



Ente per le Nuove tecnologie,
l'Energia e l'Ambiente

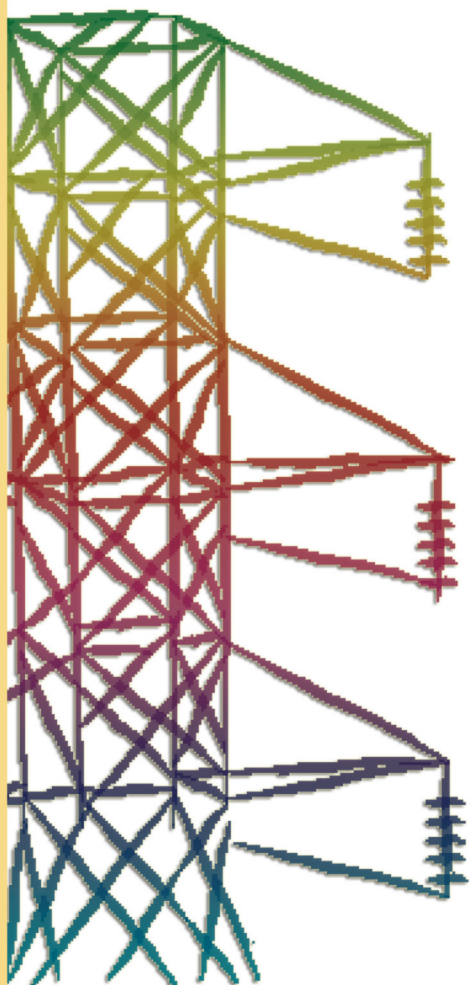


Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA SISTEMA ELETTRICO

Valutazione dei consumi nell'edilizia esistente e benchmark mediante codici semplificati: analisi di edifici ospedalieri

**W. Grassi, D. Testi, E. Menchetti, D. Della Vista, M. Bandini, L. Niccoli,
G. L. Grassini, G. Fasano**





Ente per le Nuove tecnologie,
l'Energia e l'Ambiente



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA SISTEMA ELETTRICO

Valutazione dei consumi nell'edilizia esistente e benchmark
mediante codici semplificati: analisi di edifici ospedalieri

*W. Grassi, D. Testi, E. Menchetti, D. Della Vista, M. Bandini, L. Niccoli, G. L.
Grassini, G. Fasano*

VALUTAZIONE DEI CONSUMI NELL'EDILIZIA ESISTENTE E BENCHMARK MEDIANTE CODICI
SEMPLIFICATI: ANALISI DI EDIFICI OSPEDALIERI

W. Grassi, D. Testi, E. Menchetti, D. Della Vista, M. Bandini, L. Niccoli, G. L. Grassini
(Dipartimento di Energetica Lorenzo Poggi dell'Università di Pisa)

Gaetano Fasano (ENEA)

Marzo 2009

Report Ricerca Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Area: Usi finali

Tema: Sviluppo di linee guide e indici di riferimento per il legislatore

Responsabile Tema: Gaetano Fasano, ENEA

INDICE

- Abbreviazioni* - pag. 5
- 1** *Introduzione* - p. 6
- 2** *Generalità sugli edifici ospedalieri* - p. 8
- 2.1 *Normative* - p. 8
- 2.2 *Zone funzionali* - p. 14
- 2.3 *Consumi* - p. 16
- 2.4 *Approccio bottom-up* - p. 19
- 3** *Descrizione del Nuovo Ospedale San Giovanni di Dio di Firenze* - p. 20
- 3.1 *Descrizione della struttura* - p. 21
- 3.2 *Descrizione degli impianti* - p. 26
- 3.3 *Descrizione dei modelli occupazionali* - p. 27
- 3.4 *Consumi elettrici e termici* - p. 28
- 4** *Descrizione dell'Ospedale degli Infermi di San Miniato* - p. 31
- 4.1 *Descrizione della struttura* - p. 31
- 4.2 *Descrizione degli impianti* - p. 36
- 4.3 *Descrizione dei modelli occupazionali* - p. 38
- 4.4 *Consumi elettrici e termici* - p. 38
- 5** *Programmi impiegati per le simulazioni degli ospedali* - p. 41
- 5.1 *Mc4Suite* - p. 41
- 5.2 *TRNSYS* - p. 41
- 5.3 *EnergyPlus e DesignBuilder* - p. 42

- 6** ***Calcolo della potenza da installare per riscaldamento e raffrescamento - p. 51***
- 6.1 *Calcolo con Mc4Suite della potenza da installare per il riscaldamento del Nuovo Ospedale San Giovanni di Dio - p. 51*
- 6.2 *Calcolo con TRNSYS della potenza da installare per il riscaldamento del Nuovo Ospedale San Giovanni di Dio - p. 51*
- 6.3 *Calcolo con EnergyPlus della potenza da installare per il riscaldamento dell'Ospedale degli Infermi - p. 52*
- 6.4 *Calcolo con EnergyPlus della potenza da installare per il raffrescamento dell'Ospedale degli Infermi - p. 53*
- 7** ***Analisi dinamica del Nuovo Ospedale San Giovanni di Dio - p. 55***
- 7.1 *Analisi dinamica nella stagione invernale con TRNSYS in condizioni di termostatazione ideale - p. 55*
- 7.2 *Analisi dinamica nella stagione invernale con TRNSYS in condizioni di termostatazione reale - p. 56*
- 7.3 *Analisi dinamica nella stagione estiva con TRNSYS in condizioni di termostatazione ideale - p. 57*
- 7.4 *Analisi dinamica nella stagione estiva con TRNSYS in condizioni di termostatazione reale - p. 58*
- 7.5 *Calcolo del fabbisogno di energia primaria per il riscaldamento e confronto con i consumi reali di combustibile - p. 60*
- 7.6 *Stima del fabbisogno di energia primaria per il raffrescamento e confronto con i consumi reali di energia elettrica - p. 61*
- 8** ***Analisi dinamica dell'Ospedale degli Infermi - p. 63***
- 8.1 *Analisi dinamica nella stagione invernale con EnergyPlus - p. 63*
- 8.2 *Analisi dinamica nella stagione estiva con EnergyPlus - p. 64*
- 8.3 *Calcolo del fabbisogno di energia primaria per il riscaldamento e confronto con i consumi reali di combustibile - p. 67*

- 8.4 *Stima del fabbisogno di energia primaria per il raffrescamento - p. 68*
- 9** ***Analisi parametrica per il Nuovo Ospedale San Giovanni di Dio con TRNSYS - p. 69***
 - 9.1 *Rivestimento delle pareti esterne con un cappotto isolante - p. 69*
 - 9.2 *Sostituzione degli infissi con inserimento di tripli vetri - p. 69*
 - 9.3 *Inserimento di una copertura isolante sui tetti - p. 69*
 - 9.4 *Incremento della massa frontale dell'edificio - p. 70*
 - 9.5 *Variazione della zona climatica - p. 70*
- 10** ***Analisi parametrica per l'Ospedale degli Infermi con EnergyPlus - p. 71***
 - 10.1 *Modifica della trasmittanza delle pareti esterne - p. 71*
 - 10.2 *Sostituzione degli infissi con inserimento di doppi e tripli vetri - p. 71*
 - 10.3 *Modifica della massa frontale dell'edificio - p. 71*
 - 10.4 *Variazione dell'orientazione dell'edificio - p. 72*
 - 10.5 *Variazione della zona climatica - p. 72*
- 11** ***Conclusioni e sviluppi previsti - p. 74***

Abbreviazioni

ACS: Acqua Calda Sanitaria

ASL: Azienda Sanitaria Locale

BTZ: olio combustibile a Basso Tenore di Zolfo

CAD: Computer Aided Design (progettazione assistita da elaboratore)

DEA: Dipartimento Emergenza e Accettazione

DOE: Department Of Energy (Dipartimento di Energia degli Stati Uniti)

DPR: Decreto del Presidente della Repubblica

EER: Energy Efficiency Ratio (coefficiente di prestazione per macchina frigorifera)

FIRE: Federazione Italiana per l'uso Razionale dell'Energia

GG: Gradi Giorno

ISPESL: Istituto Superiore Prevenzione E Sicurezza sul Lavoro

n.a.: non applicabile

NOSGD: Nuovo Ospedale San Giovanni di Dio

OdI: Ospedale degli Infermi

OSS: Operatori Socio-Sanitari

p.l.: posto letto

TEP: Tonnellate Equivalenti di Petrolio (1 TEP = 11628 kWh termici = 4545.45 kWh elettrici)

TMY: Typical Meteorological Year (anno tipico meteorologico)

UTA: Unità di Trattamento dell'Aria

1. Introduzione

Circa un terzo dell'utilizzo totale d'energia in Italia è riferibile al settore dell'edilizia. In questo contesto, gli edifici a destinazione d'uso ospedaliera assumono una veste strategica, non solo per il loro imprescindibile ruolo sociale, ma anche in quanto soggetti fortemente energivori. Negli ospedali si rilevano infatti consumi medi 3 volte superiori rispetto a quelli del settore civile residenziale in analoghe condizioni climatiche. Questi edifici presentano peraltro ampi margini di risparmio energetico, conseguibili sia attraverso un miglioramento dell'efficienza dei sistemi edificio-impianto, sia tramite una gestione più oculata dell'energia, che purtroppo di rado si registra in una struttura pubblica.

Dati disaggregati sui consumi dell'edilizia ospedaliera sono di difficile reperibilità. D'altro canto essi sarebbero particolarmente preziosi, nell'ottica di predisporre linee guida per il risparmio energetico in questo settore e individuare specifici indici di riferimento per la valutazione delle prestazioni energetiche, utilizzabili in leggi, regolamenti, normative, coerentemente con le direttive europee in tema d'usi finali dell'energia.

Una via alternativa, prevista pure nelle direttive europee sull'efficienza energetica, è il cosiddetto approccio "bottom-up", che consiste nell'identificazione di tipologie costruttive particolarmente significative e frequenti nel parco edilizio nazionale e, per ciascuna di queste classi, nell'analisi dettagliata di una singola struttura, da utilizzare come benchmark per una successiva estensione dei risultati ottenuti e delle conclusioni tratte.

Oggetto d'indagine sono stati due ospedali significativamente diversi, in termini di dimensioni, funzioni e anno di costruzione. In particolare si è analizzato il Nuovo Ospedale San Giovanni di Dio a Firenze e l'Ospedale degli Infermi a San Miniato, Pisa. Il primo è un grande ospedale, relativamente moderno, che serve un distretto sanitario, mentre il secondo è un edificio più vecchio, collocato in una cittadina, ad uso prevalentemente ambulatoriale e di riabilitazione. Queste due strutture si sono rese disponibili a fornire informazioni tecniche indispensabili per l'analisi dei consumi energetici e relative agli edifici, agli impianti e alla loro gestione. Inoltre ci sono stati consegnati gli storici dei consumi di energia elettrica, combustibili e acqua.

Tutti questi dati, in aggiunta ai parametri climatici esterni, rappresentano le condizioni d'ingresso per simulare gli andamenti dinamici di temperatura e umidità nei vari locali che costituiscono i fabbricati. Un calcolo accurato del comportamento dinamico è indispensabile non solo

per determinare correttamente il fabbisogno energetico di energia primaria, ma anche per valutare il contributo delle singole zone funzionali dell'ospedale e l'efficacia di determinati interventi operativi di riqualificazione energetica.

Per la simulazione del sistema edificio-impianto ci siamo avvalsi di due software evoluti e globalmente riconosciuti come EnergyPlus (DOE) e TRNSYS (Università del Wisconsin - Madison).

2. Generalità sugli edifici ospedalieri

Le Aziende Sanitarie Locali distribuite sul territorio nazionale sono in tutto 163. Al vasto patrimonio immobiliare ospedaliero da esse gestito, vanno aggiunte tutte le strutture di ricovero private, le quali forniscono un 25% aggiuntivo di posti letto, per un totale di circa 250000 posti letto, distribuiti in oltre 1500 strutture. L'edilizia ospedaliera è particolarmente variegata, con fabbricati di epoche differenti e destinazioni sanitarie diversificate. La richiesta di energia in questo settore è estremamente elevata e il fabbisogno deve essere assolutamente garantito da impianti termici ed elettrici generalmente attivi 24 ore su 24, 365 giorni l'anno. In particolare l'energia è utilizzata per il riscaldamento, la ventilazione e l'illuminazione degli ambienti, la preparazione di acqua calda sanitaria, il raffrescamento estivo, la produzione di vapore per sterilizzazione e umidificazione, oltre che per le cucine, le lavanderie, i trasporti interni, i calcolatori, i dispositivi diagnostici e terapeutici, etc. L'incremento della complessità delle apparecchiature impiegate e l'adeguamento alle normative in termini di temperature, umidità e ricambi d'aria imposti porta inoltre ad ulteriori aumenti dei consumi e ad una maggiore difficoltà nella gestione degli impianti.

2.1 Normative

Le norme e le leggi per la progettazione di una struttura sanitaria sono molteplici e riguardano svariati campi di applicazione, data la complessità e l'importanza sociale della struttura e la situazione delicata in cui si trovano i suoi utenti. Limitando l'attenzione alle condizioni di benessere ambientale legato al condizionamento dei locali, i parametri da tenere sotto controllo sono la temperatura, l'umidità relativa e la concentrazione di inquinanti (carica batterica, gas medicali, etc.). Questi parametri determinano la buona o cattiva qualità dell'aria e tale controllo avviene indirettamente tramite la definizione di tassi di ventilazione o di filtraggio, di specifiche condizioni di pressione e temperatura dei locali, di ammissibilità o meno di ricircolo dell'aria stessa. I riferimenti legislativi successivi sono quindi limitati a questi aspetti, particolarmente importanti per il benessere e per il raggiungimento stesso dell'obiettivo di una struttura sanitaria.

La normativa italiana vigente in materia di benessere termoigrometrico nelle strutture sanitarie si basa principalmente su due testi di riferimento: la Circolare del Ministero dei Lavori Pubblici del 22/11/1974, n. 13011, e il DPR del 14/1/1997. La prima consiste in un brevissimo scritto dal titolo "Requisiti fisico-tecnici per le costruzioni edilizie ospedaliere. Proprietà termiche, igrometriche, di ventilazione e di illuminazione", che per troppi anni è stato l'unico testo del corpus legislativo per

strutture sanitarie a disciplinare tale settore e in aggiunta in modo insufficiente. Il secondo invece, disciplinando i requisiti minimi per l'esercizio dell'attività sanitaria, ha colmato tale vuoto normativo e fornito indicazioni tecniche dettagliate necessarie per la progettazione degli impianti e dell'edificio. Vi sono inoltre specifiche normative tecniche che disciplinano i vari settori: le principali di nostro interesse sono la 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/TS 11300-2 "Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria". In particolare, la prima fornisce dati tecnici a seguito della Circolare 13011 in merito alla ventilazione e ai dispositivi per garantire una buona qualità dell'aria, la seconda invece fornisce dei valori plausibili di richiesta di acqua calda sanitaria da parte delle strutture ospedaliere e conseguenti metodi di calcolo del fabbisogno di energia primaria.

Nel paragrafo dei requisiti termoigrometrici e di ventilazione per gli ambienti, la Circolare 13011 prescrive che siano rispettati i seguenti punti:

- temperatura degli ambienti di $20^{\circ}\text{C} \pm 2 \text{ K}$ in tutti i reparti ospedalieri, compresi i servizi, garantita durante il periodo invernale mediante impianto di riscaldamento; si ricordi che anche nel DPR 412 del 1993 viene confermata come temperatura massima ammissibile in tale tipologia di edificio (e in tutte le altre ad eccezione delle strutture industriali) quella di $20^{\circ}\text{C} \pm 2 \text{ K}$, senza ulteriori differenziazioni;
- nelle camere di degenza, nei locali ad uso collettivo e nei disimpegni durante il periodo invernale deve essere garantito un valore di umidità relativa del $40\% \pm 5\%$;
- i valori di ricambio d'aria devono essere quelli riassunti in Tabella 1 e garantiti da un impianto di ventilazione forzata in cui l'aria venga opportunamente filtrata e successivamente immessa negli ambienti a velocità non superiori a 0.15 m/s;
- nei blocchi operatori, sale travaglio, rianimazione, parti prematuri, lattanti, terapia intensiva, centro dialisi, settore sterile e laboratori d'analisi deve esserci un impianto di condizionamento senza ricircolo che garantisca sia in estate sia in inverno il rispetto degli obblighi su esposti, o in ogni caso devono essere rispettati i valori della UNI 5104 (poi divenuta UNI 10339).

Tabella 1. Ricambi d'aria prescritti agli ambienti ospedalieri dalla Circolare 13011

| Zona | Ricambi d'aria |
|---------------------|--|
| Degenze | 2 volumi/ora |
| Degenze bambini | 3 volumi/ora |
| Reparti diagnostica | 6 volumi/ora |
| Reparti speciali | 6 volumi/ora |
| Isolamento | 12 volumi/ora |
| Servizi igienici | 10 volumi/ora |
| Soggiorno | 30 m ³ /ora per persona (valore minimo) |

Si riportano quindi in Tabella 2 anche i parametri di ventilazione minimi obbligatori secondo la UNI 10339 per ospedali, case di cura, cliniche e assimilabili, ricordando che anche qui viene ribadito che non è ammesso usare aria di ricircolo.

Tabella 2. Ventilazione minima prescritta dalla UNI 10339

| Zona | Portata d'aria esterna minima |
|----------------------------|-----------------------------------|
| Degenze | 11 litri/s per persona |
| Corsie | 11 litri/s per persona |
| Camere sterili | 11 litri/s per persona |
| Camere per infettivi | Specificata in base alle esigenze |
| Sale mediche/soggiorni | 8.5 litri/s per persona |
| Terapie fisiche | 11 litri/s per persona |
| Sale operatorie/sale parto | Specificata in base alle esigenze |
| Servizi igienici | Estrazione di 8 volumi/ora |

Come si nota, anche per le degenze e per le corsie è resa obbligatoria la ventilazione senza ricircolo, particolarmente onerosa a livello energetico e forse eccessivamente severa. Nella stessa normativa vengono anche specificate le classi di filtri e l'efficienza di filtrazione per le diverse categorie di edifici. Per le strutture ospedaliere, queste informazioni sono riassunte in Tabella 3.

Tabella 3. Classi di filtri ed efficienza di filtrazione prescritte dalla UNI 10339

| Zona | Classe di filtri (min-max) | Efficienza di filtrazione |
|-----------------------------------|----------------------------|---------------------------|
| Degenze | 6-8 | Alta |
| Corsie | 6-8 | Alta |
| Camere sterili e infettivi | 10-11 | Altissima |
| Maternità, anestesia e radiazioni | 10-11 | Altissima |
| Prematuri e sale operatorie | 11-12 | Altissima |
| Visite mediche | 6-8 | Alta |
| Soggiorni e terapie fisiche | 6-8 | Alta |

In Tabella 4 sono infine riportate le velocità dell'aria massima ammissibile nel volume occupato per mantenere le condizioni di benessere. Da notare che gli obblighi di ventilazione e di massima velocità dell'aria sono legati tra loro.

Tabella 4. Velocità massime dell'aria prescritte dalla UNI 10339

| Zona | Riscaldamento [m/s] | Raffrescamento [m/s] |
|--|----------------------------|-----------------------------|
| Degenze, corsie, camere sterili, infettivi, visite mediche e soggiorni | 0.05-0.1 | 0.05-0.15 |
| Maternità, anestesia, radiazioni, prematuri e sale operatorie | 0.05-0.1 | 0.05-0.15 |
| Terapie fisiche | 0.1-0.2 | 0.15-0.25 |

È in questo quadro normativo vigente e sufficiente fino ai tardi anni Novanta che s'inserisce il secondo testo di riferimento prima citato. Il DPR del 1997 definisce i requisiti minimi che devono essere rispettati ed applicati da parte di una struttura sanitaria, in termini di politica, obiettivi ed attività, di struttura organizzativa, di gestione delle risorse umane e tecnologiche, di valutazione e miglioramento della qualità, di sistema informativo. Inoltre i requisiti minimi strutturali, tecnologici e organizzativi specifici per le varie strutture, differenziate in quelle di assistenza ambulatoriale, ricovero ospedaliero a ciclo continuato o diurno per acuti e ricovero non ospedaliero, sono ulteriormente suddivisi in base alla destinazione d'uso delle varie zone della struttura stessa.

La sezione più interessante del DPR 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 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.

Di seguito sono riportati i principali requisiti termoigrometrici e di ventilazione, divisi per zone in cui sono specificati dal DPR:

- Reparto operatorio
 - temperatura interna invernale ed estiva compresa tra 20 e 24°C
 - umidità relativa invernale ed estiva compresa tra 40% e 60%
 - ricambi d'aria di 15 volumi/ora e obbligo d'aria esterna senza ricircolo (occorre specificare che le Linee Guida dell'ISPESL del 23/7/1999 ammettono che, fatti salvi

i 15 volumi/ora d'aria esterna, si possono incrementare questi stessi utilizzando anche aria di ricircolo limitata alla singola sala operatoria, ossia non si possono miscelare flussi d'aria provenienti da due distinte sale operatorie; questo per equipararsi agli altri stati europei, che prevedono la possibilità di ricircolo)

- filtraggio dell'aria del 99.97%
- Punto nascita-blocco parto
 - temperatura interna invernale ed estiva compresa tra 20 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 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 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 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

Ad integrazione delle normative italiane si possono citare anche le più importanti normative estere, in particolare la tedesca DIN 1946/87 e la statunitense ASHRAE 62-1989. Le condizioni di pressione prescritte da quest'ultima ai vari locali, al fine di evitare possibili contaminazioni e fughe di

flussi batterici, sono riportate in Tabella 5. Tale aspetto non è preso in considerazione dalle normative italiane e rappresenta quindi un'importante integrazione.

