – DesignBuilder) con n°3 ricambi/ora volumetrici di aria con solo rinnovo (senza ricircolo) per zona termica e con *set-point* di controllo ambiente con banda (min-max) 21°C – 27°C, senza nessun controllo sull'umidità relativa. Questi parametri termo-igrometrici, come detto in precedenza, sono il risultato dell'accorpamento delle zone termiche di Degenza, di Utilizzi Medicali e dei Corridoi in un'unica zona, avendo adottato come riferimento i parametri più gravosi e restrittivi indicati dal D.P.R. 14/01/97 [25] per ciascuna zona.

A seguire si riporta come esempio la tabella elaborata a corredo di ogni simulazione e contenente il cruscotto sinottico di tutti i dati di input utilizzati:

6.2.5 - 1		Simulazioni dinamiche del reparto di Medicina Interna 1 del Piano VIII - AOB (<i>settings</i>)						rev 60.04
set-point controllo ambientale			HVAC con sub-ZONE					
riscaldamento	raffrescamento	umidità relativa	zona termica	[ric/h]	riscaldamento	raffrescamento	modalità	tipo
21 °C	27°C	fluttuazione libera	unica	3,00	sì	sì	COMPACT	CAV single
N.B. : ventilazione naturale --->			servizi	12,00	sì	no		UTA
			ECV	2,00	sì	no		2 tubi

Tabella 1 – Esempio di cruscotto contenente tutti i dati di input del modello di simulazione.

Trattandosi di simulazioni dinamiche sviluppate durante la stagione estiva, preso atto del

funzionamento stagionale degli impianti governato dal sistema di commutazione attuato in modo manuale, è stata focalizzata maggiormente l'attenzione sulle misure rilevate sul campo, procedendo ad un monitoraggio quasi in *real time*, visti i risultati non convergenti delle simulazioni. Si è riscontrato, alla fine dell'osservazione dei dati, un sostanziale non impiego dei sistemi a recupero di calore MP3 per il trattamento dell'aria primaria (vedi i grafici della potenza media oraria rilevata – Figure 17 e 27) per tutto il periodo. Per questa ragione, la prima ipotesi di utilizzare un unico *Template* HVAC a tutt'aria CAV, ha lasciato prontamente il posto all'utilizzo di diversi nuovi *Template*. Avendo la necessità di generare un modello fedele alla realtà, sono stati creati dei *Template* ad hoc per descrivere il comportamento di ogni singolo impianto installato al piano, calibrando la modellazione sulle caratteristiche tecniche e le modalità di funzionamento rilevate nel reparto. Nel dettaglio, quindi, sono stati modellati 3 *Template*, aventi le seguenti caratteristiche:

- A. “*ECV-Riscaldamento con Radiatori*”, adottato per le zone termiche identificate come “Elementi di collegamento verticale - vani scala”. I settaggi prevedono una disponibilità del sistema sulle 24 ore, con un servizio di solo riscaldamento stagionale, con almeno n°2 ricambi/ora di aria in solo rinnovo ;
- B. “*FC-Single duct*”, a servizio delle zone termiche identificate come “Degenze, Utilizzi Medicali e Corridoi”. I settaggi prevedono una disponibilità del sistema sulle 24 ore, con un servizio di riscaldamento o raffrescamento stagionale, avente almeno n°3 ricambi/ora di aria in solo rinnovo ;
- C. “*WC-Riscaldamento con Radiatori*”, adottato per le zone termiche dei “Servizi igienici - bagni”. I settaggi prevedono una disponibilità del sistema sulle 24 ore, con un servizio di solo riscaldamento stagionale, con almeno n°12 ricambi/ora di aria in solo rinnovo.

A questo punto, ci si è trovati di fronte al problema della gestione della modellazione dei ricambi d'aria negli ambienti, come da prescrizioni normative, tali ricambi non potevano essere garantiti dai sistemi di impianto a disposizione del reparto. L'assenza di funzionamento di un sistema UTA in grado di garantire una modalità controllata della ventilazione degli ambienti, ha portato a considerare diverse ipotesi di modellazione, comunque tenendo conto dello stato delle cose. Mantenendo ferma l'ipotesi del rispetto delle regole normative, è stato ponderato che il rispetto dei parametri di ventilazione fosse operato in modo naturale, ossia per mezzo dell'apertura delle finestre all'interno degli

ambienti. Avendo eseguito, durante il lavoro di ricerca, anche una battuta termografica su tutto l'involucro esterno del Piano 8° dell'A.O.B, tale supposizione è stata ampiamente consolidata anche in occasione di questa sessione d'indagine [22].

Il modello è stato aggiornato, quindi, impiegando i nuovi *Template*. I risultati generati dalla simulazione si sono rivelati discretamente coerenti con i dati misurati di energia e di temperatura, valutando la comparazione dei loro valori medi giornalieri mensili, come si potrà verificare dalle tabelle dei risultati illustrate nel successivo paragrafo 4.3.

L'analisi del confronto puntuale tra simulazione e misure rilevate con scansione oraria, invece, ha fatto rilevare qualche criticità legata soprattutto all'andamento ondulatorio delle temperature, causato dall'elevato numero di ricambi orari (non controllato), effettuato per mezzo della sola ventilazione naturale. I risultati, considerando tutte le aleatorietà delle condizioni presenti al contorno, descritte nel dettaglio al paragrafo 4.2.3, si possono comunque considerare accettabili e coerenti con le misure rilevate.

I risultati ed i relativi grafici di confronto ottenuti confrontando i dati rilevati durante la campagna di misure effettuata nel reparto di Medicina Interna 1 ed i risultati delle simulazioni dinamiche sono stati raccolti e illustrati nell'ultimo paragrafo 4.3.

4.2.2 Ipotesi di calcolo e dati di ingresso

In questo paragrafo sono descritte le ipotesi dedotte dal contesto di condizioni al contorno esistenti e le approssimazioni e le semplificazioni che è stato opportuno adottare nel modello di simulazione, per restituire con il modello numerico il problema reale. Per procedere alla fase di simulazione è stato necessario stabilire, quindi, delle variabili in ingresso, in grado di definire in maniera precisa e circoscritta (nel modello) le condizioni al contorno. Nel precedente paragrafo è stato descritto come sono state individuate le zone termiche nel modello, nel seguito della trattazione sono descritti nel dettaglio i dati in ingresso adottati per le simulazioni dinamiche.

Dati climatici

I dati riferiti al clima della località utilizzati nel modello sono stati generati con l'aiuto del software *Meteonorm*, che, attingendo dalla banca dati proprietaria, genera un file meteo

orario annuale basato sulla media calcolata su uno storico pluriennale di rilievo di temperatura a bulbo secco, umidità relativa, irradiazione diffusa e diretta su superficie orizzontale, velocità e direzione del vento del sito geografico di riferimento (Cagliari - Latitudine: 39.22°; Longitudine: 9.13°; Altezza sul livello del mare: 17 m).

Geometria e caratteristiche termo-fisiche del sistema edificio-impianti

Avendo a disposizione i dati di rilievo e le planimetrie aggiornate (restituite in sede di redazione della Diagnosi Energetica dell'AOB [1]), grazie alla disponibilità e la gentile collaborazione del personale dell'Ufficio Tecnico, si è dapprima implementato il modello inserendo tutti i dati riferiti alla corretta definizione della geometria dell'edificio (*Appendice A*) ed ai dettagli delle sue caratteristiche termofisiche (*Appendice B*). Fatto ciò, si è provveduto all'implementazione nel modello delle sue zone termiche, i cui dettagli sono riportati al paragrafo 3.3, assegnando contestualmente le caratteristiche del sistema impianti, affrontato al paragrafo 3.2. Nella tabella a seguire sono stati riportati i setting adottati per la restituzione dei risultati riportati nel paragrafo 4.3:

7.1.1		Simulazione dinamica del reparto di Medicina Interna 1 del Piano VIII - AOB (settings)							rev 3.10	
set-point controllo ambientale				modello AOB_P8-Med1 con sub-ZONE						
riscaldamento	raffrescamento	umidità relativa	apporti	sub-ZONA termica	[ric/h]	Heating	Cooling	modalità	tipo	
21 °C	27°C	fluttuazione libera	✓	degenze	5,00	✓	✓	HVAC COMPACT	Fan Coil 2 tubi	
N.B. : aria rinnovo con ventilazione naturale				servizi	6,00	✓	X		X	
				ECV	2,00	✓	X		X	

Tabella 2 - Parametri in ingresso adottati nel modello di simulazione finale.

Parametri relativi agli apporti interni gratuiti

Per ciascuna zona termica si sono mantenuti i valori relativi agli apporti gratuiti, definiti nella loro componente sensibile, convettiva, radiativa e latente, già adottati e definiti al paragrafo 3.3.2.

4.2.3 Problematiche e considerazioni

Avendo ben chiara, quindi, la complessità del sistema edificio-impianti analizzato nel reparto di Medicina Interna 1 e partendo dalle problematiche già riscontrate e riportate nel paragrafo 3.4.1 della presente tesi, una gravosa criticità riscontrata è rimasta la

restituzione nel modello delle reali condizioni al contorno concernenti la configurazione tecnica degli impianti rilevati e, soprattutto, le effettive modalità di regolazione in esercizio presso gli ambienti dell'edificio dell'A.O.B. La necessità, inoltre, di introdurre all'interno di una simulazione il reale comportamento dell'occupante per quanto attiene l'attività svolta all'interno dei locali, la gestione dei *set-point* di temperatura e la gestione dell'apertura delle finestre per garantire la ventilazione degli ambienti, ha complicato in modo esponenziale la difficoltà dell'operazione.

Alla luce di queste considerazioni, i risultati ottenuti con la simulazione dinamica, condotta con la modellazione inversa, si ritiene che possano considerarsi soddisfacenti. Il confronto tra i dati reali (Diagnosi Energetica) ed i risultati delle simulazioni dinamiche ha mostrato una differenza minima di massimo circa il 3% sul totale della domanda di energia calcolato sulle medie mensili, per cui con uno scarto migliore rispetto al precedente blocco di simulazioni.

Tra le principali cause responsabili della difficile gestione dell'implementazione del modello, si riportano le seguenti:

- L'utilizzo nelle simulazioni dinamiche di un file climatico generato con metodi statistici storici, benché si sia dimostrato mediamente attendibile, ha restituito dei valori correlati all'accadimento dei fenomeni meteorologici che hanno mostrato una certa coerenza sul medio-breve periodo (medie mensili). Non sempre hanno trovato un effettivo riscontro con quelli realmente accaduti valutando una scansione temporale oraria, caratterizzata in modo peculiare dal recente andamento dei fenomeni climatici. Si è osservato in maniera evidente, nel confronto tra misure e risultati delle simulazioni, che l'andamento dei picchi delle simulazioni, talvolta, non è quindi sincronizzato con l'andamento delle condizioni climatiche locali. In sostanza, si è potuto verificare che la presenza di una forte nuvolosità o di un innalzamento delle temperature nel file climatico, non sempre trova un conseguente sincrono riscontro nelle misure di energia e temperatura rilevate (e viceversa).
- Le simulazioni dinamiche sono state condotte imponendo per ogni zona termica il rispetto delle condizioni termo-igrometriche prescritte e contenute nel D.P.R. 14/01/97. Gli impianti tecnologici installati nell'A.O.B, al momento, come già riportato, non sono sempre in grado di garantire il mantenimento controllato di tutti i citati parametri termo-igrometrici. In realtà, quindi, la domanda energetica rilevata al piano

non può essere riferita al solo mantenimento in esercizio di detti parametri prescrittivi, ma probabilmente è più strettamente connessa al margine di miglioramento dell'efficienza energetica che potrebbe derivare da un opportuno (e facile) adeguamento degli impianti installati (e non in esercizio) e da una ottimizzazione della regolazione da operare sugli stessi.

- Una regolazione centralizzata, automatica e calibrata, per il sistema edificio-impianti dell'AOB non è al momento disponibile, per cui l'utenza regola localmente le temperature, nei vari ambienti del reparto, operando sui termostati dei ventilconvettori oppure agendo sulla ventilazione naturale. Il ricambio dell'aria viene attuato prevalentemente con la (frequente) apertura delle finestre *ad libitum*, per cui è necessario ponderare, nella restituzione del modello, l'esistenza di rilevanti variabili aleatorie.

Avendo compiuto un'indagine termografica [22] sull'involucro esterno del Piano 8° dell'AOB durante la stagione invernale, dall'analisi dell'immagine riportata in Figura 40 contenente uno stralcio del mosaico dei termogrammi, si è potuto verificare quanto ipotizzato in merito all'apertura delle finestre. La presenza nel termogramma delle aree marcate con il colore rosso, visibile nell'area in prossimità della sommità delle finestre, denota l'apertura parziale delle stesse.

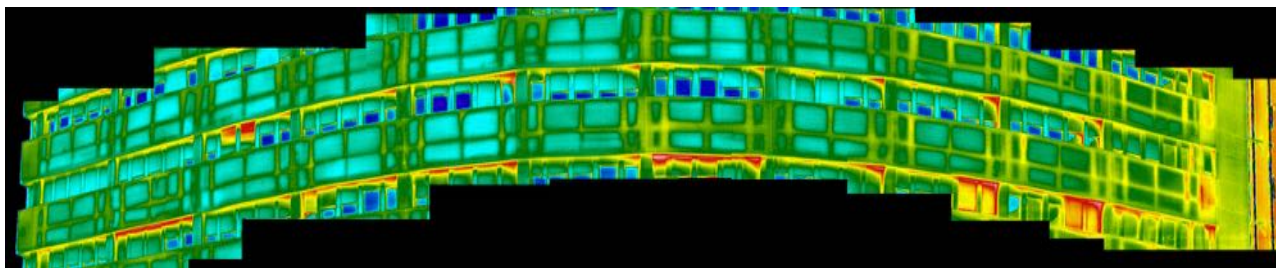


Figura 39 - Stralcio del mosaico dei termogrammi dell'involucro del Piano 8° dell'AOB.

Valutando che questo rilievo è stato effettuato in piena notte e con una temperatura esterna di circa 8 °C, si è preso atto, durante la fase di implementazione del modello, dell'assodato costume di regolare i ricambi d'aria per mezzo della ventilazione naturale, in tutte le stagioni dell'anno.

[22] G. Pisano, F. Floris "Termografia generale dell'edificio "Azienda Ospedaliera Brotzu" ed analisi termografica di dettaglio del piano ottavo dello stesso edificio al fine di verificare il grado di isolamento dell'involucro edilizio e pianificare interventi di miglioramento dell'efficienza energetica.", Associazione Termotecnica Italiana, Cagliari 2013

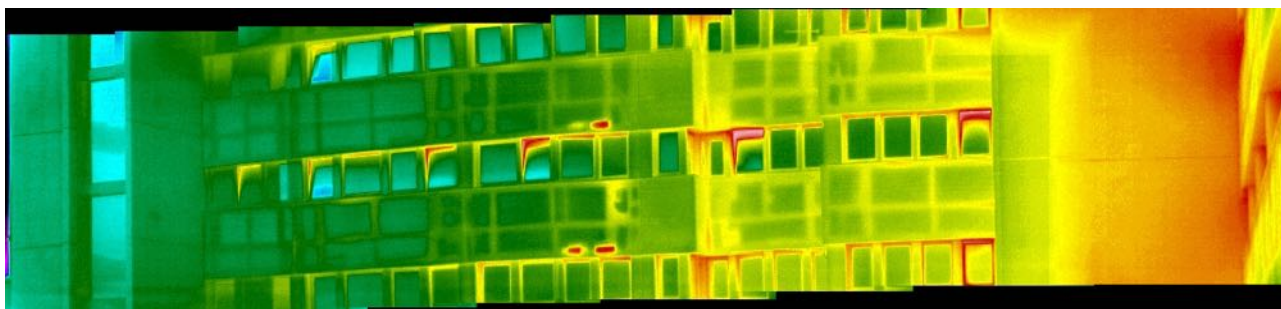


Figura 40- Dettaglio dello stralcio di un altro mosaico di termogrammi dell'involucro del Piano 8° dell'AOb.

- La domanda di energia termica al piano è quindi caratterizzata ancora da fenomeni di sovra-riscaldamento o sotto-raffrescamento, la cui causa è prevalentemente da imputare alla percezione soggettiva degli utenti, come già riportato.
- In sede di Energy Audit si è rilevata la presenza di diverse pompe di calore, *monosplit* di piccola potenza, alimentate ad energia elettrica, installate anche al Piano 8°, le cui modalità di gestione sono demandate alla soggettiva sensazione degli utenti. Non avendo la possibilità di monitorare in modo globale ed integrato la quantità di energia termica ed elettrica utilizzata, non è stato possibile disporre di una corretta contabilizzazione dell'energia totale, effettivamente utilizzata al piano, per il controllo dei parametri termo-igrometrici. Avendo attrezzato un monitoraggio diretto, invece, sui parametri termo-igrometrici degli ambienti, è apparso immediatamente manifesto dall'analisi qualitativa dell'andamento dei grafici che, laddove siano installate le pompe di calore *monosplit*, queste offrano un'importante contributo per la regolazione delle condizioni di comfort interno.

Nel dettaglio, dall'analisi delle misure delle singole zone monitorate all'interno del reparto con i sensori 174H della Testo, abbiamo verificato l'installazione dei citati *monosplit* all'interno delle zone 25 e 26. Come si potrà notare dal grafico riportato in figura 41 relativo ai dati riferiti al mese di Agosto, seguendo l'andamento delle temperature nelle zone 25 (Studio del Direttore) e 26 (Sala riunioni) si può leggere un *trend* prossimo ai 21/22 °C, mentre nelle altre zone si hanno valori di riferimento maggiori di qualche grado e con andamento oscillante. Questo fenomeno è strettamente connesso all'impiego di dette pompe di calore, installate nei singoli ambienti del reparto (e dell'AOb), per il controllo del comfort ambientale interno.

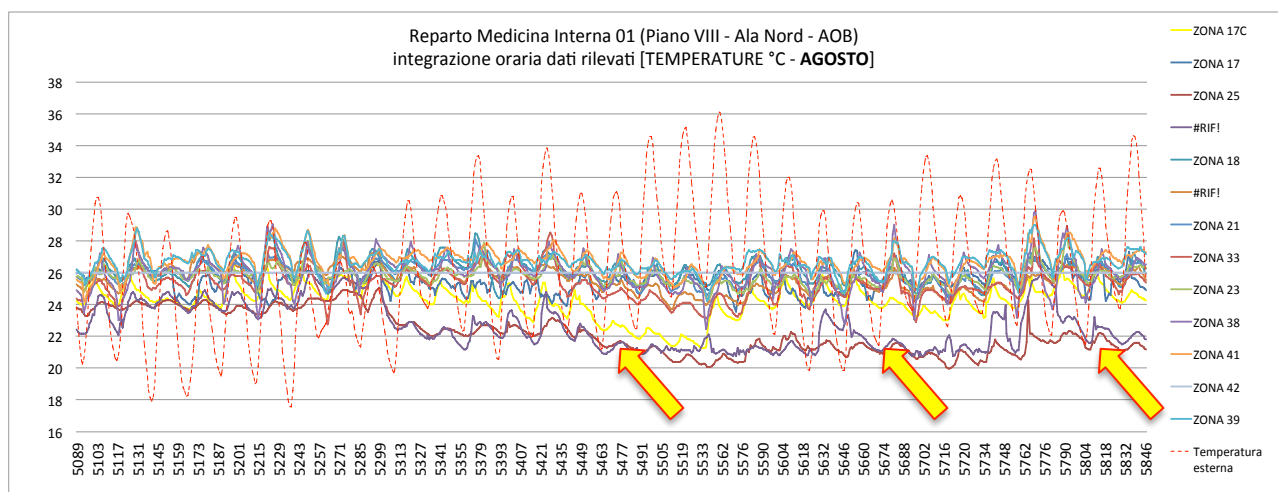


Figura 41 - Grafico di confronto tra l'andamento delle temperature in tutte le zone termiche monitorate e la temperatura esterna, riferite a valori orari medi del mese di Agosto.

L'utilizzo non coordinato e discrezionale di questi dispositivi unitamente al sistema di climatizzazione centrale, non solamente genera dei costi energetici fuori dal controllo generale, ma si ritiene possa essere tra le principali cause delle differenze riscontrate dal confronto effettuato tra l'energia misurata in sede di Energy Audit e quella calcolata nelle simulazioni dinamiche.

4.3 – Risultati delle simulazioni

L'adozione di un metodo di simulazione *data driven*, ha consentito di giungere, alla fine, ad un buon livello di approssimazione dei risultati ottenuti, restituendo delle minime differenze percentuali sul confronto dei valori totali di Energia, Temperatura e Umidità relativa, calcolato come media giornaliera mensile. A seguire sono riportati i grafici e le tabelle dei risultati di confronto ottenuti.

Mese di LUGLIO

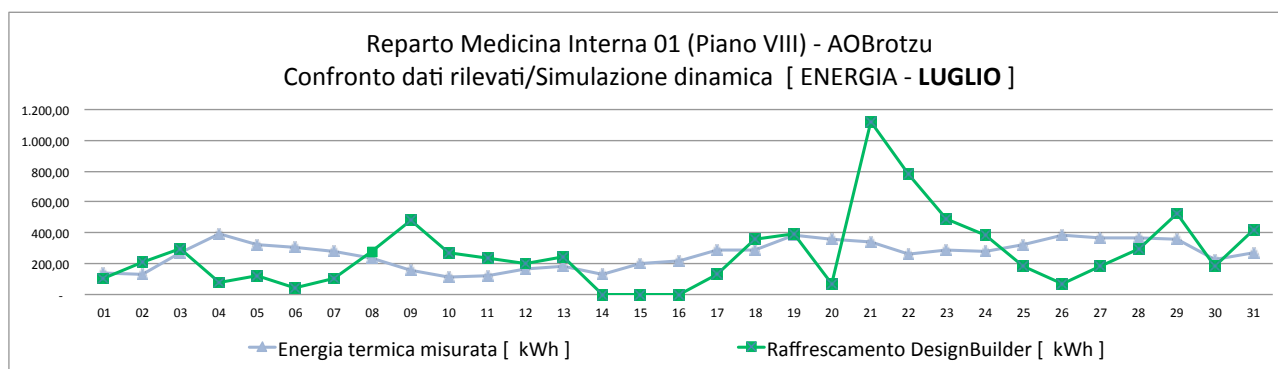


Figura 42 - Grafico di confronto dei dati di Energia misurati ed i risultati della simulazione dinamica.

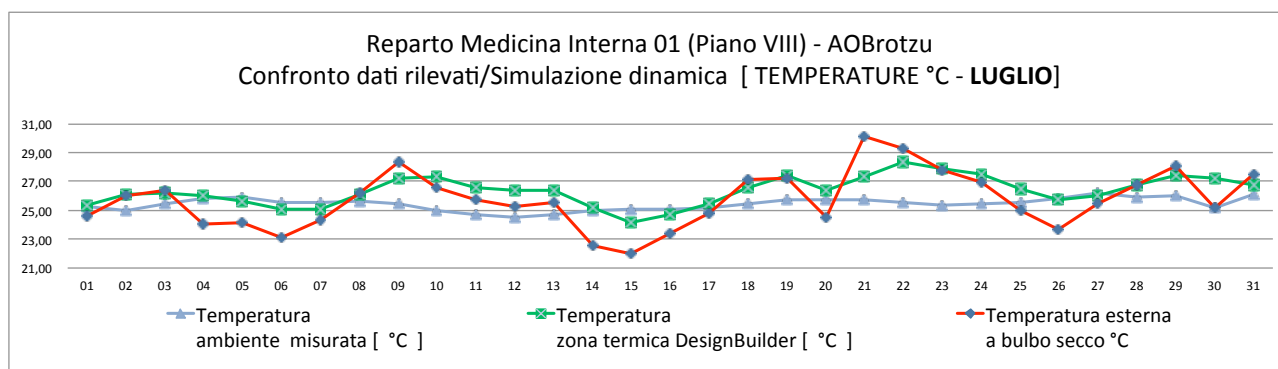


Figura 43 - Grafico di confronto dei dati di Temperatura misurati ed i risultati della simulazione dinamica.

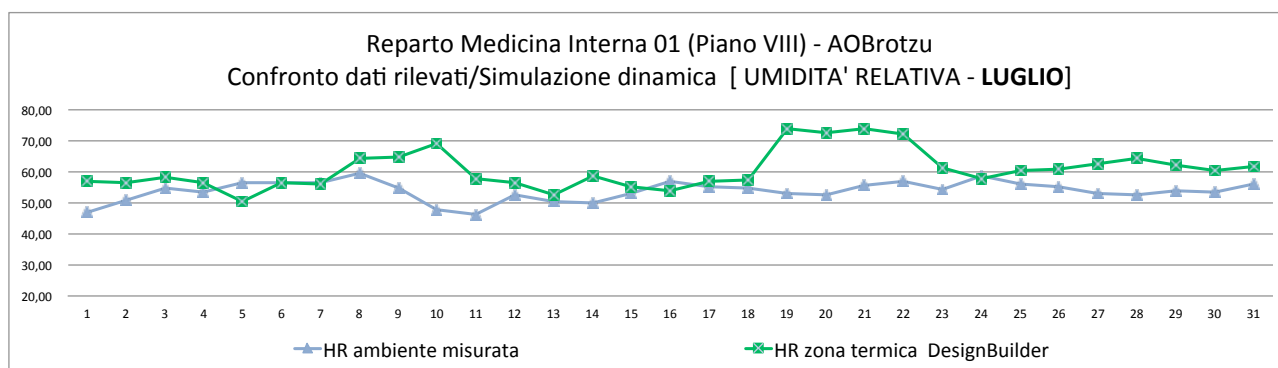


Figura 44 - Grafico di confronto dei dati di Umidità Relativa misurati ed i risultati della simulazione dinamica.

LUGLIO	ENERGIA			TEMPERATURE	TEMPERATURE	differenza	UMIDITA'	Umidità Relativa	differenza
	Energia termica misurata	Raffrescamento DesignBuilder	differenza	Temperatura ambiente misurata	Temperatura zona termica DesignBuilder		HR ambiente misurata	zona termica DesignBuilder	
GIORNI	[kWh]	[kWh]	[%]	[°C]	[°C]	[%]	[%]	[%]	[%]
1	136,91	101,31	26%	25,30	25,39	0%	46,93	57,11	-22%
2	128,43	209,71	-63%	24,96	26,08	4%	50,93	56,29	-11%
3	273,96	297,90	-9%	25,48	26,21	3%	54,57	58,03	-6%
4	390,84	81,15	79%	25,80	26,04	1%	53,61	56,48	-5%
5	322,76	122,57	62%	25,94	25,61	-1%	56,32	50,43	10%
6	306,59	44,24	86%	25,56	25,04	-2%	56,58	56,53	0%
7	277,11	104,79	62%	25,59	25,10	-2%	56,48	56,07	1%
8	237,65	276,37	-16%	25,68	26,13	2%	59,56	64,14	-8%
9	160,78	485,41	-202%	25,44	27,27	7%	54,64	64,57	-18%
10	112,89	272,32	-141%	25,01	27,36	9%	47,78	69,02	-44%
11	121,07	236,38	-95%	24,72	26,59	7%	46,28	57,89	-25%
12	165,70	204,88	-24%	24,51	26,41	7%	52,58	56,45	-7%
13	186,53	248,21	-33%	24,72	26,41	6%	50,59	52,66	-4%
14	134,68	0,03	100%	24,95	25,13	1%	50,03	58,90	-18%
15	199,79	-	100%	25,11	24,16	-4%	53,13	55,39	-4%
16	215,20	3,25	98%	25,12	24,74	-2%	57,08	54,09	5%
17	284,89	133,80	53%	25,16	25,42	1%	55,24	57,02	-3%
18	284,30	361,91	-27%	25,43	26,57	4%	54,86	57,35	-5%
19	385,80	396,78	-3%	25,74	27,44	6%	53,21	73,90	-39%
20	359,25	69,41	81%	25,78	26,40	2%	52,80	72,71	-38%
21	337,73	1.123,75	-233%	25,76	27,33	6%	55,64	74,03	-33%
22	263,43	776,93	-195%	25,56	28,37	10%	57,09	72,10	-26%
23	288,56	490,82	-70%	25,37	27,87	9%	54,30	61,24	-13%
24	280,97	386,43	-38%	25,42	27,47	7%	58,73	57,84	2%
25	327,68	180,69	45%	25,56	26,52	4%	56,22	60,45	-8%
26	384,70	66,67	83%	25,86	25,70	-1%	55,37	60,97	-10%
27	366,21	180,11	51%	26,21	26,01	-1%	52,92	62,46	-18%
28	363,92	293,08	19%	25,90	26,72	3%	52,80	64,26	-22%
29	354,48	526,63	-49%	25,98	27,39	5%	53,97	61,99	-15%
30	226,80	179,91	21%	25,18	27,24	8%	53,29	60,57	-14%
31	268,86	420,36	-56%	26,14	26,74	2%	55,98	61,81	-10%
MENSILE	8.148,44	8.275,79	1,5%	25,45	26,35	3,4%	53,86	60,73	11,3%
differenza	1,54%			media giornaliera mensile			media giornaliera mensile		

Figura 45 - Tabella di confronto tra i valori delle misure e dei risultati della simulazione (giornaliero mensile).

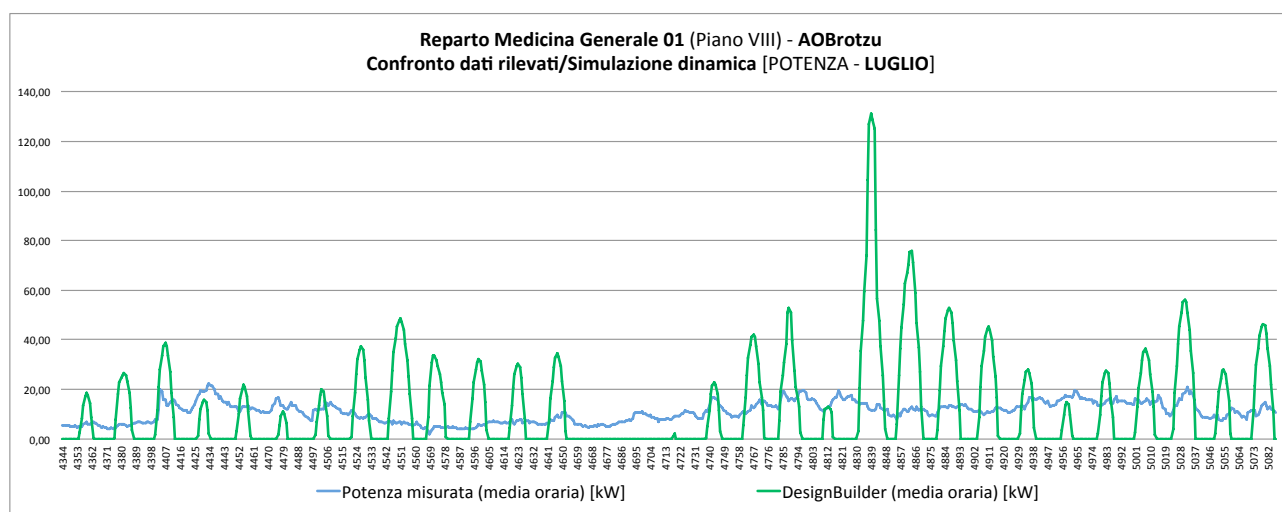
Serie di dati con *time-step* orario

Figura 46 – Grafico di confronto tra i valori delle misure e dei risultati della simulazione riferiti alla potenza oraria del mese di Luglio.

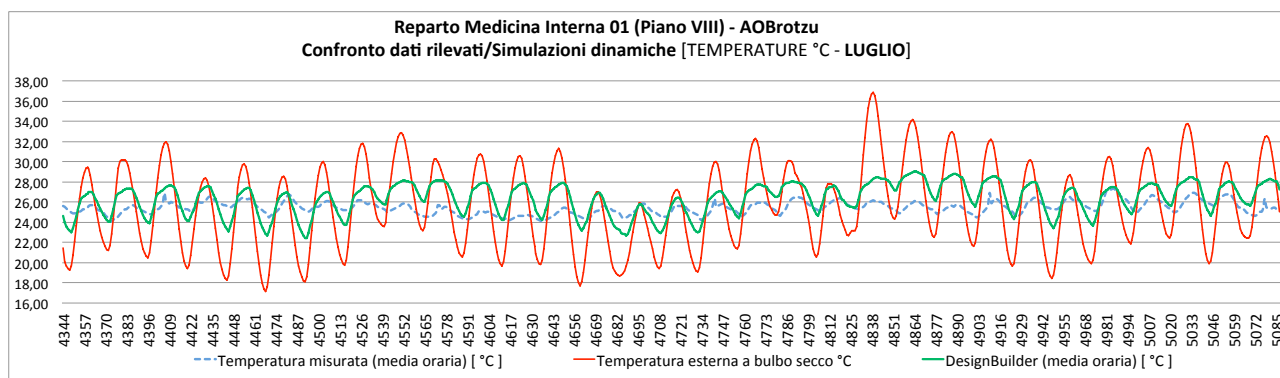


Figura 47 - Grafico di confronto tra i valori delle misure e dei risultati della simulazione riferiti alla temperatura oraria del mese di Luglio.

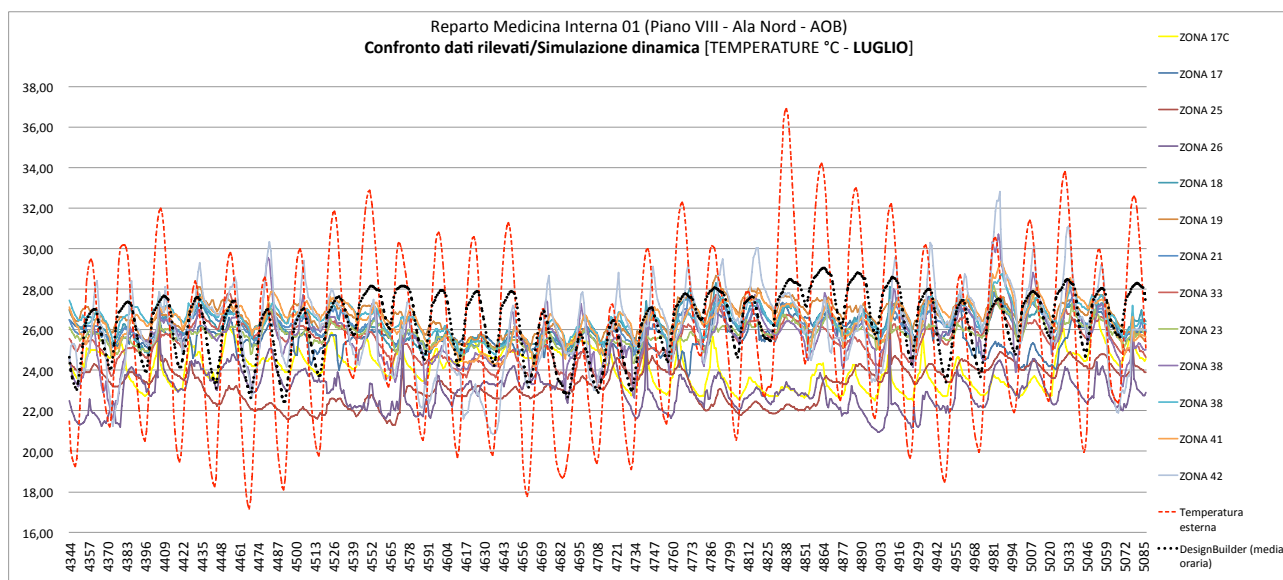


Figura 48 - Grafico di confronto tra l'andamento delle temperature in tutte le zone termiche monitorate, la temperatura esterna ed i risultati della simulazione, riferiti a valori orari medi del mese di Luglio.

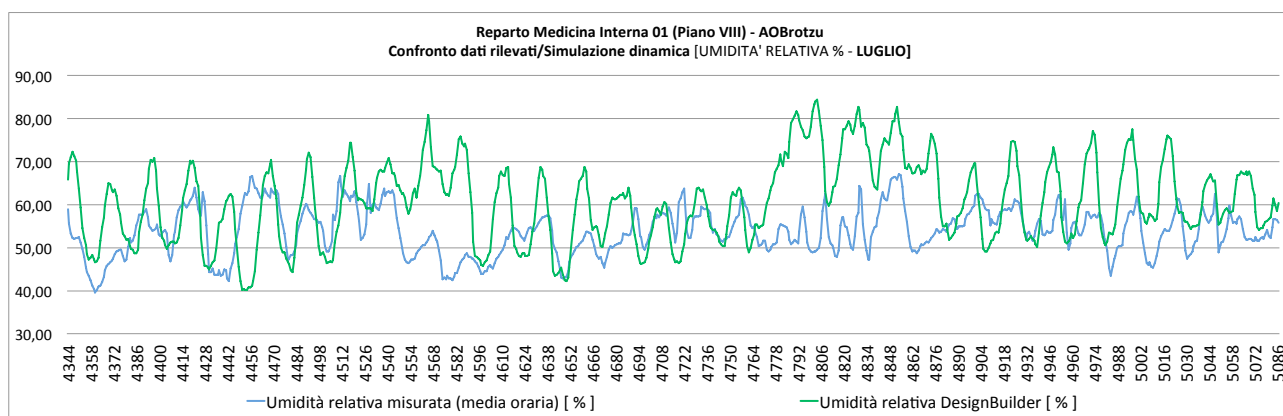


Figura 49 - Grafico di confronto tra i valori delle misure e dei risultati della simulazione riferiti all'umidità relativa oraria del mese di Luglio.

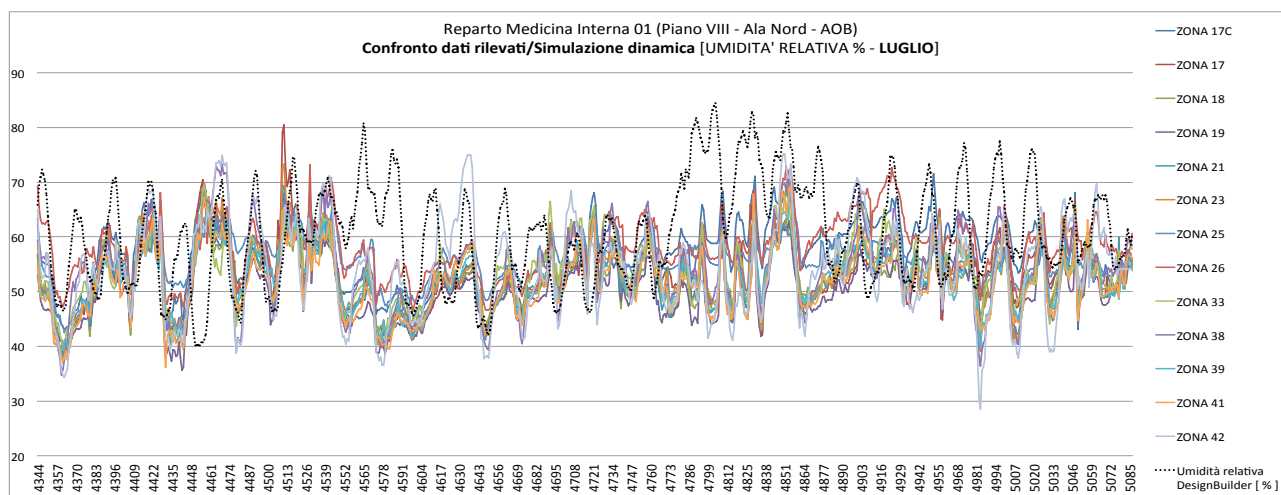


Figura 50 - Grafico di confronto tra l'andamento delle umidità relative in tutte le zone termiche monitorate ed i risultati della simulazione, riferiti a valori orari medi del mese di Luglio.

