



Università degli Studi di Cagliari

## **DOTTORATO DI RICERCA**

Progettazione Meccanica

Ciclo XXV

Diagnosi Energetica dell' Azienda Ospedaliera "G.Brotzu"

Settore/i scientifico disciplinari di afferenza

ING-IND/09

Presentata da: Dott. Ing. Francesco Valentino Caredda

Coordinatore Dottorato Prof. Ing. Natalino Mandas

Tutor/Relatore Prof. Ing. Natalino Mandas

Esame finale anno accademico 2011 – 2012

# INDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUZIONE</b>	<b>5</b>
1.1	OBIETTIVI DELLA RICERCA	6
1.2	STRUTTURA DELLA TESI	7
<b>2</b>	<b>L'AZIENDA OSPEDALIERA BROTZU</b>	<b>8</b>
2.1	DESCRIZIONE DEGLI EDIFICI	9
2.2	DESCRIZIONE DEGLI IMPIANTI	12
2.2.1	IMPIANTI ELETTRICI	13
2.2.2	IMPIANTI TERMICI	15
2.2.2.1	CENTRALE TERMICA	15
2.2.2.2	SOTTOCENTRALE TERMICA	17
2.2.2.3	PRODUZIONE ACQUA CALDA SANITARIA	21
2.2.2.4	CENTRALE FRIGORIFERA	23
2.2.3	IMPIANTI DI DISTRIBUZIONE DELL'ENERGIA TERMICA	27
2.2.4	IMPIANTI DI EROGAZIONE DELL'ENERGIA TERMICA	29
2.2.5	SISTEMI DI MONITORAGGIO DEI CONSUMI TERMICI	33
2.2.5.1	MONITORAGGIO RISCALDAMENTO E ACS	33
2.2.5.2	MONITORAGGIO RAFFRESCAMENTO	34
<b>3</b>	<b>AUDIT ENERGETICO "AOB"</b>	<b>36</b>
3.1	ELABORAZIONE ED ANALISI DEI DATI ACQUISITI	36
3.1.1	RISCALDAMENTO	36
3.1.2	PREPARAZIONE ACS	44
3.1.3	RAFFRESCAMENTO	48
3.2	BILANCIO ENERGETICO AOB	53
3.2.1	ENERGIA IN INGRESSO	53
3.2.1.1	ENERGIA TERMICA (COMBUSTIBILE)	54
3.2.1.2	ENERGIA ELETTRICA	56
3.2.2	CONSUMI ENERGETICI FINALI	60
3.3	VALUTAZIONE INDICI ENERGETICI AOB	63
<b>4</b>	<b>ANALISI TERMO-ENERGETICA TRAMITE MODELLAZIONE NUMERICA</b>	<b>66</b>
4.1	CODICE UTILIZZATO PER LA SIMULAZIONE DINAMICA: "TRNSYS"	66
4.1.1	DESCRIZIONE TRNSYS	66
4.1.2	CALIBRAZIONE DEL CODICE	67
4.1.2.1	BESTEST/ASHRAE	67
4.1.2.2	UNI 15265	78
4.2	MODELLAZIONE CORPO CENTRALE AOB	84
4.2.1	DEFINIZIONE DEL MODELLO	85

4.2.1.1	DATI IN INGRESSO .....	85
4.2.1.2	INDIVIDUAZIONE ZONE TERMICHE.....	86
<b>4.2.2</b>	<b>IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO.....</b>	<b>89</b>
4.2.2.1	SIMULATION STUDIO .....	91
4.2.2.2	TRNBUILD .....	95
4.2.2.3	ELABORAZIONE RISULTATI (MATLAB) .....	100
4.2.2.4	SVILUPPO CRONOLOGICO DEL CODICE .....	101
<b>4.2.3</b>	<b>MODELLO MATEMATICO TRNSYS-TRNBUILD.....</b>	<b>102</b>
<b>4.3</b>	<b>RISULTATI OTTENUTI .....</b>	<b>109</b>
4.3.1	CONSUMI GLOBALI DI ENERGIA TERMICA.....	109
4.3.2	CONSUMI ENERGETICI PER PIANO.....	111
4.3.3	ANALISI DELLE POTENZE DI PICCO .....	113
<b>4.4</b>	<b>CONFRONTO RISULTATI SIMULAZIONE-AUDIT.....</b>	<b>114</b>
4.4.1	POTENZE TERMICHE.....	114
4.4.2	CONSUMI ANNUALI E MENSILI .....	115
<b>5</b>	<b>ANALISI DEGLI INTERVENTI PROPOSTI PER IL RISPARMIO ENERGETICO .....</b>	<b>118</b>
<b>5.1</b>	<b>INTERVENTI SULL'INVOLUCRO .....</b>	<b>118</b>
<b>5.2</b>	<b>INTERVENTI SUI SISTEMI DI MONITORAGGIO DELL'ENERGIA.....</b>	<b>122</b>
5.2.1	MONITORAGGIO CENTRALI TECNOLOGICHE .....	122
5.2.2	MONITORAGGIO SEPARATO DEI PIANI (ENERGIA TERMICA) .....	123
<b>5.3</b>	<b>INTERVENTI SUGLI IMPIANTI.....</b>	<b>126</b>
5.3.1	PROCEDURE E SOFTWARE DI CALCOLO .....	128
5.3.2	SISTEMI ANALIZZATI .....	129
5.3.2.1	SOLARE TERMICO.....	129
5.3.2.2	SOLARE FOTOVOLTAICO.....	133
5.3.2.3	COGENERAZIONE .....	135
5.3.2.4	TRIGENERAZIONE.....	139
5.3.2.5	SISTEMA MULTIENERGETICO.....	142
5.3.3	ANALISI DETTAGLIATA SISTEMI PROPOSTI .....	146
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONI .....</b>	<b>152</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>154</b>
	<b>APPENDICI.....</b>	<b>156</b>
	<b>APPENDICE A) PLANIMETRIE CORPO CENTRALE.....</b>	<b>156</b>
	<b>APPENDICE B) CARATTERISTICHE SUPERFICI OPACHE E TRASPARENTI.....</b>	<b>169</b>
	<b>APPENDICE C) CARATTERISTICHE IMPIANTI .....</b>	<b>181</b>

## SIMBOLOGIA

$A$	superficie della parete	$[m^2]$
$C$	capacità termica	$[J/K]$
$C_p$	calore specifico	$[J/(kg\ K)]$
$FCS$	fattore di contributo solare	$[\%]$
$h$	coefficiente di scambio termico convettivo	$[W/(m^2\ K)]$
$IRR$	tasso interno di rendimento (internal rate of return)	$[\%]$
$\dot{m}$	portata massica	$[kg/s] [kg/hr]$
$P$	potenza impianto	$[W] [kJ/hr]$
$PBT$	tempo di ritorno dell'investimento (pay back time)	[anni]
$\dot{q}$	flusso termico specifico	$[W/m^2] [kJ/(hr\ m^2)]$
$\dot{Q}_{cplg,i}$	flussi termici convettivi tra due zone termiche	$[W] [kJ/hr]$
$\dot{Q}_{g,c,i}$	apporti interni gratuiti convettivi	$[W] [kJ/hr]$
$\dot{Q}_{g,r,i,wi}$	apporti interni gratuiti radiativi	$[W] [kJ/hr]$
$\dot{Q}_i$	flusso termico convettivo verso il nodo i-esimo	$[W] [kJ/hr]$
$\dot{Q}_{inf,i}$	potenza termica scambiata per infiltrazione	$[W] [kJ/hr]$
$\dot{Q}_{lat,i}$	apporti termici di calore latente	$[W] [kJ/hr]$
$\dot{Q}_{long,wi}$	flussi termici sull'infrarosso (onde lunghe)	$[W] [kJ/hr]$
$\dot{Q}_{r,wi}$	flusso termico radiativo verso il nodo i-esimo	$[W] [kJ/hr]$
$\dot{q}_{s,i}$	scambio termico conduttivo specifico (parete interna)	$[W/m^2] [kJ/(hr\ m^2)]$
$\dot{q}_{s,o}$	scambio termico conduttivo specifico (parete esterna)	$[W/m^2] [kJ/(hr\ m^2)]$
$\dot{Q}_{sol,wi}$	apporti solari verso le pareti interni	$[W] [kJ/hr]$
$\dot{Q}_{surf,i}$	scambi termici tra il nodo i-esimo e le pareti della zona	$[W] [kJ/hr]$
$\dot{Q}_{vent}$	potenza termica scambiata per ventilazione	$[W] [kJ/hr]$
$\dot{Q}_{wall-gain}$	apporti radianti della parete	$[W] [kJ/hr]$
$R$	resistenza termica	$[K/W] [K\ hr/kJ]$
$T$	temperatura	$[K] [^\circ C]$
$U$	trasmittanza termica	$[W/(m^2\ K)]$
$VAN$	valore attuale netto	$[€]$
$W_{g,i}$	apporti interni gratuiti di calore latente	$[W] [kJ/hr]$
$\omega$	umidità assoluta	$[kg_{vap}/kg_{aria}]$

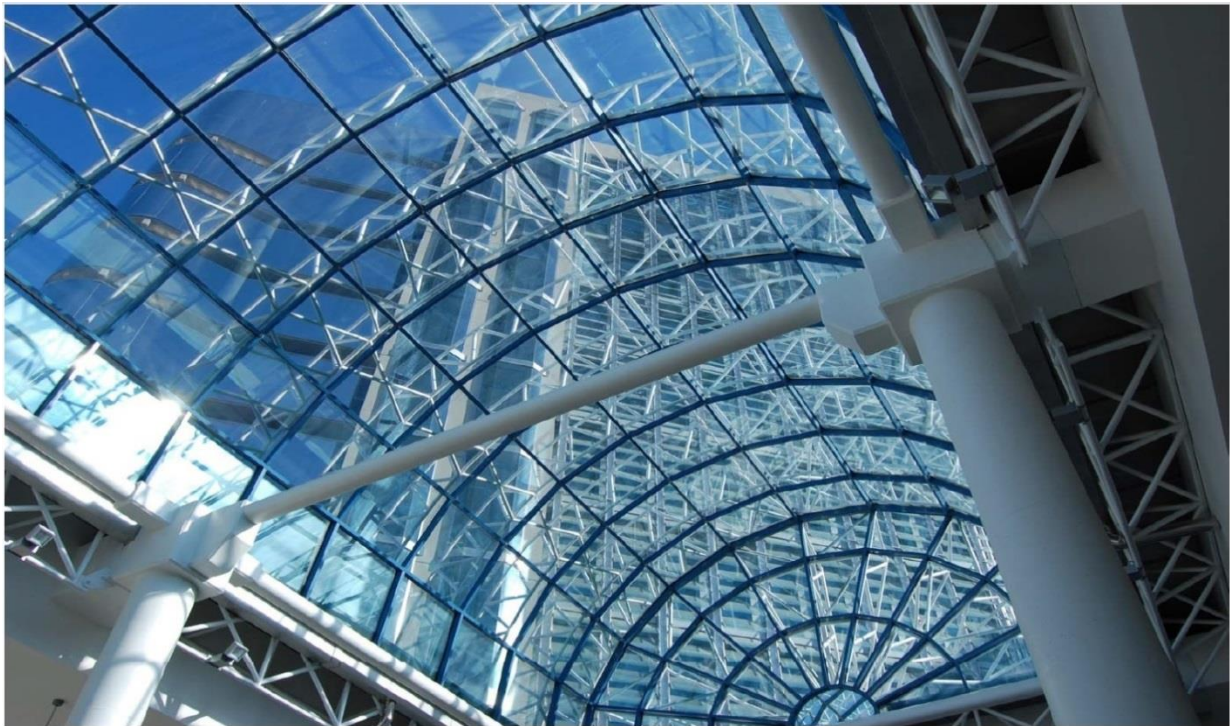
**Pedici**

$a$	ambiente
$b$	condizione al contorno
$c$	convettivo
$cplg, i$	zone termiche adiacenti alla i-esima
$g$	vetro
$i$	zona termica (nodo) i-esima
$inf$	infiltrazioni
$j$	zona termica (nodo) j-esima adiacente alla i-esima
$o$	esterno
$r$	radiativo
$req$	richiesta
$s$	superficie - parete
$star$	nodo virtuale
$set, i, c$	set-point raffrescamento
$set, i, h$	set-point riscaldamento
$vent$	ventilazione
$zone, k$	zona termica k-esima
$\tau$	tempo

# 1 INTRODUZIONE

Tra tutte le strutture civili, quelle ospedaliere sono fra le più energivore. La causa principale va ricercata nelle particolari attività svolte, che richiedono grandi quantità di energia per poter garantire la miglior qualità di servizio agli utenti e per far fronte all'importante domanda di energia elettrica richiesta dalle apparecchiature e dagli strumenti diagnostici. Un'altra importante voce che incide sul bilancio energetico di un ospedale è costituita dalla climatizzazione degli ambienti, legata al raggiungimento e mantenimento delle elevate qualità dell'aria richieste per svolgere le attività sanitarie, si pensi alle particolari condizioni di astaticità richieste nei reparti operatori o nei locali dove sono assistiti i pazienti con patologie critiche. Occorre inoltre considerare l'approccio con cui molti degli ospedali oggi presenti nel nostro paese sono stati costruiti. Nei decenni precedenti, grazie ai bassi costi dell'energia e soprattutto ad una minore sensibilità politica e sociale verso la sostenibilità economica ed ambientale delle attività umane, la progettazione e costruzione delle strutture sanitarie era orientata al raggiungimento degli standard sanitari richiesti, trascurando l'efficienza del sistema edificio-impianto.

Da queste premesse appare evidente come i bilanci energetici degli ospedali, e più in generale delle strutture sanitarie, presentino elevati consumi elettrici e termici i cui costi ricadono nei bilanci economici delle aziende ospedaliere, e di conseguenza, vista l'elevata incidenza dei costi della sanità pubblica, sulle tasche dei cittadini-contribuenti. In questi tempi di crisi economica, di fronte alla sempre più impellente necessità di contenere la spesa pubblica e costi dei servizi ai cittadini, senza intaccare il livello qualitativo delle prestazioni erogate, la gestione energetica degli ospedali è una tra le innumerevoli voci di spesa la cui razionalizzazione è di fatto obbligatoria. Il contrasto tra richieste di contenimento della spesa e mantenimento degli standard qualitativi può essere ottenuto soltanto migliorando l'efficienza del sistema in esame, e nello specifico del problema che intendiamo affrontare, ottimizzando la gestione energetica nelle strutture ospedaliere. La soluzione di questo problema richiede nuovi strumenti e conoscenze, nonché un approccio diverso rispetto a quello seguito in passato, più attento alle tematiche di sostenibilità economica, energetica ed ambientale.



**Figura 1.1 – Vista interna Hall dell’Azienda Ospedaliera Brotzu.**

In questo contesto si inserisce il lavoro presentato nella presente tesi, redatta a conclusione del dottorato di ricerca in “Progettazione Meccanica” presso l’Università di Cagliari, in cui è esposta la realizzazione della diagnosi energetica dell’Azienda Ospedaliera Brotzu, una delle più importanti realtà sanitarie della regione Sardegna. Questo studio è stato condotto in sostegno al progetto di ricerca dal titolo: *“Proposta di un sistema competitivo e flessibile per la riduzione del fabbisogno e l’ottimizzazione della gestione energetica dell’Azienda Ospedaliera G. Brotzu”*, finanziato dalla Regione Sardegna (Legge Regionale 7-8-2007 N°7) e realizzato dal Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Chimica e dei Materiali (DIMCM), in collaborazione con l’Azienda Ospedaliera Brotzu [1].

## 1.1 OBIETTIVI DELLA RICERCA

La ricerca svolta ha avuto come scopo la diagnosi energetica dell’Azienda Ospedaliera Brotzu, ossia l’analisi della situazione energetica attuale e la proposta di interventi atti a migliorarne la gestione energetica e ridurre i consumi. Vista la particolare complessità del nosocomio preso in esame, questo lavoro vuole rappresentare un esempio concreto di applicazione di metodologie e criteri scientifici, estendibili non solo ad altre realtà ospedaliere del contesto regionale e nazionale, ma a qualsiasi edificio adibito ad altri usi.

Il lavoro di ricerca svolto può essere sommariamente suddiviso in tre parti: audit energetico; analisi termoenergetica tramite modellazione dinamica dell’edificio; proposte d’intervento. Le prime due parti sono state portate avanti parallelamente, sia per motivi di organizzazione temporale che per affinità scientifica, mentre l’ultima parte, essendo fortemente dipendente dai risultati delle due fasi precedenti, è stata affrontata al termine del progetto di ricerca. Particolare attenzione è stata dedicata allo sviluppo della modellazione dinamica, strumento che funge da chiave di volta tra le altre due fasi del lavoro, consentendo una maggiore profondità d’analisi sui risultati dell’audit e lo studio di proposte d’intervento ad hoc per il caso sotto esame. Gli obiettivi specifici delle tre fasi della ricerca sono di seguito esposti.

Tramite l’audit energetico si vuole pervenire ad una descrizione realistica, dal punto di vista energetico, dello stato attuale dei luoghi. L’obiettivo principale di questa fase del lavoro è quindi rivolta all’individuazione delle caratteristiche peculiari del sistema edificio impianto e alla definizione del bilancio energetico dell’azienda ospedaliera. Per quanto riguarda l’edificio, nell’ottica di dover implementare un modello numerico dell’ospedale nella fase successiva del lavoro, oltre alla conoscenza delle caratteristiche termofisiche delle strutture opache e trasparenti che la compongono, si dovrà concentrare l’attenzione sulla destinazione d’uso di tutti gli ambienti presenti. Il bilancio energetico del sistema edificio-impianto deve considerare i flussi energetici in ingresso agli impianti, contemplando l’analisi storica dei consumi, la loro incidenza economica, e gli usi finali dell’energia, dipendenti dalle richieste di carico delle varie utenze che operano nell’ospedale.

La seconda fase prevede l’analisi termoenergetica dell’azienda ospedaliera, tramite un modello dinamico virtuale dell’ospedale costruito con il codice TRNSYS-TRNBUILD [2]. Partendo dai dati reperiti tramite l’audit, si vuole ricostruire l’intero ospedale e simularne il comportamento orario in regime dinamico, studiandone il comportamento termico al variare del tempo, delle condizioni al contorno e dell’utilizzo che ne viene fatto da parte delle utenze sanitarie. Con il modello virtuale, che verrà poi messo a disposizione dell’Azienda Ospedaliera Brotzu, sarà possibile conseguire i seguenti obiettivi: analisi e verifica dei consumi rilevati durante la fase di audit, con lo scopo di individuare le principali cause del consumo e indirizzare la scelta delle strategie di risparmio energetico da mettere in atto; simulazione di alcuni degli interventi di efficientamento energetico, testandone la fattibilità tecnico-economica con un modello numerico più accurato e realistico dei comuni codici stazionari presenti in commercio.

Nella terza e ultima fase del lavoro, partendo dalle considerazioni scaturite dall’esame dei dati dell’audit e delle simulazioni dinamiche, si dovranno analizzare tutte quelle proposte d’intervento che consentiranno di raggiungere i due seguenti obiettivi: ottimizzare la gestione energetica da parte dell’azienda; conseguire dei risparmi energetici ed economici. L’analisi delle proposte d’intervento, con l’obiettivo di garantire una maggiore aderenza con la realtà, non dovrà avvenire utilizzando metodologie numeriche che si avvalgono del calcolo stazionario mensile, bensì utilizzando metodiche più complesse quali il modello dinamico dell’ospedale, dei codici quasi-stazionari,

HOMER [3], o dinamici, TRNSYS, che lavorano sulla base delle curve di carico orarie ricavate tramite audit. Gli interventi di miglioramento dell'efficienza energetica dovranno essere obbligatoriamente corredati dall'analisi economica che metta in evidenza i costi dell'intervento, i tempi di ritorno atteso e la profittabilità dell'investimento. L'obiettivo finale di questa fase dovrà quindi essere l'individuazione di quelle soluzioni che consentiranno di ottenere un risparmio energetico ed economico per l'Azienda Ospedaliera Brotzu, migliorando contemporaneamente la sostenibilità ambientale, riduzione di immissioni inquinanti e climalteranti.

## 1.2 STRUTTURA DELLA TESI

Nel capitolo 2 sarà presentata l'Azienda Ospedaliera Brotzu al centro della nostra analisi. Dopo una breve esposizione sulla storia e le attività dell'azienda, saranno descritti gli edifici che la compongono e le caratteristiche dell'involucro. Seguirà la descrizione degli impianti tecnologici che forniscono l'energia necessaria per il regolare funzionamento della struttura. Tali impianti comprendono sia quelli dedicati alla conversione dell'energia elettrica e termica in ingresso all'azienda, sia quelli dedicati alla distribuzione ed erogazione dell'energia alle utenze finali.

Nel terzo capitolo saranno descritte tutte quelle attività di raccolta ed elaborazione dei dati che ci ha consentito di effettuare il bilancio energetico dell'Azienda Ospedaliera Brotzu. Partendo dall'energia in ingresso, sotto forma di combustibile ed energia elettrica, si perverrà alla ricostruzione dei principali flussi di energia, fino ad arrivare alle richieste di carico delle varie utenze presenti nella struttura. Oltre all'analisi dei consumi energetici recenti, sarà presentata la serie storica degli andamenti dei consumi e dei costi di approvvigionamento. La parte finale del capitolo sarà dedicata alla valutazione dei principali indici di Benchmark e al loro confronto con gli indici di altre realtà ospedaliere del contesto nazionale e internazionale.

Il capitolo 4 è interamente dedicato all'analisi termo-energetica del Brotzu, effettuata tramite un modello dinamico virtuale costruito con il software TRNSYS. Nella prima parte del capitolo sarà descritto il codice di calcolo e le operazioni effettuate, seguendo la prassi descritta nella letteratura internazionale, per la sua validazione e calibrazione. Seguirà l'esposizione delle operazioni effettuate per passare dal problema fisico reale al modello semplificato e infine alla sua implementazione numerica, corredando il tutto con una sintetica descrizione del modello matematico alla base del codice. Infine saranno riportati i risultati ottenuti con le simulazioni e il confronto tra i valori numerici e i dati di consumo reale ottenuti tramite l'audit.

Nel quinto capitolo saranno presentati gli interventi proposti, aventi come obiettivo principale la riduzione del fabbisogno energetico e la sua ottimizzazione. Le proposte d'intervento riguarderanno diversi aspetti del sistema edificio-impianto; partendo dagli interventi sull'involucro, passando per le proposte che riguardano i sistemi di monitoraggio e gestione delle grandezze energetiche, fino ad arrivare allo studio di fattibilità di sistemi alternativi per la produzione di energia termica ed elettrica. Su quest'ultimo aspetto sarà concentrata la maggiore attenzione, proponendo degli interventi in grado di sfruttare le energie rinnovabili e i sistemi per la produzione combinata di energia termica ed elettrica (cogenerazione e trigenerazione). Particolare attenzione sarà posta sull'analisi tecnico-economica dei principali interventi, valutandone la fattibilità economica e la sostenibilità ambientale al variare della taglia e della tecnologia.

Infine, nel sesto e ultimo capitolo saranno espone le conclusioni e presentati gli sviluppi futuri che potranno scaturire dalla continuazione del lavoro fin qui svolto nell'ambito del Dottorato di Ricerca.

## 2 L'AZIENDA OSPEDALIERA BROTZU

La struttura [4] oggetto del nostro studio è intitolata al Prof. G. Brotzu (1885-1976), illustre scienziato e politico sardo cui si deve la scoperta (1948) del *Cephalosporium acremonium*, alla base della famiglia di antibiotici oggi largamente utilizzate e conosciute come cefalosporine [5]. L'ospedale, inaugurato nel 1982 e riconosciuto (D.P.C.M. 08/04/1993) come "Ospedale di Alta Specializzazione e di Rilievo Nazionale", è oggi costituito in Azienda Ospedaliera Autonoma per decreto del Presidente della Giunta Regionale (n°168 del 29/07/1996). Situata nella città di Cagliari, in un'area peculiare per le sue caratteristiche di quiete e serenità, contribuisce, assieme ad altre strutture sanitarie localizzate nelle immediate vicinanze, alla creazione di un nevralgico polo sanitario al servizio del capoluogo regionale e della sua area vasta. Conosciuta per le sue attrezzature tecnologiche all'avanguardia e per le metodologie di analisi altamente specializzate e sofisticate, l'Azienda Ospedaliera Brotzu (indicata in seguito con l'acronimo AOB) rappresenta oggi il più importante punto di riferimento per la sanità sarda, tra le prestazioni rese disponibili agli utenti è doveroso citare: Centro prelievi e trapianti d'organo; PET/Ciclotrone; Tomografia computerizzata (TAC); Unità di Tomografia e Risonanza Magnetica (RM); Angiografia Digitale; Gamma Camere; MOC; Mammografia; Cardioangiografia; Ecotomografia tridimensionale. L'AOB, al cui interno lavorano circa 1'900 dipendenti, tra personale medico, paramedico, tecnico, amministrativo e collaboratori a progetto, è in grado di far fronte ogni anno a circa 30'000 ricoveri e 150'000 prestazioni ambulatoriali. I numeri di posti letto disponibili sono pari a circa 570, suddivisi tra i 20 reparti in cui è organizzata la struttura.



**Figura 2.1 - Giuseppe Brotzu [5].**



**Figura 2.2 - Azienda Ospedaliera Brotzu.**

Nel corso del tempo si sono succeduti diversi interventi volti alla riqualificazione della struttura, l'ultimo in ordine temporale si è svolto tra il 1997-2010 ed è stato incentrato sul perseguimento dei seguenti obiettivi:

- Adeguamento dell'intera struttura secondo le norme di accreditamento vigenti (D.P.R. 14/01/1997)[6].
- Garantire costantemente un alto livello di specializzazione mediante l'impiego di apparecchiature e tecnologie sanitarie d'avanguardia.
- Umanizzazione della struttura mediante un processo che miri a migliorare la qualità, il comfort e i servizi.

Gli interventi effettuati hanno riguardato diversi aspetti dell'azienda, tra i quali si ricordano: aggiornamento impianti di climatizzazione (1998-1999); nuovi ambulatori di cardiologia (2000-2002); ascensori (2000-2006); adeguamento antincendio (2000-2006); sale operatorie (2002-2006); sostituzione infissi esterni (2003-2007);

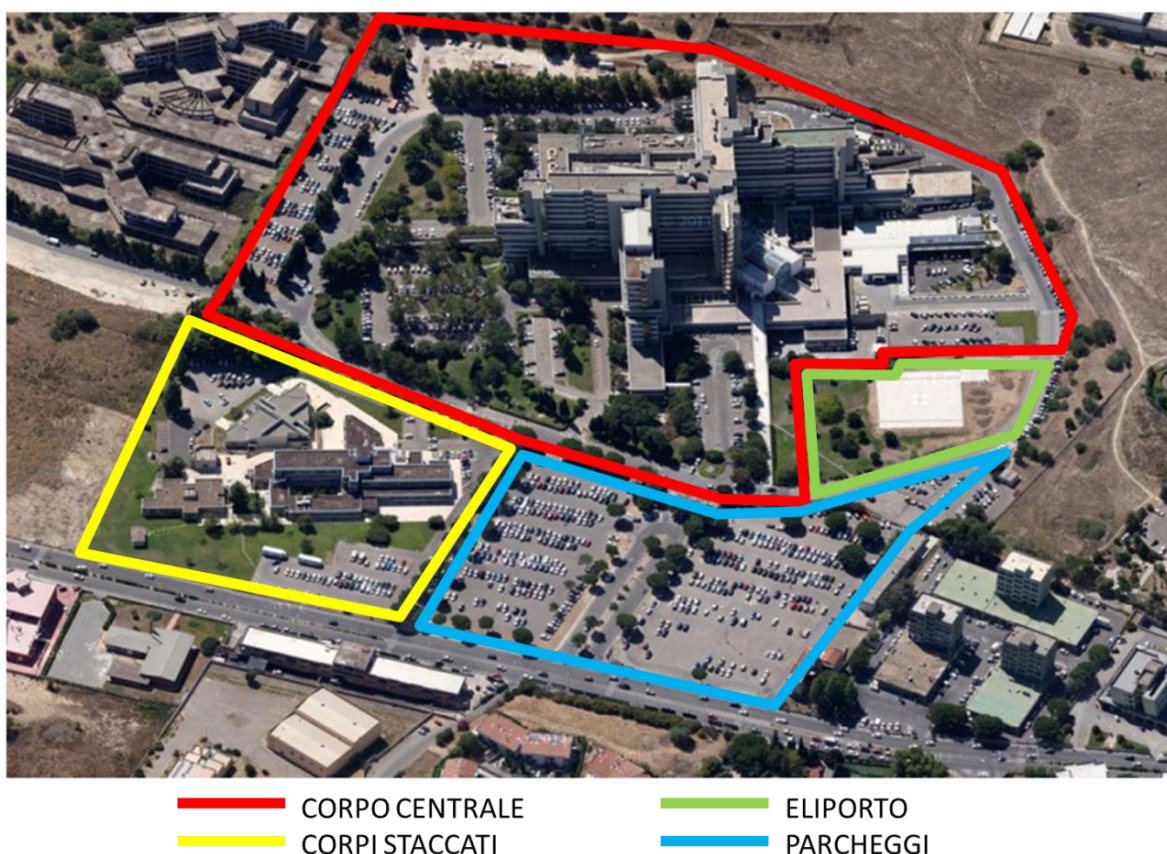


costruzione di nuove vie d'emergenza e della Hall d'ingresso (2004-2008); costruzione Trauma Center (2005-2009); Elisuperficie (2008-2010); etc.

All'inizio del 2000 è stato avviato un processo di riorganizzazione interna, avente come obiettivo la messa in comune di tutta una serie di competenze ed esperienze scientifiche e tecniche capaci di fornire al paziente una più efficace risposta diagnostico-terapeutica. Questo processo ha portato all'istituzione dei seguenti dipartimenti:

- Chirurgia
- Diagnostica per Immagini
- Emergenza
- Medicina Interna
- Patologia Cardio-Toraco-Vascolare
- Patologia Renale
- Servizi Speciali di Diagnosi e Cura

## 2.1 DESCRIZIONE DEGLI EDIFICI



**Figura 2.3 - Vista aerea dell'Azienda Ospedaliera Brotzu.**

L'Azienda Ospedaliera Brotzu occupa un'area complessiva di circa 110'000 m<sup>2</sup>, dove trovano luogo diverse aree riservate ai parcheggi, alcune aeree destinate a verde, l'eliporto e due corpi di fabbrica (figura 2.3): il primo, chiamato "Corpo Centrale", è l'edificio principale di maggior dimensioni; il secondo, "Corpi Staccati", ha dimensioni notevolmente inferiori rispetto al Corpo Principale ed ospita alcuni ambulatori, il centro prelievi e un Auditorium. Il Corpo centrale è l'edificio oggetto esclusivo della nostra analisi, esso è costituito da una struttura monoblocco in calcestruzzo armato suddivisa in 13 livelli (tabella 2.1), caratterizzati da una tipologia edilizia mista del tipo piastra-torre. La zona a "piastra" si sviluppa orizzontalmente e comprende i due piani inferiori (piano Piastra e Seminterrato), in cui sono collocati i servizi generali, quelli di diagnosi e cura e tutte le centrali

tecnologiche. Oltre ad essi, è presente un ulteriore livello interrato che alloggia il sistema di distribuzione orizzontale del fluido termovettore inviato verso le varie colonne verticali (montanti) di adduzione ai piani. La “torre” è articolata su undici piani fuori terra, dove sono collocati tutti reparti specialistici, il blocco operatorio e le zone di degenza. Le planimetrie dei vari piani sono riportate nell’Appendice A [7].

**Tabella 2.1 - Dati caratteristici dei vari livelli del Corpo Centrale.**

PIANO	DESTINAZIONE D'USO - REPARTI	POSTI LETTO	SUPERFICIE [m <sup>2</sup> ]	VOLUME [m <sup>3</sup> ]
XI	Oculistica - Chirurgia vascolare	26	2'600	9'100
X	Urologia - Gastroenterologia	71	3'200	11'200
IX	Nefrologia e Dialisi	26	3'615	12'653
VIII	Medicina 1 - Medicina 2	79	3'615	12'653
VII	Chirurgia generale - Centro ustionati - Neuroriabilitazione	56	3'615	12'653
VI	Neurologia - Stroke unit - Neurochirurgia	69	3'865	13'528
V	Blocco Operatorio	0	4'675	16'363
IV	Cardiochirurgia - Cardiologia	82	3'845	13'458
III	Ostetricia e Ginecologia - Sale parto	50	4'280	14'980
II	Pediatria - Cardiologia pediatrica - Studi pervasivi dello sviluppo	44	4'630	16'205
I	Uffici - Banca - Bar - Edicola - Cappella -Chirurgia d'urgenza - Ortopedia e Traumatologia	47	7'590	26'565
<b>Piastra</b>	Pronto soccorso - Terapia intensiva - Uffici - Terapia antalgica - Endoscopia digestiva - Fisiocinesiterapia - Immunoematologia - Radiologia - Medicina nucleare - Laboratori - Risonanza magnetica - Poliambulatorio - Rianimazione	22	16'480	57'680
<b>Seminterrato</b>	Mensa - Servizio farmaceutico - Magazzini -Sterilizzazione - Servizio mortuario - Impianti tecnici - Centrale operativa 118 - PET - Centro diabetici	0	16'460	57'610
<b>TOTALE</b>		<b>572</b>	<b>78'470</b>	<b>274'645</b>



**Figura 2.4 - Corpo Centrale (vista NW – lato Hall).**



**Figura 2.5 - Corpi Staccati.**

L’edificio che costituisce il corpo centrale è costituito da 12 diverse tipologie di superfici opache e 9 tipologie di superfici trasparenti. Nella tabella 2.2 sono riportate le differenti superfici opache, unitamente ai dati di spessore e

alla trasmittanza globale, calcolata imponendo i seguenti coefficienti di scambio termico convettivo: 7.7 W/(m<sup>2</sup>K) per l'interno ( $\alpha_o$ ); 25 W/(m<sup>2</sup>K) per l'esterno ( $\alpha_i$ ). Di tutte le superfici opache presentate in tabella, le prime sei, indicate con i codici da SO1 a SO5, si riferiscono all'edificio di prima costruzione (1982) e coprono gran parte della struttura. Le superfici successive, da SO6 a SO11, sono di recente posa e relative agli interventi di ampliamento che hanno portato alla realizzazione del Trauma-Center, della Hall e della nuova Torre Ascensori (2004-2009). Ulteriori dettagli sulle superfici opache, compresi i rilievi stratigrafici dettagliati con relative proprietà termofisiche, sono presenti nell'Appendice B [7].

**Tabella 2.2 - Caratteristiche principali delle superfici opache.**

<b>CODICE (Appendice B)</b>	<b>DENOMINAZIONE</b>	<b>SPESSORE</b>	<b>TRASMITTANZA</b>
<b>SO1</b>	Solaio di copertura – terrazze	480	0.298
<b>SO2a</b>	Solaio intermedio (caso a)	290	1.884
<b>SO2b</b>	Solaio intermedio (caso b)	290	1.959
<b>SO3</b>	Tamponatura in pannello a sandwich	170	0.666
<b>SO4</b>	Partizioni interne	100	1.928
<b>SO5</b>	Pareti vani scala	210	3.460
<b>SO6</b>	Pannello di copertura Trauma Center	101	2.233
<b>SO7</b>	Tamponatura Trauma Center	430	0.346
<b>SO8</b>	Solaio di copertura Hall	304	0.262
<b>SO9</b>	Tamponatura Hall	442	0.134
<b>SO10</b>	Pannello verticale vano scala – torre ascensori	60	0.559
<b>SO11</b>	Pannello orizzontale vano scala – torre ascensori	51	0.577
		mm	W/(m <sup>2</sup> K)

Nella tabella 2.3 presentiamo l'elenco delle superfici trasparenti che compongono l'AOB, assieme ai dati di trasmittanza dei telai, delle vetrate, e il valore complessivo. Le prime superfici, da ST1 a ST4, sono utilizzate esclusivamente del fabbricato di vecchia costruzione e sono frutto di un lavoro di adeguamento portato avanti nel periodo 2003-2007. Le altre superfici trasparenti, da ST5 a ST9, sono collocate nei blocchi di recente costruzione, ossia Trauma Center, Hall, nuova Torre Ascensori (2004-2009). Come per le superfici opache, ulteriori dettagli sulle caratteristiche termofisiche dei vetri e dei telai sono riportati nell'Appendice B [7].

**Tabella 2.3 - Caratteristiche principali delle superfici trasparenti.**

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

2.2 DESCRIZIONE DEGLI IMPIANTI

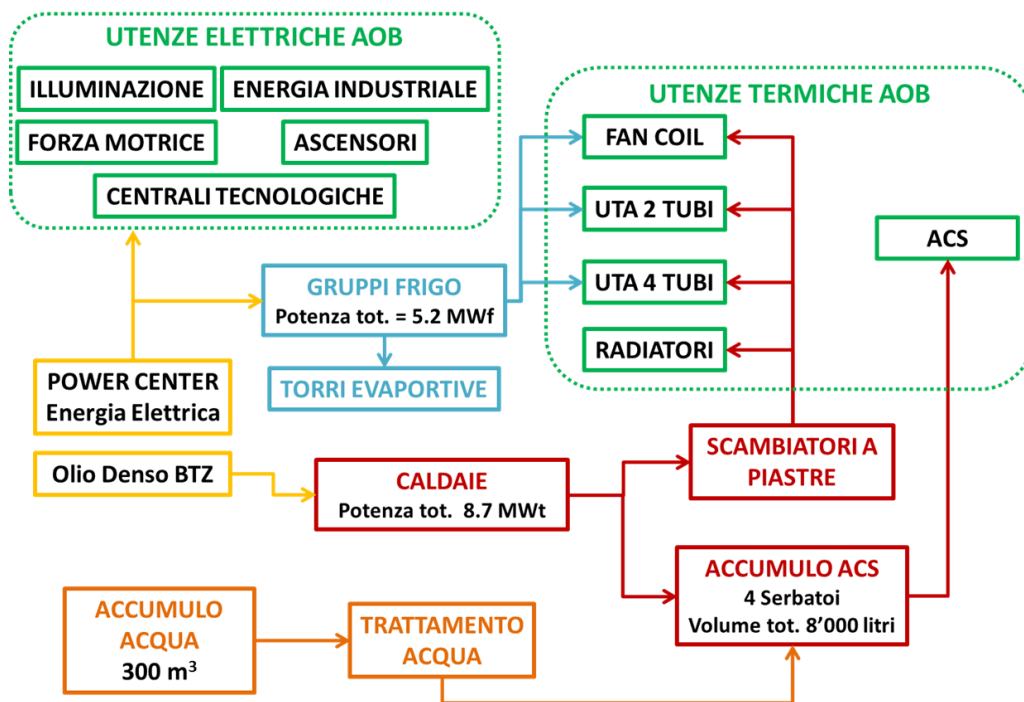


Figura 2.6 - Schema logico impianti AOB.

Nella figura 2.6 è riportato un diagramma a blocchi che descrive in maniera semplificata l’organizzazione degli impianti tecnologici dell’AOB, localizzati nel settore SW del piano seminterrato (figura 2.7). La gestione dell’energia elettrica avviene nel “Power Center”, qui sono presenti i trasformatori per la conversione da media (15’000 V) in bassa tensione e i quadri per lo smistamento alle varie utenze. La potenza di picco elaborata dal Power Center, secondo i rilievi orari elaborati, è di circa 2.3 MW. La produzione di energia termica per riscaldamento e produzione di ACS è realizzata da tre caldaie Viessman, alimentate con olio denso BTZ tipo “Ecoden”, dalla potenza termica utile complessiva di 8.7 MW, localizzate nella “Centrale Termica”. La produzione dell’energia termica per raffreddamento è deputata a 4 gruppi frigoriferi a compressione installati nella “Centrale Frigo”, la cui potenza frigorifera massima erogabile è di circa 5 MW.

Nel seguito del paragrafo saranno descritte con maggior dettaglio le caratteristiche delle varie centrali tecnologiche atte alla produzione dell’energia necessaria per il funzionamento dell’ospedale.

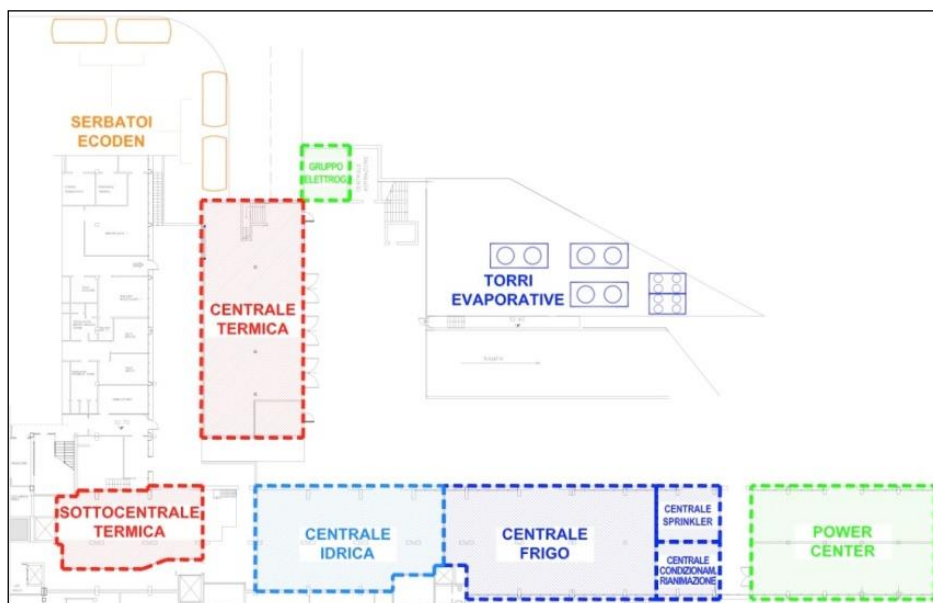


Figura 2.7 – Disposizione delle centrali tecnologiche nell’AOB.