Tabella 5. Condizioni di pressione prescritte ai locali ospedalieri dalla normativa ASHRAE 62-1989

| Zona | Condizioni di pressione |
|--|-----------------------------------|
| Sale operatorie, traumatologia, parto, nursery e terapia intensiva | Sovrappressione |
| Camere di degenza normale | Controllo non necessario |
| Servizi igienici | Sottopressione |
| Reparti d'isolamento per infettivi | Sottopressione |
| Reparti d'isolamento per immunodepressi | Sovrappressione |
| Laboratori | Specificate in base alle esigenze |
| Visite mediche | Controllo non necessario |
| Locali medicazione | Sovrappressione |
| Sterilizzazione e lavanderia | Sottopressione |

Per quanto riguarda invece la richiesta d'acqua calda sanitaria, le uniche indicazioni sono quelle specificate nella normativa UNI/TS 11300-2 (vedi Tabella 6). Tali valori si riferiscono ad una temperatura dell'acqua calda di 40°C e ad una temperatura dell'acqua d'acquedotto di 15°C. Nel caso di struttura ospedaliera a ciclo continuato (non solo diurno) senza lavanderia non si hanno valori di riferimento e quindi sono stati utilizzati i valori di fabbisogno per strutture ricettive paragonabili a quelle sanitarie. Inoltre occorre tener presente che in molti ospedali il numero di posti letto non è un dato particolarmente significativo e quindi porterebbe ad una stima della spesa energetica per ACS discordante dal dato reale. Questo si capisce bene in quelle strutture dedicate in larga parte a riabilitazione e terapia fisica, in cui vi sono anche alcune palestre, ma in cui vi sono pochi posti letto. In tal caso si può utilizzare come indicatore il numero di docce installate, adottando il valore riportato in Tabella 6. In generale è comunque bene verificare le stime fornite, integrandole con dati reali, se disponibili.

Tabella 6. Fabbisogno d'acqua calda sanitaria secondo la norma UNI/TS 11300-2

| Categoria di edificio | Fabbisogno di ACS |
|---|--|
| Attività ospedaliera day hospital | 10 litri/giorno per posto letto |
| Attività ospedaliera con pernottamento e lavanderia | 90 litri/giorno per posto letto |
| Hotel a 1 stella senza lavanderia | 40 litri/giorno per posto letto |
| Hotel a 2 stelle senza lavanderia | 50 litri/giorno per posto letto |
| Hotel a 3 stelle senza lavanderia | 60 litri/giorno per posto letto |
| Hotel a 4 stelle senza lavanderia | 70 litri/giorno per posto letto |
| Attività sportive e palestre | 100 litri/giorno per doccia installata |

Un ulteriore aspetto da considerare è l'illuminazione dei locali a destinazione d'uso sanitaria. Anch'essa è disciplinata dalla Circolare 13011 e dal DPR del 14/1/1997. In particolare, la prima prescrive i seguenti valori minimi per i livelli d'illuminazione naturale e artificiale:

- 300 lux sul piano di osservazione medica (escluso il piano operatorio);
- 200 lux sul piano di lavoro negli spazi per lettura, nei laboratori e negli uffici;
- 100 lux su un piano ideale posto a 0.6 m dal pavimento negli spazi per riunioni e per ginnastica;
- 80 lux su un piano ideale posto a 1 m dal pavimento nei corridoi, nelle scale, nei servizi igienici, negli atri e negli spogliatoi.

Queste condizioni di illuminamento devono essere assicurate in qualsiasi situazione di cielo e in ogni punto dei piani di utilizzazione considerati, mediante uno stretto rapporto di integrazione dell'illuminazione naturale con quella artificiale. Particolare cura deve inoltre essere posta per evitare fenomeni di abbagliamento, sia diretto sia indiretto, facendo in modo che nel campo visuale delle persone non compaiano oggetti la cui luminanza sia 20 volte superiore ai valori medi.

Il DPR del 1997 si limita invece a indicare come requisito minimo impiantistico la presenza di illuminazione d'emergenza nel reparto operatorio, nel punto nascita, in rianimazione e terapia intensiva, al pronto soccorso, negli ambulatori, nelle degenze e negli spazi per sterilizzazione, disinfezione e servizio mortuario.

Eccezionale attenzione va dunque posta sulla sicurezza degli impianti elettrici e termici, in modo da garantire senza soluzione di continuità il soddisfacimento dei requisiti normati, tramite l'affidabilità dei componenti e la ridondanza per l'esercizio di emergenza. Come caso particolare, ricordiamo che alcuni farmaci, anche molto costosi, hanno l'obbligo di custodia a temperatura determinata. I frigoriferi per la loro conservazione non solo devono avere garantita la continuità elettrica, ma, come ulteriore misura di sicurezza, si deve prevedere una dotazione di registratori di temperatura e sistema di allarme.

2.2 Zone funzionali

Una corretta valutazione della spesa energetica del complesso ospedaliero non può prescindere dalla definizione delle diverse zone funzionali che lo costituiscono, con differenti consumi specifici (per metro quadrato di superficie in pianta) termici ed elettrici. La suddivisione in zone con

caratteristiche simili dal punto di vista impiantistico, strutturale, occupazionale, termoigrometrico e di ventilazione, e quindi con analoghe richieste energetiche, semplifica inoltre il modello della struttura e ne riduce i tempi di simulazione computazionale.

A differenti destinazioni d'uso sanitarie corrispondono, come abbiamo visto, specifiche richieste regolamentate, ma anche diversi modelli di occupazione e di utilizzo dell'energia. Bisogna inoltre tener conto della strategia aziendale in termini di comfort alberghiero per degenti e dipendenti, la quale condiziona, per esempio, la percentuale di aree che godono di raffrescamento estivo. Consumi elevati possono dunque essere imputabili, come è ovvio, non solo ad una bassa efficienza del sistema edificio-impianto, ma anche ad un suo maggiore sfruttamento.

Una classificazione piuttosto dettagliata delle zone funzionali può comprendere le seguenti aree con differenti specificità:

- ambulatori;
- day hospital;
- reparti con degenze;
- uffici/studi;
- blocco operatorio (incluse le sale parto);
- cure intensive (pronto soccorso, rianimazione, dialisi);
- diagnostica per immagini e centro tecnologie informatiche;
- nursery/ostetricia;
- palestra per riabilitazione;
- ambienti affollati (sale d'attesa, mensa, bar, biblioteca, auditorium, cappella, corridoi);
- cucina;
- servizi di lavanderia, sterilizzazione e disinfezione;
- settori sterili, laboratori d'analisi e centro trasfusionale;
- conservazione farmaci e dispositivi medici;
- servizio mortuario;
- locali non occupati/zone non trattate (magazzini, locali tecnici).

Tramite la simulazione termodinamica dell'edificio, si potrà valutare l'incidenza relativa delle varie tipologie di locali sul fabbisogno complessivo della struttura ospedaliera.

2.3 Consumi

Per affrontare un'analisi dettagliata della spesa energetica degli ospedali è fondamentale cercare di delineare un quadro nazionale dei consumi in questo settore. Purtroppo dati disaggregati sono di difficile reperibilità, principalmente perché i soggetti che li hanno raccolti, generalmente tramite affidamento di specifici incarichi contrattuali, non intendono divulgarli oppure sono tenuti a mantenere il segreto statistico. Un'ulteriore difficoltà nella raccolta d'informazioni dalle aziende sanitarie è dovuta allo scarso interesse che la dirigenza solitamente mostra nei confronti del problema del consumo energetico. Infatti, alla luce della bassa incidenza di questa spesa all'interno dell'economia complessiva di un'azienda sanitaria, essa può risultare poco propensa a interventi migliorativi. In particolare, nel bilancio complessivo del Sistema Sanitario Nazionale (99 miliardi di euro nel 2006) l'approvvigionamento di combustibile (escluso quello per il trasporto a motore) e il rifornimento di energia elettrica incidono per circa il 2%. Queste due spese infatti corrispondono, rispettivamente, al 5% e al 2.2% della quota di bilancio relativa a beni e servizi, la quale, a sua volta, è pari al 27% della spesa totale. A livello regionale questi valori si discostano di poco. Abbiamo dunque a che fare con una spesa per l'energia bassa in senso relativo, ma decisamente significativa in senso assoluto per il Paese, poiché corrispondente a quasi 2 miliardi di euro annui. Non va inoltre dimenticato che un miglioramento dell'efficienza energetica non deve per forza tradursi soltanto in un vantaggio economico rilevabile in bolletta, ma può essere anche impiegato per incrementare il benessere termoigrometrico e la salubrità degli ambienti, a maggior ragione visto il fine stesso degli edifici in esame e la particolare condizione in cui si trovano i suoi utenti.

Fortunatamente la nomina dell'Energy Manager (responsabile per l'uso razionale dell'energia) è obbligatoria per tutte le aziende ospedaliere pubbliche o private che superino 1000 TEP annue di consumo energetico. Ogni anno, nel modulo di nomina del dirigente da parte della struttura sanitaria, viene comunicato il consumo totale che giustifichi l'adempimento alla legge. Queste informazioni sono raccolte dalla FIRE per conto del Ministero dello Sviluppo Economico. In assenza di una vera e propria anagrafe dei consumi, essi rappresentano i dati disaggregati più numerosi e maggiormente distribuiti sul territorio nazionale. D'altro canto, in questi conteggi sono escluse tutte le aziende che, nonostante l'obbligo di legge, non hanno ancora provveduto alla nomina dell'Energy Manager, oltre alle

innumerevoli realtà ospedaliere medio-piccole, con consumi inferiori al limite della kTEP annua. Dei suddetti dati, la FIRE ci ha gentilmente fornito i valori aggregati per regione e per somma di consumi elettrici e termici, relativi all'anno 2007 (vedi Tabella 7 e Figura 1). In Tabella 7 sono stati inoltre sommati, per ogni regione, i posti letto degli ospedali provvisti di Energy Manager. Il numero di posti letto del singolo ospedale, quando non fornito direttamente dal Ministero della Salute, è stato richiesto direttamente alle strutture sanitarie. I posti letto totali considerati sono circa un terzo dei posti letto disponibili in Italia in strutture pubbliche o private, per acuti e no.

Tabella 7. Consumi totali annui (in kTEP) e numero di posti letto delle strutture sanitarie provviste di Energy Manager, divisi per regione (l'Umbria è esclusa, poiché non sono pervenute nomine)

| Regione | Consumi elettrici e termici [kTEP] | Numero di posti letto | Consumi specifici [TEP/p.l.] |
|-----------------------|---|------------------------------|-------------------------------------|
| Valle d'Aosta | 3.57 | 416 | 8.58 |
| Piemonte | 94.4 | 6648 | 14.2 |
| Liguria | 17.7 | 2559 | 6.92 |
| Lombardia | 486 | 19838 | 24.5 |
| Veneto | 70.1 | 10772 | 6.51 |
| Trentino Alto Adige | 18.3 | 840 | 21.8 |
| Friuli Venezia Giulia | 15.0 | 2261 | 6.63 |
| Emilia Romagna | 59.5 | 8746 | 6.80 |
| Toscana | 44.1 | 6903 | 6.39 |
| Marche | 41.1 | 948 | 43.4 |
| Lazio | 59.8 | 5906 | 10.1 |
| Abruzzo | 10.9 | 2283 | 4.77 |
| Molise | 10.0 | 1843 | 5.43 |
| Campania | 9.36 | 1259 | 7.43 |
| Basilicata | 82.2 | 1372 | 59.9 |
| Puglia | 49.7 | 5858 | 8.48 |
| Calabria | 5.56 | 642 | 8.66 |
| Sicilia | 39.4 | 7473 | 5.27 |
| Sardegna | 9.37 | 2465 | 3.80 |
| Totale | 1126 | 89032 | 12.6 |

Due valori in Tabella 7 appaiono anomali: il consumo troppo elevato della regione Basilicata e il numero troppo basso di posti letto rilevati per la regione Marche. In ogni caso, anche escludendo queste 2 regioni dall'analisi, il consumo specifico, inteso come TEP per posto letto, oscilla notevolmente, da 3.8 TEP/p.l. della Sardegna a 24.5 TEP/p.l. della Lombardia. Questo fattore d'altra parte non può tener conto delle condizioni climatiche, che in parte giustificerebbero i bassi valori di consumo delle regioni insulari e quelli alti di regioni montane come il Trentino. Soprattutto l'indicatore

di consumo per posto letto perde di significato se si considera il diverso livello di organizzazione delle strutture sanitarie, sulla strada del crescente utilizzo ambulatoriale e della diminuzione delle degenze, specialmente per le malattie croniche.

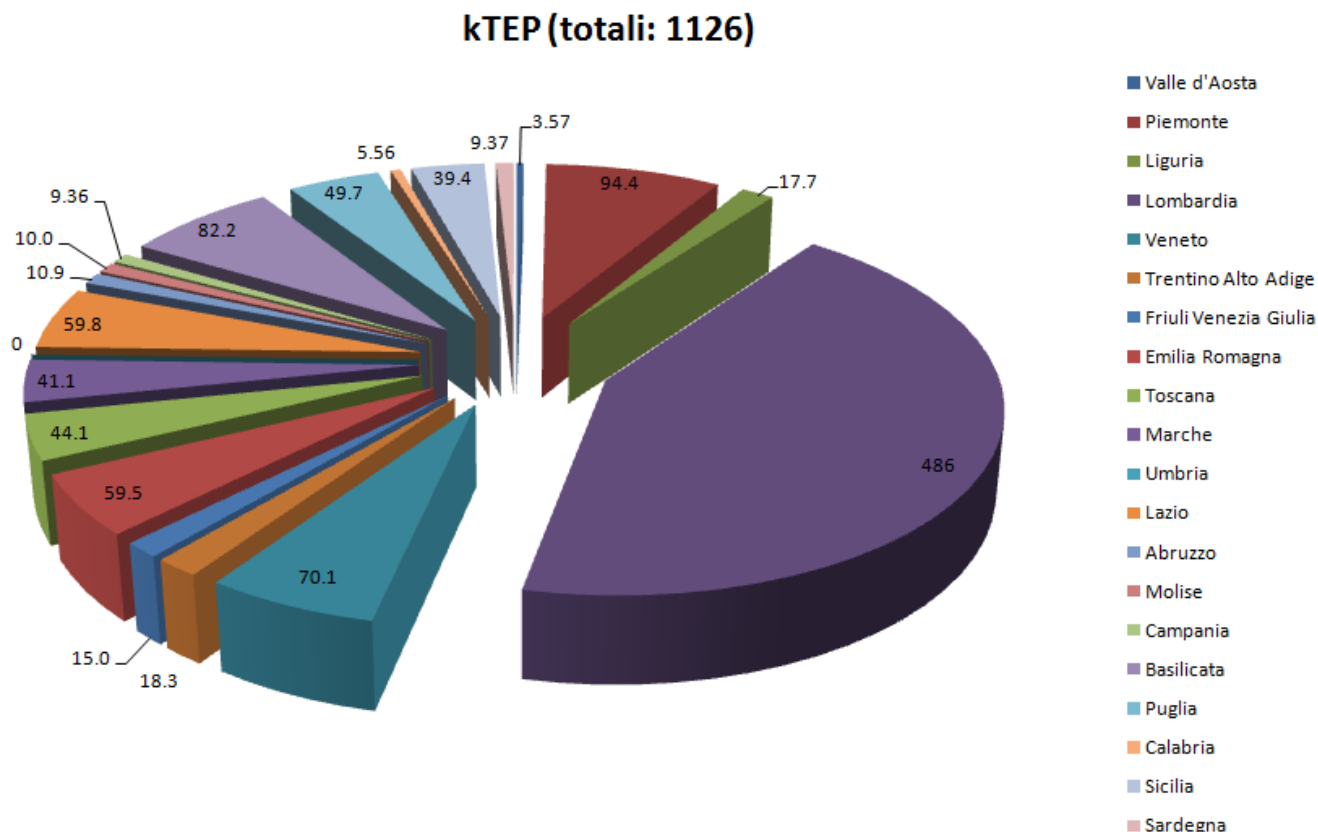


Figura 1. Consumi annui (in kTEP) degli ospedali provvisti di Energy Manager, divisi per regione

In un diverso studio relativo alla sola regione Emilia Romagna e riferito a 22 aziende ospedaliere, si passa dalle 5.6 alle 34.6 TEP/p.l., a conferma della scarsa attendibilità di questo parametro. In conclusione si può affermare che, sebbene di facile reperibilità, il posto letto non risulta idoneo come indicatore di consumi specifici per la valutazione dell'efficienza energetica di un edificio ospedaliero. D'altra parte, anche indicatori apparentemente più adatti come il volume riscaldato e la superficie in pianta presentano limiti notevoli, non affrontando il problema di un'attenta caratterizzazione della destinazione d'uso dei singoli locali costituenti il complesso edilizio e del loro specifico contributo al consumo complessivo di energia.

2.4 Approccio bottom-up

In assenza quindi di dati capillari non solo sui consumi, ma anche sulle soluzioni strutturali e impiantistiche utilizzate e sugli effettivi modelli occupazionali, si è deciso di analizzare in dettaglio due ospedali significativamente diversi, in termini di dimensioni, funzioni e anno di costruzione. Due tipologie costruttive particolarmente significative per l'edilizia ospedaliera nazionale sono infatti quella di una struttura grande, moderna e polivalente, al servizio di un distretto sanitario, e quella di un ospedale piccolo, di vecchia fabbricazione, ad uso prevalentemente ambulatoriale, collocato in un centro urbano di dimensioni ridotte. Per entrambe le classi di edifici si è selezionato un ospedale da utilizzare come banco di prova e, nello specifico, sono stati scelti, rispettivamente, il Nuovo Ospedale San Giovanni di Dio a Firenze e l'Ospedale degli Infermi a San Miniato, Pisa.

L'analisi non perde di generalità per effetto del contesto climatico, poiché le zone di Firenze e Pisa non presentano prerogative particolari, trovandosi anzi in una condizione media e comune per l'Italia dal punto di vista meteorologico. I comuni di Firenze e San Miniato appartengono alla zona climatica D, secondo la classificazione introdotta dal DPR 412 del 1993, Tabella A, e revisionata a seguito del DPR 551 del 1999. All'interno della fascia climatica D si trovano i comuni con Gradi Giorno compresi tra 1401 e 2100 (i valori di riferimento di Firenze e San Miniato sono, rispettivamente, 1821 GG e 1513 GG).

Le due strutture suddette si sono rese disponibili a collaborare, fornendo una serie d'informazioni tecniche fondamentali per l'analisi dei consumi energetici e relative a: geometria del complesso ospedaliero, materiali impiegati nell'edificio per pareti e infissi, impianti installati e loro condizioni di funzionamento, modelli dei singoli locali in termini di orari di occupazione (per il calcolo degli apporti interni) e di temperature, umidità e ricambi d'aria imposti. Ci sono inoltre stati consegnati gli storici dei consumi dell'ultimo quinquennio di energia elettrica, combustibili e acqua, rilevati con cadenza mensile.

Queste informazioni, necessarie per la successiva simulazione numerica di tipo dinamico degli edifici, ci sono state comunicate, per ciascun ospedale, dal relativo responsabile dell'uso dell'energia, dalla direzione sanitaria o dall'ufficio tecnico competente; altrimenti sono state rilevate direttamente sul campo, durante i vari sopralluoghi che abbiamo effettuato.

3. Descrizione del Nuovo Ospedale San Giovanni di Dio di Firenze

Il Nuovo Ospedale San Giovanni di Dio, detto anche Torregalli, è stato inaugurato nel 1982. Esso fa parte integrante della rete ospedaliera dell'Azienda Sanitaria di Firenze (ASL 10); il suo principale bacino d'utenza è rappresentato dai quartieri della zona sud-ovest di Firenze e dai comuni limitrofi, in particolare Scandicci (vedi Figura 2).



Figura 2. Collocazione geografica del NOSGD

L'ospedale possiede 367 posti letto tra ordinari e day hospital, tutte le discipline mediche di base oltre a molte specialistiche e ad attività d'alta specializzazione per le quali è struttura di

riferimento regionale; possiede inoltre tecnologie sanitarie e servizi diagnostico-terapeutici moderni. La mole d'attività e di prestazioni è considerevole, in riferimento alle sue dimensioni strutturali e organizzative. In un anno vengono eseguiti circa 20000 ricoveri con oltre 100000 giornate di degenza, 47000 prestazioni di pronto soccorso, 5300 interventi chirurgici. Intorno a 200000 persone all'anno accedono ai servizi ambulatoriali. In tutto l'ospedale lavorano pressappoco 200 medici e 600 infermieri, oltre al personale tecnico e amministrativo.

L'edificio può essere suddiviso in tre macrogruppi funzionali: quello dedicato alle degenze, quello dedicato ai servizi ambulatoriali-diagnostici e quello per i servizi generali, come riportato in Tabella 8.

Tabella 8. Suddivisione funzionale dei locali dell'ospedale

| Reparti | Ambulatori | Servizi |
|--------------------------|---------------------------|---------------------|
| Rianimazione | Assistente sociale | Bar |
| Cardiologia | Anatomia patologica | Farmacia |
| Chirurgia generale 1 | Centro sangue | Chiesa |
| Chirurgia generale 2 | Dietetica | Accettazione |
| Chirurgia vascolare | Laboratorio analisi | Uffici tecnici |
| Degenza breve | Odontostomatologia | Mensa |
| DEA | Radiologia | Direzione sanitaria |
| Diabetologia | Riabilitazione funzionale | Aula convegni |
| Immunoematologia | Pronto soccorso | |
| Allergologica | | |
| Medicina generale 1 | | |
| Medicina generale 2 | | |
| Nefrologia ed Emodialisi | | |
| Oculistica | | |
| Ortopedia | | |
| Ostetricia e Ginecologia | | |
| Pediatria | | |
| Psichiatria | | |
| Urologia | | |
| Blocco operatorio | | |
| Sale parto | | |

3.1 Descrizione della struttura

L'edificio si trova in posizione rialzata rispetto al territorio circostante, inoltre non vi è la presenza né di specchi d'acqua, né di edifici o vegetazione d'altezza elevata nelle vicinanze (vedi Figura 3).