A questo punto, all'interno dell'ambiente di lavoro di DesignBuilder si è proceduto ad esaminare, nel dettaglio, tutte le singole sub-Zone termiche individuate, ottenendo i valori relativi alle condizioni di *indoor comfort* di ciascuna di esse per il mese di Luglio.

I grafici a seguire riportano il bilancio di energia dovuto alle dispersioni e agli eventuali apporti gratuiti dovuti alla trasmissione del calore attraverso le pareti che circoscrivono la zona termica rappresentata da tutto il reparto di Medicina Interna 1.

I grafici riportano, anche, i parametri termo-igrometrici di zona simulati per l'intero reparto di Medicina Interna 1, per le sub-Zone n°1, n°2, n°3, n°4 e n°5 e per gli ambienti che ospitano gli annessi servizi igienici, che rappresentano i locali "critici" del sistema edificio impianti per le ragioni descritte al paragrafo 4.2.1.

Si rammenta che i servizi ricadenti nella sub-Zona termica n°1 sono esposti a Nord-Est, tranne uno (wc2) che risulta interno alla zona termica. I servizi della sub-Zona n°2, invece, hanno una esposizione Ovest, tranne uno (wc3) che risulta interno alla zona termica. I servizi ricadenti nella sub-Zona n°3 sono due, il primo, denominato "wc1", ha un'esposizione Nord-Ovest, mentre l'altro (wc3) risulta interno alla zona termica.

LUGLIO

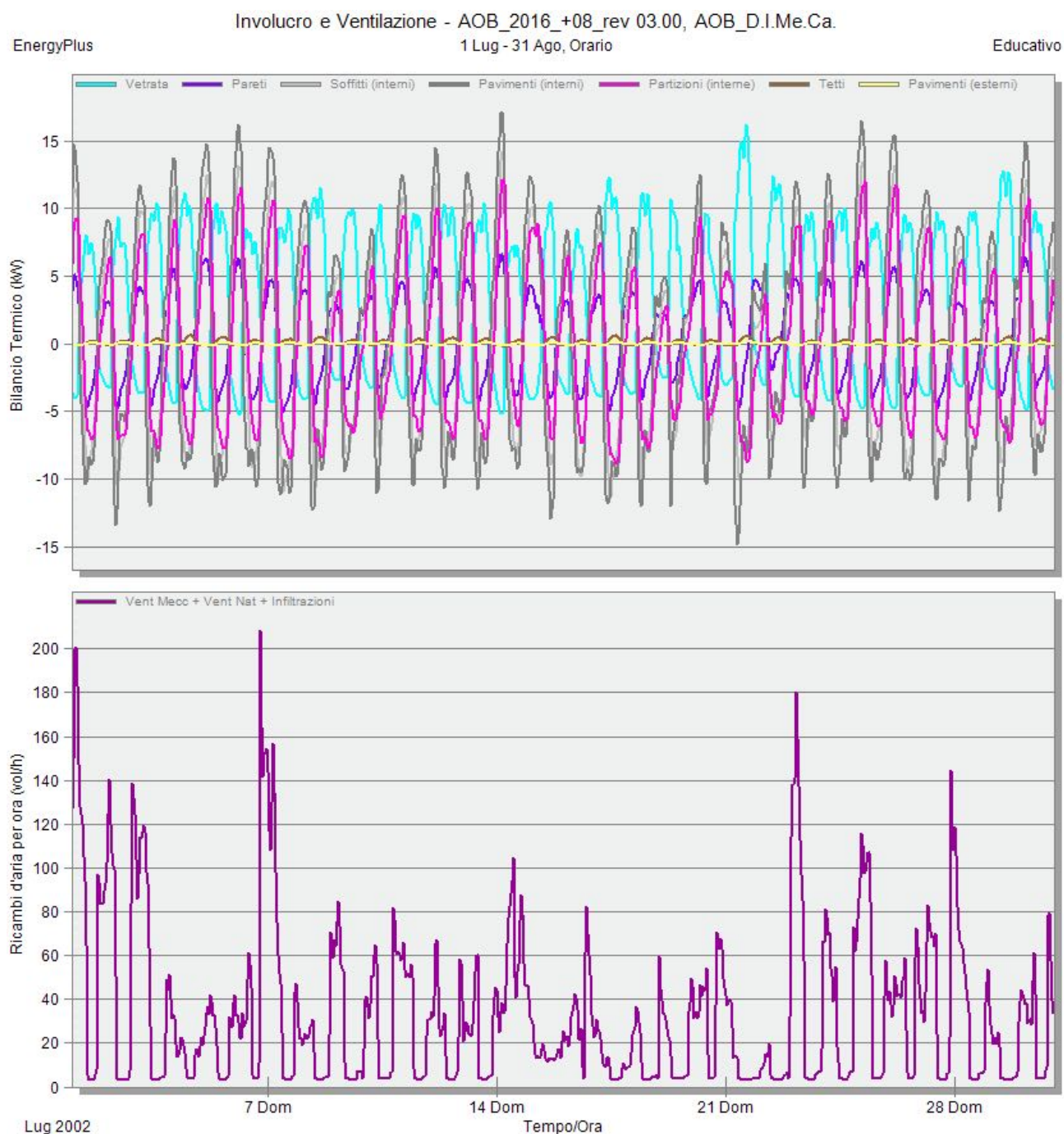


Figura 51 - Grafico relativo al bilancio termico riferito agli elementi di involucro e grafico della ventilazione del reparto di Medicina Interna 1.

LUGLIO

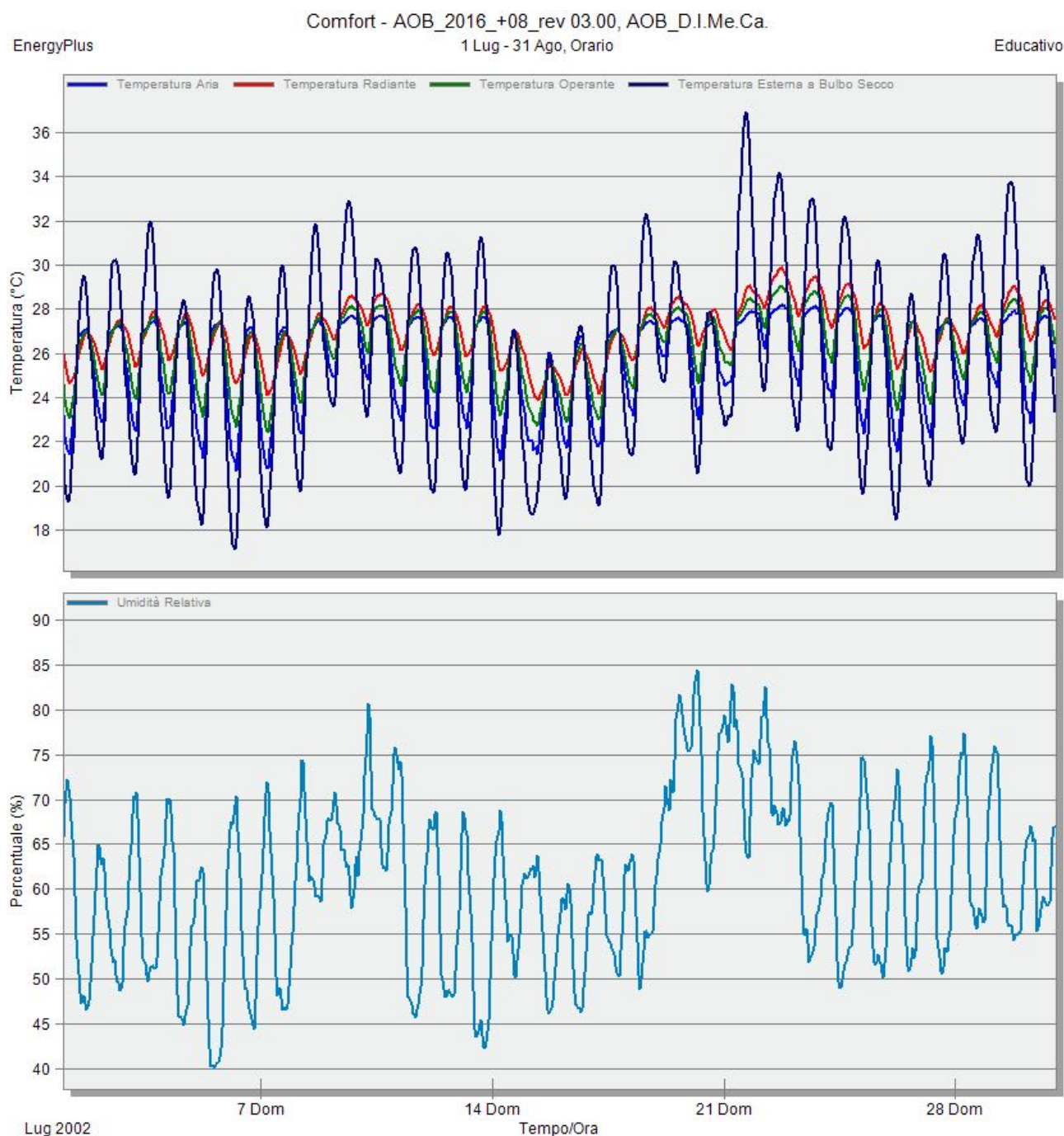


Figura 52 - Grafico relativo all'andamento delle temperature e dell'umidità relativa riferita al reparto di Medicina Interna 1.

LUGLIO

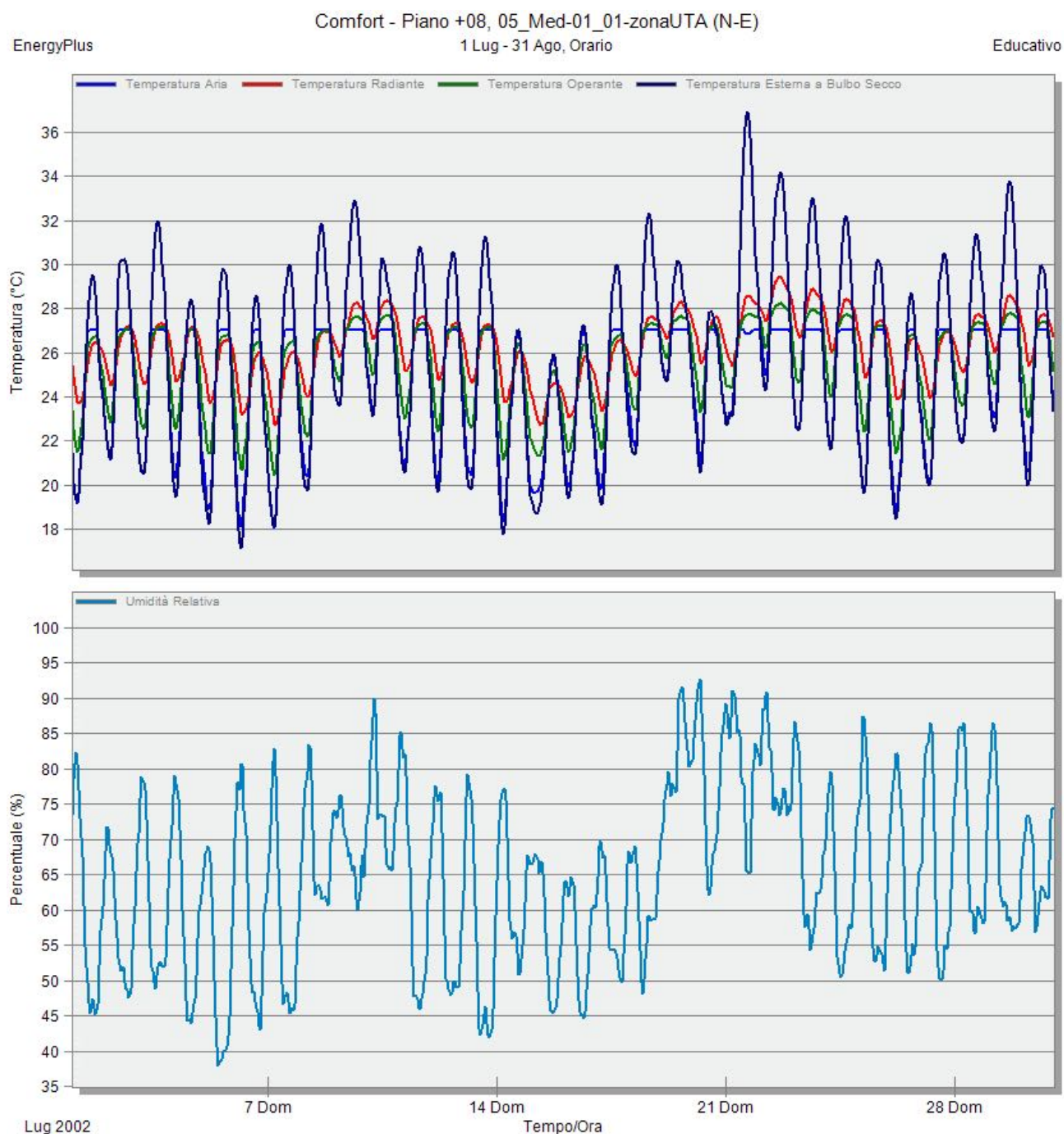


Figura 53 - Grafico relativo all'andamento delle temperature e dell'umidità relativa riferita alla sub-Zona 1 del reparto di Medicina Interna 1.

LUGLIO

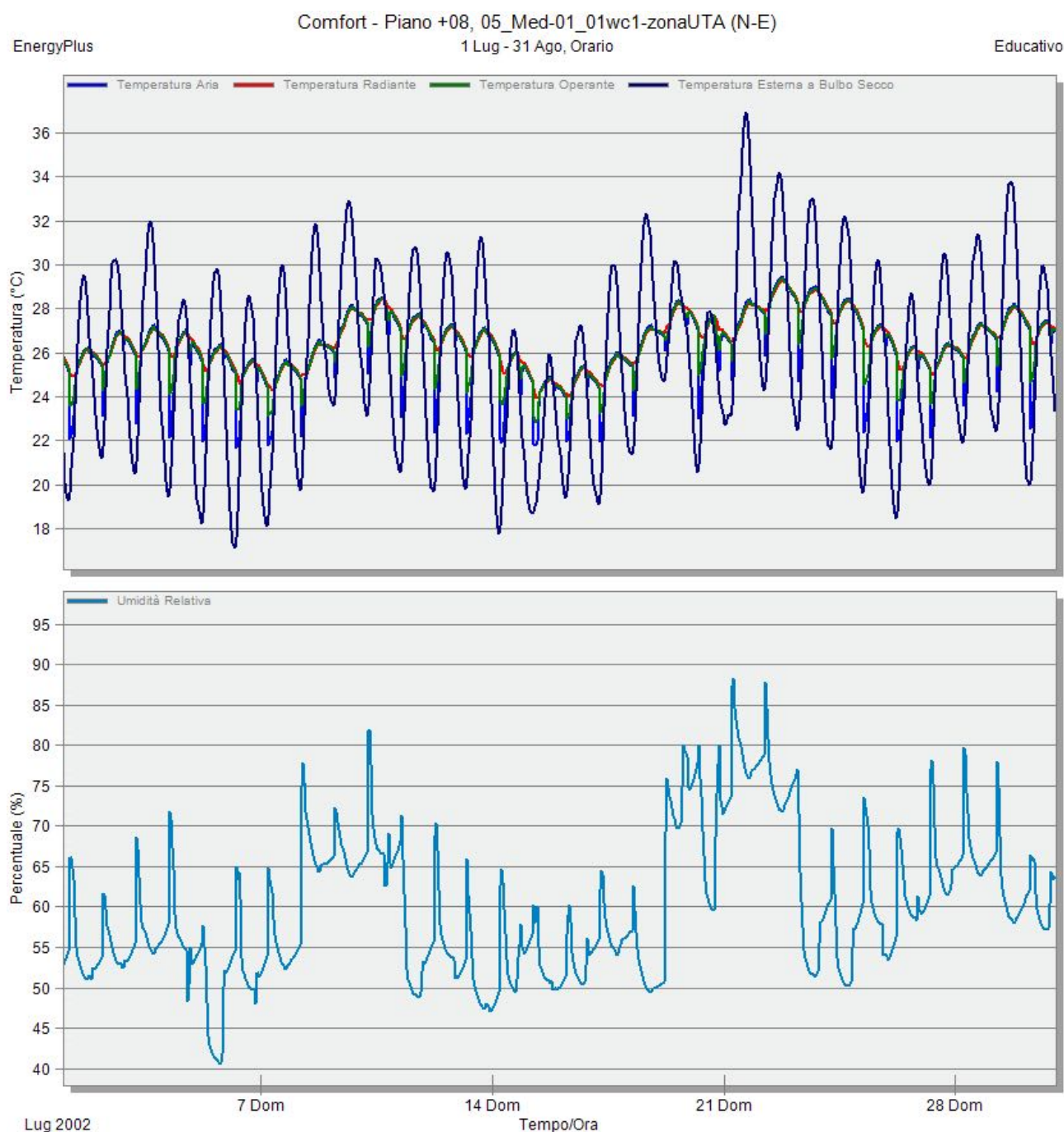


Figura 54 - Grafico dell'andamento della temperatura e dell'umidità relativa al wc1 della sub-Zona 1 del reparto di Medicina Interna 1.

LUGLIO

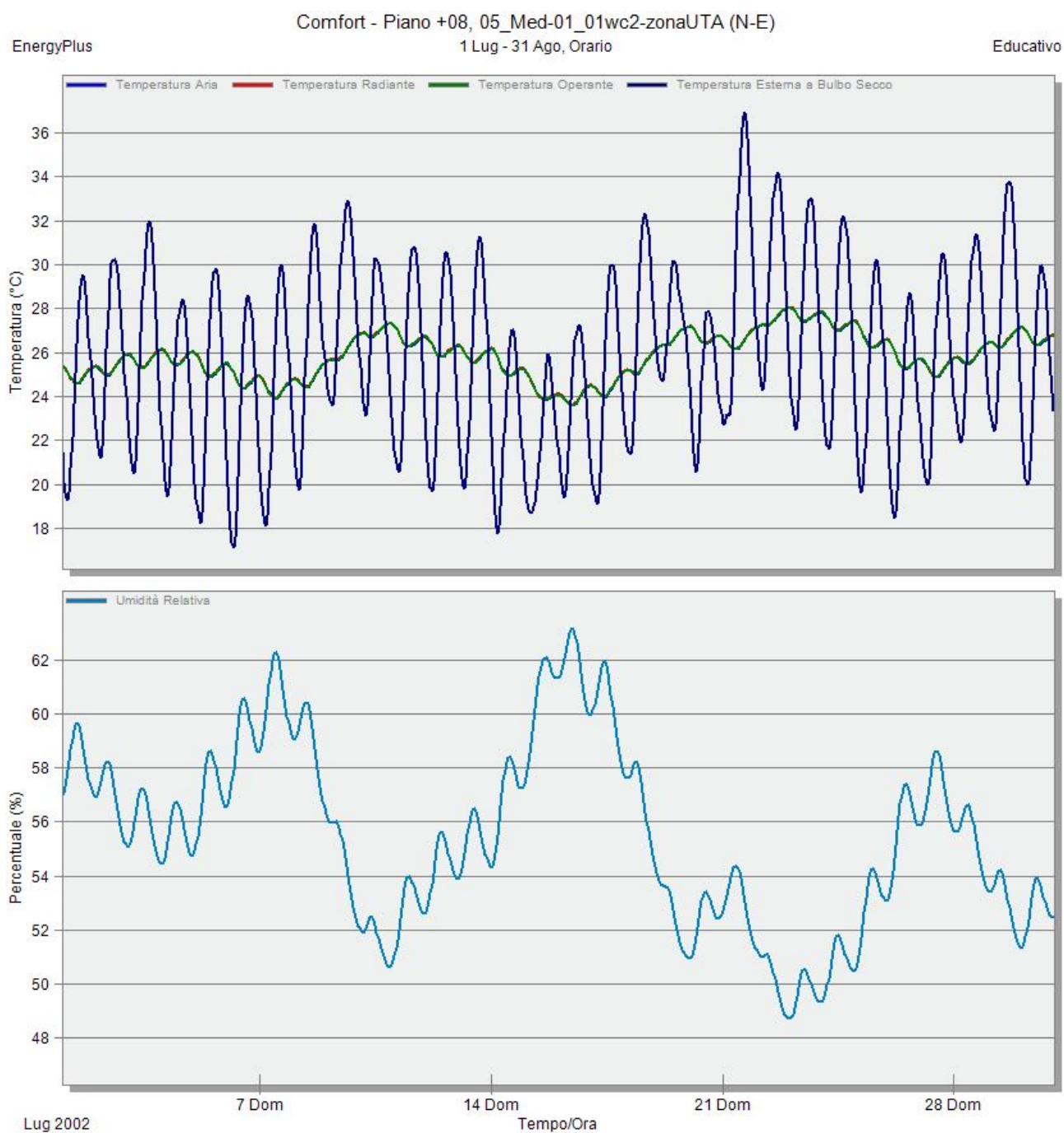


Figura 55 - Grafico dell'andamento della temperatura e dell'umidità relativa al wc2 della sub-Zona 1 del reparto di Medicina Interna 1.

LUGLIO

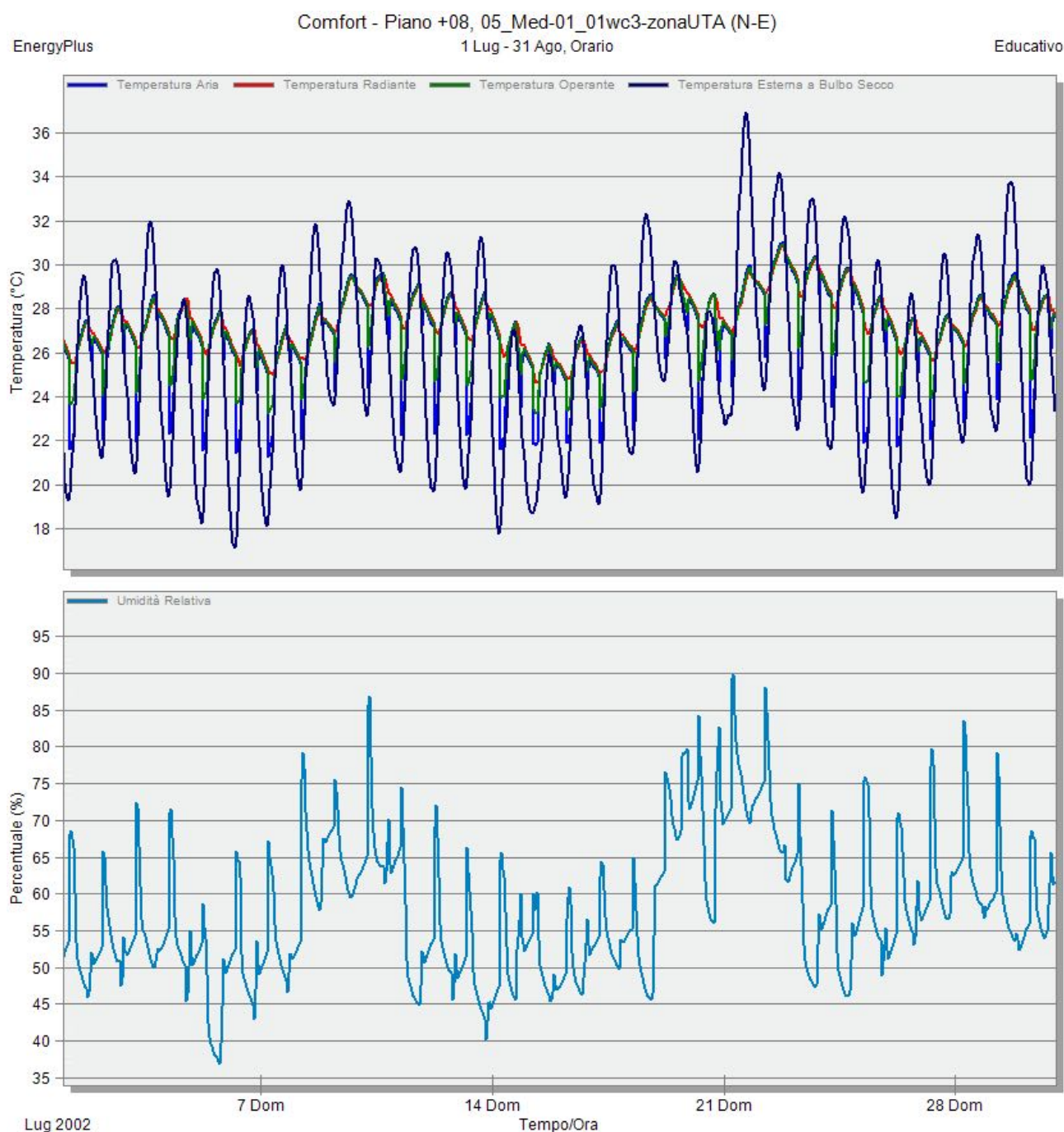


Figura 56 - Grafico dell'andamento della temperatura e dell'umidità relativa al wc3 della sub-Zona 1 del reparto di Medicina Interna 1.

LUGLIO

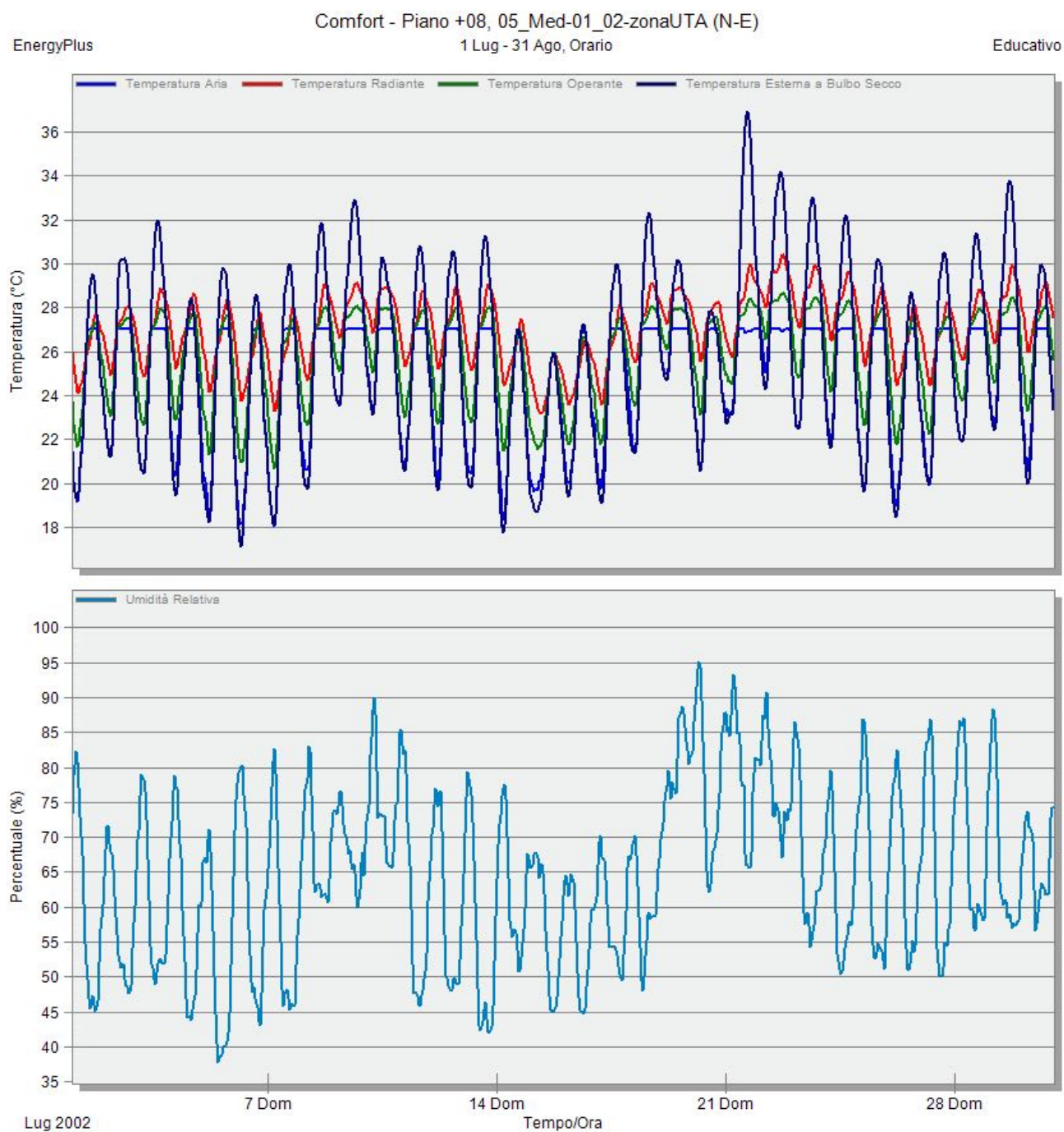


Figura 57 - Grafico relativo all'andamento delle temperature e dell'umidità relativa riferita alla sub-Zona 2 del reparto di Medicina Interna 1.

LUGLIO

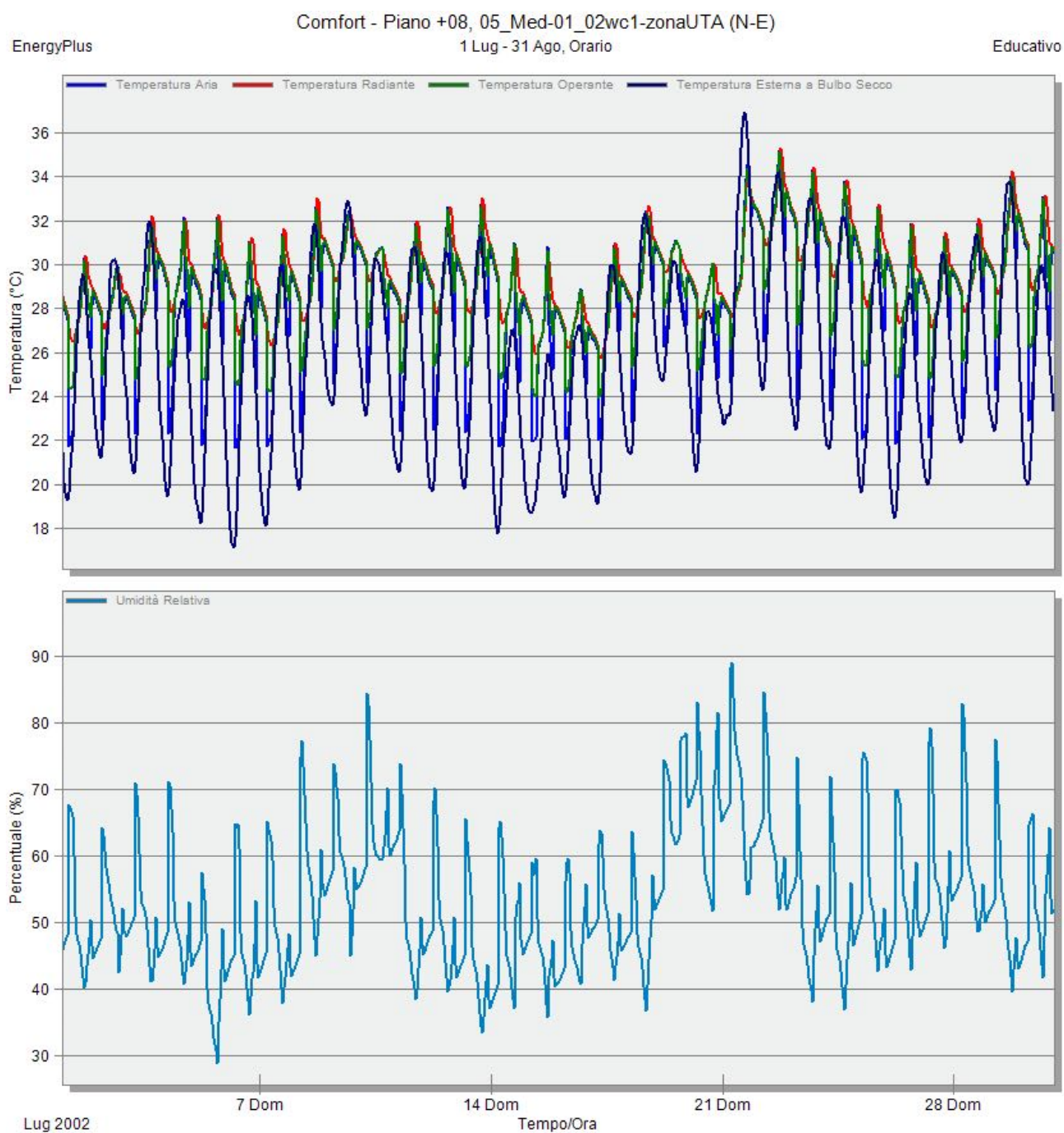


Figura 58 - Grafico dell'andamento della temperatura e dell'umidità relativa al wc1 della sub-Zona 2 del reparto di Medicina Interna 1.

LUGLIO

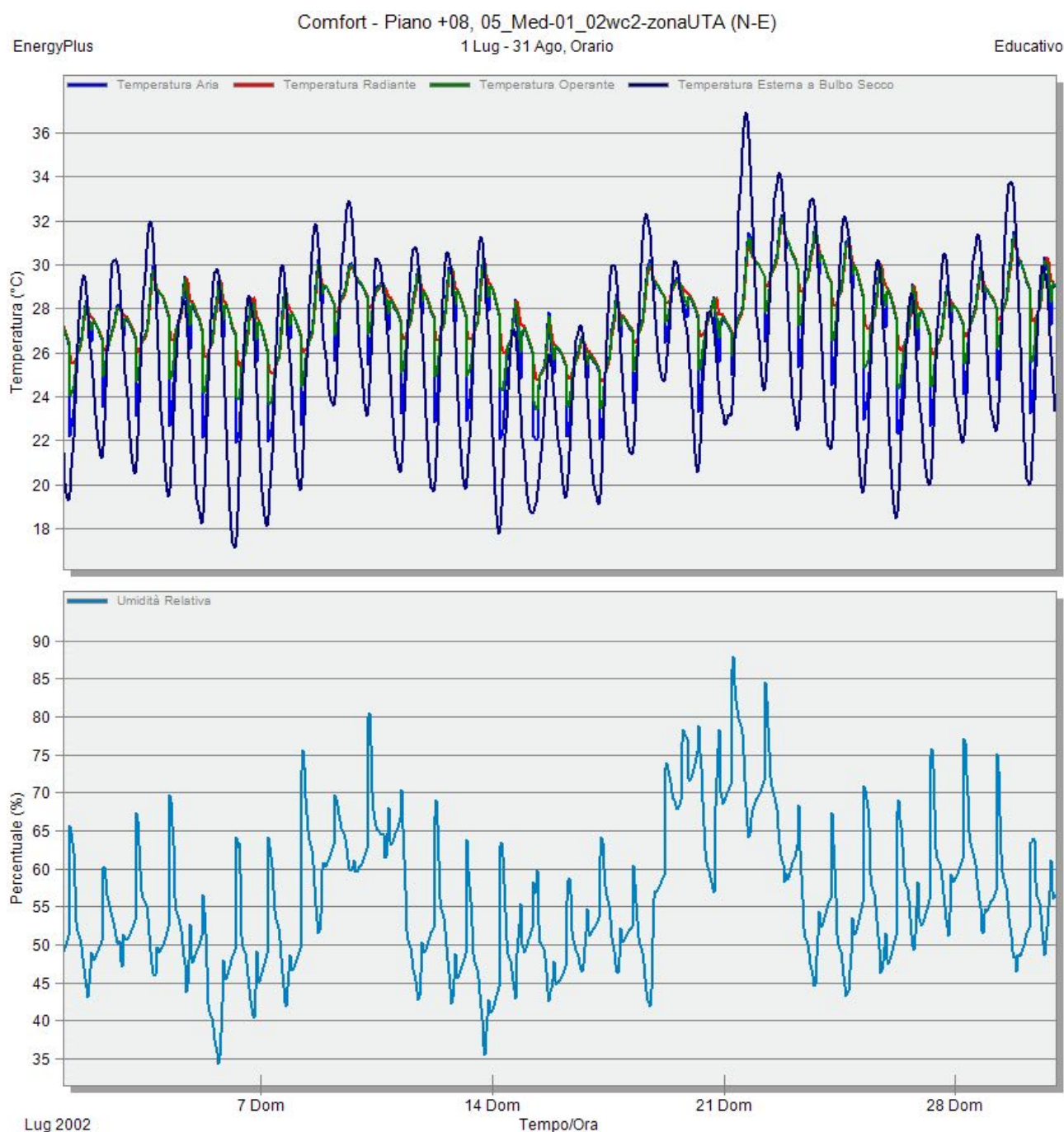


Figura 59 - Grafico dell'andamento della temperatura e dell'umidità relativa al wc2 della sub-Zona 2 del reparto di Medicina Interna 1.

LUGLIO

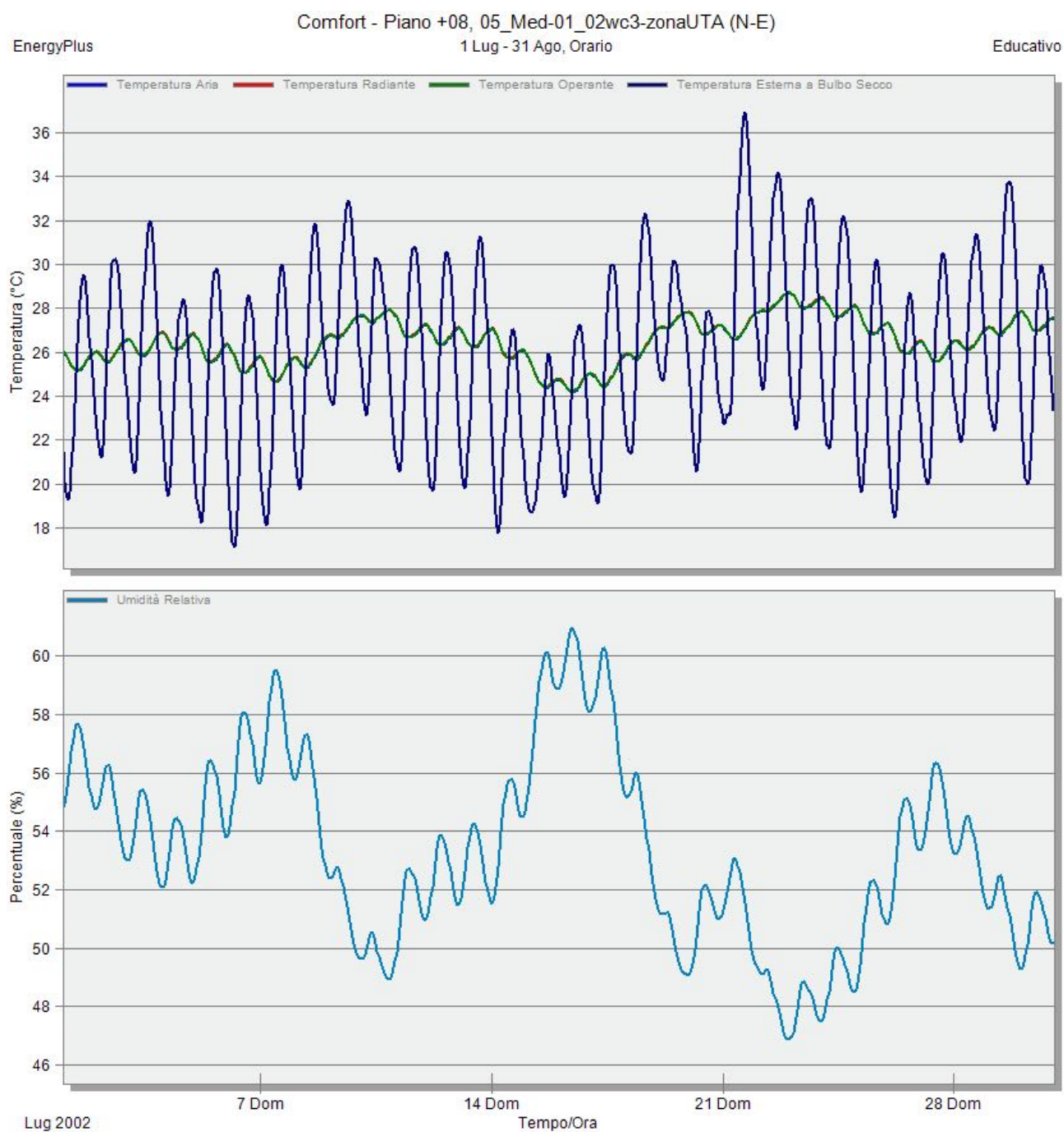


Figura 60 - Grafico dell'andamento della temperatura e dell'umidità relativa al wc3 della sub-Zona 2 del reparto di Medicina Interna 1.