### 2.2.1 IMPIANTI ELETTRICI

Il Power Center, di cui si può vedere uno schema a blocchi nella figura 2.8, si trova nell'ala SW del piano seminterrato. Il locale è stato realizzato nel 1979 ed è suddiviso, secondo la tensione elettrica delle linee, in due parti. Nella prima parte, accessibile soltanto al personale autorizzato, è localizzato l'arrivo in MT dalla rete, il sistema di sbarre rigide in rame per la ripartizione dei carichi e i sei trasformatori, ognuno dei quali alimenta delle linee specifiche. Questi sono raffreddati con olio diatermico ed effettuano la trasformazione da MT (15 kVA) a BT (400 V). Nella seconda parte del Power Center, immediatamente a valle dei trasformatori, si trova il quadro in BT dove sono alloggiati tutti i dispositivi di manovra e di controllo delle singole linee che alimentano i carichi. Al suo interno sono presenti sei quadri principali, uno per trasformatore, con gli organi di manovra e gli indicatori analogici dei principali parametri elettrici della linea trifase, e nove quadri secondari, con gli organi di manovra delle linee suddivisi in base alla tipologia di utenza alimentata e alla priorità dei carichi.

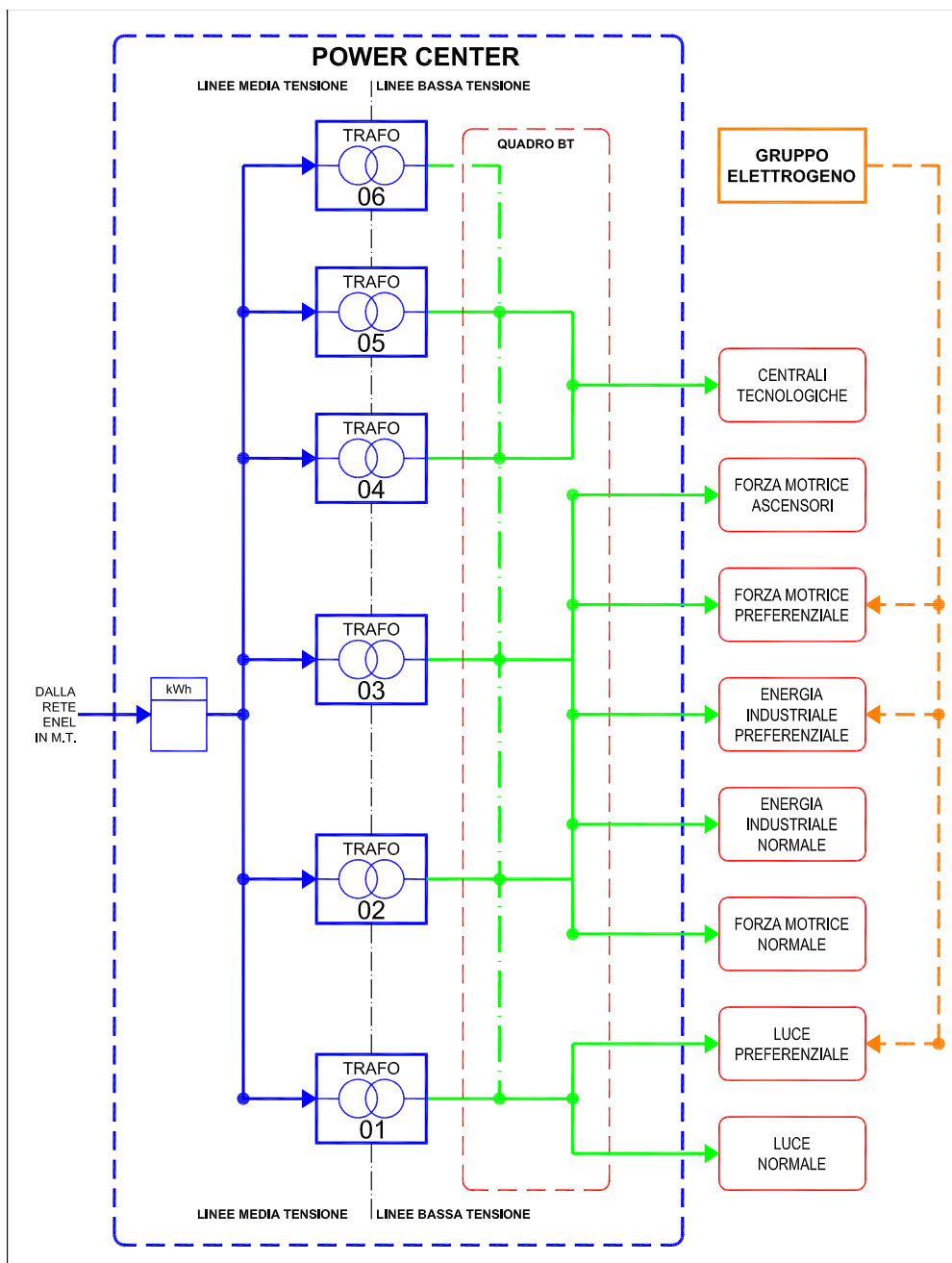


Figura 2.8 – Schema a blocchi Centrale Elettrica (Power Center) AOB.

Alcune tipologie di carico elettrico, come la forza motrice, l'energia industriale e l'illuminazione, sono suddivise in carico "normale" e "preferenziale"; questi ultimi dedicati ai servizi essenziali ed emergenza o a sistemi e apparecchiature con elevate esigenze di disponibilità la cui mancata alimentazione può dar luogo a condizioni di pericolo per l'uomo e per gli impianti. Tutti i carichi preferenziali sono provvisti di gruppi di continuità (tabella 2.4) e alimentati in parallelo dal generatore elettrico di riserva (tabella 2.5), installato nel 2012, che ne consente la funzionalità in caso di interruzione della fornitura di energia elettrica dalla rete.

**Tabella 2.4 – Potenza dei principali UPS.**

RIANIMAZIONE	SALE OPERATORIE	MICORBIOLOGIA LABORATORI ANALISI	RISONANZA MAGNETICA - TAC APPARECCHIATURE ELETTROMEDICALI
40	120	60	600
kW	kW	kW	kW

**Tabella 2.5 – Dati di targa del gruppo elettrogeno.**

MODELLO	TIPO	ALIMENTAZIONE	VELOCITÀ	FREQUENZA	TENSIONE	PRP (Prime Power)
Newton	NP650ABSL.TE	Gasolio	1'500	50	400	650 - 520
			RPM	Hz	V	kVA - kW

Le linee di carico alimentate dai vari trasformatori sono le seguenti:

**Trasformatore N°1**

**[1'000 kVA]**

- **Luce preferenziale:** alimenta tutti i quadri a monte degli impianti di illuminazione preferenziale (illuminazione vie di fuga, sale operatorie, etc.).
- **Luce normale:** alimenta tutti gli altri quadri a monte degli impianti di illuminazione.

**Trasformatori N°2-3**

**[1'000 kVA cad.]**

- **Forza motrice preferenziale:** ossia i carichi della centrale idrica, gli UPS delle sale operatorie, gli impianti per la sterilizzazione, la centrale Sprinkler, radiologia, pronto soccorso, gas medicali, etc.
- **Forza motrice normale:** alimenta tutti gli altri quadri a monte degli impianti di forza elettro-motrice.
- **Forza motrice ascensori:** alimenta tutti i motori per la movimentazione di ascensori e montacarichi.
- **Energia industriale preferenziale:** alimenta tutti i quadri a monte dei carichi industriali preferenziali.
- **Energia industriale normale:** alimenta tutti gli altri quadri a monte dei carichi industriali interrompibili.
- **Gruppi di continuità (quadro "Siemens"):** alimenta tutti i gruppi di continuità che garantiscono l'alimentazione alle apparecchiature dei reparti critici (diagnostica, medicina nucleare, radiologia, neurochirurgia, angiografia, risonanza magnetica, sale operatorie, TAC, PET, etc.) in caso di black-out.

**Trasformatori N°4-5**

**[1'000 kVA cad.]**

- **Centrali tecnologiche:** alimenta i quadri delle centrali tecnologiche, quali: centrali termica, idrica, frigorifera, sotto-centrale termica, vuoto tecnico, cucina. Sono inoltre alimentati da questi due trasformatori i principali quadri che forniscono l'energia ai terminali di erogazione di calore e di trattamento dell'aria ai piani.

**Trasformatore N°6**

**[800 kVA]**

- **Riserva:** questo trasformatore funge da riserva, consentendo, in caso di malfunzionamento, guasto o manutenzione, di sopperire ai carichi elettrici alimentati dagli altri trasformatori.

Nel corso del progetto di ricerca, grazie all'aiuto del personale tecnico, è stato effettuato un censimento delle macchine più energivore dell'AOB [8]. Da questi dati si è riuscito a valutare la potenza elettrica complessivamente installata nell'ospedale, suddivisa nelle seguenti quattro categorie di utilizzo:

- A. **Centrali Tecnologiche:** ossia la potenza dei motori elettrici che equipaggiano le macchine presenti nelle varie centrali tecnologiche dell'ospedale (centrale termica, idrica, antincendio, etc.).
- B. **Terminali di Erogazione dell'Energia Termica:** comprendente la potenza elettrica delle varie UTA e dei ventilconvettori dislocati nella struttura. Per alcune UTA a 2 tubi non è stato possibile reperire i dati delle macchine presenti; mentre per i fan-coil, a causa della mancanza di dati, la potenza elettrica dei ventilatori è stata estrapolata dalle schede tecniche di macchine simili a quelle presenti nell'AOB.
- C. **Gruppi Frigoriferi e Torri di Raffreddamento:** considerando la potenza elettrica dei compressori dei gruppi frigo e dei ventilatori dei motori che alimentano i ventilatori delle quattro torri evaporative.
- D. **Apparecchiature Elettromedicali:** comprendenti le potenze di gran parte dei macchinari necessari per la diagnostica e per la somministrazione di terapie medicali specifiche.

**Tabella 2.6 – Sintesi dei principali assorbimenti elettrici.**

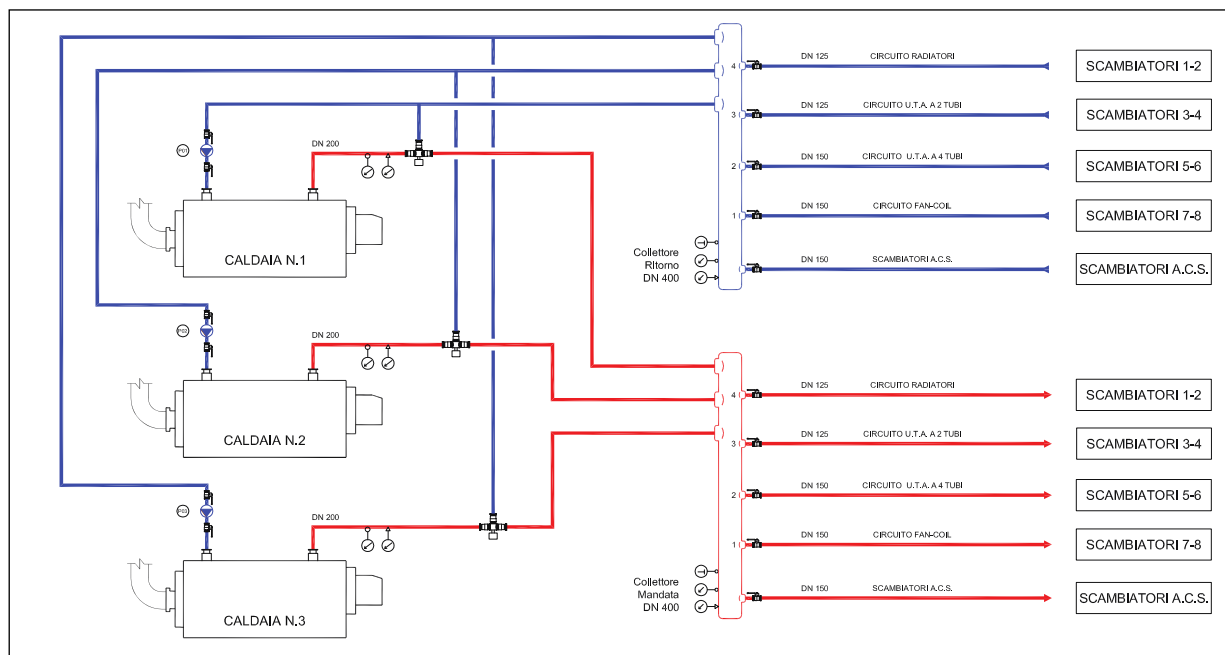
<b>POTENZE ELETTRICHE INSTALLATE NELL'AOB</b>	
A) Centrali Tecnologiche	588 kW
B) Terminali di Erogazione dell'Energia Termica	669 kW
C) Gruppi Frigoriferi e Torri di Raffreddamento	1'052 kW
D) Apparecchiature Elettromedicali	1'427 kW
<b>TOTALE</b>	<b>3'735 kW</b>

Nell'appendice C [8] sono riportati i dettagli sulle potenze elettriche per ogni singola voce presente nella tabella 2.6.

## **2.2.2 IMPIANTI TERMICI**

### **2.2.2.1 CENTRALE TERMICA**

Nella centrale termica viene prodotta l'energia necessaria per sopperire al fabbisogno termico invernale, al postriscaldamento estivo delle UTA, e per la produzione di acqua calda sanitaria. Nella figura 2.9 è riportato uno schema semplificato della centrale che ne esemplifica il funzionamento. Il fluido termovettore, prodotto dalle tre caldaie, di cui due funzionanti e una di riserva, a una temperatura di circa 80-85°C, è inviato tramite tre pompe (Tipo WILO mod. IPN 200/250) al collettore di mandata, da cui partono diverse diramazioni verso la sottocentrale termica in cui sono localizzati gli scambiatori di calore e i serbatoi di accumulo per la produzione di acqua calda sanitaria (boiler). Dalla sottocentrale arriva il fluido termovettore freddo, circa 70-75°C, che viene convogliato nel collettore di ritorno e da esso verso le caldaie, chiudendo così il circuito idraulico. Non essendo funzionante il sistema di regolazione del circuito idraulico appena descritto, che dovrebbe essere governato tramite le valvole a tre vie presenti, le caldaie lavorano sempre in modalità ON-OFF, con l'accensione comandata dai valori di temperatura rilevati nel collettore di mandata.


**Figura 2.9 - Schema semplificato centrale termica.**
**Tabella 2.7 – Dati di targa delle caldaie [9].**

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

Le tre 3 caldaie (tabella 2.7 – figura 2.10) presenti in centrale sono della Viessman, modello Turbomat Duplex RN, predisposte per il funzionamento ad olio denso BTZ “Ecoden”. Il combustibile, le cui caratteristiche sono riportate nella tabella 2.8, è stoccato in 4 serbatoi dalla capacità di 25'000 litri, realizzati in lamiera e dotati di tutti i dispositivi di sicurezza e protezione previsti dalla normativa vigente, interrati ad una profondità tale che la loro generatrice superiore disti 1 m dal livello del terreno soprastante.


**Figura 2.10 – Vista delle 3 caldaie nella centrale termica [9].**



Tabella 2.8 – Caratteristiche termo-fisiche dell’olio denso “Ecoden” [10].

CARATTERISTICHE TERMO-FISICHE DELL’OLIO DENSO BTZ (0.03% S)	
Massa Volumica (Densità) a 15°C	tipiche 0.940 max. 0.960 kg/l
Viscosità a 50°C	min. 91 tipiche 101 max. 1 14 cSt
Punto di Infiammabilità	min. 65°C tipiche 75°C
Zolfo	tipiche 0.28 max. 0.30 %p
H.F.T.	tipiche 0.02 max. 0.05 %p
Pot. Cal. Inf.	min. 9900 tipiche 9980 Kcal/Kg
Ceneri	tipiche 0.02 max. 0.030 %p
Asfaltini	tipiche 0.3 max. 1.0 %p
RCC	tipiche 5 max. 6 %p

2.2.2.2 SOTTOCENTRALE TERMICA

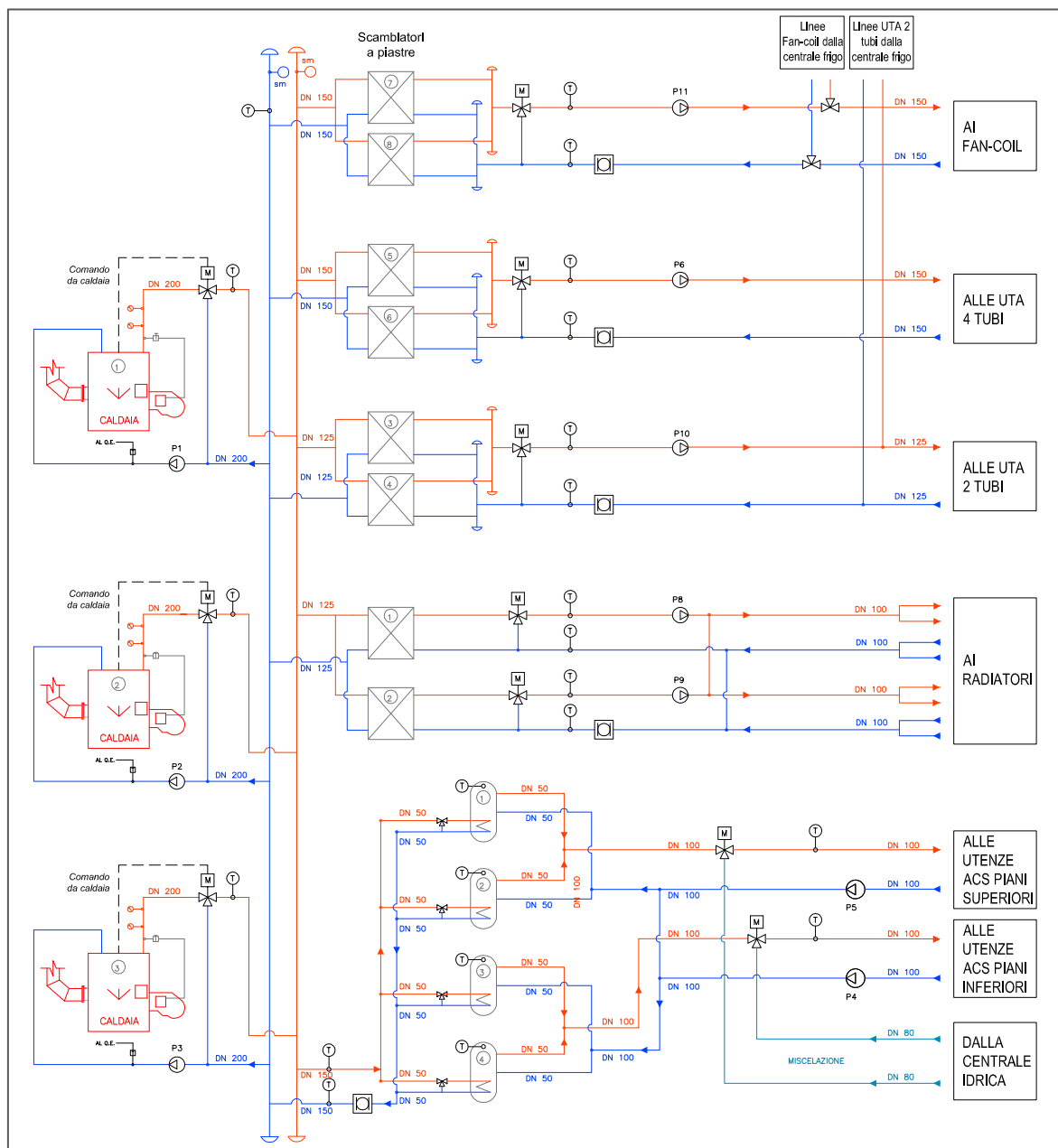


Figura 2.11 - Schema semplificato distribuzione in centrale e sottocentrale termica.

Il fluido termovettore proveniente dalla centrale termica è inviato a 8 scambiatori di calore a piastre, due per ogni tipologia di utenza di riscaldamento (fan-coils, radiatori, UTA a 2 e 4 tubi), e a 4 serbatoi ad accumulo per la produzione dell'acqua calda sanitaria, vedi figura 2.11. In questo paragrafo saranno presentate le caratteristiche delle principali linee di distribuzione del fluido termovettore in uscita dalla sottocentrale [9].

- **Circuito radiatori (scambiatori 1 e 2)**

Il fluido termovettore in arrivo dalla centrale termica è inviato a due scambiatori di calore a piastre, Tipo Alfa Laval (tabella 2.9), tramite una tubazione di diametro DN 150. L'acqua calda in uscita dagli scambiatori è quindi mandata, tramite 2 pompe di circolazione (Tipo WILO mod. IPN 50/250), verso tutti i reparti dell'ospedale.

**Tabella 2.9 – Dati di targa degli scambiatori 1 e 2 [9].**

<b>SCAMBIATORI 1-2 (CIRCUITO RADIATORI)</b>		
<b>Parametri</b>	<b>Lato caldo</b>	<b>Lato freddo</b>
Portata volumetrica (m <sup>3</sup> /h)	17.7	17.6
Temperatura d'ingresso (°C)	80	65
Temperatura d'uscita (°C)	70	75
Perdita di carico (kPa)	37.5	37.5
Calore scambiato (kW)	200	

- **Circuito UTA a 2 tubi (scambiatori 3 e 4)**

Il fluido termovettore che serve questo circuito arriva dalla centrale termica, tramite una tubazione dal diametro DN 125, e viene mandata a due scambiatori di calore a piastre Tipo Alfa Laval. L'acqua calda è inviata nella rete di distribuzione dell'ospedale mediante una pompa (Tipo WILO mod. IPN 100/250), che ne permette la distribuzione alle utenze situate prevalentemente nella nuova mensa situata al piano seminterrato, a diversi reparti al primo piano e verso l'ex centro ustionati del 7° piano.

**Tabella 2.10– Dati di targa degli scambiatori 3 e 4 [9].**

<b>SCAMBIATORI 3-4 (CIRCUITO UTA 2 TUBI)</b>		
<b>Parametri</b>	<b>Lato caldo</b>	<b>Lato freddo</b>
Portata volumetrica (m <sup>3</sup> /h)	40.8	40.5
Temperatura d'ingresso (°C)	80°C	65°C
Temperatura d'uscita (°C)	70°C	75°C
Perdita di carico (kPa)	78.1	78.0
Calore scambiato (kW)	460	

- **Circuito UTA a 4 tubi (scambiatori 5 e 6)**

L'acqua di questo circuito è inviata, mediante una tubazione di diametro DN 150, a due scambiatori di calore a piastre Tipo Alfa Laval. L'acqua in uscita dagli scambiatori è immessa nella rete di distribuzione dell'ospedale (pompa Tipo WILO mod. IPN 125/315) e indirizzata verso tutti i piani ad esclusione del 6°, 8° e 10°, con il maggior numero di utenze concentrato nei piani centrali, dal 2° al 5°, a servizio soprattutto delle sale operatorie e delle sale parto. La linea di distribuzione per le unità a 4 tubi era inizialmente costituita da una tubazione in acciaio alla quale in seguito, per far fronte alle nuove necessità dettate dall'installazione di nuove macchine, è stata aggiunta un'ulteriore tubazione in polietilene.

**Tabella 2.11 – Dati di targa degli scambiatori 5 e 6 [9].**

<b>SCAMBIATORI 5-6 (CIRCUITO UTA 4 TUBI)</b>		
<b>Parametri</b>	<b>Lato caldo</b>	<b>Lato freddo</b>
Portata volumetrica (mc/h)	75.3	74.8
Temperatura d'ingresso (°C)	80°C	65°C
Temperatura d'uscita (°C)	70°C	75°C
Perdita di carico (kPa)	98.5	98.4
Calore scambiato (kW)	850	

- **Circuito fan-coil (scambiatori 7 e 8)**

Il fluido termovettore in arrivo dalla centrale termica è inviato a due scambiatori di calore a piastre, Tipo Alfa Laval (figura 2.12), tramite una tubazione di diametro DN 150. L'acqua calda in uscita dagli scambiatori è diretta, tramite 2 pompe di circolazione (Tipo WILO mod. IPN 150/335), verso tutti i piani dell'ospedale, in particolare nei locali adibiti a degenze, uffici, ambulatori, spogliatoi, studi, etc.


**Figura 2.12 – Vista degli scambiatori del circuito fan-coil.**
**Tabella 2.12 – Dati di targa degli scambiatori 7 e 8 [9].**

<b>SCAMBIATORI 7-8 (CIRCUITO FAN-COIL)</b>		
<b>Parametri</b>	<b>Lato caldo</b>	<b>Lato freddo</b>
Portata volumetrica (mc/h)	86.1	100
Temperatura d'ingresso (°C)	80°C	52°C
Temperatura d'uscita (°C)	70°C	60°C
Perdita di carico (kPa)	11.5	14.7
Calore scambiato (kW)	1'000	

La regolazione delle varie linee di distribuzione del fluido termovettore è differente a seconda della tipologia di terminale di erogazione da alimentare. Nel caso dei radiatori e dei fan-coil, la temperatura di mandata del fluido termovettore è regolata in base alla temperatura esterna. Questa regolazione avviene tramite una valvola a tre vie motorizzata, localizzata subito a valle degli scambiatori di calore, comandata da una centralina il cui segnale di

controllo è legato al valore della temperatura esterna, misurata da una sonda situata all'esterno della centrale termica (figura 2.13a). Nella figura 2.13b sono riportati, a titolo esemplificativo, i valori relativi a 10 giorni primaverili (dal 20 al 30 aprile) delle temperature di mandata dei due circuiti, radiatori e fan-coil, e della temperatura esterna.

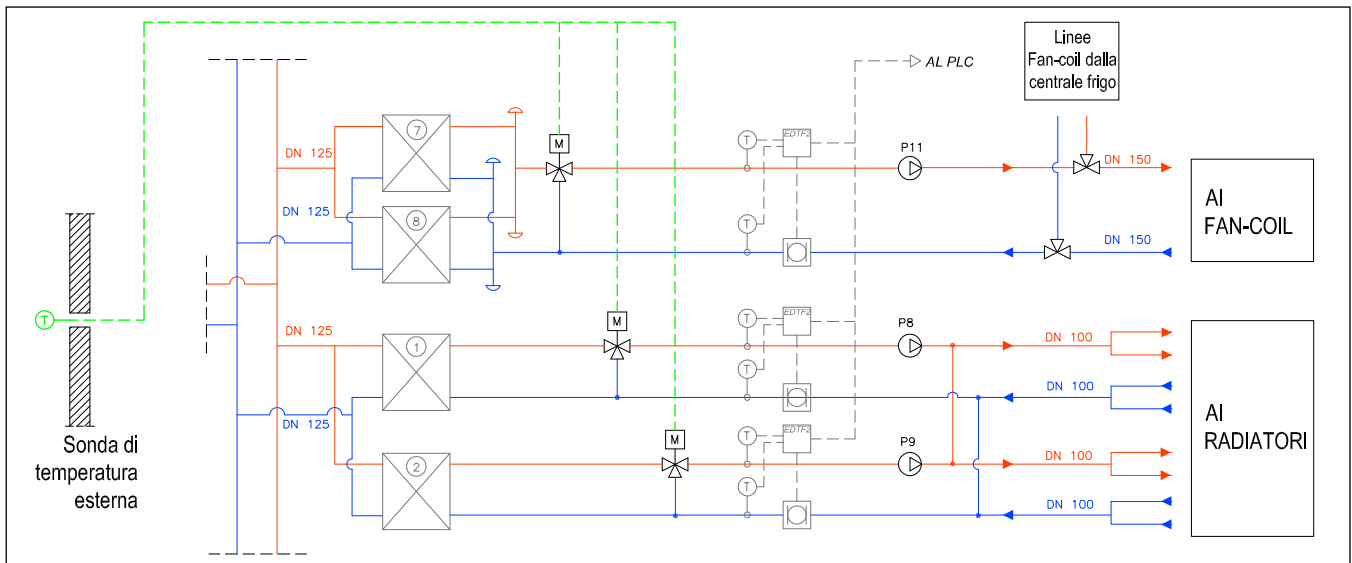


Figura 2.13a – Schema dei sistemi di regolazione dei circuiti dei radiatori e fan-coil.

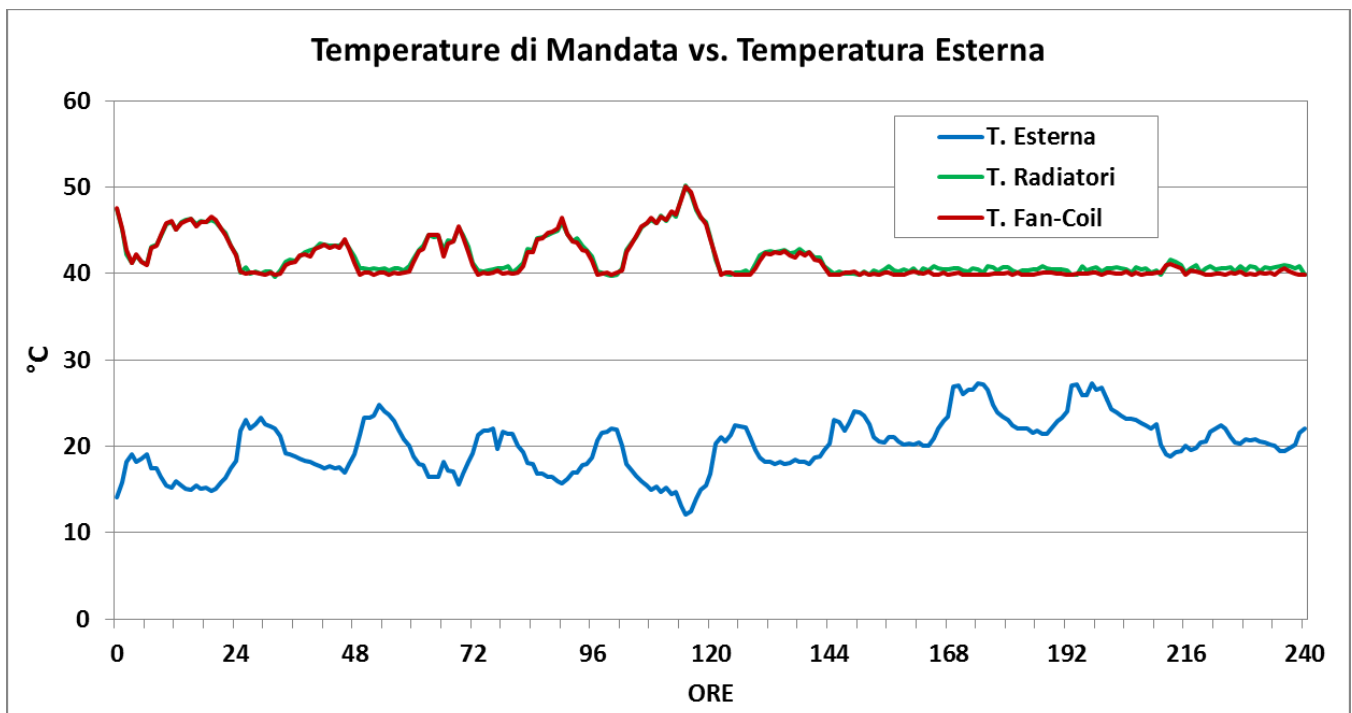


Figura 2.13b – Temperature di mandata ai radiatori e fan-coil, in funzione della temperatura esterna.

Per i circuiti di alimentazione delle UTA a 2 e 4 tubi, la regolazione avviene sulla temperatura di mandata, che viene mantenuta costante grazie all'intervento di una valvola a tre vie motorizzata comandata da una centralina che preleva il segnale di temperatura da una sonda situata a valle degli scambiatori di calore (figura 2.14a). Il valore di set-up di temperatura è impostata dai tecnici a seconda del periodo dell'anno: la temperatura di mandata delle UTA a 4 tubi viene fatta variare tra 55-70°C durante il periodo di riscaldamento e tra 45-50°C nel periodo di raffrescamento, in cui fluido termovettore caldo è utilizzato per il post-riscaldamento. Nelle UTA a 2 tubi la

temperatura di mandata è fissata intorno ai 40-50°C, esclusivamente per il periodo di riscaldamento. Considerando lo stesso periodo di osservazione della figura 2.13b (20-30 aprile), si riporta nella 2.14b i valori della temperatura esterna e delle temperature di mandata alle UTA, pari a  $60\pm 0.2^\circ\text{C}$  per le UTA a 4 tubi e  $55\pm 0.2^\circ\text{C}$  per le UTA a 2 tubi.

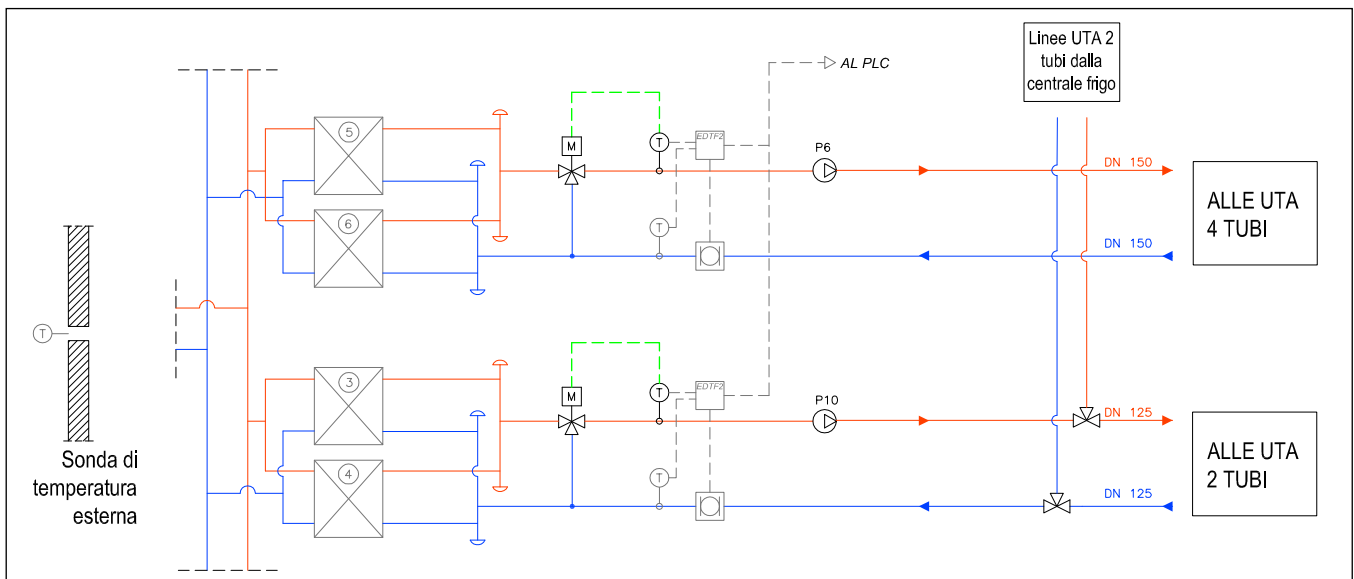


Figura 2.14a – Schema dei sistemi di regolazione dei circuiti delle UTA a 2 e 4 tubi.

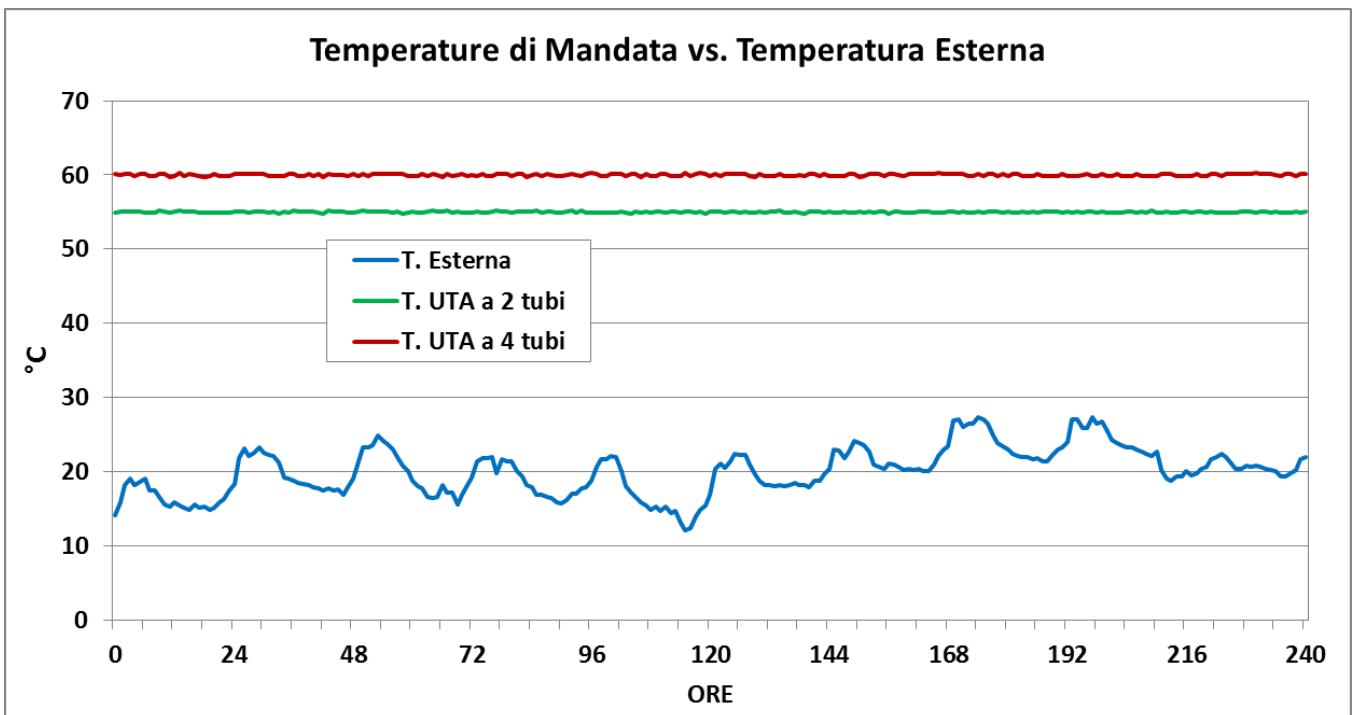
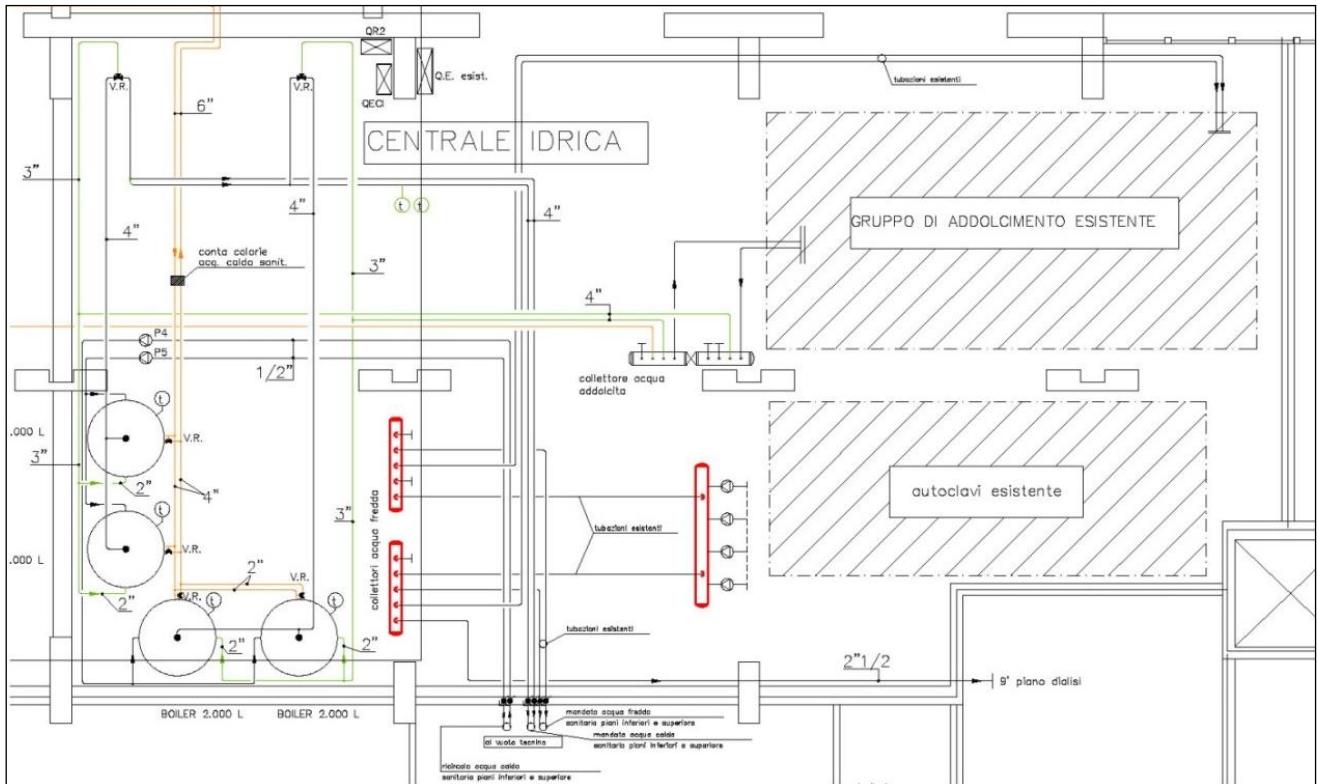


Figura 2.14b – Temperature di mandata alle UTA a 2 e 4 tubi.

### 2.2.2.3 PRODUZIONE ACQUA CALDA SANITARIA

La centrale idrica (figura 2.15) è ubicata tra la sottocentrale termica e quella frigorifera. Al suo interno si trovano le unità di pretrattamento dell'acqua in arrivo dalla rete o dal serbatoio d'accumulo da 300 m<sup>3</sup>, le pompe di circolazione, i collettori per lo smistamento delle varie linee e i serbatoi per la produzione e l'accumulo dell'acqua

calda sanitaria (figura 2.16b). L'acqua fredda, prima di essere inviata ai serbatoi per la preparazione dell'ACS, subisce i seguenti trattamenti: addolcimento per la decalcificazione dell'acqua; demineralizzazione; additivazione con sostanze chimiche (figura 2.16a).