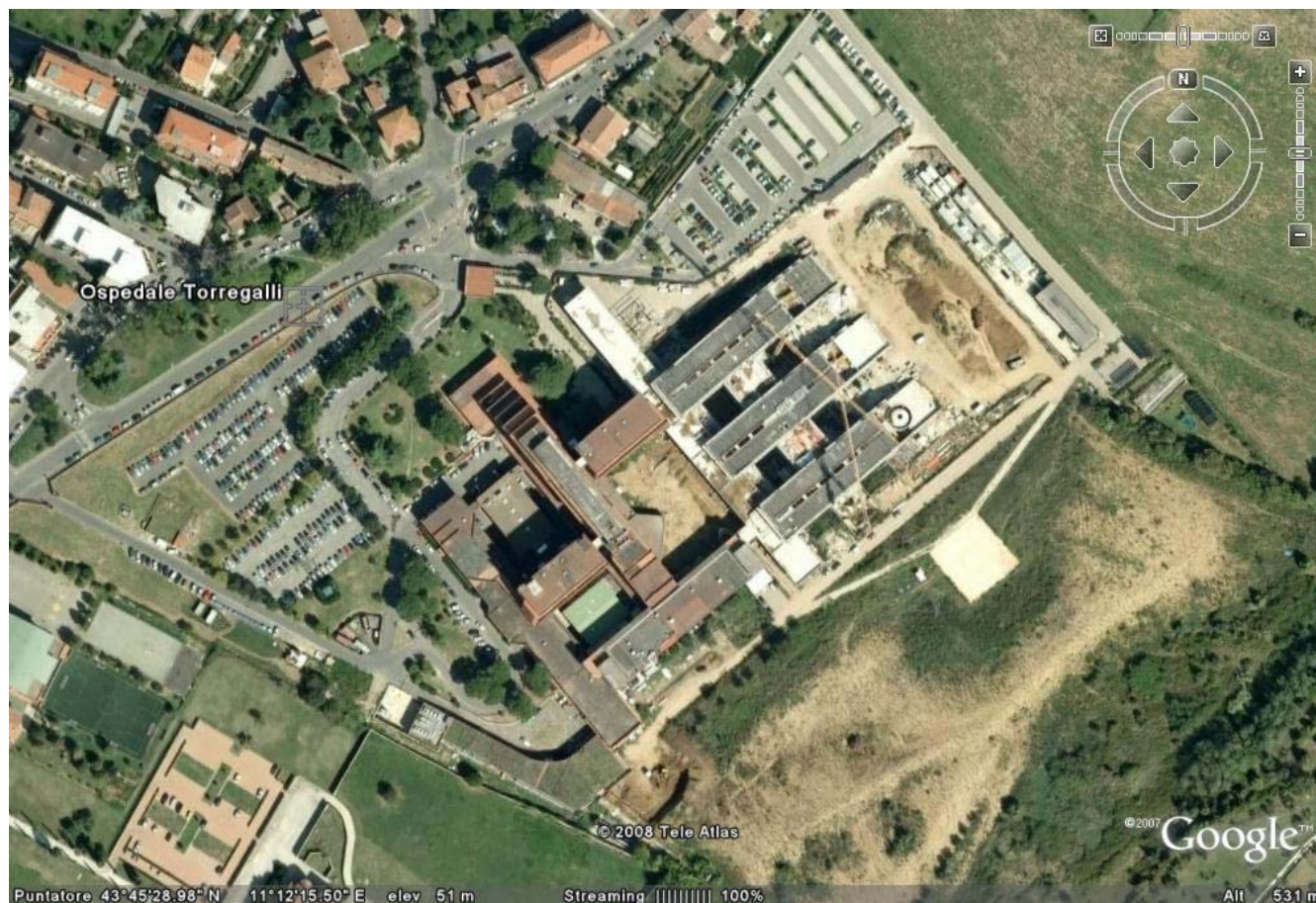


Figura 3. Foto satellitare dell'ospedale

Il complesso ospedaliero è composto da un unico fabbricato che si sviluppa su sei piani rialzati, oltre al seminterrato, al piano terra e ad un locale tecnico su tetto (vedi Figure 4, 5 e 6), per un totale di oltre 30000 m^2 in pianta e un volume di circa 100000 m^3 . Il rapporto di forma dell'edificio, S/V (con V volume delle parti di edificio riscaldate ed S superficie che delimita questo volume verso l'esterno), vale 0.36 m^{-1} . La superficie finestrata complessiva è di circa 2600 m^2 , con un rapporto tra essa e la superficie laterale esterna di 0.15 .

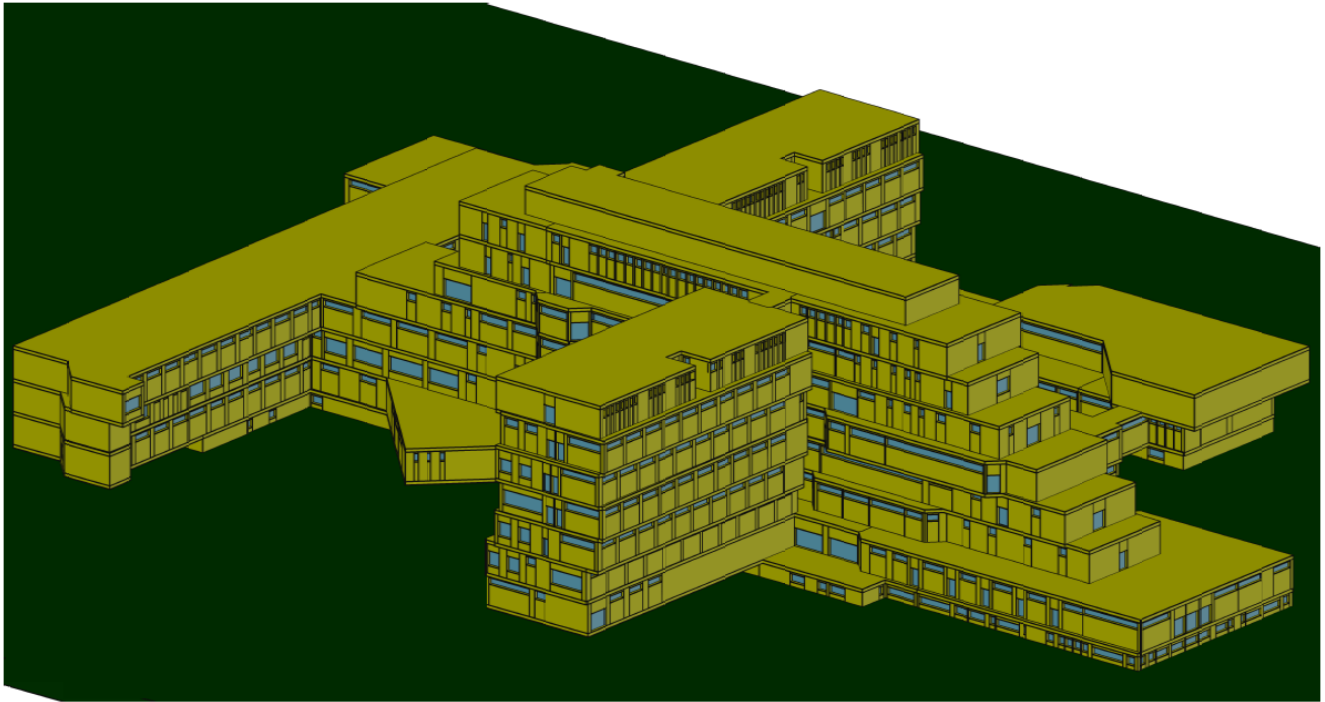


Figura 4. Ricostruzione grafica tridimensionale dell'edificio (vista da nord)

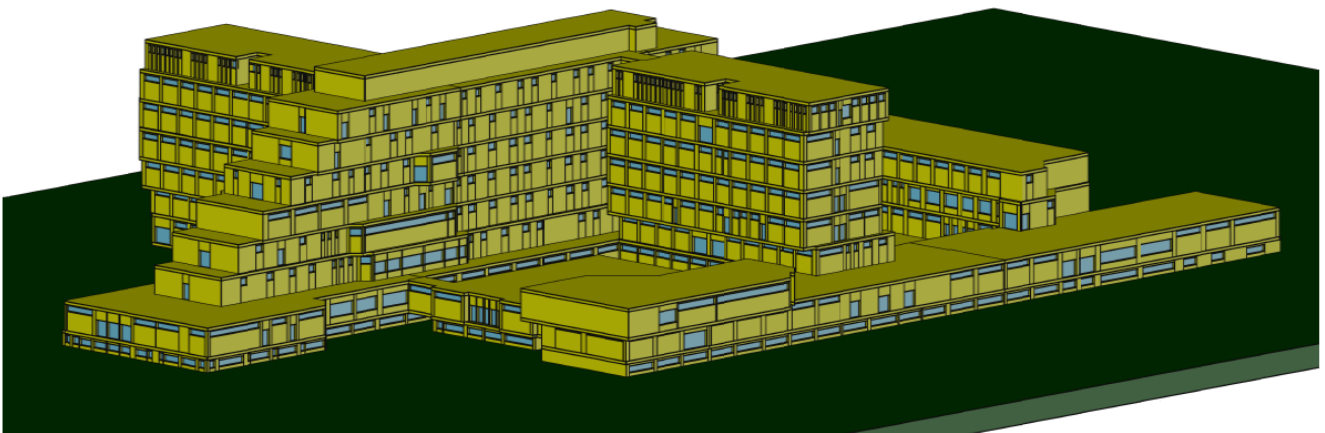


Figura 5. Ricostruzione grafica tridimensionale dell'edificio (vista da ovest)



Figura 6. Fotografia aerea del NOSGD (scattata da sud)

I locali hanno un'altezza interna di 3.5 m, ad eccezione della copertura, alta 3 m. Il piano seminterrato fuoriesce dal terreno di circa 1.5 m. I tetti sono tutti piani. In Tabella 9 è riportata la suddivisione di tutti i locali del fabbricato, insieme alle rispettive superfici in pianta.

Tabella 9. Suddivisione dettagliata degli ambienti dell'ospedale

| | | Superficie in pianta [m ²] |
|----------------------|------------------------|--|
| Seminterrato | Locali tecnici A | 116 |
| | Locali tecnici B | 183 |
| | Locali tecnici C | 136 |
| | Farmacia 1 | 756 |
| | Mensa | 764 |
| | Farmacia 2 (deposito) | 533 |
| | Spogliatoio uomini | 30 |
| | Spogliatoio donne | 152 |
| | Deposito/ufficio | 1201 |
| | Anatomia patologica | 1339 |
| | Diagnostica radiologia | 2006 |
| | Piano terra | Bar |
| Chiesa | | 215 |
| Accettazione | | 1160 |
| Endoscopia digestiva | | 292 |
| Centro sangue | | 385 |

| | | |
|------------------------|---------------------------------|--------------|
| | Emodialisi | 601 |
| | Uffici | 531 |
| | Rianimazione | 788 |
| | Pronto soccorso | 1271 |
| | Ambulatori | 789 |
| | Ambulatorio prelievi | 1009 |
| Piano primo | Stanze medici | 128 |
| | Cardiologia | 660 |
| | Traumatologia | 546 |
| | Ortopedia | 593 |
| | Day hospital | 488 |
| | Aula convegni | 521 |
| | Laboratorio analisi | 578 |
| | Oncologia | 501 |
| Piano secondo | Stanze medici | 423 |
| | Blocco operatorio | 1640 |
| | Chirurgia programmata B | 487 |
| | Laboratorio analisi | 483 |
| | Ostetricia B | 492 |
| Piano terzo | Stanze medici | 435 |
| | Nursery | 309 |
| | Neonatologia/Pediatria | 486 |
| | Sale parto | 444 |
| | Ostetricia A | 493 |
| Piano quarto | Medicina C | 495 |
| | Direzione sanitaria | 362 |
| | Stanze medici | 435 |
| | Day hospital Ginecologia | 176 |
| | Medicina D | 492 |
| Piano quinto | Stanze medici | 424 |
| | Medicina A | 491 |
| | Medicina B | 500 |
| | Ambulatori | 147 |
| | Psichiatria | 283 |
| Piano sesto | Stanze medici | 441 |
| | Uffici medicina cardiovascolare | 146 |
| | Chirurgia programmata A | 476 |
| | Allergologia | 267 |
| | Medicina d'elezione | 490 |
| Locale su tetto | Locale tecnico | 454 |
| Totale | | 30218 |

Per quanto riguarda le stratigrafie della struttura, si può fare riferimento alla Tabella 10.

Tabella 10. Ipotesi di stratigrafia delle pareti

| | | Spessore [cm] |
|------------------------------|-----------------------------------|---------------|
| Pareti esterne | Malta di gesso (intonaco esterno) | 1.5 |
| | Mattoni forati | 37 |
| | Malta di gesso (intonaco interno) | 1.5 |
| Pareti interne | Malta di gesso (intonaco) | 2 |
| | Mattoni forati | 15 |
| | Malta di gesso (intonaco) | 2 |
| Solaio controterra | Sottofondo in calcestruzzo | 30 |
| | Intercapedine d'aria | 10 |
| | Pavimento in PVC | 1 |
| Solai interni | Calcestruzzo | 37 |
| | Pavimento in PVC | 1 |
| | Malta di gesso (intonaco) | 2 |
| Tetti | Calcestruzzo | 37 |
| | Isolante (resina ureica espansa) | 3 |
| | Malta di gesso (intonaco) | 2 |
| Infissi (doppi vetri) | Vetro | 0.6 |
| | Intercapedine d'aria | 0.8 |
| | Vetro | 0.6 |

3.2 Descrizione degli impianti

L'energia termica occorrente per il funzionamento delle varie sezioni di impianto dell'ospedale viene prodotta in una centrale termica situata in un locale tecnico esterno al fabbricato, dove sono presenti 4 caldaie a metano da 1.75 MW. Il calore generato da 2 caldaie viene trasferito al fluido termovettore (acqua) e inviato a 3 sottocentrali, situate nei locali tecnici del seminterrato. In ognuna delle sottocentrali sono presenti 3 scambiatori a piastre, che trasferiscono calore al fluido termovettore secondario (ancora acqua), rispettivamente per i circuiti ACS/post-riscaldatore delle UTA, preriscaldatore delle UTA/radiatori/pannelli radianti e induttori/fan coil. Per l'accumulo di ACS sono presenti 6 serbatoi da 1000 litri ciascuno.

Il calore generato dalla terza caldaia viene utilizzato per la preparazione di acqua calda surriscaldata, impiegata per la produzione di vapore in un circuito secondario mediante scambiatore-produttore di vapore pulito. Tale vapore è usato per la mensa e per l'umidificazione dell'aria nelle UTA. La sterilizzazione si effettua invece tramite vapore prodotto da specifiche macchine elettriche.

La quarta caldaia, anch'essa destinata alla produzione di acqua calda surriscaldata, è impiegata nella gestione dei carichi massimi o dei sovraccarichi e durante i periodi di manutenzione di una delle altre tre.

L'impianto di climatizzazione estiva è invece composto da un gruppo frigorifero a compressione, raffreddato ad aria, il quale sottrae calore all'acqua da inviare alla batteria di raffreddamento delle UTA. Il gruppo possiede 2 compressori alimentati elettricamente, per una potenza complessiva di 373 kW. Con un EER ipotizzato di 2.75, la potenza frigorifera installata è dunque di 1.39 MW.

3.3 Descrizione dei modelli occupazionali

I locali elencati in Tabella 9 sono stati raggruppati secondo la classificazione fornita al Paragrafo 2.2. Il set point per le temperature di zona è fissato a 22°C nella stagione invernale, che va dal primo novembre al 15 aprile (come indicato dalla norma UNI/TS 11300-1, prospetto 3, per la zona climatica D), e a 26°C nella stagione estiva, corrispondente alla restante frazione di anno. L'umidità relativa prevista è del 50% e i ricambi d'aria imposti sono pari a 2 volumi/ora. Questi ultimi vengono effettuati tramite il circuito primario, con aria trattata per l'introduzione in ogni locale a 20°C e al 50% di umidità, indipendentemente dalla stagione. Fanno eccezione alle condizioni appena esposte gli ambienti indicati in Tabella 11, oltre, ovviamente, alle zone non trattate (i locali tecnici), che si trovano in evoluzione libera.

Tabella 11. Dati di zona per alcuni ambienti con caratteristiche particolari (in grassetto i valori diversi dalle condizioni nominali)

| | Temperatura invernale [°C] | Temperatura estiva [°C] | Umidità relativa [%] | Ricambi d'aria [volumi/ora] |
|---------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|
| Blocco operatorio | 20 | 24 | 50 | 3 |
| Diagnostica per immagini | 24 | 26 | 50 | 2 |
| Farmacia | 20 | 26 | 50 | 2 |
| Uffici/studi | 20 | 26 | 50 | 0.5 |
| Mensa | 20 | 26 | 50 | 2 |
| Nursery/ostetricia | 24 | 26 | 45 | 2 |
| Rianimazione | 22 | 26 | 50 | 3 |

Per quanto riguarda le schede d'occupazione, per ogni zona si è fatta un'ipotesi di affollamento alle varie ore del giorno tra pazienti, accompagnatori, visitatori, dottori, infermieri, OSS, tecnici e amministrativi, basandosi sulle indicazioni forniteci dal personale ospedaliero. Analogamente, sono state compiute delle stime per la potenza termica generata dalle apparecchiature mediche e dai computer presenti. Infine si è tenuto conto del calore prodotto dagli apparecchi d'illuminazione, con carico massimo dalle 6:00 alle 23:00 e carico ridotto al 70% nelle restanti ore notturne. A differenza

degli altri apporti interni considerati, quelli dovuti alle persone non sono soltanto di tipo sensibile, ma forniscono anche un contributo di tipo latente, con la produzione di vapore per respirazione e sudorazione.

3.4 Consumi elettrici e termici

L'Energy Manager dell'ASL 10 di Firenze, Ing. Ivo Bigazzi, ci ha gentilmente fornito i dati storici dei consumi di energia elettrica, metano e ACS per il NOSGD.

In Tabella 12 sono riportati i volumi di metano fatturati dal fornitore nel periodo che va dal 2005 al 2008 in metri cubi standard (a 15°C e 1 atm) e la corrispondente spesa energetica in TEP. Per l'ultimo anno è disponibile anche il dettaglio mensile.

Tabella 12. Volumi di metano fatturati nel periodo 2005-2008

| | Metano fatturato [10³ Sm³] | Energia spesa in TEP |
|--------------------|---|-----------------------------|
| Totale 2005 | 1271 | 1093 |
| Totale 2006 | 1369 | 1178 |
| Totale 2007 | 1080 | 929 |
| Totale 2008 | 1058 | 910 |
| Gennaio 2008 | 140.2 | 121 |
| Febbraio | 115.7 | 99.5 |
| Marzo | 99.72 | 85.8 |
| Aprile | 83.87 | 72.1 |
| Maggio | 71.94 | 61.9 |
| Giugno | 56.98 | 49.0 |
| Luglio | 91.48 | 78.7 |
| Agosto | 32.64 | 28.1 |
| Settembre | 60.66 | 52.2 |
| Ottobre | 81.66 | 70.2 |
| Novembre | 124.2 | 107 |
| Dicembre 2008 | 99.28 | 85.4 |

I consumi effettivi di energia elettrica in MWh riferiti al periodo che va da aprile 2006 a dicembre 2008 sono invece riportati in Tabella 13, con la corrispondente spesa energetica in TEP.

Tabella 13. Energia elettrica utilizzata nel periodo aprile 2005-dicembre 2008

| | Consumo di energia elettrica [MWh] | Energia spesa in TEP |
|--------------------|------------------------------------|----------------------|
| Aprile 2006 | 519.0 | 114 |
| Maggio | 635.6 | 140 |
| Giugno | 670.6 | 148 |
| Luglio | 809.6 | 178 |
| Agosto | 722.2 | 159 |
| Settembre | 633.9 | 139 |
| Ottobre | 646.9 | 142 |
| Novembre | 624.5 | 137 |
| Dicembre 2006 | 498.1 | 110 |
| Totale 2007 | 7233 | 1591 |
| Gennaio 2007 | 508.4 | 112 |
| Febbraio | 458.8 | 101 |
| Marzo | 520.6 | 115 |
| Aprile | 571.3 | 126 |
| Maggio | 666.9 | 147 |
| Giugno | 727.8 | 160 |
| Luglio | 759.3 | 167 |
| Agosto | 727.7 | 160 |
| Settembre | 658.1 | 145 |
| Ottobre | 622.4 | 137 |
| Novembre | 506.7 | 111 |
| Dicembre 2007 | 505.0 | 111 |
| Totale 2008 | 7329 | 1612 |
| Gennaio 2008 | 510.1 | 112 |
| Febbraio | 475.5 | 105 |
| Marzo | 507.5 | 112 |
| Aprile | 578.5 | 127 |
| Maggio | 661.4 | 146 |
| Giugno | 712.6 | 157 |
| Luglio | 774.0 | 170 |
| Agosto | 761.8 | 168 |
| Settembre | 668.1 | 147 |
| Ottobre | 638.8 | 141 |
| Novembre | 490.9 | 108 |
| Dicembre 2008 | 550.3 | 121 |

Sommando le componenti termiche ed elettriche, i consumi specifici del NOSGD sono pari a 6.87 TEP/p.l. sia nel 2007 sia nel 2008, appena sopra la media di 6.39 TEP/p.l. della regione Toscana (vedi Tabella 7).

Per quanto concerne infine l'ACS, è stata misurata un'erogazione media di 12 m³ il giorno ad una temperatura di 45°C, senza distinzione tra la stagione invernale e quella estiva. Considerando che l'acqua viene scaldata da una temperatura d'acquedotto di circa 15°C in media, l'energia spesa in un anno per l'ACS è di 550 GJ, corrispondenti a 13.1 TEP.