LUGLIO

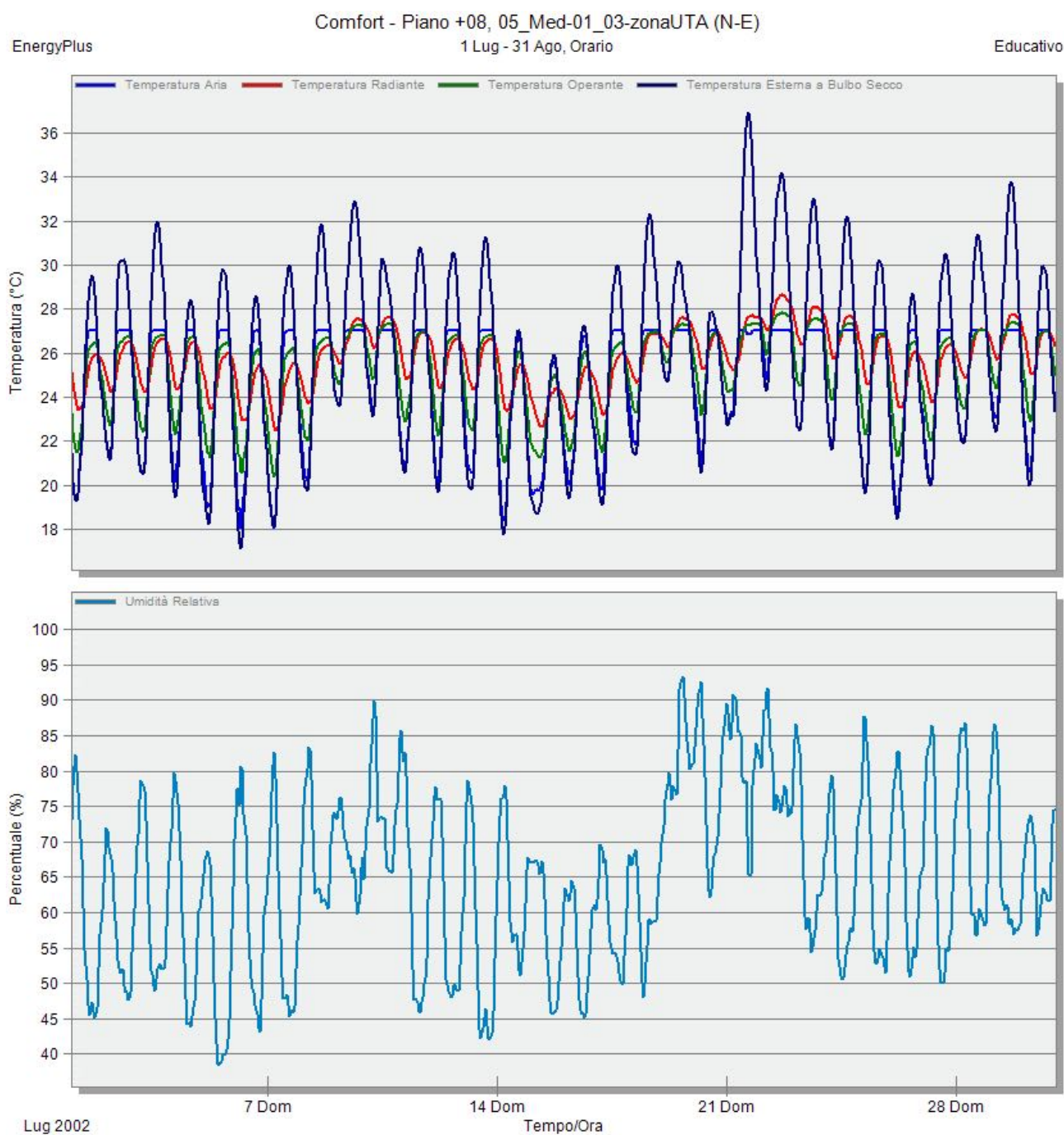


Figura 61 - Grafico relativo all'andamento delle temperature e dell'umidità relativa riferita alla sub-Zona 3 del reparto di Medicina Interna 1.

LUGLIO

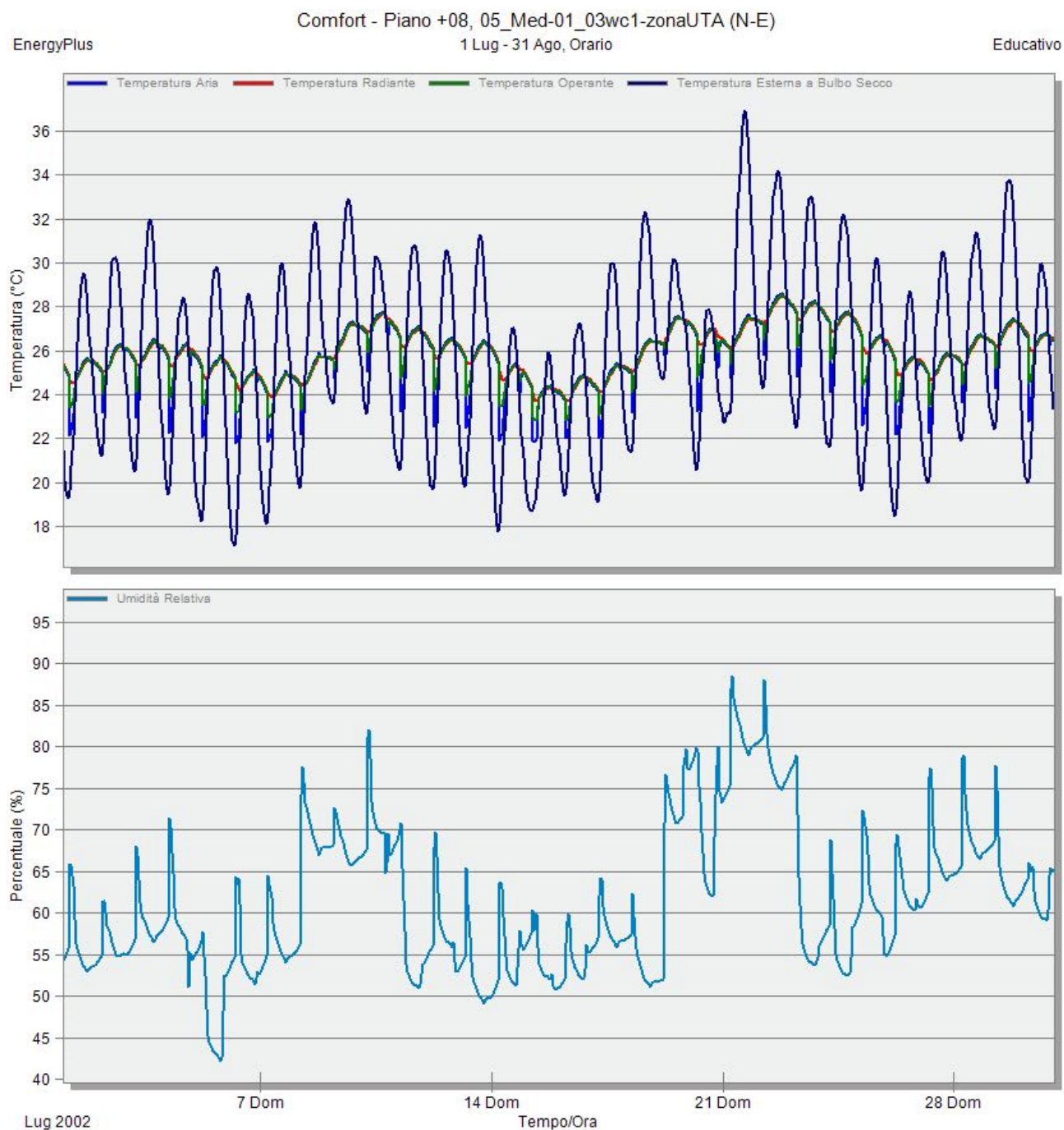


Figura 62 - Grafico dell'andamento della temperatura e dell'umidità relativa al wc1 della sub-Zona 3 del reparto di Medicina Interna 1

LUGLIO

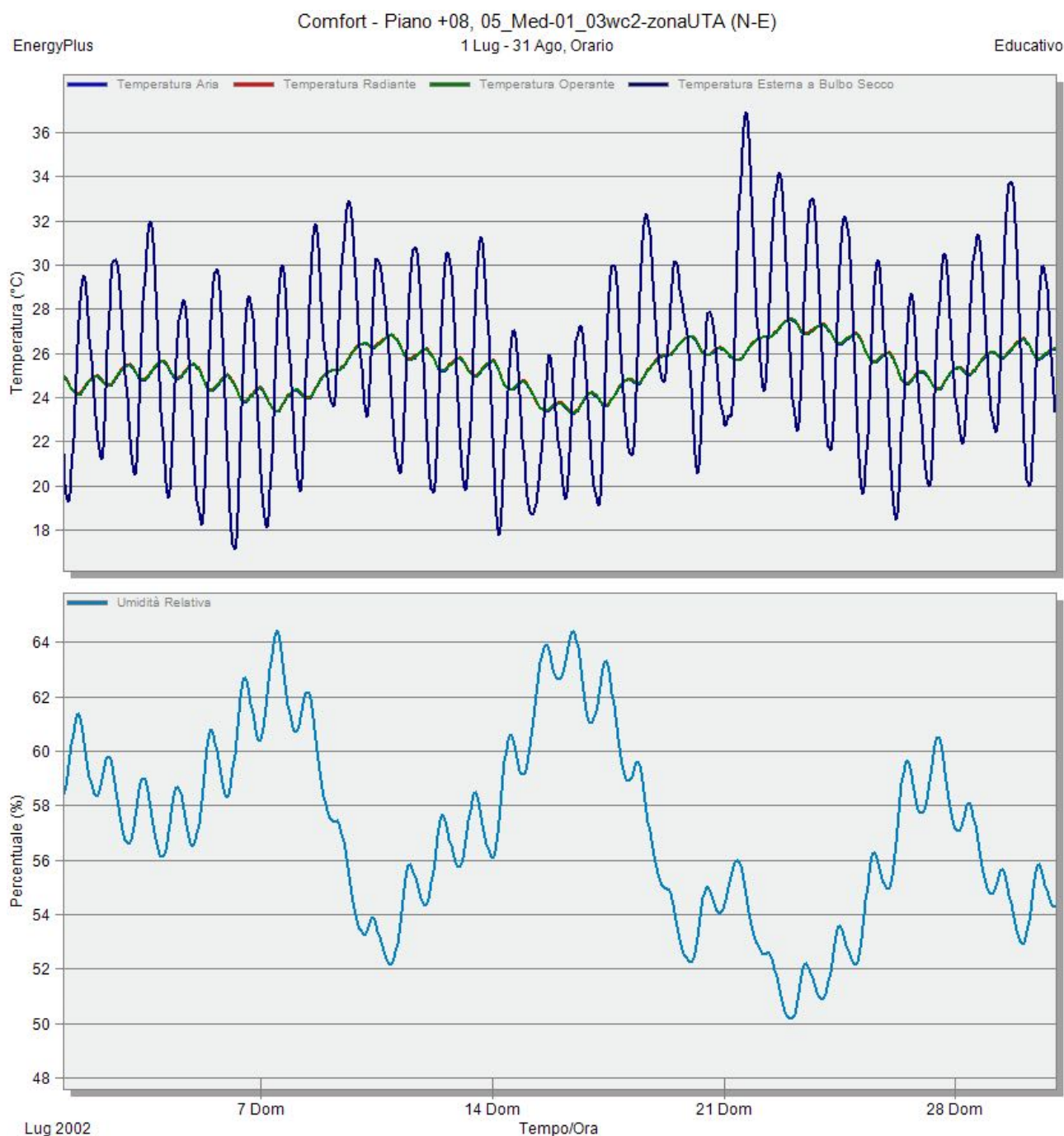


Figura 63 - Grafico dell'andamento della temperatura e dell'umidità relativa al wc2 della sub-Zona 3 del reparto di Medicina Interna 1

LUGLIO

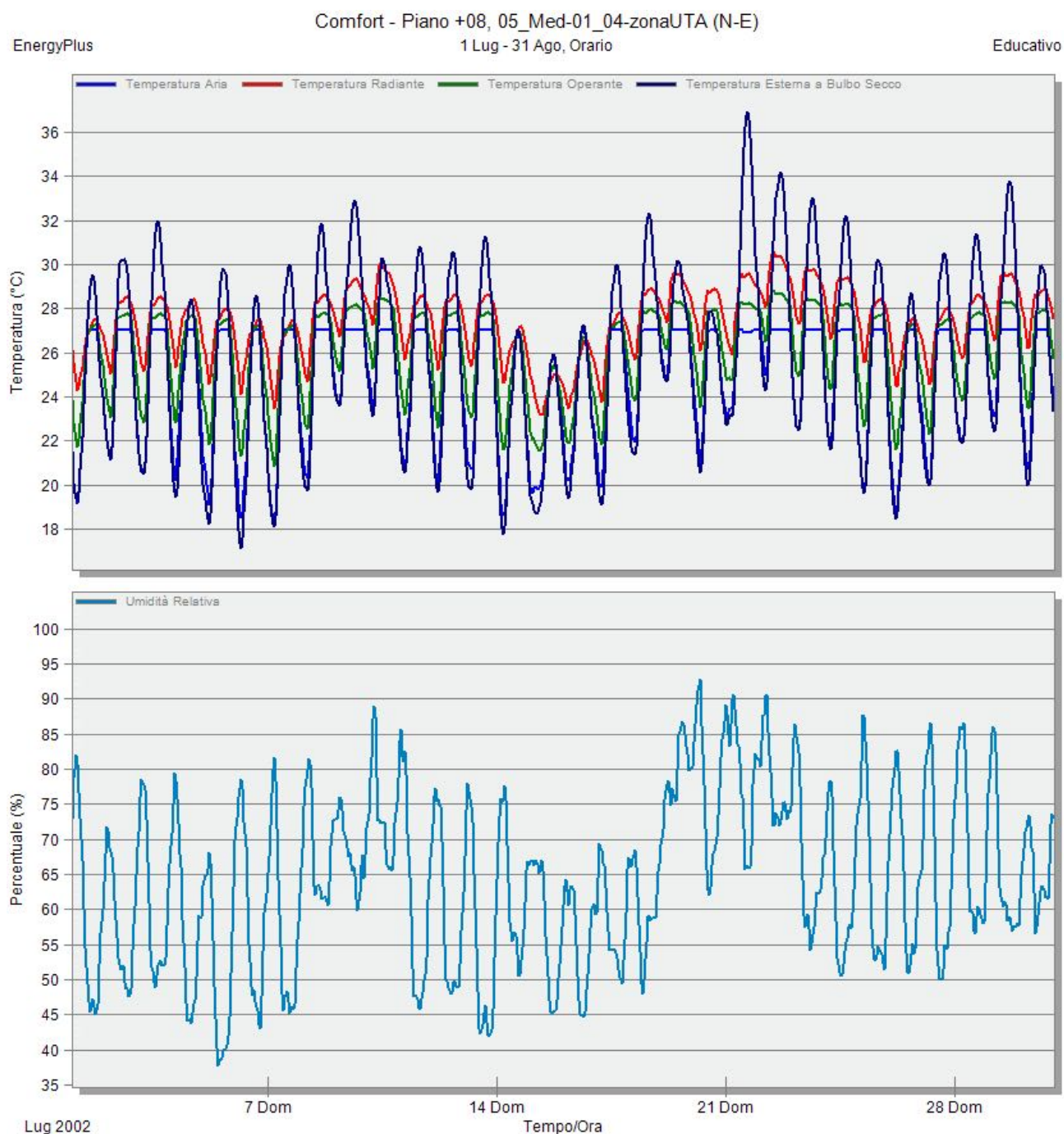


Figura 64 - Grafico dell'andamento della temperatura e dell'umidità relativa alla sub-Zona 4 del reparto di Medicina Interna 1

LUGLIO

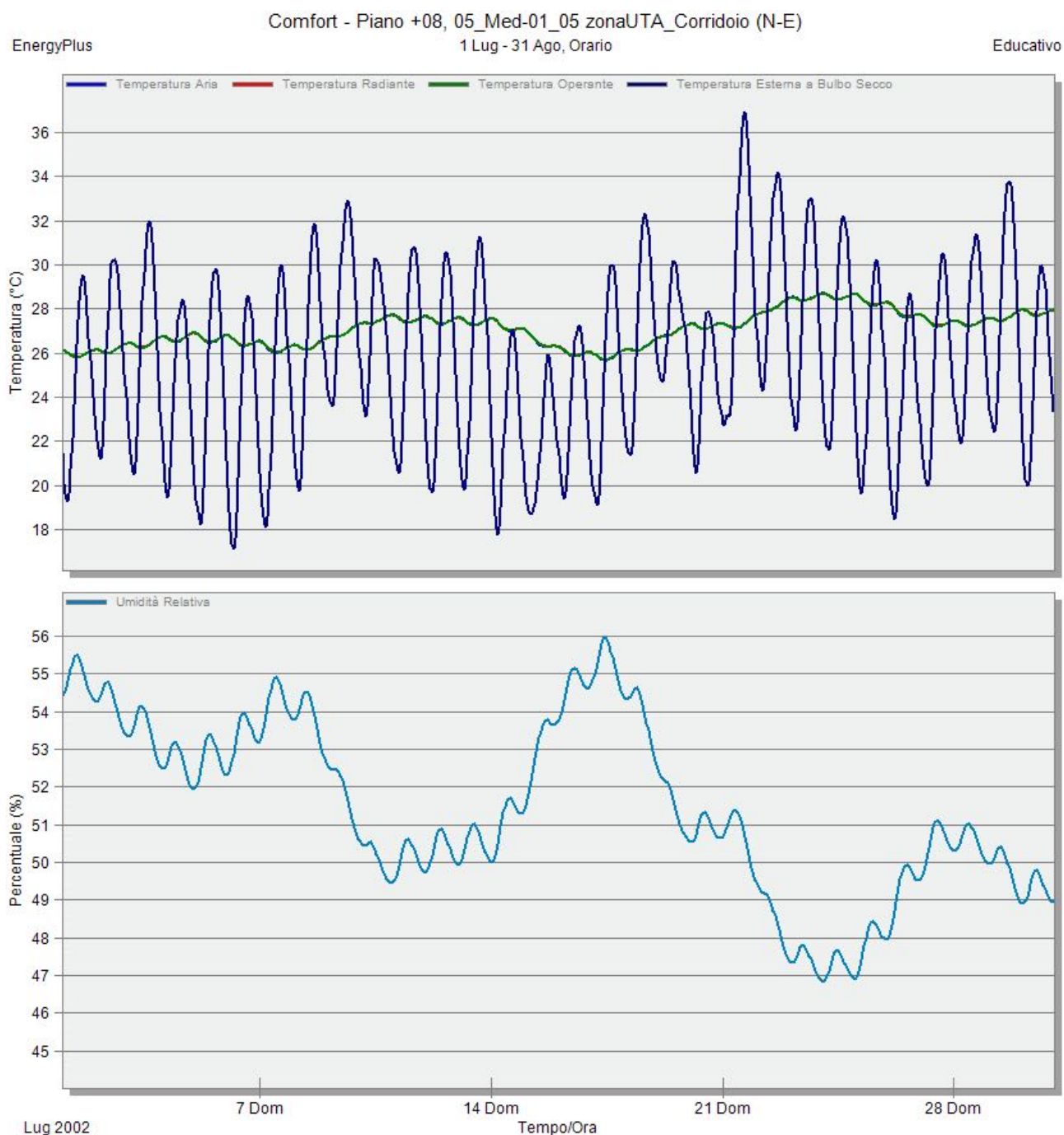


Figura 65 - Grafico dell'andamento della temperatura e dell'umidità relativa alla sub-Zona 5 del reparto di Medicina Interna 1

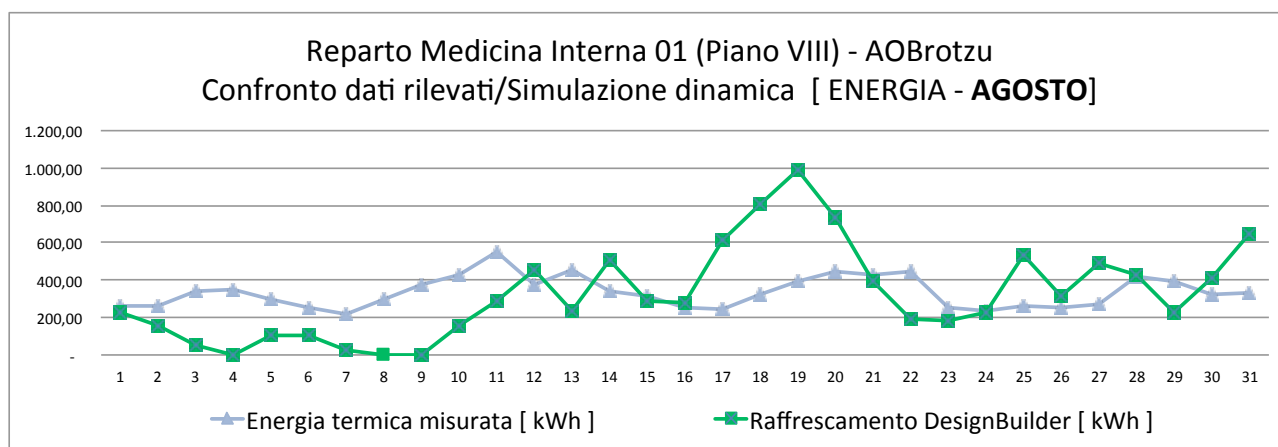
Mese di AGOSTO

Figura 66 - Grafico di confronto dei dati di Energia misurati ed i risultati della simulazione dinamica.

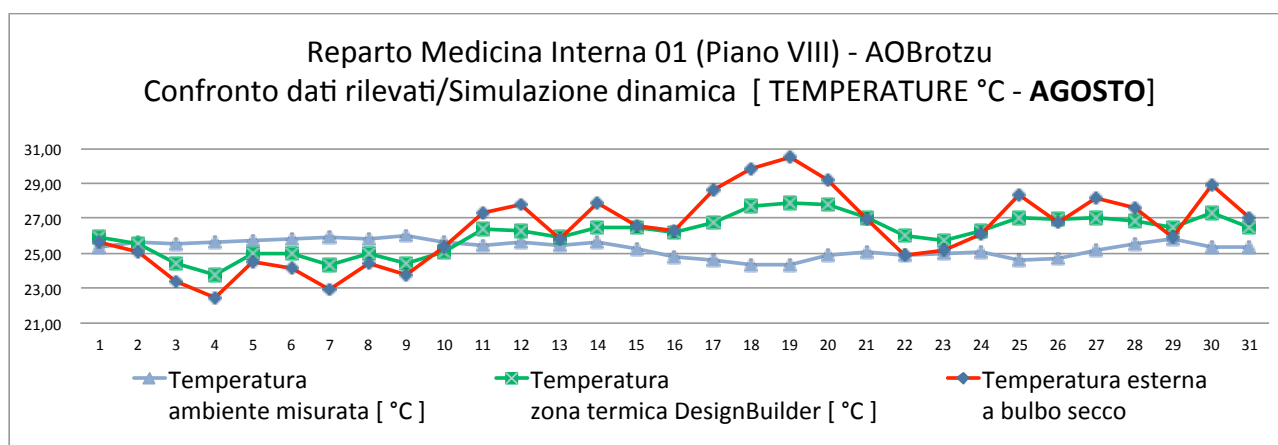


Figura 67 - Grafico di confronto dei dati di Temperatura misurati ed i risultati della simulazione dinamica.

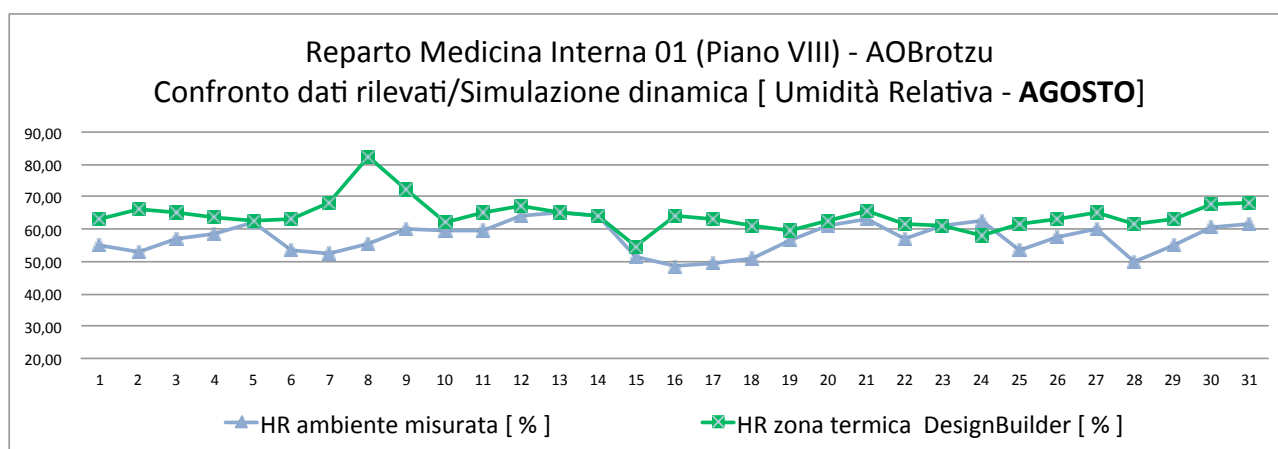


Figura 68 - Grafico di confronto dei dati di Umidità Relativa misurati ed i risultati della simulazione dinamica.

Serie di dati con *time-step* orario

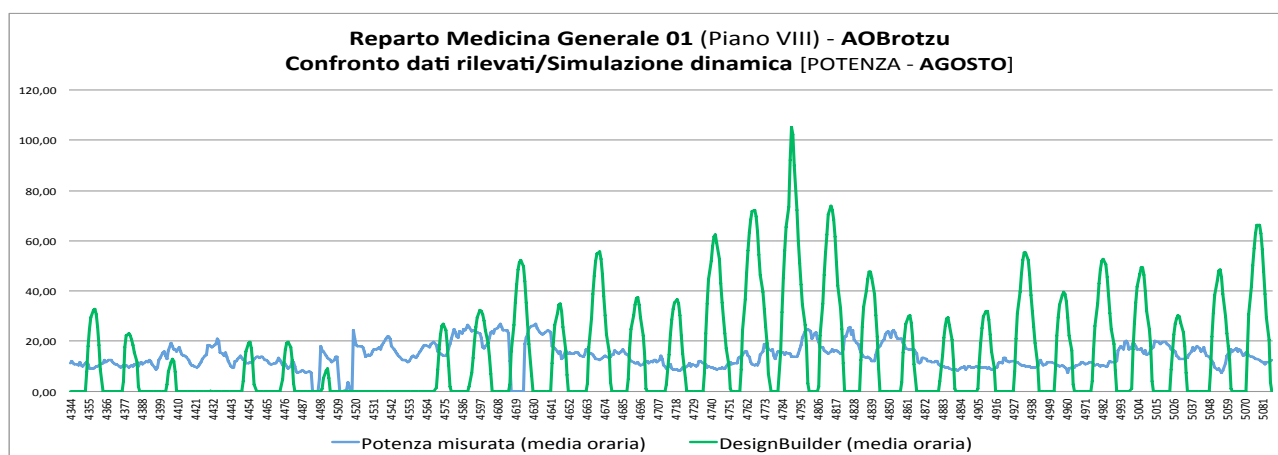


Figura 69 - Grafico di confronto tra i valori delle misure e dei risultati della simulazione riferite alla potenza oraria del mese di Agosto.

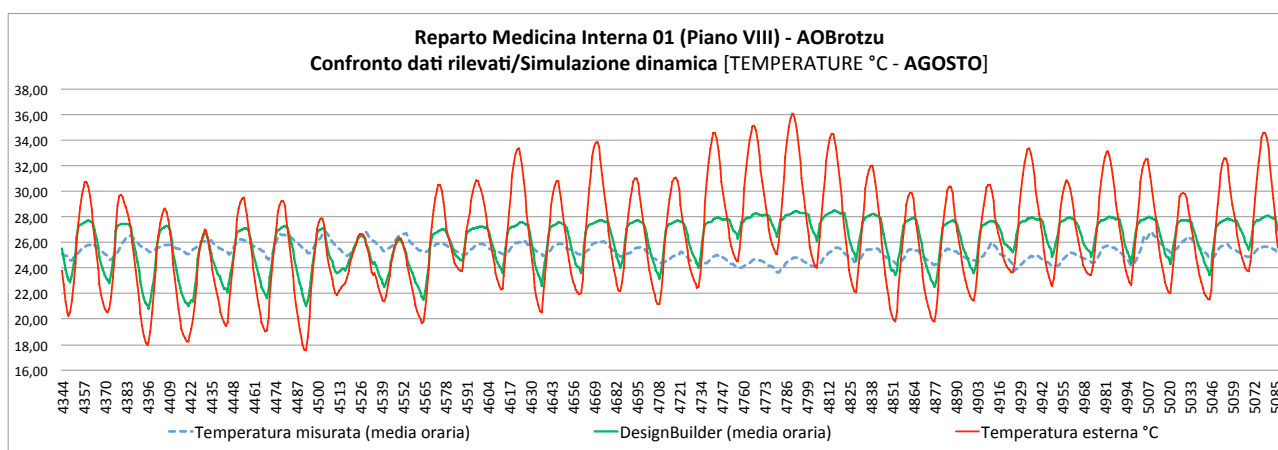


Figura 70 - Grafico di confronto tra i valori delle misure e dei risultati della simulazione riferite alla temperatura oraria del mese di Agosto.

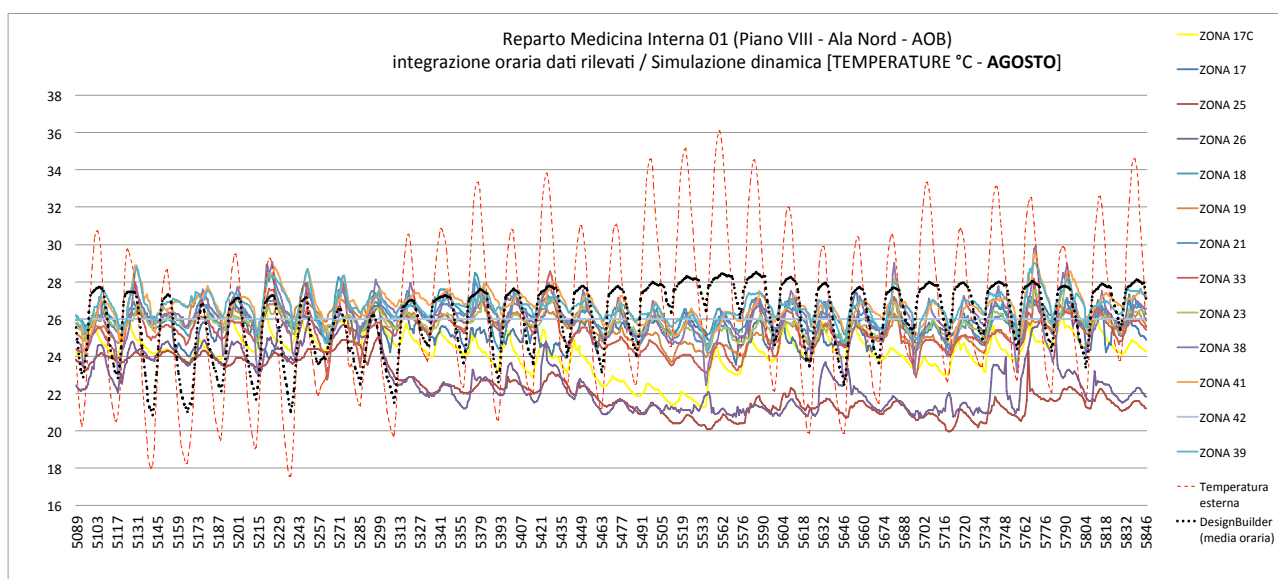


Figura 71 - Grafico di confronto tra l'andamento delle temperature in tutte le zone termiche monitorate, la temperatura esterna ed i risultati della simulazione, riferite a valori orari medi del mese di Agosto.

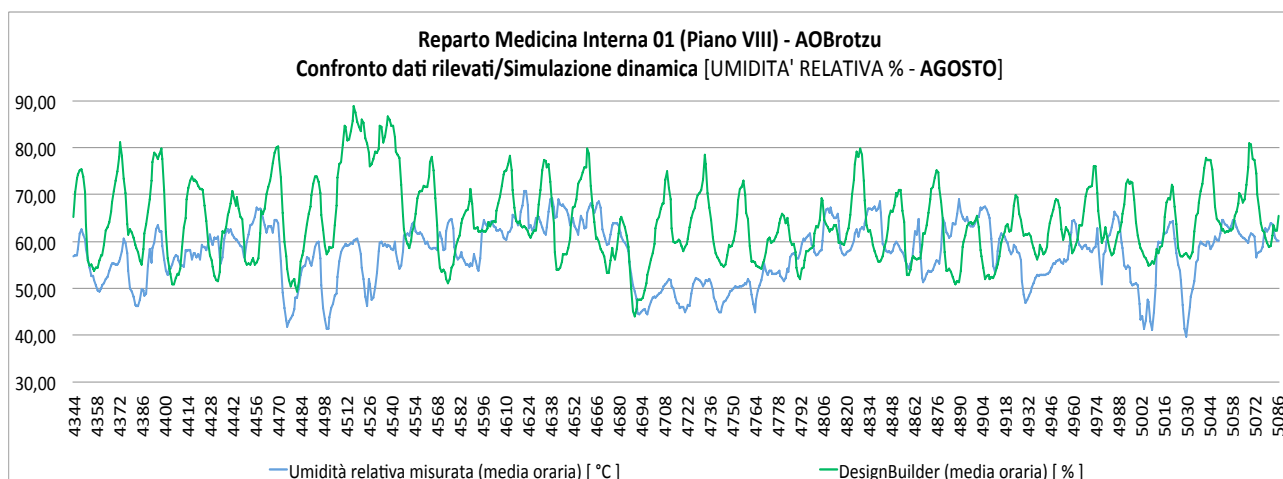


Figura 72 - Grafico di confronto tra i valori delle misure e dei risultati della simulazione riferite all'umidità relativa oraria del mese di Agosto.

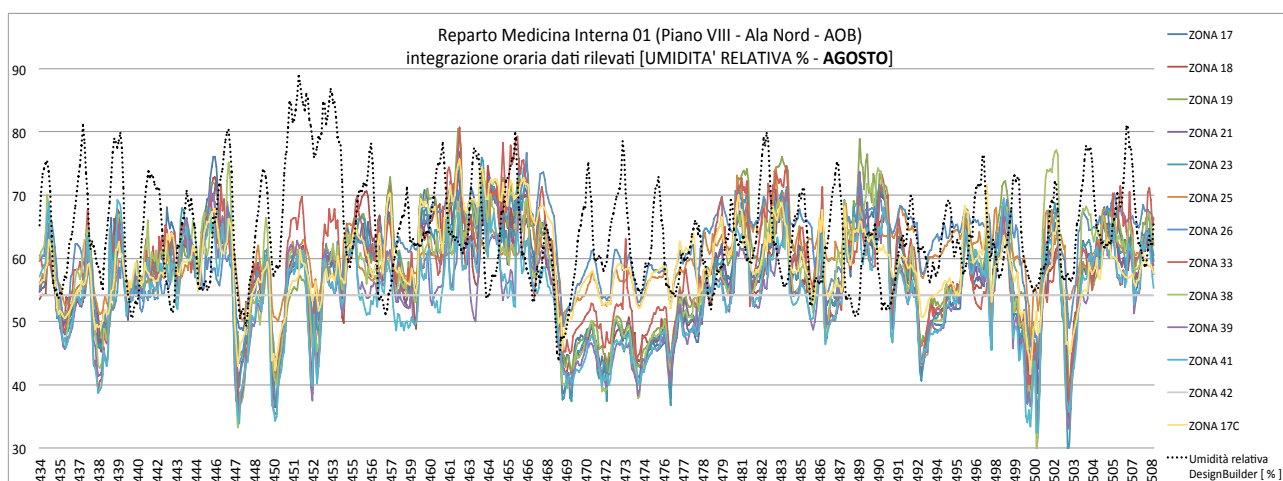


Figura 73 - Grafico di confronto tra l'andamento delle umidità relative in tutte le zone termiche monitorate ed i risultati della simulazione, riferite a valori orari medi del mese di Agosto.