**Figura 2.15 – Planimetria della centrale idrica.**



**Figura 2.16a-b – Vista delle unità di trattamento dell'acqua e dei bollitori in centrale idrica [9].**

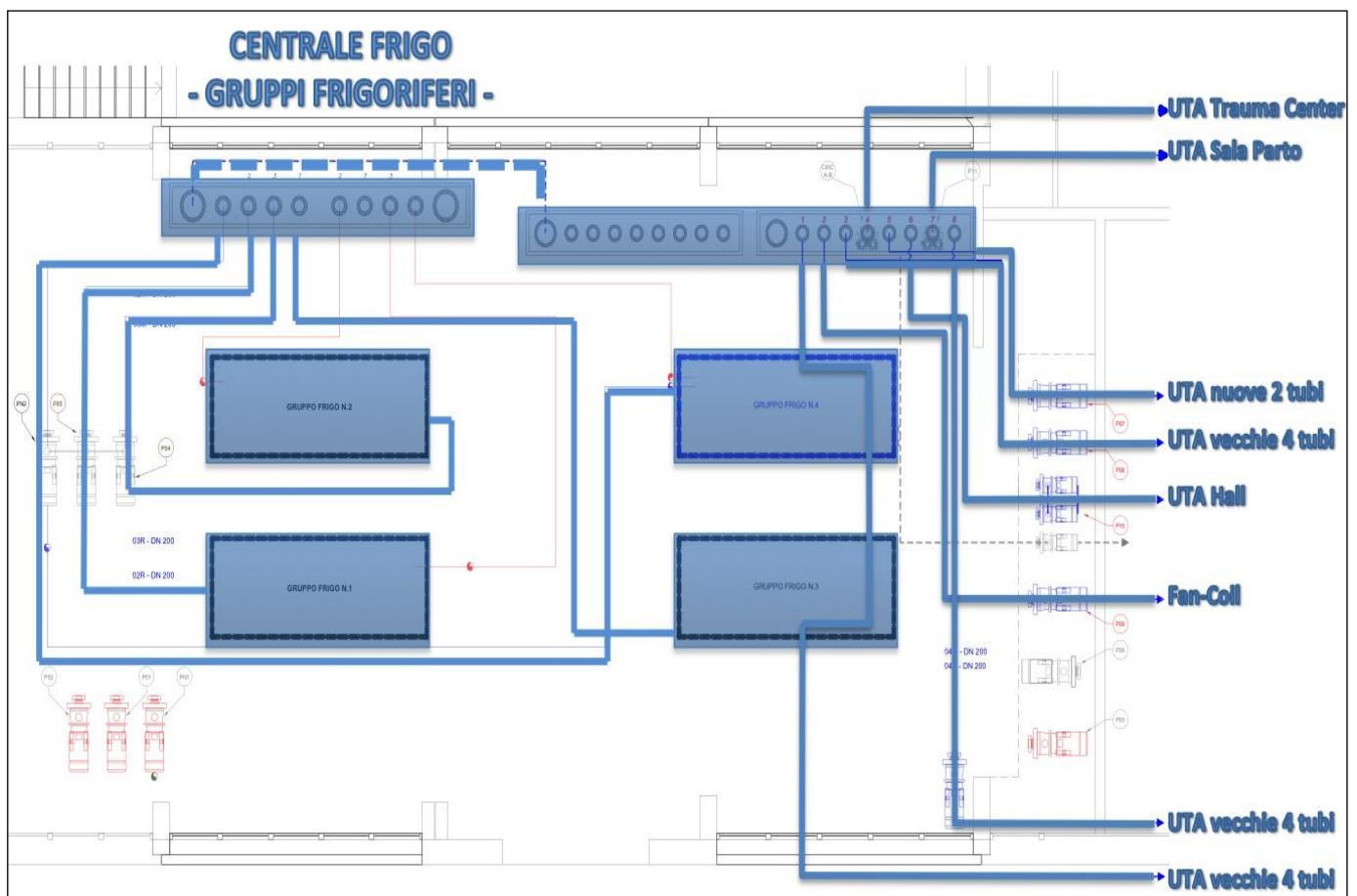
Dopo aver subito i trattamenti indicati, l'acqua è inviata a 4 bollitori verticali realizzati in lamiera d'acciaio inox AISI 316L, coibentati con poliuretano flessibile di spessore 50 mm e finiti esternamente con lamierino d'alluminio pesante con spessore 0.6 mm. Ogni scambiatore di calore interno ai boiler, costituito da un fascio tubiero estraibile in acciaio inox AISI 316L con superficie di scambio di  $6 \text{ m}^2$ , è alimentato da una tubazione proveniente direttamente dal collettore della centrale termica. L'acqua calda per uso sanitario viene inviata alla rete di distribuzione dell'ospedale alla temperatura di  $48 \pm 5^\circ\text{C}$ , ottenuta miscelando l'acqua fredda della rete con quella a circa  $50\text{-}60^\circ\text{C}$  proveniente dai quattro bollitori.

**Tabella 2.13 – Dati di targa dei boiler per ACS [9].**

<b>BOLLITORI VERTICALI TIPO FIORINI</b>	
Pressione di esercizio	10 bar
Capacità	2'000 litri
Resa termica	125.6 kW
Delta T	50°C
Delta P	1.2 m

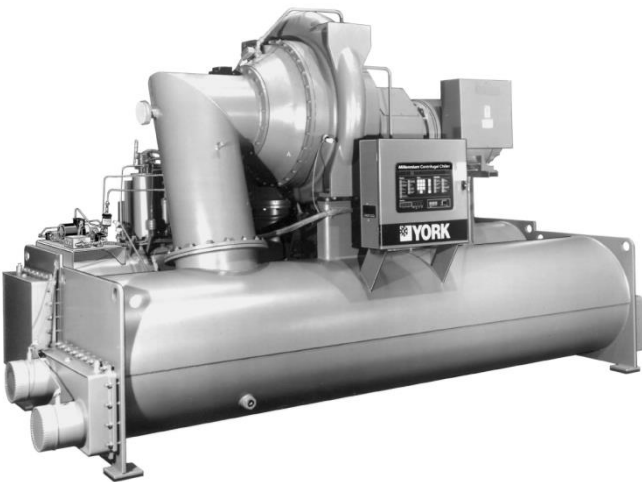
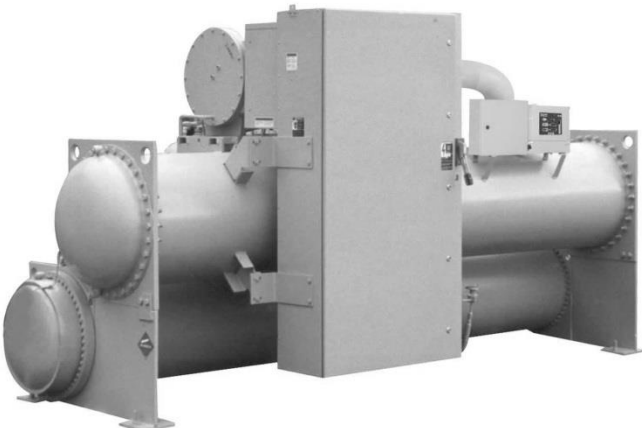
**2.2.2.4 CENTRALE FRIGORIFERA**

Nella centrale frigorifera sono installati 2 gruppi frigoriferi York (1'144 kWf ciascuno) con compressore a vite, un gruppo frigorifero York (1'400 kWf) con compressore centrifugo e un gruppo centrifugo della Daikin, di recente acquisizione, con potenza frigorifera pari a 1'500 kW (tabella 2.14). Il fluido termovettore a bassa temperatura in uscita dai gruppi frigo è inviato a un collettore, posizionato nelle immediate vicinanze, dal quale si diramano le mandate verso i vari terminali di utilizzazione.



**Figura 2.17 - Schema planimetrico centrale frigorifera AOB.**

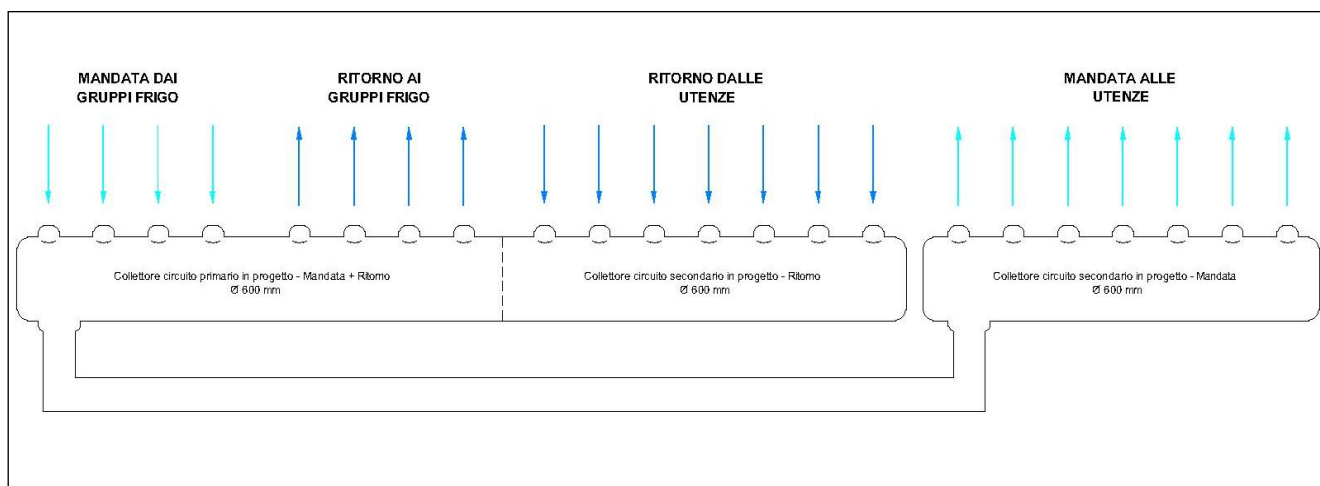
Tabella 2.14 – Dati di targa dei gruppi frigo.

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

Le tubazioni di mandata e ritorno dei quattro gruppi frigo sono convogliate in un collettore e connesse ai collettori di mandata e ritorno dalle utenze, in modo da costituire un separatore idraulico (figura 2.18), il quale consente



all'impianto di lavorare costantemente senza differenze di pressione tra i collettori di mandata e ritorno dei circuiti primario e secondario, in modo da evitare, in condizioni ottimali e con pompe e collettori adeguatamente dimensionati, fenomeno di interferenza tra le pompe. Quando le portate del circuito primario e di quello secondario sono perfettamente bilanciate, la temperatura di mandata dal generatore di calore è identica a quella in ingresso all'impianto secondario e, in tali condizioni, l'impianto lavora alla migliore efficienza possibile con il minimo consumo di energia. Il separatore idraulico, in questo caso, dovrebbe essere in grado di far lavorare ogni pompa solo ed esclusivamente per il suo circuito consentendo pertanto di evitare azioni di reciproco disturbo tra le pompe che lavorano per circuiti diversi: azioni che possono far "bruciare" le pompe, costringendole a lavorare fuori campo, sottrarre forza motrice alle pompe stesse, rendendole incapaci di fornire le prestazioni richieste e far funzionare gli impianti in condizioni diverse da quelle ottimali previste in progetto.





**Figura 2.18 – Separatore circuito primario e secondario in centrale frigo.**

I condensatori dei gruppi sono del tipo a raffreddamento evaporativo, ottenuto mediante la circolazione forzata dell'aria, forzata da due ventilatori assiali su dei pacchi di scambiatori a lamine. Ogni gruppo frigo è collegato ad una singola torre di raffreddamento, per un totale di 4 torri, collocate nell'area antistante la centrale termica, al livello del piano strada (figura 2.19). Le specifiche tecniche delle varie torri sono riportate nella tabella 2.15.



**Figura 2.19 – Vista aerea delle torri evaporative.**

Tabella 2.15 – Dati di targa delle torri di raffreddamento.

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

### 2.2.3 IMPIANTI DI DISTRIBUZIONE DELL'ENERGIA TERMICA

In questa sezione sarà descritta la distribuzione verticale del fluido termovettore, partendo dalle centrali tecnologiche, collocate al piano -1, fino ad arrivare a tutti i reparti dell'ospedale. Le tubazioni del fluido caldo, in uscita dalla sottocentrale termica, percorrono orizzontalmente il vuoto tecnico, situato sotto il piano seminterrato, fino ad arrivare alle colonne verticali di distribuzione, realizzate sia internamente sia esternamente alla struttura. Il fluido termovettore freddo, proveniente dal collettore di mandata della centrale frigo, è inviato tramite otto diverse linee alle utenze: tre di queste alimentano le UTA a 2 tubi della Nuova Hall, il reparto di Ginecologia e il Trauma Center; un'altra linea è dedicata alle altre UTA a due tubi; un'ulteriore linea serve i fan-coil; tutte le restanti sono linee sono a disposizione per le UTA a 4 tubi. Queste ultime hanno delle colonne di distribuzione verticale dedicate, le altre (UTA a 2 tubi e fan-coil) percorrono le stesse linee del fluido caldo, intercettando, tramite valvole a tre vie per la commutazione caldo/freddo, le linee di mandata dalla centrale termica.

#### ➤ Distribuzione verticale circuito radiatori

Il circuito di distribuzione del fluido termovettore verso i radiatori, presenti dal 1° piano fino all'11°, parte dalla sotto-centrale termica, attraversa il vuoto tecnico e si suddivide in sei colonne verticali, collocate in appositi cavedi realizzati all'interno della struttura.

Le colonne sono distribuite in maniera uniforme in modo da coprire tutta la superficie dei piani: la colonna A è situata nell'ala est, la B e la D sono nei pressi dei corpi ascensori dei blocchi nord-est e sud-ovest, la F nell'ala nord, la E nell'ala sud e la H nell'ala ovest (figura 2.20a).

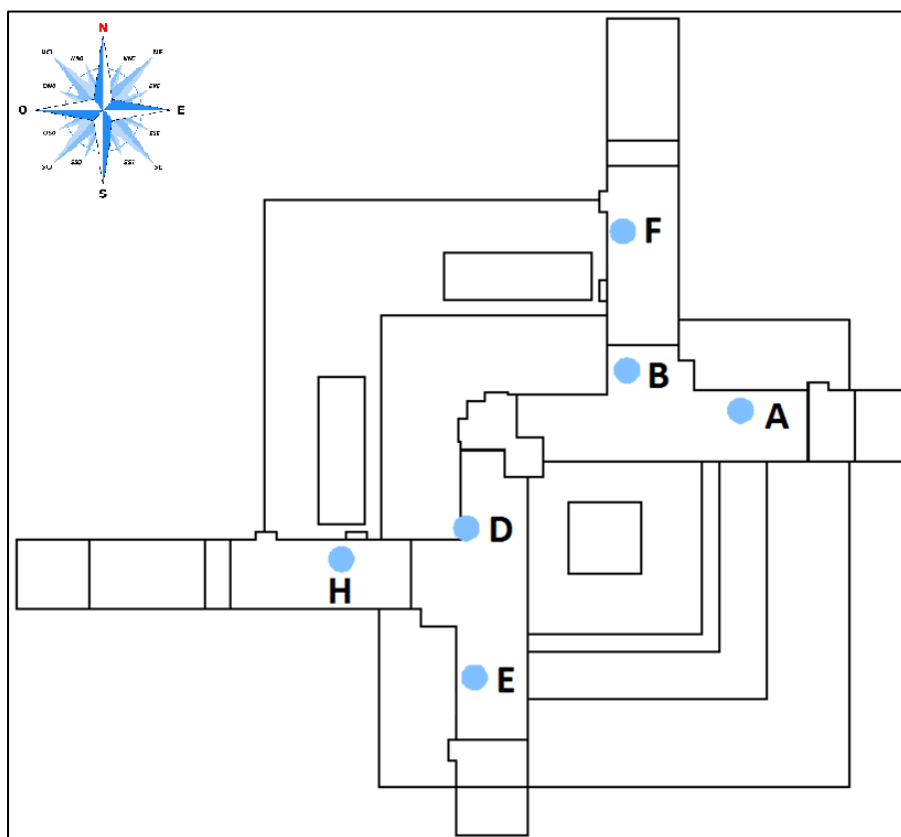


Figura 2.20a – Localizzazione colonne verticali circuito radiatori.

#### ➤ Distribuzione verticale circuito UTA 2 tubi

La distribuzione verticale verso i vari piani (-1, dal 1° al 7° tramite UTA; 8°, 10° e 11° con recuperatori MP3) avviene tramite tre colonne verticali: le colonne A e D, collocate in prossimità dei corpi scala per i visitatori dei corpi nord-est e sud-ovest; la colonna E, passante all'interno di un cavedio realizzato nei pressi del corpo scala del braccio sud (figura 2.20b).

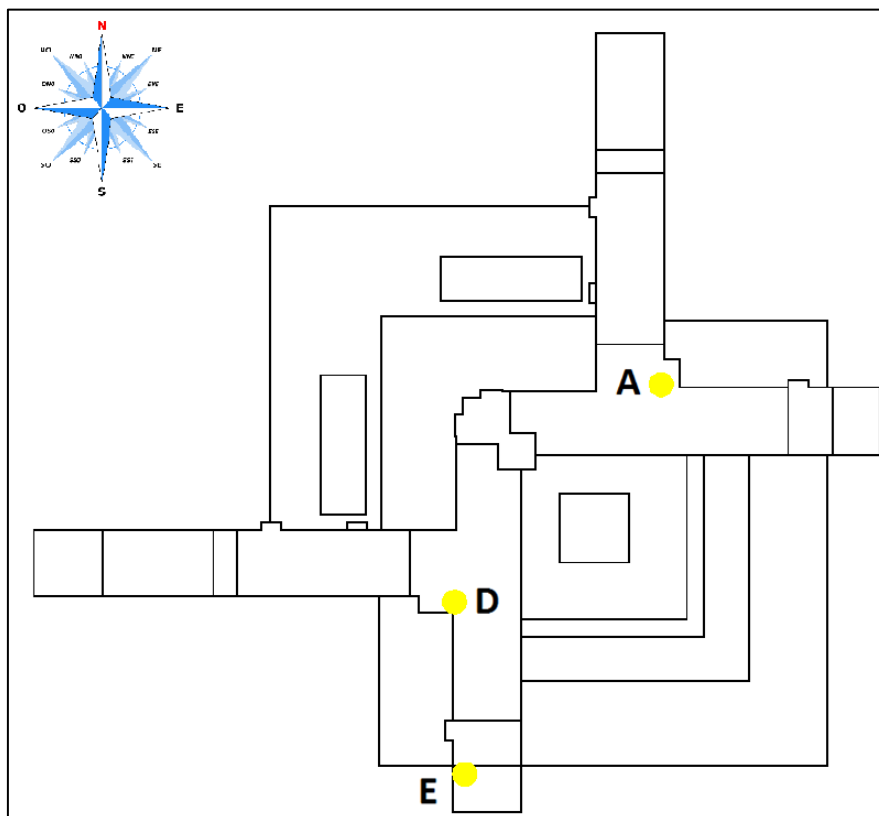


Figura 2.20b - Localizzazione colonne verticali UTA a 2 tubi.

➤ **Distribuzione verticale circuito UTA 4 tubi**

La distribuzione del fluido termovettore alle UTA a 4 tubi, dislocate nei reparti critici, avviene tramite quattro colonne verticali: la colonna 1 è adiacente al corpo scala per il personale del braccio Est; la colonna 2 è situata in prossimità del corpo ascensori dei visitatori nel braccio Nord; la colonna 3 si trova accanto al corpo ascensori dei visitatori nel braccio Ovest; infine, la colonna 4 è collocata in prossimità del corpo scala del personale nel braccio Sud (figura 2.20c).

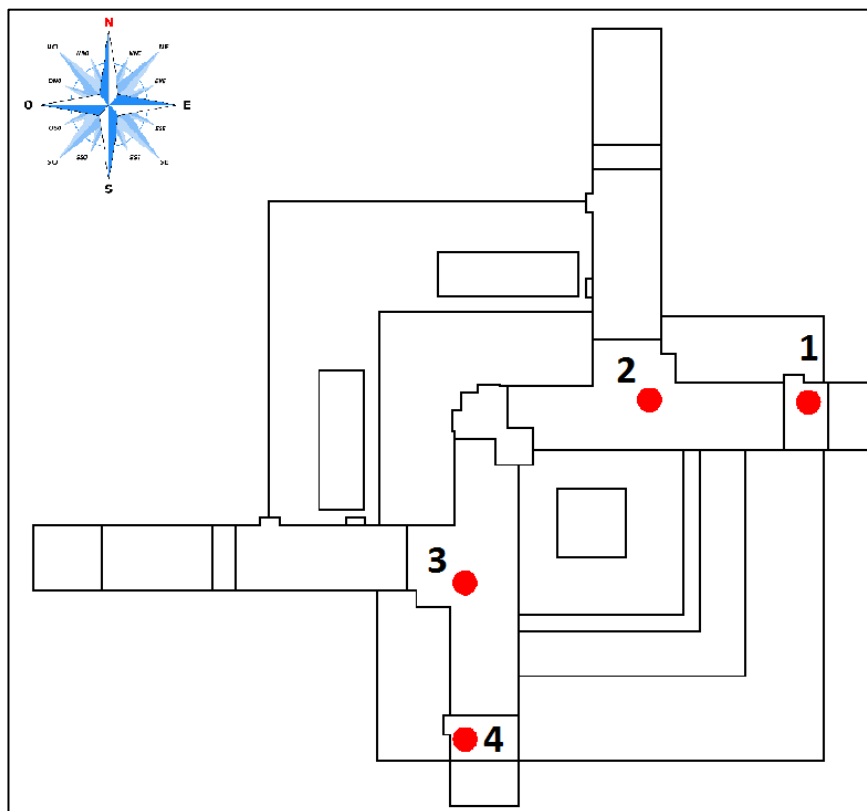
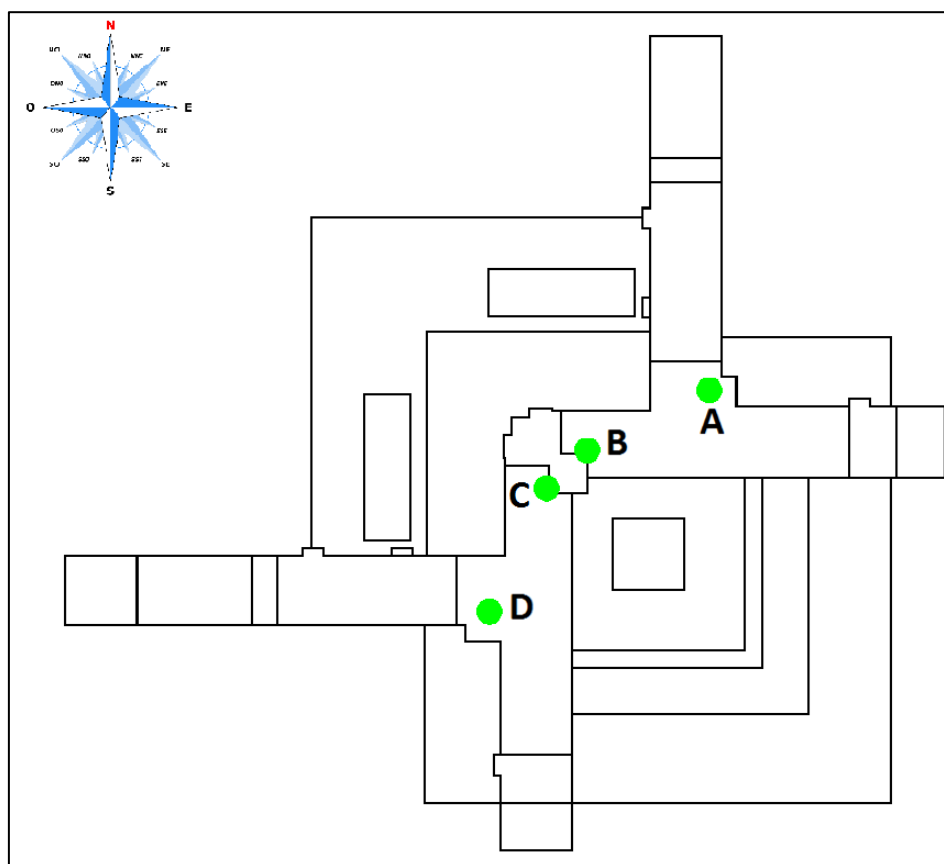


Figura 2.20c – Localizzazione colonne verticali UTA a 4 tubi.

### ➤ Distribuzione verticale circuito Fan-Coil

I fan-coil, presenti in tutti i livelli del corpo centrale dell'AOB, sono alimentati da quattro colonne verticali: la B e C sono adiacenti al corpo scala centrale; mentre le colonne A e D sono situate in prossimità del vano scala principale (figura 2.20d).



**Figura 2.20d - Localizzazione colonne verticali circuito Fan-Coil.**

#### **2.2.4 IMPIANTI DI EROGAZIONE DELL'ENERGIA TERMICA**

All'interno dell'AOB sono presenti i seguenti terminali d'erogazione dell'energia termica [8]:

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

L'utilizzo delle varie tipologie di terminale dipende dalla classificazione del reparto, basata sulla criticità delle attività sanitarie svolte: nei "Reparti Critici", vedi tabella 2.16, si utilizzano soltanto impianti di climatizzazione a tutt'aria (UTA a 4 tubi); negli altri reparti sono utilizzati impianti di condizionamento misti aria-acqua, con l'aria primaria per il rinnovo fornita da UTA a 2 o 4 tubi o recuperatori di calore, la regolazione delle condizioni termoigrometriche interne avviene tramite fan coils, radiatori o pompe di calore di piccola potenza.

La necessità di effettuare questa differenziazione impiantistica tra i reparti è causata dalle particolari esigenze di controllo delle condizioni termoigrometriche (temperatura interna, rinnovo d'aria, umidità relativa) interne e della qualità dell'aria, ottenuta tramite appositi sistemi di filtraggio, prescritta dalle normative vigenti [6].

Tabella 2.16 – Reparti critici.

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

I Radiatori e i Fan-Coil sono installati in tutti i livelli della struttura, solitamente negli uffici, studi medici, degenze e nei servizi. Essi consentono soltanto di regolare la temperatura dell'aria interna, senza intervenire sui valori di umidità relativa e sul rinnovo dell'aria. Una prima regolazione di questi dispositivi avviene in sottocentrale termica, come descritto precedentemente, tramite il controllo della temperatura di mandata ai terminali. Una seconda regolazione all'interno degli ambienti può essere effettuata soltanto per i fan-coil, agendo sulla velocità dei ventilatori che equipaggiano le macchine. Quest'ultima tipologia di regolazione non è sotto il controllo del personale tecnico dell'azienda, ma è lasciata alle persone (pazienti, visitatori, medici, etc.) presenti nel locale.

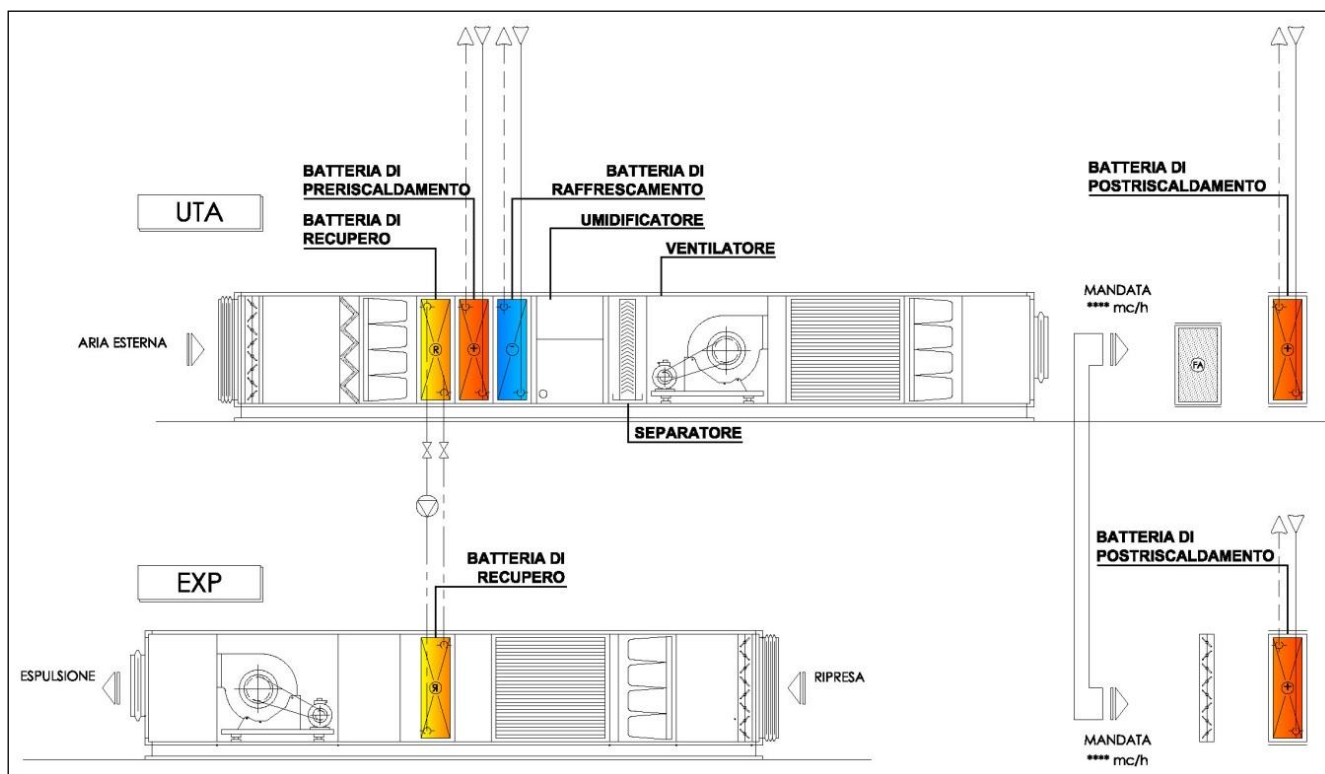
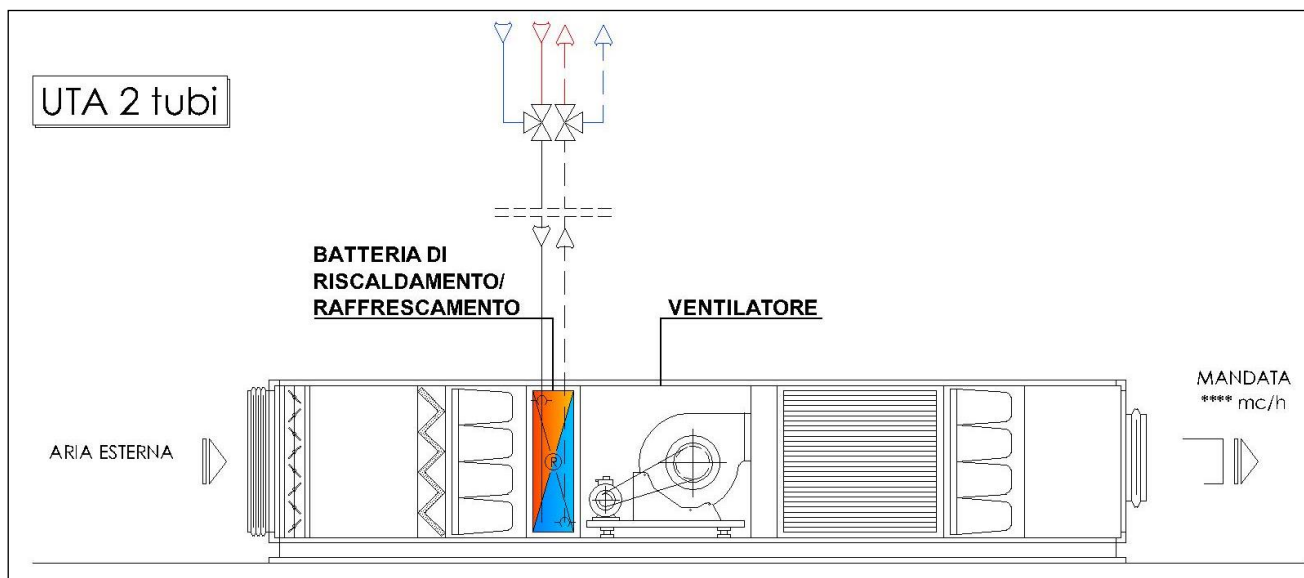


Figura 2.21 – Schema generico UTA a 4 tubi (tipologia installata nel Trauma-Center).

Le UTA a 4 tubi sono dislocate primariamente nei reparti critici e sono alimentate da due circuiti del fluido termovettore, caldo e freddo, provenienti dalle centrali termiche. Il fluido termovettore caldo alimenta la batteria

per il riscaldamento, suddivisa, secondo la configurazione installata, in ulteriori due batterie per eseguire il pre e il post riscaldamento dell'aria. In alcune macchine sono presenti anche delle batterie per il recupero dell'energia termica dall'aria di ripresa (figura 2.21). Lo scopo delle UTA a 4 tubi è quello di fornire l'aria di rinnovo e regolare i valori di temperatura e umidità relativa all'interno degli ambienti, garantendo il rispetto dei parametri microclimatici prescritti dalle normative vigenti [6]. Le caratteristiche termoigrometriche dell'aria in mandata verso gli ambienti da climatizzare sono regolate da una centralina di controllo che aziona diverse valvole motorizzate a tre vie disposte nei circuiti del fluido termovettore. I segnali di controllo della centralina sono funzione dei valori di temperatura e umidità relativa misurati dalle sonde localizzate sia all'interno degli ambienti sia nelle canalizzazioni dell'aria di ripresa.

Le **UTA a 2 tubi** sono utilizzati nelle seguenti zone dell'ospedale: l'ex-centro ustionati al 7° piano, negli ambulatori, uffici e laboratori del piano piastra, nella zona adibita a cucina e mensa. Le macchine sono alimentate con il fluido termovettore proveniente dalla sottocentrale termica o dalla centrale frigorifera. La selezione tra le due tipologie di fluido avviene tramite un'apposita valvola a tre vie, localizzata in sottocentrale termica, azionata manualmente ad ogni cambio di stagione dal personale tecnico, che permette di indirizzare alle UTA il fluido termovettore proveniente dalla centrale frigorifera all'inizio della stagione di raffrescamento (circa maggio - ottobre), oppure il fluido proveniente dalla sottocentrale termica all'inizio della stagione di riscaldamento (circa novembre - aprile). Il compito delle UTA a 2 tubi è quello di garantire il rinnovo dell'aria all'intero degli ambienti e una limitata regolazione delle temperature interne, lasciando al resto degli impianti, radiatori e ventilconvettori, il compito di soddisfare il fabbisogno e/o carico termico rimanente. La temperatura dell'aria di mandata ha un valore costante, fissato dal personale tecnico dell'A.O.B., secondo la tipologia di zona servita e la stagione, tramite il pannello di controllo delle singole macchine. Il software di controllo permette di controllare la temperatura di mandata dell'aria regolando l'apertura della valvola motorizzata a tre vie, il cui segnale di controllo è dipendente dalla temperatura misurata da un'apposita sonda posizionata nella canalizzazione dell'aria di mandata.



**Figura 2.22 – Schema generico UTA a 2 tubi.**

I **recuperatori MP3** sono installati dal piano 3° fino all'11°, con l'esclusione del 5° piano in cui sono localizzati i blocchi operatori. La differenza rispetto ai sistemi precedenti sta nella presenza di una batteria di scambio termico, vedi figura 2.23, che consente di recuperare parte del calore sensibile presente nell'aria di espulsione. A valle del recuperatore di calore e a monte del canale di mandata è situata una batteria di riscaldamento/raffrescamento, alimentata tramite lo stesso circuito che porta il fluido termovettore alle UTA a 2 tubi, che consente di regolare la temperatura dell'aria immessa negli ambienti. Date le caratteristiche dell'impianto descritto, esso viene utilizzato soltanto per il rinnovo dell'aria, lasciando ad altri sistemi, come radiatori e fan-coil, il compito di sopperire ai fabbisogni/carichi termici dei locali specifici. Il sistema di regolazione della temperatura di mandata dell'aria di questi sistemi è identico a quello presente nelle UTA a 2 tubi.

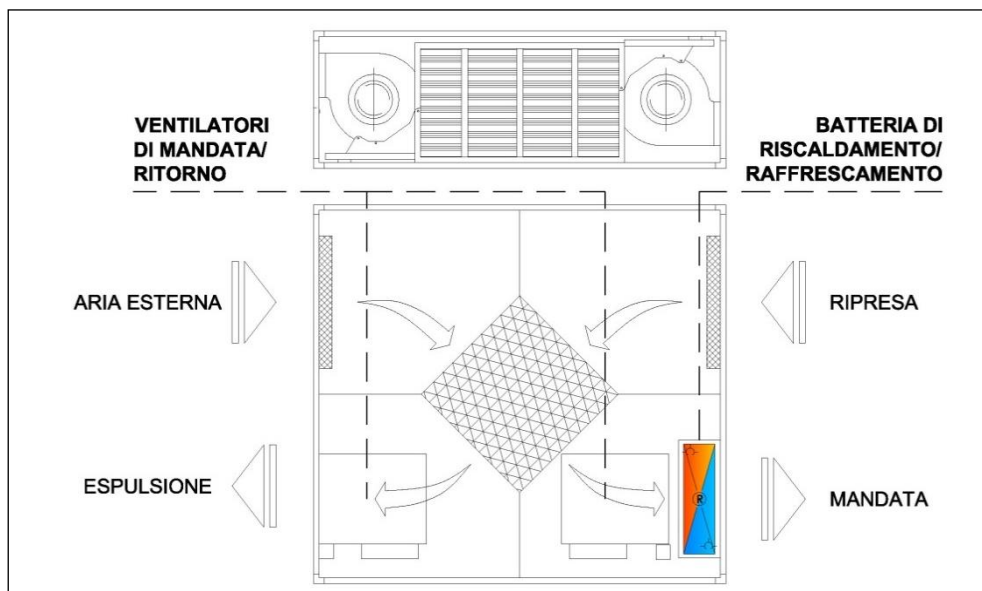


Figura 2.23 – Schema generico recuperatori MP3.

Nella tabella seguente è presentata una sintesi delle potenze termiche per riscaldamento e raffrescamento installate in ciascun piano dell'AOB, suddivise per tipologia d'impianto di erogazione. Ulteriori dettagli sulle caratteristiche tecniche principali di tutti i sistemi di erogazione dell'energia termica presenti nell'AOB sono riportati nell'Appendice C.

Tabella 2.17 – Potenza termica installata nei vari piani, suddivisa per tipologia d'impianto di erogazione [8].

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

**Legenda**

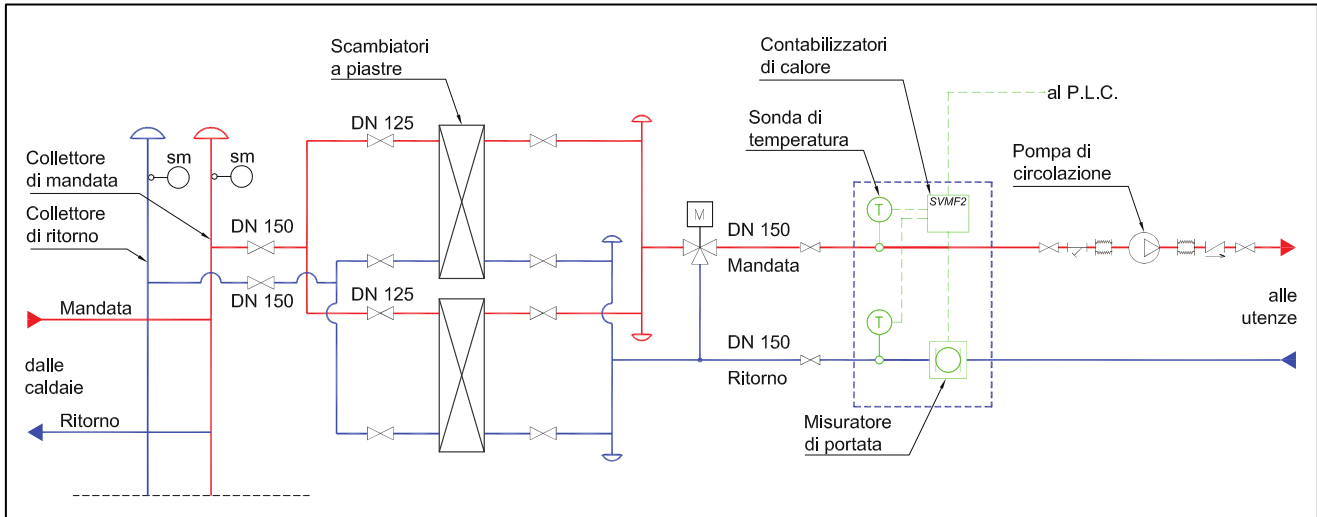
- Dati parziali
- \* Dati comprensivi della potenza del recuperatore
- n.d.** Dati non disponibili
- n.p.** Tipologia di terminale non presente



**2.2.5 SISTEMI DI MONITORAGGIO DEI CONSUMI TERMICI**

**2.2.5.1 MONITORAGGIO RISCALDAMENTO E ACS**

Nell'anno 2004, a seguito dell'acquisto delle nuove caldaie, è stato installato nella sottocentrale termica un sistema di acquisizione e registrazione dei consumi energetici connessi al riscaldamento e alla produzione di ACS. La contabilizzazione energetica è compiuta separatamente per tutte le tipologie di utenze alimentate dalla sottocentrale, ossia: Radiatori; UTA a 2 e 4 tubi; Fan-Coil; Acqua Calda Sanitaria.