4. Descrizione dell'Ospedale degli Infermi di San Miniato

L'Ospedale degli Infermi, sebbene il comune di San Miniato faccia parte della provincia di Pisa, è compreso per motivi di contiguità geografica nella rete ospedaliera dell'Azienda Sanitaria di Empoli (ASL 11), che si trova in provincia di Firenze. Il suo principale bacino d'utenza è rappresentato dal comune di San Miniato e dai paesi confinanti (vedi Figura 7).



Figura 7. Collocazione geografica dell'Odi

Il nosocomio è specializzato nella dialisi e nella riabilitazione, oltre a fornire qualche servizio ambulatoriale e di day hospital. Complessivamente ha una disponibilità di 64 posti letto.

4.1 Descrizione della struttura

La struttura sanitaria è situata a San Miniato Alta, ad una quota di circa 140 m sul livello del mare. Il complesso ospedaliero è suddiviso in due edifici, un ex-sanatorio risalente agli anni Trenta e un ex-convento del Settecento, più volte ampliato e ristrutturato. I due edifici sono chiamati, rispettivamente, Padiglione Montegrappa e Padiglione Superiore. Tra essi è presente un ampio piazzale

adibito a parcheggio. Entrambi sono posti su un declivio montuoso e hanno i lati nord-est e nord-ovest rivolti verso valle (vedi Figura 8).

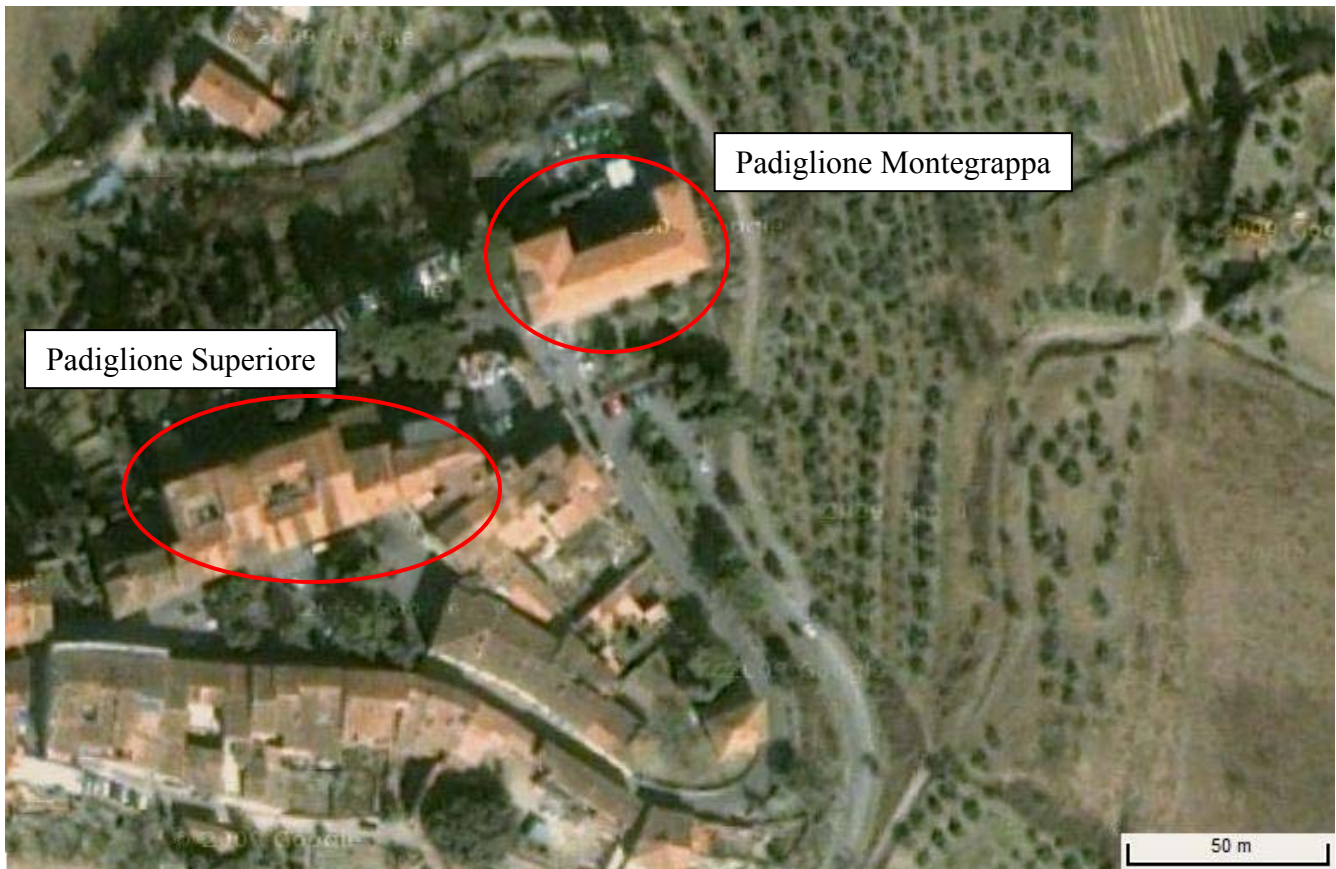


Figura 8. Foto satellitare dell'ospedale (il nord è in alto)

Tra i due padiglioni principali sono presenti alcuni locali tecnici e una centralina elettrica. Ci sono inoltre tre edifici adibiti rispettivamente a camera mortuaria, archivi e spogliatoi. Gli spogliatoi sono collocati in un'ex-falegnameria adiacente al Padiglione Superiore, mentre gli altri due edifici sono isolati e non proiettano ombra sui padiglioni principali; la camera mortuaria, in particolare, è parzialmente interrata ed è posta sopra ad un magazzino che raccoglie i rifiuti destinati all'inceneritore.

Il Padiglione Montegrappa è situato al di fuori del centro abitato, ad una quota di 7 m inferiore rispetto all'altro edificio; nonostante ciò, la distanza da quest'ultimo è tale da far sì che non vi siano ombre proiettate. Il fabbricato si sviluppa su tre piani: un seminterrato alto 4.3 m, dove si trovano i magazzini, la cappella e la diagnostica, il primo piano di 5.17 m, che da qualche anno non è più utilizzato, e un piano rialzato di 5.35 m, che ospita parte delle degenze e delle strutture riabilitative. Il

piano seminterrato fuoriesce dal terreno di circa 0.6 m. La facciata principale dell'edificio è orientata a sud-est e presenta un loggiato di due piani.

Il Padiglione Superiore è invece inserito nel tessuto urbano, si affaccia su una piazza e confina da un lato con una chiesa e dall'altro con appartamenti; il lato posteriore è rivolto verso il piazzale interno che lo separa dall'altro fabbricato. L'edificio è costituito da un seminterrato tecnico alto 3.5 m, che ospita le centrali termiche e idriche, un piano terra di 4.46 m, dove si trovano parte degli ambulatori e delle strutture riabilitative e i reparti di radiologia e cardiologia, il primo piano di 4.09 m, che ospita la maggior parte delle degenze, e il secondo piano di 3.5 m, dove si trovano la sala operatoria, le restanti degenze e gli studi medici.

In totale il complesso ospedaliero occupa circa 7550 m² in pianta e un volume di 31850 m³ (1900 m² e 9300 m³ per il Padiglione Montegrappa, 5650 m² e 22550 m³ per il Padiglione Superiore). Come si vede nelle Figure 9 e 10, ad esclusione di qualche copertura piana, nei due edifici i tetti sono inclinati di circa 30°. Nel punto più alto il tetto arriva a 1.5 m; il sottotetto non è calpestabile, né riscaldato.

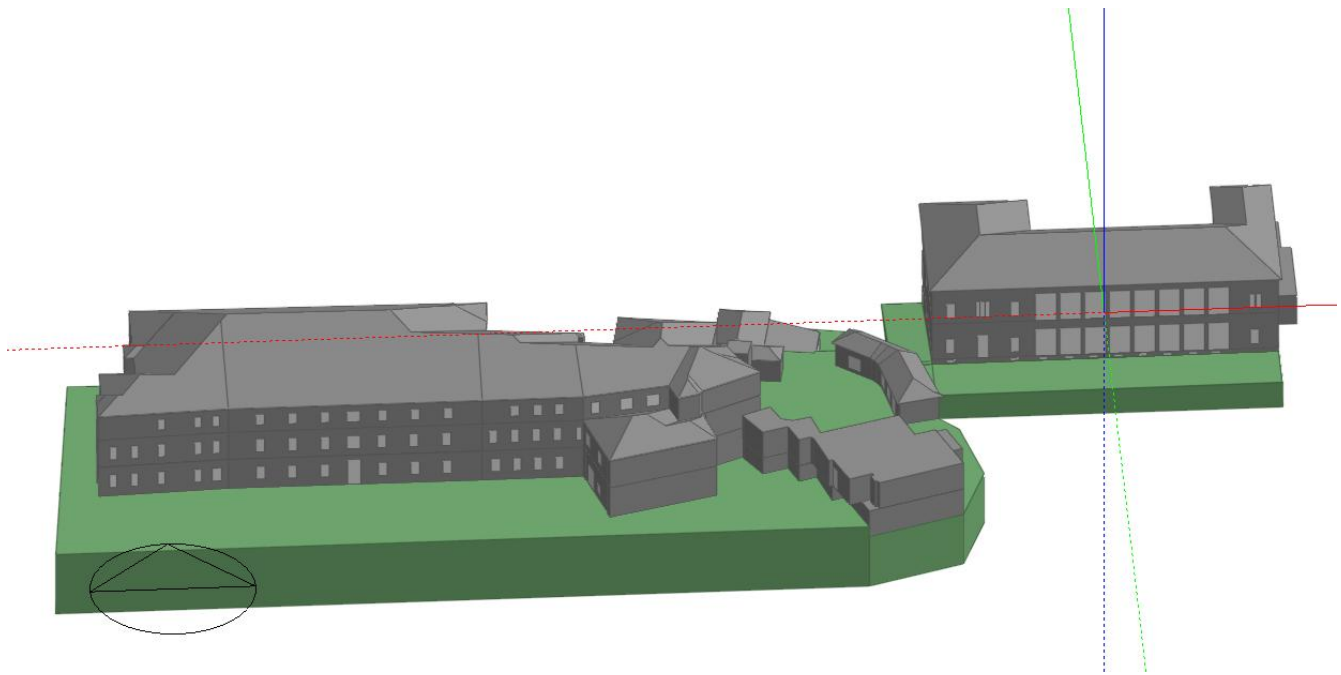


Figura 9. Ricostruzione grafica tridimensionale dell'edificio (vista da sud)

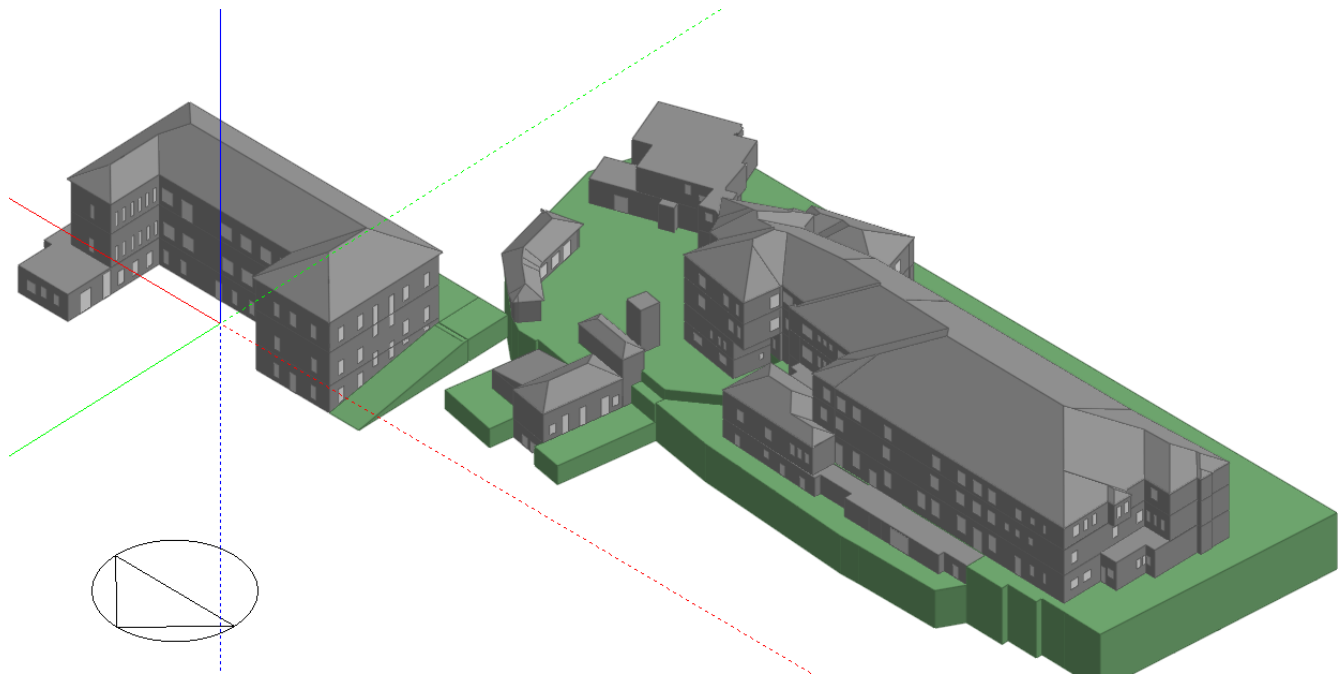


Figura 10. Ricostruzione grafica tridimensionale dell'edificio (vista da nord-ovest)

In Tabella 14 è riportata la suddivisione di tutti i locali dei due fabbricati, insieme alle rispettive superfici in pianta.

Tabella 14. Suddivisione dettagliata degli ambienti dei due edifici ospedalieri

| | Padiglione Montegrappa | Superficie in pianta [m²] |
|-----------------------|-------------------------------|---|
| Seminterrato | Spogliatoio degenti | 59.7 |
| | Cappella | 21.8 |
| | Corridoio | 113 |
| | Vano scale | 26.8 |
| | Degenza | 79.9 |
| | Degenza dialisi | 32.8 |
| | Centrale termica | 29.1 |
| | Magazzino 1 | 38.8 |
| | Magazzino 2 | 91.9 |
| | Locali infermieri | 10.1 |
| | Emodialisi 1 | 59.0 |
| | Emodialisi 2 | 47.5 |
| | Medicheria | 80.0 |
| | Ufficio medico dialisi | 17.1 |
| | Osmosi | 14.6 |
| | Studio medico | 17.0 |
| | Piano primo | Piano inutilizzato |
| Piano rialzato | Corridoio nefrologia | 172 |
| | Vano scale | 26.8 |

| | | |
|---------------------------|-----------------------------|-------------|
| | Bagni e cucina | 50.1 |
| | Camere | 130 |
| | Attività riabilitative | 33.8 |
| | Terapia fisica | 33.8 |
| | Ambulatorio 1 | 18.0 |
| | Ambulatorio 2 | 32.1 |
| | Medicheria 1 | 19.9 |
| | Medicheria 2 | 39.8 |
| | Studio caposala | 29.4 |
| Totale Montegrappa | | 1905 |
| | Padiglione Superiore | |
| Seminterrato | Bar | 78.0 |
| | Centrale termica | 197 |
| | Centrale idrica | 266 |
| Piano terra | Corridoio | 355 |
| | Cappella | 133 |
| | Magazzino 1 | 45.2 |
| | Magazzino 2 | 271 |
| | Montalettighe | 37.6 |
| | Riabilitazione 1 | 130 |
| | Riabilitazione 2 | 119 |
| | Riabilitazione 3 | 115 |
| | Radiologia | 319 |
| | Ambulatori 1 | 68.3 |
| | Ambulatori 2 | 47.0 |
| | Accettazione | 68.4 |
| | Cardiologia | 118 |
| Piano primo | Corridoio | 404 |
| | Degenza 1 | 628 |
| | Degenza 2 | 80.6 |
| | Degenza 3 | 126 |
| | Neonatologia | 63.5 |
| | Montalettighe | 37.6 |
| | Magazzino | 45.1 |
| | Studi medici | 71.6 |
| | Ambulatori 1 | 94.7 |
| | Ambulatori 2 | 71.1 |
| | Ambulatori 3 | 70.2 |
| Piano secondo | Corridoio | 393 |
| | Degenza 1 | 304 |
| | Degenza 2 | 111 |
| | Degenza 3 | 24.0 |
| | Camera d'isolamento | 69.0 |
| | Bagni e ripostigli | 50.0 |
| | Montalettighe | 37.6 |
| | Sala operatoria | 111 |

| | | |
|-------------------------|--------------|-------------|
| | Ambulatori | 144 |
| | Studi medici | 273 |
| | Palestra | 72.8 |
| Totale Superiore | | 5648 |
| Totale OdI | | 7552 |

Per quanto riguarda le stratigrafie ipotizzate per le due strutture, ci si riferisce alla Tabella 15. In accordo con le tecniche costruttive del tempo, le pareti esterne del Montegrappa sono in mattoni pieni e non presentano né intercapedini, né strati isolanti (tipologia 2 in Tabella 15). Per quanto riguarda il Superiore, il nucleo originale dell'edificio è sostenuto da muri portanti spessi 1.5 m e quindi caratterizzati da una notevole massa frontale (tipologia 1 in Tabella 15); gli ambienti aggiunti negli interventi d'ampliamento hanno invece pareti esterne analoghe a quelle dell'altro padiglione.

Tabella 15. Ipotesi di stratigrafia delle pareti dei due edifici

| | | Spessore [cm] |
|-------------------------------------|----------------------|----------------------|
| Pareti esterne (tipologia 1) | Intonaco esterno | 1.3 |
| | Mattoni pieni | 25 |
| | Terra | 100 |
| | Mattoni pieni | 25 |
| | Intonaco interno | 1.3 |
| Pareti esterne (tipologia 2) | Intonaco esterno | 1.3 |
| | Mattoni pieni | 20 |
| | Intonaco interno | 1.3 |
| Pareti e solai interni | Intonaco | 1.3 |
| | Mattoni pieni | 20 |
| | Intonaco | 1.3 |
| Pavimento su terra | Cemento | 10 |
| | Massetto | 7 |
| | Pavimento di legno | 3 |
| Tetti piani | Asfalto | 1.9 |
| | Pannello di fibra | 1.3 |
| | Cemento | 1 |
| Tetti inclinati | Tegole | 2.5 |
| | Intercapedine d'aria | 2 |
| | Feltro | 5 |
| Infissi | Vetro singolo | 0.6 |

4.2 Descrizione degli impianti

L'impianto di produzione di energia termica per riscaldamento e preparazione d'ACS è costituito da 2 centrali termiche, originariamente destinate ad essere indipendenti e a soddisfare un

padiglione ciascuna, ma che attualmente vengono utilizzate alternativamente per coprire l'intero carico dei due padiglioni. In particolare la centrale di maggiore potenza è alimentata a BTZ e viene utilizzata durante la stagione invernale, mentre d'estate, per la produzione di ACS, è in funzione la seconda centrale, alimentata a metano.

Le tubazioni dedicate al riscaldamento dei due edifici si distribuiscono in 3 circuiti autonomi, uno per il Padiglione Superiore e 2 per il Padiglione Montegrappa; la necessità di un secondo circuito per quest'ultimo fabbricato è dovuta alle condizioni di esposizione della sua ala nord-est, decisamente più fredda del resto dell'edificio e dunque termostata a parte. La regolazione dell'impianto è di tipo climatico, ossia avviene variando la temperatura di mandata dalla caldaia in funzione della temperatura esterna, misurata da una sonda ambientale. La regolazione climatica è inoltre accoppiata ad una regolazione di zona, effettuata mediante termostati posti, appunto, nelle varie zone dell'edificio. I terminali d'impianto sono radiatori modulari in ghisa, privi di valvole termostatiche e posizionati uno per stanza, ad eccezione dei corridoi, dove ne sono presenti due. Ciascun corpo scaldante possiede dai 5 ai 6 elementi.

Al riscaldamento dell'ACS vengono dedicati 2 circuiti, che servono altrettanti accumulatori da 2000 litri, uno per ciascun edificio. Infine la climatizzazione della sala operatoria è gestita da un opportuno impianto di trattamento dell'aria.

La centrale termica a BTZ si compone di 2 caldaie in acciaio pressurizzate (pressione d'esercizio: 4.5 bar) da 650 kW di potenza al focolare e in grado di fornire una potenza utile di 581 kW (rendimento di combustione: 89.4%). La scelta del combustibile venne dettata in origine dall'assenza di una linea di fornitura del metano; anche ora che tale linea è stata portata vicino all'ospedale per l'alimentazione della cucina e dell'altra centrale termica, essa non risulta sufficiente, essendo in bassa pressione. La centrale termica a metano ha invece a disposizione 2 caldaie da 252.3 kW di potenza nominale e 227.6 kW di potenza utile (rendimento di combustione: 90.2%), anch'esse pressurizzate a 4.5 bar.

Alcune degenze, alcuni studi e uffici e le palestre sono raffrescati d'estate tramite semplici split, alimentati elettricamente. La potenza frigorifera complessivamente installata è di 121.3 kW, suddivisa in 63.3 kW per le degenze, 38.7 kW per studi e uffici e 19.3 kW per le palestre. L'EER ipotizzato per questi condizionatori è di 2.9, dunque la richiesta di potenza elettrica per gli impianti di raffrescamento estivo è pari a 41.8 kW.