AGOSTO	ENERGIA			TEMPERATURE	TEMPERATURE	differenza	UMIDITA'	HR zona termica DesignBuilder	differenza
	Energia termica misurata	Raffrescamento DesignBuilder	differenza						
GIORNI	[kWh]	[kWh]	[%]	[°C]	[°C]	[%]	[%]	[%]	[%]
1	258,34	229,37	11%	25,33	25,91	2%	54,83	62,87	13%
2	258,95	157,12	39%	25,62	25,57	0%	52,74	65,98	20%
3	338,86	55,92	83%	25,59	24,42	-5%	57,26	64,93	12%
4	346,63	0,08	100%	25,68	23,76	-8%	58,77	63,78	8%
5	299,64	101,57	66%	25,73	24,99	-3%	62,25	62,50	0%
6	257,80	105,92	59%	25,86	24,98	-3%	53,37	62,96	15%
7	214,19	29,17	86%	25,96	24,37	-7%	52,23	67,98	23%
8	297,57	-	100%	25,87	25,01	-3%	55,59	82,39	33%
9	377,38	-	100%	25,99	24,40	-7%	59,92	72,38	17%
10	430,69	157,62	63%	25,60	25,03	-2%	59,78	62,10	4%
11	547,77	286,10	48%	25,48	26,35	3%	59,34	64,90	9%
12	378,88	456,17	-20%	25,60	26,30	3%	64,29	67,18	4%
13	458,31	239,12	48%	25,47	25,93	2%	65,26	65,13	0%
14	343,73	506,97	-47%	25,60	26,49	3%	64,32	64,05	0%
15	316,03	288,36	9%	25,28	26,47	5%	51,27	54,72	6%
16	249,98	281,84	-13%	24,79	26,19	5%	48,62	64,21	24%
17	242,87	613,78	-153%	24,61	26,79	8%	49,19	63,06	22%
18	323,70	801,70	-148%	24,35	27,72	12%	50,95	61,10	17%
19	390,02	988,64	-153%	24,35	27,92	13%	56,27	59,51	5%
20	444,41	735,19	-65%	24,89	27,83	11%	61,23	62,70	2%
21	425,52	397,35	7%	25,09	27,02	7%	63,21	65,40	3%
22	449,66	188,27	58%	24,91	26,03	4%	57,06	61,72	8%
23	251,90	185,11	27%	24,97	25,73	3%	61,17	61,12	0%
24	231,66	227,94	2%	25,08	26,26	4%	62,53	58,20	-7%
25	265,79	532,75	-100%	24,60	27,07	9%	53,53	61,76	13%
26	250,24	318,41	-27%	24,66	26,96	9%	57,53	63,00	9%
27	266,65	494,49	-85%	25,13	27,01	7%	60,04	64,89	7%
28	417,66	432,45	-4%	25,55	26,90	5%	50,09	61,70	19%
29	391,66	223,48	43%	25,80	26,49	3%	54,83	63,01	13%
30	321,34	408,56	-27%	25,33	27,29	7%	60,73	67,68	10%
31	330,45	649,98	-97%	25,35	26,48	4%	61,58	68,02	9%
MENSILE	10.378,27	10.093,42	-2,8%	25,29	26,12	3,2%	57,41	64,22	10,6%
differenza	-2,82%			media giornaliera mensile			media giornaliera mensile		

Figura 74 - Tabella di confronto tra i valori delle misure e dei risultati della simulazione (giornaliero mensile).

A questo punto, all'interno dell'ambiente di lavoro di DesignBuilder si è proceduto ad esaminare, nel dettaglio, tutte le singole sub-Zone termiche individuate, ottenendo i valori relativi alle condizioni di *indoor comfort* di ciascuna di esse per il mese di Agosto.

I grafici a seguire, come già in precedenza fatto per il mese di Luglio, riportano il bilancio di energia dovuto alle dispersioni e agli eventuali apporti gratuiti dovuti alla trasmissione del calore attraverso le pareti che circoscrivono la zona termica rappresentata da tutto il reparto di Medicina Interna 1.

I grafici riportano, anche, i parametri termo-igrometrici di zona simulati per l'intero reparto di Medicina Interna 1, per le sub-Zone n°1, n°2, n°3, n°4 e n°5 e per gli ambienti che ospitano gli annessi servizi igienici, che rappresentano i locali "critici" del sistema edificio impianti per le ragioni descritte al paragrafo 4.2.1.

AGOSTO

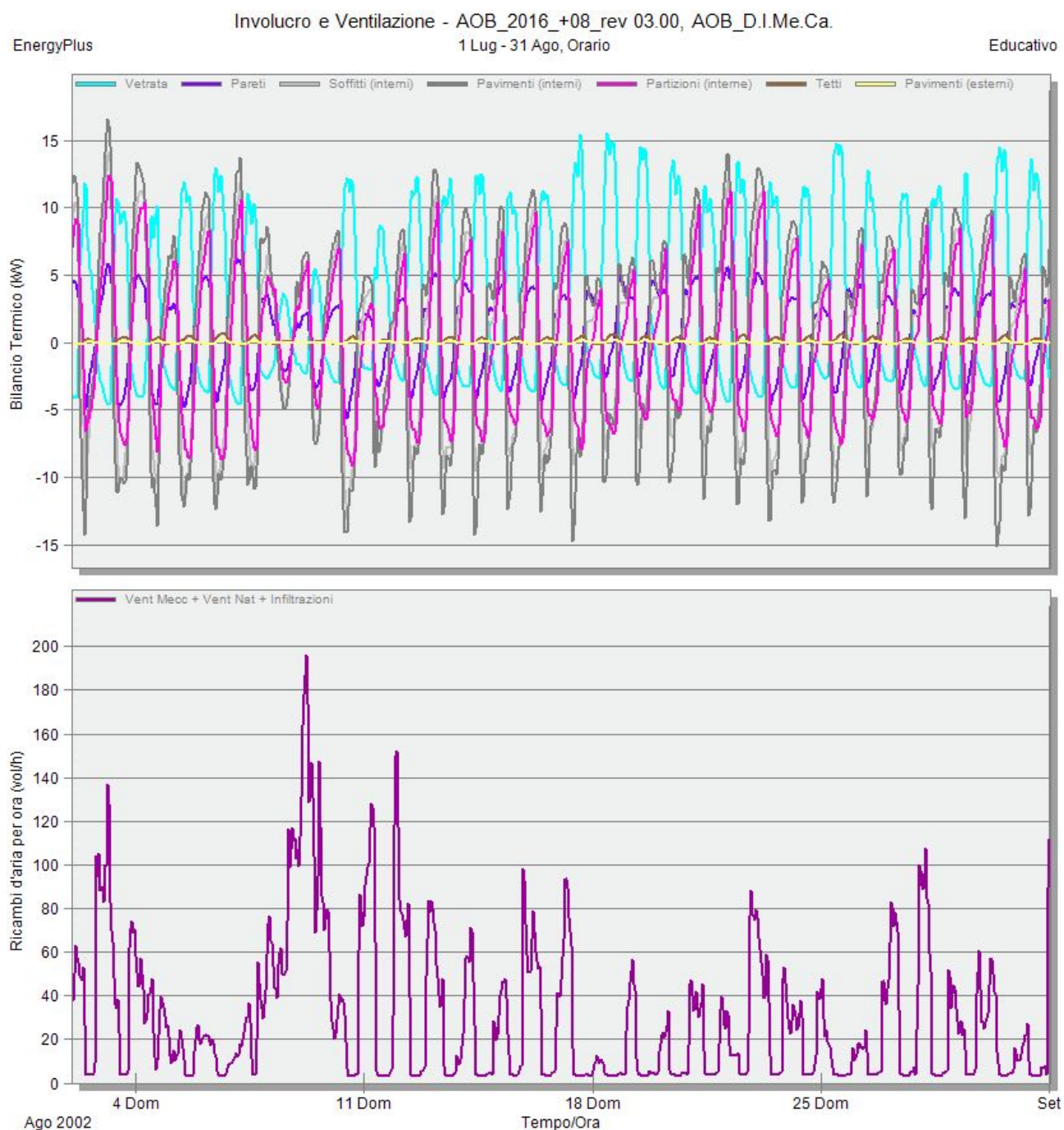


Figura 75 - Grafico relativo al bilancio termico riferito agli elementi di involucro e grafico della ventilazione del reparto di Medicina Interna 1.

AGOSTO

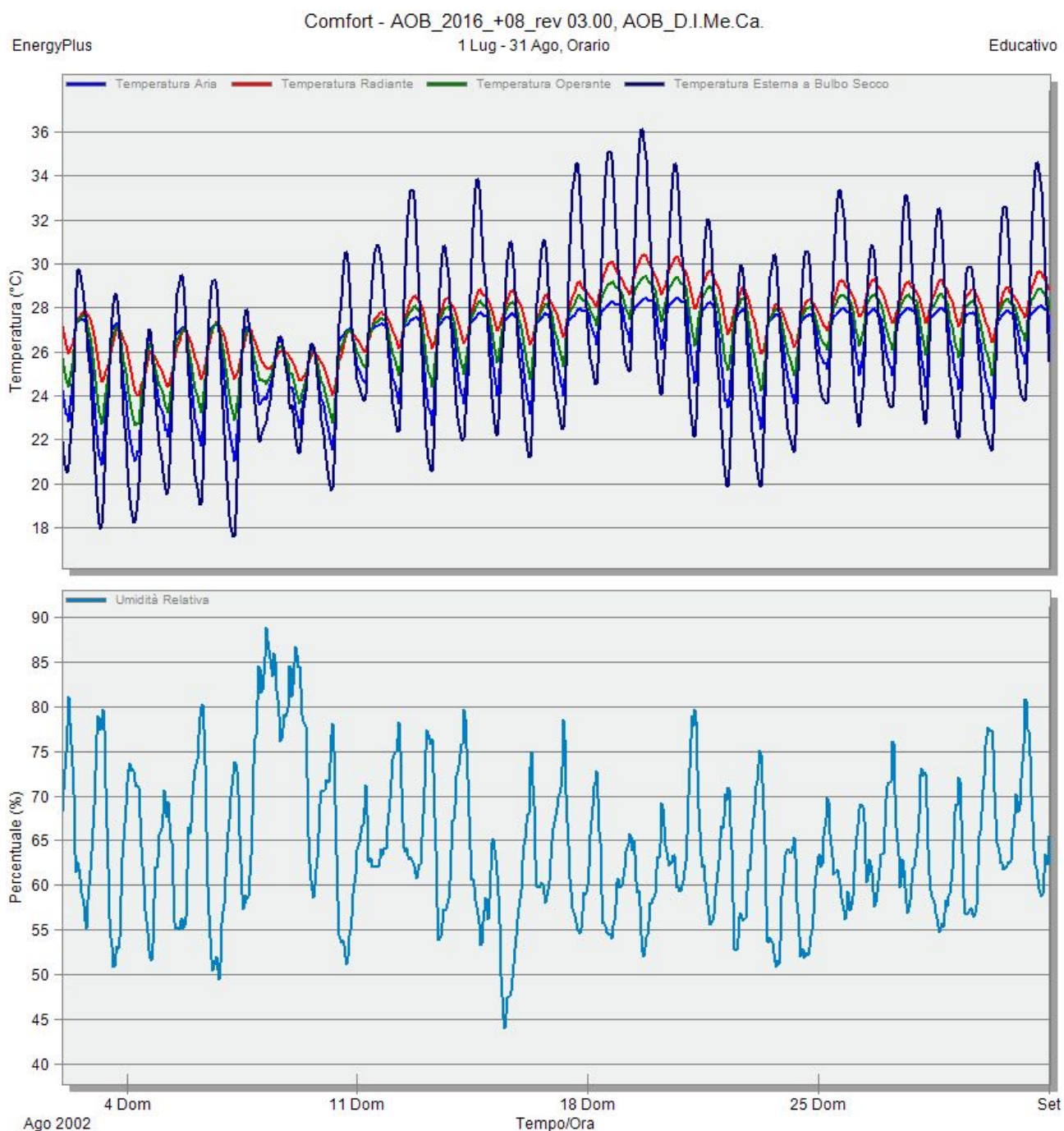


Figura 76 - Grafico dell'andamento della temperatura e dell'umidità relativa all'interno dell'intero reparto di Medicina Interna 1.

AGOSTO

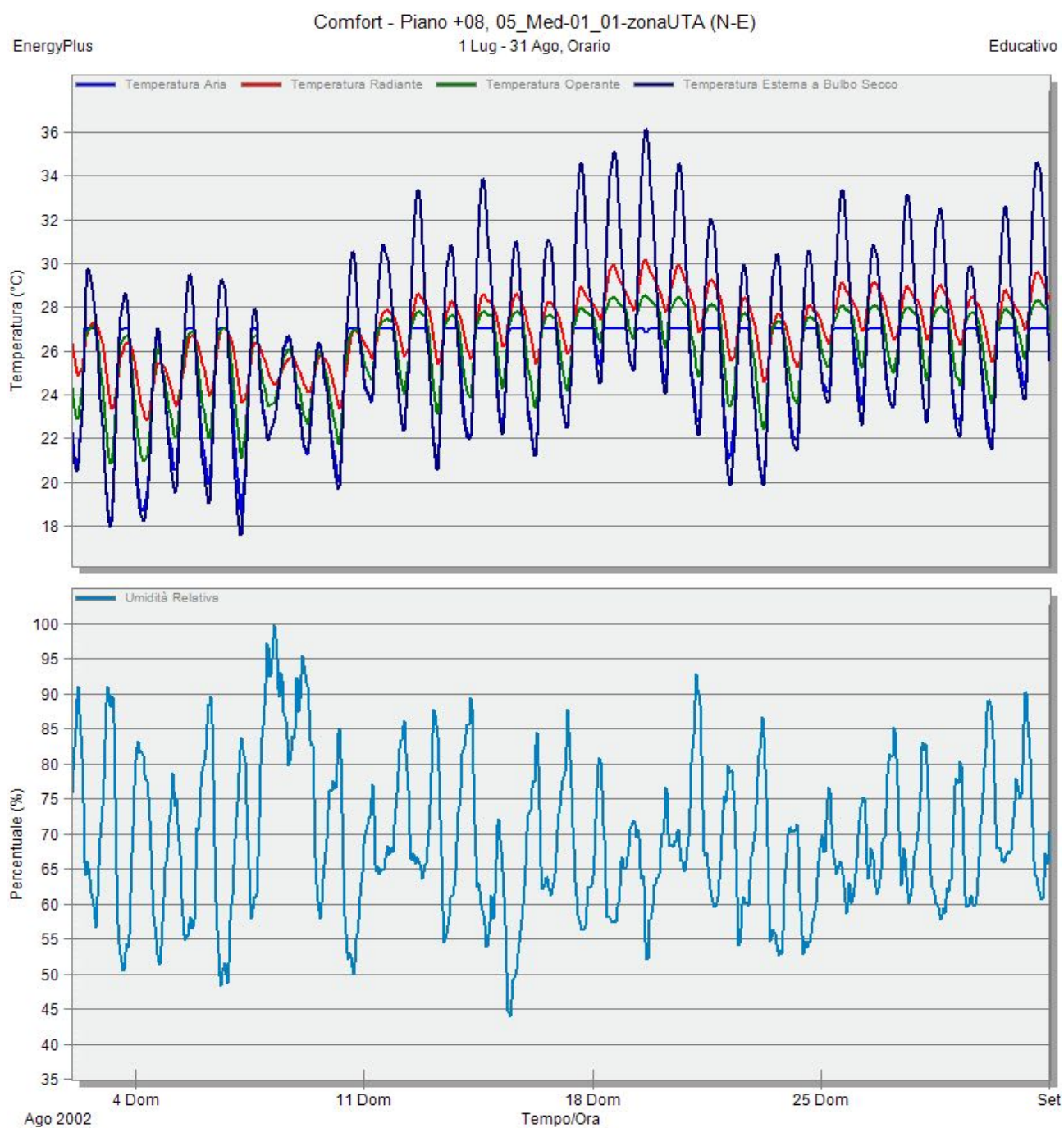


Figura 77 - Grafico dell'andamento della temperatura e dell'umidità relativa alla sub-Zona 1 del reparto di Medicina Interna 1.

AGOSTO

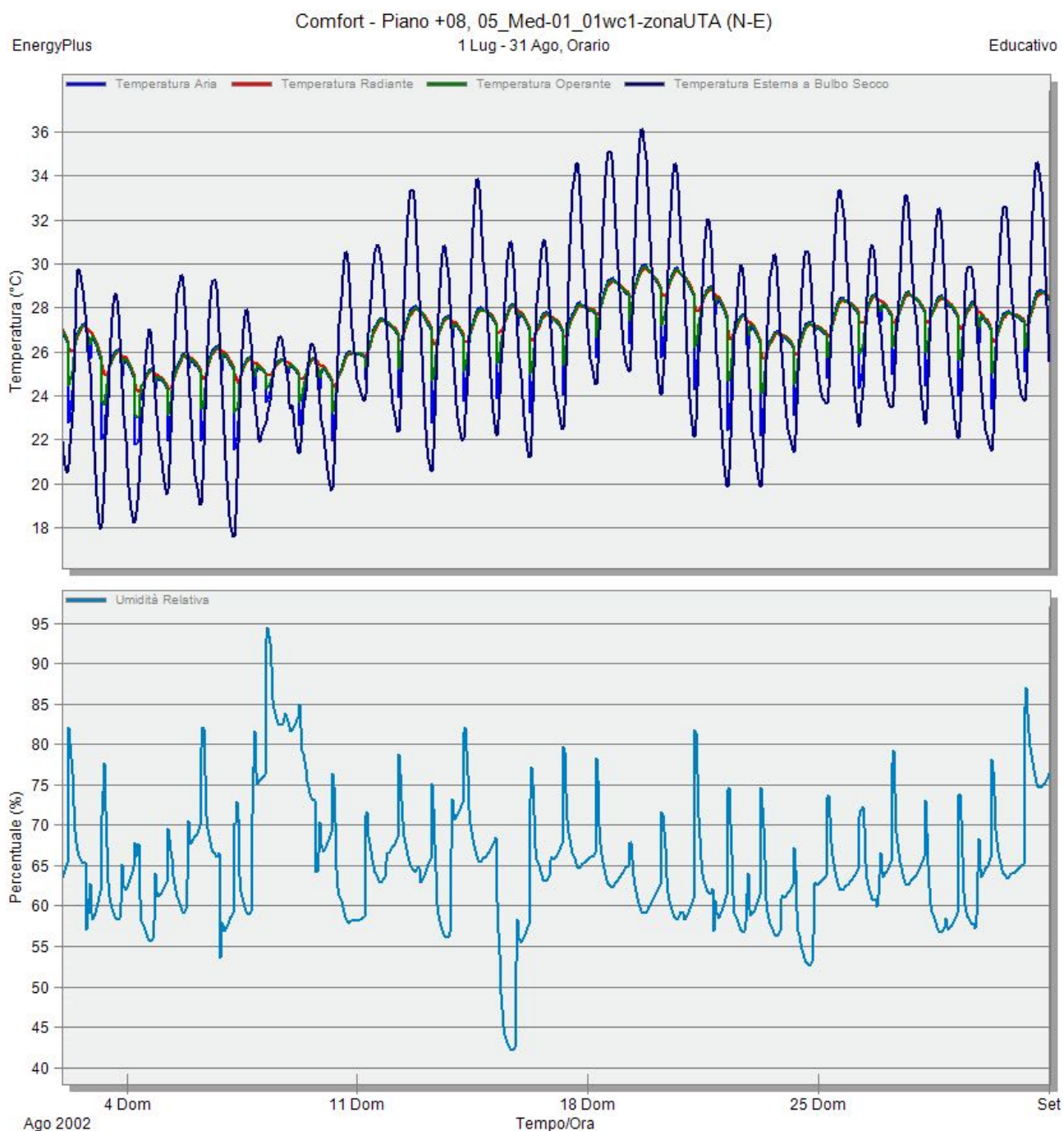


Figura 78 - Grafico dell'andamento della temperatura e dell'umidità relativa al wc1 della sub-Zona 1 del reparto di Medicina Interna 1.

AGOSTO

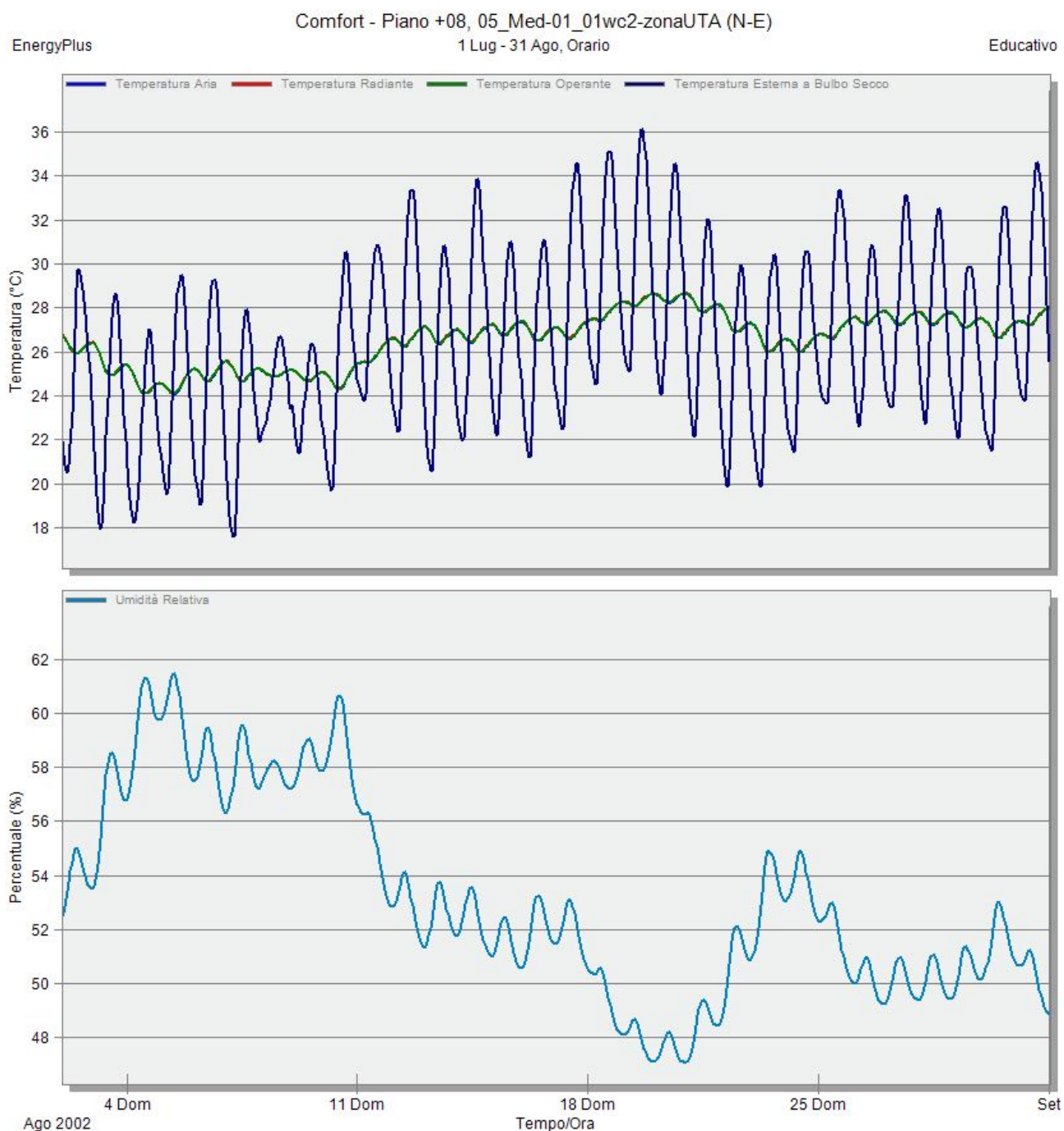


Figura 79 - Grafico dell'andamento della temperatura e dell'umidità relativa al wc2 della sub-Zona 1 del reparto di Medicina Interna 1.

AGOSTO

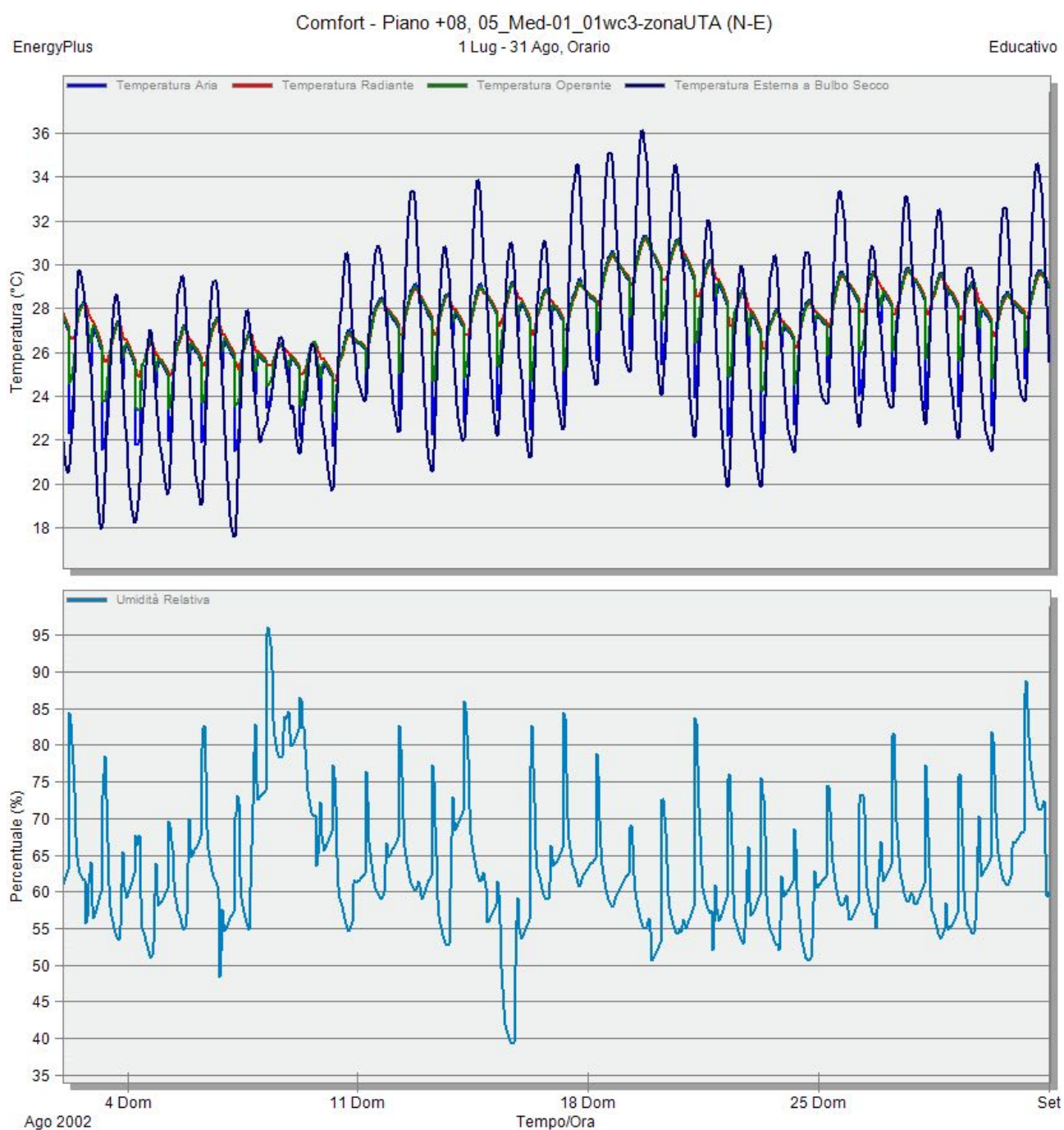


Figura 80 - Grafico dell'andamento della temperatura e dell'umidità relativa al wc3 della sub-Zona 1 del reparto di Medicina Interna 1

AGOSTO

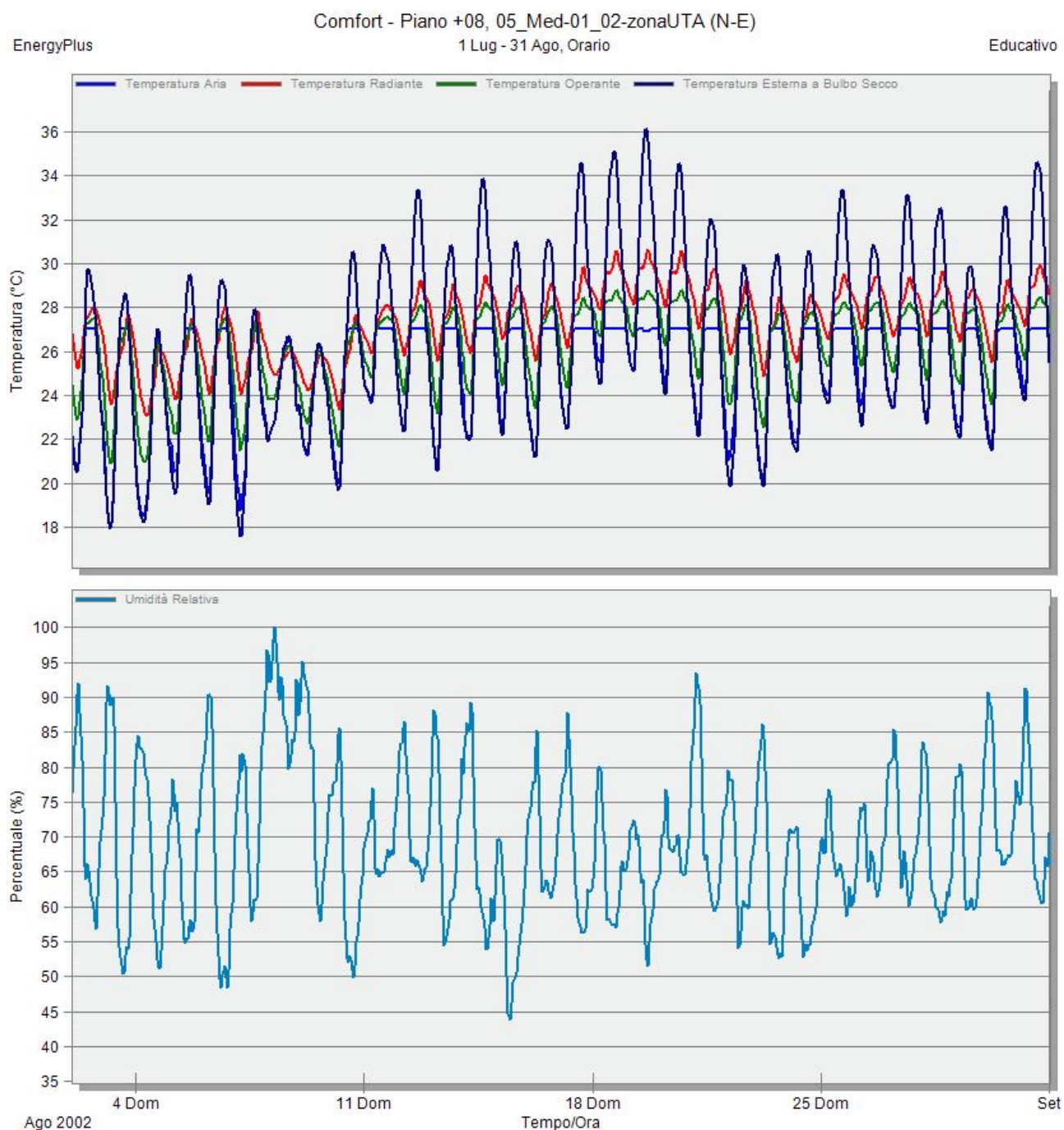


Figura 81 - Grafico dell'andamento della temperatura e dell'umidità relativa alla sub-Zona 2 del reparto di Medicina Interna 1.

AGOSTO

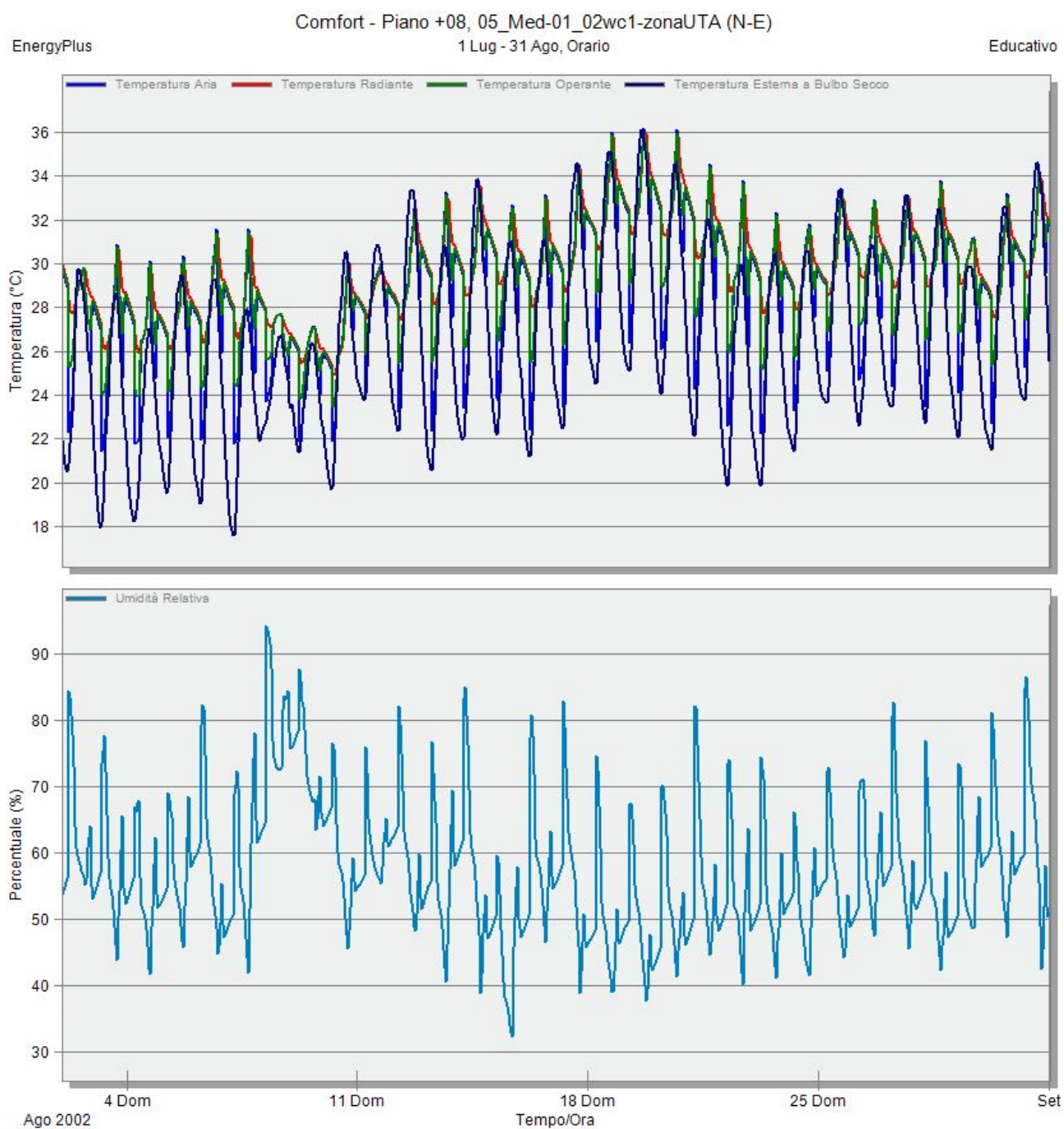


Figura 82 - Grafico dell'andamento della temperatura e dell'umidità relativa al wc1 della sub-Zona 2 del reparto di Medicina Interna 1.

AGOSTO

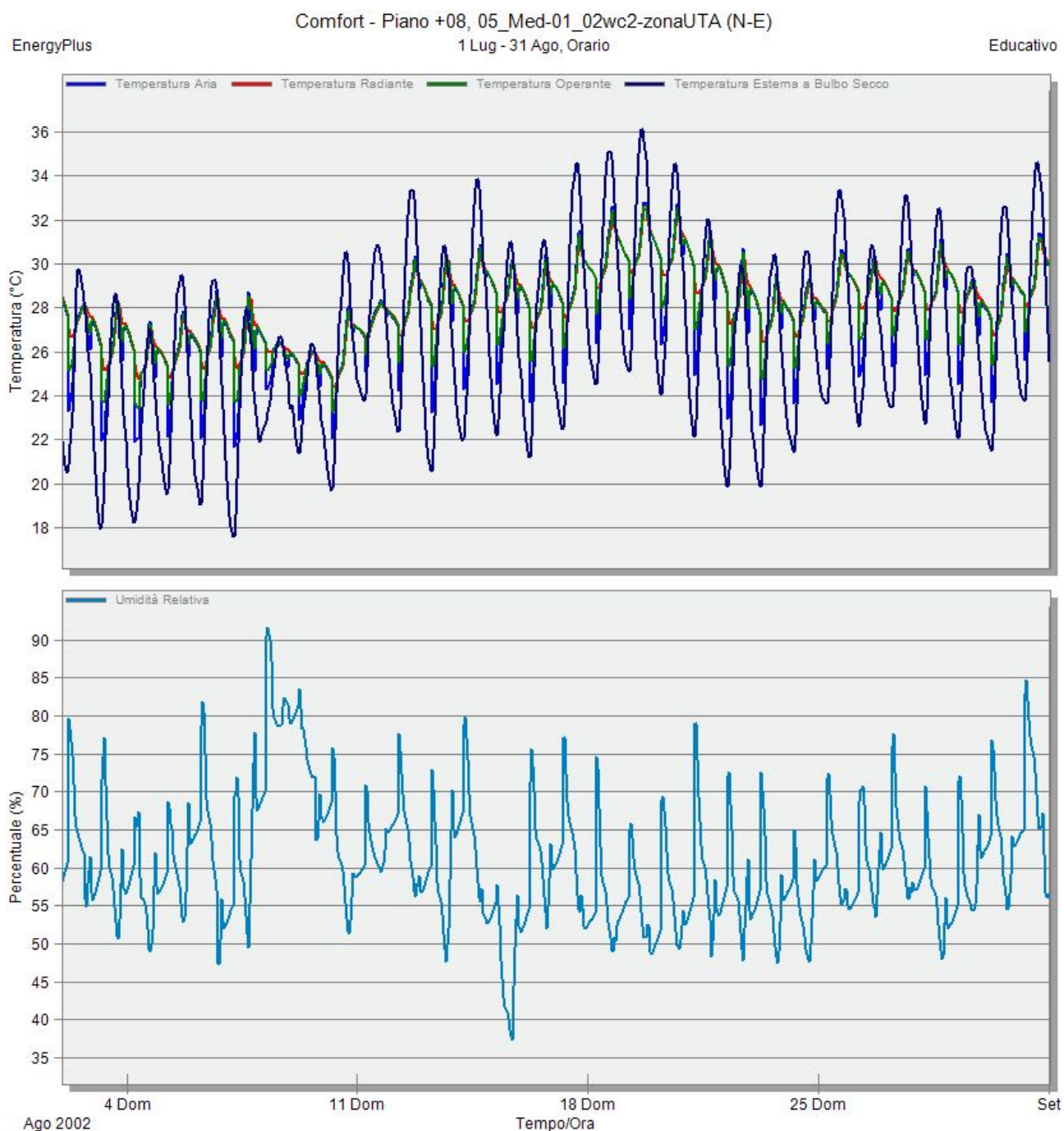


Figura 83 - Grafico dell'andamento della temperatura e dell'umidità relativa al wc2 della sub-Zona 2 del reparto di Medicina Interna 1.