**Figura 2.24 - Schema semplificato dei misuratori di calore (centrale termica).**

**Tabella 2.18 - Caratteristiche del contabilizzatore di calore (centrale termica).**

DISPOSITIVO	MARCA	MODELLO	CARATTERISTICHE TECNICHE
Contabilizzatore di energia	ABB	SVM F2	Display LCD e interfaccia M-bus 2 ingressi a impulsi per contatori esterni
Sonde di temperatura	/	PT500	Sonde di temperatura a immersione Elemento sensibile a termo resistenza Pt500Ω. Connessioni 2 o 4 fili diametro max 9 mm. Range temperatura: 0 – 180°C Δt apprezzabile = 2 – 100 °C
Contatore volumetrico	/	WPH-T-HD-D	Contatore Woltmann per acqua calda fino a 120 °C Dimensioni costruzione DIN ISO 4064, DN 50 - 300 Pressione di funzionamento: fino 16 bar

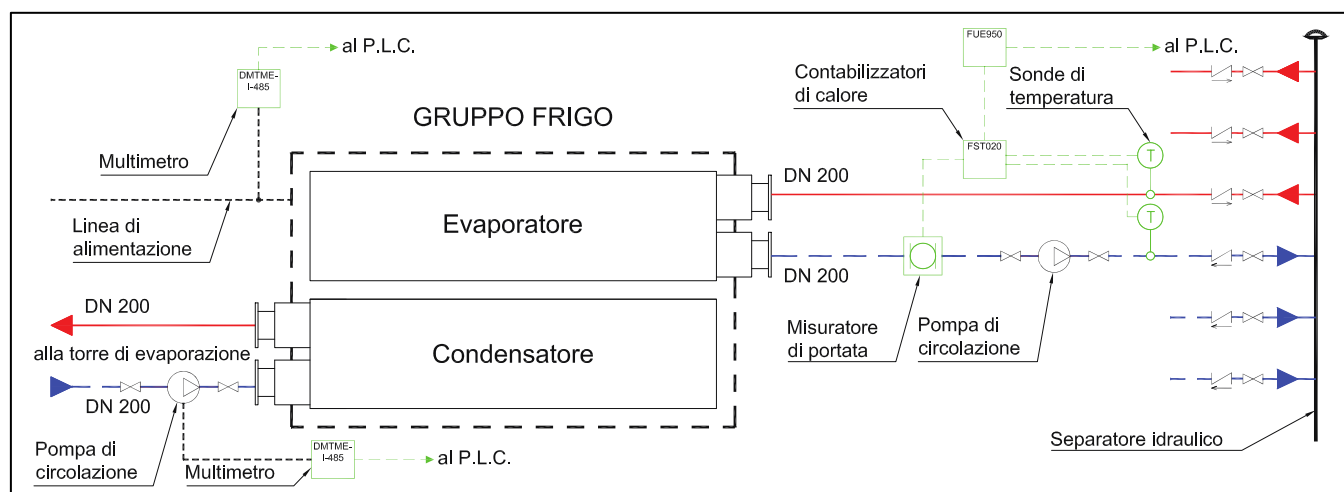
Il sistema di acquisizione dei consumi, il cui schema semplificato è riportato nella figura 2.24, è inserito a valle degli scambiatori a piastre e alla valvola a tre vie che serve per regolare la temperatura di mandata del fluido termovettore alle utenze. Esso è costituito da un contatore volumetrico, inserito nella tubazione di ritorno del fluido termovettore, e da due sonde di temperatura poste in mandata e in ritorno. I segnali elettrici, in uscita da questi tre misuratori, sono inviati a un contabilizzatore di calore che elabora i segnali e invia il dato di consumo al PLC situato nel locale dei caldaisti. Unica eccezione è costituita dal circuito dell'acqua calda sanitaria, in cui il sistema di rilevamento dei consumi è localizzato a monte dei scambiatori di calore situati all'interno dei 4 serbatoi d'accumulo. Le caratteristiche del contabilizzatore di calore sono riportate nella tabella 2.18. Oltre ai misuratori di energia termica, sono presenti delle sonde che misurano la temperatura di mandata del fluido termovettore verso i terminali del riscaldamento (radiatori, ventilconvettori, UTA), le temperature dell'ACS, sia in mandata sia dentro i boiler, le temperature del fluido in mandata e ritorno dalle caldaie. Tutti i dati rilevati, di cui si riporta una sintesi

nella tabella 2.19, sono inviati al PLC e salvati con cadenza oraria in diversi file in formato csv, la cui modalità di elaborazione e i risultati ottenuti sono presentati nel capitolo successivo.

**Tabella 2.19 - Dati acquisiti ed elaborati (Riscaldamento e produzione ACS).**

FILE archivio dati nel PLC	Unità di Misura
Consumo energia acqua calda sanitaria	MWh
Consumo energia scambiatore 1-2 (circuito radiatori)	kWh
Consumo energia scambiatori 3 e 4 (circuito UTA a 2 tubi)	kWh
Consumo energia scambiatori 5 e 6 (circuito UTA a 4 tubi)	kWh
Consumo energia scambiatori 7 e 8 (circuito Fan-coil)	kWh
Temperatura esterna	°C
Temperatura di mandata dalle caldaie	°C
Temperatura di ritorno alle caldaie	°C
Temperatura di mandata ACS ( accumuli 01 e 02)	°C
Temperatura di mandata ACS ( accumuli 03 e 04)	°C
Temperatura di mandata circuito radiatori	°C
Temperatura di mandata circuito UTA a 2 tubi	°C
Temperatura di mandata circuito UTA a 4 tubi	°C
Temperatura di mandata circuito fan-coils	°C
Temperature ACS dei singoli serbatoi di accumulo (1-2-3-4)	°C

### 2.2.5.2 MONITORAGGIO RAFFRESCAMENTO



**Figura 2.25 - Schema semplificato dei misuratori di calore (centrale frigorifera).**

All'inizio del progetto di ricerca ci si è accorti che non era presente presso l'AOB, contrariamente a quanto avviene per la contabilizzazione del riscaldamento e dell'ACS, un sistema per il monitoraggio dei consumi di energia frigorifera. Si è deciso quindi di acquistare e installare un sistema di contabilizzazione dell'energia prodotta dai 4 gruppi frigoriferi presenti in centrale. Tale sistema (figura 2.25 e tabella 2.20), installato nella primavera del 2012 e funzionante a partire dal mese di maggio di tale anno, è costituito da 4 contatori di calore, ognuno di essi costituito da un misuratore di portata ultrasonico e da una coppia di sonde di temperature a contatto a resistenza di platino, installate nelle tubazione di mandata e ritorno che portano il fluido termovettore da ciascun gruppo frigo al

separatore idraulico, incaricato della distribuzione del fluido freddo verso i vari reparti dell'ospedale. I segnali in uscita dai contabilizzatori d'energia vengono trasmessi, tramite interfaccia RS232, all'unità centrale che archivia i dati in una propria memoria interna e li invia ad un PC remoto, con il quale è possibile monitorare lo stato di funzionamento dei 4 gruppi frigo e archiviare in un apposito database tutti i dati (tabella 2.21) rilevati dal sistema.

**Tabella 2.20 - Caratteristiche del contabilizzatore di calore (centrale frigorifera).**

DISPOSITIVO	MARCA	MODELLO	CARATTERISTICHE TECNICHE
Unità centrale M-Bus	SIEMENS	OZW10	Letture max 750 dispositivi con interfaccia M-Bus Conforme EN 1434-3
Contabilizzatore di energia	SIEMENS	SITRANS FUE950	Calcolo e misura di: E, M, V, Th, Tc, K Range temperatura: -20 – +190°C
Contabilizzatore flusso volumetrico	SIEMENS	SITRANS FST020	Display LCD Interfaccia M-bus 2 ingressi a impulsi per contatori esterni Range temperatura: 0 – 190°C $\Delta t$ apprezzabile = 2 – 120 °C
Sonde di temperatura	G. Riccato	/	Termometri a resistenza di platino Sensore: Pt 500 $\Omega$ . Elemento: singolo a 2 fili Range temperatura: -20 – 200°C
Contatore volumetrico	Controlotron	1012MS-8	Trasduttori a ultrasuoni Range temperatura: -18 – 60°C Precisione: +/- 5% portata volumetrica Risoluzione 0.03 m/s

Con lo scopo di valutare con maggiore precisione l'EER di ciascuna macchina installata nella centrale frigorifera, nell'autunno del 2012 è stato installato un sistema per il monitoraggio degli assorbimenti elettrici. In totale sono stati installati sei multimetri trifase (ABB mod. DMTME-I-485): quattro per la misura dei consumi elettrici dei compressori dei gruppi frigo; uno per la misura dei consumi elettrici della pompa di circolazione installata nella la linea che porta il fluido del nuovo gruppo Daikin (gruppo N°4) al condensatore; l'ultimo multimetro è dedicato alla misura degli assorbimenti dei 2 ventilatori collocati nella torre evaporativa del gruppo N°4. Tale sistema non è attualmente dotato di un apposito software per la registrazione dei dati storici di consumo, ma consente soltanto la visualizzazione dei valori istantanei e di quelli cumulati, a partire dall'inizio del periodo di rilevamento, delle varie grandezze acquisite. Per questo motivo, e per i forti ritardi che non hanno consentito l'installazione primaverile di tali dispositivi, non è stato possibile recuperare dati storici relativi ai consumi elettrici della sola centrale frigorifera. Una valutazione di essi è stata comunque fatta a partire dai dati orari relativi all'intero consumo elettrico dell'A.O.B.

**Tabella 2.21 - Dati acquisiti ed elaborati (Raffrescamento).**

FILE archivio dati nel PLC	Unità di Misura
Consumo energia termica gruppo frigorifero N°1-2-3-4	kWh
Portata fluido termovettore (gruppo N°1-2-3-4)	m <sup>3</sup> /h
Temperatura di mandata fluido termovettore (gruppo N°1-2-3-4)	°C
Temperatura di ritorno fluido termovettore (gruppo N°1-2-3-4)	°C

### **3 AUDIT ENERGETICO “AOB”**

In questo capitolo saranno presentate le procedure che hanno consentito la redazione dell’audit energetico dell’Azienda Ospedaliera Brotzu, attraverso il quale si è ricostruito un quadro approfondito e realistico dei consumi e dei flussi energetici all’interno di essa. Nelle prime fasi del lavoro si è proceduto a reperire tutte le informazioni necessarie attraverso sopralluoghi in situ, colloqui con il personale tecnico dell’azienda e raccogliendo tutto il materiale cartaceo e digitale necessario, quest’ultimo contenente i dati acquisiti dai vari sistemi di monitoraggio presenti nell’azienda. Terminata la fase di raccolta delle informazioni e censito tutto il materiale in possesso, si è proceduto con l’elaborazione e la verifica dei dati, rilevando eventuali anomalie presenti. I dati alterati sono stati corretti, attraverso varie procedure numeriche, o integrati tramite ulteriori rilevamenti in situ. Tutti i risultati delle elaborazioni numeriche hanno consentito di realizzare un quadro finale esaustivo di tutta la contabilità energetica, dei flussi di energia in ingresso e uscita dagli impianti e la definizione degli indicatori energetici più significativi dell’AOB.

Nella prima parte del capitolo verrà descritta la modalità di elaborazione dei dati raccolti, mettendo in risalto le anomalie e incongruenze riscontrate per le varie tipologie di utenze e i metodi adottati per porvi rimedio. Nella seconda parte del capitolo sarà presentato il bilancio energetico dell’AOB, in cui è valutato l’ammontare dell’energia in ingresso alla struttura, insieme alla sua incidenza economica e al suo andamento storico, e gli usi finali di tale energia, suddivisa per tipologia di utenza. Infine sarà presentata una breve analisi degli indicatori energetici più significativi e del loro confronto con altre aziende ospedaliere del contesto nazionale.

#### **3.1 ELABORAZIONE ED ANALISI DEI DATI ACQUISITI**

##### **3.1.1 RISCALDAMENTO**

Tutti i dati rilevati dal sistema di acquisizione, descritto nel paragrafo 2.2.5.1, sono registrati su dei file in formato .csv, nei quali è riportata la data e l’ora nella quale è avvenuta la registrazione e la grandezza rilevata. L’inizio della registrazione su file parte dalla messa in esercizio del sistema di rilevamento, o dall’ultimo reset, e si conclude nell’istante in cui i file sono stati prelevati dal PC. Per quanto riguarda il monitoraggio delle grandezze relative ai consumi per riscaldamento, l’AOB ha reso disponibili i dati del periodo compreso tra il 04/07/2007 e il 13/04/2011. Un secondo set di dati, relativo al periodo che va dal 20/04/2012 al 20/03/2013, è stato impiegato per la verifica del funzionamento del sistema di monitoraggio a seguito dell’intervento, commissionato dall’AOB, di manutenzione, verifica e taratura della strumentazione di misura, effettuato dalla ditta GDM e realizzato tra dicembre 2011 e febbraio 2012.

Su questi dati è stata svolta, tramite un apposito software compilato in ambiente Matlab [11], una prima verifica da cui sono emerse diverse criticità. La prima riguarda l’assenza di alcune ore di rilevamento, in numero molto ridotto e discontinuo ma tale da comportare un errore, sui valori di consumo annuale, stimato intorno allo 0.2%. Tali “buchi”, presenti in quasi tutti i file, sono stati corretti tramite software, interpolando i valori di consumo delle ore precedenti al periodo mancante. In tal modo è stato possibile ottenere una serie di dati completa e sincronizzata per tutte le 8760 ore che compongono un anno. Un’altra anomalia riscontrata, ben più grave della precedente, è stata la presenza di lunghi periodi di rilevamento di consumo nullo, nonostante in tal lasso temporale vi sia stato un consumo reale di energia (Es. consumo nullo di riscaldamento per l’intero mese di gennaio). È stata inoltre riscontrata la totale mancanza di dati di consumo, o la presenza di caratteri non decifrabili (es. #####), nelle celle di diversi file relativi ai consumi energetici. Per entrambi questi tipi di anomalie si è intervenuto con delle correzioni, effettuate sempre tramite interpolazioni dei periodi precedenti, soltanto in presenza di piccoli periodi di discontinuità. Nel caso di dati inutilizzabili per lunghi periodi, superiori alle 24 ore, si è deciso di non intervenire con delle correzioni ed eliminare il dato rilevato. La difformità tra dati rilevati e attesi, così come la mancanza o

illeggibilità di dati, ha comportato l'inutilizzabilità di interi periodi di rilevamento, le serie di dati maggiormente danneggiate sono risultate essere le seguenti:

- Scambiatori 5-6 (UTA a 4 tubi): dati non utilizzabili dal 01/01/08 al 29/05/08
- Scambiatori 7-8 (Fan-Coil): dati non utilizzabili dal 26/05/10 al 31/12/10

Terminata questa prima analisi e correzione dei dati in nostro possesso, si è proceduto con un controllo dei valori rilevati, verificando la presenza di errori di carattere numerico incompatibili con la realtà fisica del fenomeno, quali numeri negativi o valori di consumo superiori alle potenzialità delle caldaie presenti nella struttura o degli scambiatori che alimentano le varie linee dei circuiti idronici. Tutti i valori anomali sono stati corretti imponendo, come valore massimo ammissibile di consumo istantaneo (kW), la massima potenza termica erogabile dagli scambiatori di calore collocati a monte dei contabilizzatori di calore. Oltre ai consumi di energia termica, sono stati elaborati i file relativi alle temperature del fluido termovettore. Tali file, al contrario di quelli relativi ai consumi, non contenevano importanti anomalie, pertanto non sono state necessarie complesse elaborazioni e correzioni per renderli adoperabili per le future analisi.

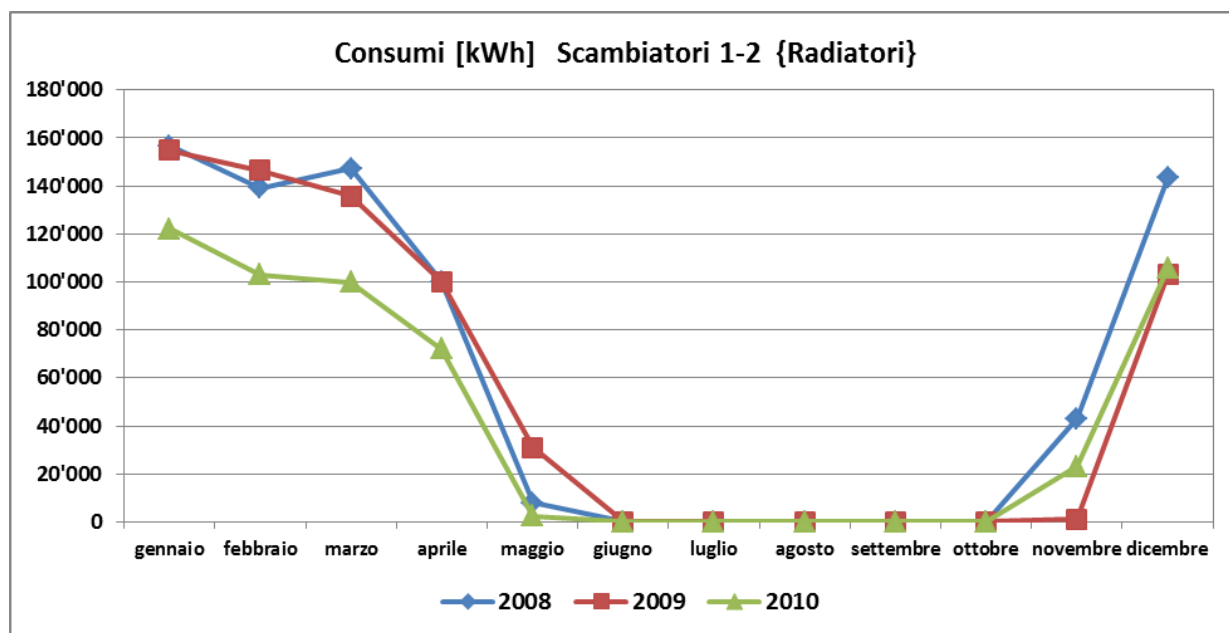
Di seguito presenteremo in dettaglio le analisi effettuate e le problematiche riscontrate per tutte le tipologie di dati acquisiti. L'analisi delle grandezze rilevate per il riscaldamento dev'essere suddivisa tra le varie voci che la compongono: radiatori; UTA a 2 tubi; UTA a 4 tubi; Ventilconvettori. Presentiamo in questa sede l'analisi dei rilievi del triennio 2007-2011, preso come riferimento per il calcolo dei consumi energetici. Tutti i dati sono stati elaborati su base oraria e mensile, ma per semplicità di trattazione faremo di solito riferimento ai valori mensili.

## ➤ RADIATORI

**Tabella 3.1 - Consumi energetici periodo 2008-2010: Radiatori.**

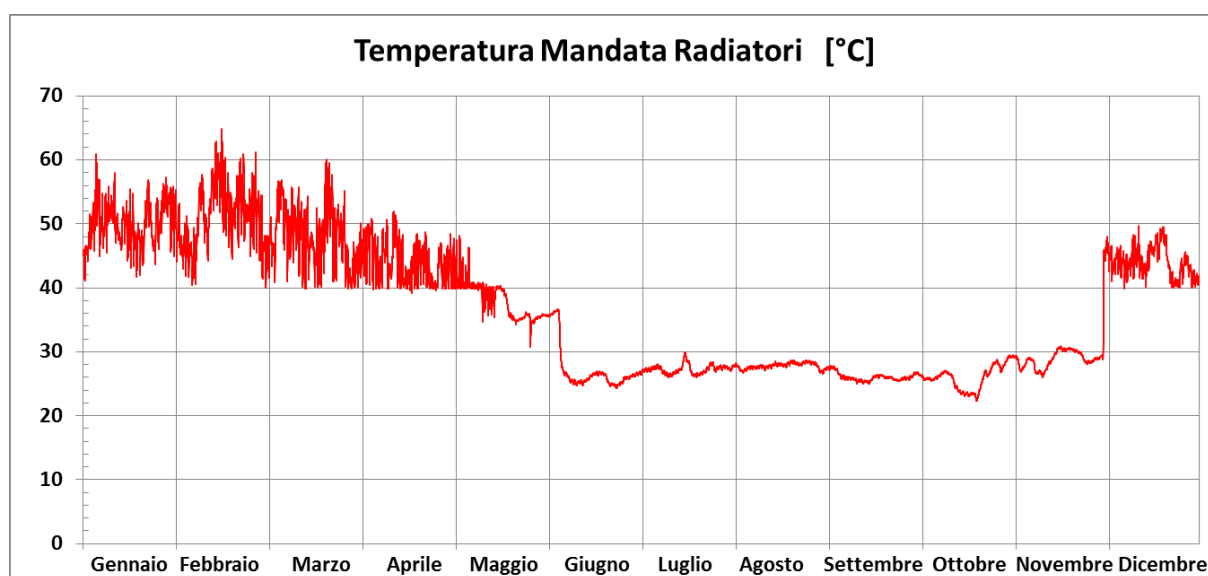
CONSUMI RADIATORI [kWh]	2008	2009	2010	Media 2008-2010
<b>GENNAIO</b>	156'796	154'887	121'996	138'068
<b>FEBBRAIO</b>	139'251	146'480	102'920	128'184
<b>MARZO</b>	147'350	135'799	99'923	117'466
<b>APRILE</b>	100'195	100'163	72'058	90'805
<b>MAGGIO</b>	7'831	30'941	2'315	13'696
<b>GIUGNO</b>	14	0	0	5
<b>LUGLIO</b>	0	0	0	0
<b>AGOSTO</b>	0	0	0	0
<b>SETTEMBRE</b>	0	0	0	0
<b>OTTOBRE</b>	0	0	0	0
<b>NOVEMBRE</b>	42'939	1'052	23'070	22'354
<b>DICEMBRE</b>	143'415	102'992	105'649	117'352
<b>TOTALE</b>	<b>737'791</b>	<b>672'314</b>	<b>527'931</b>	<b>627'929</b>

I consumi termici dei radiatori, che sono alimentati dagli scambiatori indicati come N°1 e N°2, sono monitorati da due sistemi separati, uno per scambiatore. Nel corso dell'analisi si farà sempre riferimento al risultato aggregato, sommando i consumi delle due linee e mediando i valori delle temperature del fluido termovettore nelle due linee del circuito.



**Figura 3.1 - Consumi energetici periodo 2008-2010: Radiatori.**

I dati di consumo dei radiatori, tra tutti quelli esaminati, sono risultati essere quelli più completi, pertanto i valori di consumo ricavati, vedi tabella 3.1 e figura 3.1, tengono conto della media dell'intero periodo di rilevamento. Nel periodo invernale d'utilizzo, dalla metà novembre a metà maggio, la temperatura di mandata del fluido termovettore è compresa tra 40-60°C, con dei valori medi mensili che si attestano tra i 45-50°C. Nel periodo estivo, a causa del mancato utilizzo di questi impianti, le temperature di mandata non si discostano significativamente dalla temperatura ambiente, circa 25-30°C, corrispondente a quella interna della sottocentrale termica. Un esempio è presentato nella figura 3.2, dove sono riportati i valori orari della temperatura di mandata, registrati nell'anno 2009.



**Figura 3.2 - Temperatura di mandata radiatori, anno 2009.**

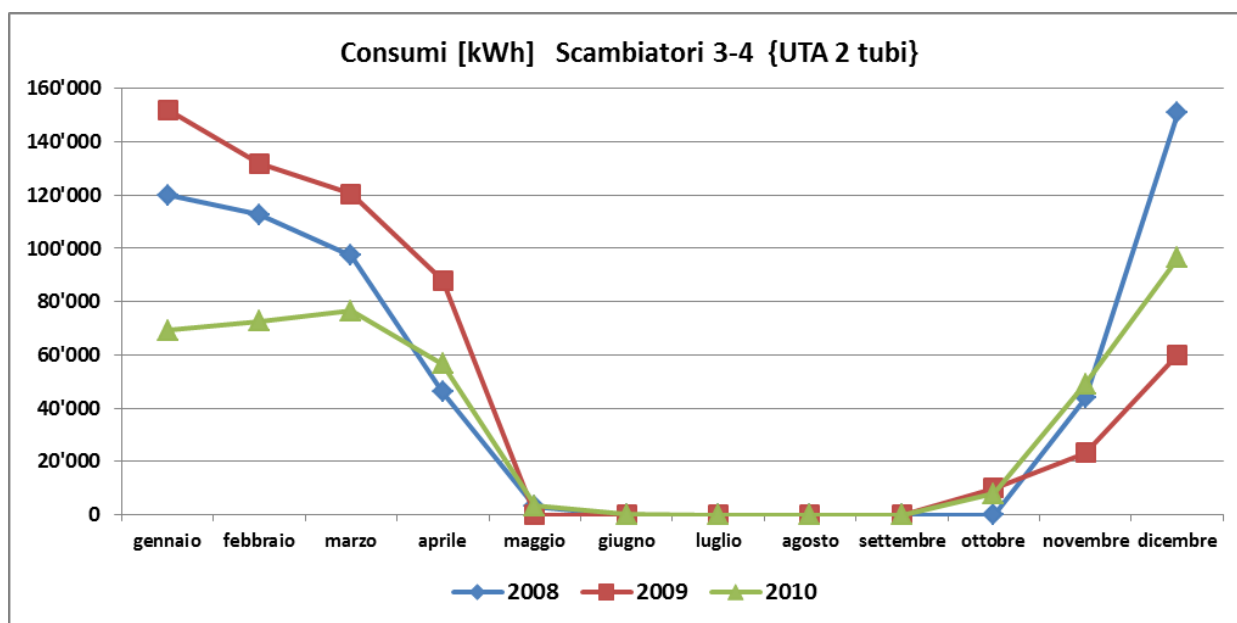
### ➤ UTA a 2 TUBI

L'analisi dei consumi delle UTA a 2 tubi (tabella 3.2 e figura 3.3) è stata effettuata basandosi sui dati dell'intero triennio 2008-2010, ad esclusione del periodo maggio-settembre del 2009. Infatti, in questi mesi è stato rilevato un consistente e anomalo consumo di cui non è stato possibile valutarne la causa. Tale anomalia, riscontrata soltanto nei dati di consumo ma non nei valori di temperatura, non si è più verificata nei periodi successivi, pertanto si è

deciso di eliminare l'intervallo di dati sospetto senza eseguire sostituzioni poiché sono stati ritenuti sufficienti i dati dall'anno precedente e successivo.

**Tabella 3.2 - Consumi energetici periodo 2008-2010: UTA a 2 TUBI.**

CONSUMI UTA 2 Tubi [kWh]	2008	2009	2010	Media 2008-2010
GENNAIO	119'898	152'059	69'298	113'203
FEBBRAIO	112'764	131'845	72'628	106'980
MARZO	97'323	120'392	76'531	93'130
APRILE	46'165	88'013	56'675	63'618
MAGGIO	3'245	Non Attendibile	3'350	3'298
GIUGNO	20	Non Attendibile	80	50
LUGLIO	0	Non Attendibile	34	17
AGOSTO	0	Non Attendibile	0	0
SETTEMBRE	0	Non Attendibile	0	0
OTTOBRE	0	10'018	7'997	6'005
NOVEMBRE	43'765	23'177	49'135	38'692
DICEMBRE	150'767	59'999	96'373	102'380
<b>TOTALE</b>	<b>573'946</b>	<b>585'502 (parziale)</b>	<b>432'101</b>	<b>527'371</b>



**Figura 3.3 - Consumi energetici periodo 2008-2010: UTA a 2 TUBI.**

Le temperature di mandata nel periodo invernale, da metà ottobre fino ai primi giorni di maggio, grazie al sistema di regolazione installato nella sottocentrale termica, hanno un andamento costante con delle oscillazioni contenute in  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ . La temperatura di set-point è stata fatta variare, dal personale dell'AOB, nel corso del periodo analizzato. Nel 2008 la temperatura di mandata è stata mantenuta intorno ai  $50^{\circ}\text{C}$ , nel 2009 sui  $60^{\circ}\text{C}$ , nella prima parte del 2010 a  $55^{\circ}\text{C}$  per poi passare nell'autunno dello stesso anno da  $50^{\circ}\text{C}$  a  $55^{\circ}\text{C}$  e infine a  $60^{\circ}\text{C}$  (vedi figura 3.4), quest'ultimo valore mantenuto anche nei primi mesi del 2011. Sono stati rilevati dei brevi periodi temporali, pari a poche ore, in cui la temperatura varia irregolarmente. Nel periodo estivo gli impianti a di UTA a 2 tubi non

sono utilizzati, le temperature rilevate oscillano intorno ai 17-21°C, inferiori a quelle dei radiatori e alla stessa temperatura ambiente. Temperature così basse potrebbero essere giustificate da qualche trafilemento di acqua fredda proveniente dai gruppi frigo, dovuto al malfunzionamento della valvola di ritegno che seziona il circuito e consente il passaggio dal periodo di riscaldamento invernale a quello di raffreddamento estivo.

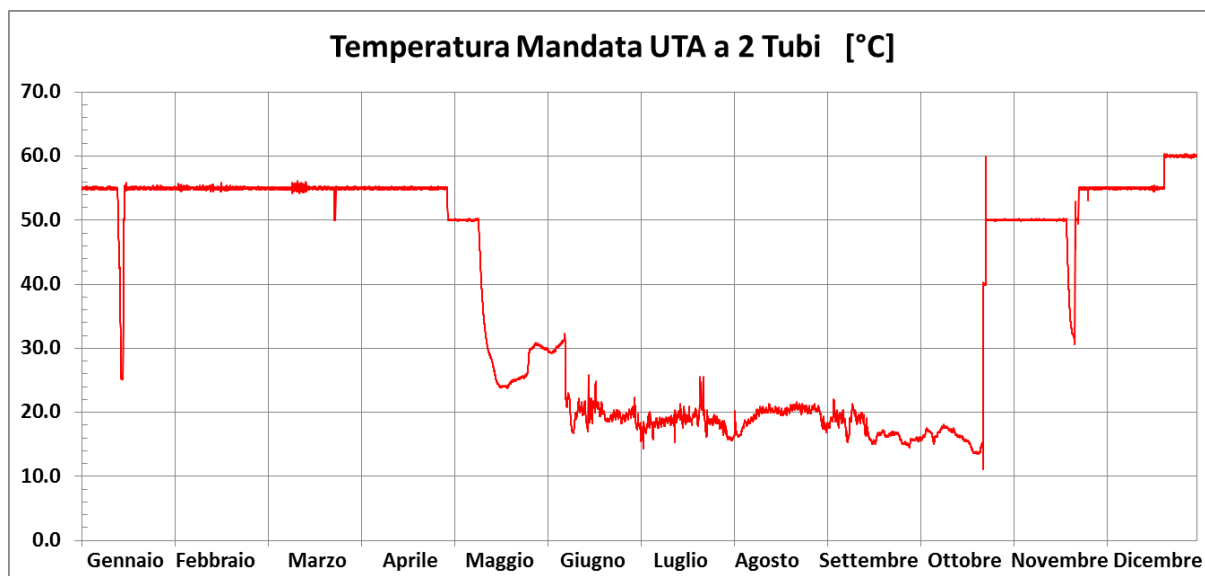


Figura 3.4 - Temperatura di mandata UTA a 2 tubi, anno 2010.

#### ➤ UTA a 4 TUBI

Escludendo i primi cinque mesi del 2008, in cui il sistema di acquisizione non ha registrato alcun valore, i dati di consumi delle UTA a 4 tubi non hanno presentato particolari problemi ed è stato possibile quantificarne l'ammontare, riportato nella tabella 3.3 e figura 3.5.

Tabella 3.3 - Consumi energetici periodo 2008-2010: UTA a 4 TUBI.

CONSUMI UTA 4 Tubi [kWh]	2008	2009	2010	Media 2008-2010
GENNAIO	Non Attendibile	447'443	553'295	518'023
FEBBRAIO	Non Attendibile	429'965	439'551	463'522
MARZO	Non Attendibile	369'035	404'081	368'407
APRILE	Non Attendibile	208'166	261'160	234'663
MAGGIO	Non Attendibile	111'292	201'430	156'361
GIUGNO	129'504	84'148	107'385	107'012
LUGLIO	148'270	86'876	81'430	105'525
AGOSTO	105'483	87'043	90'341	94'289
SETTEMBRE	107'758	74'220	111'216	97'732
OTTOBRE	97'703	129'913	193'356	140'324
NOVEMBRE	202'900	252'409	284'885	246'731
DICEMBRE	432'129	451'950	467'419	450'499
<b>TOTALE</b>	<b>1'223'746 (parziale)</b>	<b>2'732'460</b>	<b>3'195'548</b>	<b>2'983'088</b>



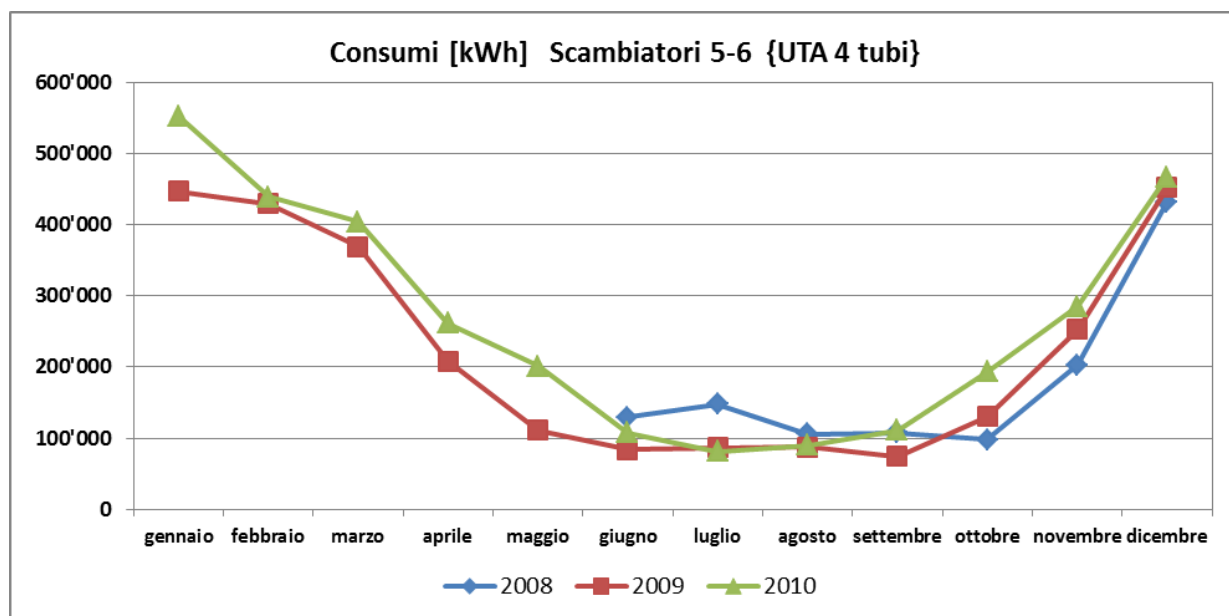


Figura 3.5 - Consumi energetici periodo 2008-2010: UTA a 4 TUBI.

Gli impianti con UTA a 4 tubi, dovendo provvedere alla climatizzazione dei reparti più critici dell'ospedale, hanno un funzionamento annuale. Il fluido termovettore caldo è necessario nel periodo invernale, da metà novembre a metà maggio, per il riscaldamento degli ambienti; nel periodo estivo è invece necessario per il postriscaldamento dell'aria, necessario a causa del processo di deumidificazione. Per questo motivo, le temperature di mandata rilevate hanno un andamento costante per tutto l'anno. Le temperature sono state mantenute, nel periodo invernale, intorno ai 60°C, con un innalzamento a circa 68°C effettuato a fine del 2010. Nel periodo estivo, le temperature sono quasi sempre impostate intorno ai 50°C. Sono state rilevate, soprattutto nel periodo invernale, delle forti oscillazioni di temperatura, dell'ordine di 10°C, al di sotto del valore di set-point, come mostrato nell'esempio relativo al 2008 riportato in figura 3.6.

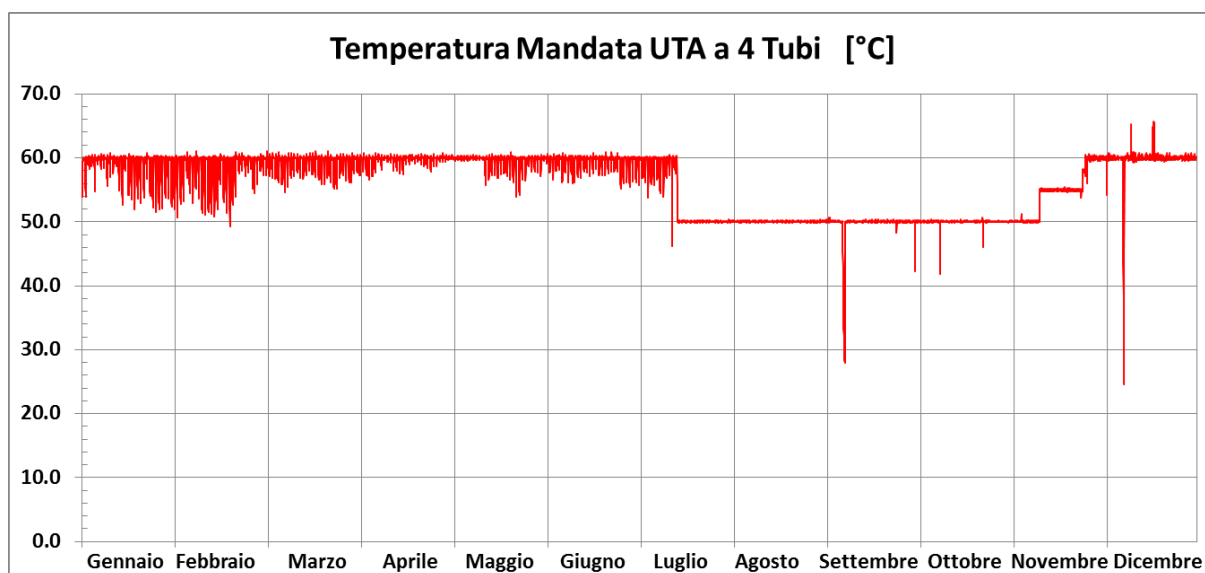


Figura 3.6 - Temperatura di mandata UTA a 4 tubi, anno 2008.

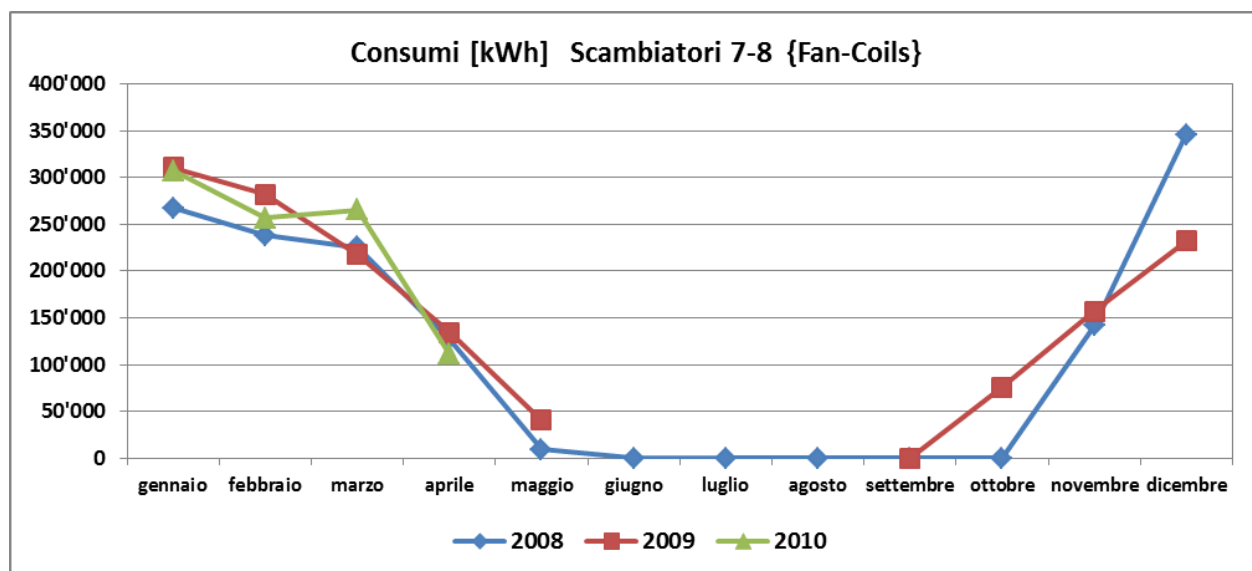
#### ➤ FAN-COIL

I dati di consumo dei fan-coil hanno presentato notevoli problematiche (tabella 3.4 e figura 3.7). I rilievi del periodo giugno-agosto 2009 hanno presentato dei valori di consumo fortemente anomali: a fronte di un consumo atteso molto basso, se non nullo, il sistema ha registrato dei consumi superiori ai mesi primaverili e autunnali. Le

temperature del fluido termovettore in mandata non hanno peraltro mostrato la presenza di alcun consumo di acqua calda, pertanto tali dati anomali di consumo sono stati eliminati in quanto ricondotti ad anomalie del sistema di rilevamento. I contabilizzatori di calore hanno mostrato ulteriori problemi, infatti il sistema non ha registrato alcun dato utile a partire dal mese di maggio del 2010. L'anomalia è da attribuire al software che gestisce le acquisizioni, responsabile pure della mancata acquisizione dei segnali degli altri contabilizzatori di calore.