4.3 Descrizione dei modelli occupazionali

I locali elencati in Tabella 14 sono stati raggruppati secondo la classificazione fornita al Paragrafo 2.2. Il set point per le temperature di zona è fissato a 20°C nella stagione invernale, che va dal primo novembre al 15 aprile (siamo in zona climatica D), e a 24°C nella stagione estiva. L'umidità relativa prevista è del 50% e i ricambi d'aria imposti sono pari a 0.7 volumi/ora. Fanno eccezione a queste condizioni la sala operatoria, per la quale sono previsti ricambi d'aria di 15 volumi/ora, oltre, ovviamente, alle zone non condizionate (bagni e ripostigli, montalettighe, magazzini, piano primo del Montegrappa), che si trovano in evoluzione libera.

Per quanto riguarda le schede d'occupazione, per ogni zona si è fatta un'ipotesi di affollamento alle varie ore del giorno tra pazienti, accompagnatori, visitatori, dottori, infermieri, OSS, tecnici e amministrativi, basandosi sulle indicazioni forniteci dal personale ospedaliero. Analogamente, sono state compiute delle stime per la potenza termica generata dalle apparecchiature mediche, dai computer e dagli apparecchi d'illuminazione presenti.

I reparti di cardiologia e radiologia, ospitati nel piano terreno del Superiore, offrono servizi diagnostici e ambulatoriali e sono aperti dalle 8:00 alle 19:00 nei giorni feriali. La sala operatoria presente in questo padiglione viene utilizzata due volte alla settimana per tutta la mattinata ed è riscaldata solo nella fase d'impiego. Il Montegrappa invece ospita il reparto di nefrologia e offre servizio di emodialisi, che si tiene due volte al giorno, fine settimana escluso, per una durata di 4 ore a paziente.

4.4 Consumi elettrici e termici

L'Ing. Sergio Lami dell'ufficio manutenzione dell'ASL 11 di Empoli ci ha gentilmente fornito i dati storici dei consumi di energia elettrica, BTZ e metano per l'OdI.

In Tabella 16 sono riportati le quantità di BTZ consegnate nel periodo che va dal 2000 al 2007 e i volumi di metano fatturati nel 2007.

Tabella 16. Quantità di BTZ consegnate dal 2000 al 2007 e volumi di metano fatturati nel 2007

| | BTZ consegnato [10³ kg] | Metano fatturato [10³ Sm³] | Energia spesa in TEP |
|-------------|---|---|-----------------------------|
| 2000 | 15.98 | | 15.7 |
| 2001 | 53.58 | | 52.5 |
| 2002 | 115.1 | | 113 |
| 2003 | 131.9 | | 129 |
| 2004 | 116.4 | | 114 |
| 2005 | 135.2 | | 133 |
| 2006 | 78.78 | | 77.2 |
| 2007 | 40.38 | 14.19 | 39.6 + 12.2 = 51.8 |

I consumi effettivi di energia elettrica in MWh riferiti al periodo che va da gennaio 2007 a dicembre 2008 sono invece riportati in Tabella 17, con la corrispondente spesa energetica in TEP.

Tabella 17. Energia elettrica utilizzata nel periodo gennaio 2007-dicembre 2008

| | Consumo di energia elettrica [MWh] | Energia spesa in TEP |
|--------------------|---|-----------------------------|
| Totale 2007 | 695.3 | 153 |
| Gennaio 2007 | 63.32 | 13.9 |
| Febbraio | 57.46 | 12.6 |
| Marzo | 60.90 | 13.4 |
| Aprile | 54.36 | 12.0 |
| Maggio | 57.27 | 12.6 |
| Giugno | 57.36 | 12.6 |
| Luglio | 62.23 | 13.7 |
| Agosto | 58.52 | 12.9 |
| Settembre | 52.86 | 11.6 |
| Ottobre | 54.67 | 12.0 |
| Novembre | 55.02 | 12.1 |
| Dicembre 2007 | 61.37 | 13.5 |
| Totale 2008 | 640.6 | 141 |
| Gennaio 2008 | 61.61 | 13.6 |
| Febbraio | 56.51 | 12.4 |
| Marzo | 58.23 | 12.8 |
| Aprile | 55.74 | 12.3 |
| Maggio | 52.35 | 11.5 |
| Giugno | 54.56 | 12.0 |
| Luglio | 58.45 | 12.9 |
| Agosto | 52.49 | 11.5 |
| Settembre | 48.90 | 10.8 |
| Ottobre | 47.52 | 10.5 |
| Novembre | 47.73 | 10.5 |
| Dicembre 2008 | 46.54 | 10.2 |

Sommando le componenti termiche ed elettriche per l'anno 2007, i consumi specifici dell'OdI sono pari a 3.2 TEP/p.l., al di sotto della media per la sanità toscana (vedi Tabella 7).

Infine l'utilizzo di ACS non viene monitorato ed è stato stimato tramite la norma UNI/TS 11300-2. Il consumo giornaliero medio risulta di 2.17 m³.

5. Programmi impiegati per le simulazioni degli ospedali

Per la simulazione termodinamica dei due complessi ospedalieri descritti nei precedenti Capitoli 3 e 4 sono stati utilizzati i due software EnergyPlus e TRNSYS. Entrambi i codici non hanno un'interfaccia grafica di facile fruibilità, perciò ci si è avvalsi del supporto di software specifici per costruire il modello della struttura come DesignBuilder e Mc4Suite.

Allo scopo di semplificare la modellazione, è stata condotta la suddivisione degli edifici in zone composte da più locali, assimilabili sulla base della stessa destinazione d'uso e conseguente specificità degli apporti termici interni, dei ricambi d'aria necessari, dei terminali d'impianto presenti e del loro sistema di regolazione.

5.1 Mc4Suite

Mc4Suite è il prodotto principale dell'azienda Mc4 Software, fondata a Torino nel 1982 e attualmente presente con sedi anche negli Stati Uniti e in Spagna.

L'interfaccia grafica di quest'applicativo è semplice e intuitiva, oltre ad essere compatibile con AutoCAD®, il più diffuso software di CAD. L'utente disegna il fabbricato in pianta e il software restituisce una grafica tridimensionale. Tutti i dati necessari per il calcolo, come la collocazione geografica dell'edificio, la stratigrafia delle pareti e la qualità dei serramenti possono essere inseriti graficamente. Il programma valuta in maniera rapida e affidabile i carichi massimi invernali ed estivi, seguendo procedure di calcolo basate sulle più recenti leggi e normative, e restituisce la potenza da installare nei vari ambienti in esame. L'effetto di ogni modifica viene subito evidenziato, grazie all'aggiornamento istantaneo del disegno e dei risultati di calcolo.

5.2 TRNSYS

TRNSYS è un applicativo disponibile dal 1975, sviluppato dal Laboratorio di Energia Solare dell'Università del Wisconsin - Madison, in collaborazione con il Laboratorio di Applicazioni dell'Energia Solare dell'Università del Colorado. Oggi è un programma distribuito e utilizzato in tutto il mondo.

TRNSYS è l'acronimo di TRaNsient SYstem Simulation program; si tratta dunque di un software per la simulazione di sistemi in condizioni termiche transitorie. È adoperato da tecnici e ricercatori per il calcolo del fabbisogno di energia negli edifici e per la valutazione, in termini di

efficienza energetica, di soluzioni progettuali o di possibili interventi su ambienti già costruiti. Può inoltre essere impiegato per simulare le strategie di controllo degli impianti e i modelli comportamentali degli occupanti.

Il punto di forza di TRNSYS è la sua flessibilità, dovuta principalmente alla struttura aperta e modulare, che consente agli utenti di personalizzare ed estendere in maniera semplice i modelli esistenti, al fine di adattarli alle proprie necessità. Inoltre il programma può essere facilmente interfacciato con comuni software di calcolo come Microsoft Excel e MATLAB®.

L'utente, tramite un linguaggio di descrizione del sistema, specifica gli elementi che lo costituiscono e il modo in cui sono interconnessi. La libreria interna contiene molti dei componenti comunemente utilizzati nei sistemi energetici termici ed elettrici, oltre ai dati meteorologici raccolti da numerose stazioni sparse per il globo.

Il pacchetto software contiene tre programmi principali: Simulation Studio, TRNBuild e Simulation Engine. Il primo è l'interfaccia grafica dalla quale si possono creare progetti, trascinando componenti nello spazio di lavoro, collegandoli tra loro e impostando i parametri globali di simulazione. TRNBuild è lo strumento necessario per inserire i dati d'ingresso in edifici multizona. Consente di specificare tutti i dettagli della struttura e, più in generale, tutte i dati necessari alla simulazione del comportamento termodinamico dell'edificio, tra cui gli schemi di utilizzo degli impianti di riscaldamento e raffrescamento e la distribuzione dei carichi interni. L'ultimo programma infine legge le informazioni sulla simulazione contenute nel file di input e nelle eventuali librerie da esso richiamate ed effettua il calcolo. Contemporaneamente mette a disposizione i risultati ottenuti passo dopo passo, consentendone una rappresentazione grafica sotto forma di andamenti in funzione del tempo delle variabili termodinamiche in gioco.

5.3 EnergyPlus e DesignBuilder

EnergyPlus è stato sviluppato dal DOE in Fortran90, con aggiornamenti in Fortran95; la logica che ha guidato lo sviluppo è stata quella di consentire, a chi lo volesse, di integrare, modificare parti del programma o aggiungere componenti con relativa facilità, dunque il codice è "open source" e lo stile di programmazione è di tipo modulare. EnergyPlus è inoltre concepito per essere un "motore di calcolo": la definizione dei dati di input e il post-processing non sono particolarmente agevoli all'interno del programma, in genere queste due fasi vengono affidate ad interfacce sviluppate da terze parti.

EnergyPlus è un programma per l'analisi energetica dinamica degli edifici. A partire dalla caratterizzazione fisico-geometrica dell'involucro, dei sistemi di condizionamento associati e dei dati climatici del luogo, fornisce dati sulle potenze necessarie all'impianto e sul consumo di energia primaria per il mantenimento di date condizioni.

Gli elementi del modello utilizzato dal programma per portare avanti questo tipo di analisi possono essere schematizzati come segue:

- condizioni climatiche esterne;
- involucro, definito dalla geometria dell'edificio e dalle proprietà termofisiche delle sue superfici;
- zona termica, parte dell'edificio nella quale le caratteristiche termoigrometriche dell'aria sono omogenee;
- guadagni interni;
- controlli su temperatura ed umidità delle zone;
- controlli su temperatura e portata di punti dell'impianto;
- impianti di distribuzione dell'aria di condizionamento;
- impianti di raffrescamento e riscaldamento, che possono interagire con l'UTA o direttamente con la zona (ad esempio, impianto a radiatori).

File meteo

Tutti i programmi per la simulazione non stazionaria degli edifici utilizzano file che contengono dati temporali sulle condizioni climatiche locali. Il file meteo usato in EnergyPlus è una riformattazione del classico formato TMY, con l'aggiunta di due nuovi campi di dati, uno per le misure della radiazione infrarossa, l'altro con il tempo di rilevamento dei dati, in minuti, in modo da consentire l'utilizzo di misure derivate da scansioni temporali fitte ma non necessariamente complete su tutto il periodo di simulazione.

Bilancio di zona

Il modello che descrive la zona è un modello a parametri concentrati, costituito dalle equazioni di bilancio dell'energia e della massa di vapore acqueo:

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{\text{car.int.}}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{\text{superflet}}} h_i A_i (T_{st} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{\text{zone ad.}}} \dot{m} C_p (T_{st} - T_z) + \dot{m}'_{\text{inf}} C_p (T_{\infty} - T_z) + \dot{Q}'_{\text{sys}}$$

con

C_z capacità termica del volume d'aria della zona considerata

T_z temperatura media della zona

T_s temperatura della superficie della parete

T_{∞} temperatura esterna

$\sum_{i=1}^{N_{\text{car.int.}}} \dot{Q}_i$ = somma dei guadagni interni convettivi

$\sum_{i=1}^{N_{\text{superflet}}} h_i A_i (T_{st} - T_z)$ = scambio termico convettivo con le pareti

$\sum_{i=1}^{N_{\text{zone ad.}}} \dot{m} C_p (T_{st} - T_z)$ = scambio termico per ventilazione interzona

$\dot{m}'_{\text{inf}} C_p (T_{\infty} - T_z)$ = scambio termico per ventilazione esterna (incluse le infiltrazioni)

\dot{Q}'_{sys} = potenza termica dell'impianto

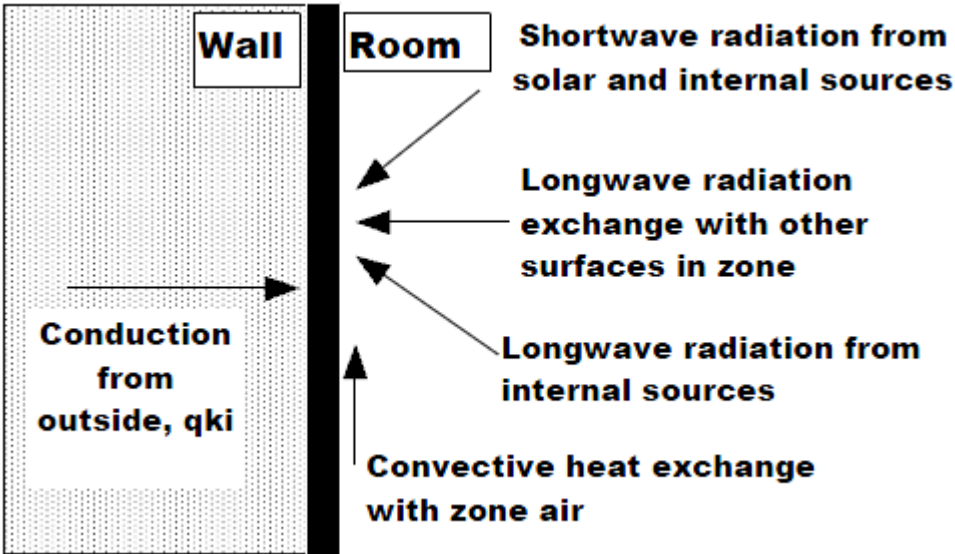
$$\rho_{\text{aria}} V_z \frac{dW_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{\text{car.int.}}} \dot{M}_w + \sum_{i=1}^{N_{\text{superflet}}} \rho_{\text{aria}} h_{\text{mt}} A_i (W_{st} - W_z) + \dot{m}'_{\text{sys}} W_{\text{sys in}} - \dot{m}'_{\text{sys}} W_{\text{sys out}} + \dot{m}'_{\text{inf}} (W_{\infty} - W_z)$$

V_z volume d'aria

W umidità specifica.

Bilancio sulla parete, lato interno

I termini considerati nel bilancio dell'energia sulla parete interna sono evidenti dallo schema seguente:



L'irraggiamento nell'infrarosso è modellato ipotizzando che le superfici siano corpi grigi, opachi e riflettenti in maniera diffusa, e che la temperatura sia uniforme su ognuna di esse; si può inoltre linearizzare la relazione dello scambio termico per irraggiamento.

L'irraggiamento solare è considerato sia nella componente diretta (ASHRAE clear sky solar model, Zhang-Huang solar model) che diffusa (distribuzione anisotropa).

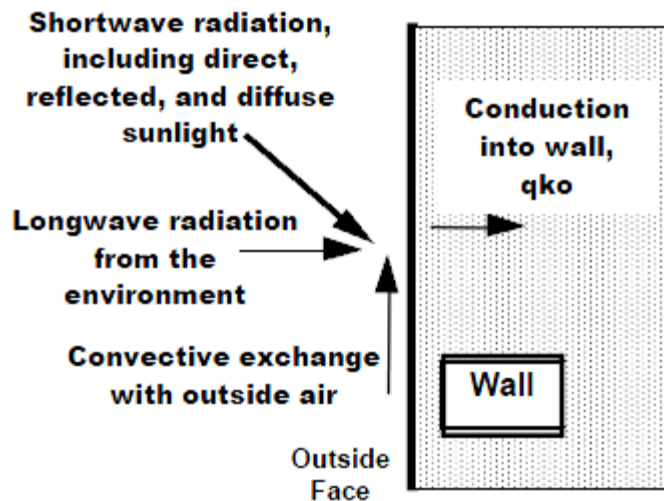
Gli algoritmi per il calcolo della convezione interna sono molteplici:

- semplice: coefficiente di scambio costante;
- dettagliato: coefficienti dipendenti dalla temperatura, $h \propto \Delta T^{1/4}$;
- modello di diffusore a soffitto;
- modello di parete Trombe.

Conduzione attraverso la parete

La conduzione attraverso le pareti è affidata ad uno schema monodimensionale a coefficienti costanti, risolto da un algoritmo di tipo CFT (Conduction Transfer Function), che può essere integrato da uno schema alle differenze finite, nel caso in cui ci sia la necessità di introdurre una conducibilità termica variabile.

Bilancio sulla parete, esterno



Anche per la convezione esterna sono implementati più algoritmi:

- semplice: dipendenza quadratica dalla velocità del vento;
- dettagliato, BLAST, TARP: suddividono il coefficiente di convezione nella componente naturale (calcolata come nel caso di parete interna) e forzata (correlazione Sparrow, Ramsey, Mass)

Guadagni interni

I guadagni interni sono suddivisi in sei categorie:

- persone;
- luci;
- apparecchiature elettriche;
- apparecchiature a gas;
- generatori di vapore;
- termobattiscopa a regolazione climatica.

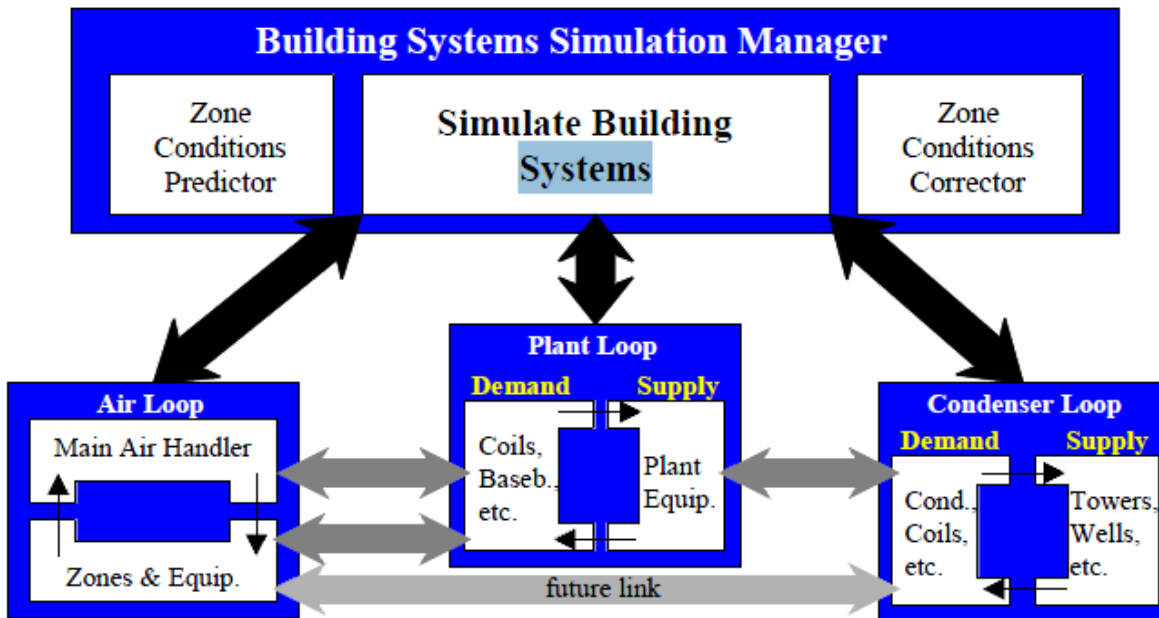
Ogni elemento è gestito da una scheda di funzionamento creata dall'utente che regola l'intensità del guadagno in funzione del tempo. Tramite la definizione di queste schede si ottiene una caratterizzazione della destinazione d'uso delle varie zone.

Controlli di zona

È possibile definire per ogni zona un controllore di umidità e di temperatura, eventualmente con banda morta; anche in questo caso il valore del set point può variare nel tempo, coerentemente con un programma di funzionamento gestito dall'utente.

Impianto

Le interazioni tra edificio e impianto sono sintetizzate nella figura seguente:



Nella versione più generale un impianto è costituito da quattro anelli:

- Air Loop, il circuito d'aria primaria, all'interno del quale si definiscono le caratteristiche dei terminali d'impianto, dei fan, degli scambiatori, si possono impostare dei controlli termigrometrici e sulla portata dell'aria, inoltre a questo livello si gestisce il ricambio d'aria forzato;
- 2 Plant loop, circuiti di raffreddamento e riscaldamento, che possono essere accoppiati con terminali direttamente sulla zona (è il caso dei radiatori) oppure con l'UTA; anche questi anelli possono essere soggetti a vincoli, ad esempio la temperatura in un dato punto; il controllo viene attuato attraverso la variazione della portata nell'anello;
- condenser loop, che simula il lato condensatore del circuito frigorifero.