AGOSTO

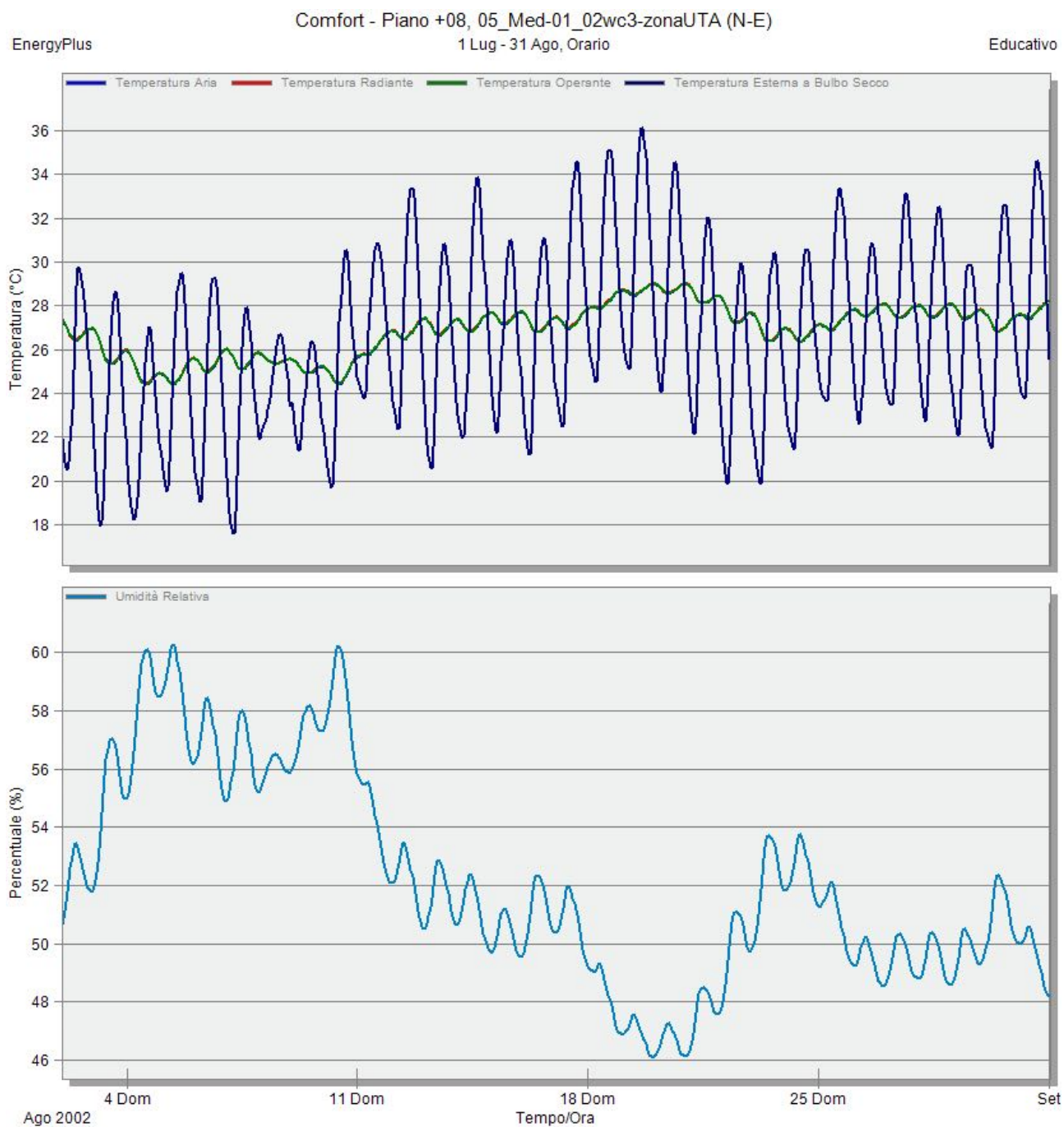


Figura 84 - Grafico dell'andamento della temperatura e dell'umidità relativa al wc3 della sub-Zona 2 del reparto di Medicina Interna 1.

AGOSTO

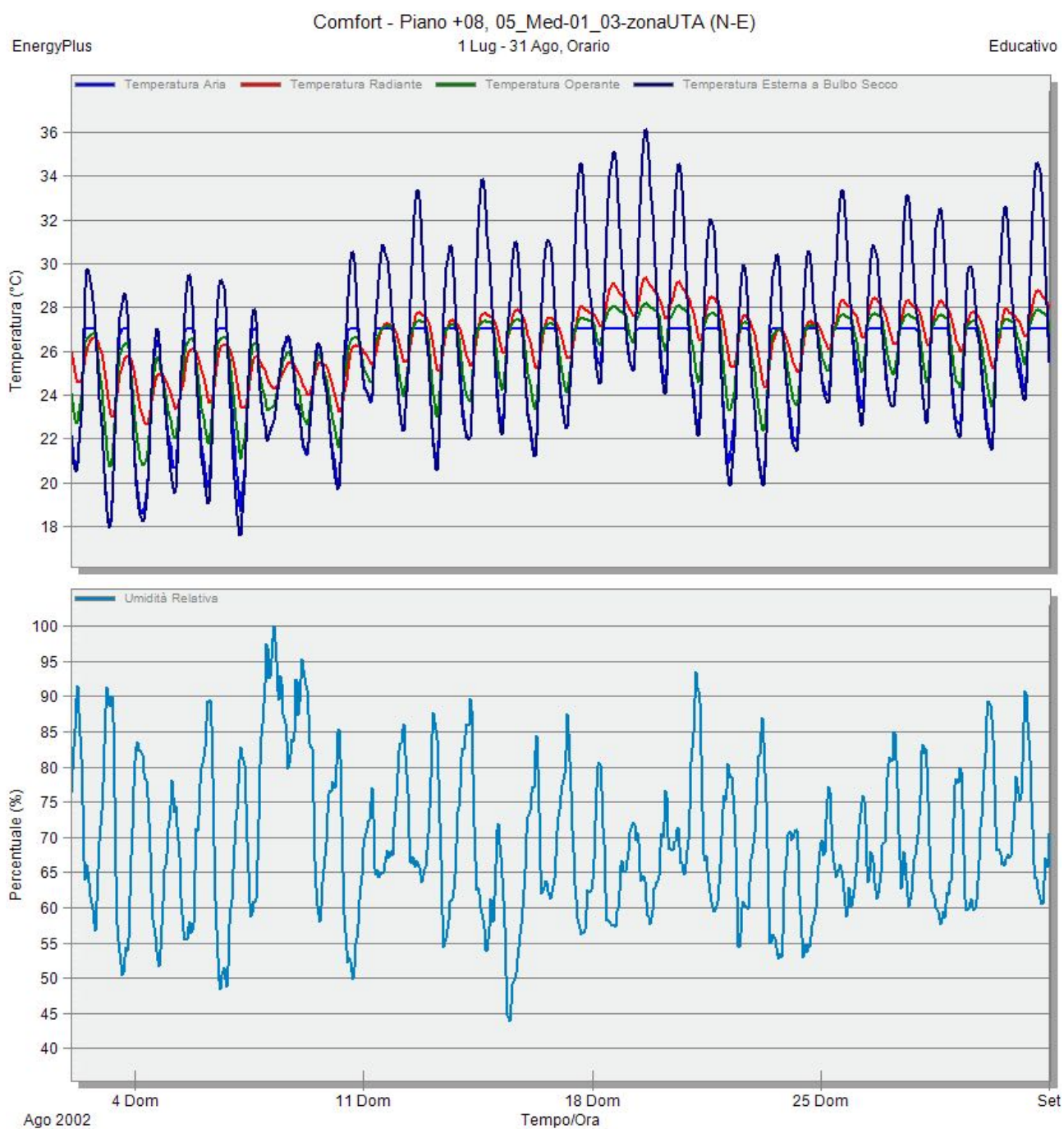


Figura 85 - Grafico dell'andamento della temperatura e dell'umidità relativa alla Zona 3 del reparto di Medicina Interna 1.

AGOSTO

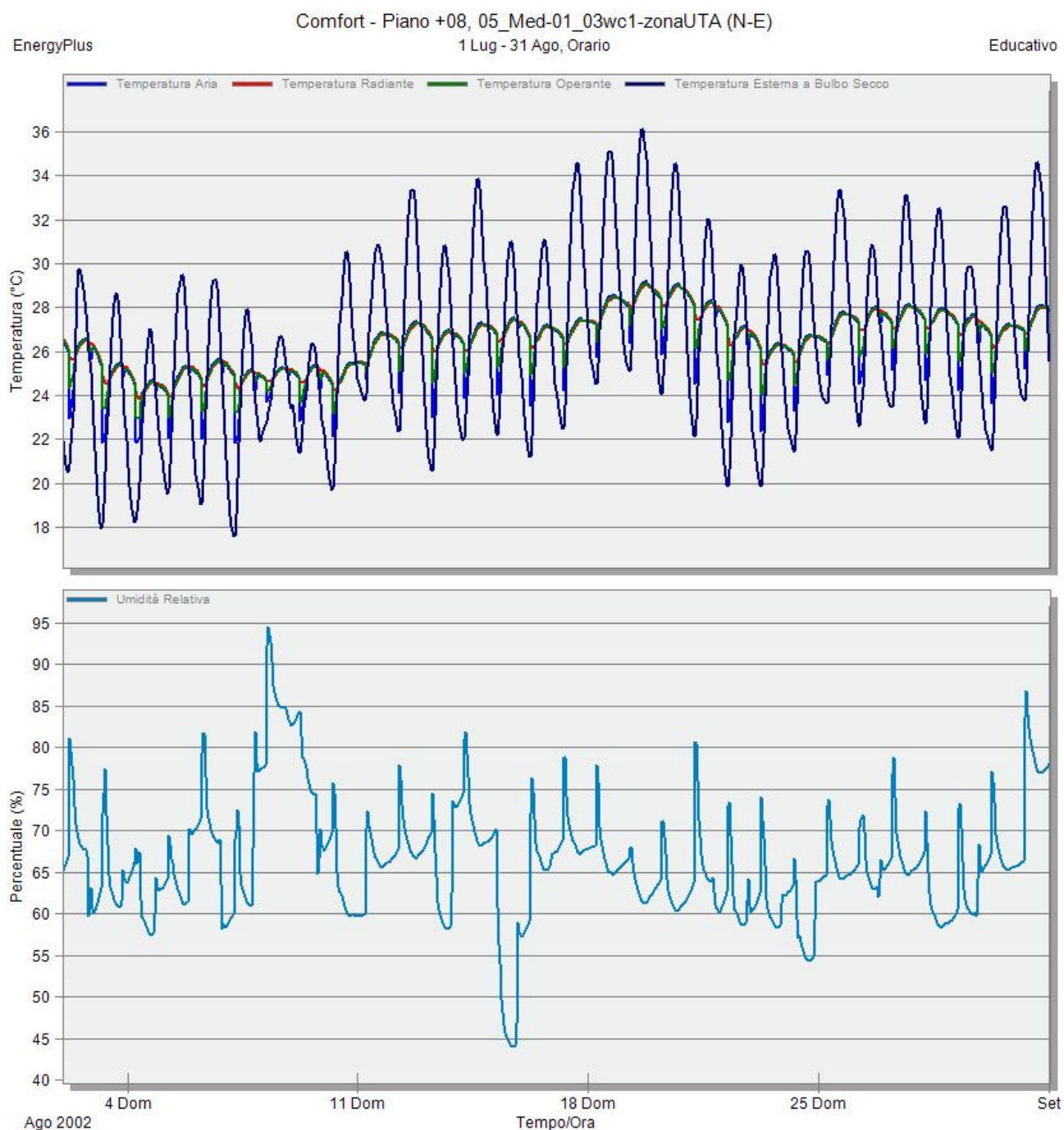


Figura 86 - Grafico dell'andamento della temperatura e dell'umidità relativa al wc1 della sub-Zona 3 del reparto di Medicina Interna 1.

AGOSTO

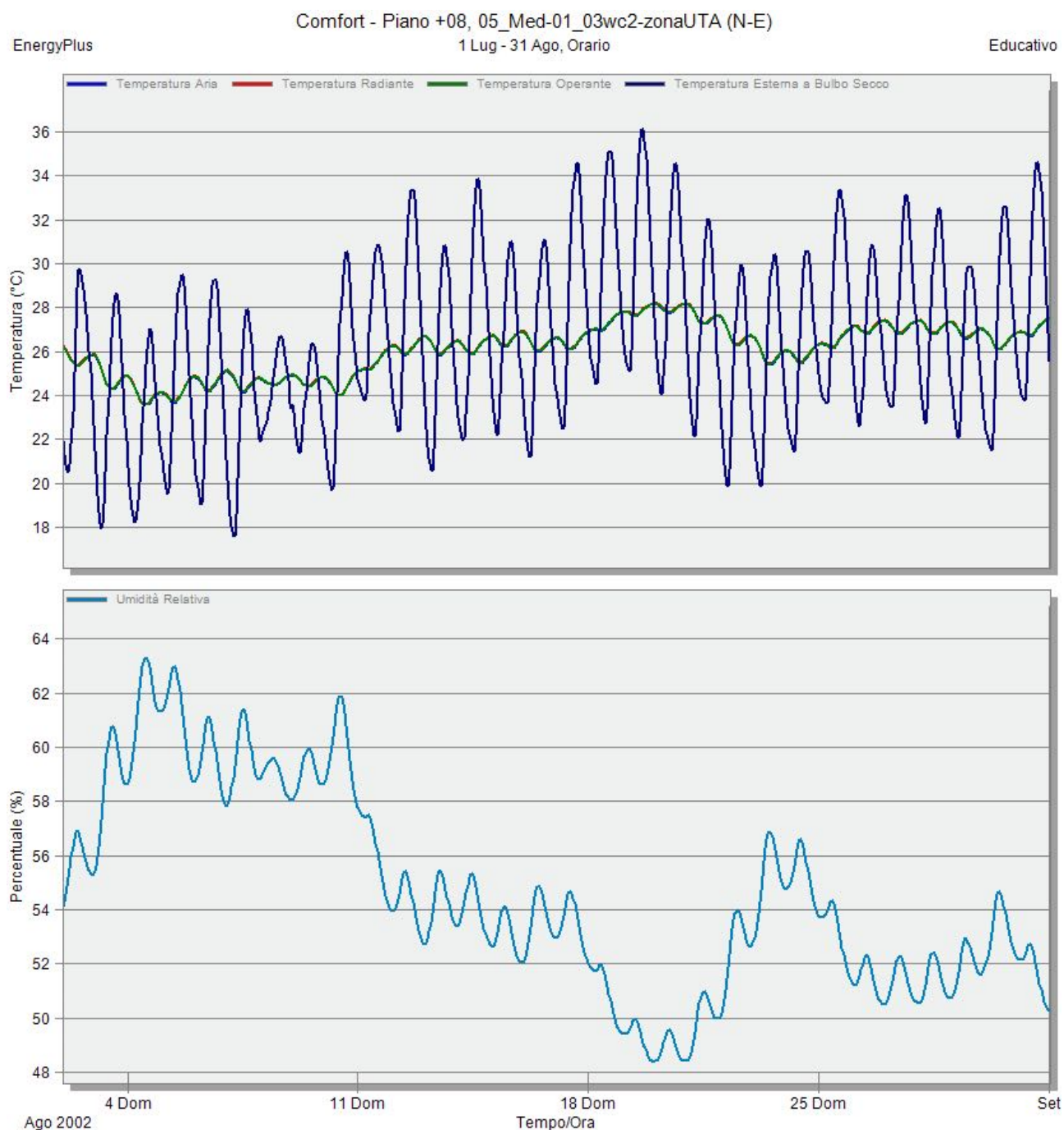


Figura 87 - Grafico dell'andamento della temperatura e dell'umidità relativa al wc2 della sub-Zona 3 del reparto di Medicina Interna 1.

AGOSTO

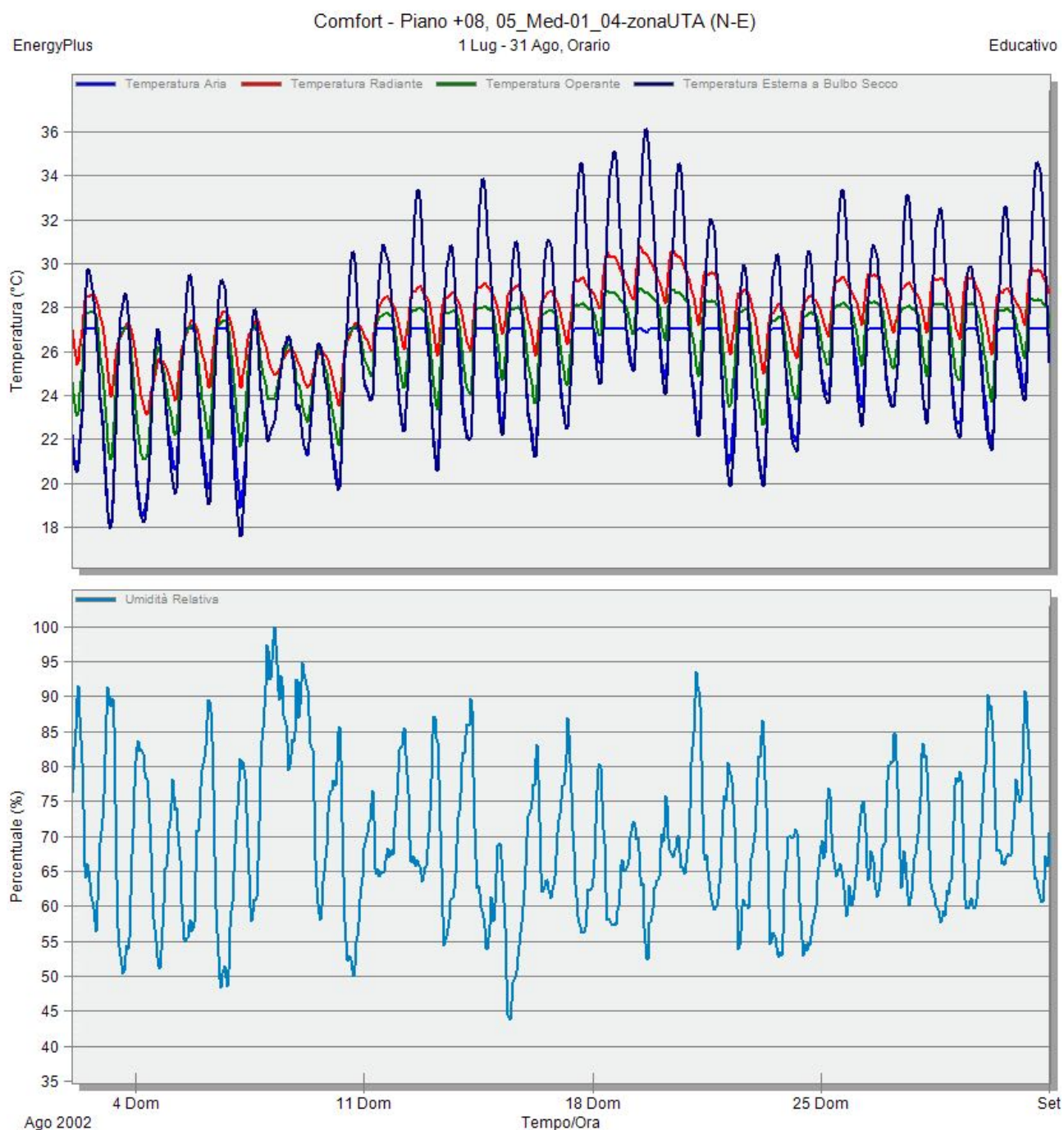


Figura 88 - Grafico dell'andamento della temperatura e dell'umidità relativa alla Zona 4 del reparto di Medicina Interna 1.

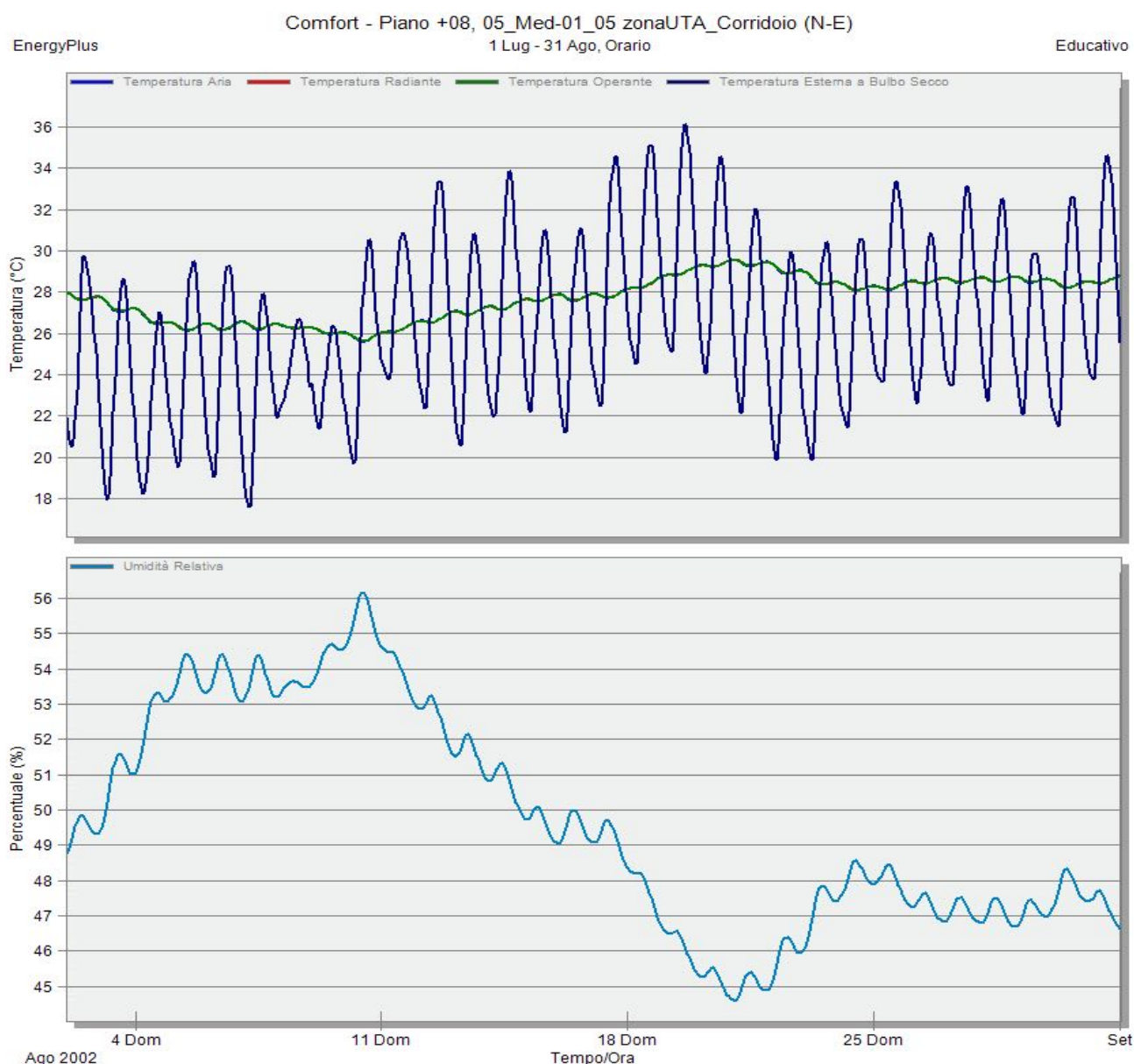


Figura 89 - Grafico dell'andamento della temperatura e dell'umidità relativa della Zona 5 del reparto di Medicina Interna 1.

Al termine dell'analisi dei risultati, valutate le criticità illustrate nel paragrafo 4.2.3 e le specificità del sistema edificio-impianti studiato, è possibile ritenere soddisfacente il lavoro operato in sede di modellazione e, quindi, di simulazione.

Le differenze riscontrate tra i valori orari delle temperature e dell'umidità relativa, se si escludono le misure di quegli ambienti dotati di impianti di climatizzazione ausiliari e si pondera la criticità correlata all'utilizzo di un file climatico basato su andamenti statistici e storici, tali differenze si ritengono prevedibili e accettabili. Le differenze constatate tra i dati misurati ed i risultati ottenuti dalla simulazione, come si potrà vedere dalle tabelle, oscillano da un minimo del 2-3%, se riferite ai valori mensili di energia, ad un massimo del 10-11%, per i valori medi mensili riferiti all'umidità relativa.

5. CAPITOLO 5

ANALISI DEGLI SCENARI DI IMPIEGO DELLA MODELLAZIONE INVERSA

Le dimensioni dell'Azienda Ospedaliera e le caratteristiche intrinseche, strettamente connesse al tipo ed alla qualità del servizio erogato, giocano un ruolo decisivo nella scelta e nella valutazione degli interventi di generale miglioramento del sistema edificio-impianti.

La valutazione della fattibilità tecnico-economica di eventuali scenari di intervento e di miglioramento dell'efficienza energetica, data la dimensione e la configurazione del sistema AOB, sono strettamente conseguenti ad una pianificazione degli interventi che deve tener in considerazione l'intero sistema edificio-impianti dell'AOB. I risultati delle simulazioni dinamiche di dettaglio effettuate sul Piano 8°, hanno messo in evidenza le differenze di approccio alla modellazione esistenti rispetto al primo set di simulazioni effettuate sui singoli piani dell'AOB, avendo adottato delle ipotesi semplificate. Per questa ragione, pur disponendo a questo punto di un buon modello del reparto studiato, non disponendo però di tutte le necessarie informazioni a corredo per gli altri piani dell'AOB, si è optato per mantenere l'attenzione focalizzata sul Piano 8°. Nella realtà delle cose, non potendo procedere, almeno in questa fase, ad ipotizzare degli interventi differenziati e localizzati solo per il reparto di Medicina Interna 1, si è valutato di analizzare degli scenari di impiego utilizzando la modellazione inversa. La valutazione delle ipotesi di intervento, quindi, deve tenere in giusta considerazione le necessità derivanti dagli standard che un servizio sanitario ha l'obbligo di mantenere durante l'erogazione del servizio, in termini di quantità e qualità.

5.1 – Scenari di utilizzo della modellazione inversa per il miglioramento dell'efficienza energetica del sistema edificio-impianti.

La dimensione importante del sistema edificio-impianti dell'AOB e la gestione di un sistema così complesso, ha portato ad interventi successivi di adeguamento e miglioramento, talvolta, non coordinati, che non sempre hanno tenuto conto dell'originale equilibrio di detto sistema. Come già descritto nel Capitolo 3, l'AOB ha visto perciò fasi diverse di ammodernamento ed ampliamento degli impianti tecnologici installati, che oggi,

allo stato delle cose, denota un processo in itinere di ammodernamento tecnologico degli impianti lato produzione. Altri reparti, come il blocco operatorio, e le recenti realizzazioni, come la torre che ospita i nuovi ascensori, sono stati attrezzati con impianti tecnologici adeguati ed all'avanguardia, ma purtroppo questo processo di adeguamento non ha ancora coinvolto diversi dei reparti dislocati nei piani dell'AOB, come il Piano 8°. Questi reparti, infatti, vengono asserviti dagli impianti in maniera non selettiva e con modalità di erogazione e regolazione del servizio non modulabili e, peraltro impostate e gestite a monte. In sede di Energy Audit, questi aspetti sono emersi immediatamente, soprattutto a seguito dell'elaborazione dei dati eseguita per la redazione finale del documento di diagnosi. La disponibilità dei risultati della diagnosi energetica effettuata, è limitata ad una informazione aggregata sulla domanda di energia, che non dà nessun tipo di riferimento sull'utilizzo parziale di ogni piano. L'assenza di un sistema di controllo centralizzato sulla regolazione e sui parametri termo-igrometrici, inoltre, non permette di intervenire, allo stato delle cose, sugli impianti in esercizio in modo da ottimizzarne le prestazioni ed i consumi di energia.

L'occasione offerta dal controllo sul consumo dell'energia termica impiegata per la climatizzazione ed il monitoraggio sull'andamento dei parametri termo-igrometrici ambientali di cui oggi si dispone per il reparto di Medicina Interna 1, è assolutamente preziosa. E' stato possibile, in questo modo, ottenere importanti informazioni sul funzionamento specifico delle zone termiche studiate. E' stato possibile, inoltre, comprendere le modalità di conduzione e gestione degli ambienti, dove la regolazione del micro-clima interno è dipendente solamente dalle sensazioni soggettive di benessere dei degenti, dei visitatori o del personale dipendente dell'Ospedale. L'importanza della disponibilità di questo tipo di informazioni è stata immediatamente manifesta quando si sono ri-analizzati i risultati delle simulazioni elaborate nel Capitolo 3, dove si era adottato un approccio diretto alla modellazione, assumendo ipotesi semplificate. Le differenze tra i dati della diagnosi energetica ed i risultati delle simulazioni dinamiche ottenute avevano percentuali prossime al 20% per il riscaldamento e vicine al 30% per il raffrescamento. La causa principale di queste differenze oggi si identifica, evidentemente, nella difformità esistente tra le ipotesi adottate in sede di modellazione e le condizioni reali di input (temperature ed umidità relative, reali modalità di ventilazione, etc. ...).

Ergo, la disponibilità di dati certi, soprattutto quando si ha l'occasione di studiare sistemi di edificio-impianti esistenti e già costruiti, dotati di impianti tecnologici in esercizio, diventa di importanza fondamentale. Al fine di comprendere meglio l'importanza della relazione esistente tra domanda di energia termica e controllo dei parametri termo-igrometrici interni agli ambienti, in questa parte della ricerca si sono sviluppate (e si continuano ad ipotizzare) una serie di ipotesi di scenario possibile di interventi, utilizzando un approccio *data-driven* nella modellazione, adottando diversi parametri per la ventilazione degli ambienti e variando i *range* operativi di temperatura ed umidità relativa. Avendo individuato come "caso base" di riferimento, il modello utilizzato per le simulazioni dinamiche del Capitolo 4, si riporta di seguito il cruscotto dei dati di input del modello:

1 -BASE		Simulazione dinamica del reparto di Medicina Interna 1 del Piano VIII - AOB (settings)								rev 3.00	
set-point controllo ambientale				modello AOB_P8-Med1 con sub-ZONE							
riscaldamento	raffrescamento	umidità relativa	apporti	sub-ZONA termica	[ric/h]	[schedule]	Heating	Cooling	modalità	tipo	
24 (±3) °C	24 (±3) °C	fluttuazione libera	✓	degENZE	5,00	H24	✓	✓	HVAC COMPACT	Fan Coil 2 tubi	
N.B. : nei servizi ed nei vani scala il ricambio d'aria è naturale ->				servizi	6,00	12h	✓	X		X	
				ECV	2,00	12h	✓	X		X	

Figura 1 - Tabella con i dati di input del modello nel "caso base".

Il "caso base", in sintesi, rappresenta l'esito della modellazione effettuata con approccio *data-driven* al fine di far giungere a convergenza i risultati delle simulazioni con i dati misurati con il monitoraggio. I parametri di temperatura interna degli ambienti climatizzati è mantenuta entro l'intervallo 24±3°C, mentre l'umidità relativa non viene controllata ed è libera di fluttuare. La ventilazione meccanica è stata impostata con un ricambio d'aria di 5 vol/h, con prelievo dell'aria dall'esterno, senza ricircolo. Per quanto riguarda la parte relativa agli impianti, nella simulazione con il codice DesignBuilder si è adoperata la procedura semplificata di calcolo denominata *HVAC Compact*. Esplorando le potenzialità di DesignBuilder, conoscendo bene la configurazione impiantistica presente al Piano 8°, si è deciso di implementare ulteriormente il modello del "caso base" utilizzando la modalità *HVAC Detailed* per il calcolo e la modellazione degli impianti.

3 -AOB (real)		Simulazione dinamica del reparto di Medicina Interna 1 del Piano VIII - AOB (settings)								rev 3.12	
set-point controllo ambientale				modello AOB_P8-Med1 con sub-ZONE							
riscaldamento	raffrescamento	umidità relativa	apporti	sub-ZONA termica	[ric/h]	[schedule]	Heating	Cooling	modalità	tipo	
24 (±3) °C	24 (±3) °C	50 (±10) %	✓	degenge	3,00	H24	✓	✓	HVAC DETAILED	CAV-MP3 +FC tubi	
N.B. : nei servizi ed nei vani scala il ricambio d'aria è naturale ->				servizi	6,00	12h	✓	✗		✗	
				ECV	2,00	H24	✓	✗		✗	

Figura 2 - Tabella con i dati di input del modello nel "caso AOB real".

Si è creato, quindi, un modello derivato dal “caso base”, denominato “caso AOB *real*”, del quale nella figura 2 si riportano i dati di input. Il “caso AOB *real*”, è stato impostato con gli stessi parametri di temperatura interna adottati nel precedente modello ($24\pm 3^{\circ}\text{C}$), mentre è stato previsto un controllo dell’umidità relativa secondo il *range* di $50\pm 10\%$. La ventilazione meccanica è stata impostata con 3 vol/h (valore minimo da normativa), con prelievo dell’aria dall’esterno, senza ricircolo.

Come si può riscontrare dai dettagli riportati al Capitolo 3 sulla parte relativa agli impianti, si è configurato il modello in modo coerente con lo stato dei luoghi, quindi, si è proceduto alla modellazione di un impianto a tutt’aria, dotato di sistemi a recupero di calore, analogo a quello presente a servizio del reparto (e quindi delle 5 sub-Zone individuate) ed a inserire i sistemi a fan-coil laddove fossero nella realtà installati. Terminata la configurazione del modello anche nella sua parte impianti, si è provveduto a lanciare le simulazioni, che hanno risposto in modo molto interessante e coerente.

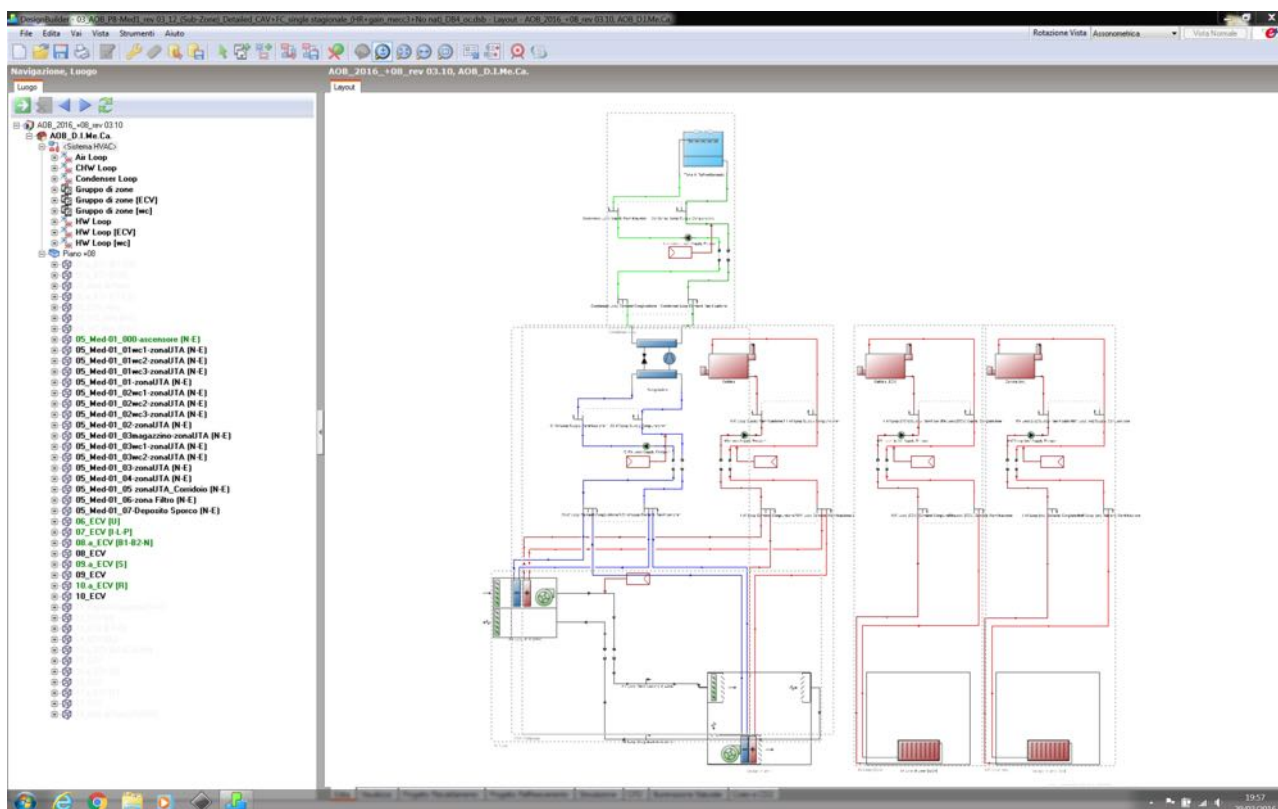
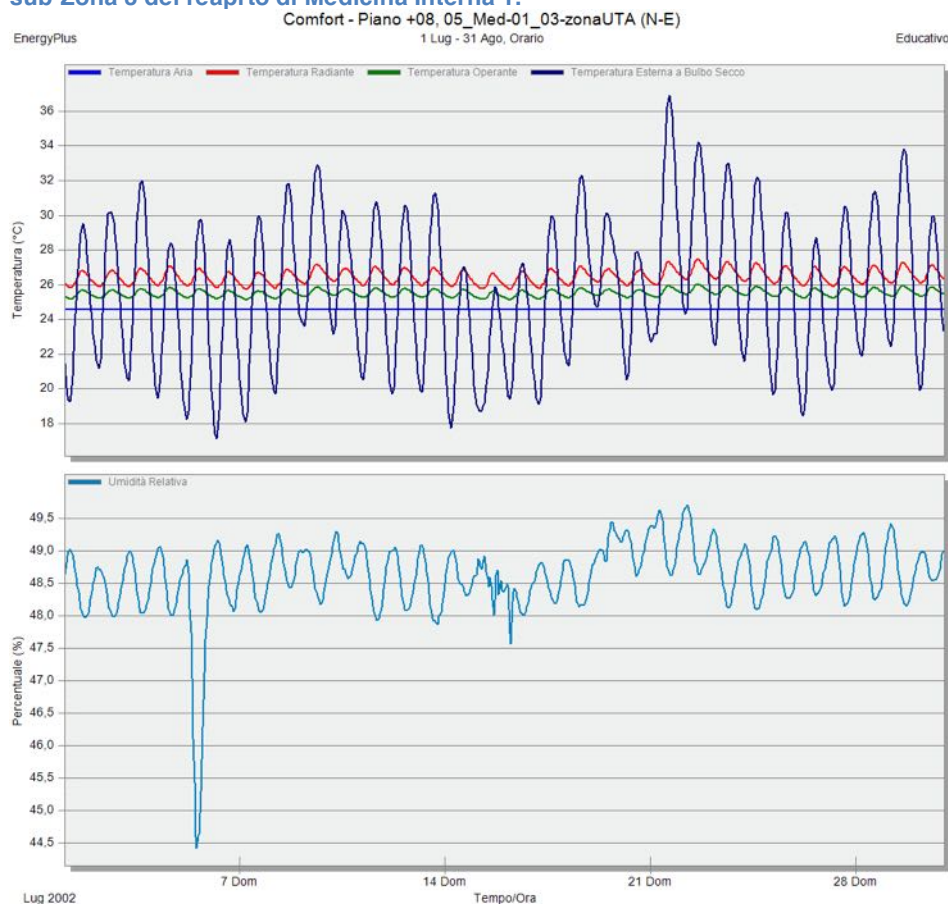


Figura 3.. - Schermata del software DesignBuilder in modalità "HVAC Detailed", contenente lo schema logico di configurazione degli impianti dell'AOB.

Proseguendo l’analisi dei mesi estivi, i risultati hanno mostrato un incremento della domanda di energia mensile significativa, infatti si è passati dai circa 9/10'000 kWh ai circa 35'000 kWh, però si sono registrati andamenti delle temperature molto affini nelle zone

termiche monitorate., come riportato in figura 4 (sub-Zona 3 del reparto). In sintesi, le osservazioni interessanti riguardano il confronto tra la quantità di energia richiesta nel caso *base* e nel caso *AOB real*, e sono le seguenti: 1) ottenendo orientativamente lo stesso andamento delle temperature interne, a meno della quota di trattamento dell'aria da imputare alla più efficace fase di deumidificazione, la quantità di energia impiegata nel secondo caso risulta praticamente tripla; 2) l'energia richiesta per la climatizzazione estiva del caso *AOB real* è assolutamente in linea con i risultati medi ottenuti in sede di Energy Audit; 3) l'energia richiesta per la climatizzazione estiva del caso *base* risultava molto inferiore ai risultati medi ottenuti in sede di Energy Audit.