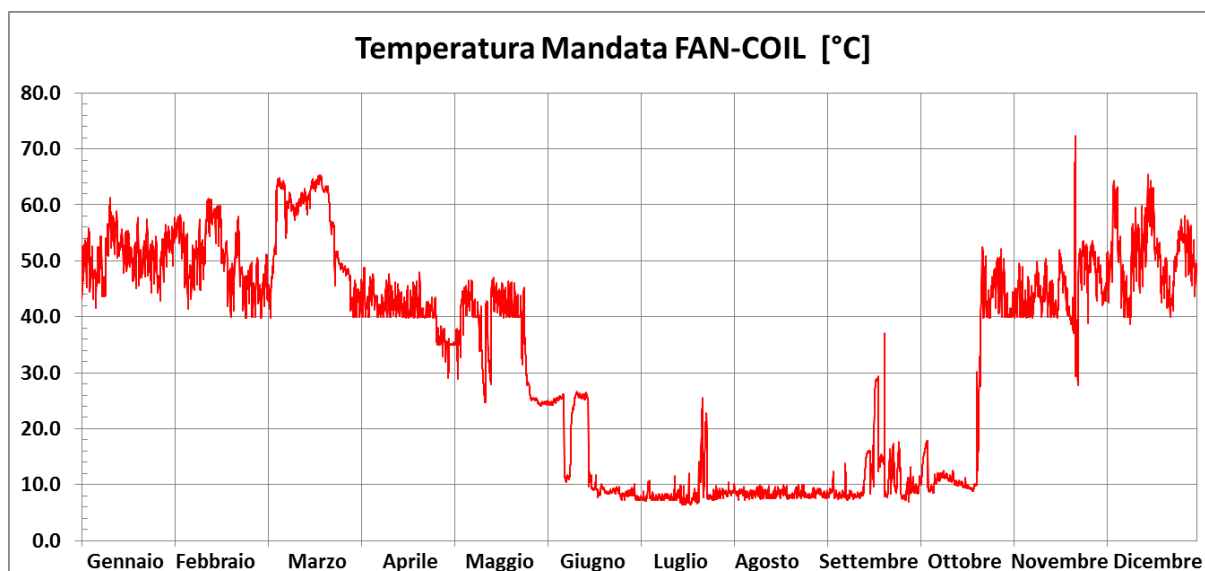
**Tabella 3.4 - Consumi energetici periodo 2008-2010: FAN-COIL.**

CONSUMI FAN-COIL [kWh]	2008	2009	2010	Media 2008-2010
<b>GENNAIO</b>	267'306	310'451	307'194	294'984
<b>FEBBRAIO</b>	237'940	281'639	256'386	258'655
<b>MARZO</b>	225'132	217'630	265'481	236'081
<b>APRILE</b>	126'847	134'168	111'242	124'085
<b>MAGGIO</b>	9'529	40'591	Non Attendibile	25'060
<b>GIUGNO</b>	2	Non Attendibile	Non Disponibile	2
<b>LUGLIO</b>	50	Non Attendibile	Non Disponibile	50
<b>AGOSTO</b>	0	Non Attendibile	Non Disponibile	0
<b>SETTEMBRE</b>	0	2	Non Disponibile	1
<b>OTTOBRE</b>	146	76'023	Non Disponibile	38'084
<b>NOVEMBRE</b>	141'575	157'107	Non Disponibile	149'341
<b>DICEMBRE</b>	345'844	232'313	Non Disponibile	289'078
<b>TOTALE</b>	<b>737'791</b>	<b>672'314</b> <i>(parziale)</i>	<b>527'931</b> <i>(parziale)</i>	<b>1'415'421</b>



**Figura 3.7 - Consumi energetici periodo 2008-2010: FAN-COIL.**

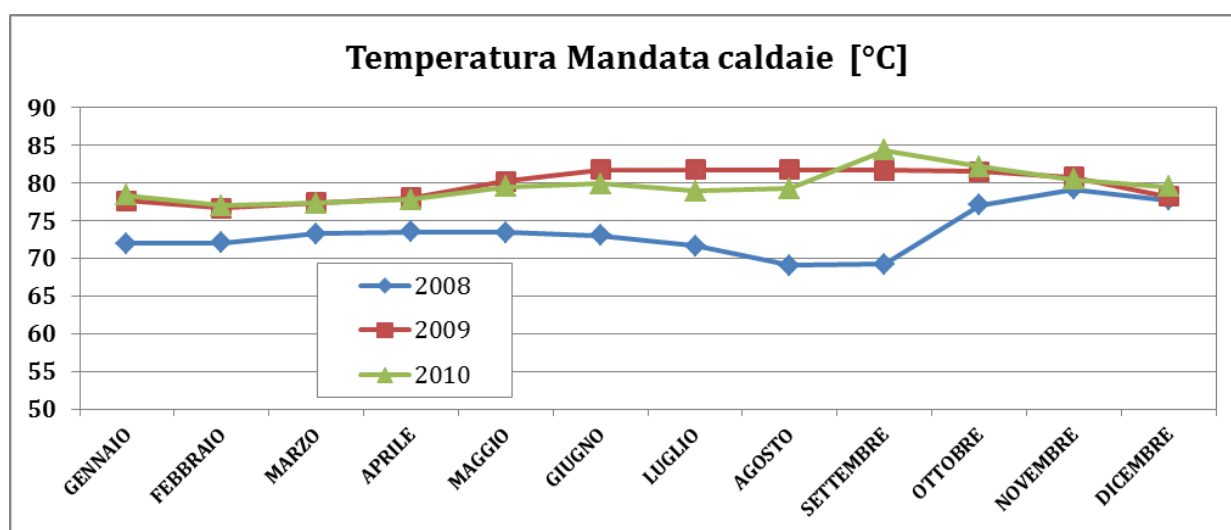
L'analisi temperature di mandata mostra una forte variabilità nel periodo invernale (figura 3.8), con valori compresi tra i 40-60°C e variazioni giornaliere dell'ordine dei 7-8 °C. Nel periodo estivo le temperature si mantengono intorno agli 8-11 °C, valori nettamente inferiori a quelli ambientali, giustificabili con un malfunzionamento della valvola di ritegno.



**Figura 3.8 - Temperatura di mandata Ventilconvettori, anno 2010.**

Tutti i valori di consumo termico fin qui presentati sono stati confrontati con quelli rilevati dopo la manutenzione del sistema di contabilizzazione energetica. Nel secondo campione di dati, dal 20/4/2012 al 20/3/2012, non sono state riscontrate le anomalie del campione precedente e si è potuto procedere con una rapida valutazione dei consumi termici delle varie linee dei circuiti del riscaldamento. I valori ottenuti sono stati confrontati con quelli relativi al campione precedente (2008-2010), a cui è stato sottratto il consumo del mese di aprile. Concentrando l'attenzione sui consumi annuali, rispetto al triennio 2008-2010, si è notata una diminuzione dei consumi dei radiatori del 4.9%, un aumento di consumi delle UTA a 2 e 4 tubi rispettivamente del 14.8% e 9.8%, mentre il consumo dei ventilconvettori è rimasto costante, -0.9%. La variazione del consumo termico globale per riscaldamento è del 6.4%. Il confronto ha mostrato una sostanziale corrispondenza tra i consumi dei due periodi campionati, con variazioni dello stesso ordine di grandezza di quelle annuali riscontrate nel periodo 2008-2010. Pertanto si è deciso di considerare come riferimento attendibile i valori di consumo mensile e annuale del primo triennio di riferimento.

#### ➤ TEMPERATURE MANDATA E RITORNO CALDAIE



**Figura 3.9 - Temperatura di mandata delle caldaie.**

Oltre ai dati relativi alle utenze per riscaldamento, sono state analizzate le temperature di mandata e ritorno del fluido termovettore che circola dalle caldaie al collettore che alimenta i vari scambiatori di calore della sottocentrale termica. La temperatura di mandata è di circa 70-80°C, mentre quella di ritorno è mediamente più bassa di circa 10-15°C (figure 3.9-10). L'analisi dei dati orari di temperatura mostrano irregolari oscillazioni attorno ai valori medi, che a seconda dei periodi di rilevamento vanno da pochi gradi di differenza ( $\pm 2^\circ\text{C}$ ) fino  $\pm 8^\circ\text{C}$ .

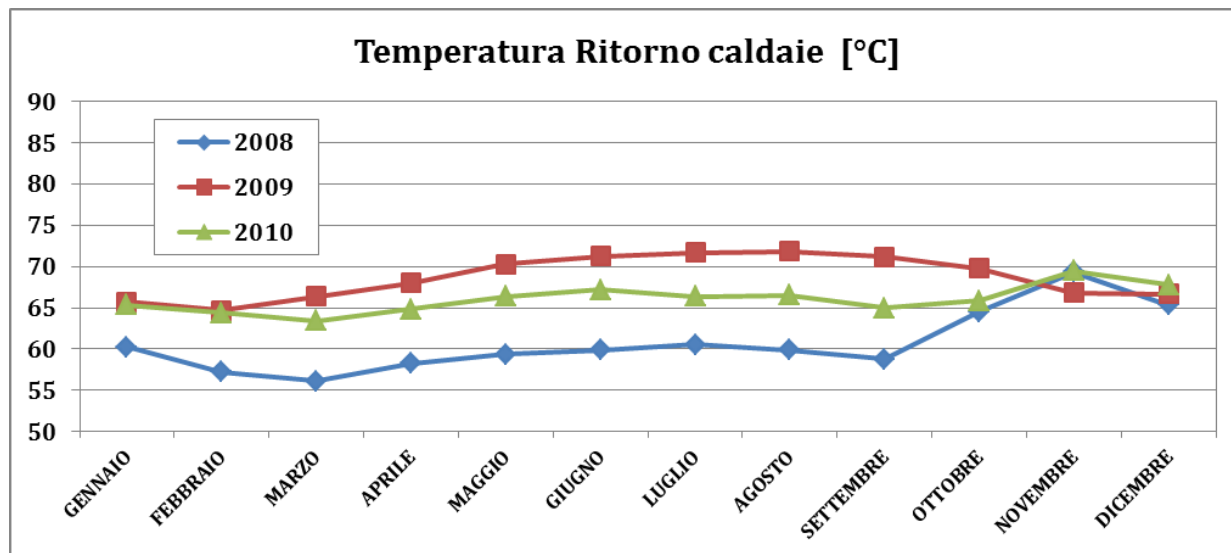


Figura 3.10 - Temperatura di ritorno alle caldaie.

### 3.1.2 PREPARAZIONE ACS

L'analisi dei dati di consumo dell'acqua calda sanitaria è stata alquanto problematica e ha necessitato di un dispendio di tempo e risorse nettamente superiore rispetto all'analisi dei consumi di altre tipologie di utenze. La prima fonte di problematicità è da ricondursi alla bassa risoluzione del sistema di monitoraggio. Infatti, a fronte di un consumo giornaliero medio orario di circa 230 kWh, la risoluzione del sistema è di 100 kWh, il che comporta un'incertezza sulla misura di circa il 44%. Oltre a questo problema, si è potuta constatare la mancanza o inutilizzabilità dei dati orari per lunghi periodi temporali. Sui 40 mesi che compongono il periodo di rilevamento principale, dicembre 2008 – marzo 2011, soltanto 10 di essi (gennaio – luglio 2008; gennaio – marzo 2011) avevano una qualità dei dati accettabile e in grado di permettere una ricostruzione parziale dei consumi mensili. Si è pervenuti quindi a una prima stima dei consumi annuali di energia per ACS, mediando i valori mensili di consumo per i periodi noti e stimando i valori per i mesi mancanti sulla base dei consumi medi del primo trimestre dell'anno (tabella 3.5).

Tabella 3.5 - Consumo mensile ed annuale di ACS (prima stima).

	ACQUA CALDA SANITARIA [kWh]					
	2007	2008	2009	2010	2011	Media 2008-2010
GENNAIO	Non Disponibile	153'100	Non Attendibile	Non Attendibile	196'400	174'750
FEBBRAIO	Non Disponibile	145'500	Non Attendibile	Non Attendibile	165'600	155'550
MARZO	Non Disponibile	149'100	Non Attendibile	Non Attendibile	136'000	142'550
APRILE	Non Disponibile	141'000	Non Attendibile	Non Attendibile	Non Disponibile	141'000

MAGGIO	Non Disponibile	139'500	Non Attendibile	Non Attendibile	Non Disponibile	139'500
GIUGNO	Non Disponibile	124'700	Non Attendibile	Non Attendibile	Non Disponibile	124'700
LUGLIO	Non Disponibile	153'000	Non Attendibile	Non Attendibile	Non Disponibile	153'000
AGOSTO	Non Disponibile	Non Attendibile	Non Attendibile	Non Attendibile	Non Disponibile	162'871 (stimato)
SETTEMBRE	Non Disponibile	Non Attendibile	Non Attendibile	Non Attendibile	Non Disponibile	157'617 (stimato)
OTTOBRE	Non Disponibile	Non Attendibile	Non Attendibile	Non Attendibile	Non Disponibile	162'871 (stimato)
NOVEMBRE	Non Disponibile	Non Attendibile	Non Attendibile	Non Attendibile	Non Disponibile	157'617 (stimato)
DICEMBRE	88'100 (parziale)	Non Attendibile	Non Attendibile	Non Attendibile	Non Disponibile	162'871 (stimato)
TOTALE						1'834'895

Volendo pervenire a un valore più realistico di consumo, basato su un campione maggiore di rilievi, si è deciso di elaborare i dati di consumo eliminando tutti quei valori ritenuti fisicamente incompatibili con le potenze termiche effettivamente disponibili in centrale idrica. Sono stati pertanto sostituiti tutti i valori superiori alla massima potenza termica disponibile con tale valore, pari a 500 kW, recuperando in tal modo tutti quei dati che nel corso della prima stima sono stati eliminati. Con questo metodo è stato possibile ottenere un numero di rilievi pari a 17'605 ore (circa 2 anni), più del doppio del numero utilizzabile per la prima stima. Il valore così ottenuto presentava una sovrastima del consumo, dovuta all'imposizione di un elevato consumo per tutti quei valori deteriorati. Pertanto si è proceduto nel ricalcolare i consumi orari, sottraendo ai valori ottenuti in precedenza una quantità pari alla risoluzione del sistema (100 kW). Sono stati ottenuti così due valori di consumo, uno minimo e uno massimo, che hanno consentito di effettuare una seconda stima del consumo termico di ACS, basata non più su valori mensili ma su valori medi orari. Il valore di consumo annuale ottenuto con questa seconda stima è quindi compreso nell'intervallo 2'000 MWh  $\pm 22\%$  (440 kWh), corrispondente a un consumo medio orario giornaliero di circa 228 kWh. Il valore della prima stima (1'835 MWh) è compreso nell'intervallo individuato e si discosta dal valore centrale di circa 8-9%.

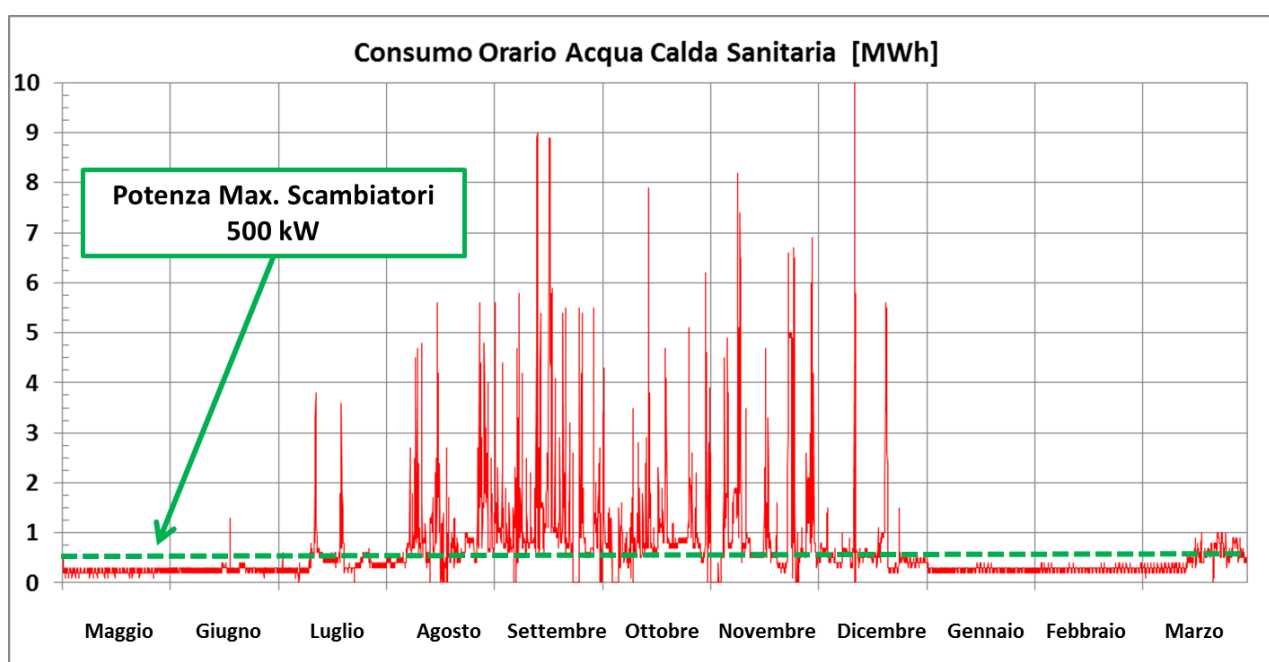


Figura 3.11 - Consumo orario ACS (20/4/12 – 20/3/13).

Data la grande incertezza sul valore di consumo, si è dovuta attendere la fine dei lavori di revisione del sistema di monitoraggio, effettuata dalla ditta GDM nel febbraio 2012, per poter avere a disposizione dati più attendibili su cui calcolare i consumi annuali. Il periodo di rilievo su cui è stata effettuata la terza e ultima stima dei consumi, comprende il periodo temporale compreso tra il 20 Aprile e il 20 marzo del 2013 (figura 3.11). Nella figura si può notare come dagli ultimi giorni di giugno e fino al mese di dicembre, il sistema di monitoraggio riprenda a registrare valori anomali di potenza termica, superiori al limite fisico di 500 kW. Per questo motivo i dati sono stati elaborati secondo le modalità descritte in precedenza. I risultati ottenuti confermano quelli calcolati stimati in precedenza tramite i valori orari del periodo 2007-2011. Il consumo orario medio giornaliero ottenuto è pari a 230 kWh, il consumo annuale è invece di 2'015 MWh, con uno scostamento dal valore medio precedente inferiore di 1%. La differenza rispetto al primo valore di consumo annuale stimato è di circa l'8.5%, inoltre è stata notata una robusta congruità con i valori di consumo mensile dei primi due mesi riportati nell'ultima colonna della tabella 3.11, con una differenza non superiore al 2.2%.

Nonostante tutte le problematiche emerse nella valutazione dei consumi energetici, è stato comunque possibile ricostruire anche la distribuzione qualitativa dei consumi orari, riportata nella figura 3.12. Questi valori sono stati ottenuti sulla base delle seguenti ipotesi [9]:

- Rendimento distribuzione: 95%
- Rendimento erogazione: 83%
- Perdite di calore annue: 8.8 MWh

Il rendimento di produzione è da considerarsi pari al 100% perché il sistema di rilevamento dei consumi è montato a valle delle caldaie. Con i rendimenti e le perdite, si ha pertanto un consumo annuo di energia pari a circa 1'580 MWh. Considerando una differenza di temperatura tra mandata e ritorno variabile tra i 35°C e i 40°C, si perviene ad un consumo di giornaliero di ACS pari a circa 93-106 m<sup>3</sup>, corrispondenti, orientativamente, a 160-185 litri/giorno per posto letto.

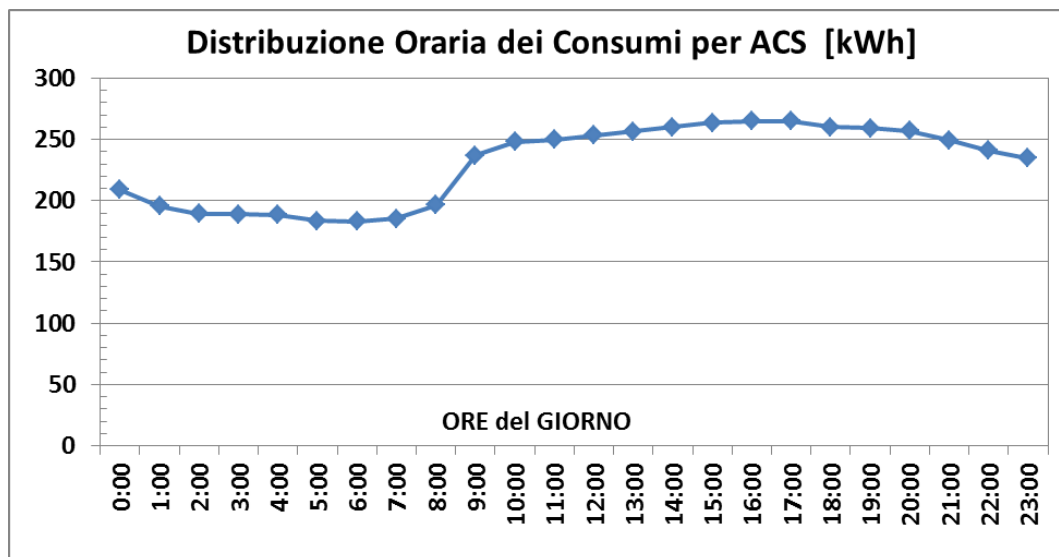


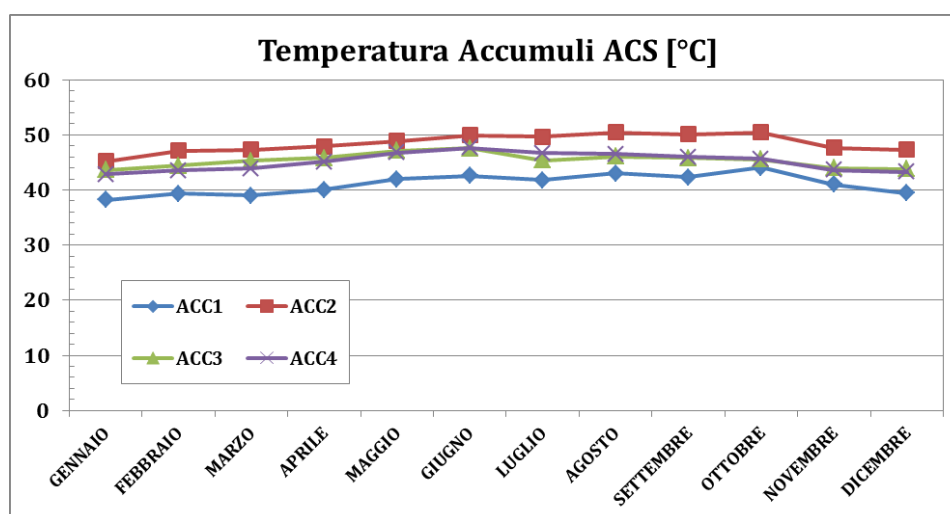
Figura 3.12 - Andamento dei consumi medi orari di ACS.

Nella tabella 3.6 e nelle figure 3.13-14 sono riportati i valori delle temperature medie mensili nei quattro serbatoi di accumulo e nelle due tubazioni di mandata dell'ACS, la prima che preleva il fluido dai serbatoi 1-2 e la seconda relativa ai serbatoi 3-4. I valori medi mensili sono ricavati sulla base dei consumi orari del periodo 2008-2010, pertanto quelli riportati in tabella e nelle figure tengono conto della media di tre anni. Le variazioni orarie di temperatura si discostano dai valori medi mensili di circa  $\pm 5^{\circ}\text{C}$  sulle linee di mandata dell'ACS, mentre per i serbatoi di accumulo si notano delle variazioni che vanno dai  $\pm 2-3^{\circ}\text{C}$  ai  $\pm 8^{\circ}\text{C}$ , a seconda dei periodi dell'anno e dei serbatoi. È possibile notare un'apparente incongruenza tra le temperature degli accumuli e quelle di mandata, in cui

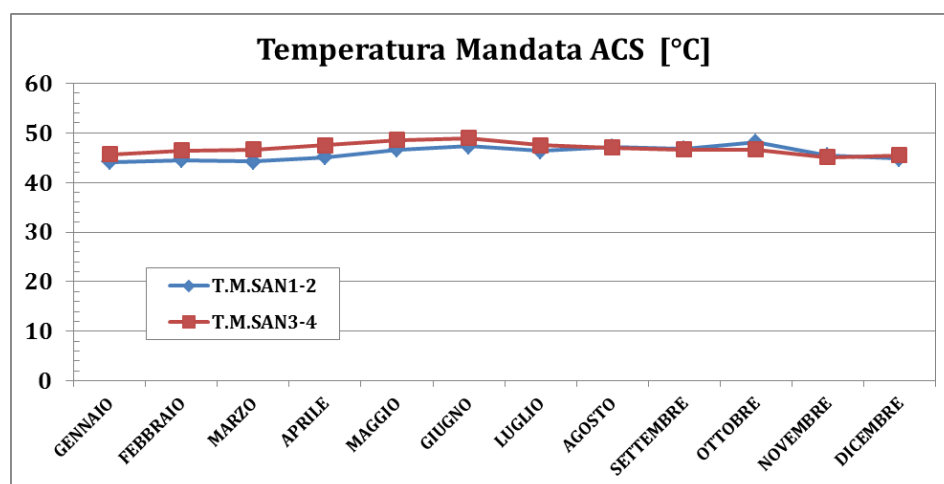
le prime sono inferiori alle seconde. A seguito degli interventi di revisione del sistema di acquisizione e taratura delle sonde, tale incongruenza è ancora presente. Pertanto si è ipotizzato un posizionamento non ottimale di tali sonde all'interno dei boiler, posizione che risente dell'ingresso di acqua fredda di rete dal fondo del serbatoio.

**Tabella 3.6 - Temperature medie nei serbatoi di accumulo e di mandata dell'ACS (2008-2010).**

MESI	TEMPERATURA ACS NEI SERBATOI DI ACCUMULO [°C]				TEMPERATURA MANDATA ACS [°C]	
	BOILER 1	BOILER 2	BOILER 3	BOILER 4	LINEA 1-2	LINEA 3-4
GENNAIO	38.2	45.2	43.6	42.9	44.1	45.7
FEBBRAIO	39.4	47.1	44.4	43.6	44.6	46.5
MARZO	39.0	47.3	45.3	43.9	44.2	46.7
APRILE	40.0	47.9	45.8	45.1	45.1	47.5
MAGGIO	42.0	48.9	47.2	46.8	46.6	48.5
GIUGNO	42.6	49.9	47.6	47.6	47.3	48.9
LUGLIO	41.8	49.7	45.4	46.7	46.3	47.5
AGOSTO	43.0	50.4	46.1	46.5	47.1	47.1
SETTEMBRE	42.3	50.1	45.8	46.0	46.7	46.7
OTTOBRE	44.0	50.4	45.6	45.7	48.0	46.7
NOVEMBRE	41.0	47.7	44.0	43.6	45.4	45.1
DICEMBRE	39.5	47.3	43.8	43.3	44.8	45.5



**Figura 3.13 - Temperatura ACS nei quattro serbatoi d'accumulo.**



**Figura 3.14 - Temperatura di mandata dell'ACS.**

### 3.1.3 RAFFRESCAMENTO

Il sistema di monitoraggio dei gruppi frigo consente di registrare i dati, acquisiti con un intervallo di 2 minuti, su specifici file di testo da cui è possibile risalire a tutte le grandezze monitorate, quali l'energia termica prodotta dai 4 gruppi (MWh), il volume di fluido-vettore (m<sup>3</sup>), la potenza istantanea (kW), la portata (m<sup>3</sup>/h), la temperatura di mandata e quella di ritorno (in °C). Dopo l'installazione del sistema, primavera del 2012, e la fase di taratura e controllo del suo corretto funzionamento (maggio 2012), è partita la campagna di raccolta dei dati riguardanti la stagione estiva del 2012. Il periodo preso in esame per le analisi e le successive elaborazioni presentate in questo lavoro va dal 28 maggio al 4 ottobre 2012, per un totale di circa 128 giorni di rilevamento (3080 ore). A causa di alcuni problemi relativi alla gestione hardware e software del sistema, gestito dal personale dell'AOB, sono stati persi i rilievi orari di alcuni periodi, riducendo quindi il numero di dati disponibili a 2203 ore di rilevamento, pari a circa il 72% del monte ore totale. Tale problema non ha comunque inficiato il buon esito della campagna di rilevamento. Infatti, poiché gli unici dati andati perduti sono relativi ai consumi orari, è stato comunque possibile risalire, tramite i valori cumulati, alla quantità di energia frigorifera erogata in questi periodi. A partire da gennaio 2013 sono stati rilevati ulteriori dati per valutare la produzione frigorifera del periodo invernale, il periodo preso in esame va dal 14 gennaio al 21 marzo 2013 (circa 1'560 ore). Questa serie di dati è praticamente completa, risultando mancante soltanto lo 0.45% del valore. Nei dati disponibili non sono state riscontrate anomalie analoghe a quelle del sistema di acquisizione installato nella sottocentrale termica (vedi paragrafo precedente), pertanto si è preceduto all'elaborazione degli stessi tramite alcuni programmi scritti in Matlab, i cui risultati sono di seguito mostrati:

#### ➤ POTENZA-ENERGIA TERMICA FRIGORIFERA

Il sistema di rilevamento ha consentito di acquisire sia i dati di potenza istantanea (kW), sia i valori di energia termica prodotta (kWh), i cui valori mensili sono riportati nella tabella 3.7. Nelle figure 3.15-16 sono riportati i valori di potenza frigorifera relativi ai mesi di maggiore e minore produzione, agosto e febbraio, i "buchi" nelle figure sono dovuti ai periodi di mancata registrazione.

**Tabella 3.7 - Energia termica prodotta mensilmente dai gruppi frigo.**

PRODUZIONE DI ENERGIA TERMICA FRIGORIFERA [MWh]							
	GIUGNO	LUGLIO	AGOSTO	SETTEMBRE	GENNAIO-MARZO	TOTALE	Incidenza %
<b>GRUPPO 1</b>	283	357	505	304	1	1'450	<b>33.0%</b>
<b>GRUPPO 2</b>	194	76	100	0	22	392	<b>8.9%</b>
<b>GRUPPO 3</b>	116	310	362	191	0	979	<b>22.3%</b>
<b>GRUPPO 4</b>	220	401	400	348	201	1'570	<b>35.7%</b>
<b>TOTALE</b>	<b>814</b>	<b>1'144</b>	<b>1'368</b>	<b>843</b>	<b>223</b>	<b>4'392</b>	<b>100%</b>

Analizzando i dati orari è stata notata un'ampia variazione dei valori di energia termica prodotta dai singoli gruppi. Nei periodi estivi di minor carico, maggio e settembre, la potenza termica dei vari gruppi oscilla tra i 200-500 kW. Nei periodi di maggior carico, soprattutto tra la fine di luglio e l'inizio di agosto, la potenza frigorifera varia tra 500 e 1'000 kW per singola macchina, raggiungendo un picco di potenza totale stimabile intorno ai 2'500 kW. Nel periodo invernale, gennaio-marzo, la potenza oscilla tra i 50 e 200 kW, con diversi periodi di fermo causata dalla mancante richiesta di carico frigorifero. Per i vari gruppi è stato possibile quantificare il numero di ore di funzionamento, e quindi la percentuale di utilizzo rispetto alle ore monitorate:

- Gruppo 1: 55.45 % (2'092 ore)
- Gruppo 2: 26.37 % (995 ore)
- Gruppo 3: 46.91 % (1'770 ore)
- Gruppo 4: 87.15 % (3'288 ore)



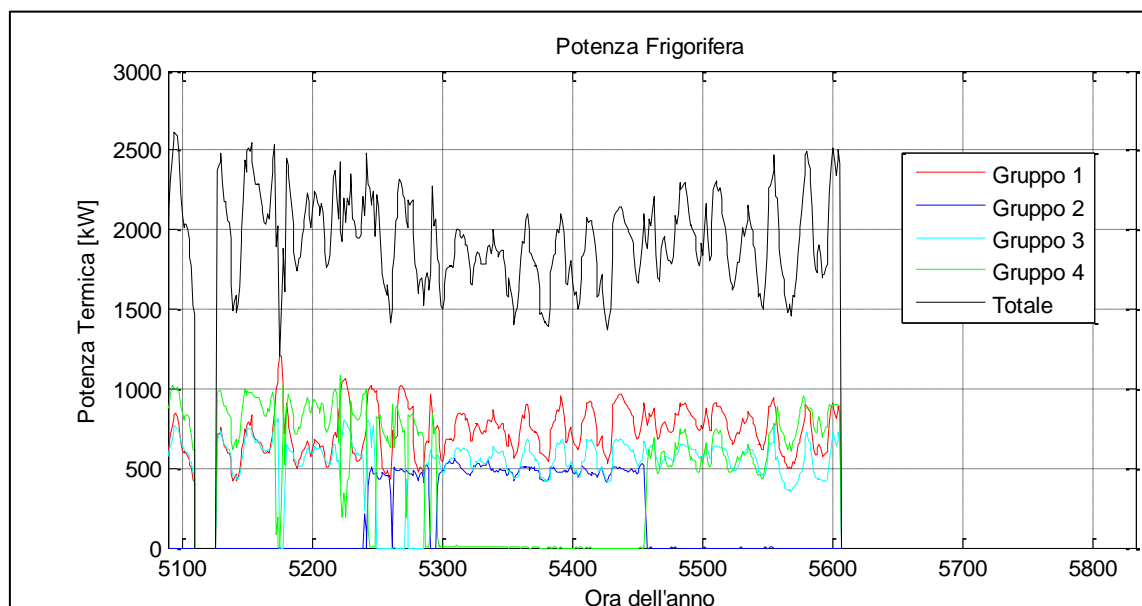


Figura 3.15 - Potenza termica erogata dai gruppi frigo (agosto).

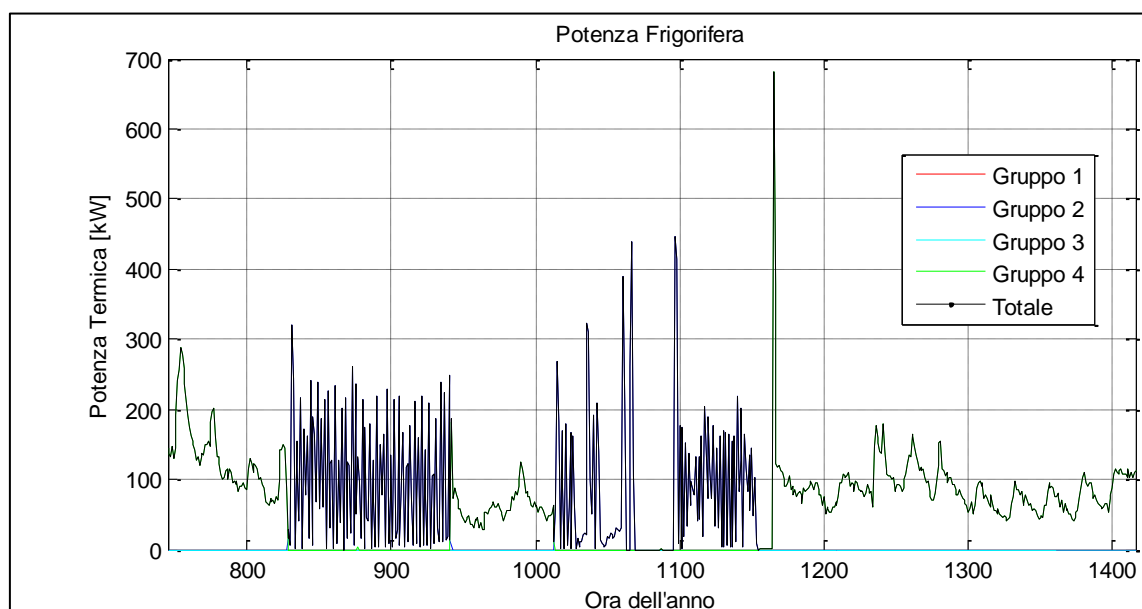


Figura 3.16 - Potenza termica erogata dai gruppi frigo (febbraio).

La produzione termica nei periodi di cui non si possiedono dati rilevati è stata ricavata eseguendo le seguenti elaborazioni:

- **Gennaio:** è stata ricavata, partendo dalle acquisizioni che si riferiscono ai giorni dal 14 al 31, la produzione giornaliera di energia frigorifera, pari a 2.52 MWh/giorno. Ipotizzando tale valore costante per tutto il mese, la produzione frigorifera mensile è pari al prodotto di quella giornaliera per il numero di giorni del mese.
- **Marzo:** avendo a disposizione i rilievi dei primi 20 giorni del mese, è stato utilizzato lo stesso procedimento applicato per il mese di gennaio.
- **Aprile:** non avendo alcun dato a disposizione, il valore di produzione frigorifera di questo mese è stato stimato come valor medio dei consumi del mese precedente e successivo (marzo-maggio), considerando la presenza di un giorno in meno per il mese d'aprile.

- **Maggio:** i dati rilevati disponibili per questo mese erano limitati a soli 3 giorni, pertanto la produzione frigorifera è stata stimata tramite la media pesata di due termini:
  - Il primo è stato ricavato tramite l'elaborazione delle curve di carico elettrico mensile dell'AOB. Notando un aumento dei consumi elettrici medi mensili nel periodo che va da maggio a ottobre si può ragionevolmente ipotizzare che questa variazione sia dovuta alla produzione di energia termica frigorifera. Pertanto è stata valutata l'energia elettrica utilizzata in questi mesi dalla centrale frigo, sottraendo ai consumi elettrici dei mesi da maggio ad ottobre il consumo elettrico mensile medio del periodo novembre-aprile. Dividendo il consumo frigorifero, ricavato dalle misurazioni dirette effettuate tra giugno e settembre, con i corrispettivi consumi elettrici ricavati secondo la procedura precedentemente illustrata, è stato stimato un valore di EER stagionale, che, moltiplicato per il consumo elettrico relativo alla sola parte frigorifera del mese di maggio, ha consentito di calcolare la produzione termica frigorifera di tale mese.
  - Il secondo termine è più semplicemente ricavato calcolando la produzione frigorifera mensile che si avrebbe ipotizzando costante la produzione giornaliera degli ultimi 3 giorni del mese.

Il peso utilizzato per il calcolo è pari a 1/3 per il primo termine, 2/3 per il secondo.

- **Ottobre:** è stato seguito lo stesso procedimento adottato per il mese di maggio.
- **Novembre:** è stato applicato lo stesso procedimento applicato per il mese d'aprile.
- **Dicembre:** è stata calcolata la produzione media giornaliera del periodo invernale, calcolata considerando l'intervallo temporale che va dal 14 gennaio al 20 marzo. Tale valore, 2.47 MWh/giorno, moltiplicato per il numero di giorni del mese, fornisce il valore di produzione mensile.

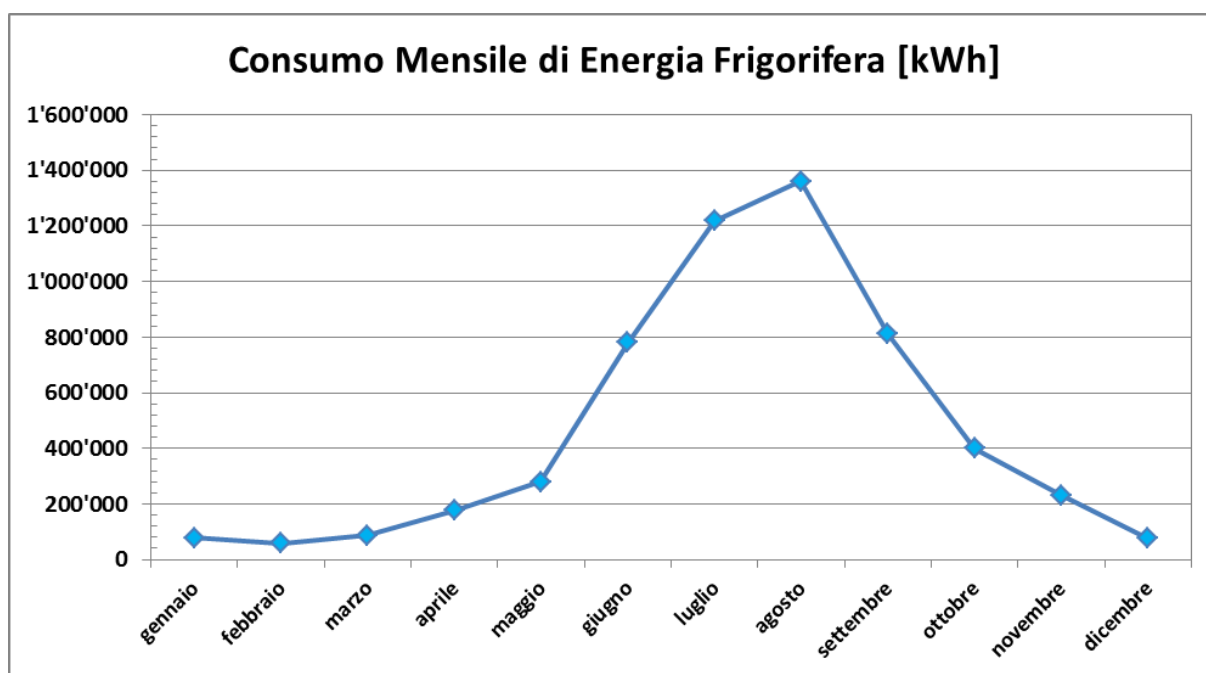


Figura 3.17 – Consumi mensili di energia termica per raffrescamento.

Tabella 3.8 – Consumi mensili di energia termica per raffrescamento.

	ENERGIA TERMICA PER RAFFRESCAMENTO [kWh]	FONTE DEI VALORI
<b>GENNAIO</b>	78'081	monitorato (dal 14 al 31) – ricostruito
<b>FEBBRAIO</b>	58'600	monitorato
<b>MARZO</b>	86'800	monitorato (dal 1 al 21) - ricostruito
<b>APRILE</b>	177'802	interpolazione (marzo - maggio)

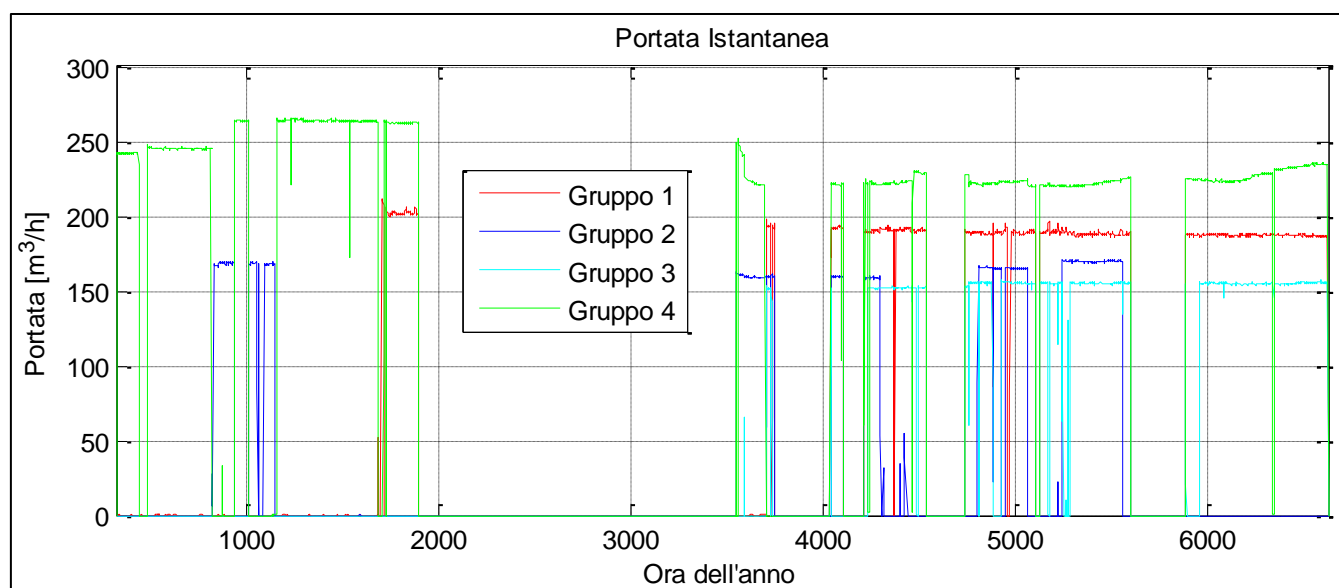
<b>MAGGIO</b>	280'657	ricostruito (consumi elettrici – monitoraggio)
<b>GIUGNO</b>	780'172	monitorato
<b>LUGLIO</b>	1'218'998	monitorato
<b>AGOSTO</b>	1'361'680	monitorato
<b>SETTEMBRE</b>	811'157	monitorato
<b>OTTOBRE</b>	399'724	ricostruito (consumi elettrici – monitoraggio)
<b>NOVEMBRE</b>	230'473	interpolazione (ottobre – dicembre)
<b>DICEMBRE</b>	76'587	ricostruito sulla base dei consumi medi invernali
<b>TOTALE</b>	<b>5'560'730</b>	

### ➤ PORTATA DI FLUIDO TERMOVETTORE

La portata di fluido termovettore freddo nel periodo estivo varia a seconda della potenzialità dei vari gruppi frigoriferi, con lievi oscillazioni intorno ai seguenti valori:

- Gruppo 1: 185-195 m<sup>3</sup>/h
- Gruppo 2: 160-170 m<sup>3</sup>/h
- Gruppo 3: 150-160 m<sup>3</sup>/h
- Gruppo 4: 220-240 m<sup>3</sup>/h

Nel periodo invernale la portata del gruppo N°4, quello maggiormente utilizzato in questo lasso temporale, è superiore al valore estivo indicato in precedenza, attestandosi intorno ai 240-265 m<sup>3</sup>/h.