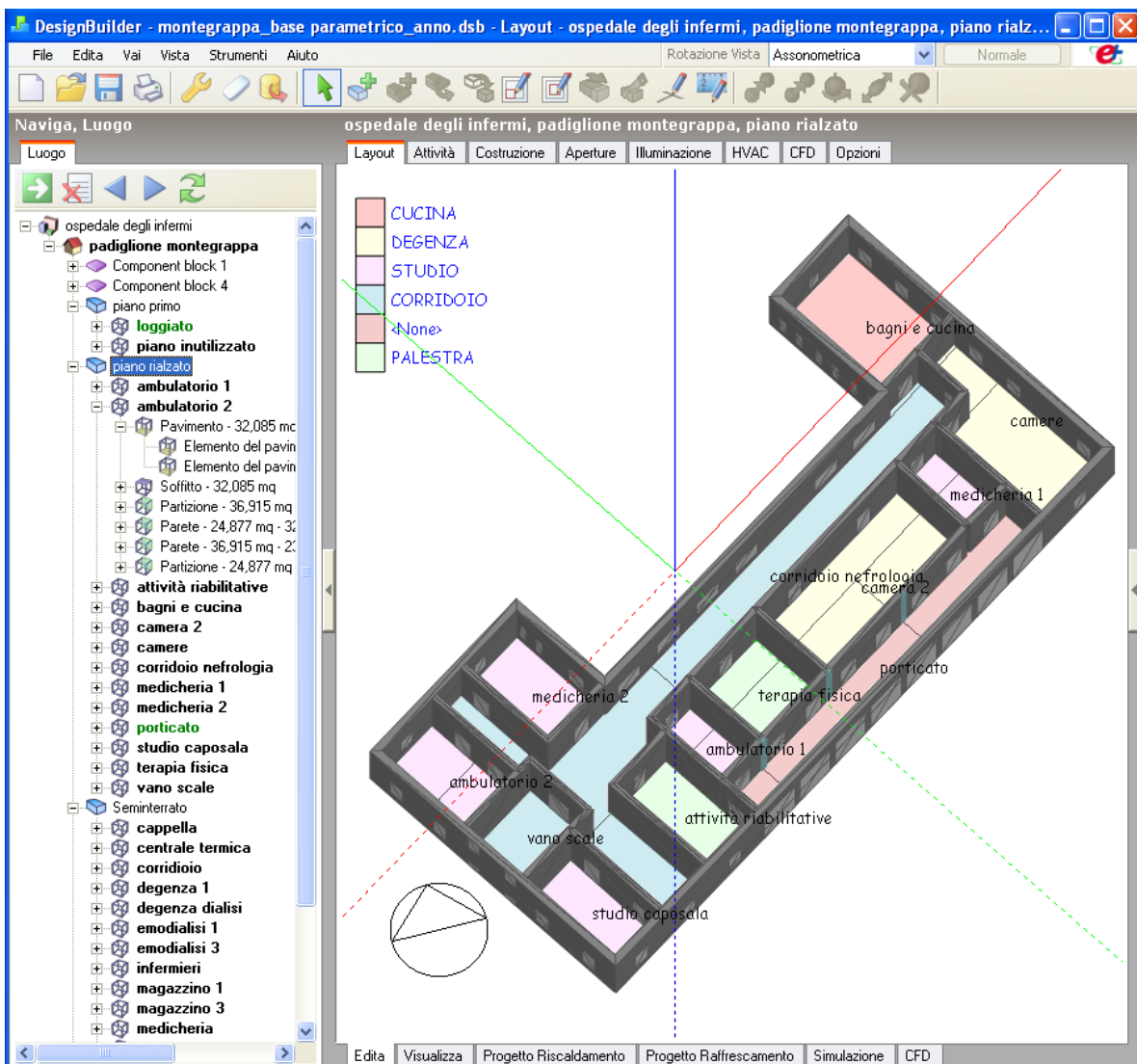
DesignBuilder

EnergyPlus è un software orientato al calcolo: per la creazione di file di input complessi e per la gestione dei relativi risultati sono state sviluppate delle interfacce da terze parti.

DesignBuilder, programma creato da DesignBuilder Software Ltd, è una di queste interfacce.

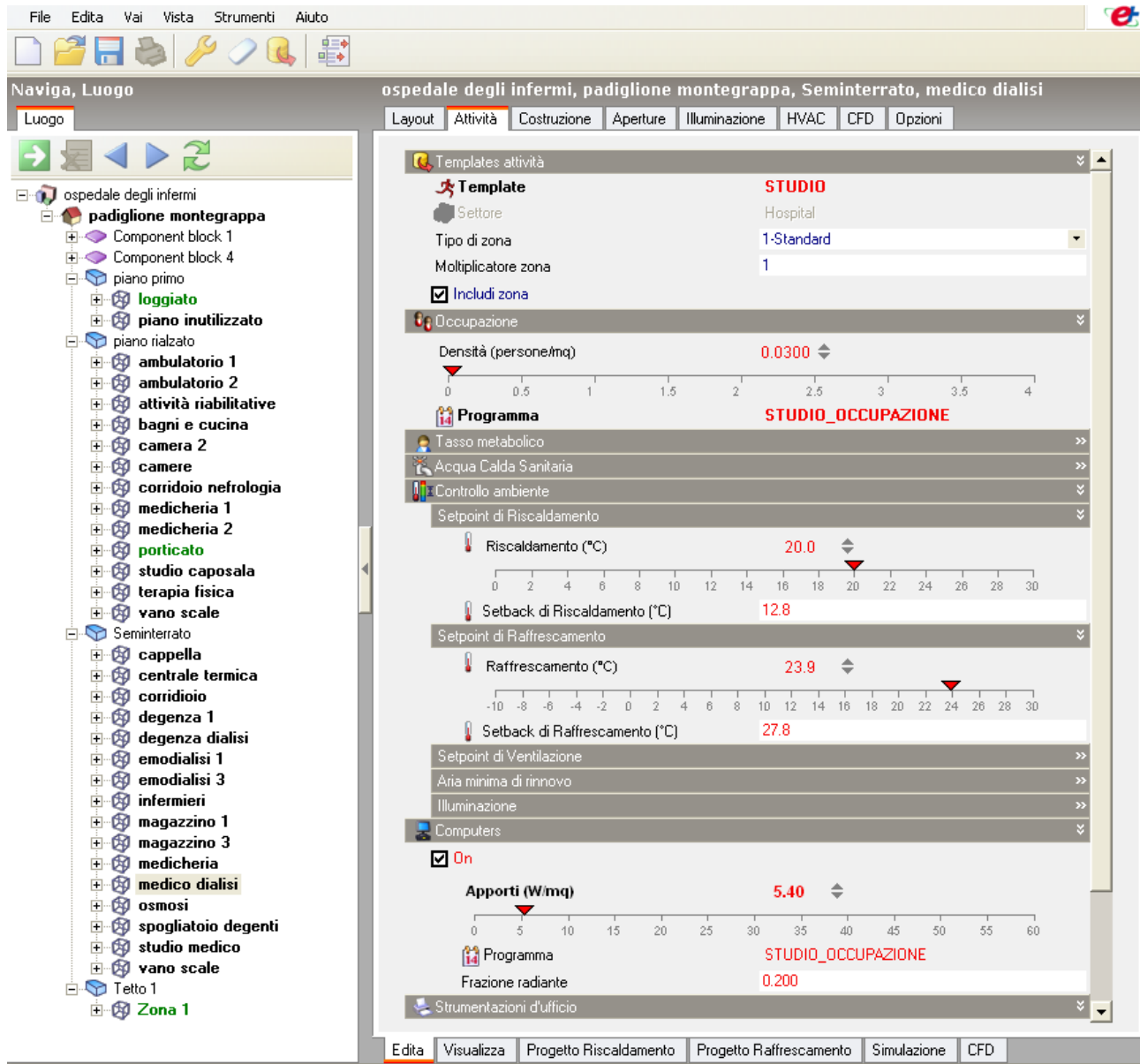
Geometria e schede

Una finestra CAD consente di modellare agevolmente la geometria dell'edificio ed assegnare le proprietà fisiche alle varie strutture:



Finestra di modellazione

Analoghe finestre consentono la gestione dei programmi di funzionamento dell'impianto e dei guadagni interni, l'impostazione dei set point di umidità e temperatura:



Schede di funzionamento

Risultati

I risultati possono essere richiesti come sintesi annuale o a passi temporali più fitti, fino ad arrivare alla cadenza pari a quella del passo temporale usato nella simulazione; possono inoltre essere aggregati a livello dell'intero edificio o di singola zona. Di seguito si riporta un esempio di tabella di dati mensili, per un intero edificio:

Temperature, Apporti di Calore e Consumo di Energia - ospedale degli infermi, padiglione montegrappa

| EnergyPlus | 1 Gen - 31 Dic, Mensile | | | | | | | | | | | Valutazione |
|--|-------------------------|-----------|-----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|----------|----------|-----------|-------------|
| Mese | | | | | | | | | | | | |
| Acqua Calda Sanitaria (2-Gas naturale) (kWh) | 1414,73 | 1277,82 | 1414,73 | 1369,09 | 1414,73 | 1369,09 | 1414,73 | 1414,73 | 1369,09 | 1414,73 | 1369,09 | 1414,73 |
| Elettricità (kWh) | 451,60 | 416,86 | 468,97 | 434,23 | 468,97 | 451,60 | 451,60 | 468,97 | 451,60 | 451,60 | 451,60 | 451,60 |
| Illuminazione (kWh) | 1784,99 | 1621,83 | 1803,55 | 1724,42 | 1803,55 | 1742,98 | 1784,99 | 1803,55 | 1742,98 | 1784,99 | 1742,98 | 1784,99 |
| energia ausiliaria (pompe, ventilatori, etc) (kWh) | 365,89 | 330,48 | 365,89 | 364,09 | 365,89 | 364,09 | 365,89 | 365,89 | 364,09 | 365,89 | 364,09 | 365,89 |
| Caldaia (Gas) (kWh) | 31583,07 | 23825,29 | 18419,73 | 4111,59 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 19196,20 | 31685,00 |
| Chiller (Elettricità) (kWh) | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 48,36 | 557,72 | 2056,41 | 3961,62 | 3926,58 | 1449,97 | 413,22 | 0,00 | 0,00 |
| Temperatura dell'aria (°C) | 19,64 | 20,09 | 20,61 | 20,04 | 22,61 | 24,62 | 25,72 | 25,70 | 24,01 | 20,76 | 19,98 | 19,60 |
| Temperatura radiante (°C) | 19,23 | 19,88 | 20,63 | 20,34 | 23,15 | 25,48 | 26,84 | 26,77 | 24,65 | 21,13 | 19,71 | 19,17 |
| Temperatura operante (°C) | 19,43 | 19,98 | 20,62 | 20,19 | 22,88 | 25,05 | 26,28 | 26,23 | 24,33 | 20,94 | 19,84 | 19,39 |
| Temperatura esterna a bulbo secco (°C) | 6,95 | 7,68 | 9,07 | 12,35 | 16,70 | 20,38 | 23,49 | 23,90 | 19,97 | 15,91 | 11,45 | 7,02 |
| Vetrata (kWh) | -5287,37 | -5482,85 | -5995,41 | -3990,63 | -3581,95 | -2675,77 | -2314,26 | -2529,72 | -3204,01 | -3377,60 | -4091,72 | -5108,54 |
| Pareti (kWh) | -17683,79 | -15078,76 | -13848,60 | -6933,99 | -4502,17 | -2147,47 | -474,19 | -598,82 | -3111,89 | -4526,42 | -12087,83 | -17489,43 |
| Soffitti (interni) (kWh) | -4223,13 | -2849,12 | -1934,01 | -383,05 | 1560,15 | 2760,23 | 3816,69 | 3607,01 | 2226,97 | 703,59 | -2454,42 | -4320,21 |
| Pavimenti interni (kWh) | 236,22 | -27,61 | -313,45 | -529,70 | -1351,38 | -1714,57 | -2038,45 | -2069,47 | -1624,84 | -883,97 | -14,58 | 257,77 |
| Pavimenti su terra (kWh) | -1326,41 | -1390,32 | -1827,37 | -1304,49 | -3000,04 | -4476,62 | -5524,43 | -5408,74 | -3723,10 | -1588,41 | -1416,30 | -1305,65 |
| Partizioni (interne) (kWh) | -589,92 | 223,17 | 1072,29 | 1151,94 | 1824,73 | 1944,22 | 2391,80 | 2351,49 | 2471,91 | 2008,58 | -126,30 | -683,54 |
| Tetti (kWh) | -1098,58 | -856,90 | -684,12 | -165,50 | 141,93 | 348,11 | 439,56 | 317,18 | 58,60 | -96,81 | -708,26 | -1112,05 |
| Porte e bocchette di ventilazione (kWh) | -532,73 | -454,62 | -413,35 | -200,49 | -109,62 | -32,48 | 41,82 | 55,00 | -37,16 | -109,13 | -355,28 | -528,29 |
| Ventilazione esterna (kWh) | -4678,26 | -4379,66 | -4757,41 | -3260,95 | -2980,32 | -2399,60 | -1663,80 | -1507,57 | -2351,69 | -2446,22 | -3144,34 | -4601,31 |
| Energia radiante (kWh) | 28424,76 | 21442,77 | 16577,76 | 3700,43 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 17276,58 | 28516,50 |
| Apporti illuminazione (kWh) | 1784,99 | 1621,83 | 1803,55 | 1724,42 | 1803,55 | 1742,98 | 1784,99 | 1803,55 | 1742,98 | 1784,99 | 1742,98 | 1784,99 |
| Apporti Computer + Apparecchiature (kWh) | 451,60 | 416,86 | 468,97 | 434,23 | 468,97 | 451,60 | 451,60 | 468,97 | 451,60 | 451,60 | 451,60 | 451,60 |
| Apporti di occupazione (kWh) | 867,93 | 783,26 | 854,76 | 837,69 | 783,55 | 702,07 | 697,71 | 707,95 | 721,50 | 841,26 | 845,10 | 868,75 |
| Apporti solari attraverso finestre esterne (kWh) | 3893,28 | 6239,47 | 9207,10 | 9216,02 | 10379,20 | 10361,11 | 11217,10 | 11372,05 | 9722,90 | 8171,58 | 4281,71 | 3509,51 |
| Raffrescamento fornito (kWh) | 0,00 | 0,00 | 0,00 | -134,43 | -1408,68 | -4969,37 | -9026,71 | -8730,34 | -3362,82 | -852,02 | 0,00 | 0,00 |
| Raffrescamento sensibile (kWh) | 0,00 | 0,00 | 0,00 | -134,48 | -1410,55 | -4978,08 | -9042,26 | -8745,52 | -3368,00 | -853,04 | 0,00 | 0,00 |
| Raffrescamento totale (kWh) | 0,00 | 0,00 | 0,00 | -130,58 | -1505,85 | -5552,30 | -10696,36 | -10601,78 | -3914,93 | -1115,68 | 0,00 | 0,00 |
| Vent Mecc + Vent Nat + Infiltrazioni (vol/ora) | 0,23 | 0,23 | 0,23 | 0,23 | 0,25 | 0,28 | 0,29 | 0,29 | 0,27 | 0,24 | 0,23 | 0,23 |

La divisione dei vari contributi rispecchia quella fra i termini del bilancio di energia per la singola zona.

6. Calcolo della potenza da installare per riscaldamento e raffrescamento

Un calcolo preliminare della potenza di riscaldamento necessaria per coprire il fabbisogno di un edificio di riferimento di forma elementare è stato effettuato sia con TRNSYS sia con EnergyPlus. Si è così potuto verificare che, a parità di dati d'ingresso in termini di geometria e materiali della struttura e di temperature e coefficienti di scambio termico imposti all'interno e all'esterno, i due software forniscono praticamente gli stessi risultati, con uno scarto inferiore al 2%.

6.1 Calcolo con Mc4Suite della potenza da installare per il riscaldamento del Nuovo Ospedale San Giovanni di Dio

La temperatura esterna è fissata a 0°C, mentre gli ambienti interni si trovano nelle condizioni operative della stagione invernale, descritte al Paragrafo 3.3, ad esclusione dei locali tecnici non trattati, la cui temperatura viene imposta a 18°C. Gli apporti gratuiti solari e i carichi interni vengono trascurati. Anche i ricambi d'aria applicati coincidono con quelli nominali.

In queste condizioni, la richiesta di potenza termica, calcolata da Mc4Suite per il riscaldamento del NOSGD, è di 3.18 MW; questo valore è coerente con la potenza delle caldaie realmente installate nel complesso ospedaliero (vedi Paragrafo 3.2). La potenza totale per il riscaldamento può essere suddivisa nelle seguenti quote:

- dispersioni e infiltrazioni: 1074 kW;
- ventilazione aria primaria, contributo di calore sensibile: 1288 kW;
- ventilazione aria primaria, contributo di calore latente: 703 kW;
- ventilazione sensibile di zona: 115 kW.

6.2 Calcolo con TRNSYS della potenza da installare per il riscaldamento del Nuovo Ospedale San Giovanni di Dio

Nelle stesse condizioni utilizzate per il calcolo con Mc4Suite, viene effettuata la simulazione con TRNSYS. Il modello geometrico in questo caso è semplificato; in particolare i vari locali sono stati accorpati nelle seguenti macrozone: ambulatori, day hospital, reparti con degenze, uffici/studi, blocco operatorio, cure intensive, diagnostica per immagini, nursery/ostetricia, ambienti affollati, laboratori d'analisi, farmacia e zone non trattate.

La richiesta di potenza termica per il riscaldamento del NOSGD ricavata da TRNSYS è di 3.02 MW, con una deviazione soltanto del 5.03% rispetto al valore ottenuto da Mc4Suite, nonostante la notevole semplificazione operata sulle zone. Anche in questo caso la potenza totale per il riscaldamento può essere suddivisa tra i vari contributi:

- dispersioni e infiltrazioni: 890 kW;
- ventilazione aria primaria, contributo di calore sensibile: 1319 kW;
- ventilazione aria primaria, contributo di calore latente: 694 kW;
- ventilazione sensibile di zona: 115 kW.

In alternativa, la potenza totale può anche essere ripartita tra le macrozone che compongono il complesso ospedaliero:

- ambulatori: 676 kW;
- day hospital: 68.1 kW;
- reparti con degenze: 615 kW;
- uffici/studi: 176 kW;
- blocco operatorio: 269 kW;
- cure intensive: 391 kW;
- diagnostica per immagini: 250 kW;
- nursery/ostetricia: 202 kW;
- ambienti affollati: 75.7 kW;
- laboratori d'analisi: 151 kW;
- farmacia: 144 kW;
- zone non trattate: 0 kW.

6.3 Calcolo con EnergyPlus della potenza da installare per il riscaldamento dell'Ospedale degli Infermi

Per il calcolo della potenza necessaria per il riscaldamento dell'OdI, la temperatura esterna è stata fissata a -2.9°C, mentre le condizioni operative degli ambienti interni e i ricambi d'aria sono

quelli descritti al Paragrafo 4.3, relativamente alla stagione invernale. Anche in questo caso gli apporti gratuiti da parte dell'irradiazione solare e dei carichi interni (persone, apparecchiature mediche, computer, apparecchi d'illuminazione) vengono trascurati.

La richiesta di potenza termica risultante dalla simulazione effettuata con EnergyPlus è di 324 kW (80.7 kW per il Padiglione Montegrappa e 243 kW per il Padiglione Superiore). Questo valore è assai minore della potenza realmente installata nel complesso ospedaliero (vedi Paragrafo 4.2); è dunque probabile che una delle 2 caldaie a BTZ sia ridondante e venga utilizzata soltanto per la gestione dei sovraccarichi e durante i periodi di manutenzione dell'altra caldaia. La potenza totale per il riscaldamento può essere suddivisa nelle seguenti quote:

- dispersioni, contributo delle pareti: 79.2 kW (42.0 kW per il Montegrappa e 37.3 kW per il Superiore);
- dispersioni, contributo dei pavimenti su terra: -5.66 kW (-1.03 kW e -4.63 kW, valori di segno negativo delle dispersioni indicano un apporto di riscaldamento);
- dispersioni, contributo delle coperture: 64.3 kW (13.0 kW e 51.4 kW);
- dispersioni, contributo delle vetrate: 39.2 kW (11.8 kW e 27.3 kW);
- ventilazioni e infiltrazioni: 146 kW (14.9 kW e 131 kW).

Le piccole dispersioni di segno negativo, quindi gli apporti di riscaldamento da parte dei pavimenti su terra sono imputabili al fatto che nei seminterrati sono presenti locali non climatizzati.

6.4 Calcolo con EnergyPlus della potenza da installare per il raffrescamento dell'Ospedale degli Infermi

Per quanto concerne il raffrescamento estivo, il calcolo viene fatto sulla potenza di picco registrata nell'arco di un giorno in cui la temperatura esterna oscilla nel tempo con un'onda sinusoidale, tra la temperatura minima di 20.7°C e la massima di 32°C. L'umidità relativa esterna è fissata al 60%, mentre la temperatura e l'umidità degli ambienti interni corrispondono a quelle già indicate al Paragrafo 4.3 per la stagione estiva. In questo caso gli apporti solari e quelli di produzione interna vengono presi in considerazione, poiché aumentano la potenza a carico dell'impianto di refrigerazione.

La simulazione fornisce un fabbisogno di potenza frigorifera pari a 143 kW (42.8 kW per il Montegrappa e 100 kW per il Superiore), un valore superiore alla potenza realmente installata nella

struttura sanitaria tramite i vari condizionatori elettrici (vedi Paragrafo 4.2), che comunque non sono presenti in tutti i locali. La potenza totale per il raffrescamento può essere suddivisa nelle seguenti quote:

- dispersioni, contributo delle pareti: -10.5 kW (5.59 kW per il Montegrappa e -16.1 kW per il Superiore; valori di segno negativo delle dispersioni indicano un apporto di raffrescamento);
- dispersioni, contributo dei pavimenti su terra: -42.5 kW (-11.3 kW e -31.2 kW);
- dispersioni, contributo delle coperture: 33.9 kW (5.43 kW e 28.5 kW);
- dispersioni, contributo delle vetrate: 15.8 kW (8.30 kW e 7.53 kW);
- ventilazioni e infiltrazioni: 30.5 kW (2.60 kW e 27.9 kW);
- apporti solari: 71.5 kW (23.8 kW e 47.7 kW);
- apporti degli occupanti: 11.4 kW (2.36 kW e 9.02 kW);
- apporti delle apparecchiature mediche e dei computer: 11.4 kW (2.06 kW e 9.37 kW);
- apporti dell'illuminazione: 21.6 kW (3.97 kW e 17.6 kW).