Figura 4 - Andamento della temperatura e dell'umidità relativa all'interno della sub-Zona 3 del reparto di Medicina Interna 1.



L'insieme di questi fattori farebbe dedurre, quindi, che la differenza di energia osservata tra i due casi analizzati, non sia stata rilevata in sede di monitoraggio del reparto, perchè effettivamente non impiegata dai sistemi di impianto in servizio al piano. A seguito dei rilievi effettuati, si è potuto riscontrare, come già riportato in precedenza, la presenza di diverse pompe di calore ausiliari (monosplit), che affiancano il sistema centralizzato di climatizzazione, per cui, ragionevolmente, sono queste a fornire la quota di energia non contabilizzata in sede di monitoraggio.

Si è potuto accertare inoltre, che la modalità di gestione della ventilazione (ricambio d'aria naturale) ed il controllo dell'umidità relativa siano i due parametri che incidono maggiormente sui consumi di energia.

È facilmente dimostrabile per mezzo degli esiti delle ripetute prove effettuate sui modelli di simulazione, che una strategia di gestione “puntuale” (e possibilmente anche in remoto...) dei parametri di controllo del microclima interno, mediante una regolazione separata e controllata degli ambienti, possa permettere di attuare delle misure di efficienza energetica. Queste misure sarebbero in grado di generare quindi dei risparmi in termini energetici e di creare ulteriori benefici in termini di miglioramento del servizio erogato, garantire migliori condizioni di benessere all'interno della struttura ospedaliera e, aspetto da non sottovalutare, dare garanzia del rispetto delle normative vigenti in materia.

A seguito di quanto sin ora rappresentato, si prospettano degli scenari di intervento per estendere il sistema di monitoraggio anche agli altri piani dell'AOB, in maniera analoga a quanto realizzato presso il Piano 8°:

- Installazione di sistemi di monitoraggio, distinti per singoli piani o, meglio, differenziati per reparto sanitario, distinguendo le varie tipologie d'impianto di erogazione presente ;
- Installazione di sensori di temperatura ed umidità relativa collocati in ambienti strategici per il monitoraggio.

Il potenziale di efficienza offerto dalla messa in atto di questi accorgimenti è importante e prospetta l'ottenimento dei seguenti risultati:

- aumentare il livello di dettaglio dell'Energy Audit, permettendo una contabilizzazione puntuale per piano al fine di individuare le eventuali possibilità di efficienza e di risparmio energetico ;
- ottimizzare l'impiego degli impianti in esercizio presso l'AOB, privilegiando l'utilizzo dei sistemi più efficienti per conseguire il raggiungimento degli standard sulla qualità dell'aria prescritti dalla vigente normativa ;
- proseguire con l'implementazione dei modelli dell'AOB realizzati, adoperando l'approccio *data-driven* con maggior dettaglio, al fine di ottenere una migliore convergenza tra misure e risultati delle simulazioni.

CAPITOLO 6

CONCLUSIONI

Il lavoro di ricerca svolto durante il dottorato ha affrontato in maniera esaustiva il tema della simulazione termo-energetica dinamica, in tale ambito sono state valutate ed approfondite tutte le opportunità di sviluppo che la disciplina offre nelle diverse sfaccettature della materia. Si è preso atto, dapprima, dell'importanza che ricopre la "questione energetica" in sede europea (e mondiale) e quale sia l'importanza della progettazione sostenibile applicata agli edifici. Saper progettare un edificio nZEB, *nearly Zero Energy Building*, rappresenta sicuramente una sfida senza precedenti ed è oggetto dell'interesse generale in questo particolare momento storico. Avendo consapevolezza dei contenuti delle cogenti normative in materia, gli aspetti da governare sono molteplici e riguardano l'energia, l'ambiente e l'economia. Tali aspetti devono essere valutati peraltro sull'intero ciclo di vita dell'edificio, dalla sua costruzione alla sua riqualificazione, passando per la gestione e la sua manutenzione. Occorre progettare degli edifici dotati di buoni standard di *indoor comfort* e saper impiegare delle opportune tecniche progettuali che permettano di poter prevedere, consapevolmente, il comportamento del sistema edificio-impianti al variare delle condizioni al contorno, quali il clima, la disponibilità delle fonti energetiche, le abitudini degli occupanti e le modalità di gestione degli impianti. Ergo, durante il lavoro di ricerca si è affrontato lo studio di quegli strumenti di calcolo avanzati, capaci di pronosticare, in un regime dinamico, gli effetti delle scelte progettuali compiute o da compiere, dove la progettazione, integrata e consapevole, deve essere in grado di controllare gli aspetti legati al fabbisogno energetico ed alla domanda di energia degli edifici.

Una parte del lavoro di ricerca è stata dedicata all'approfondimento delle modalità di funzionamento dei codici di calcolo TRNSYS e DesignBuilder, dedicando una particolare attenzione ai loro algoritmi di calcolo e ai modelli matematici che li governano. Questo approfondimento si è concluso con l'applicazione di due procedure di calibrazione dei

codici di calcolo (BESTest dell'ASHRAE e UNI 15265) e con la valutazione dei risultati ottenuti.

L'oggetto prevalente dell'attività di ricerca è stato, quindi, la simulazione numerica delle prestazioni degli edifici (*building performance simulation*), la quale è stata affiancata da un'attività sperimentale di monitoraggio dei dati energetici su un caso studio reale. La scelta di questo binomio ha consentito di portare avanti un lavoro di ricerca molto interessante, dapprima incentrato sull'analisi termo-energetica dell'Azienda Ospedaliera "G. Brotzu" ed in seguito basata sull'iterativo confronto tra misure e risultati delle simulazioni termo-energetiche. Attraverso la modellazione in regime dinamico del sistema edificio-impianti dell'AOB, una volta generati i risultati derivanti dalle simulazioni effettuata con approccio diretto, il lavoro è stato sviluppato tramite un'analisi di confronto tra risultati ottenuti e dati misurati attraverso la citata attività sperimentale di monitoraggio. Da questa analisi di confronto è subito emersa una importante criticità legata all'incertezza delle variabili di ingresso del modello elaborato, riguardanti diversi parametri di input, relativi, per esempio, alla regolazione ed alla gestione degli impianti in esercizio nell'AOB. Si è avuto modo, quindi, di procedere ad un'attività di monitoraggio, organizzata nel reparto di Medicina Interna 1 del Piano 8° dell'Ospedale, con un sistema in grado di controllare sia l'energia termica utilizzata per la climatizzazione, che i valori di temperatura ed umidità relativa degli ambienti climatizzati. Lo sviluppo della ricerca ha riguardato, quindi, una campagna di raccolta delle misure sul campo, che purtroppo, nonostante tutti gli sforzi profusi, avrebbe necessità di ulteriore tempo al fine di poter completare la collezione dei dati che ricopra i cicli stagionali di un intero anno. La realtà ospedaliera oggetto del caso studio è risultata una fonte inesauribile di spunti ed occasioni per l'attività di ricerca, ma ha presentato molte difficoltà di gestione, data la sua particolare complessità e magnitudo.

L'attenzione dell'attività di ricerca è stata focalizzata, a questo punto, su un altro obiettivo fondamentale per la ricerca applicata in questi ambiti: la conduzione della modellazione numerica con l'approccio governato dai dati. Disponendo di un sistema (edificio-impianti) esistente di riferimento e di dati reali sulle prestazioni effettive, è stato possibile costruire un modello realistico del reparto analizzato. E' stata condotta, quindi, una simulazione calibrata del reparto, per mezzo del codice DesignBuilder, in modo che i risultati relativi al fabbisogno energetico elaborato fossero affini alla domanda di energia misurata. In questa parte conclusiva del lavoro di ricerca, è stato possibile, per mezzo della convergenza

ottenuta tra i risultati delle simulazioni dinamiche e i parametri termo-igrometrici interni agli ambienti, effettuare delle osservazioni interessanti ed approfondire lo studio sulle reali funzionalità e duttilità di questo strumento operativo basato sul processo iterativo.

Lo sviluppo della ricerca offerto dall'utilizzo della modellazione inversa e della simulazione dinamica per la verifica delle performance post-costruzione è, al momento, pressoché illimitato. Il lavoro svolto in questa tesi, pur avendo necessità di una ulteriore esplorazione, ha dimostrato di essere in grado di poter prevedere in anticipo il comportamento futuro dell'edificio, risultando, quindi, un utile ed efficace strumento operativo di supporto, per l'indirizzo delle scelte sulle migliori soluzioni per l'efficienza energetica.

Si ritiene, quindi, che tra gli scenari di sviluppo futuro offerti dalla continuazione del lavoro di ricerca, prodotto nell'ambito di questo dottorato, ci possa essere un'estensione dell'attività di monitoraggio a tutti i singoli piani dell'Ospedale, proseguendo nell'attività di collezione dei dati di monitoraggio del Piano 8°, e con una successiva implementazione dei modelli numerici elaborati, creando di fatto una fucina di risorse e risposte molto interessanti dal punto di vista della ricerca applicata. Sarà possibile calcolare a priori il valore dei risparmi energetici ed economici ottenibili sulle attività proiettate sull'intero sistema edificio-impianti dell'AOB, dando la possibilità ai decisori di essere supportati in maniera rigorosa ed affidabile, anche sul piano della fattibilità tecnico-economica, nel ventaglio dei possibili scenari di intervento di miglioramento.

BIBLIOGRAFIA

- [1] - N. Mandas, F. V. Caredda, O. Caboni, S. La Croce, *“Proposta di un sistema competitivo e flessibile per la riduzione del fabbisogno e l’ottimizzazione della gestione energetica dell’Azienda Ospedaliera G. Brotzu”*, Relazione Scientifica Finale, Progetto finanziato con L.R. n.7 Agosto 2007, Università di Cagliari, Dicembre 2012.
- [2] - *“TRNSYS 16 Documentation”*, Volumi 1-8, Solar Energy laboratory, University of Wisconsin-Madison, USA, Gennaio 2006.
- [3] - *“TRNSYS 16 Documentation”*, Volume 5: Mathematical Reference, Solar Energy laboratory, University of Wisconsin- Madison, USA, Gennaio 2006.
- [4] - *“EnergyPlus Engineering Reference - The Reference to EnergyPlus Calculations”*, COPYRIGHT © 1996-2011 The Board of Trustees of the University of Illinois and the Regents of the University of California through the Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory
- [5] - *“DesignBuilder EnergyPlus Simulation - Documentation (DB v.3.1)”* - DesignBuilder © 2008-2011
- [6] - American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers ASHRAE, *“Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs”*, ANSI/ASHRAE Standard 140.
- [7] - R. Judkoff – J. Neymark, *“International Energy Agency Building Energy Simulation Test (BESTEST) and Diagnostic Method”*, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Boulder Colorado, USA, Febbraio 1995.
- [8] - Meteotest, *“Meteonorm Version 6.0, Part II:Theory”*, Handbook, Aprile 2010.
- [9] - J.L.M. Hensen – R. Lamberts, *“Building performance simulation for design and operation”*, ed. Spon Press, 2011
- [10] - J.D. Spitler, *“Load Calculation Application Manual”*, ASHRAE, Atlanta, 2009
- [11] - M. Filippi – E. Fabrizio, *“Introduzione alla simulazione termoenergetica dinamica degli edifici”*, ed. Delfino – Guida AICARR, 2012
- [12] - Duffie J.A., Beckman W. A. (2006), *“Solar Engineering of Thermal Processes”*, JOHN WILEY & SONS, INC., Third Edition, 2006
- [13] - M. A. Cucumo, V. Marinelli, G. Oliveti, *“Ingegneria Solare. Principi ed applicazioni”* (Cap. 06, Sistemi Solari Passivi)
- [14] - AA.VV. *“Caratterizzazione energetica dell’Azienda Ospedaliera G. Brotzu, Ospedale San Michele – Cagliari”*, Rapporto intermedio, ENEA, Settembre 2007.
- [15] - G. Cabras, *“Aggiornamento delle planimetrie e delle caratteristiche geometriche e fisiche delle strutture dell’Azienda Ospedaliera G. Brotzu di Cagliari”*, Report interno DIMCM - Cagliari, 2011.
- [16] - G. Gandolfo, *“Aggiornamento delle caratteristiche tecniche e dimensionali relative agli impianti tecnici della struttura ospedaliera AOB di Cagliari”*, Report interno DIMCM - Cagliari, 2011.
- [17] - F. Leonardi, *“Rilievo ed elaborazione dei dati termoigrometrici nel reparto di Medicina 1 dell’Azienda Ospedaliera “G. Brotzu” di Cagliari”*, Tesi di Laurea Triennale in Ingegneria

Meccanica, relatore Prof. Ing. N. Mandas, correlatore O. Caboni, D.I.M.C.M. Università degli Studi di Cagliari, 2014.

- [18] - M. Bandini – L. Niccoli, *“Analisi Dinamica delle Prestazioni energetiche di un Complesso Ospedaliero di Grandi Dimensioni Mediante i Codici di Calcolo MC4 Suite e TRNSYS 16”*, Tesi di Laurea Specialistica, Università di Pisa, 2008.
- [19] - E. Fabrizio, *“Feasibility of polygeneration in energy supply systems for health-care facilities under the Italian climate and boundary conditions”*, Energy for Sustainable Development, 15 (2011) 92-103
- [20] - E. Fabrizio, M. Filippi, J. Virgone, *“An hourly modeling framework for the assessment of energy exploitation and energy converters selection and sizing in buildings”*, Energy and Buildings, 41 (2009) 1037-1050
- [21] - AA. VV. *“RICERCA SISTEMA ELETTRICO. Valutazione dei consumi nell’edilizia esistente e benchmark mediante codici semplificati: analisi di edifici ospedalieri”*, Report RSE/2009/117 ENEA, Marzo 2009.
- [22] - G. Pisano, F. Floris *“Termografia generale dell’edificio “Azienda Ospedaliera Brotzu” ed analisi termografica di dettaglio del piano ottavo dello stesso edificio al fine di verificare il grado di isolamento dell’involucro edilizio e pianificare interventi di miglioramento dell’efficienza energetica.”*, Associazione Termotecnica Italiana, Cagliari 2013

Web

- [23] - Sito Istituzionale Azienda Ospedaliera Brotzu, www.aobrotzu.it
- [24] - http://it.wikipedia.org/wiki/Giuseppe_Brotzu

Normativa

- [25] - Decreto del Presidente della Repubblica, *“Ordinamento ed Organizzazione dei Servizi Sanitari ed Assistenziali”*, 14 Gennaio 1997 (G.U. 20 febbraio 1997, n. 42, S.O.).
- [26] - UNI EN 15265, *“Calcolo del Fabbisogno di Energia per il Riscaldamento e il Raffrescamento degli Ambienti Mediante Metodi Dinamici, criteri generali e procedimenti di validazione”*, Norma Europea, Febbraio 2008.
- [27] - UNI EN ISO 13790, *“Prestazione Energetica degli Edifici, Calcolo del Fabbisogno di Energia per il Riscaldamento e il Raffrescamento”*, Norma Europea, Giugno 2008.
- [28] - UNI/TS 11300-1:2014, *“Prestazione Energetica degli Edifici - Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell’edificio per la climatizzazione estiva ed invernale”*
- [29] - UNI/TS 11300-2:2014, *“Prestazione Energetica degli Edifici - Parte 2: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale, per la produzione di acqua calda sanitaria, per la ventilazione e per l’illuminazione in edifici non residenziali”*.
- [30] - UNI/TS 11300-3:2010, *“Prestazione Energetica degli Edifici - Parte 3: Determinazione del Fabbisogno di Energia Primaria e dei Rendimenti per la Climatizzazione Estiva”*.

- [31] - UNI/TS 11300-4:2012, *“Prestazione Energetica degli Edifici - Parte 4: Utilizzo di energie rinnovabili e di altri metodi di generazione per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria”*.
- [32] - Decreto Ministero dello Sviluppo Economico 11 marzo 2008 coordinato con Decreto 26 gennaio 2010, (G.U. n. 35 del 12-02-2010).
- [33] - Decreto Ministero dello Sviluppo Economico 5 luglio 2012, (G.U. n. 159 del 10-07-2010).

Altre tesi consultate

- [34] - F. V. Caredda, *“Diagnosi energetica dell’Azienda Ospedaliera G. Brotzu”*, Tesi di dottorato di ricerca in Progettazione Meccanica, UniCA - a.a. 2012.
- [35] - C. Pacchiega, *“Simulazione termo-energetica dinamica di edifici ad elevate prestazioni: procedure di validazione dei modelli, applicazioni progettuali e casi studio.”*, Tesi di dottorato di ricerca in Scienze dell’Ingegneria, UniFE - a.a. 2014.

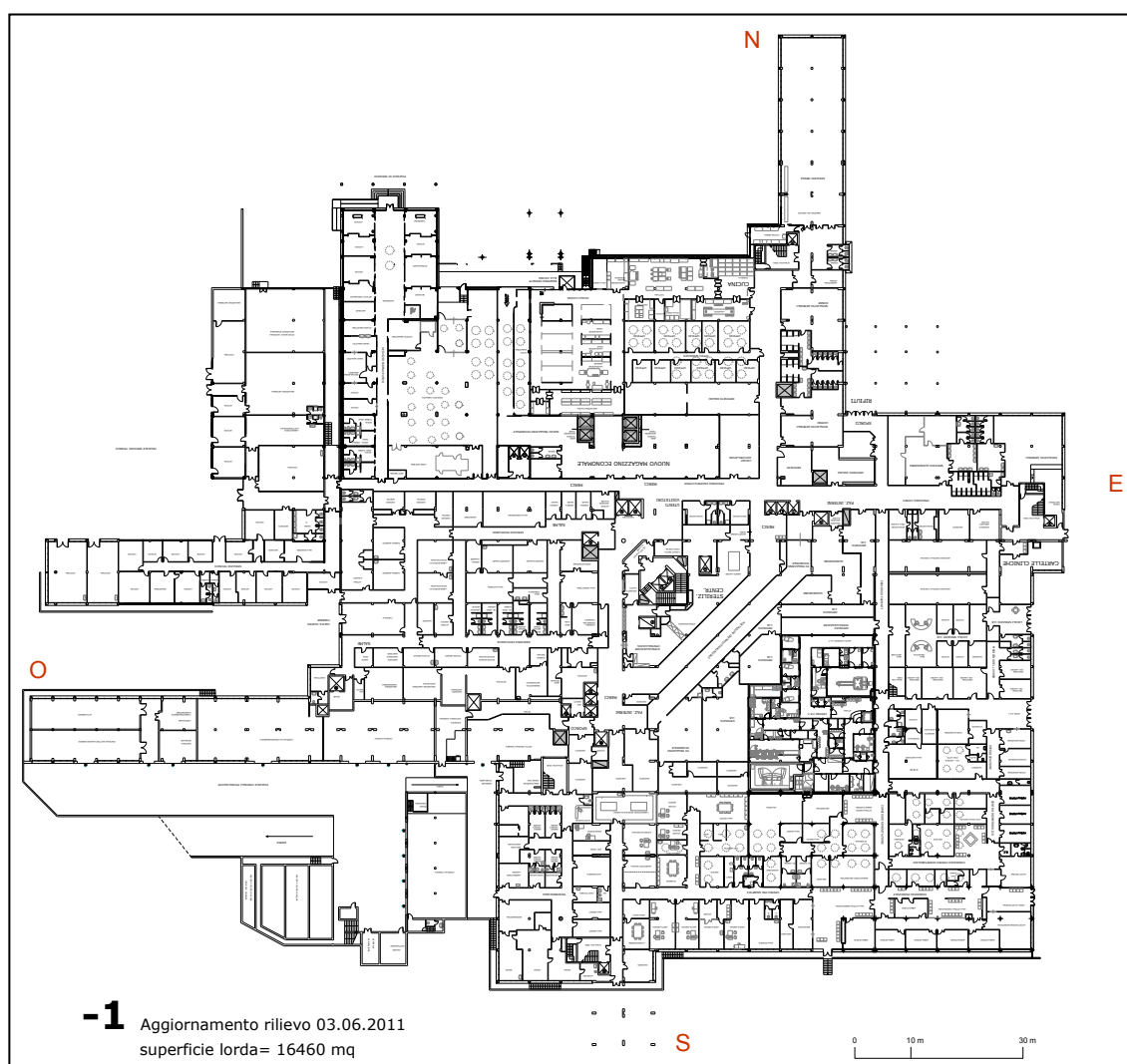
APPENDICE A

Planimetrie del Corpo Centrale dell'AOB ^[1] ^[15]

PIANO Seminterrato

Superficie lorda: 16'460 m²

Attività svolte/Reparti: Centrali Tecnologiche, Ufficio Tecnico, Magazzini generali, Cucina, Lavanderia, Mensa, Spogliatoi, Anatomia Patologica, Morgue, Farmacia, Locali 118, Centro PET, Centro Malattie Dismetaboliche, Ambulatori Cardiologia, Ambulatori Diabetologia, Microbiologia.

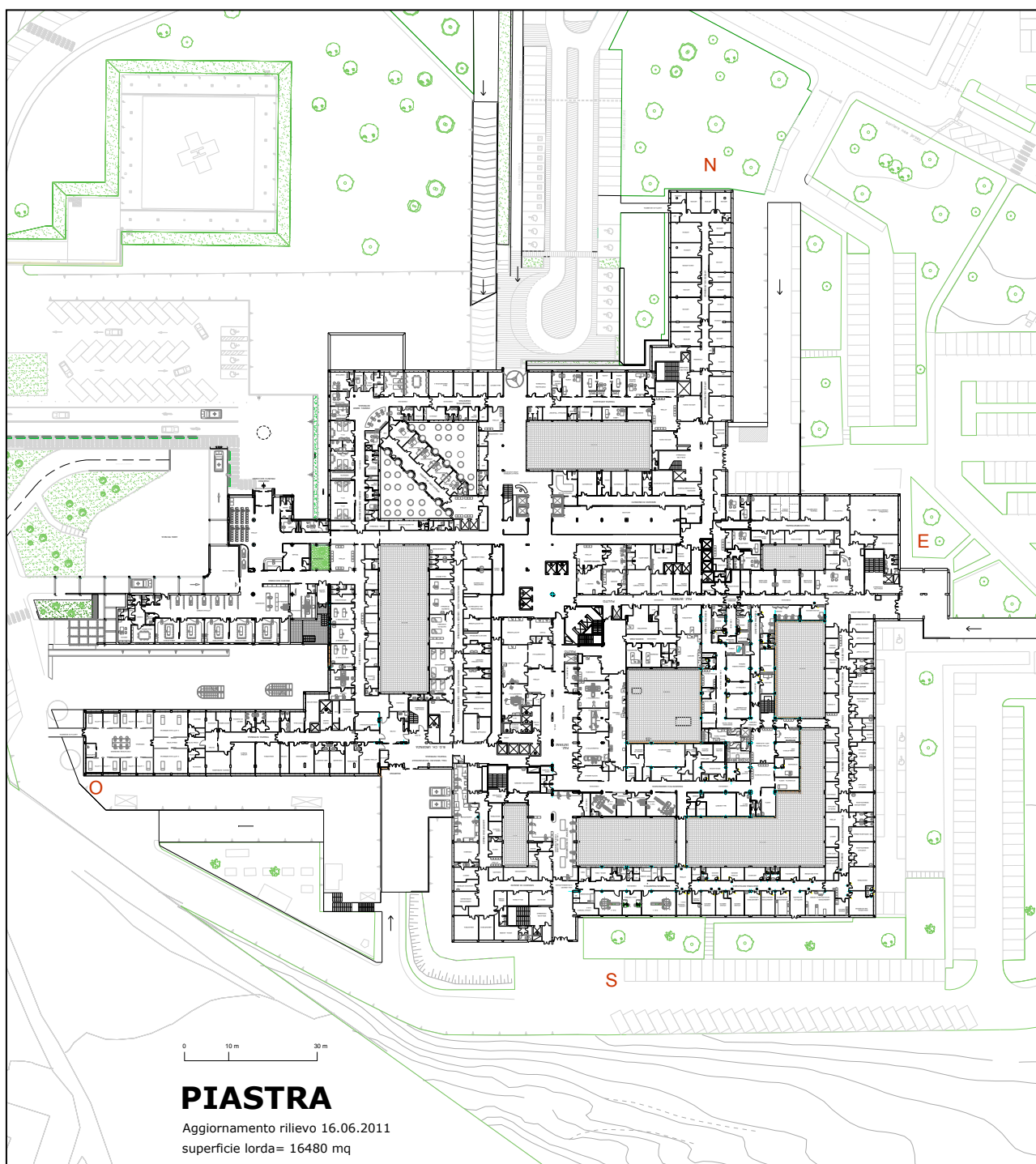


^[1] N. Mandas, F. V. Caredda, O. Caboni, S. La Croce, "Proposta di un sistema competitivo e flessibile per la riduzione del fabbisogno e l'ottimizzazione della gestione energetica dell'Azienda Ospedaliera G. Brotzu", Relazione Scientifica Finale, Progetto finanziato con L.R. n.7 Agosto 2007, Università di Cagliari, Dicembre 2012.

^[15] G. Cabras, "Aggiornamento delle planimetrie e delle caratteristiche geometriche e fisiche delle strutture dell'Azienda Ospedaliera G. Brotzu di Cagliari", Report interno DIMCM - Cagliari, 2011.

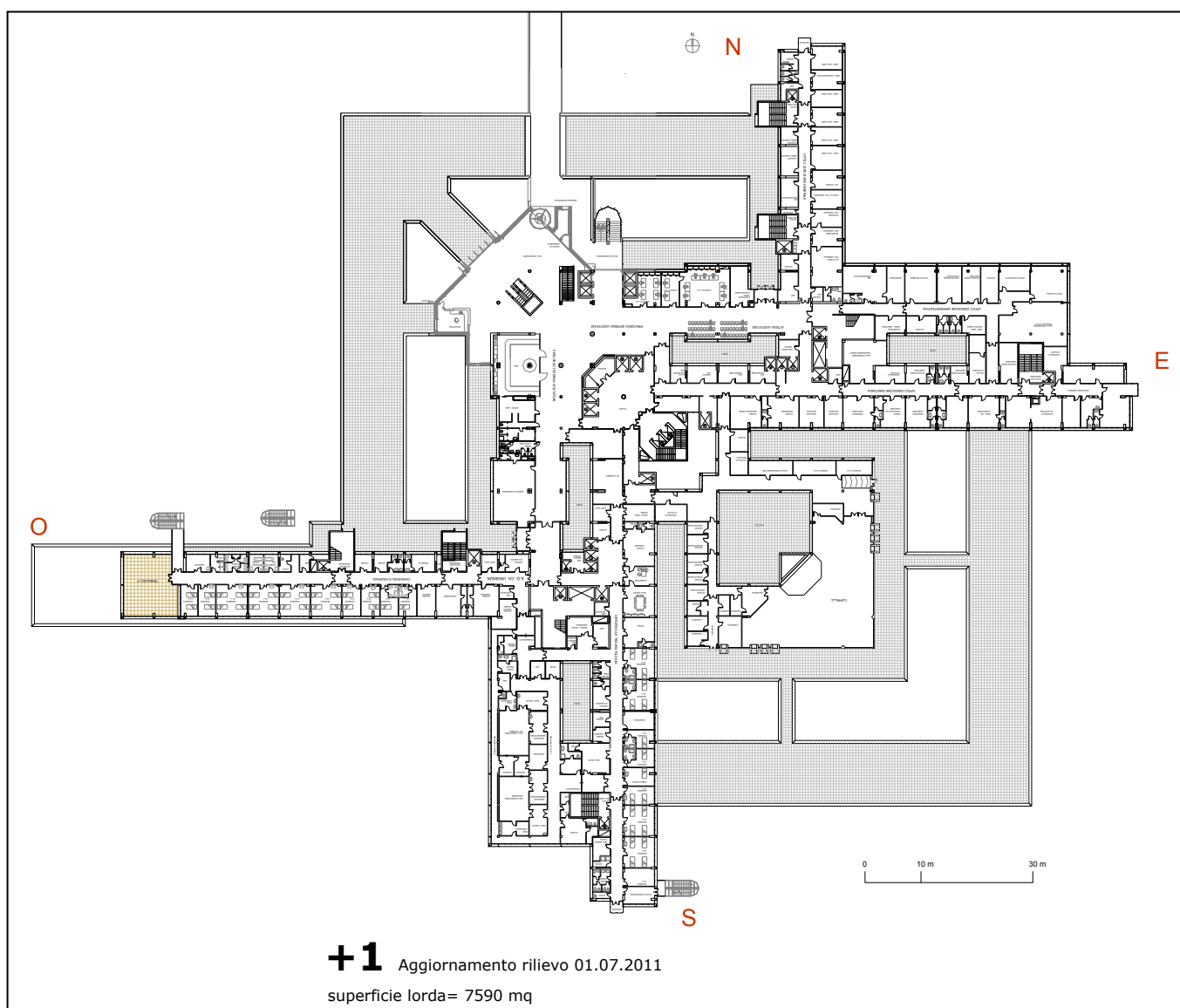
PIANO 0 (Piano Piastra)**Superficie lorda: 16'480 m²**

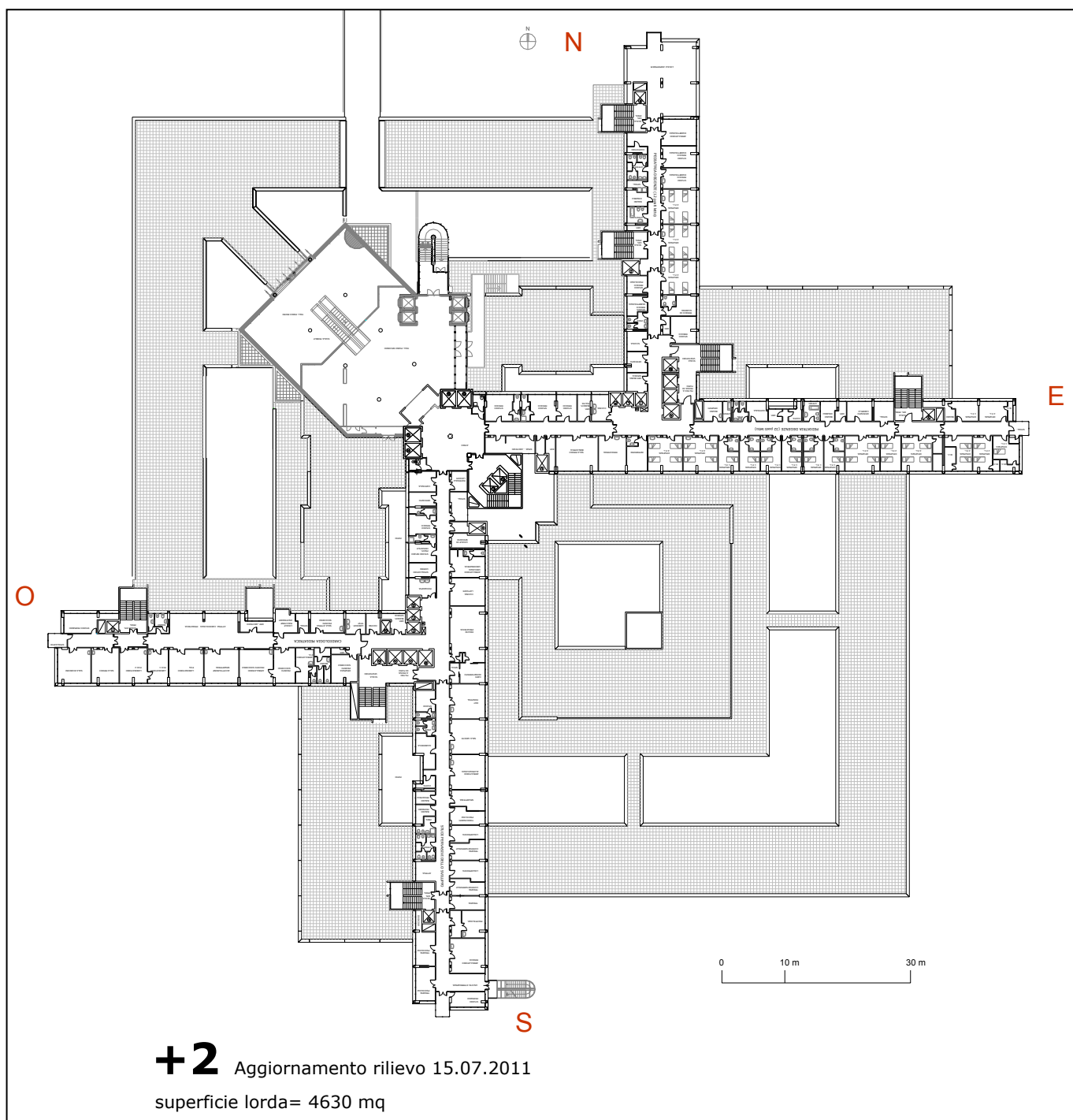
Attività svolte/Reparti: Terapia Intensiva, Pronto Soccorso, Trauma Center, Osservazione Breve Intensiva, Ambulatori Ortopedia, Ambulatori Endoscopia Digestiva, Ambulatori Terapia Antalgica, Ambulatori Oculistica, Ambulatori Otorinolaringoiatra, Ambulatori Dermatologia, Anatomia Patologica, Laboratori Analisi, Laboratori Microbiologia, Radiologia, Medicina Nucleare, Uffici del Personale, Uffici Economato



PIANO I**Superficie lorda:** 7'590 m²

Attività svolte/Reparti: Hall, CUP, Bar, Edicola, Banca, Cappella, Direzione Generale, Direzione Amministrativa, Direzione Sanitaria, Ortopedia, Chirurgia d'Urgenza, Sala Operatoria Chirurgia d'Urgenza, Sala operatoria Ortopedia.

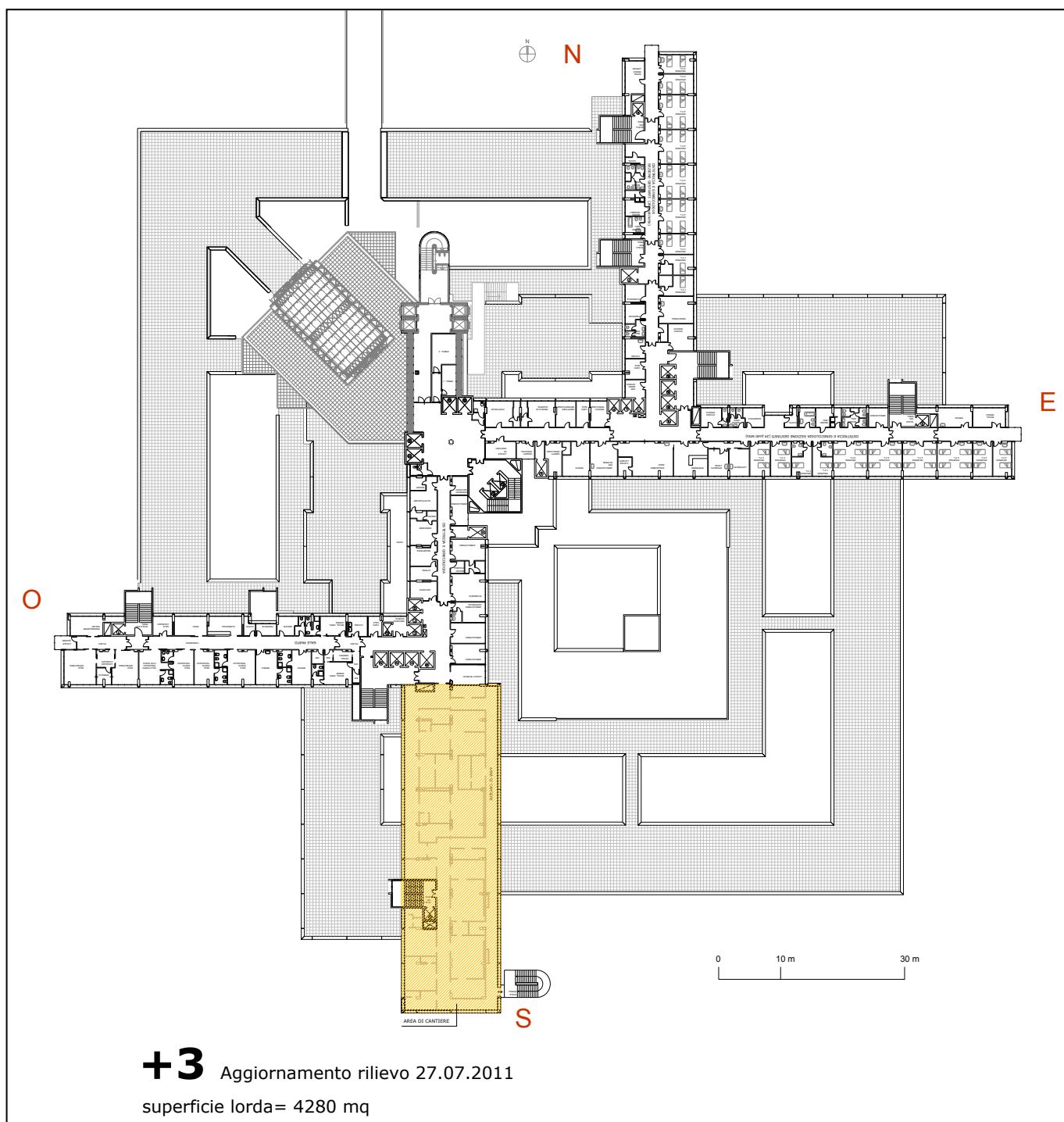


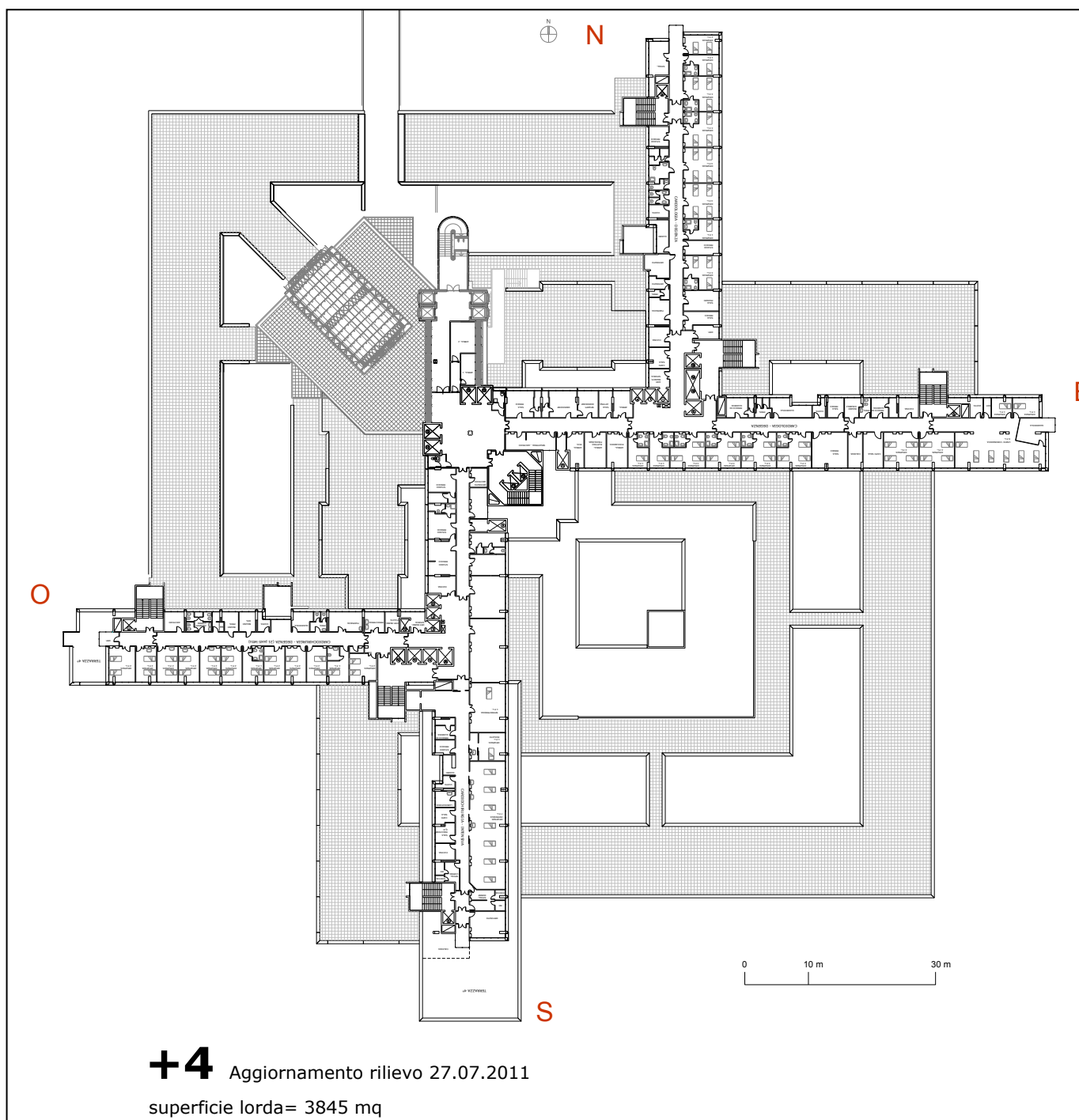
PIANO II**Superficie lorda:** 4'630 m²**Attività svolte/Reparti:** Pediatria, Cardiologia Pediatrica, Studi Pervasivi dello Sviluppo.