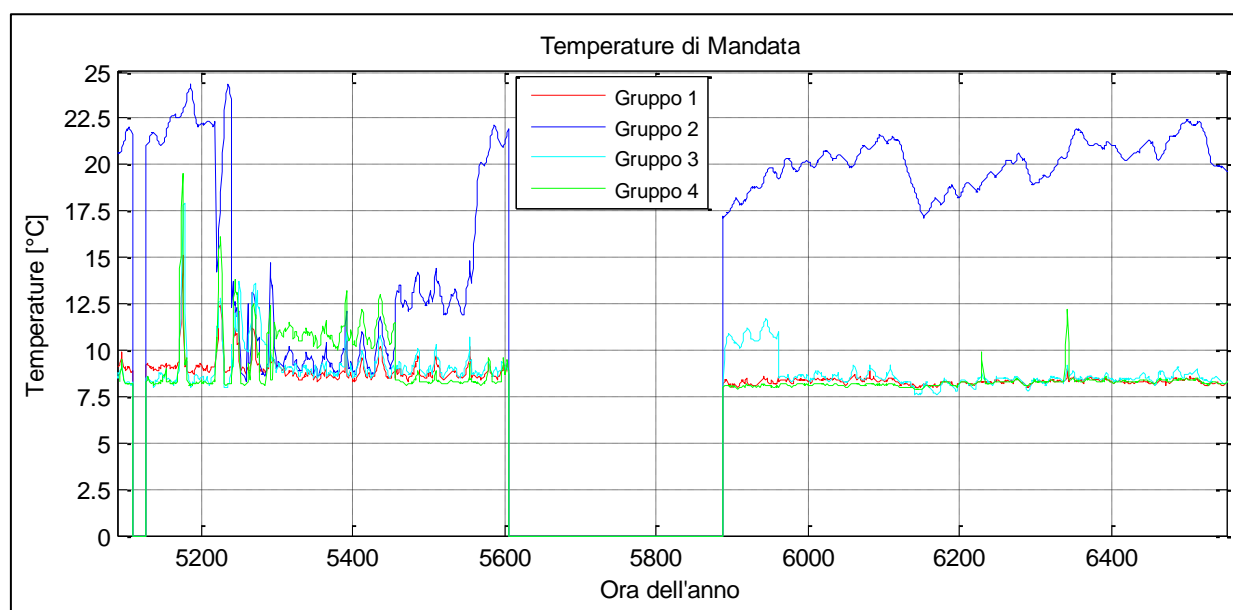


**Figura 3.18 - Portata di fluido termovettore dai gruppi frigo (intero periodo di rilevamento).**

### ➤ TEMPERATURE DI MANDATA e RITORNO

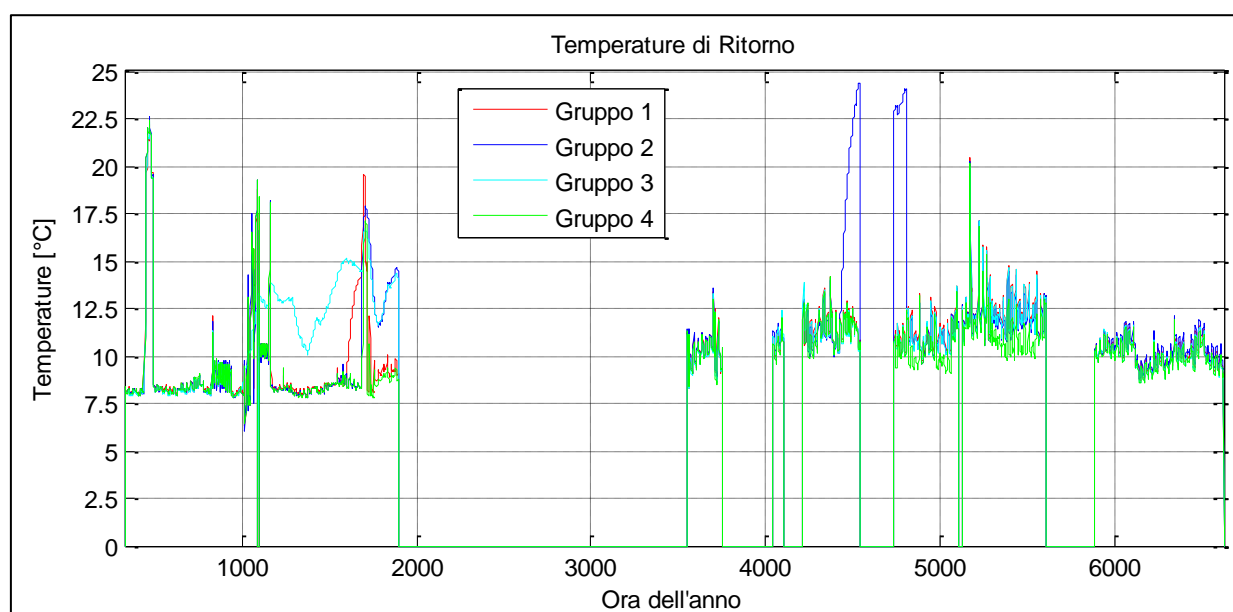
Nel periodo estivo, la temperatura dell'acqua di mandata (figura 3.19) dai gruppi frigo al collettore (vedi descrizione impianto nel capitolo 2) è regolata intorno agli 8-9°C. Nella figura è osservabile, specialmente per il gruppo N°2, dei valori di temperatura nettamente superiori a quelli di settaggio. La causa va da ricercarsi nella presenza di acqua stagnante nella tubazione, dovuta allo spegnimento della macchina frigorifera per un lungo periodo di manutenzione, che si porta a temperature prossime a quell'ambiente. Nel periodo invernale esaminato sono state rilevate temperature di mandata lievemente inferiori rispetto a quelle estive, circa 1-2°C in meno, inoltre,

conseguentemente a lunghi periodi di fermo dei alcuni gruppi, la temperatura nelle tubazioni di mandata tende a valori prossimi a quelli della temperatura ambiente.



**Figura 3.19 - Temperatura di mandata dai gruppi frigo (luglio-agosto).**

La temperatura dell'acqua di ritorno (figura 3.20) assume valori molto simili, compresi tra i 9°C e i 15°C, per tutti i gruppi. Questo è dovuto al fatto che l'acqua, proveniente dai singoli terminali di erogazione, si miscela all'interno del separatore idraulico (vedi capitolo 2). Come si può vedere dalla figura, i valori più elevati della temperatura di ritorno si registrano nei periodi più caldi dell'estate, durante la quale i carichi frigoriferi sono maggiori. È possibile inoltre riscontrare un anomalo innalzamento della temperatura di ritorno al gruppo N°2, orientativamente tra le ore 4300-4800 (10-20 giugno), in cui la macchina è stata disconnessa per manutenzione. In questo periodo l'acqua presente nella tubazione non si è potuta miscelare con quella più fredda del separatore, portandosi verso valori vicino a quelli dell'aria interna alla centrale frigorifera. I valori più elevati di temperatura che si riscontrano in alcuni periodo della stagione invernale sono da ricollegarsi al fermo dei gruppi, causato dalla mancata di richiesta di carico frigorifero.



**Figura 3.20 - Temperatura di ritorno ai gruppi frigo (intero periodo di rilevamento).**

## 3.2 BILANCIO ENERGETICO AOB

In questa sezione sarà presentato il bilancio energetico dell'AOB, ponendo particolare attenzione ai flussi di energia in ingresso alla struttura e all'utilizzo che ne è fatto dalle utenze. Uno schema semplificato dei flussi energetici è riportato nella figura 3.21.

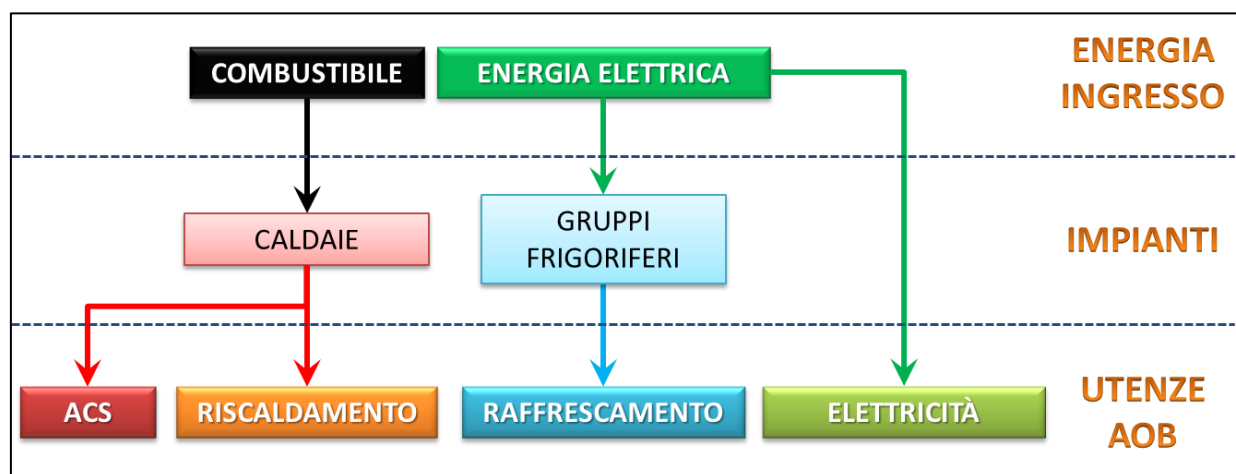


Figura 3.21 - Flussi energetici dell'AOB.

In ingresso alla struttura si hanno due forme d'energia: il combustibile necessario per alimentare le caldaie e l'energia elettrica acquistata in MT dalla rete. La conversione dell'energia in ingresso all'AOB in altre forme "utili" per le utenze avviene nelle centrali tecnologiche, indicate in figura come impianti, descritte esaurientemente nel capitolo precedente (Cap. 2). L'energia in uscita dagli impianti è utilizzata dalle utenze dell'ospedale per fornire i seguenti servizi: produzione di ACS; Riscaldamento e Raffrescamento degli ambienti; Elettricità. Non è stato possibile scorporare ulteriormente quest'ultima voce ulteriormente (illuminazione, forza motrice, etc.) a causa della mancanza di un funzionante sistema di misura di queste grandezze. Unica eccezione è rappresentata, seppur parzialmente, dall'energia consumata per alimentare la centrale frigorifera.

### 3.2.1 ENERGIA IN INGRESSO

L'energia annualmente in ingresso all'AOB è pari a circa 20'000 MWh, corrispondente a 1'726 tep. Il 43% sotto forma di energia termica (combustibile), il restante 57% sotto forma di energia elettrica. La distribuzione mensile di tali quantità energetiche è riportata nella figura 3.22 e nella tabella 3.9.

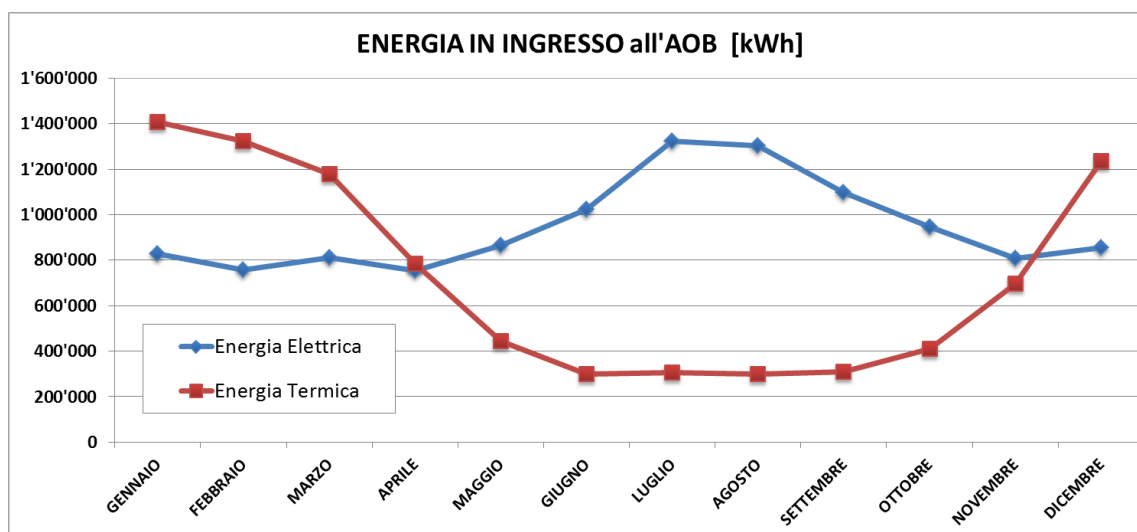


Figura 3.22 - Distribuzione mensile energia in ingresso all'AOB.

Tabella 3.9 - Distribuzione mensile energia ini ingresso all'AOB.

MESI	ENERGIA IN INGRESSO [kWh]	
	Energia Elettrica	Energia Termica
GENNAIO	829'509	1'408'239
FEBBRAIO	757'818	1'324'626
MARZO	810'521	1'179'812
APRILE	754'821	783'281
MAGGIO	864'179	443'693
GIUGNO	1'023'475	298'332
LUGLIO	1'324'132	306'060
AGOSTO	1'303'453	300'023
SETTEMBRE	1'097'127	308'964
OTTOBRE	946'244	410'408
NOVEMBRE	809'176	695'325
DICEMBRE	855'909	1'235'369
<b>TOTALE</b>	<b>11'376'361</b>	<b>8'694'132</b>

### 3.2.1.1 ENERGIA TERMICA (COMBUSTIBILE)

I dati di consumo di olio combustibile, Ecoden, sono stati ottenuti partendo dai rifornimenti, ricavati tramite fatture, riferiti al periodo 2004-2010 (tabella 3.10) e dai dati consumo giornaliero e mensile del 2009-2011 (tabella 3.11), annotati su un registro tenuto dai tecnici interni dell'azienda addetti alla conduzione della centrale termica.

Tabella 3.10 - Rifornimenti mensili di combustibile: anni 2004-2010 (parziale).

RIFORNIMENTO MENSILE DI COMBUSTIBILE [kg]							
MESE	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
GENNAIO	150'594	129'438	131'000	106'136	113'330	123'918	116'251
FEBBRAIO	123'760	136'780	128'000	90'900	99'768	117'464	112'040
MARZO	136'506	119'186	131'286	88'800	92'206	103'002	109'234
APRILE	83'980	94'050	58'062	65'650	65'000	70'480	
MAGGIO	36'840	18'176	22'764	23'472	33'915	38'182	
GIUGNO	15'418	11'956	15'054	18'616	21'716	29'335	
LUGLIO	12'028	18'580	13'468	5'500	24'400	33'499	
AGOSTO	10'996	16'135	14'444	4'800	13'657	34'321	
SETTEMBRE	12'004	21'834	15'300	29'642	25'300	33'136	
OTTOBRE	12'826	22'688	20'080	35'062	24'990	41'751	
NOVEMBRE	58'556	58'556	46'356	93'562	55'499	61'393	
DICEMBRE	128'950	128'950	86'372	127'600	120'699	104'568	
<b>TOTALE</b>	<b>782'458</b>	<b>776'329</b>	<b>682'186</b>	<b>689'740</b>	<b>690'480</b>	<b>791'049</b>	

Tabella 3.11 - Consumi mensili di combustibile: anni 2009-2011.

CONSUMO MENSILE DI COMBUSTIBILE [kg]			
MESE	2009	2010	2011
GENNAIO	non disponibile	116'251	119'435
FEBBRAIO	117'464	112'040	119'940

<b>MARZO</b>	103'002	109'234	109'128
<b>APRILE</b>	70'480	70'641	66'690
<b>MAGGIO</b>	38'182	46'867	42'504
<b>GIUGNO</b>	non disponibile	29'506	26'754
<b>LUGLIO</b>	33'499	25'409	21'394
<b>AGOSTO</b>	34'321	25'738	22'248
<b>SETTEMBRE</b>	33'136	30'446	22'310
<b>OTTOBRE</b>	41'751	38'956	31'509
<b>NOVEMBRE</b>	61'393	67'914	48'027
<b>DICEMBRE</b>	104'568	107'623	93'003
<b>TOTALE</b>	<b>637'796 (parziale)</b>	<b>780'625</b>	<b>722'942</b>

Tabella 3.12 - Riepilogo consumi e costi di combustibile, anni 2004-2012.

<b>ANNO</b>	<b>Consumi kg/anno</b>	<b>Consumi kWh/anno</b>	<b>Costo €/anno</b>	<b>Costo Specifico €/kg</b>	<b>Costo Specifico c€/kWh</b>
<b>2004</b>	782'458	9'080'860	523'736	0.669	5.77
<b>2005</b>	776'329	9'009'729	534'034	0.688	5.93
<b>2006</b>	682'186	7'917'148	534'584	0.784	6.75
<b>2007</b>	689'740	8'004'816	576'340	0.836	7.20
<b>2008</b>	690'480	8'013'404	621'359	0.900	7.75
<b>2009</b>	791'049	9'180'563	766'532	0.969	8.35
<b>2010</b>	780'625	9'059'587	814'524	1.043	8.99
<b>2011</b>	722'942	8'390'144	812'270	1.124	9.68

In conformità a questi dati è stato possibile ricostruire l'andamento dei consumi mensili e annuali di energia termica (figura 3.23a – tabella 3.12). Analizzando i risultati ottenuti, si può notare come i consumi annuali degli ultimi 8 anni non abbiano subito sostanziali variazioni, se non una lieve flessione nel triennio 2006-2008 e nel 2011. Non è stata evidenziata alcuna tendenza di aumento o diminuzione dei consumi nel medio-lungo periodo, pertanto il consumo di energia termica si può ritenere costante e pari a circa 750'000 kg/anno di combustibile, corrispondenti a circa 8'700 MWh/anno di energia, distribuita mensilmente come mostrato in figura 3.22.

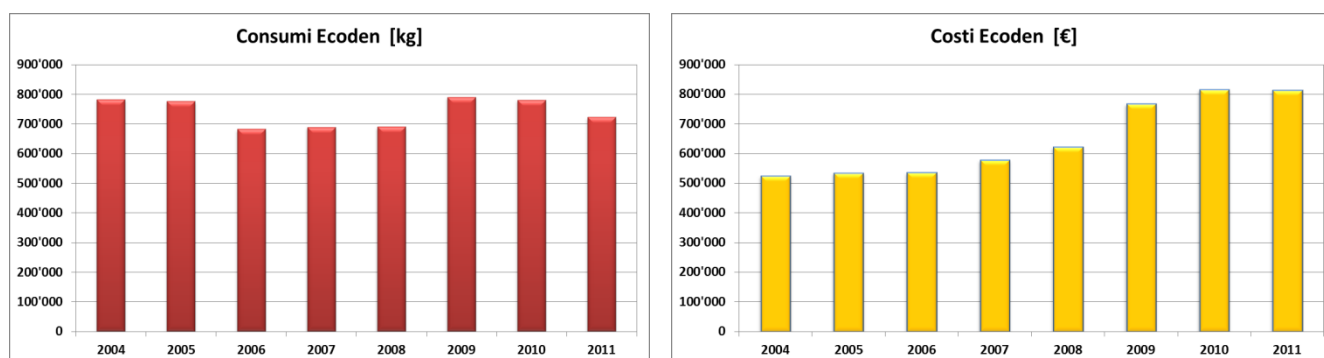


Figura 3.23a,b - Consumi e costi annuali dell'ECODEN, periodo 2004-2011.

Oltre ad analizzare i consumi di energia termica è stata determinata la loro incidenza economica, valutando i costi totali annui sostenuti per l'approvvigionamento del combustibile, dalla quale sono stati ricavati i costi specifici, per unità di massa di olio combustibile (€/kg) e per unità energetica fornita (€/kWh) (tabella 3.12 – figura 3.23b). I costi relativi al periodo 2004-2007 sono stati ricavati dalle fatture d'acquisto del combustibile, mentre quelli del periodo 2008-2011 sono stati stimati sulla base del trend di crescita del prezzo specifico dell'Ecoden nel quadriennio precedente e sulla base di un'indagine di mercato [12]. Il motivo della mancanza di dati certi sui costi

per l'ultimo periodo d'analisi (2008-2011) è dovuto al fatto che il servizio d'acquisto del combustibile è stato esternalizzato e, pertanto non è stato possibile risalire a tali dati. Se dal punto di vista dei consumi non è stata rilevata una notevole variazione annuale, nel periodo di riferimento 2004-2011, lo stesso non si può dire per i costi sostenuti per l'acquisto del combustibile (figura 3.23b), aumentati in 8 anni del 55%. È stato rilevato, infatti, un aumento annuo dei costi pari al 7.7%; ipotizzando un tasso d'inflazione annuo del 3%, ciò si traduce in una deriva dei costi energetici valutabile intorno al 4.6% annuo.

### 3.2.1.2 ENERGIA ELETTRICA

L'energia elettrica, necessaria per far fronte alle innumerevoli richieste energetiche dell'AOB, è acquistata tramite contratto di fornitura in media tensione. La suddivisione delle fasce di costo, con il quale è contabilizzata l'energia in ingresso alla struttura, è regolamentata secondo la delibera 181 del 2006 dell'AEEG [13]. La suddivisione delle tre fasce orarie è riportata nella figura 3.24.

		Fasce orarie (deliberazione AEEG 181/06)																							
fascia oraria		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Lunedì-Venerdì		F3						F2	F1 Peak										F2	F3					
Sabato		F3						F2 mid level																F3	
Domenica e festivi		F3 off peak																							

Figura 3.24 - Fasce orarie relative alla fornitura di energia elettrica.

Tabella 3.13 – Dettaglio consumi per l'anno 2009.

ANNO 2009	ENERGIA ATTIVA: Consumi totali e per fascia oraria [MWh]				ENERGIA REATTIVA: Consumi totali [MVARh]	Fattore di Potenza cosφ	Picco di Potenza [MW]
	TOTALE	F1	F2	F3			
Gennaio	839	312	200	328	407	0.900	1.716
Febbraio	754	309	179	266	349	0.907	1.707
Marzo	797	324	182	291	346	0.917	1.652
Aprile	734	299	148	287	351	0.902	1.598
Maggio	885	323	214	348	444	0.894	1.967
Giugno	1'066	414	252	400	566	0.883	2.280
Luglio	1'318	534	311	473	699	0.883	2.431
Agosto	1'348	490	308	551	710	0.885	2.437
Settembre	1'078	437	256	384	568	0.885	2.484
Ottobre	913	359	229	325	472	0.888	1.861
Novembre	795	325	181	289	377	0.904	1.710
Dicembre	823	324	165	334	386	0.905	1.746
<b>TOTALE</b>	<b>11'349</b>	<b>4'449</b>	<b>2'624</b>	<b>4'276</b>	<b>5'675</b>	<b>0.896</b>	<b>Max 2.437</b>

Il periodo preso come riferimento per i calcolo dei consumi elettrici comprende il biennio 2009-2010, i cui dati sono stati ricavati dalle fatture messe a disposizione dall'ufficio tecnico dell'AOB. Nelle tabelle 3.13-14 sono riportati i dettagliati relativi alle forniture di energia elettrica, ossia i valori di consumo mensile, la ripartizione tra energia attiva e reattiva, il fattore di potenza (cosφ) e il picco di potenza.



Tabella 3.14 – Dettaglio consumi per l'anno 2010.

ANNO 2010	ENERGIA ATTIVA: Consumi totali e per fascia oraria [MWh]				ENERGIA REATTIVA: Consumi totali [MVARh]	Fattore di Potenza cosφ	Picco di Potenza [MW]
	TOTALE	F1	F2	F3			
Gennaio	820	295	190	335	377	0.909	1.689
Febbraio	762	314	181	267	352	0.908	1.745
Marzo	824	346	193	285	379	0.908	1.632
Aprile	776	312	178	286	369	0.903	1.708
Maggio	844	335	188	320	403	0.902	1.778
Giugno	981	383	229	369	498	0.892	2.214
Luglio	1'330	511	334	485	725	0.878	2.469
Agosto	1'259	481	298	481	735	0.864	2.508
Settembre	1'117	447	269	401	641	0.867	2.433
Ottobre	980	369	240	370	non disponibile	non disponibile	2.203
Novembre	823	334	187	303	402	0.899	1.751
Dicembre	889	355	185	349	447	0.893	1.868
<b>TOTALE</b>	<b>11'404</b>	<b>4'482</b>	<b>2'671</b>	<b>4'251</b>	<b>5'327</b>	<b>0.902</b>	<b>Max 2.508</b>

Partendo dai dati riportati nelle fatture, è stata eseguita un'analisi per fascia oraria, ponendo così in evidenza la distribuzione dei consumi durante la giornata. La fascia oraria che registra il consumo annuo maggiore è la F1, che con 4'465 MWh/anno rappresenta il 39.3% dei consumi elettrici; segue la fascia F3, responsabile del 37.5% dei consumi (4'264 MWh/anno); infine nella fascia F2 si registra un consumo medio di 2'648 MWh/anno, pari al 23.3% del consumo elettrico totale.

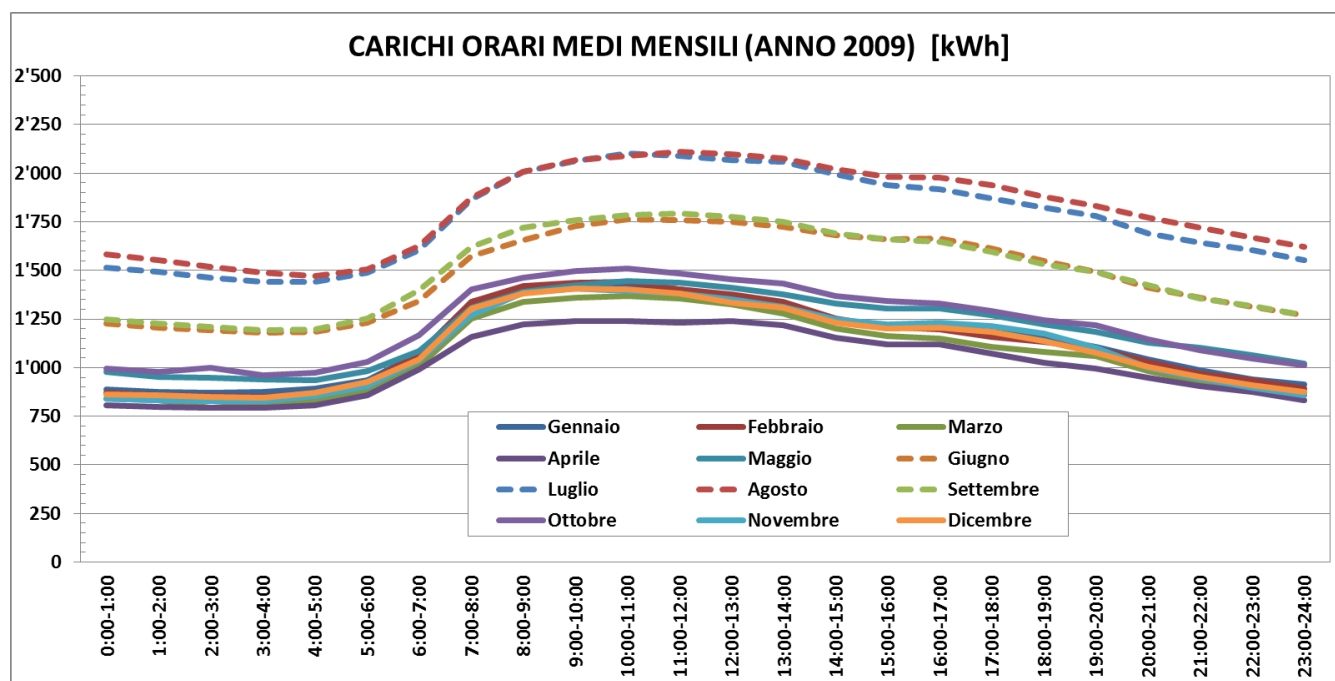


Figura 3.25 – Consumi orari medi mensili di energia elettrica (anno 2009).

Nella figura 3.25 sono stati riportati i consumi orari medi mensili per ogni mese del 2009, unico anno solare per il quale erano disponibili tali valori. L'andamento orario dei consumi è sostanzialmente simile per tutti i mesi dell'anno, con i picchi di consumo concentrati nella mattina; particolarmente evidenti sono gli elevati consumi nel

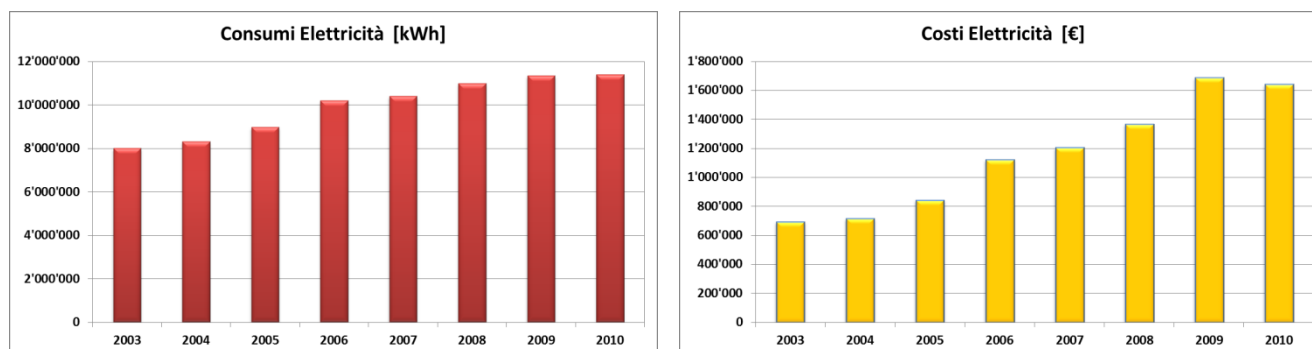
periodo estivo (giugno-settembre), riportati in linea tratteggiata, durante il quale sono maggiormente in funzione i gruppi frigoriferi per la produzione dell'energia termica necessaria per il raffrescamento degli ambienti.

Tramite l'analisi delle bollette, emesse dalle diverse aziende di distribuzione che si sono avvicinate negli anni, è stato possibile ricostruire l'andamento storico dei consumi, relativo al periodo 2003-2010. Dell'anno 2012 sono disponibili soltanto dati parziali, per questo motivo, nonostante siano stati considerati durante l'analisi dei dati, non saranno riportati nel seguito del lavoro. Mancando i costi degli anni 2007 e 2008, si è proceduto tramite interpolazione lineare a ricostruire il consumo specifico di questo biennio, ipotizzando costante il tasso di crescita di tale valore nel periodo di riferimento (2003-2010).

I dati di consumo annuale e i costi sostenuti, compresi quelli specifici (€/kWh), sono riportati nella tabella 3.15 e nelle figure 3.26a-b.

**Tabella 3.15 - Riepilogo consumi e costi dell'energia elettrica, anni 2003-2010.**

ANNO	Consumi kWh/anno	Costo €/anno	Costo Specifico c€/kWh
2003	8'002'137	691'675	8.64
2004	8'312'392	713'167	8.58
2005	8'978'839	842'039	9.38
2006	10'193'912	1'119'858	10.99
2007	10'404'169	1'202'326	11.56
2008	10'992'571	1'365'978	12.43
2009	11'348'974	1'685'967	14.86
2010	11'403'748	1'638'396	14.37



**Figura 3.26a,b - Consumi e costi annuali dell'Energia Elettrica, periodo 2003-2010.**

È possibile notare, nell'arco temporale considerato, un aumento della richiesta annua di energia elettrica mediamente del 5.2%, confermato dai dati parziali relativi al primo semestre del 2012. Per questo motivo, nel seguito del lavoro, i valori di riferimento di consumo elettrico saranno sempre valutati sulla base del biennio più prossimo (2009-2010), contrariamente al consumo termico calcolato basandosi su quelli del 2004-2011. I costi specifici dell'energia elettrica sono aumentati, in questo periodo, del 7.53%. Ipotizzando un tasso d'inflazione annua costante al 3%, si ottiene un valore di deriva dei costi elettrici pari al 4.4% annuo. L'effetto combinato dell'aumento dei consumi e dei costi specifici ha portato a un aumento dei costi annui stimabile intorno al 13%, facendo più che raddoppiare (+137%), in soli otto anni, l'esborso economico dell'azienda ospedaliera.

Concentrando l'attenzione sui costi del biennio di maggior interesse (2009-2010), è stata condotta, partendo dai dati mensili riportati nelle tabelle 3.16-17, un'analisi sulle varie macro voci che contribuiscono al costo totale annuo. Le categorie di costo individuate sono: costo dell'energia attiva; quota potenza e di uso delle reti; sovra-costi per la potenza reattiva; tasse, quote fisse, perdite, etc.; I.V.A. (20%).

Tabella 3.16 - Analisi dei costi della bolletta elettrica, anno 2009.

MESE	COSTI ENERGIA 2009						
	Costo Energia Attiva	Quota Potenza + Uso Reti	Potenza Reattiva	Tasse, quote fisse, perdite, ecc.	Imponibile	Iva 20%	Importo totale
Gennaio	€ 68'635	€ 20'745		€ 13'453	€ 102'833	€ 20'567	€ 123'399
Febbraio	€ 63'380	€ 18'958		€ 12'465	€ 94'803	€ 18'961	€ 113'763
Marzo	€ 66'757	€ 19'745		€ 12'951	€ 99'454	€ 19'891	€ 119'345
Aprile	€ 61'155	€ 18'322		€ 13'142	€ 92'619	€ 18'524	€ 111'142
Maggio	€ 72'074	€ 22'179	€ 13	€ 15'280	€ 109'547	€ 21'909	€ 131'456
Giugno	€ 88'216	€ 26'541	€ 133	€ 17'994	€ 132'884	€ 26'577	€ 159'461
Luglio	€ 110'402	€ 32'069	€ 190	€ 20'009	€ 162'671	€ 32'534	€ 195'205
Agosto	€ 109'384	€ 32'698	€ 158	€ 20'248	€ 162'488	€ 32'498	€ 194'985
Settembre	€ 90'358	€ 27'183	€ 117	€ 16'813	€ 134'471	€ 26'894	€ 161'365
Ottobre	€ 76'028	€ 22'549	€ 69	€ 14'089	€ 112'734	€ 22'547	€ 135'281
Novembre	€ 66'693	€ 19'824		€ 12'604	€ 99'121	€ 19'824	€ 118'945
Dicembre	€ 67'950	€ 20'468		€ 12'933	€ 101'350	€ 20'270	€ 121'620
<b>TOTALE</b>	<b>€ 941'032</b>	<b>€ 281'281</b>	<b>€ 680</b>	<b>€ 181'980</b>	<b>€ 1'404'973</b>	<b>€ 280'995</b>	<b>€ 1'685'967</b>

Tabella 3.17 - Analisi dei costi della bolletta elettrica, anno 2010.

MESE	COSTI ENERGIA 2010						
	Costo Energia Attiva	Quota Potenza + Uso Reti	Potenza Reattiva	Tasse, quote fisse, perdite, ecc.	Imponibile	Iva 20%	Importo totale
Gennaio	€ 59'647	€ 22'265		€ 11'881	€ 93'794	€ 18'759	€ 112'552
Febbraio	€ 57'208	€ 21'078		€ 11'287	€ 89'573	€ 17'915	€ 107'487
Marzo	€ 62'129	€ 22'236		€ 11'894	€ 96'259	€ 19'252	€ 115'511
Aprile	€ 57'893	€ 22'038		€ 12'601	€ 92'531	€ 18'506	€ 111'037
Maggio	€ 62'690	€ 23'771		€ 13'485	€ 99'945	€ 19'989	€ 119'935
Giugno	€ 72'721	€ 28'004	€ 47	€ 15'257	€ 116'030	€ 23'206	€ 139'236
Luglio	€ 98'458	€ 39'092	€ 390	€ 29'199	€ 167'138	€ 33'428	€ 200'566
Agosto	€ 92'880	€ 37'783	€ 771	€ 19'856	€ 151'290	€ 30'258	€ 181'548
Settembre	€ 83'296	€ 33'875	€ 584	€ 18'013	€ 135'768	€ 27'154	€ 162'922
Ottobre	€ 72'157	€ 30'138		€ 14'666	€ 116'961	€ 23'392	€ 140'353
Novembre	€ 61'483	€ 25'210	€ 104	€ 12'623	€ 99'419	€ 19'884	€ 119'303
Dicembre	€ 66'002	€ 27'077	€ 20	€ 13'522	€ 106'621	€ 21'324	€ 127'946
<b>TOTALE</b>	<b>€ 846'564</b>	<b>€ 332'566</b>	<b>€ 1'917</b>	<b>€ 184'283</b>	<b>€ 1'365'330</b>	<b>€ 273'066</b>	<b>€ 1'638'396</b>

Analizzando i valori delle tabelle è stato possibile desumere che l'incidenza maggiore riguarda il costo della sola energia attiva, 53.77% sul totale; la restante parte è dovuta alla somma della quota di potenza e a quella per l'utilizzo della rete elettrica (18.47%), seguita dall'IVA (16.67%) e dalle varie imposte e quote fisse (11.02%), unite in un'unica voce per semplicità. Del tutto ininfluenza è la quota dovuta alla potenza reattiva, che incide per lo 0.08%. Considerando la media dei costi del biennio 2009-10, sono stati calcolati i costi per la sola componente "energia attiva", i costi netti dell'energia elettrica, considerando anche tasse, sovra-costi, potenza reattiva e quote fisse, e infine sommando anche il 20% per l'Iva (figura 3.27).

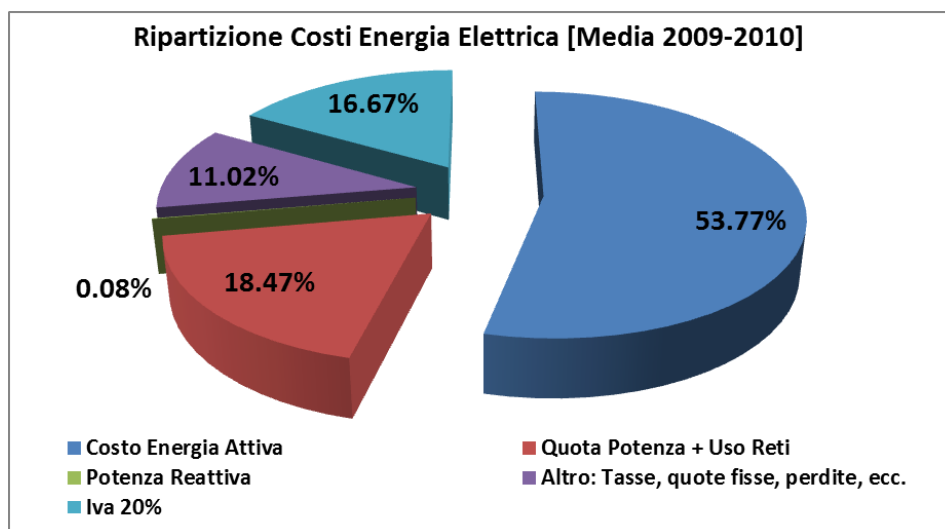


Figura 3.27 - Ripartizione costi dell'Energia Elettrica, periodo 2009-2010.

Tabella 3.18 – Costi specifici dell'energia elettrica.

FASCIA ORARIA	Costo specifico energia attiva [c€/kWh]	Costo netto Iva esclusa [c€/kWh]	Costo netto Iva inclusa [c€/kWh]
F1	10.72	16.59	19.91
F2	6.76	10.48	12.58
F3	5.55	8.61	10.33

### 3.2.2 CONSUMI ENERGETICI FINALI

Esaminiamo ora i consumi finali dell'energia, suddivisa in calore per acqua calda sanitaria, riscaldamento, raffrescamento e infine in energia per gli usi elettrici, escludendo in quest'ultima voce l'energia elettrica necessaria per la produzione del freddo, stimata secondo le modalità presentate nel paragrafo 3.1.3. Nella tabella 3.19 e figura 3.28 sono riportati gli andamenti mensili di tali grandezze.

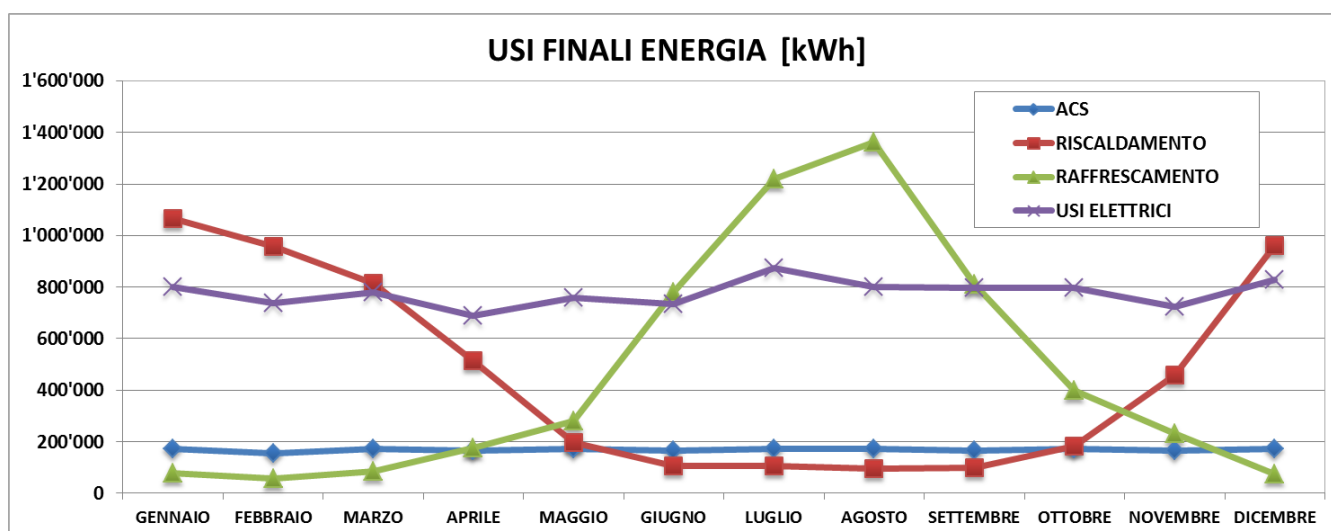


Figura 3.28 - Consumi mensili di energia termica, differenziati per uso finale.