7. Analisi dinamica del Nuovo Ospedale San Giovanni di Dio

Oltre alle condizioni operative fissate all'interno dell'edificio (vedi Paragrafo 3.3), per effettuare la simulazione dinamica ora per ora è necessario conoscere gli andamenti dell'irradiazione solare e dei parametri climatici esterni. Si è così sfruttato il TMY della zona più vicina a disposizione, quella di Pisa, che fornisce con dettaglio orario: temperatura e umidità dell'aria, direzione e intensità del vento, posizione del sole e grado di nuvolosità. L'anno tipico meteorologico rappresenta una selezione di dati climatici relativa ad una specifica località, attinti da una banca dati di diversi anni di misurazioni (nel nostro caso dal 1961 al 1990); è fatto in modo tale da rimanere consistente con le caratteristiche del luogo in esame in termini di valori annuali minimi, massimi e medi per le temperature, le piogge, i venti, etc.

7.1 Analisi dinamica nella stagione invernale con TRNSYS in condizioni di termostatazione ideale

La simulazione dinamica nel periodo di riscaldamento (1 novembre-15 aprile) con termostatazione ideale permette di conoscere il fabbisogno orario di energia termica per ogni zona dell'edificio, da fornire tramite i terminali d'impianto. I risultati presentati nelle Tabelle 18 e 19 si riferiscono a tutto il periodo invernale e sono suddivisi, rispettivamente, per contributi e per ambienti. Dato che TRNSYS non tiene conto dei ponti termici, le dispersioni sono state maggiorate del 10%, in accordo con la normativa UNI/TS 11300-1, prospetto 4.

Tabella 18. Fabbisogno di energia termica per il riscaldamento del NOSGD, suddivisa per contributi
($A + B + C = D = E + F - G - H$)

| | Energia termica necessaria per il riscaldamento [TEP] |
|---|--|
| Riscaldamento sensibile dell'aria primaria (A) | 251.3 |
| Umidificazione dell'aria primaria (B) | 117.6 |
| Riscaldamento sensibile di zona (C) | 112.5 |
| Fabbisogno totale (D) | 481.4 |
| Dispersioni (E) | 221.5 |
| Ventilazioni e infiltrazioni (F) | 417.1 |
| Apporti solari (G) | 41.45 |
| Carichi interni (H) | 115.7 |

Tabella 19. Fabbisogno di energia termica per il riscaldamento del NOSGD, suddivisa per ambienti

| | Energia termica necessaria per il riscaldamento [TEP] | Energia termica specifica [mTEP/m²] |
|--------------------------|--|---|
| Ambulatori | 107.5 | 17.22 |
| Day hospital | 9.506 | 14.31 |
| Reparti con degenze | 88.66 | 14.74 |
| Uffici/studi | 19.48 | 4.929 |
| Blocco operatorio | 41.38 | 19.86 |
| Cure intensive | 61.82 | 19.37 |
| Diagnostica per immagini | 46.98 | 23.42 |
| Nursery/ostetricia | 33.31 | 18.71 |
| Ambienti affollati | 14.02 | 18.35 |
| Laboratori d'analisi | 28.72 | 21.44 |
| Farmacia | 30.01 | 23.28 |
| Zone non trattate | 0 | 0 |
| Totale | 481.4 | 15.93 |

7.2 Analisi dinamica nella stagione invernale con TRNSYS in condizioni di termostatazione reale

Una simulazione più vicina alla reale condizione di riscaldamento dell'edificio è stata eseguita inserendo gli opportuni terminali d'impianto nei vari ambienti e lasciando una banda morta di ± 1 K sui set point di zona. È stata inoltre implementata una regolazione climatica sulla portata d'aria dei fan coil. Nelle Tabelle 20 e 21 sono riportati i risultati di questa simulazione per l'intero periodo invernale, nuovamente suddivisi per contributi e per ambienti.

Tabella 20. Energia termica fornita dai terminali d'impianto per il riscaldamento del NOSGD e suddivisione per contributi ($A + B + C = D = E + F - G - H$)

| | Energia termica necessaria per il riscaldamento [TEP] |
|---|--|
| Riscaldamento sensibile dell'aria primaria (A) | 251.3 |
| Umidificazione dell'aria primaria (B) | 117.6 |
| Riscaldamento sensibile di zona (C) | 100.9 |
| Energia termica fornita in totale (D) | 469.8 |
| Dispersioni (E) | 216.2 |
| Ventilazioni e infiltrazioni (F) | 410.8 |
| Apporti solari (G) | 41.45 |
| Carichi interni (H) | 115.7 |

Tabella 21. Energia termica fornita dai terminali d'impianto per il riscaldamento del NOSGD, suddivisa per ambienti

| | Energia termica necessaria per il riscaldamento [TEP] | Energia termica specifica [mTEP/m²] |
|--------------------------|--|---|
| Ambulatori | 108.1 | 17.31 |
| Day hospital | 9.372 | 14.11 |
| Reparti con degenze | 88.19 | 14.66 |
| Uffici/studi | 19.49 | 4.931 |
| Blocco operatorio | 40.80 | 19.58 |
| Cure intensive | 61.81 | 19.36 |
| Diagnostica per immagini | 41.21 | 20.54 |
| Nursery/ostetricia | 31.57 | 17.73 |
| Ambienti affollati | 13.86 | 18.15 |
| Laboratori d'analisi | 26.98 | 20.14 |
| Farmacia | 28.44 | 22.06 |
| Zone non trattate | 0 | 0 |
| Totale | 469.8 | 15.55 |

7.3 Analisi dinamica nella stagione estiva con TRNSYS in condizioni di termostatazione ideale

La simulazione dinamica nel periodo di raffrescamento (16 aprile-31 ottobre) con termostatazione ideale permette di conoscere il fabbisogno orario di energia frigorifera per ogni zona dell'edificio, da fornire tramite i terminali d'impianto. Al raffrescamento sensibile di zona, che viene effettuato da fan coil, va aggiunto un contributo latente, stimato nella misura del 30%.

I risultati presentati nelle Tabelle 22 e 23 si riferiscono a tutto il periodo estivo. Nella conversione dell'energia in TEP si è tenuto conto del fatto che la potenza frigorifera è fornita tramite un gruppo a compressione, alimentato elettricamente.

Dato che i ricambi d'aria vengono effettuati in ogni caso con introduzione a 20°C, nelle ore notturne in cui la temperatura esterna scende sotto questo valore è stato necessario riscaldare l'aria. Sarà dunque presente anche in questa stagione un contributo di energia per il riscaldamento dell'aria primaria, fornita dalle caldaie a metano.

Tabella 22. Fabbisogno di energia frigorifera per il raffrescamento del NOSGD, suddivisa per contributi (A + B + C + D = E = F + G + H + I)

| | Energia frigorifera necessaria per il raffrescamento [TEP] |
|--|---|
| Raffrescamento sensibile dell'aria primaria | 125.0 |
| Deumidificazione dell'aria primaria (B) | 468.4 |
| Raffrescamento sensibile di zona (C) | 19.82 |
| Raffrescamento latente di zona (D) | 5.947 |
| Fabbisogno totale (E) | 619.2 |
| Dispersioni (F) | -286.3 (apporto di raffrescamento) |
| Ventilazioni e infiltrazioni (G) | 394.9 |
| Apporti solari (H) | 155.8 |
| Carichi interni (I) | 354.9 |
| Riscaldamento dell'aria primaria | 71.87 |

Tabella 23. Fabbisogno di energia frigorifera per il raffrescamento del NOSGD, suddivisa per ambienti

| | Energia frigorifera necessaria per il raffrescamento [TEP] | Energia frigorifera specifica [mTEP/m²] |
|--------------------------|---|---|
| Ambulatori | 134.3 | 21.50 |
| Day hospital | 16.94 | 25.50 |
| Reparti con degenze | 142.1 | 23.63 |
| Uffici/studi | 21.08 | 5.334 |
| Blocco operatorio | 67.16 | 32.23 |
| Cure intensive | 82.38 | 25.81 |
| Diagnostica per immagini | 42.75 | 21.31 |
| Nursery/ostetricia | 40.19 | 22.57 |
| Ambienti affollati | 16.28 | 21.31 |
| Laboratori d'analisi | 28.55 | 21.31 |
| Farmacia | 27.47 | 21.31 |
| Zone non trattate | 0 | 0 |
| Totale | 619.2 | 20.49 |

7.4 Analisi dinamica nella stagione estiva con TRNSYS in condizioni di termostatazione reale

Una simulazione più vicina alla reale condizione di raffrescamento dell'edificio è stata eseguita inserendo gli opportuni terminali d'impianto nei vari ambienti e lasciando una banda morta di ± 1 K sui set point di zona. Nelle Tabelle 24 e 25 sono riportati i risultati di questa simulazione per l'intero periodo estivo.

Tabella 24. Energia frigorifera fornita dai terminali d'impianto per il raffrescamento del NOSGD e suddivisione per contributi (A + B + C + D = E = F + G + H + I)

| | Energia frigorifera necessaria per il raffrescamento [TEP] |
|--|---|
| Raffrescamento sensibile dell'aria primaria (A) | 125.0 |
| Deumidificazione dell'aria primaria (B) | 468.4 |
| Raffrescamento sensibile di zona (C) | 16.10 |
| Raffrescamento latente di zona (D) | 4.830 |
| Energia frigorifera fornita in totale (E) | 614.4 |
| Dispersioni (F) | -287.6 (apporto di raffrescamento) |
| Ventilazioni e infiltrazioni (G) | 391.2 |
| Apporti solari (H) | 155.8 |
| Carichi interni (I) | 354.9 |
| Riscaldamento dell'aria primaria | 71.87 |

Tabella 25. Energia frigorifera fornita dai terminali d'impianto per il raffrescamento del NOSGD, suddivisa per ambienti

| | Energia frigorifera necessaria per il raffrescamento [TEP] | Energia frigorifera specifica [mTEP/m²] |
|--------------------------|---|---|
| Ambulatori | 133.4 | 21.36 |
| Day hospital | 17.25 | 25.96 |
| Reparti con degenze | 141.8 | 23.58 |
| Uffici/studi | 21.06 | 5.328 |
| Blocco operatorio | 64.25 | 30.84 |
| Cure intensive | 82.10 | 25.72 |
| Diagnostica per immagini | 42.75 | 21.31 |
| Nursery/ostetricia | 39.38 | 22.12 |
| Ambienti affollati | 16.30 | 21.34 |
| Laboratori d'analisi | 28.56 | 21.32 |
| Farmacia | 27.54 | 21.37 |
| Zone non trattate | 0 | 0 |
| Totale | 614.4 | 20.33 |

A titolo di esempio, in Figura 11 si può osservare il tipico andamento annuale di temperatura dell'aria interna, calcolato da TRNSYS per un reparto con degenze del NOSGD, e confrontarlo con la curva relativa all'evoluzione della temperatura dell'aria esterna.

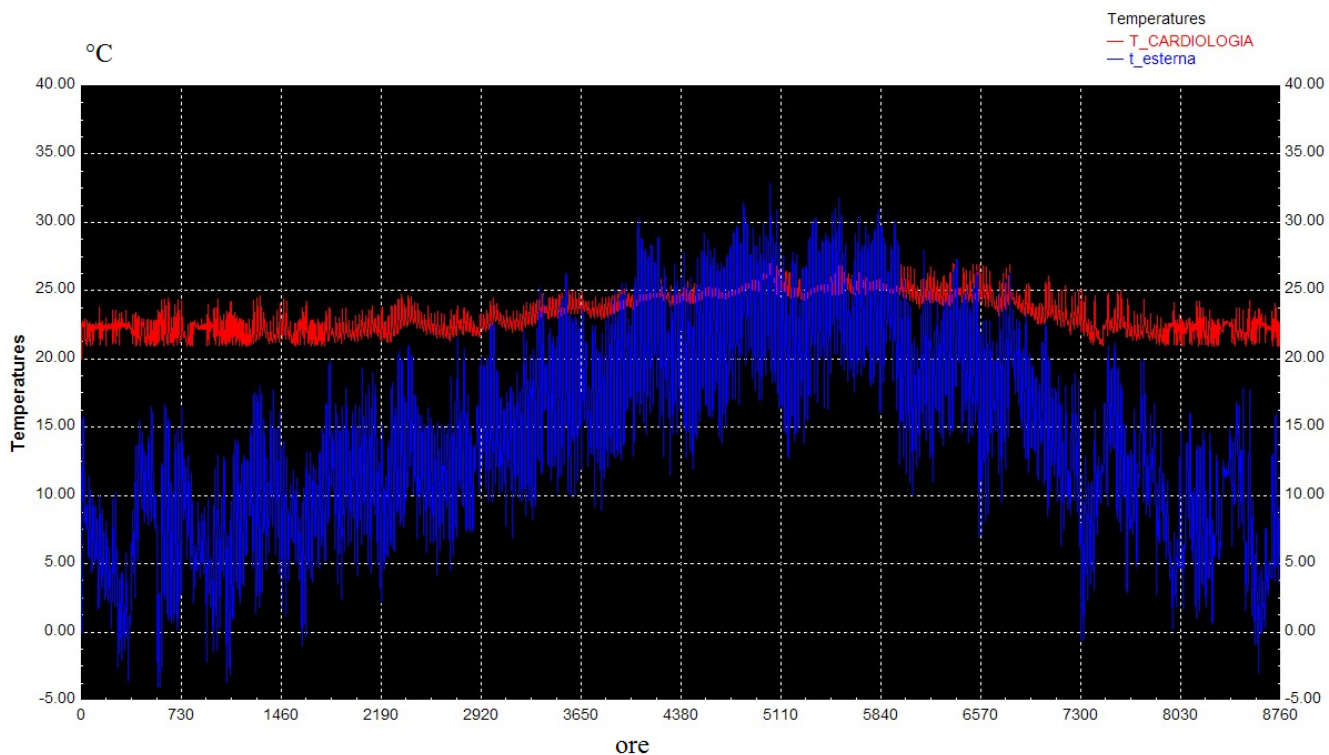


Figura 11. Andamento annuale di temperatura dell'aria del reparto di Cardiologia del NOSGD (in °C, curva rossa), calcolato da TRNSYS per climatizzazione invernale ed estiva con termostatazione reale, e andamento della temperatura dell'aria esterna secondo il TMY (in °C, curva blu)

7.5 Calcolo del fabbisogno di energia primaria per il riscaldamento e confronto con i consumi reali di combustibile

Per la valutazione del fabbisogno annuo di combustibile, una volta ottenuta via software l'energia fornita dai terminali d'impianto nel periodo invernale (vedi Paragrafo 7.2) e quella necessaria per il riscaldamento dell'aria primaria nelle notti estive (vedi Paragrafo 7.3), sono stati utilizzati i rendimenti di emissione, regolazione, distribuzione e generazione, secondo la normativa UNI/TS 11300-2. Sempre sulla base della stessa norma, si è stimata l'energia primaria impiegata per la produzione annuale di ACS, tenendo conto delle perdite di erogazione, distribuzione e accumulo e utilizzando anche qui il rendimento di generazione. Il calcolo completo è presentato in Tabella 26.

Tabella 26. Calcolo dell'energia primaria spesa annualmente per il riscaldamento e l'ACS

| | |
|--|------------------|
| Energia termica fornita ai terminali d'impianto nella stagione invernale (A) | 469.8 TEP |
| Energia fornita per il riscaldamento dell'aria primaria nella stagione estiva (B) | 71.87 TEP |
| Rendimento di emissione (C) | 0.92 |
| Rendimento di regolazione (D) | 0.96 |
| Rendimento di distribuzione (E) | 0.925 |
| Rendimento di generazione (F) | 0.81 |
| Energia primaria utilizzata per il riscaldamento (G) $G = (A + B) / (C * D * E * F)$ | 818.6 TEP |
| Energia termica consumata per l'ACS (H) | 13.14 TEP |
| Perdite di erogazione (I) | 1.015 TEP |
| Perdite di distribuzione (L) | 1.107 TEP |
| Perdite d'accumulo (M) | 1.815 TEP |
| Energia primaria utilizzata per l'ACS (N) $N = (H + I + L + M) / F$ | 21.08 TEP |
| Energia termica primaria utilizzata in totale (O) $O = G + N$ | 837.7 TEP |
| Energia spesa nel 2007 in base al reale consumo di combustibile (P) | 929 TEP |
| Energia spesa nel 2008 in base al reale consumo di combustibile (Q) | 910 TEP |
| Deviazione tra i consumi reali del 2007 e i consumi simulati (R) $R = P - O / P$ | 9.83 % |
| Deviazione tra i consumi reali del 2008 e i consumi simulati (S) $S = Q - O / Q$ | 7.95 % |

7.6 Stima del fabbisogno di energia primaria per il raffrescamento e confronto con i consumi reali di energia elettrica

Per la stima del fabbisogno di energia elettrica per la climatizzazione estiva, in mancanza di un apposito riferimento normativo, ci siamo limitati ad utilizzare l'EER di 2.75 del gruppo frigorifero installato nel NOSGD, stimato tramite la norma provvisoria europea prEN 14511, parti 1-5. Dalle 614.4 TEP di energia frigorifera (vedi Paragrafo 7.4) si passa dunque a una spesa di energia elettrica di 223.4 TEP.

Per fare un confronto con i consumi reali di energia elettrica, è necessario isolare la componente di spesa relativa al solo condizionamento estivo. Mediando i consumi di energia elettrica dei mesi invernali si ottiene una stima dell'energia utilizzata mensilmente per apparecchiature, computer e illuminazione, pari a 110.0 TEP nel 2007 e 111.5 TEP nel 2008. Questo valore va dunque moltiplicato per 12, per ottenere il consumo annuale, e infine sottratto al consumo totale di energia elettrica, per evidenziare la quota riferibile alla refrigerazione. Così facendo si ottiene una spesa di 271.5 TEP nel

2007 e 274.4 TEP nel 2008. La deviazione tra i consumi reali e quelli simulati risulta quindi del 17.7% per il 2007 e del 18.6% per il 2008.

La differenza rilevata tra i consumi simulati e quelli reali, sia per il riscaldamento sia per il raffrescamento, è più che accettabile e comunque giustificabile da tutta una serie d'incertezze presenti, che vanno dall'inesattezza sulla stratigrafia ipotizzata per le pareti, all'imprecisione sui dati inseriti in termini di profili occupazionali, fino alla differenza dei parametri climatici tra il TMY impiegato e gli anni meteorologici reali.

8. Analisi dinamica dell'Ospedale degli Infermi

La simulazione dinamica dell'OdI è stata effettuata con l'edificio nelle condizioni operative interne indicate al Paragrafo 4.3 e utilizzando il TMY della zona di Pisa.

8.1 Analisi dinamica nella stagione invernale con EnergyPlus

La simulazione dinamica nel periodo di riscaldamento (1 novembre-15 aprile) con termostatazione ideale consente di ricavare l'energia termica che i radiatori devono fornire in ogni zona del complesso ospedaliero. I risultati mostrati in Tabella 27 si riferiscono a tutto il periodo invernale e sono suddivisi tra i due padiglioni per quote di dispersioni, ventilazioni e infiltrazioni, apporti solari e carichi interni.

Tabella 27. Fabbisogno di energia termica per il riscaldamento dell'OdI, suddivisa per contributi

| | Energia termica necessaria per il riscaldamento [TEP] |
|--|--|
| Totale dispersioni | 30.66 |
| Totale dispersioni Padiglione Montegrappa | 12.17 |
| Pareti | 7.061 |
| Pavimenti su terra | 0.7310 |
| Coperture | 1.806 |
| Vetrate | 2.571 |
| Totale dispersioni Padiglione Superiore | 18.49 |
| Pareti | 5.814 |
| Pavimenti su terra | 1.101 |
| Coperture | 7.706 |
| Vetrate | 3.871 |
| Totale ventilazioni e infiltrazioni | 9.812 |
| Ventilazioni e infiltrazioni Montegrappa | 2.339 |
| Ventilazioni e infiltrazioni Superiore | 7.473 |
| Totale apporti solari | 5.272 |
| Apporti solari Montegrappa | 3.139 |
| Apporti solari Superiore | 2.133 |
| Totale carichi interni | 8.935 |
| Totale carichi interni Montegrappa | 1.591 |
| Occupanti | 0.4300 |
| Apparecchiature mediche e computer | 0.2666 |
| Illuminazione | 0.8944 |
| Totale carichi interni Superiore | 7.344 |
| Occupanti | 3.165 |

| | |
|--------------------------------------|--------------|
| Apparecchiature mediche e computer | 1.367 |
| Illuminazione | 2.812 |
| Fabbisogno totale Montegrappa | 9.778 |
| Fabbisogno totale Superiore | 16.49 |
| Fabbisogno totale Odi | 26.27 |

In Tabella 28 sono riportati i contributi delle varie macrozone al fabbisogno di energia termica per il riscaldamento invernale. Sono inoltre evidenziati i contributi specifici (per unità di superficie) e orari (anche per unità di tempo d'occupazione).

Tabella 28. Energia termica fornita dai terminali d'impianto per il riscaldamento dell'Odi, suddivisa per ambienti

| | Energia termica necessaria per il riscaldamento [TEP] | Energia termica specifica [mTEP/m²] | Energia termica specifica oraria [μTEP/(m²*h)] |
|-----------------------------|--|---|--|
| Reparti con degenze | 8.411 | 5.099 | 3.665 |
| Uffici/studi | 7.327 | 5.542 | 7.646 |
| Blocco operatorio | 0.2734 | 2.470 | 9.354 |
| Palestra per riabilitazione | 2.686 | 5.330 | 9.339 |
| Ambienti affollati | 4.274 | 2.599 | 2.759 |
| Cucina | 1.573 | 12.28 | 29.40 |
| Locali non occupati | 1.271 | 0.7365 | n.a. |

8.2 Analisi dinamica nella stagione estiva con EnergyPlus

La simulazione dinamica nel periodo di raffrescamento (16 aprile-31 ottobre) con termostatazione ideale consente di ricavare l'energia frigorifera che gli split devono fornire in ogni zona del complesso ospedaliero. I risultati mostrati in Tabella 29 si riferiscono a tutto il periodo estivo e sono suddivisi tra i due padiglioni per quote di dispersioni, ventilazioni e infiltrazioni, apporti solari e carichi interni.