PIANO III

Superficie lorda: 4'280 m²

Attività svolte/Reparti: Ostetricia e Ginecologia, Sale Parto.

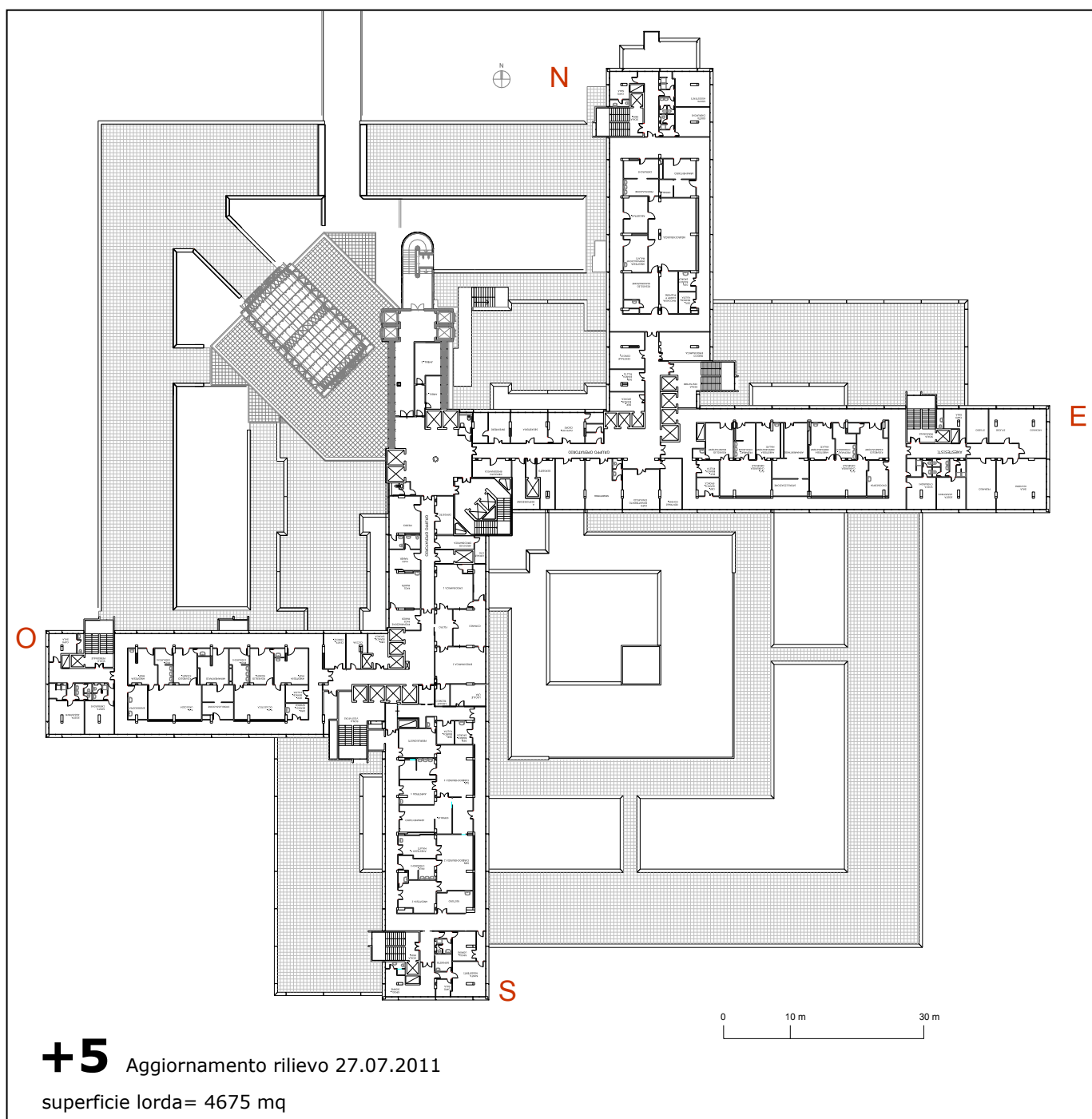


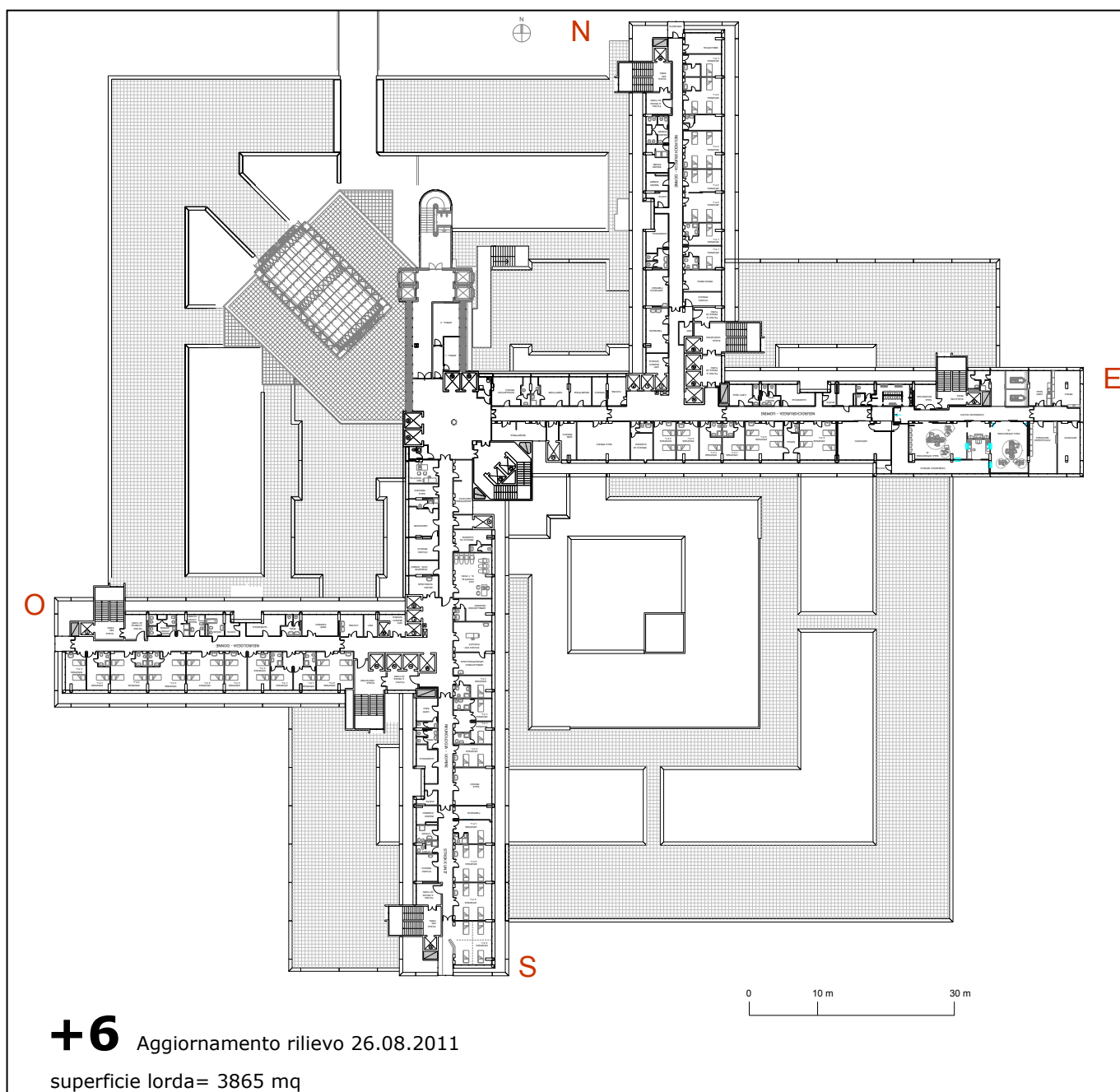
PIANO IV**Superficie lorda:** 3'845 m²**Attività svolte/Reparti:** Cardiologia, Cardiochirurgia.

PIANO V

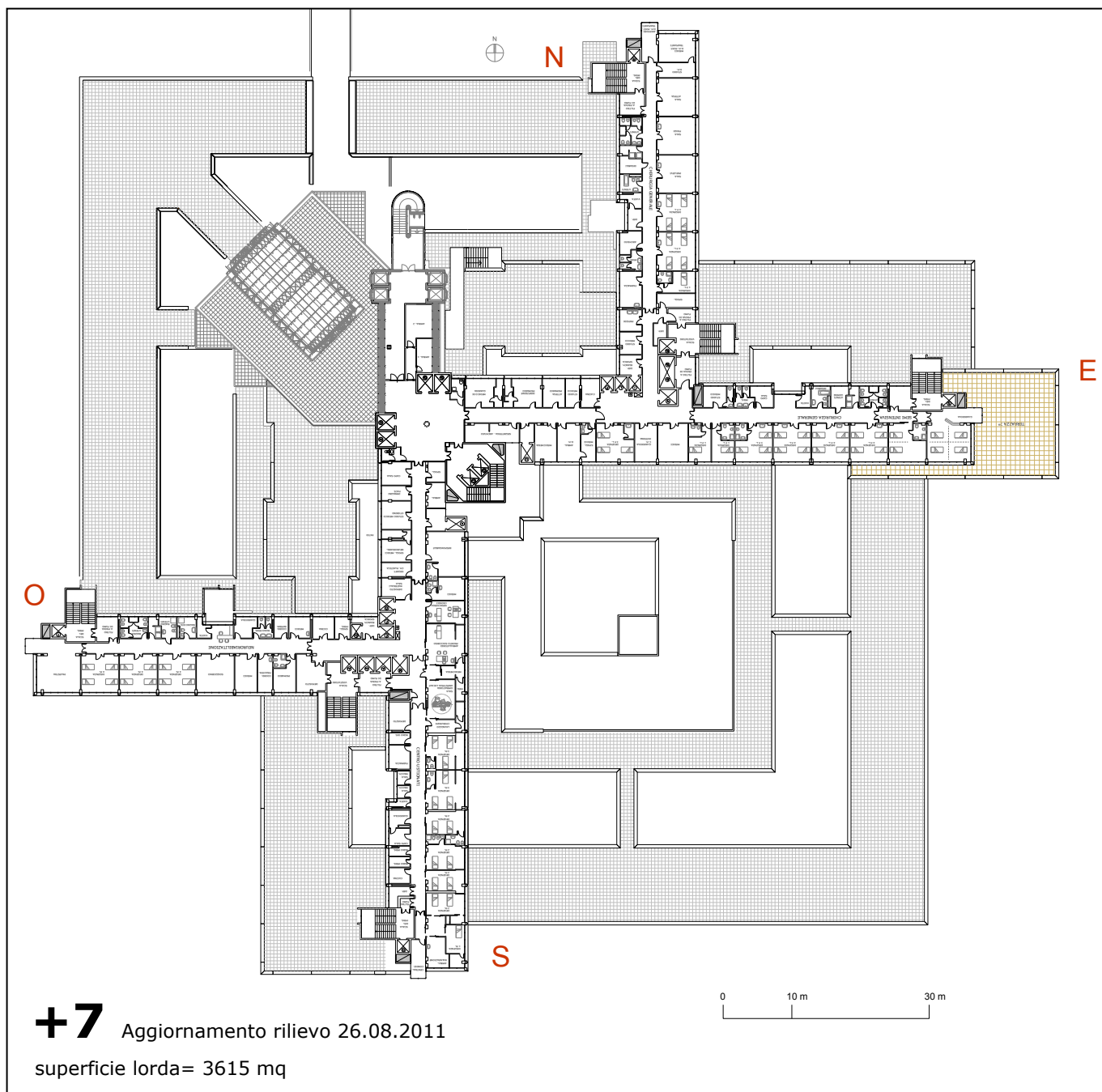
Superficie lorda: 4'675 m²

Attività svolte/Reparti: N. 4 Blocchi Operatori.



PIANO VI**Superficie lorda:** 3'865 m²**Attività svolte/Reparti:** Neurologia, Neurochirurgia, Sala Operatoria Neurochirurgia, Stroke Unit.

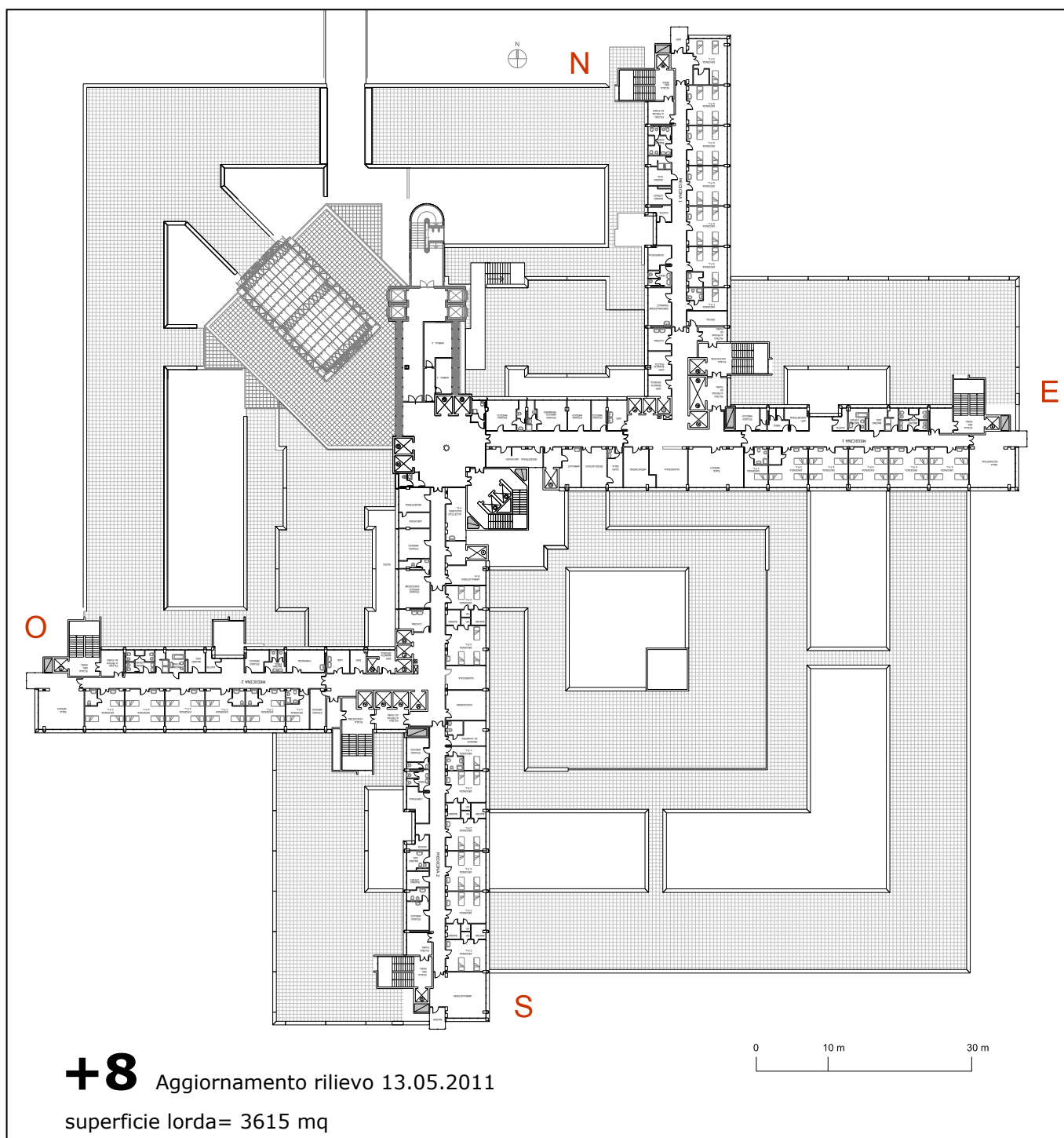
PIANO VII

Superficie lorda: 3'615 m²**Attività svolte/Reparti:** Chirurgia Generale, Chirurgia Maxillo-Facciale, Chirurgia Plastica, Centro Ustionati, Neuroriabilitazione.

PIANO VIII

Superficie lorda: 3'615 m²

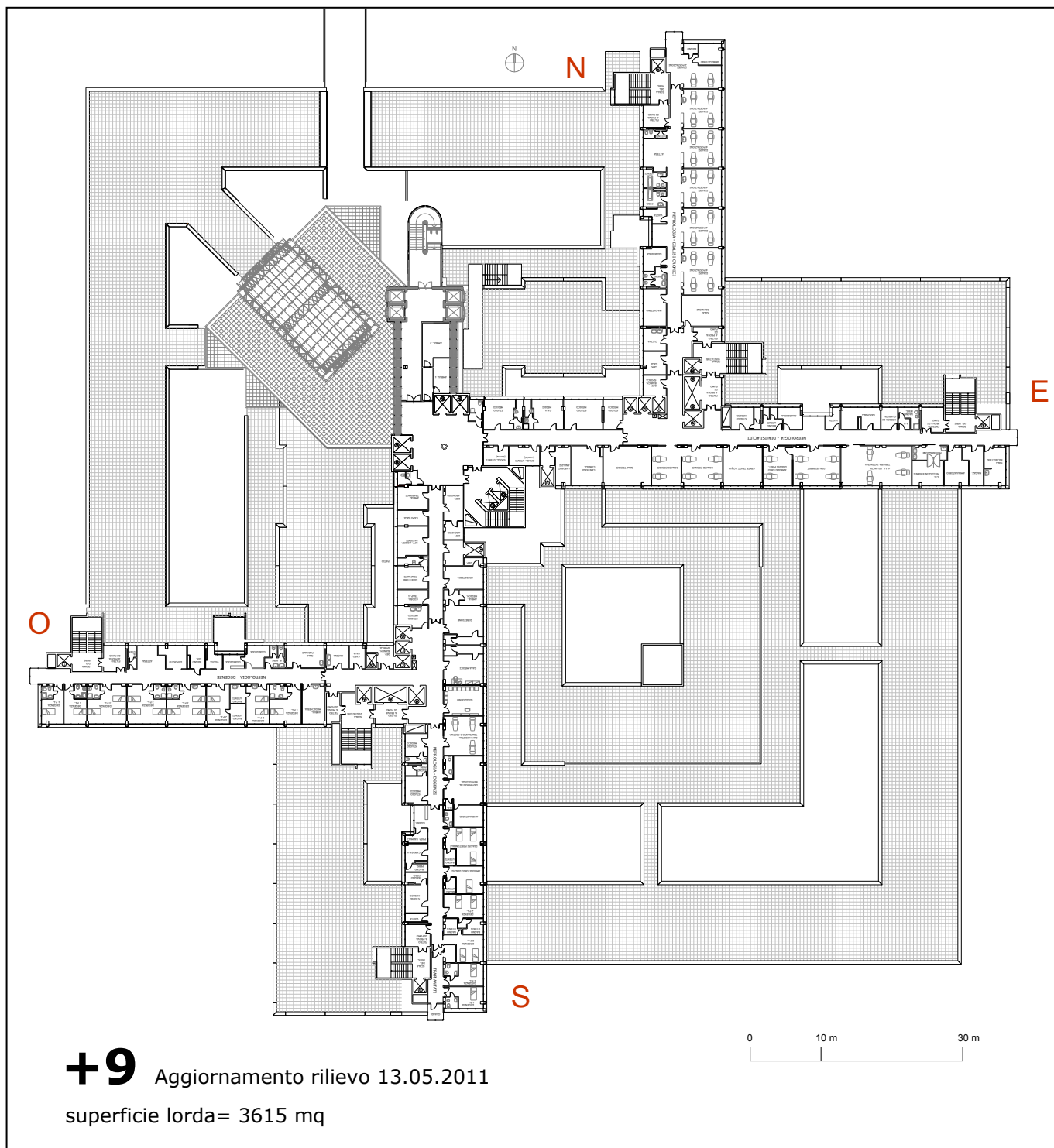
Attività svolte/Reparti: Medicina 1, Medicina 2.



PIANO IX

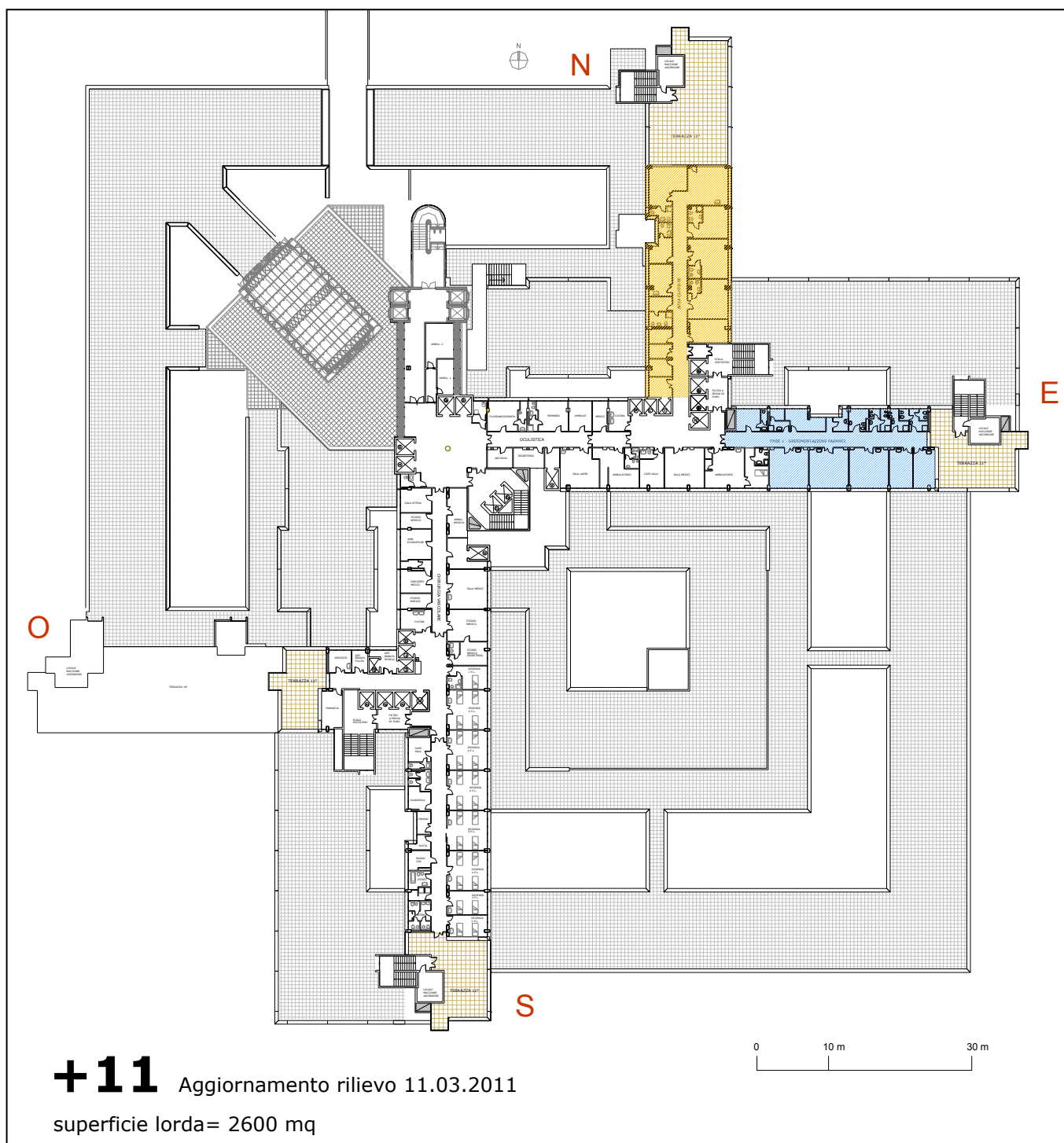
Superficie lorda: 3'615 m²

Attività svolte/Reparti: Nefrologia Dialisi Acuti, Nefrologia Dialisi Cronici, Degenze di Nefrologia.



Superficie lorda: 3'200 m²



PIANO XI**Superficie lorda: 2'600 m²****Attività svolte/Reparti:** Chirurgia Vascolare, Oculistica, Sperimentazione Farmaci (Fase 1)

APPENDICE B

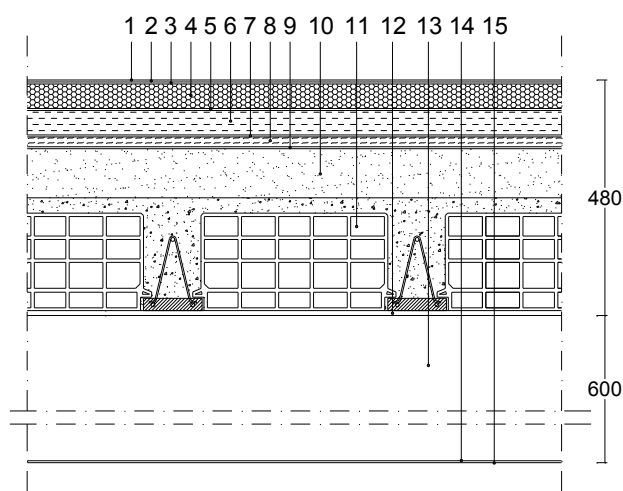
Caratteristiche termo-fisiche delle superfici opache e trasparenti del Corpo Centrale dell'AOB ^[1]

SUPERFICI OPACHE

Solaio di copertura – Terrazze corpo principale

[Codice: S01]

N.	DESCRIZIONE STRATO (da superiore ad inferiore)	s [mm]	k [W/mK]	Calore Specifico [J/kgK]	ρ [kg/m ³]
1	adduttanza superiore	0			
2	guaina ardesiata (materie plastiche compatte)	4	0.280	1300	1050
3	guaina liscia (materie plastiche compatte)	4	0.280	1300	1050
4	poliuretano in lastre ricavate da blocchi	50	0.032	1499	32
5	guaina liscia (materie plastiche compatte)	4	0.280	1300	1050
6	cls con pomice (inerti espansi origine vulcanica)	50	0.470	840	1200
7	guaina liscia (materie plastiche compatte)	4	0.280	1300	1050
8	lana di roccia	20	0.042	1030	40
9	guaina liscia (materie plastiche compatte)	4	0.280	1300	1050
10	cls cellulare da autoclave	100	0.150	840	400
11	solaio laterocementizio (travetti-laterizi-caldana)	230	0.800	840	1600
12	intonaco di calce e gesso	10	0.70	840	1400
13	vano impianti (intercapedine d'aria)	600	0.026	1000	1.30
14	controsoffitto in quadrotti in lamiera di alluminio	0.78	220.0	960	2700
15	adduttanza inferiore	0			



^[1] N. Mandas, F. V. Caredda, O. Caboni, S. La Croce, "Proposta di un sistema competitivo e flessibile per la riduzione del fabbisogno e l'ottimizzazione della gestione energetica dell'Azienda Ospedaliera G. Brotzu", Relazione Scientifica Finale, Progetto finanziato con L.R. n.7 Agosto 2007, Università di Cagliari, Dicembre 2012.

Solaio intermedio corpo centrale (caso A)

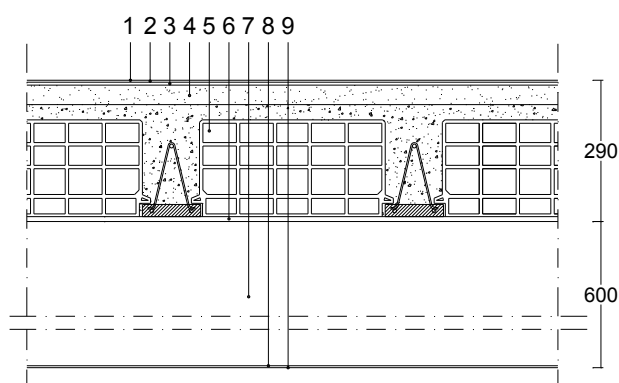
[Codice: SO2a]

N.	DESCRIZIONE STRATO (da superiore ad inferiore)	s [mm]	k [W/mK]	Calore Specifico [J/kgK]	ρ [kg/m ³]
1	adduttanza superiore	0			
2	pavimento in teli di pvc	4	0.160	1300	1000
3	massetto di finitura autolivellante	6	1.100	840	2000
4	massetto in cemento	40	1.400	840	2000
5	solaio laterocementizio (travetti-laterizi-caldana)	230	0.800	840	1600
6	intonaco di calce e gesso	10	0.70	840	1400
7	vano impianti (intercapedine d'aria)	600	0.026	1000	1.30
8	controsoffitto in quadrotti in lamiera di alluminio	0.78	220.0	960	2700
9	adduttanza inferiore	0			

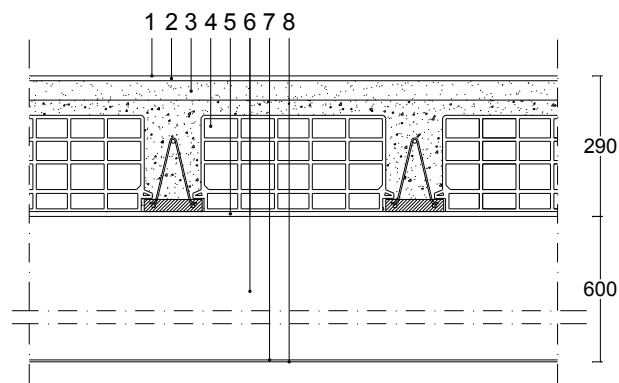
Solaio intermedio corpo centrale (caso B)

[Codice: SO2b]

N.	DESCRIZIONE STRATO (da superiore ad inferiore)	s [mm]	k [W/mK]	Calore Specifico [J/kgK]	ρ [kg/m ³]
1	adduttanza superiore	0			
2	piastrelle in ceramica	10	1.000	840	2300
3	massetto in cemento	40	1.400	840	2000
4	solaio laterocementizio (travetti-laterizi-caldana)	230	0.800	840	1600
5	intonaco di calce e gesso	10	0.70	840	1400
6	vano impianti (intercapedine d'aria)	600	0.026	1000	1.30
7	controsoffitto in quadrotti in lamiera di alluminio	0.78	220.0	960	2700
8	adduttanza inferiore	0			



Solaio Intermedio Corpo Centrale (A)

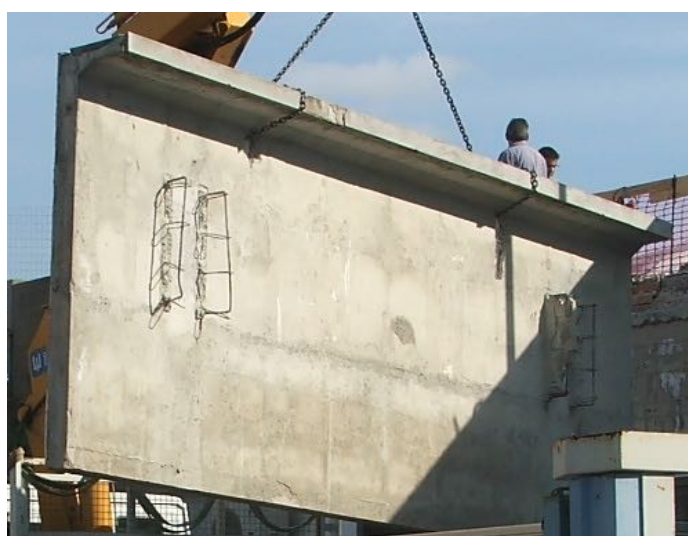
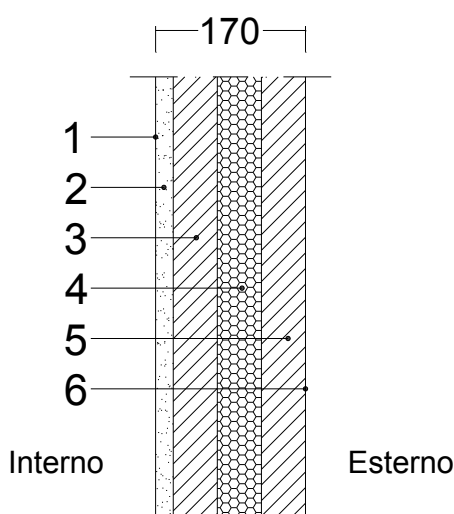


Solaio Intermedio Corpo Centrale (B)

Tamponatura in pannello a sandwich

[Codice: SO3]

N.	DESCRIZIONE STRATO (da interno ad esterno)	s [mm]	k [W/mK]	Calore Specifico [J/kgK]	ρ [kg/m ³]
1	adduttanza interna	0			
2	intonaco di calce e gesso	20	0.700	840	1400
3	CLS con aggregati naturali	50	1.910	880	2400
4	polistirene espanso in lastre ricavate da blocchi	50	0.040	1250	30
5	CLS con aggregati naturali	50	1.910	880	2400
6	adduttanza esterna	0			



Partizioni interne

[Codice: SO4]

N.	DESCRIZIONE STRATO (da interno ad esterno)	s [mm]	k [W/mK]	Calore Specifico [J/kgK]	ρ [kg/m ³]
1	adduttanza interna	0			
2	intonaco di calce e gesso	10	0.700	840	1400
3	mattoni forati	80	0.250	840	600
4	intonaco di calce e gesso	10	0.700	840	1400
5	adduttanza esterna	0			

Pareti vani scala

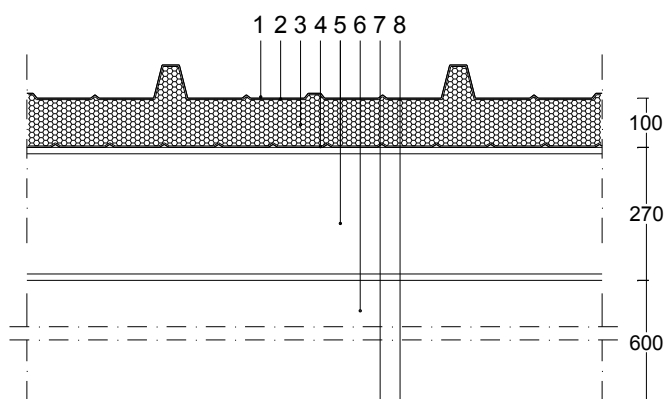
[Codice: SO5]

N.	DESCRIZIONE STRATO (da interno ad esterno)	s [mm]	k [W/mK]	Calore Specifico [J/kgK]	ρ [kg/m ³]
1	adduttanza interna	0			
2	intonaco di calce e gesso	10	0.700	840	1400
3	CLS con aggregati naturali	200	1.910	880	2400
4	adduttanza esterna	0			

Pannello di copertura Trauma Center

[Codice: S06]

N.	DESCRIZIONE STRATO (da superiore ad inferiore)	s [mm]	k [W/mK]	Calore Specifico [J/kgK]	ρ [kg/m ³]
1	adduttanza superiore	0			
2	rivestimento in lamiera d'acciaio	0.50	52.00	460	7800.0
3	pannello sandwich coibentato in lana di roccia	100	0.360	840	197.40
4	rivestimento in lamiera d'acciaio	0.50	52.00	460	7800.0
5	trave in acciaio HEA 280 (intercapedine d'aria)	270	0.026	1000	1.30
6	vano impianti (intercapedine d'aria)	600	0.026	1000	1.30
7	controsoffitto in quadrotti in lamiera di alluminio	0.78	220.0	960	2700
8	adduttanza inferiore	0			



Tamponatura Trauma Center

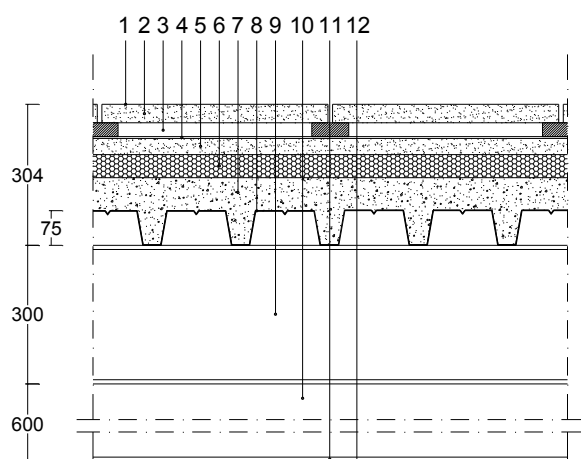
[Codice: S07]

N.	DESCRIZIONE STRATO (da interno ad esterno)	s [mm]	k [W/mK]	Calore Specifico [J/kgK]	ρ [kg/m ³]
1	adduttanza interna	0			
2	intonaco di malta cementizia	15	1.400	840	2000
3	laterizio tipo poroton	120	0.214	840	970
4	intercapedine d'aria	30	0.026	1000	1.30
5	laterizio muroblocco pesante	250	0.298	840	820
6	intonaco di malta cementizia	15	1.400	840	2000
7	adduttanza esterna	0			

Solaio di copertura Hall

[Codice: S08]