Quantitativamente, il consumo energetico maggiore è quello necessario per gli usi elettrici (9'317 MWh), comprendenti l'illuminazione, la forza elettromotrice, l'energia industriale e l'alimentazione delle centrali tecnologiche (tranne la frigorifera), seguono i consumi per il raffrescamento (5'561 MWh) e per il riscaldamento (5'554 MWh) degli ambienti, infine vi è l'energia necessaria per la produzione dell'acqua calda sanitaria (2'015 MWh). L'andamento dei consumi mensili per riscaldamento e raffrescamento risente, com'è ovvio aspettarsi, della stagionalità dovuta alle condizioni climatiche della località (Cagliari) in cui è situata l'AOB. Il carico termico necessario per la produzione di ACS si mantiene, invece, costante durante tutto l'anno, al pari dei consumi elettrici, dipendenti più dalle attività svolte nella struttura che dalle condizioni climatiche esterne.

**Tabella 3.19 - Consumi mensili di energia, differenziata per uso finale.**

MESI	USI FINALI DELL'ENERGIA [kWh]			
	ACS	RISCALDAMENTO	RAFFRESCAMENTO	ELETTRICITÀ (tranne centrale frigo)
GENNAIO	171'120	1'064'277	78'081	800'590
FEBBRAIO	154'560	957'341	58'600	736'114
MARZO	171'120	815'084	86'800	778'373
APRILE	165'600	513'172	177'802	688'968
MAGGIO	171'120	198'414	280'657	760'232
GIUGNO	165'600	107'069	780'172	734'522
LUGLIO	171'120	105'592	1'218'998	872'651
AGOSTO	171'120	94'289	1'361'680	799'127
SETTEMBRE	165'600	97'733	811'157	796'698
OTTOBRE	171'120	184'413	399'724	798'198
NOVEMBRE	165'600	457'118	230'473	723'816
DICEMBRE	171'120	959'309	76'587	827'543
<b>TOTALE</b>	<b>2'014'800</b>	<b>5'553'810</b>	<b>5'560'730</b>	<b>9'316'834</b>

**Tabella 3.20 - Suddivisione, per tipologia di utenze, dei consumi per riscaldamento.**

MESI	RISCALDAMENTO [kWh]				
	Radiatori	UTA 2 tubi	UTA 4 tubi	Fan-Coil	TOTALE Riscaldamento
GENNAIO	138'068	113'203	518'023	294'984	1'064'277
FEBBRAIO	128'184	106'980	463'522	258'655	957'341
MARZO	117'466	93'130	368'407	236'081	815'084
APRILE	90'805	63'618	234'663	124'085	513'172
MAGGIO	13'696	3'298	156'361	25'060	198'414
GIUGNO	5	50	107'012	2	107'069
LUGLIO	0	17	105'525	50	105'592
AGOSTO	0	0	94'289	0	94'289
SETTEMBRE	0	0	97'732	1	97'733
OTTOBRE	0	6'005	140'324	38'084	184'413
NOVEMBRE	22'354	38'692	246'731	149'341	457'118
DICEMBRE	117'352	102'380	450'499	289'078	959'309
<b>TOTALE</b>	<b>627'929</b>	<b>527'371</b>	<b>2'983'088</b>	<b>1'415'421</b>	<b>5'553'810</b>

Il consumo annuo di energia termica, necessario all'AOB per far fronte ai carichi di riscaldamento, è pari a circa 5'554 MWh. Questa quantità è così ripartita tra le varie tipologie di utenze: 628 MWh/anno per i radiatori (11.3%); 527 MWh/anno per le UTA a 2 tubi (9.5%); 2'983 MWh/anno per le UTA a 4 tubi (53.7%); infine 1'415 MWh/anno (25.5%) per i ventilconvettori. La distribuzione mensile di questi carichi è riportata nella tabella 3.20 e

nella figura 3.29. L'andamento dei consumi mensili è molto simile per tutte le tipologie di utenze esaminate, in particolar modo, si può notare la sostanziale tra il carico dei radiatori e quello delle UTA a 2 tubi. È importante notare come la maggior parte del fabbisogno termico sia soddisfatto dalle UTA a 4 tubi, incaricate tra l'altro di servire i reparti più critici dell'ospedale (sale operatorie, terapia intensiva, etc.). Esse presentano una certa quantità di carico anche nei mesi estivi, principalmente a causa delle richieste delle batterie di postriscaldamento, necessarie per le operazioni di deumidificazioni dell'aria.

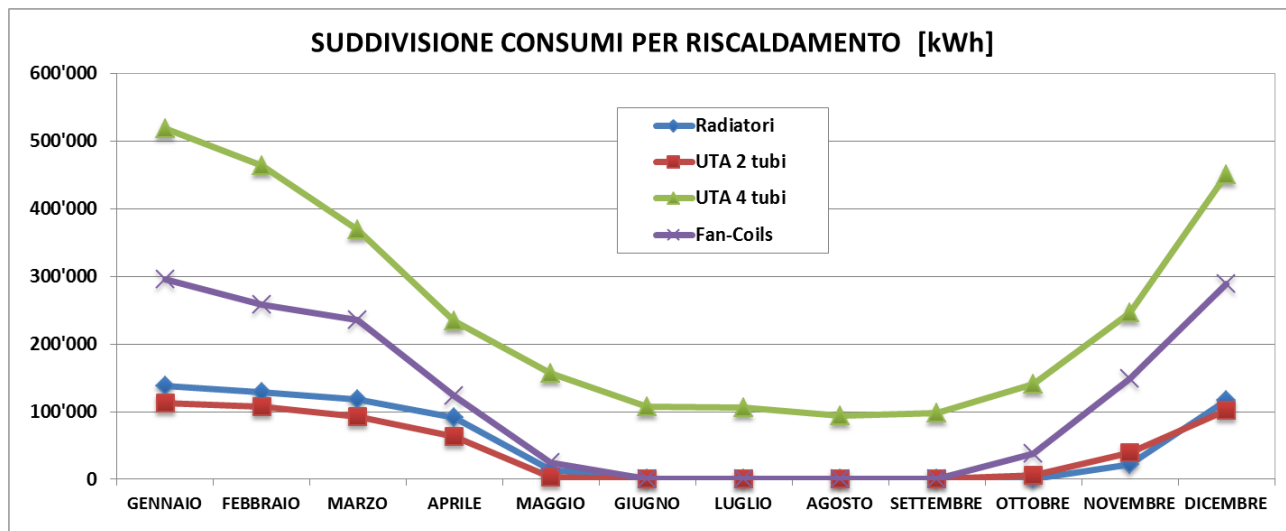


Figura 3.29 - Andamento mensile dei consumi per riscaldamento, per tipologie di utenze.

Unendo i dati appena esaminati per il riscaldamento con quelli dovuti al consumo di ACS, è possibile effettuare il bilancio sull'utilizzo dell'energia termica in ingresso nella struttura sotto forma di combustibile (figura 3.30). Degli 8'694 MWh di energia termica annualmente resa disponibile dal combustibile, circa il 64% è utilizzata per il riscaldamento degli ambienti, il 23% per la produzione di acqua calda sanitaria e il restante 13% è disperso nella parte d'impianto a monte dei sistemi di acquisizione dei dati. Se ne deduce un rendimento di questa sezione d'impianto, costituita dalle caldaie ( $\eta_{nom.} = 92.5\%$ ), collettore, scambiatori, etc., pari a circa 87%.

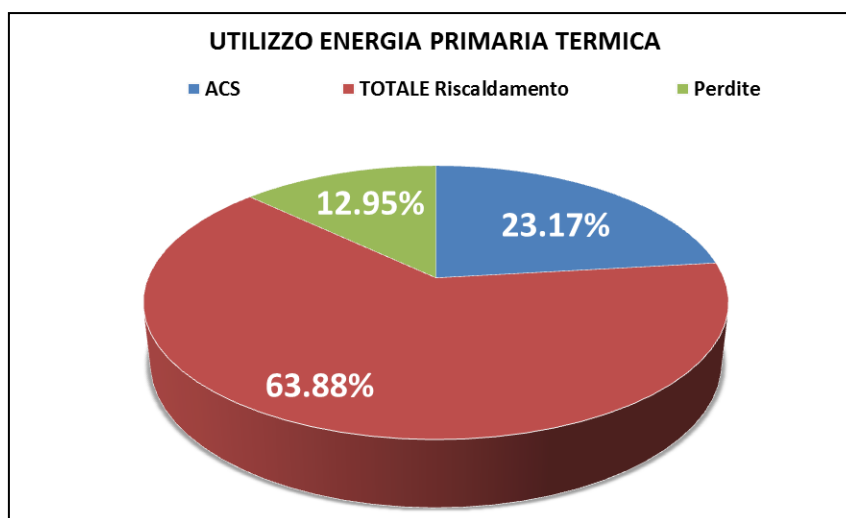


Figura 3.30 - Utilizzo dell'energia termica (combustibile) in ingresso nella struttura.

Ricapitolando tutti i dati raccolti e presentati in questo paragrafo (3.2) è possibile infine presentare il bilancio e i flussi delle grandezze energetiche all'interno dell'AOB (figura 3.31).

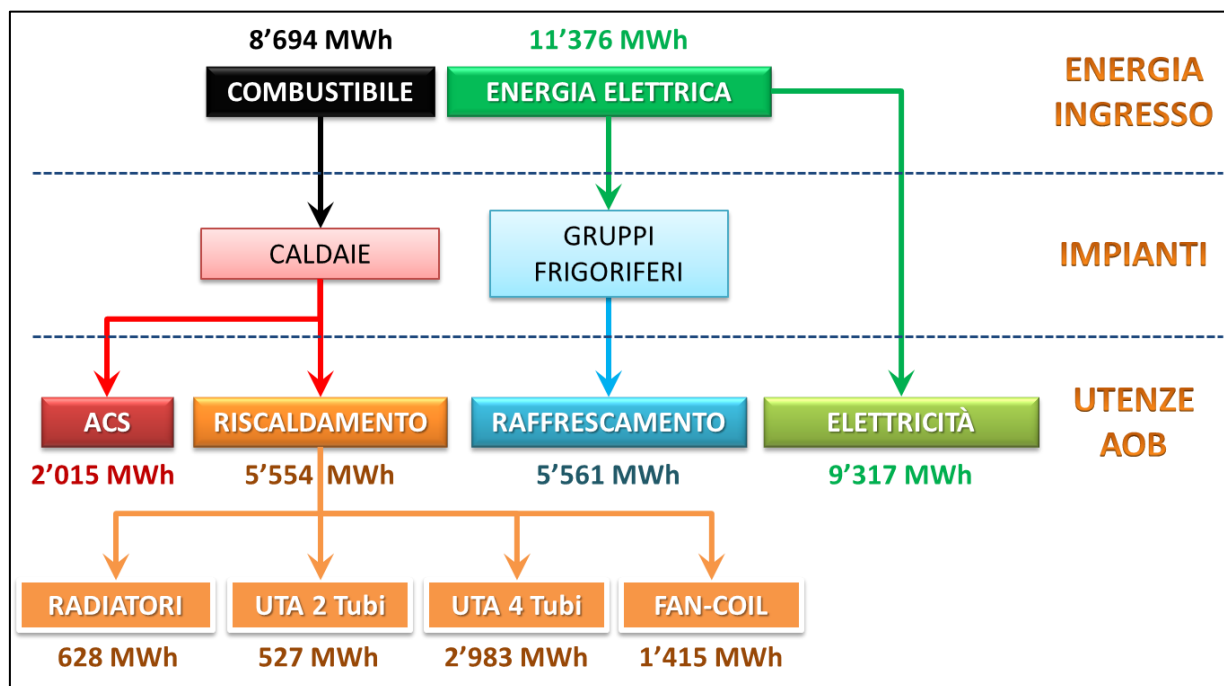


Figura 3.31 – Flussi energetici nell’AOB.

### 3.3 VALUTAZIONE INDICI ENERGETICI AOB

Terminata l’analisi del bilancio energetico dell’AOB, si è proceduto con la valutazione degli indici di consumo specifico (tabella 3.21), calcolati considerando l’energia (termica ed elettrica) in ingresso nella struttura e i parametri caratteristici dell’AOB, ossia i posti letto (572), superficie utile (62’250 m<sup>2</sup>) e il volume netto (217’876 m<sup>3</sup>).

Tabella 3.21 – Indicatori energetici dell’AOB.

ENERGIA ELETTRICA		ENERGIA TERMICA		ENERGIA TOTALE	
Per Posto Letto		Per Posto Letto		Per Posto Letto	
19.9	MWh/pl	15.2	MWh/pl	35.1	MWh/pl
1.71	tep/pl	1.31	tep/pl	3.02	tep/pl
71’599	MJ/pl	54’718	MJ/pl	126’318	MJ/pl
Per Superficie		Per Superficie		Per Superficie	
183	kWh/m <sup>2</sup>	140	kWh/m <sup>2</sup>	322	kWh/m <sup>2</sup>
1.57	ctep/m <sup>2</sup>	1.20	ctep/m <sup>2</sup>	2.77	ctep/m <sup>2</sup>
658	MJ/m <sup>2</sup>	503	MJ/m <sup>2</sup>	1’161	MJ/m <sup>2</sup>
Per Volume		Per Volume		Per Volume	
52.2	kWh/m <sup>3</sup>	39.9	kWh/m <sup>3</sup>	92.1	kWh/m <sup>3</sup>
0.449	ctep/m <sup>3</sup>	0.343	ctep/m <sup>3</sup>	0.792	ctep/m <sup>3</sup>
188	MJ/m <sup>3</sup>	144	MJ/m <sup>3</sup>	332	MJ/m <sup>3</sup>

I valori ottenuti sono stati confrontati con gli indici di Benchmark riportati in letteratura [14], relativi ai consumi specifici per posto letto delle strutture sanitarie, dotate di Energy Manager, delle varie regioni italiane. Analizzando i dati, riportati nella tabella 3.22 e in figura 3.32, si può notare come i valori di consumo specifico siano molto differenti, si passa da un minimo di 44 MWh/p.l. per la Sardegna ai 697 MWh/p.l. per la Basilicata, con l’AOB che presenta valori addirittura inferiori (35 MWh/p.l.) a quelli della regione Sardegna. Questo primo confronto non permette, però, di fare delle considerazioni conclusive, sia a causa dell’ampio intervallo di valori riscontrato, sia per le diverse tipologie di strutture sanitarie incluse nel campione, i cui consumi energetici sono strettamente legati ai servizi sanitari fornito al cittadino, non necessariamente coincidenti con quelli della struttura oggetto della nostra analisi (AOB).

Regione	Consumi Totali [MWh]	Posti letto	Consumi specifici [MWh/p.l.]
Valle d'Aosta	41'519	416	100
Piemonte	1'097'872	6'648	165
Liguria	205'851	2'559	80
Lombardia	5'652'180	19'838	285
Veneto	815'263	10'772	76
Trentino Alto Adige	212'829	840	253
Friuli Venezia Giulia	174'450	2'261	77
Emilia Romagna	691'985	8'746	79
Toscana	512'883	6'903	74
Marche	477'993	948	504
Lazio	695'474	5'906	118
Abruzzo	126'767	2'283	56
Molise	116'300	1'843	63
Campania	108'857	1'259	86
Basilicata	955'986	1'372	697
Puglia	578'011	5'858	99
Calabria	64'663	642	101
Sicilia	458'222	7'473	61
Sardegna	108'973	2'465	44
<b>AOB</b>	<b>20'071</b>	<b>572</b>	<b>35</b>

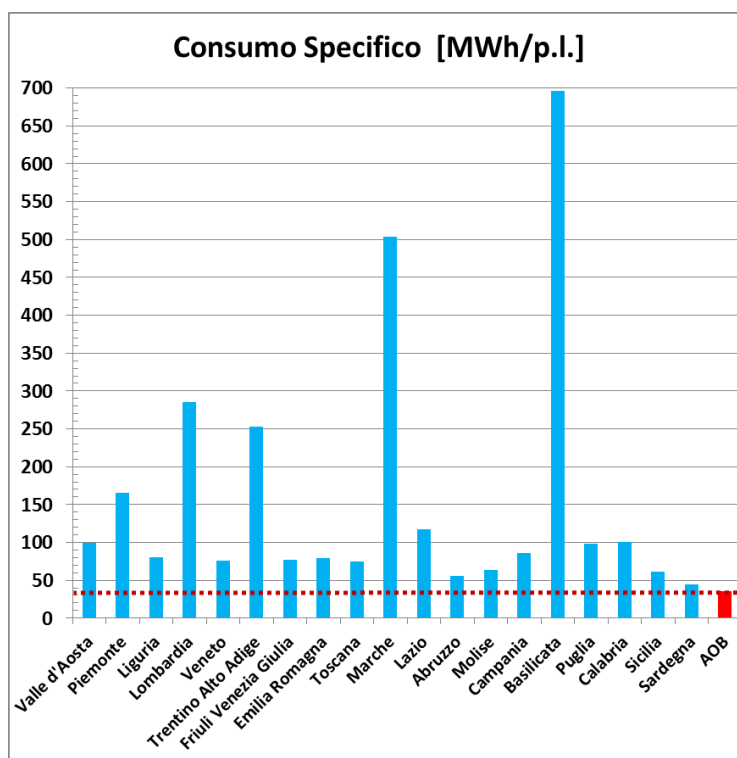


Tabella 3.22 - Figura 3.32 - Consumi specifici annui per regione [14].

Una successiva verifica degli indici di Benchmark è stata compiuta considerando i consumi specifici di energia, suddivisi in termici ed elettrici, riferiti all'unità di superficie ( $\text{kWh/m}^2$ ). Sono stati considerati i consumi medi degli ospedali di Italia, Germania, Stati Uniti e di altre cinque strutture ospedaliere del territorio nazionale di cui è stato possibile recuperare i dati [15] [16]: l'ospedale "F. Miulli" di Bari (705 posti letto,  $90'000 \text{ m}^2$ ); l'ospedale della Versilia-Viareggio ( $650$  posti letto,  $69'000 \text{ m}^2$ ); il "Presidio Sanitario Gradenigo" di Torino ( $200$  posti letto,  $16'500 \text{ m}^2$ ); "Azienda Ospedaliera Universitaria Padova" ( $1'400$  posti letto); l'ospedale "Cardarelli" di Napoli ( $1'351$  posti letto,  $126'237 \text{ m}^2$ ). Tutti i valori degli indici di Benchmark ottenuti sono stati confrontati con quelli dell'Azienda Ospedaliera Brotzu ( $572$  posti letto,  $62'250 \text{ m}^2$ ), i risultati sono riportati nella tabella 3.23 e in figura 3.33.

Concentrando l'attenzione sui valori medi nazionali si può osservare come i consumi specifici dell'Italia siano leggermente rispetto a quelli della Germania (25-30%) e molto inferiori a quelli degli Stati Uniti (36-54%). L'AOB presenta dei valori di consumo globale leggermente inferiori alla media nazionale (-9%), ma con una diversa distribuzione, infatti, i consumi termici sono inferiori del 38% e quelli elettrici superiori del 40%. Il maggior consumo elettrico rispetto a quello termico è una peculiarità riscontrata anche per l'ospedale Cardarelli di Napoli, situato a una latitudine prossima a quella di Cagliari e con un clima mediterraneo in entrambi i siti. Questo porta a ipotizzare che le condizioni climatiche siano la causa principale di questa inversione nei consumi specifici, determinando una maggiore richiesta elettrica estiva, dovuta alla climatizzazione, compensata da un minor consumo termico nel periodo invernale. Questa distribuzione nei consumi è peggiorativa rispetto a quella riscontrata per il campione nazionale, infatti, l'energia elettrica presenta dei costi maggiori rispetto a quella termica, i cui costi nella regione Sardegna sono peraltro superiori a quelli della media nazionale a causa della mancanza del gas naturale.

Restringiamo ora l'analisi alle strutture ospedaliere aventi caratteristiche, in termini di posti letto e superfici, compatibili con quelle dell'AOB, ossia l'ospedale Miulli e il Versilia. I consumi elettrici di queste due strutture sono inferiori o simili (Versilia) a quelli dell'AOB, mentre i consumi termici sono superiori. Nel caso dell'ospedale della Versilia occorre tenere in considerazione la presenza di un impianto di cogenerazione, che porta al forte sbilanciamento verso i consumi di energia termica.



Tabella 3.23 - Consumi specifici annui di diverse strutture ospedaliere [15] [16].

OSPEDALE	ELETTRICO	TERMICO	TOTALE
	kWh/m <sup>2</sup>	kWh/m <sup>2</sup>	kWh/m <sup>2</sup>
Miulli (BARI)	181	213	395
Ospedale Versilia (VIAREGGIO)	135	354	489
Gradenigo (TORINO)	291	436	727
Az. Osp. Università Padova	154	196	350
Cardarelli (NAPOLI)	322	189	510
Italia (Media Ospedali)	130	225	355
Germania (Media Ospedali)	100	180	280
USA (Media Ospedali)	280	350	630
<b>AZIENDA OSPEDALIERA BROTZU</b>	<b>183</b>	<b>140</b>	<b>322</b>

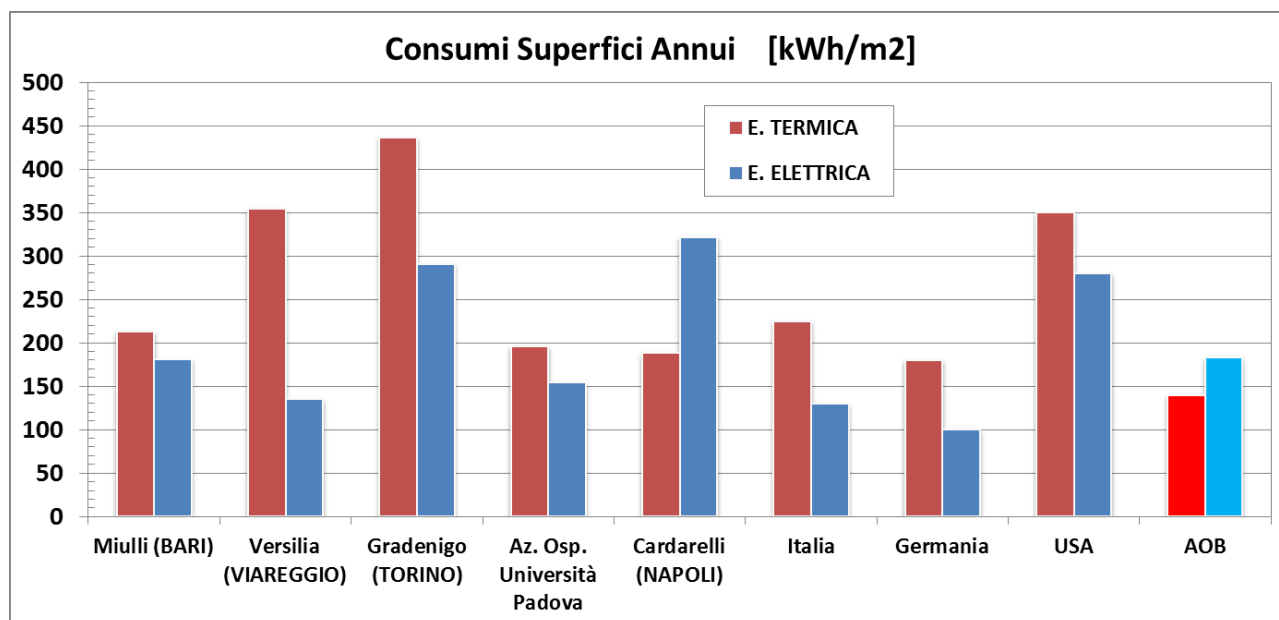


Figura 3.33 - Consumi specifici annui di diverse strutture ospedaliere [15] [16].

## 4 ANALISI TERMO-ENERGETICA TRAMITE MODELLAZIONE NUMERICA

In questo capitolo sarà descritta l'analisi termo-energetica del corpo centrale dell'AOB effettuata tramite simulazione dinamica. Come si è visto nel capitolo precedente, i consumi dovuti ai fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento rappresentano la parte più consistente dell'intero bilancio energetico dell'azienda. La scelta di eseguire la simulazione dinamica del comportamento termico dell'edificio è quindi una scelta obbligata per valutare meglio le cause che determinano i consumi e predisporre le necessarie azioni di risparmio energetico. In sintesi, i vantaggi che si possono ottenere attraverso l'approccio modellistico-numerico sono i seguenti:

- **VERIFICA CONSUMI AOB:** con l'ausilio della simulazione dinamica è possibile verificare se i consumi rilevati sono compatibili con quelli ottenuti applicando rigorosamente le disposizioni della normativa vigente. In questo modo, incrociando i dati ottenuti con l'audit con i risultati delle simulazioni, è possibile razionalizzare l'uso corretto degli impianti in modo da ottimizzare i consumi energetici e minimizzare gli sprechi.
- **ANALISI RISULTATI DELL'AUDIT:** l'audit energetico, da solo, non è in grado di fornire tutte le informazioni necessarie per capire la causa dei consumi registrati. È pertanto necessario utilizzare la simulazione dinamica come strumento di analisi, con lo scopo di indagare le cause che generano tali consumi per indirizzare le strategie da mettere in atto per conseguire gli obiettivi di ottimizzazione della gestione impiantistica e di risparmio energetico.
- **ANALISI DEGLI INTERVENTI:** infine, con la simulazione dinamica, è possibile verificare in tempi rapidi i possibili interventi di miglioramento. Data la complessità e la mole della struttura, i rischi connessi alla non riuscita di un intervento di retrofit possono comportare rilevanti perdite economiche. Con l'approccio modellistico è possibile testare su un modello virtuale dell'ospedale tutte quelle possibilità impiantistiche che si vogliono implementare, con il risultato di avere dati più attendibili con i quali impostare analisi economiche che abbiano un miglior riscontro con la realtà.

Il seguito del capitolo è così organizzato: nella prima parte sarà introdotto il codice TRNSYS e le operazioni di calibrazione svolte per rendere i dati di simulazione relativi al caso in studio più attendibili; nella seconda parte sarà illustrato come l'AOB sia stato modellato e implementato sul codice di calcolo; nella terza parte saranno presentati i risultati ottenuti tramite simulazione dinamica; infine nella quarta parte sarà presentato il confronto tra i dati elaborati nella fase di audit con i risultati ottenuti con TRNSYS.

### 4.1 CODICE UTILIZZATO PER LA SIMULAZIONE DINAMICA: "TRNSYS"

#### 4.1.1 DESCRIZIONE TRNSYS

Per la simulazione dinamica dell'AOB è stato utilizzato il codice TRNSYS, acronimo di "TRAnsient SYstem Simulation program", versione 16.1. Il codice è stato sviluppato dal "Solar Energy Laboratory" dell'università di Wisconsin-Madison e attualmente è uno tra i più affidabili programmi scientifici per lo studio di sistemi dinamici nel campo energetico. Il suo utilizzo spazia dallo studio d'impianti termici ed elettrici alimentati con fonti tradizionali e/o rinnovabili all'analisi d'impianti HVAC, sistemi idraulici, impianti a idrogeno, studio dei sistemi di gestione e ottimizzazione degli impianti, fino alla caratterizzazione del comportamento energetico degli edifici. Il codice permette inoltre l'interfacciamento con altri software come Excel, Matlab, Fluent, etc.

Il cuore del programma è rappresentato dal "Simulation Studio", un ambiente di lavoro virtuale che permette di gestire gli elementi, chiamati "Type", che descrivono il problema fisico-tecnico oggetto della simulazione. Il modello generale che si vuole simulare sarà quindi composto da un insieme di Type, interconnessi tra loro

attraverso l'interfaccia grafica IISIBAT3, in modo da formare un diagramma a blocchi che sintetizza le relazioni fisico-matematiche dei vari elementi funzionali del sistema. Attraverso il Simulation Studio avviene la gestione del funzionamento del codice, scegliendo i parametri di controllo quali il tempo di simulazione, la tipologia di solutore numerico, il passo di discretizzazione temporale, etc.

Ogni Type è descritto da un modello matematico, scritto in FORTRAN-77 o C++, che attraverso una finestra grafica di gestione, chiamata "Proforma", permette di trattare ogni elemento come una Black Box; spetterà poi all'operatore definire i parametri e le grandezze di Input ed Output necessarie per garantirne il corretto funzionamento. Il programma offre inoltre la possibilità di gestire simultaneamente un insieme di Type, racchiudendoli in un unico blocco, chiamato "Macro", che permette la gestione di diversi elementi, e dei relativi dati, in maniera gerarchica e più funzionale. TRNSYS possiede una vasta libreria di Type, forniti dagli sviluppatori del software nel corso degli anni, che permettono la simulazione dei più disparati modelli dinamici in vari campi dell'ingegneria. Esistono ad esempio Type che modellano il funzionamento di collettori solari; serbatoi; valvole; pompe; compressori; muri e finestre; componenti elettriche ecc; vi sono inoltre Type che funzionano da interruttori; sistemi di controllo, forniscono dati climatici o permettono l'interazione con altri programmi quali Matlab; Excel ecc. Sono presenti anche Type di servizio che hanno la funzione di salvataggio o visualizzazione grafica delle varie grandezze studiate. Tra tutti quelli presenti in libreria, il Type 56 è sicuramente quello di particolare interesse per questo lavoro. Esso, infatti, consente di operare con l'interfaccia grafica TRNBuild che permette la costruzione di un edificio multi zona, con questa sub-routine è stato costruito il modello dell'A0B [2].

#### **4.1.2 CALIBRAZIONE DEL CODICE**

La procedura di calibrazione del codice rappresenta una tra le fasi più importanti del lavoro di modellazione, poiché da essa dipendono l'accuratezza e l'affidabilità dei risultati ottenuti. Questa fase è sovente trascurata, anche se in realtà essa rappresenta la principale causa di errore nell'uso del codice. L'operazione di calibrazione non va vista soltanto come un controllo della validità del codice, fase sempre necessaria per rilevare gli eventuali bug di programmazione, ma soprattutto come una verifica delle capacità dell'utente di utilizzare il programma nella maniera corretta, riuscendo ad implementare fedelmente il modello oggetto dello studio. Nel seguito del paragrafo saranno presentate due diverse procedure di calibrazione. La prima riprende una metodologia, concepita dall'ASHRAE [18-19], adottata dalla comunità scientifica internazionale. La seconda metodologia segue i dettami della normativa UNI EN 15265 relativa alla validazione di codici per la simulazione dinamica [20-21].

##### **4.1.2.1 BESTEST/ASHRAE**

Il primo test di calibrazione del codice TRNSYS avviene attraverso la simulazione di alcuni modelli semplici di edificio, chiamati test-case, tratti dal "*Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs*" dell'ASHRAE [18]. I test presi in considerazione sono indicati con le seguenti sigle: 195; 600; 620; 640; 650; 900; 920; 940; 950; 960. Per i casi 600; 900; 650 e 950 esistono ulteriori versioni chiamate 600FF; 900FF; 650FF e 950FF. Questi ultimi hanno le stesse caratteristiche dei casi di origine, l'unica variante è l'assenza dell'impianto di riscaldamento e raffrescamento, comportando una libera variazione della temperatura all'interno dell'edificio, da qui la simbologia FF che sta per Free-Float. La scelta di utilizzare i test forniti dall'ASHRAE è conseguenza della meticolosità con la quale sono descritti i vari problemi fisici da studiare. Ciò permette a qualunque utente la ripetizione sistematica dell'esperimento numerico, controllando in maniera accurata tutti i parametri e le condizioni al contorno che possono alterare la validità dei risultati.

##### **DESCRIZIONE EDIFICIO TEST ANALIZZATO**

L'edificio preso in considerazione in tutti i casi, tranne il 960, è formato da un parallelepipedo di base 6x8 metri e alto 2.7 metri che costituisce un'unica zona termica dal volume complessivo di 129.6 m<sup>3</sup>. Il lato lungo della base è rivolto verso sud (figure 4.1-4.2).

I materiali costituenti i muri hanno caratteristiche diverse secondo il test case trattato. Per i test 195, 600, 620, 640 e 650 si utilizzano muri definiti come Lightweight (tabella 4.1); per i test 900, 920, 940 e 950 si utilizzano i muri Heavyweight (tabella 4.2). I valori di assorbività e trasmittanza della radiazione sono differenziati considerando rispettivamente 0.1 e 0.1 per il test case 195; per tutti gli altri test si utilizzano i valori di 0.6 e 0.9.

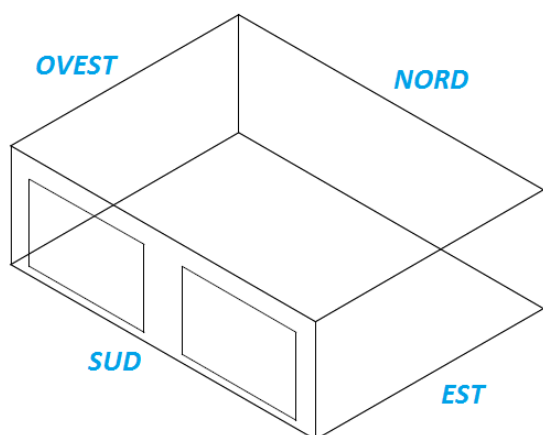


Figura 4.1 - Edificio dei test case (tranne 960; 620; 920).

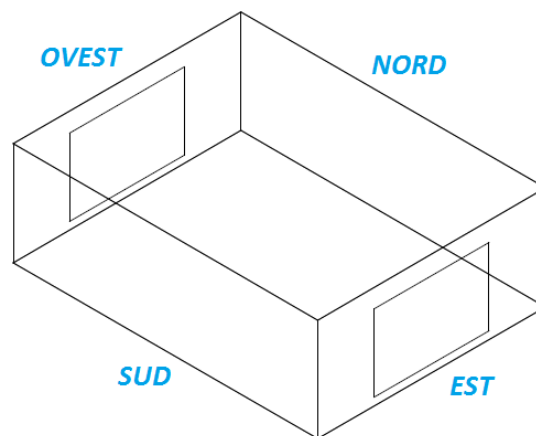


Figura 4.2 - Edificio dei test case 620; 920.

Tabella 4.1 - Materiali costituenti le superfici opache, murature leggere.

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

Il test case 195 non presenta alcuna superficie vetrata, mentre i test case 600; 640; 650; 900; 940 e 950 presentano due superfici vetrate nella parete esposta a sud, ciascuna di esse ha superficie pari a 6 m<sup>2</sup> (vedi figura 4.1). I test case 620 e 920 non contengono alcuna superficie vetrata a sud, ma presentano nelle pareti est e ovest una finestra di 6 m<sup>2</sup> (figura 4.2).

Tabella 4.2 - Materiali costituenti le superfici opache, murature pesanti.

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

✓ TEST CASE 960

Il test case 960 differisce dagli altri casi per la presenza di due zone termiche indicate come back-zone e sun-zone. La back-zone è uguale sia come dimensioni, caratteristiche termo fisiche e input all'unica zona termica utilizzata nel caso 600 con la sostituzione della parete sud con una parete comune alla sun-zone le cui caratteristiche sono riportate nella tabella 4.3. La sun-zone ha la base di 2x8 m con altezza di 2.7 metri e le caratteristiche delle pareti sono le stesse della zona 900. La parete sud contiene due finestre di 6 m<sup>2</sup> ciascuna.

Tabella 4.3 - Materiali costituenti la parete divisoria.

PARETE COMUNE TRA BACK-ZONE E SUN-ZONE						
ELEMENTO	k [W/mK]	Spessore [m]	U [W/m <sup>2</sup> K]	R [m <sup>2</sup> K/W]	Densità [kg/m <sup>3</sup> ]	Cp [J/kgK]
Common wall	0.510	0.20	2.55	0.392	1400	1000

DATI DI INPUT

Per completare la costruzione dei modelli da utilizzare nelle simulazioni è necessario definire le seguenti grandezze in ingresso:

✓ FILE METEO

Il file di dati meteorologici utilizzato nei codici di calcolo è indicato nello standard ASHRAE ed è lo stesso utilizzato nella compilazione dei BESTEST contenenti i risultati di riferimento per la validazione. Tali dati sono forniti sotto forma oraria e la località in cui sono stati rilevati è l'ex aeroporto di Denver-Stapleton (Colorado - USA). I principali parametri del sito sono riepilogati nella seguente tabella 4.4. L'utilizzo di tale località è

giustificato dal fatto che sono presenti notevoli escursioni termiche nel corso dell'anno e durante le giornate, garantendo quindi un caso abbastanza indicativo per la validazione dei codici di calcolo energetico.

**Tabella 4.4 - Riepilogo dati meteorologici del sito (Denver).**

Latitudine	Longitudine	Altitudine	Temperatura minima annuale	Temperatura massima annuale	Temperatura media annuale
39.8° Nord	104.9° Ovest	1609 m	-24.39 °C	35.00 °C	9.71 °C
Irradiazione globale annuale (orizzontale)	Irradiazione normale annuale	Irradiazione diretta annuale (orizzontale)	Irradiazione diffusa annuale (orizzontale)		
1832 kWh/m <sup>2</sup>	2354 kWh/m <sup>2</sup>	1339 kWh/m <sup>2</sup>	492 kWh/m <sup>2</sup>		

✓ INFILTRAZIONI

Le infiltrazioni di aria esterna sono pari a 0.5 volumi/ora e sono presenti in tutti i test case utilizzati, ad eccezione del 195.

✓ APPORTI INTERNI GRATUITI

Gli apporti interni gratuiti sono pari a 200 W, sono composti soltanto da calore sensibile suddiviso nelle seguenti componenti: 60% radiativo; 40% convettivo. Tali apporti sono presenti in tutti i test case tranne il 195 e la sun-zone del test 960.

✓ COEFFICIENTI DI SCAMBIO TERMICO CONVETTIVO

I coefficienti di scambio termico convettivo delle superfici vanno distinti a seconda che si tratti di superficie opaca o trasparente. Per le superfici opache si utilizzano i seguenti valori: 3.16 W/m<sup>2</sup>K per l'interno; 24.67 W/m<sup>2</sup>K per l'esterno. Le superfici trasparenti hanno invece i seguenti valori: 3.16 W/m<sup>2</sup>K per l'interno; 16.37 W/m<sup>2</sup>K per l'esterno.

✓ FINESTRE

Le finestre utilizzate nelle simulazioni obbediscono alle specifiche indicate dall'ASHRAE. Data la grande quantità di parametri necessari per la definizione della superficie vetrata, riportiamo nella tabella 4.5 soltanto alcune delle grandezze termofisiche più significative. Per i casi in cui le superfici vetrate sono esposte a SUD, eccetto il test-case 960, la posizione delle finestre è la seguente: altezza dal suolo pari a 0.2 m; distanza dai bordi delle pareti di 0.5m. Nel test-case 960 l'altezza dal suolo cambia in 0.5 m, mentre la distanza laterale resta invariata. Per le pareti EST e OVEST la posizione della finestra è centrale rispetto alla parete.

**Tabella 4.5 - Caratteristiche delle superfici vetrate.**

CARATTERISTICHE FINESTRE							
Altezza	Larghezza	N° Vetri	k vetro	R tot. (aria-aria)	Densità vetro	Cp vetro	Gas
2 m	3 m	2	1.06 W/mK	3 m <sup>2</sup> K/W	2500 kg/m <sup>3</sup>	750 J/kgK	Aria

✓ DISTRIBUZIONE IRRADIAZIONE SOLARE INTERNA

La distribuzione di energia solare, passante attraverso le superfici vetrate verso l'interno dell'ambiente, è così definita: 64.2% colpisce il pavimento; 16.8% va verso il soffitto; le pareti est e ovest assorbono il 3.8%; alla parete nord arriva il 5.3%; verso sud il 2.6%; mentre il restante 3.5% viene disperso dalle finestre. Tali valori valgono per i test case 600; 640; 650; 900; 940; 950. Per i test case 620 e 920 bisogna apportare le seguenti modifiche ai valori d'irradiazione incidente: le pareti est e ovest assorbono il 2.5% della radiazione; le pareti nord e sud il 5.25%; gli altri valori non subiscono modifiche. Per la Sun-zone del test case 960 bisogna ridefinire gli apporti secondo la seguente distribuzione: 60% sul pavimento; 6% sul soffitto; 20% sulla parete nord; il 3% verso sud; il 2% verso est e ovest; il restante 7% è disperso dalle superfici vetrate.

✓ SISTEMA DI VENTILAZIONE MECCANICA – SET UP TERMOSTATI

I sistemi di riscaldamento e raffrescamento utilizzati considerano soltanto il calore sensibile, trascurando completamente quello latente. Inoltre per quanto riguarda il riscaldamento si assume che il sistema funzioni soltanto ad aria, portando a uno scambio termico che è al 100% di tipo convettivo e 0% radiante. La potenza dei sistemi di riscaldamento e raffrescamento è infinita (in pratica si tara a 1 MW), con efficienza degli impianti pari al 100%. Secondo i test case cambia il sistema di controllo della temperatura all'interno dell'edificio, in particolare possiamo distinguere le seguenti tipologie di set up dei termostati:

✓ 20-20 (BANG-BANG) [Test Case: 195]

La temperatura della zona è tenuta costantemente a 20°C. In pratica il riscaldamento si accende quando la temperatura si abbassa sotto i 20°C e il raffrescamento se la temperatura va sopra i 20°C.