Tabella 29. Fabbisogno di energia frigorifera per il raffrescamento dell’Odi, suddivisa per contributi

| | Energia frigorifera necessaria per il raffrescamento [TEP] |
|--|---|
| Totale dispersioni | -25.54 (apporto di raffrescamento) |
| Totale dispersioni Padiglione Montegrappa | -8.272 |
| Pareti | -0.5280 |
| Pavimenti su terra | -5.214 |
| Coperture | 1.364 |
| Vetrate | -3.894 |
| Totale dispersioni Padiglione Superiore | -17.27 |
| Pareti | -2.728 |
| Pavimenti su terra | -12.19 |
| Coperture | 1.628 |
| Vetrate | -3.982 |
| Totale ventilazioni e infiltrazioni | -7.876 (apporto di raffrescamento) |
| Ventilazioni e infiltrazioni Montegrappa | -2.970 |
| Ventilazioni e infiltrazioni Superiore | -4.906 |
| Totale apporti solari | 26.40 |
| Apporti solari Montegrappa | 13.46 |
| Apporti solari Superiore | 12.94 |
| Totale carichi interni | 25.23 |
| Totale carichi interni Montegrappa | 3.916 |
| Occupanti | 0.9900 |
| Apparecchiature mediche e computer | 0.5940 |
| Illuminazione | 2.332 |
| Totale carichi interni Superiore | 21.32 |
| Occupanti | 8.514 |
| Apparecchiature mediche e computer | 4.202 |
| Illuminazione | 8.602 |
| Fabbisogno totale Montegrappa | 6.138 |
| Fabbisogno totale Superiore | 12.08 |
| Fabbisogno totale Odi | 18.22 |

In Tabella 30 sono riportati i contributi delle varie macrozone al fabbisogno di energia frigorifera per il raffrescamento estivo. Sono di nuovo evidenziati anche i contributi specifici (per unità di superficie) e orari (anche per unità di tempo d’occupazione).

Tabella 30. Energia frigorifera fornita dai terminali d'impianto per il raffrescamento dell'OdI, suddivisa per ambienti

| | Energia frigorifera necessaria per il raffrescamento [TEP] | Energia frigorifera specifica [mTEP/m²] | Energia frigorifera specifica oraria [μTEP/(m²*h)] |
|-----------------------------|---|---|---|
| Reparti con degenze | 6.529 | 3.958 | 3.139 |
| Uffici/studi | 5.351 | 3.788 | 6.238 |
| Blocco operatorio | 3.030 | 27.37 | 103.7 |
| Palestra per riabilitazione | 0.9125 | 1.811 | 8.497 |
| Ambienti affollati | 1.421 | 0.8642 | 0.4167 |
| Cucina | 0.3598 | 2.809 | 7.585 |
| Locali non occupati | 0.2064 | 0.1196 | n.a. |

Un altro tipo d'informazione che si può ottenere dalla simulazione dinamica è lo sfasamento temporale della risposta in termini di temperatura dell'aria interna rispetto all'onda termica giornaliera esterna. Questo ritardo è dovuto alle caratteristiche capacitive dell'edificio, dipendenti principalmente dalla sua massa frontale. A titolo di esempio, in Figura 12 vengono rappresentati l'andamento della temperatura dell'aria esterna della settimana centrale di luglio e quello calcolato da EnergyPlus, nello stesso periodo, per l'aria interna di una zona dell'OdI non condizionata in estate. Lo sfasamento giornaliero in questo caso si può stimare in circa 5 ore di ritardo.

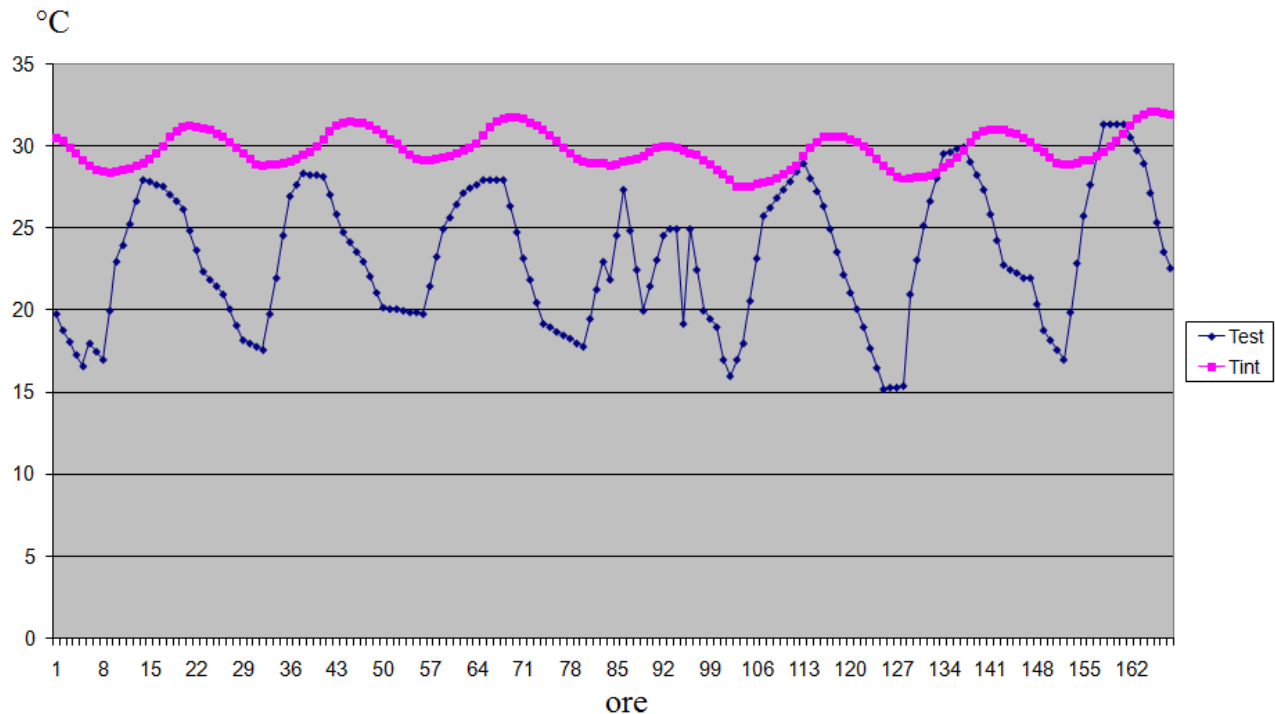


Figura 12. Andamento della temperatura dell'aria esterna secondo il TMY (in °C, curva blu) della settimana centrale di luglio e corrispondente andamento di temperatura dell'aria interna di una zona dell'OdI non climatizzata (in °C, curva rosa), calcolato da EnergyPlus

8.3 Calcolo del fabbisogno di energia primaria per il riscaldamento e confronto con i consumi reali di combustibile

Per la valutazione in TEP del fabbisogno annuo di combustibile, una volta ottenuta via software l'energia fornita dai terminali d'impianto nel periodo invernale (vedi Paragrafo 8.1), sono stati utilizzati i rendimenti di emissione, regolazione, distribuzione e generazione; si è inoltre stimata l'energia primaria impiegata per la produzione annuale di ACS. Il calcolo completo è presentato in Tabella 31.

Tabella 31. Calcolo dell'energia primaria spesa annualmente per il riscaldamento e l'ACS

| | |
|--|------------------|
| Energia termica fornita ai terminali d'impianto nella stagione invernale (A) | 26.27 TEP |
| Rendimento di emissione (B) | 0.90 |
| Rendimento di regolazione (C) | 0.88 |
| Rendimento di distribuzione (D) | 0.88 |
| Rendimento di generazione (E) | 0.86 |
| Energia primaria utilizzata per il riscaldamento (F) $F = A / (B * C * D * E)$ | 43.83 TEP |
| Energia primaria utilizzata per l'ACS (G) | 2.491 TEP |
| Energia termica primaria utilizzata in totale (H) $H = F + G$ | 46.32 TEP |
| Energia spesa nel 2007 in base al reale consumo di combustibile (I) | 51.8 TEP |
| Deviazione tra i consumi reali del 2007 e i consumi simulati (L) $L = I - H / I$ | 10.6 % |

Anche in questo caso la differenza rilevata tra i consumi simulati e quelli reali è assolutamente ammissibile, considerando le numerosi fonti d'incertezza presenti nei dati d'ingresso della simulazione e le semplificazioni adoperate nel modello.

8.4 Stima del fabbisogno di energia primaria per il raffrescamento

Per la stima del fabbisogno di energia elettrica per la climatizzazione estiva, si è utilizzato l'EER di 2.9 degli split elettrici installati nell'OdI. La richiesta di energia frigorifera di 18.22 TEP (vedi Paragrafo 8.2) viene dunque soddisfatta con una spesa di energia elettrica di 6.283 TEP. La quota di energia elettrica impiegata per la refrigerazione risulta quindi molto piccola rispetto alle 153 TEP di energia elettrica complessivamente consumate dalla struttura sanitaria (vedi Paragrafo 4.4).

9. Analisi parametrica per il Nuovo Ospedale San Giovanni di Dio con TRNSYS

Tra i risultati della simulazione dinamica dell'edificio, si è già potuto mettere in luce il peso dei vari contributi di dispersioni, ventilazioni e infiltrazioni, apporti solari e carichi interni al fabbisogno complessivo dell'edificio, in termini sia di energia termica per il riscaldamento che di energia frigorifera per il raffrescamento degli ambienti ospedalieri.

Un maggiore approfondimento può essere compiuto per mezzo di un'analisi parametrica, facendo variare alcuni fattori come le caratteristiche strutturali del fabbricato e il clima esterno.

9.1 Rivestimento delle pareti esterne con un cappotto isolante

Un primo intervento ipotizzato sull'edificio è la coibentazione delle pareti esterne tramite cappotto isolante. Con un'aggiunta di 6 cm di polistirene espanso e un ulteriore intonaco di 1.5 cm, la trasmittanza delle pareti scende al di sotto di $0.36 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, che è il limite regolamentare che entrerà in vigore dal 2010, secondo il Decreto Legislativo 311 del 2006. La simulazione effettuata con TRNSYS della struttura ospedaliera così modificata fornisce un margine di risparmio del 4.37% sull'energia primaria necessaria per il riscaldamento, corrispondente a 36.55 TEP annue. L'energia elettrica impiegata per la refrigerazione non subisce invece significative modifiche.

9.2 Sostituzione degli infissi con inserimento di tripli vetri

Un altro intervento simulato sull'edificio è la sostituzione di tutti gli infissi con tripli vetri. In questo caso si ottiene un margine di risparmio dell'1.76% sull'energia primaria necessaria per il riscaldamento, corrispondente a 14.68 TEP annue. Anche l'energia elettrica impiegata per la refrigerazione ha una leggera diminuzione, pari allo 0.77%, corrispondente a 1.73 TEP.

9.3 Inserimento di una copertura isolante sui tetti

I tetti possono essere coibentati aggiungendo 10 cm di resina isolante; in questo modo la trasmittanza delle coperture scende al di sotto di $0.32 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, che è il limite regolamentare che entrerà in vigore dal 2010. La simulazione effettuata con TRNSYS fornisce un margine di risparmio del 3.72% sull'energia primaria necessaria per il riscaldamento, corrispondente a 31.06 TEP annue. L'energia elettrica impiegata per la refrigerazione non subisce invece variazioni significative.

9.4 Incremento della massa frontale dell'edificio

Un altro parametro che viene fatto variare per essere simulato con TRNSYS è la massa frontale del fabbricato; essa viene raddoppiata, mantenendo costante la trasmittanza delle pareti. Questo intervento, sebbene porti a uno sfasamento maggiore dell'onda termica giornaliera, non produce effetti apprezzabili sui consumi energetici stagionali, né invernali, né estivi.

9.5 Variazione della zona climatica

Un ultimo fattore che è stato preso in considerazione sono le condizioni meteorologiche esterne. Come già detto, il comune di Firenze si trova nella zona climatica D e i GG del TMY utilizzato da TRNSYS sono 1852. Si è provato allora a simulare il comportamento dinamico dell'ospedale in corrispondenza di un clima più caldo (Palermo, zona B, TMY con 966 GG) e di uno più freddo (Bolzano, zona E, TMY con 2498 GG).

Il passaggio al clima di Palermo comporta una diminuzione dell'energia primaria per il riscaldamento del 54.31% (454.1 TEP annue in meno), mentre con le condizioni esterne di Bolzano i consumi aumentano del 41.07% (343.3 TEP in più). Diversamente, l'energia elettrica per il raffrescamento estivo col clima di Palermo sale del 99.13%, con una richiesta di ulteriori 223.2 TEP annue, mentre con quello di Bolzano scende del 20.99%, con un risparmio di 47.27 TEP.

10. Analisi parametrica per l’Ospedale degli Infermi con EnergyPlus

Un’analisi parametrica analoga a quella effettuata con TRNSYS per il NOSGD (vedi Capitolo 9) è stata svolta con EnergyPlus per il Padiglione Montegrappa dell’Odl.

10.1 Modifica della trasmittanza delle pareti esterne

In Tabella 32 viene evidenziato l’effetto sui consumi energetici della variazione della trasmittanza delle pareti esterne dell’edificio rispetto al valore di partenza di 2.071 W/(m²K).

Tabella 32. Effetto della variazione della trasmittanza delle pareti esterne sui fabbisogni energetici

| Trasmittanza [W/(m ² K)] | Energia primaria necessaria per il riscaldamento invernale [TEP] | Risparmio energetico (valori negativi indicano un risparmio) | | Energia elettrica necessaria per il raffrescamento estivo [TEP] | Risparmio energetico (valori negativi indicano un risparmio) | |
|--|---|--|----------|--|--|----------|
| | | [%] | [TEP] | | [%] | [mTEP] |
| 2.071 | 16.31 | 0% | 0 | 2.117 | 0% | 0 |
| 1.257 | 12.18 | -25.31% | -4.129 | 2.139 | 1.054% | 22.31 |
| 3.646 | 24.43 | 49.81% | 8.124 | 2.101 | -0.7378% | -15.62 |

10.2 Sostituzione degli infissi con inserimento di doppi e tripli vetri

La sostituzione dei vetri singoli presenti nel fabbricato con doppi e tripli vetri porta ai risparmi energetici riportati in Tabella 33.

Tabella 33. Effetto della sostituzione degli infissi sui fabbisogni energetici

| Tipologia d’infissi | Energia primaria necessaria per il riscaldamento invernale [TEP] | Risparmio energetico | | Energia elettrica necessaria per il raffrescamento estivo [TEP] | Risparmio energetico | |
|------------------------|---|-------------------------|----------|--|-------------------------|----------|
| | | [%] | [TEP] | | [%] | [mTEP] |
| Vetro singolo | 16.31 | 0% | 0 | 2.117 | 0% | 0 |
| Doppio vetro | 15.37 | -5.784% | -0.9434 | 1.980 | -6.471% | -137.0 |
| Tripla vetro | 14.88 | -8.775% | -1.431 | 2.139 | 1.054% | 22.31 |

10.3 Modifica della massa frontale dell’edificio

In Tabella 34 viene mostrato l’effetto sui consumi energetici della variazione della massa frontale dell’edificio rispetto al valore iniziale di 470 kg/m².

Tabella 34. Effetto della variazione della massa frontale dell'edificio sui fabbisogni energetici

| Massa frontale [kg/m ²] | Energia primaria necessaria per il riscaldamento invernale [TEP] | Risparmio energetico | | Energia elettrica necessaria per il raffrescamento estivo [TEP] | Risparmio energetico | |
|-------------------------------------|--|----------------------|----------|---|----------------------|----------|
| | | [%] | [TEP] | | [%] | [mTEP] |
| 470 | 16.31 | 0% | 0 | 2.117 | 0% | 0 |
| 235 | 16.46 | 0.9016% | 0.1471 | 2.154 | 1.771% | 37.48 |
| 940 | 15.97 | -2.089% | -0.3408 | 2.094 | -1.096% | -23.20 |
| 1410 | 16.51 | 1.253% | 0.2044 | 2.071 | -2.171% | -45.96 |

10.4 Variazione dell'orientazione dell'edificio

Un altro interessante fattore da analizzare è l'orientazione dell'edificio. Da un'inclinazione iniziale del Padiglione Montegrappa di 33° da nord verso ovest, si è prima ruotato l'edificio di 90° verso ovest e poi lo si è diretto perfettamente ad est (rotazione di 123° verso est rispetto alla posizione originaria). I risultati di queste simulazioni sono riportati in Tabella 35.

Tabella 35. Effetto dell'orientazione dell'edificio sui fabbisogni energetici

| Orientazione da nord verso ovest [°] | Energia primaria necessaria per il riscaldamento invernale [TEP] | Risparmio energetico | | Energia elettrica necessaria per il raffrescamento estivo [TEP] | Risparmio energetico | |
|--------------------------------------|--|----------------------|----------|---|----------------------|----------|
| | | [%] | [TEP] | | [%] | [mTEP] |
| 33 | 16.31 | 0% | 0 | 2.117 | 0% | 0 |
| 123 | 16.03 | -1.737% | -0.2834 | 1.843 | -12.92% | -273.5 |
| -90 | 15.44 | -5.344% | -0.8716 | 1.934 | -8.621% | -182.5 |

10.5 Variazione della zona climatica

L'ultimo parametro considerato sono le condizioni meteorologiche esterne. Il comune di San Miniato si trova nella zona climatica D e i GG del TMY utilizzato da EnergyPlus sono 1868. Si è quindi simulato il comportamento dinamico del Padiglione Montegrappa in corrispondenza delle aree climatiche di Napoli (zona C, TMY con 1583 GG), Palermo (zona B, TMY con 994 GG) e Bolzano (zona E, TMY con 2773 GG). In Tabella 36 viene mostrato l'effetto sui consumi energetici della variazione della fascia climatica.

Tabella 36. Effetto della variazione della zona climatica sui fabbisogni energetici

| Zona climatica e GG | Energia primaria necessaria per il riscaldamento invernale [TEP] | Risparmio energetico | | Energia elettrica necessaria per il raffrescamento estivo [TEP] | Risparmio energetico | |
|---------------------|--|----------------------|----------|---|----------------------|----------|
| | | [%] | [TEP] | | [%] | [mTEP] |
| D 1868 | 16.31 | 0% | 0 | 2.117 | 0% | 0 |
| C 1583 | 13.09 | -19.77% | -3.225 | 2.769 | 30.80% | 652.0 |
| B 994 | 5.868 | -64.02% | -10.44 | 3.550 | 67.71% | 1433 |
| E 2773 | 27.38 | 67.85% | 11.07 | 1.062 | -49.83% | -1055 |

11. Conclusioni e sviluppi previsti

Nonostante la complessità delle strutture ospedaliere e la diversificazione delle destinazioni sanitarie, entrambi i codici di calcolo utilizzati, TRNSYS ed EnergyPlus, si sono rivelati assolutamente adatti a simulare la dinamica degli edifici, in termini di temperatura, umidità e potenze fornite per il riscaldamento e il raffrescamento delle singole zone di controllo, in due tipologie costruttive particolarmente significative per questo settore edilizio. Avendo a disposizione per due ospedali gli storici dei consumi di combustibile e di energia elettrica, si è potuto quindi effettuare una validazione di massima, che ha evidenziato la bontà delle approssimazioni effettuate per costruire i modelli dei due sistemi edificio-impianto, con le relative schede di utilizzo, e per simulare il clima esterno. I tempi di calcolo non si ritengono altresì particolarmente onerosi: circa 20 minuti per la simulazione annuale del NOSGD con TRNSYS e 4 ore per quella dei due padiglioni dell'OdI con EnergyPlus, utilizzando personal computer di prestazioni medie.

Questi modelli di calcolo validati specificamente sulla realtà ospedaliera consentiranno di eseguire approfondite analisi parametriche, simulando anche strutture virtuali, per costruire una banca dati di consumi nell'edilizia sanitaria. L'obiettivo finale è quello di predisporre linee guida per il risparmio energetico in questo settore e individuare precisi indici di riferimento per la valutazione delle prestazioni energetiche, utilizzabili in leggi, regolamenti, normative, coerentemente con le direttive europee in tema d'usi finali dell'energia.

Dall'analisi sui due edifici benchmark risulta evidente la differenza tra le varie zone funzionali dell'ospedale in termini di consumi specifici (per metro quadrato di superficie in pianta) termici ed elettrici. La chiave per una corretta valutazione della spesa energetica e per la definizione di un parametro di riferimento di prestazione appare dunque la caratterizzazione delle diverse destinazioni d'uso con specifici requisiti all'interno della struttura; l'indicatore di consumo per posto letto sembra invece aver perso di significato, in considerazione della riorganizzazione delle strutture sanitarie, con crescente utilizzo ambulatoriale e diminuzione delle degenze.

Si sottolinea infine che la disponibilità dimostrata dalla ASL 11 di Empoli non si limita al supporto fornito per l'Ospedale di San Miniato, ma si potrebbe estendere anche all'Ospedale San Giuseppe di Empoli, già oggetto da parte nostra d'indagine preliminare con vari sopralluoghi. Questo grande ospedale è particolarmente ben progettato in termini d'involucro e presenta soluzioni impiantistiche interessanti, specialmente per gli aspetti di regolazione, con unità di controllo ambiente

presenti in ogni locale. Da evidenziare è poi il monitoraggio capillare che viene effettuato sulle temperature dei locali e la rilevazione di temperature e portate in tutti i settori dei circuiti idraulici ed aeraulici.

L'accesso ai dati operativi ci potrà essere fornito in varie finestre temporali, per seguire le fasi di messa a punto e gestione degli impianti. La maggiore risoluzione spaziale e temporale delle variabili termotecniche che avremo a disposizione ci consentirà di ottenere una validazione più robusta dei codici di calcolo. A sua volta, questo aprirà la strada all'effettiva implementazione e verifica di soluzioni di gestione che si sono dimostrate efficaci nell'ambiente simulato.