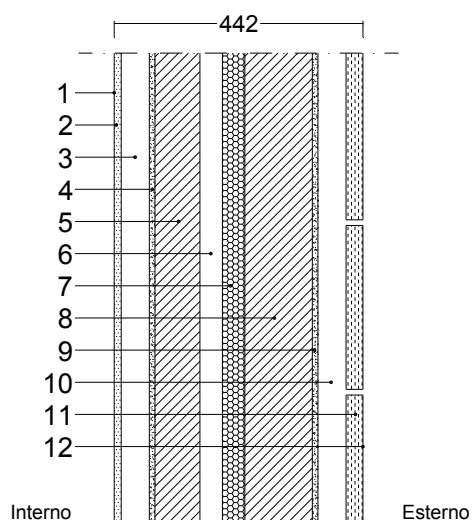
N.	DESCRIZIONE STRATO (da superiore ad inferiore)	s [mm]	k [W/mK]	Calore Specifico [J/kgK]	ρ [kg/m ³]
1	adduttanza esterna	0			
2	quadrotto in malta cementizia 50x50 sp. 4 cm	40	1.400	840	2000
3	distanziatore in polipropilene (interc. Aria)	30	0.026	1000	1.30
4	membrana elastoplastomerica imp. monostrato	4	0.280	1200	1050
5	massetto di malta cementizia	35	1.400	840	2000
6	pannello in polistirene espanso	50	0.032	1499	32
7	cls leggero termoisolante (h70+75-7)=138 mm	138	0.160	840	500
8	lamiera grecata zincata h 75 mm, sp. 7 mm	7	52.00	450	7800
9	trave in acciaio IPE 300 (intercapedine d'aria)	300	0.026	1000	1.30
10	vano impianti (intercapedine d'aria)	600	0.026	1000	1.30
11	controsoffitto in lastre di cartongesso	15	0.21	1000	900
12	adduttanza interna	0			



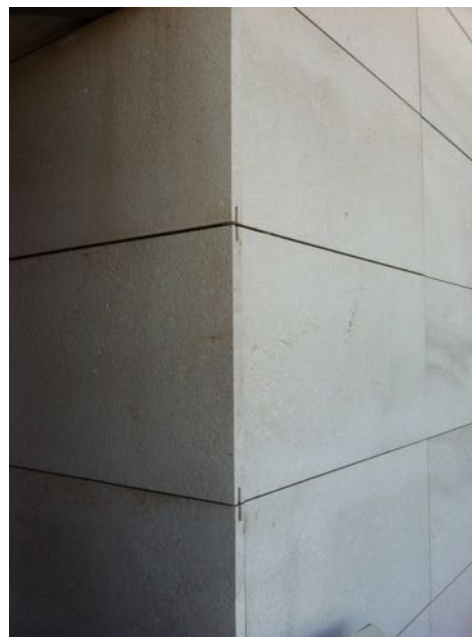
Tamponatura Hall

[Codice: S09]

N.	DESCRIZIONE STRATO (da interno ad esterno)	s [mm]	k [W/mK]	Calore Specifico [J/kgK]	ρ [kg/m ³]
1	adduttanza interna	0			
2	lastra di cartongesso sp. 12,5 mm	12	0.210	1000	900
3	telaio C50 per lastra cartongesso (interc. Aria)	50	0.026	1000	1.30
4	intonaco di malta cementizia	10	1.400	840	2000
5	parete in laterizio forato	80	0.250	840	600
6	intercapedine d'aria	40	0.026	1000	1.30
7	strato isolante in polistirene espanso	40	0.040	1250	30
8	parete in laterizio forato	120	0.250	840	600
9	intonaco di malta cementizia	10	1.400	840	2000
10	supporto per rivestimento esterno (interc. Aria)	50	0.026	1000	1.30
11	rivestimento in lastre calcare di Orosei	30	1.50	840	1900
12	adduttanza esterna	0			



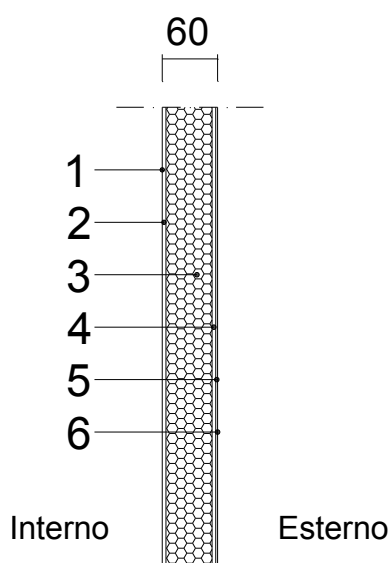
Sp. 442 mm



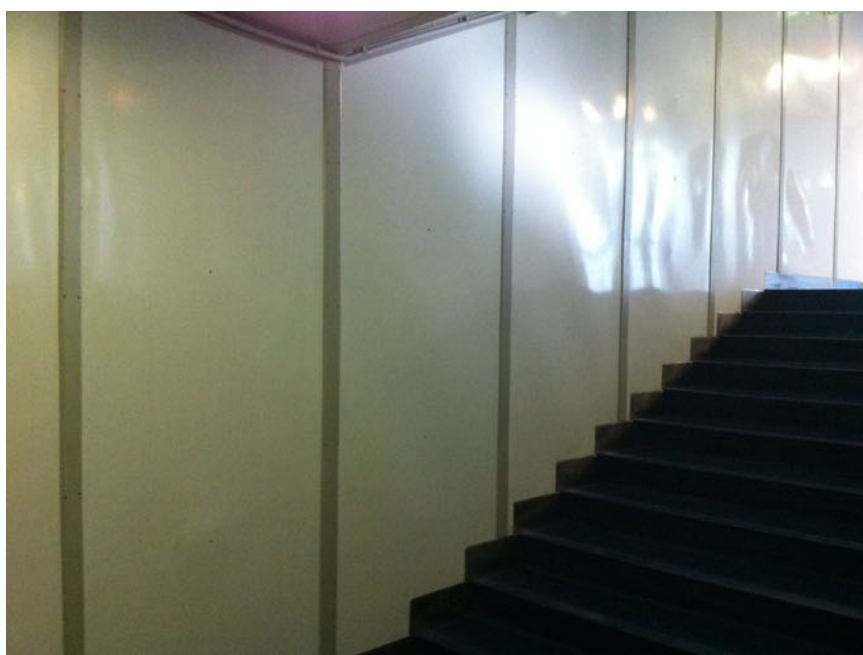
Pannello verticale vano scala – Torre ascensori

[Codice: SO10]

N.	DESCRIZIONE STRATO (da interno ad esterno)	s [mm]	k [W/mK]	Calore Specifico [J/kgK]	ρ [kg/m ³]
1	adduttanza interna	0			
2	rivestimento PVC	4	0.160	1300	1400
3	pannello con poliuretano espanso autoestinguente	50	0.032	1300	40
4	rivestimento PVC	4	0.160	1300	1400
5	lamiera in acciaio inox 2 mm	2	17.00	500	8000
6	adduttanza esterna	0			



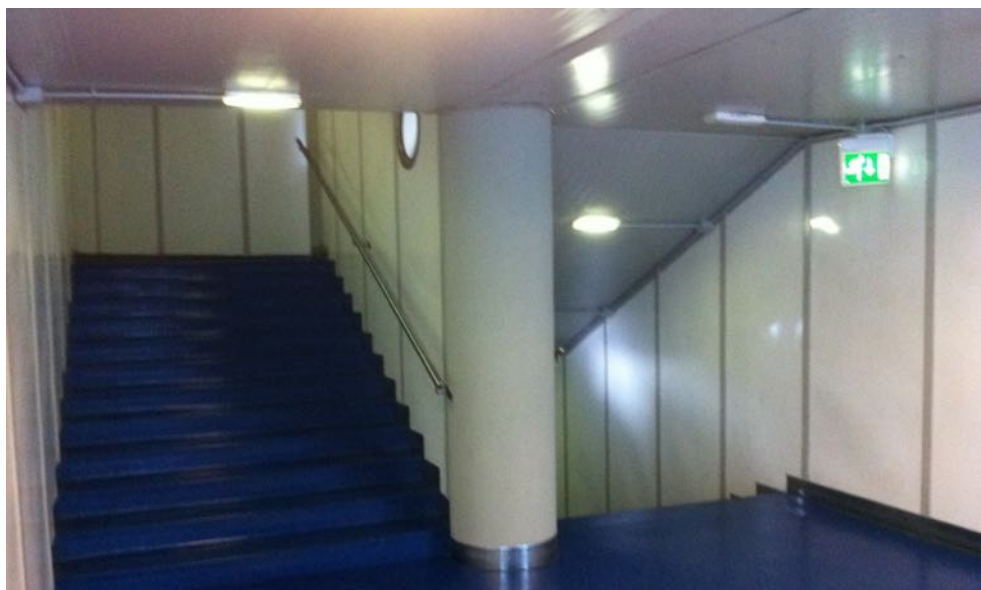
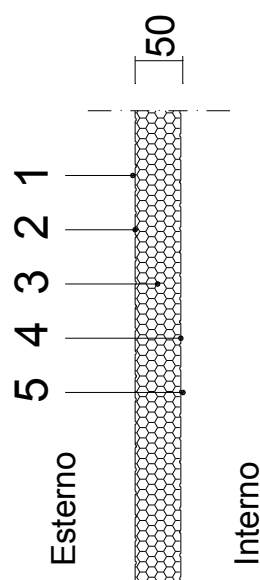
Sp. 60 mm



Pannello orizzontale vano scala – Torre ascensori

[Codice: SO11]

N.	DESCRIZIONE STRATO (da superiore ad inferiore)	s [mm]	k [W/mK]	Calore Specifico [J/kgK]	ρ [kg/m ³]
1	adduttanza esterna	0			
2	rivestimento in lamiera d'acciaio	0.4	52.00	460	7800
3	pannello con poliuretano espanso autoestinguente	50	0.032	1300	40
4	rivestimento in lamiera d'acciaio	0.4	52.00	460	7800
5	adduttanza interna	0			

**SUPERFICI TRASPARENTI**

Finestre a nastro (corpo principale)

[Codice: ST1]

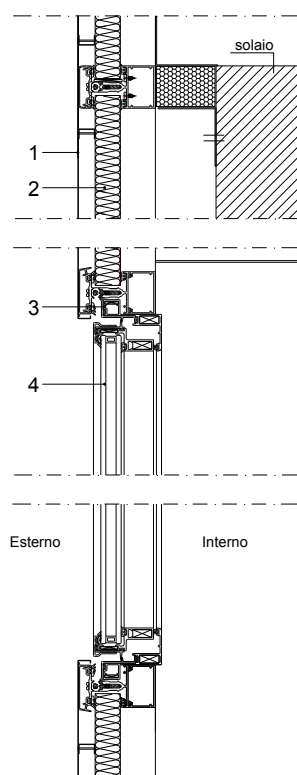
N.	DESCRIZIONE STRATO	s [mm]	k [W/mK]	C [W/m ² K]	ρ [kg/m ³]
1	telaio estruso in lega di alluminio 6060 UNI 9006/1 a taglio termico tipo "EKU 53 TT", trasmittanza termica unitaria DIN Kr=3,00 W/m ² K	53		3.00	2700
2	vetrata isolante ad alta prestazione termica e a controllo solare composta da una lastra di SUNERGY da 6-12-6 mm. AZUR TEMPERATO, camera d'aria da 12 mm. U=1.8 W/m ² K con gas, fattore luminoso TL 50%, fattore energetico RE 8%-AE 63%-TED 29%, fattore solare FS 36%.			1.8	



Facciata terminale corridoi

[Codice: ST2]

N.	DESCRIZIONE STRATO	s [mm]	k [W/mK]	C [W/m²K]	ρ [kg/m³]
1	strato di lamiera in alluminio con finitura titanio		220		2700
2	pannello termoisolante in polistirene espanso estruso (XPS) tipo "STYSOL"	20	0.034		30
3	facciata continua realizzata con profili in lega di alluminio EN AW 6060-T5 conformi alla norma UNI 1220-2:2002 del sistema "ALL.CO. FX50"	50		2.50 5.90	2700
4	vetro camera SUNERGY AZUR mm. 6+12 aria + 44.1 basso emissivo			1.6	



Vetrata verticale vani scala

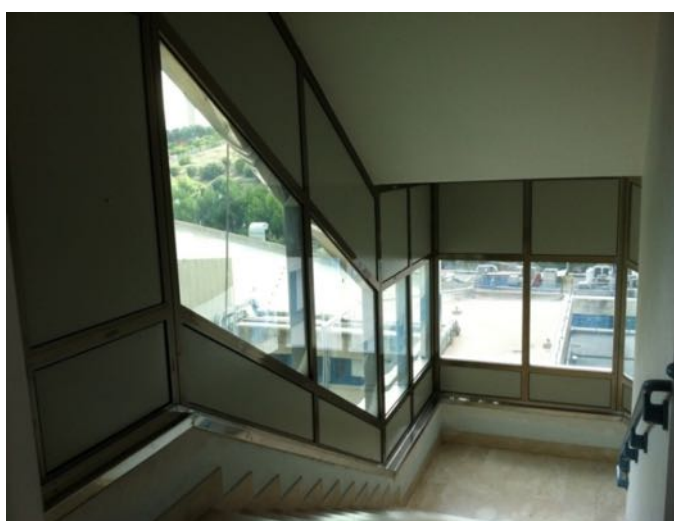
[Codice: ST3]

N.	DESCRIZIONE STRATO	s [mm]	k [W/mK]	C [W/m ² K]	ρ [kg/m ³]
1	telaio estruso in lega di alluminio 6060 UNI 3569-66 tipo "ALL.CO. EXPORT45TT"	45		3.35	2700
2	vetro camera SUNERGY AZUR mm. 6+12 aria + 44.1 basso emissivo			1.6	
3	doppia lamiera in acciaio inox 10/10		17		8000
4	pannello termoisolante in polistirene espanso estruso (XPS) tipo "STYSOL"	20	0.034		30

Vetrata vano scala principale

[Codice: ST4]

N.	DESCRIZIONE STRATO	s [mm]	k [W/mK]	C [W/m ² K]	ρ [kg/m ³]
1	telaio estruso in lega di alluminio 6060 UNI 3569-66 tipo "ALL.CO. EXPORT45TT"	45		3.35	2700
2	vetro antinfortunistico 6 mm temperato + plastico 1.52 + 8 mm temperato riflettente tipo "ECLIPS ADVANTAGE green" filo lucido.			1.8	
3	lamiera in acciaio inox 1 mm	1	17		8000
4	pannello termoisolante in polistirene espanso estruso (XPS) tipo "STYSOL"	20	0.034		30
5	pannello in lamiera di alluminio preverniciato	1.5	220.0		2700



Facciata Trauma Center

[Codice: ST5]

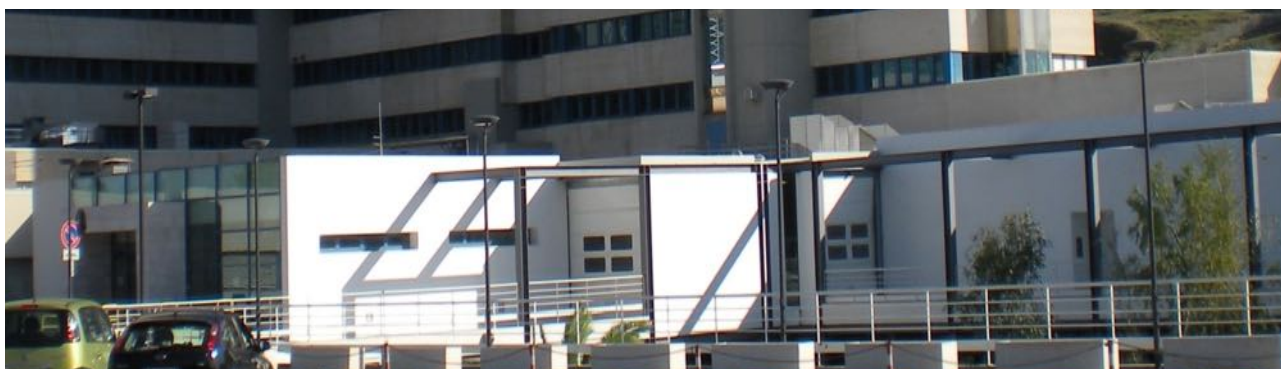
N.	DESCRIZIONE STRATO	s [mm]	k [W/mK]	C [W/m ² K]	ρ [kg/m ³]
1	facciata continua realizzata con profili in lega di alluminio EN AW 6060-T5 conformi alla norma UNI 1220-2:2002 del sistema "ALL.CO. FX50"	50		2.50 5.90	2700
2	vetrata isolante ad alta prestazione termica e a controllo solare composta da una lastra esterna di SUNERGY da 6 mm. AZUR TEMPERATO, camera d'aria da 12 mm. E lastra interna di cristallo stratificato antinfortunistico, bassoemissivo tipo STRATOBEL G + PLANIBEL 4mm. Trasmissione termica K=1.5 Kcal/mq °K, potere fonoisolante 41 DB, fattore luminoso RL 11-TL45, fattore energetico RE 8%-AE 66%-TED 26%, fattore solare FS 34%.			1.8	



Infissi Trauma Center

[Codice: ST6]

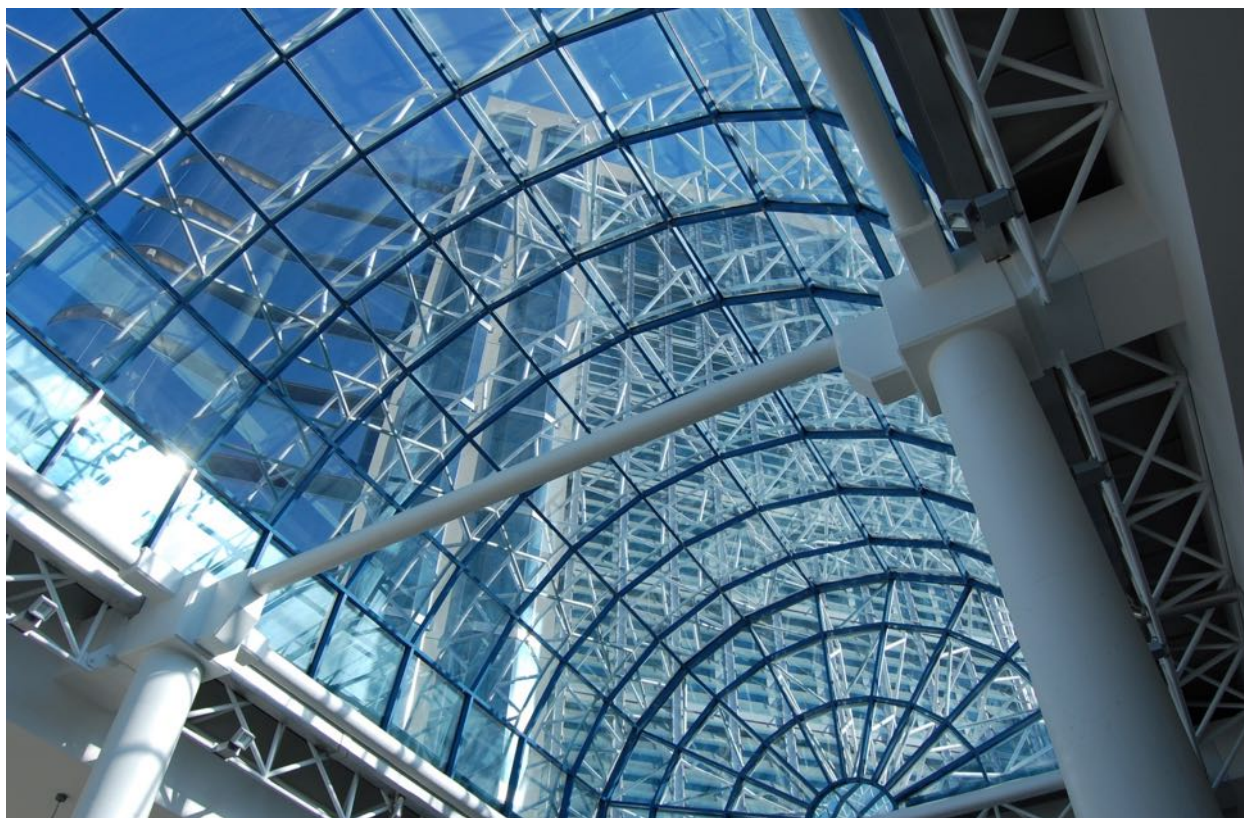
N.	DESCRIZIONE STRATO	s [mm]	k [W/mK]	C [W/m ² K]	ρ [kg/m ³]
1	telaio estruso in lega di alluminio 6060 UNI 3569-66 tipo "ALL.CO. EXPORT45TT"	45		3.35	2700
2	vetrata isolante ad alta prestazione termica e a controllo solare composta da una lastra esterna di SUNERGY da 6 mm. AZUR TEMPERATO, camera d'aria da 12 mm. E lastra interna di cristallo stratificato antinfortunistico, bassoemissivo tipo STRATOBEL G + PLANIBEL 4mm. Trasmissione termica K=1.5 Kcal/mq °K, potere fonoisolante 41 DB, fattore luminoso RL 11-TL45, fattore energetico RE 8%-AE 66%-TED 26%, fattore solare FS 34%.			1.8	



Facciata – cupola Hall

[Codice: ST7]

N.	DESCRIZIONE STRATO	s [mm]	k [W/mK]	C [W/m ² K]	ρ [kg/m ³]
1	facciata continua realizzata con profili in lega di alluminio EN AW 6060-T5 conformi alla norma UNI 1220-2:2002 del sistema "ALL.CO. FX50"	50		2.50 5.90	2700
2	vetrata isolante ad alta prestazione termica e a controllo solare composta da una lastra esterna di SUNERGY da 6 mm. AZUR TEMPERATO, camera d'aria da 12 mm. E lastra interna di cristallo stratificato antinfortunistico, bassoemissivo tipo STRATOBEL G + PLANIBEL 4mm. Trasmissione termica K=1.5 Kcal/mq °K, potere fonoisolante 41 DB, fattore luminoso RL 11-TL45, fattore energetico RE 8%-AE 66%-TED 26%, fattore solare FS 34%.			1.8	



Vetrata ascensori (nuova torre)

[Codice: ST8]

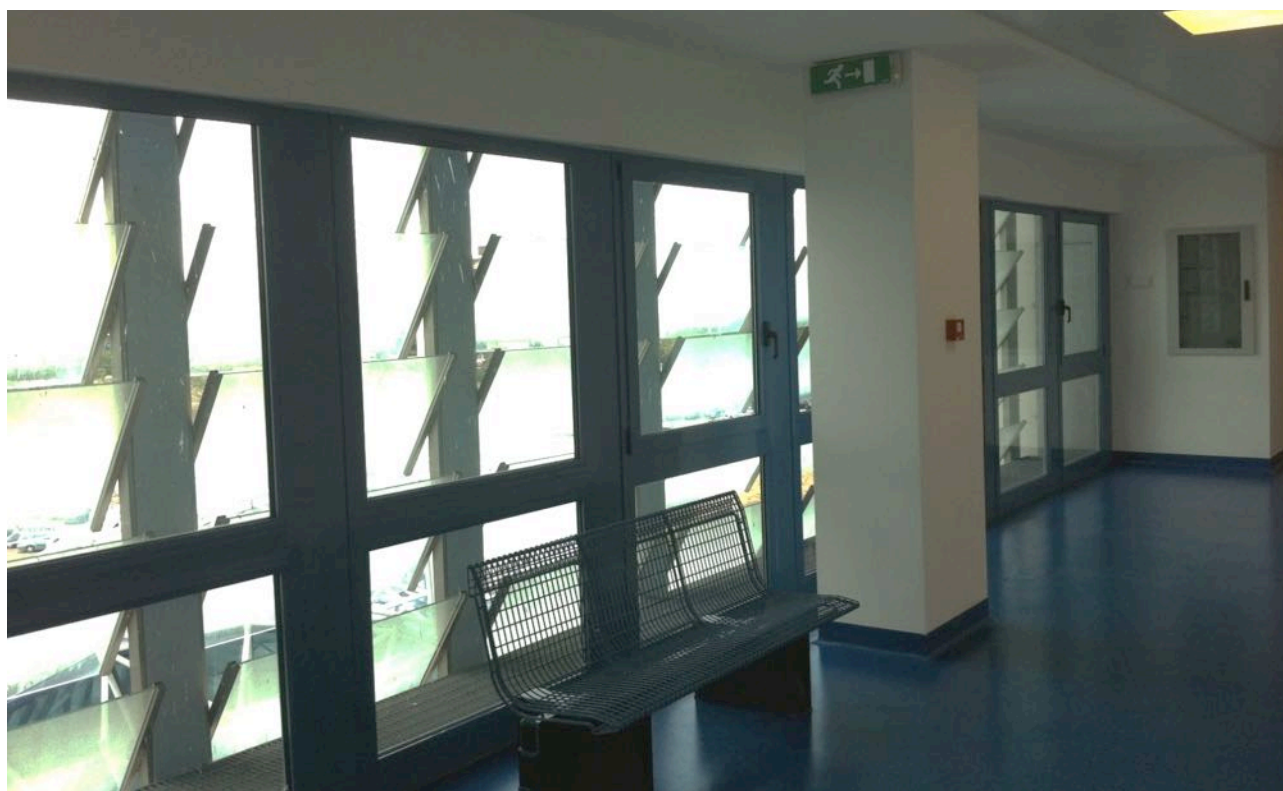
N.	DESCRIZIONE STRATO	s [mm]	k [W/mK]	C [W/m ² K]	ρ [kg/m ³]
1	piastra di ancoraggio in acciaio in corrispondenza dei solai dei diversi piani.				8000
2	lastra in vetro stratificato composta da: lastra esterna spessore 10 mm ad alte prestazioni meccaniche di tipo riflettente a controllo solare tonalità neutra; lastra interna in vetro indurito semitemperato bassoemissivo 6 mm.			4.1	



Infissi torre ascensori

[Codice: ST9]

N.	DESCRIZIONE STRATO	s [mm]	k [W/mK]	C [W/m ² K]	ρ [kg/m ³]
1	vetrata verticale basculante per interni, continua di taglio termico, eseguita in alluminio anodizzato, telaio fisso da 45 mm, telaio mobile da 52 mm. I profili estrusi in lega di alluminio 6060 UNI 3569-66 tipo "Metra NC45 superthermic"	45		3.4	2700
2	vetrata isolante ad alta prestazione termica e a controllo solare composta da una lastra esterna di SUNERGY da 6 mm. AZUR TEMPERATO, camera d'aria da 12 mm. E lastra interna di cristallo stratificato antinfortunistico, bassoemissivo tipo STRATOBEL G + PLANIBEL 4mm. Trasmissione termica K=1.5 Kcal/mq °K, potere fonoisolante 41 DB, fattore luminoso RL 11-TL45, fattore energetico RE 8%-AE 66%-TED 26%, fattore solare FS 34%.			1.8	



APPENDICE C

Caratteristiche degli impianti tecnologici installati ed in esercizio presso il
Corpo Centrale dell'A.O.B.^[1]

IMPIANTI ELETTRICI

Tabella C1 – Potenze elettriche dei gruppi di circolazione installati nelle centrali tecnologiche.

CENTRALE SERVITA	POTENZA [kW]	UTILIZZO	POTENZA [kW]
Centrale Termica	72	Elettropompe circolazione primari	45
		Motori bruciatori caldaia	27
Sotto-centrale Termica	75.9	Elettropompe scambiatori e aria primaria	56.3
		Elettropompe tubazione UTA polietilene	19.6
Centrale Idrica	63.8	Elettropompe ricircolo acqua calda sanitaria	30
		Elettropompe sollevamento acqua fredda	33.8
Centrale Frigo	222.5	Elettropompe circolazione terminali	67
		Elettropompe torri	37
		Elettropompe circolazione gruppi frigo	118.5
Centrale Vuoto tecnico	20.5	Pompe centrale del vuoto	20.5
Centrale Antincendio	92.2	Pompe centrale antincendio	92.2
Centrale Sprinkler	20.9	Pompe centrale sprinkler	20.9
Centrale Termica Corpi Separati	6	Elettropompe circolazione primari	6
Centrale ACS Corpi Separati	14.1	Elettropompe acqua sanitaria	5.1
		Elettropompe riscaldamento laboratori 1-2	3
		Elettropompe riscaldamento sanitario	3
		Elettropompe riscaldamento sala congressi	3
TOTALE	587.9		

Tabella C2 – Potenze elettriche dei gruppi frigoriferi e delle torri di raffreddamento.

	MARCA	TIPOLOGIA COMPRESSORE	POTENZA COMPRESSORE [kW]	POTENZA MOTORI VENTILATORI [kW]	POTENZA TOTALE [kW]
Gruppo 1	York	Centrifugo	309	22	331
Gruppo 2	York	A vite	204	22	226
Gruppo 3	York	A vite	204	22	226
Gruppo 4	McQuay	Centrifugo	247	22	269
TOTALE			964	88	1'052

^[1] N. Mandas, F. V. Caredda, O. Caboni, S. La Croce, "Proposta di un sistema competitivo e flessibile per la riduzione del fabbisogno e l'ottimizzazione della gestione energetica dell'Azienda Ospedaliera G. Brotzu", Relazione Scientifica Finale, Progetto finanziato con L.R. n.7 Agosto 2007, Università di Cagliari, Dicembre 2012

Tabella C3 – Potenze elettriche installate negli impianti di climatizzazione.

PIANO	ASSORBIMENTI ELETTRICI DEGLI IMPIANTI DI CLIMATIZZAZIONE [kW]				
	UTA 4 Tubi	UTA 2 Tubi	Recuperatori MP3	Fan-Coil	TOTALE
XI	non presente	non presente	1.20	2.62	3.82
X	non presente	non presente	1.48	4.20	5.68
IX	66.62	non presente	0.59	3.14	70.34
VIII	non presente	non presente	1.79	4.49	6.28
VII	16.57	dati non disponibili	1.18	3.70	21.45
VI	43.83	non presente	1.95	4.81	50.59
V	259.21	non presente	non presente	3.17	262.38
IV	133.65	non presente	1.18	3.05	137.88
III	53.58	non presente	0.88	3.61	58.08
II	dati non disponibili	non presente	non presente	4.79	4.79
I	non presente	dati non disponibili	non presente	7.86	7.86
Piastra	9.50	dati non disponibili	non presente	9.78	19.28
Seminterrato	16.70	non presente	non presente	3.57	20.27
TOTALE	599.66	0.00	10.25	58.78	668.69

Tabella C4 – Potenze elettriche delle principali apparecchiature elettromedicali.

APPARECCHIO ELETTRIMEDICALE	QUANTITÀ	POTENZA [kW]	POTENZA TOTALE [kW]
Ecografo	64	1	64
Pompa infusoriale	300	0.5	150
Ventilatore polmonare	60	0.04	2.4
Riunito dentistico	4	1.08	4.3
Dose unitaria	1	6	6
Tac 1	1	100	100
Tac 2	1	200	200
Angiografo	2	120	240
Angiografo 2	1	240	240
Apparecchio fisso raggi X	6	50	300
Mammografo	2	25	50
Portatile per scopia 1	5	5	25
Portatile per scopia 2	3	15	45
TOTALE			1'426.7

IMPIANTI TERMICI

Tabella C5– Potenze termiche delle UTA a 4 tubi.

PIANO SERVITO	MARCA MODELLO	N° UNITÀ	POTENZA BATTERIA FREDDA [kW]	POTENZA BATTERIA CALDA [kW]	POTENZA BATTERIA POST-RISC. [kW]	POTENZA UMIDIFICATORE ELETTRICO [kW]
XI - X	Non sono presenti UTA a 4 tubi a servizio di questi piani					
IX	STA UTA 84 DVZ 25	1	75.9	58.2	n.d.	n.d.
	TECNAIR LB OHU 208	1	80.9	78.6	0	27
	TECNAIR LB OHU 56	1	20.9	26	9	10
VIII	Non sono presenti UTA a 4 tubi a servizio di questo piano					
VII	TECNAIR LB OHU 56	1	20.9	26	9	10
VI	TECNAIR LB OHU 56	2	41.8	52	18	20
	TECNAIR LB OHU 208	1	80.9	78.6	0	27
V	FAST FM 119	1	113.8	87.3	n.d.	n.d.
	TECNAIR LB OHU 56	3	62.7	78	27	30
	TECNAIR LB OHU 208	1	80.9	78.6	0	27
	TECNAIR LB OHU 138	5	255.5	667	90	100
IV	TECNAIR LB OHU 208	3	242.7	235.8	0	81
III	TECNAIR LB OHU 138	2	41.8	52	18	20
	TECNAIR LB OHU 78	1	33	40.9	0	12
II	RDH 315 R NICOTRA	1	127	54.5	0	0
I	UNICLIMA KK 02/1	2	54	32.7	n.d.	n.d.
	UNICLIMA KK 08/1	1	91	46	n.d.	n.d.
Piastra	S.T.A UTA 22 DVI 45	2	60	60	n.d.	n.d.
	S.T.A UTA 68 DAI 45	2	113.8	87.2	n.d.	n.d.
	UNICLIMA KK 08/1	1	43.6	33.4	n.d.	n.d.
	UNICLIMA KK 02/1	1	30	23.27	n.d.	n.d.
	S.T.A. UTA 68 DVZ 25	2	113.8	87.2	n.d.	n.d.
	MEKAR 23MK0608	1	UTA del TRAUMACENTER - dati non disponibili			
	SITAL CLIMA CTS 09	2	131	152	n.d.	n.d.
Seminterrato	S.T.A UTA 115 S	1	131	101	n.d.	n.d.
	MP3 KTA002	1	30	29.6	n.d.	n.d.
	S.T.A UTA 115 DVZ 25	1	131	101	n.d.	n.d.
	S.T.A UTA 180 DVI 45	1	131	101	n.d.	n.d.
	RHOSS	1	290	179	32	n.d.
	///	1	UTA a servizio della PET - dati non disponibili			
TOTALE		44	2'629	2'647	203 (par.)	364 (par.)

n.d. dato non disponibile per questa macchina

par. risultato parziale

Tabella C6– Potenze termiche delle UTA a 2 tubi.

PIANO SERVITO	MARCA MODELLO	N° UNITÀ	POTENZA BATTERIA FREDDA [kW]	POTENZA BATTERIA CALDA [kW]
XI – X – IX - VIII	Non sono presenti U.T.A. a 2 tubi a servizio di questi piani			
VII	S.T.A. UTA DZZ75	1	69.3	54.5
	S.T.A. UTA DZZ15	1	9.2	7.3
VI – V – IV III - II - I	Non sono presenti U.T.A. a 2 tubi a servizio di questi piani			
Piastra	SAIVER ASZ 450K	3	133.9	98.2
	SAIVER ASZ 250K	2	48.9	71.4
Seminterrato	E.V. 200	1	272	209
	SAIVER ASZ 250K	1	24.5	35.7
TOTALE		9	558	476

Tabella C7– Potenze termiche dei Recuperatori di Calore (MP3).

PIANO	MODELLO	N°	PORTATA ARIA [m³/h]	POTENZA FRIGO. [kW]	POTENZA RISCALD. [kW]	POTENZA RECUPERATORE		POTENZA VENTILATORE [kW]
						FREDDO [kW]	CALDO [kW]	
XI	XRC 15	4	6'000	12.7	19.6	5.76	22.3	1.20
X	XRC 15	2	3'000	6.4	9.8	2.88	11.1	0.60
	XRC 10	6	6'000	12.2	19.3	5.76	22.3	0.88
IX	XRC 10	4	4'000	8.2	12.9	3.84	14.8	0.59
VIII	XRC 15	4	6'000	12.7	19.6	5.76	22.3	1.20
	XRC 10	4	4'000	8.2	12.9	3.84	14.8	0.59
VII	XRC 15	1	1'500	3.2	4.9	1.44	5.6	0.30
	XRC 10	6	6'000	12.2	19.3	5.76	22.3	0.88
VI	XRC 15	6	9'000	19.1	29.3	8.64	33.4	1.80
	XRC 10	1	1'000	2.0	3.2	0.96	3.7	0.15
V	Non sono presenti Recuperatori di Calore a servizio di questo piano							
IV	XRC 10	6	6'000	12.2	19.3	5.76	22.3	0.88
	XRC 15	1	1'500	3.2	4.9	1.44	5.8	0.30
III	XRC 10	6	6'000	12.2	19.3	5.76	22.3	0.88
II – I Piastra Seminterrato	Non sono presenti Recuperatori di Calore a servizio di questi piani							
TOTALE		51	60'000	125	194	57.6	223	10.3

Tabella C8 – Dati di targa dei Recuperatori di Calore (MP3).

DATI TECNICI	VENTILATORE	RECUPERATORE TERMICO		BATTERIA SUPPLEMENTARE		PORTATA ARIA DI RINNOVO [m³/h]
		Regime Invernale [kW]	Regime Estivo [kW]	Riscaldamento [kW]	Raffrescamento [kW]	
MODELLO	Potenza [W]					
XRC10	147	3.71	0.96	3.22	2.04	1'000
XRC15	300	5.57	1.44	4.89	3.18	1'500

Tabella C9 – Potenze termiche dei Ventilconvettori.

PIANO SERVITO	MARCA MODELLO	NUMERO UNITÀ INSTALLATE	SUPERFICIE SERVITA [m²]	POTENZA FRIGORIFERA [kW]	POTENZA RISCALDAMENTO [kW]
XI	YORK MFV	33	690	112.6	269.7
X	YORK MFV	54	1204	177.3	423.2
IX	YORK MFV	42	720	484.5	319.9
VIII	YORK MFV	57	1379	191.8	452.3
VII	YORK MFV	48	1069	158.9	374.5
VI	YORK MFV	57	773	191.7	449.5
V	YORK MFV	29	738	125.9	285.3
IV	YORK MFV	27	740	73.5	177.8
	AERMAC FCX	20	n.d.	41.6	94.0
III	YORK MFV	49	918	141.4	341.2
II	YORK MFV	63	1392	195.9	469.3
	AERMAC FCX	1	n.d.	3.4	7.4
I	YORK MFV	100	2512	325.7	781.4
Piastra	YORK MFV	91	2200	281.6	675.3
	AERMAC FCX	46	n.d.	122.8	271.7
Seminterrato	AERMAC FCX	47	1638	159.8	347.8
TOTALE		764	15'973	2'788	5'740

n.d. dato non disponibile

Tabella C10 – Dati di targa dei Ventilconvettori.

MARCA - MODELLO	POTENZA RAFFRESCAMENTO [kW]	POTENZA RISCALDAMENTO [kW]
YORK - MFV 80	5.59	12.2
YORK - MFV 60	4.28	10.1
YORK - MFV 40	2.55	6.30
YORK - MFV 20	1.55	3.48
AERMEC - FCX U	1.00	2.49
AERMEC - FCX APC	3.40	7.40

Tabella C11 – Potenze termiche dei Radiatori.

PIANO SERVITO	NUMERO UNITÀ INSTALLATE	SUPERFICIE SERVITA [m ²]	POTENZA RISCALDAMENTO [kW]
XI	17	284	2.47
X	17	543	7.90
IX	52	571	10.39
VIII	56	853	9.64
VII	24	264	3.88
VI	59	621	11.74
V	11	240	3.15
IV	17	n.d.	3.15
III	51	709	9.91
II	45	568	8.68
I	26	428	4.61
Piastra	Non sono presenti Radiatori a servizio di questo piano		
Seminterrato	Non sono presenti Radiatori a servizio di questo piano		
TOTALE	375	5'081	75.5

n.d. dato non disponibile

Tabella C12 – Dati di targa dei Radiatori.

N° COLONNE	DIMENSIONI (mm)			VOLUME ACQUA PER ELEMENTO [litri]	POTENZA TERMICA NOMINALE (W)
	H	L	P		
2	566	60	60	0.57	55.6
3	880	60	95	1.00	114
4	880	60	130	1.06	145
5	880	60	165	1.32	172