✓ 20-27 (DEADBAND) [Test Case: 600; 620; 900; 920; 960 (solo back-zone)]

La temperatura della zona è mantenuta tra i 20-27°C. Il riscaldamento si accende quando la temperatura si abbassa sotto i 20°C e il raffrescamento se la temperatura va sopra i 27°C.

✓ SETBACK [Test Case: 640; 940]

L'impianto di raffrescamento è sempre acceso mantenendo la temperatura interna inferiore ai 27°C. L'impianto di riscaldamento ha due diversi set-point secondo l'ora della giornata: dalle 7:00 alle 23:00 la temperatura interna va tenuta sopra i 20°C; dalle 23:00 alle 7:00 la temperatura interna non deve scendere sotto i 10°C.

✓ VENTING [Test Case: 650; 950]

L'impianto di riscaldamento è sempre spento. L'impianto di raffrescamento ha due condizioni di set-point: dalle 18:00 alle 7:00 l'impianto è sempre spento; dalle 7:00 alle 18:00 l'impianto deve mantenere la temperatura interna al di sotto dei 27°C. È presente in questa configurazione un impianto di ventilazione forzata che immette all'interno della zona dell'aria prelevata dall'esterno. Il settaggio di tale impianto di ventilazione forzata è il seguente: dalle 7:00 alle 18:00 l'impianto è sempre spento; dalle 18:00 alle 7:00 l'impianto è acceso alla sua portata nominale di 13.14 Volumi/ora, pari a 1703.16 m<sup>3</sup>/h.

✓ FREE-FLOAT [Test Case: 600FF; 650FF; 900FF; 950FF; 960 (solo sun-zone)]

Gli impianti di riscaldamento e raffrescamento sono sempre spenti, in questo modo la temperatura interna della zona termica è libera di oscillare senza controllo.

## RISULTATI SIMULAZIONI

Presentiamo ora i risultati delle simulazioni, tali valori saranno confrontati con quelli di riferimento ottenuti dal National Renewable Energy Laboratory facente capo al DOE (Department of Energy USA) [19]. Questi valori di riferimento, indicati in letteratura come BESTEST, sono stati ottenuti attraverso otto diversi codici di calcolo dinamico utilizzati in ambito scientifico e professionale. Tali risultati non sono pertanto da considerarsi come valori reali di riferimento, ma servono per fornire un'indicazione dell'ordine di grandezza, o il target, che è possibile ottenere con quello che oggi è riconosciuto essere lo stato dell'arte della simulazione numerica nell'ambito dell'analisi energetica degli edifici. Nelle successive analisi pertanto verificheremo che i risultati ottenuti rientrino nel range minimo-massimo ottenuto dai BESTEST o che comunque non ci si discosti del 10% dai valori limite di massimo o minimo.

La prima verifica comprende il controllo dell'elaborazione dei dati climatici d'ingresso da parte di TRNSYS, nello specifico si andranno a confrontare i valori dell'irradiazione incidente sulle superfici sud e ovest per i giorni 5 Marzo e 27 Luglio. I risultati ottenuti sono riportati nelle figure 4.3, 4.4, 4.5, 4.6.

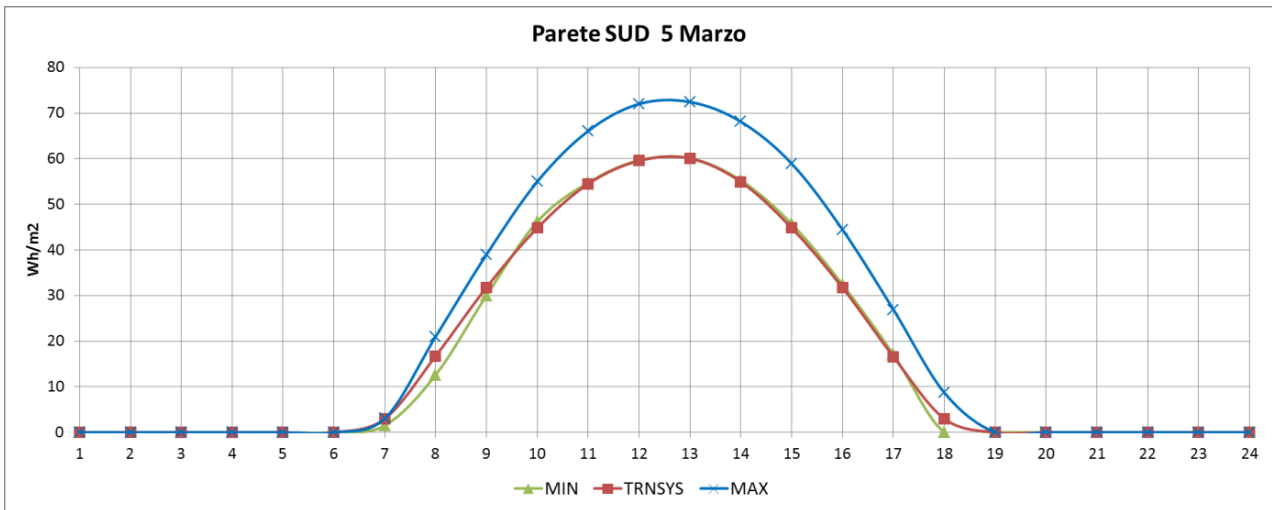


Figura 4.3 - Irradiazione incidente sulla superficie esposta a Sud il 5 Marzo.

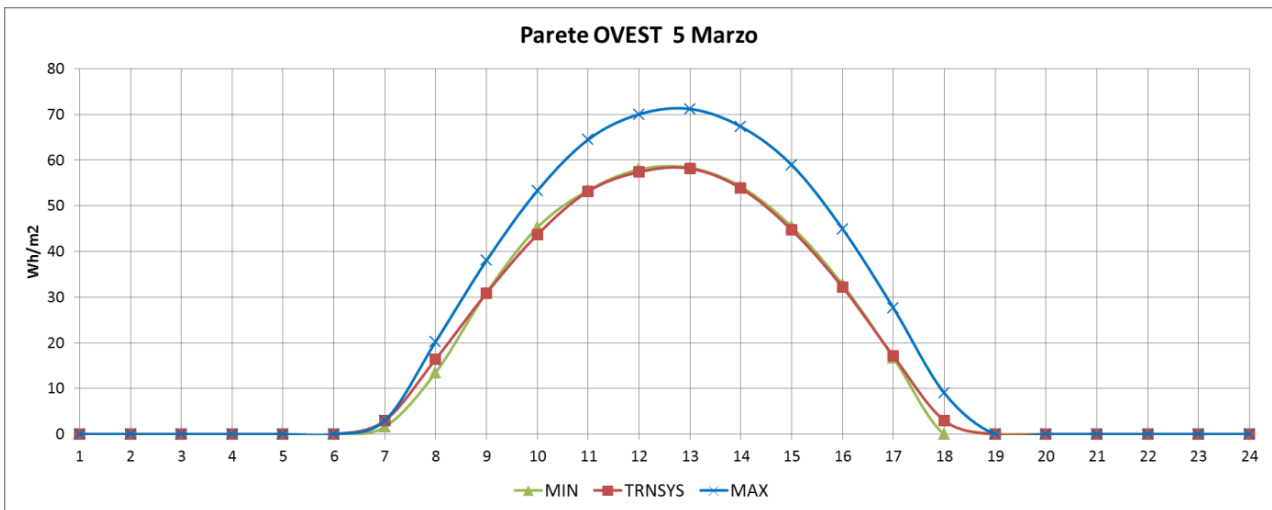


Figura 4.4 - Irradiazione incidente sulla superficie esposte a Ovest il 5 Marzo.

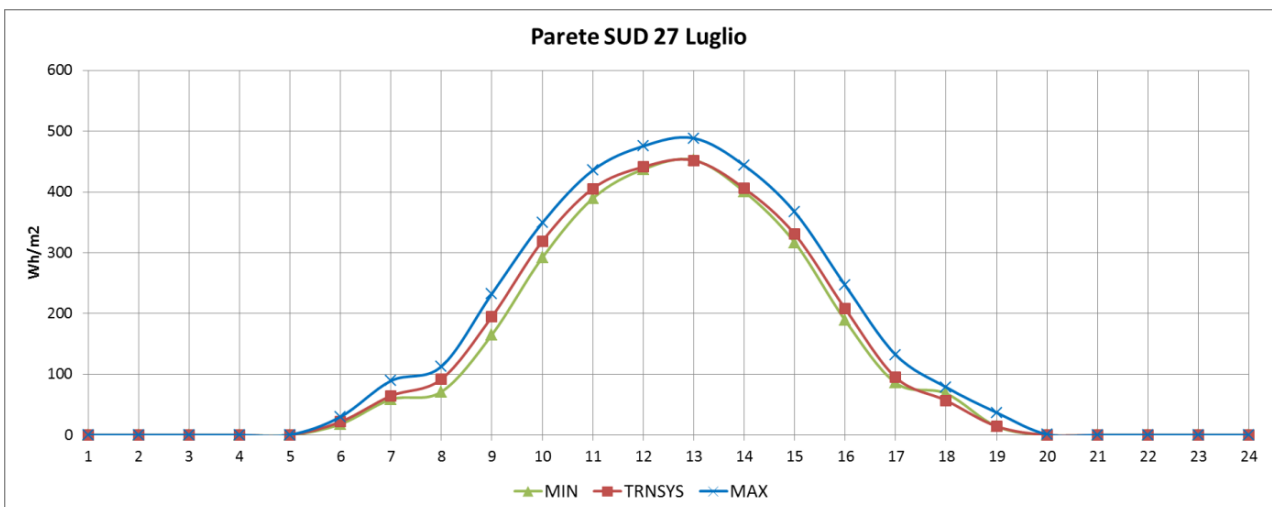


Figura 4.5 - Irradiazione incidente sulla superficie orientata a Sud il 27 Luglio.



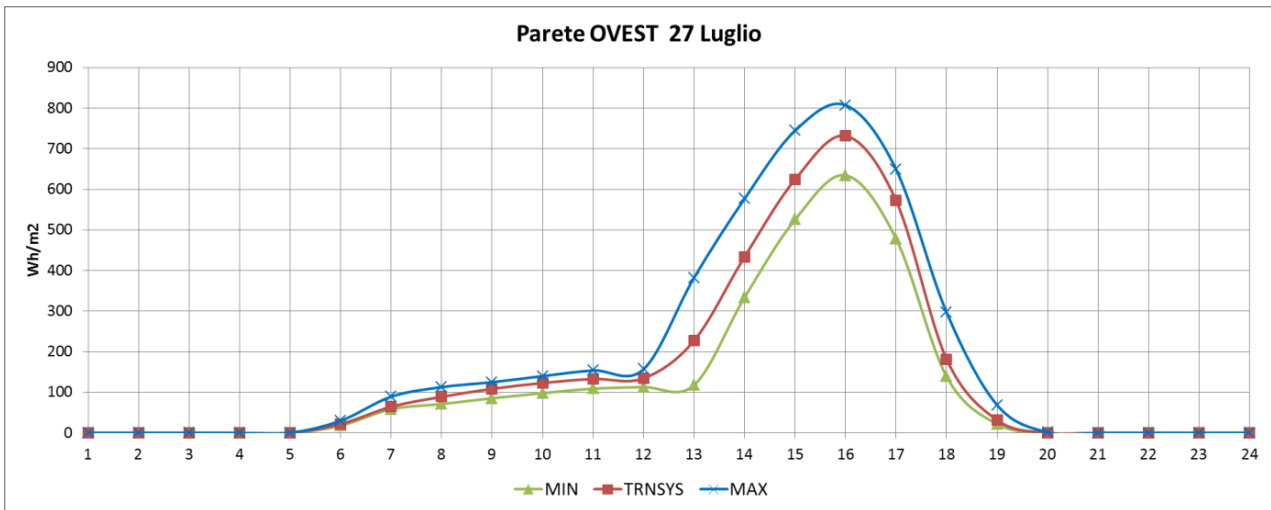


Figura 4.6 - Irradiazione incidente sulla superficie orientata a Ovest il 27 Luglio.

I risultati riportati nelle figure precedenti mostrano come il software sia in grado di modellare il problema fisico in maniera corretta. I risultati sui valori d'irradiazione rientrano dentro l'intervallo dei valori del BESTEST o comunque si discostano di poco dai limiti imposti, con una differenza relativa inferiore all'1%.

Procediamo con l'analisi dell'energia annua necessaria per il riscaldamento e il raffrescamento dei vari test-case, i cui risultati sono riportati nelle tabelle 4.6-7 e nelle figure 4.7-8. Il codice utilizzato passa il test di controllo, infatti i risultati rientrano nel range dei BESTEST o se ne discostano per meno del 10%. In particolare si può notare che i valori di riscaldamento annuale si attestano intorno al valor medio tra i minimi e i massimi dei BESTEST. I valori di raffrescamento ottenuti con TRNSYS si trovano invece nella parte bassa del range, con qualche leggera escursione al di sotto di essa, comunque inferiore al limite del 10% imposto. Tale risultato è maggiormente evidente per i test del gruppo 9xx, corrispondente ai casi con muratura pesante.

Tabelle 4.6-4.7 - Fabbisogno annuo di energia per il riscaldamento e raffrescamento.

RISCALDAMENTO ANNUALE TEST CASE #	BESTEST RANGE			TRNSYS		
	MIN [MWh]	MAX [MWh]	RANGE AVERAGE	Risultati [MWh]	fuori range	PASSA TEST
600	4.296	5.709	5.090	5.070	0.00%	SI
620	4.613	5.944	5.407	5.281	0.00%	SI
640	2.751	3.803	3.207	3.280	0.00%	SI
650	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00%	SI
900	1.170	2.041	1.745	1.683	0.00%	SI
920	3.313	4.300	3.973	3.944	0.00%	SI
940	0.793	1.411	1.160	1.123	0.00%	SI
950	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00%	SI
960	2.311	3.373	2.846	2.909	0.00%	SI
195	4.167	5.871	4.999	5.318	0.00%	SI

RAFFRESCAMENTO ANNUALE TEST CASE #	BESTEST RANGE			TRNSYS		
	MIN [MWh]	MAX [MWh]	RANGE AVERAGE	Risultati [MWh]	fuori range	PASSA TEST
600	6.137	7.964	6.832	6.148	0.00%	SI
620	3.417	5.004	4.218	3.652	0.00%	SI
640	5.952	7.811	6.592	5.938	0.24%	SI
650	4.816	6.545	5.482	4.820	0.00%	SI
900	2.132	3.415	2.678	2.016	5.44%	SI
920	1.840	3.092	2.552	2.134	0.00%	SI
940	2.079	3.241	2.578	1.928	7.26%	SI
950	0.387	0.921	0.605	0.375	3.10%	SI
960	0.411	0.803	0.618	0.432	0.00%	SI
195	0.264	0.510	0.436	0.332	0.00%	SI

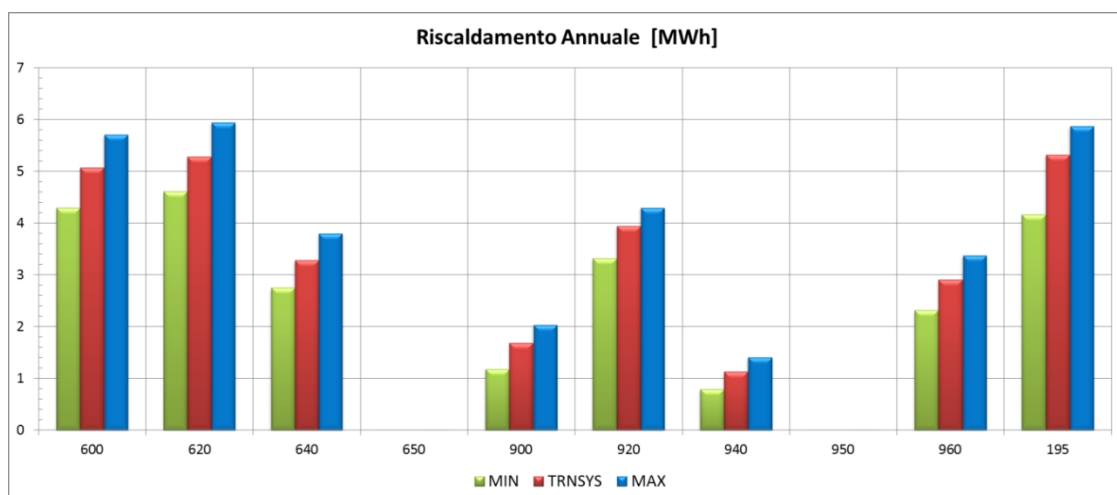


Figura 4.7 - Fabbisogno annuo di energia per il riscaldamento.

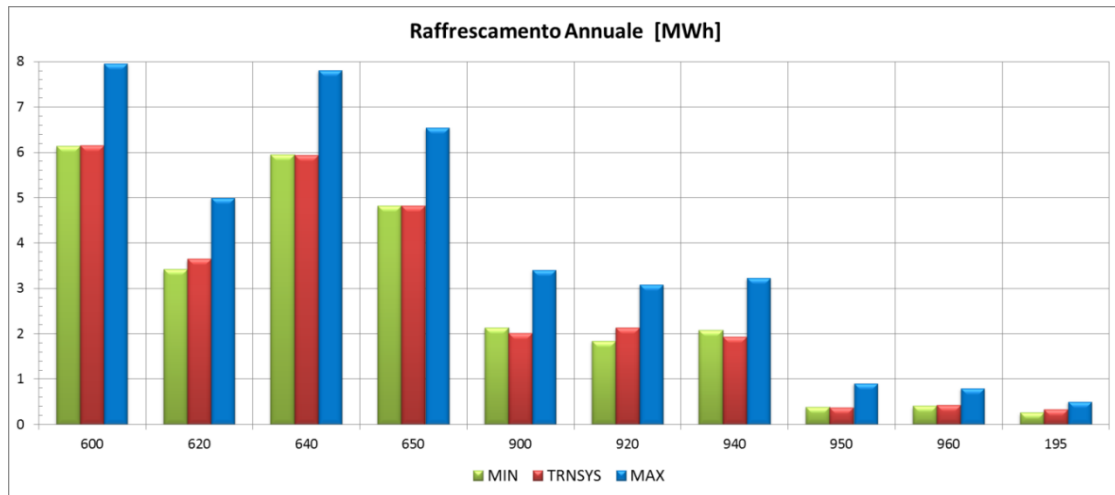


Figura 4.8 - Fabbisogno annuo di energia per il raffrescamento.

Veniamo ora all’analisi delle potenze di picco registrate nei vari casi esaminati, i cui risultati sono esposti nelle figure e tabelle seguenti. Dall’analisi dei risultati si può evidenziare come i carichi di picco, sia in riscaldamento sia in raffrescamento, si mantengono all’interno dell’intervallo dei BESTEST, con valori molto prossimi a quelli medi riportati nelle tabelle 4.8-9.

Tabella 4.8 – 4.9 - Picchi annuali di potenza registrati per il riscaldamento e il raffrescamento.

CARICO DI PICCO ORARIO PER RISCALDAMENTO TEST CASE #	BESTEST RANGE			TRNSYS		
	MIN [kW]	MAX [kW]	RANGE	Risultati [kW]	fuori range	PASSA TEST
			AVERAGE			
600	3.437	4.354	4.039	3.880	0.00%	SI
620	3.591	4.379	4.092	3.870	0.00%	SI
640	5.232	8.078	6.287	6.038	0.00%	SI
650	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00%	SI
900	2.850	4.081	3.578	3.414	0.00%	SI
920	3.308	4.156	3.848	3.624	0.00%	SI
940	3.980	9.923	6.047	5.373	0.00%	SI
950	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00%	SI
960	2.410	2.896	2.725	2.717	0.00%	SI
195	2.004	2.385	2.225	2.272	0.00%	SI

CARICO DI PICCO ORARIO PER RAFFRESCAMENTO TEST CASE #	BESTEST RANGE			TRNSYS		
	MIN [kW]	MAX [kW]	RANGE	Risultati [kW]	fuori range	PASSA TEST
			AVERAGE			
600	5.965	7.551	6.597	6.101	0.00%	SI
620	3.634	5.096	4.420	3.933	0.00%	SI
640	5.892	7.537	6.551	6.063	0.00%	SI
650	5.831	7.458	6.463	5.967	0.00%	SI
900	2.888	4.901	3.579	3.101	0.00%	SI
920	2.385	3.777	3.165	2.735	0.00%	SI
940	2.888	4.901	3.579	3.101	0.00%	SI
950	2.033	3.848	2.821	2.325	0.00%	SI
960	0.953	1.403	1.224	1.003	0.00%	SI
195	0.616	0.853	0.754	0.658	0.00%	SI

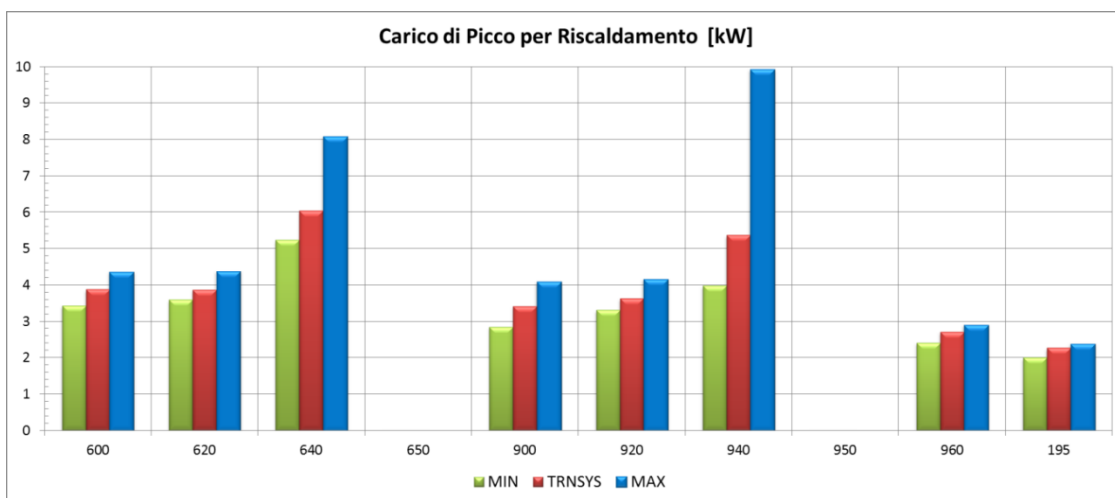


Figura 4.9 - Picchi annuali di potenza registrati per il riscaldamento.

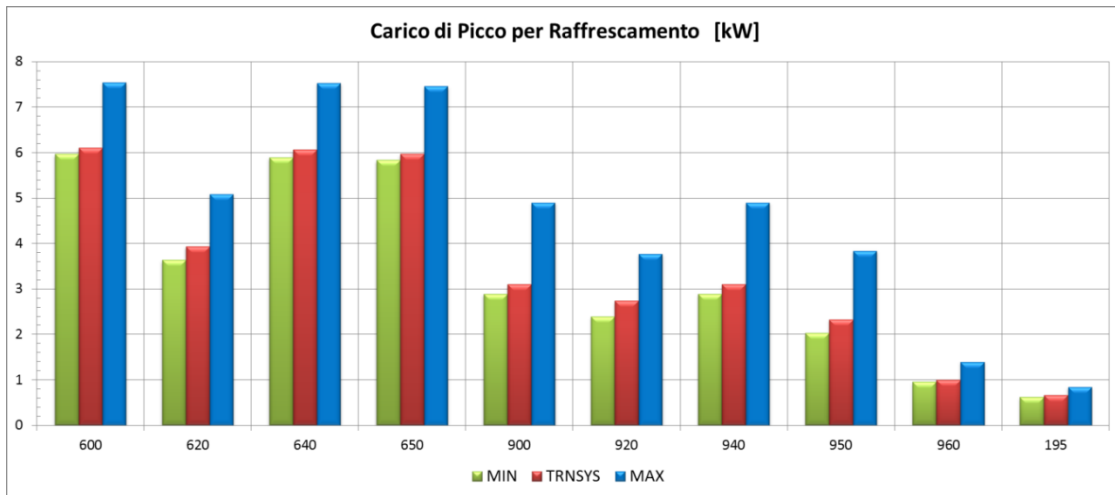


Figura 4.10 - Picchi annuali di potenza registrati per il raffrescamento.

Concentriamo la nostra attenzione sulle temperature rilevate all'interno della zona termica per i casi Free Float, ovvero i casi che non prevedono un controllo della temperatura interna. Saranno riportati i valori minimi, massimi e medi orari per i valori di temperatura registrati per i test case in esame. Anche per questa serie di dati si riscontra un buon accordo con i valori ottenuti dai BESTST, le differenze riscontrate sono inferiori del 2% rispetto al range di controllo, che in valore assoluto corrispondono a una differenza di circa 0.1-0.7 °C.

Tabella 4.10 - Temperature Massime, Minime e Medie Annuali registrate nei test-case Free-Float.

TEMPERATURA ORARIA MASSIMA DI ZONA TEST CASE #	BESTEST RANGE			TRNSYS		
	MIN [°C]	MAX [°C]	RANGE	Risultati [°C]	fuori range	PASSA TEST
	AVERAGE					
600FF	64.90	69.81	66.67	64.51	0.60%	SI
900FF	41.81	44.80	43.10	41.04	1.85%	SI
650FF	63.24	68.49	65.15	63.25	0.00%	SI
950FF	35.54	38.50	36.40	35.11	1.21%	SI

TEMPERATURA ORARIA MINIMA DI ZONA TEST CASE #	BESTEST RANGE			TRNSYS		
	MIN [°C]	MAX [°C]	RANGE	Risultati [°C]	fuori range	PASSA TEST
	AVERAGE					
600FF	-18.80	-9.96	-16.68	-19.10	1.60%	SI
900FF	-6.38	-1.65	-4.19	-3.85	0.00%	SI
650FF	-23.00	-9.97	-21.09	-23.18	0.78%	SI
950FF	-20.20	-9.83	-18.39	-19.90	0.00%	SI

TEMPERATURA ORARIA MEDIA DI ZONA TEST CASE #	BESTEST RANGE			TRNSYS		
	MIN [°C]	MAX [°C]	RANGE	Risultati [°C]	fuori range	PASSA TEST
	AVERAGE					
600FF	24.22	25.93	25.06	24.26	0.00%	SI
900FF	24.45	25.93	25.18	24.36	0.37%	SI
650FF	17.99	19.62	18.67	17.93	0.33%	SI
950FF	14.00	14.97	14.39	13.92	0.57%	SI

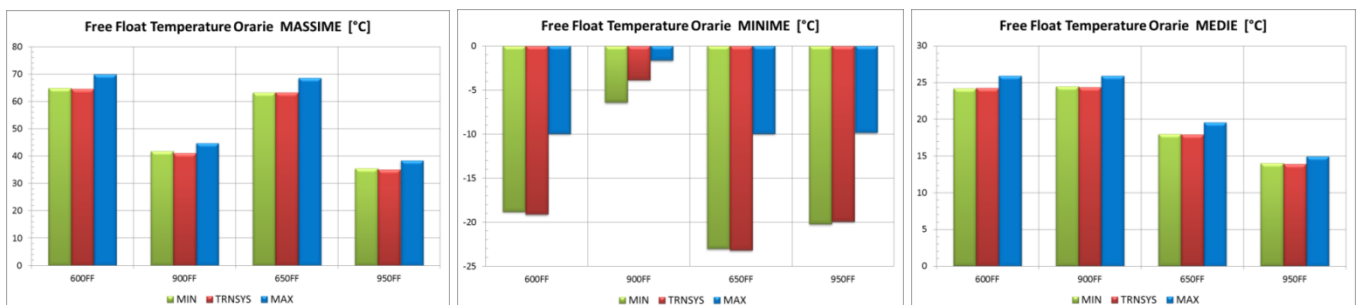


Figura 4.11 - Temperature Massime, Minime e Medie Annuali registrate nei test-case Free-Float.

Proseguiamo la presentazione dei risultati con l'analisi delle temperature medie orarie dei casi Free-Float. Nei grafici seguenti sono riportati i valori di temperatura all'interno dell'edificio per diversi test-case in differenti giorni dell'anno. Nelle figure 4.12-13 compaiono i casi 600FF e 900FF relativi al 4 Gennaio. Nelle figure 4.14-15 sono invece presentati i casi 650FF e 950FF con riferimento alla giornata del 27 Luglio.

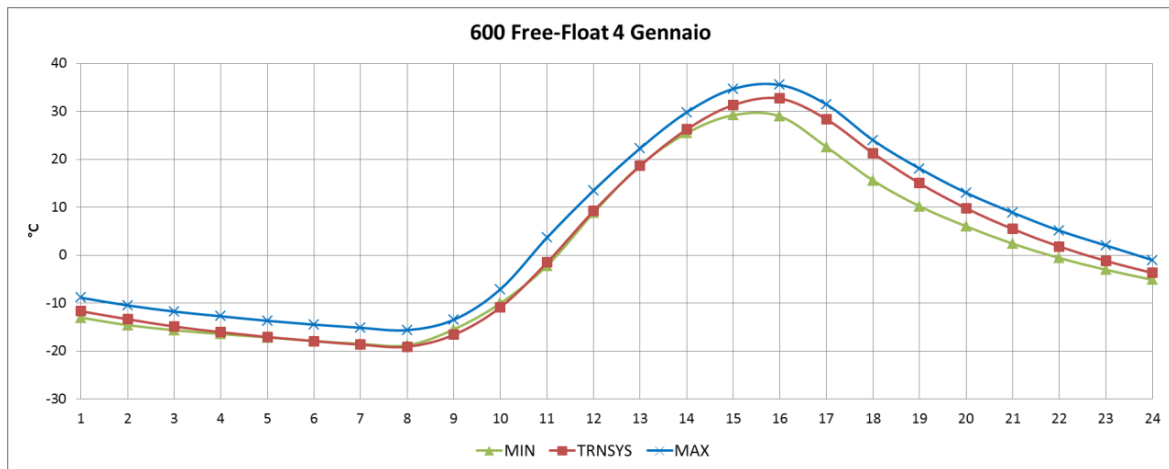


Figura 4.12 - Temperature interne all'edificio al 4 Gennaio per il test-case 600FF.

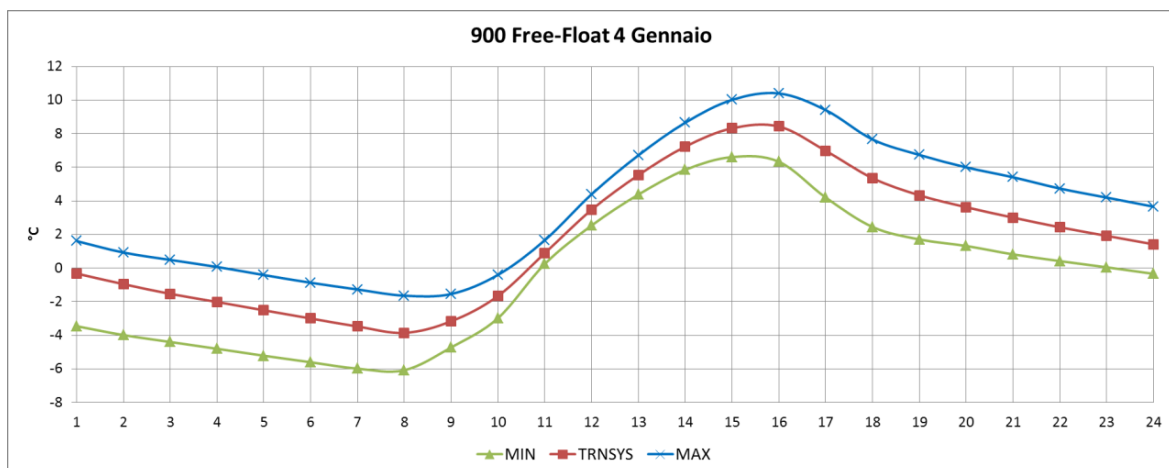


Figura 4.13 - Temperature interne all'edificio al 4 Gennaio per il test-case 900FF.

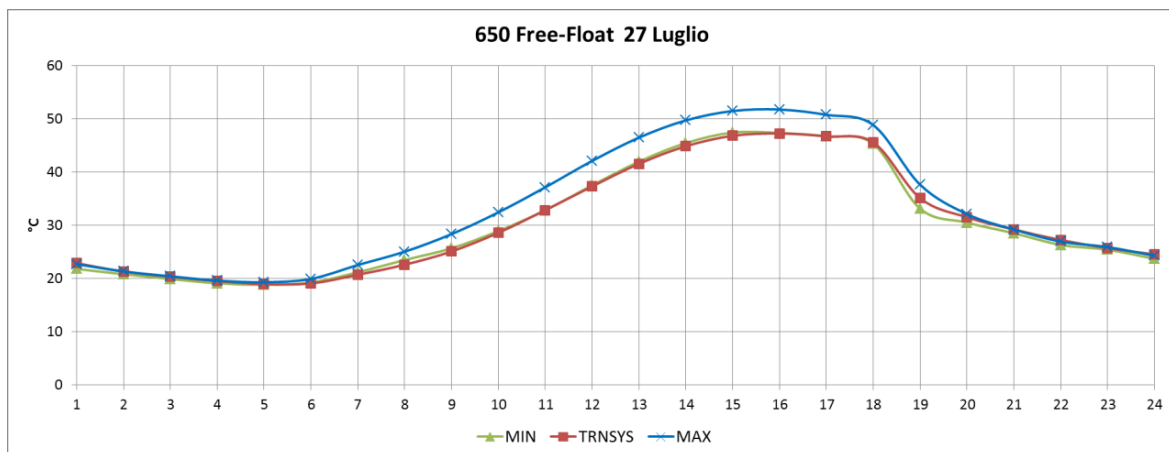
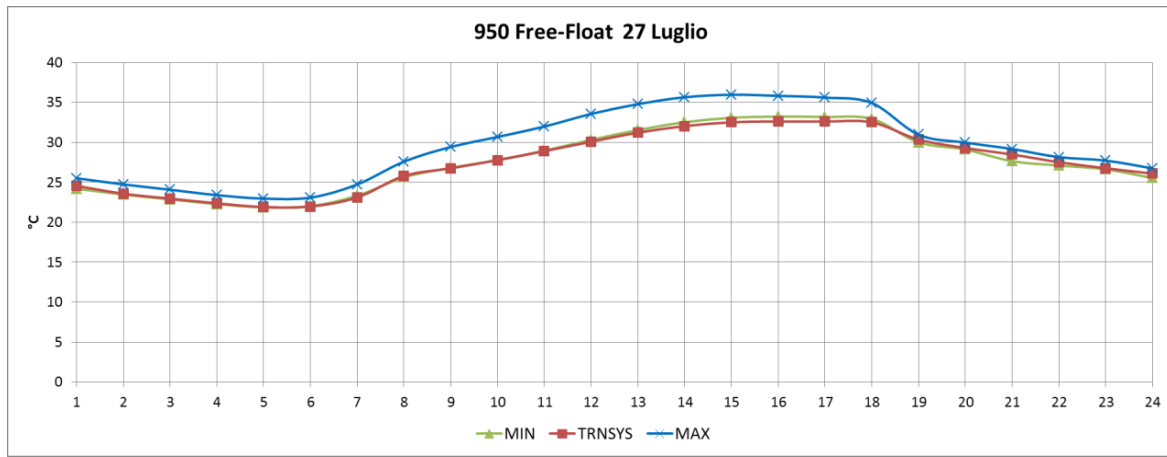
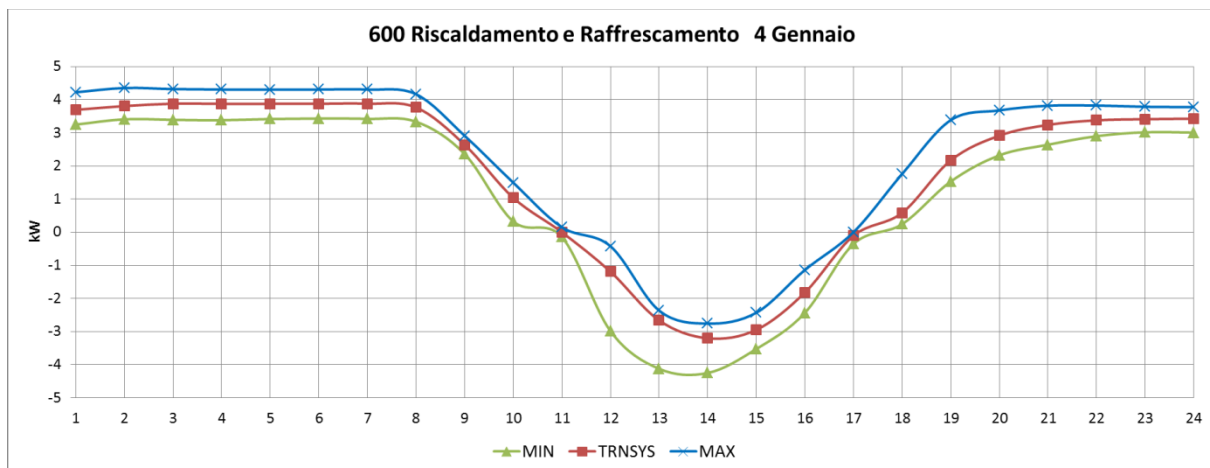


Figura 4.14 - Temperature interne all'edificio al 27 Luglio per il test-case 650FF.

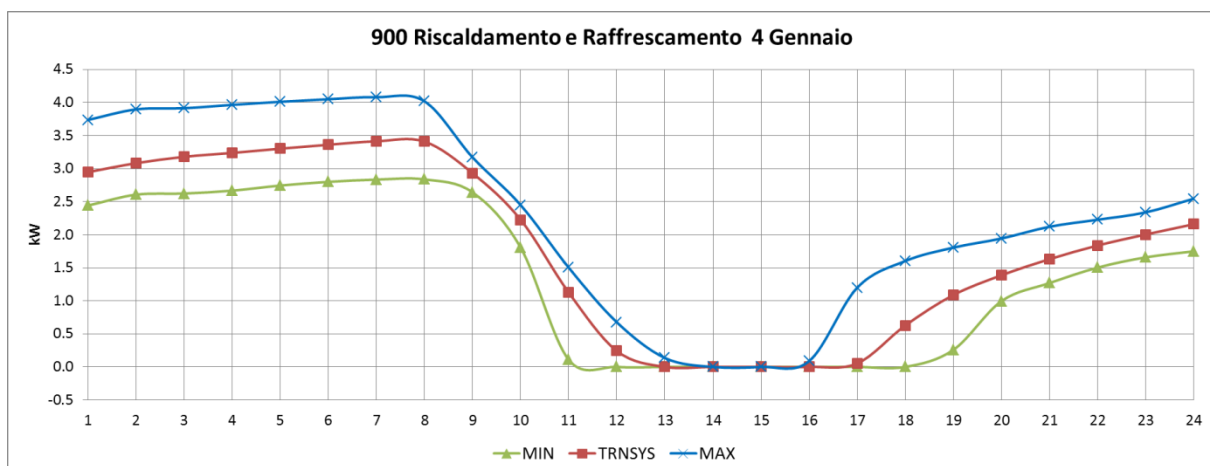


**Figura 4.15 - Temperature interne all'edificio al 27 Luglio per il test-case 950FF.**

Il codice presenta dei risultati che stanno spesso all'interno del range dei BESTEST, con qualche sporadica deviazione contenuta nel limite del 10% imposto. Il valor medio di questa deviazione è intorno all'1-2% che in termini assoluti corrisponde a meno di 1°C. Analizzando le figure 4.12-4.14-4.15 si può notare come i valori ottenuti da Trnsys si attestano nella parte bassa del range, ciò non avviene per il caso 900FF i cui risultati si collocano grosso modo in una posizione intermedia, e questo fatto si verifica soprattutto nel periodo estivo (figure 4.14-4.15). Questa è la causa della minore richiesta di energia frigorifera che si registra nella tabella 4.7 e nella figura 4.8.



**Figura 4.16 - Energia termica e frigorifera consumata il 4 Gennaio nel test-case 600.**



**Figura 4.17 - Energia termica e frigorifera consumata il 4 Gennaio nel test-case 900.**

Terminiamo la validazione di TRNSYS mostrando l'andamento orario della potenza termica necessaria per il riscaldamento (indicata con il segno +) e il raffrescamento (indicata con il segno -) dell'edificio presente nei test-case 600 e 900, riguardo al giorno 4 Gennaio (figure 4.16-4.17). I valori da noi ottenuti, disegnati in linea rossa, sono sempre contenuti dentro l'intervallo calcolato dai BESTEST, linee blu e verdi, mostrando un buon comportamento del codice nel simulare il modello test.

Considerando tutti i risultati ottenuti finora, è possibile affermare che le operazioni di validazione e calibrazione, effettuate sui casi test ASHRAE/BESTEST, hanno dato un esito positivo, mostrando le buone capacità del codice TRNSYS di modellare correttamente il problema fisico assegnato.

#### 4.1.2.2 UNI 15265

In questo paragrafo esamineremo il comportamento del codice Trnsys nel simulare i test case tratti dalla norma UNI 15265. Questi test sono indicati con numerazione progressiva da 1 a 12; uno di questi test, il numero 6, è stato utilizzato anche dalla UNI 13790 per testare il comportamento dei codici che eseguono sia il calcolo stazionario che quello orario semplificato. La stessa norma UNI 13790 riporta i risultati ottenuti che sono presi come riferimento per la validazione di tutti quei codici che la applicano o per le sue emanazioni nazionali, per l'Italia si tratta delle UNI-TS 11300. In questa fase del lavoro si vuole verificare quale sia la corrispondenza tra i valori ottenuti con Trnsys e quelli presi come riferimento dalle normative europee [20] [21].

#### DESCRIZIONE EDIFICIO TEST ANALIZZATO

Il test prende in considerazione la stanza di un edificio che ha le seguenti dimensioni: lunghezza = 3.6 m; profondità = 5.5 m; altezza = 2.8 m. Il tetto, il pavimento e tre delle quattro pareti che compongono la stanza sono adiacenti ad un ambiente avente la stessa temperatura e con la quale gli scambi termici sono nulli (pareti adiabatiche). Soltanto per i test dal N° 9 al 12 il tetto è esposto verso l'esterno ed è quindi investito dalla radiazione solare e non si comporta in maniera adiabatica. Per tutti i test esiste una sola parete che si affaccia verso l'esterno, precisamente verso ovest, essa ha una superficie totale di 10.08 m<sup>2</sup> e vi è ricavata una finestra di 7 m<sup>2</sup>. Tutti gli eventuali ponti termici presenti nella struttura devono essere trascurati.

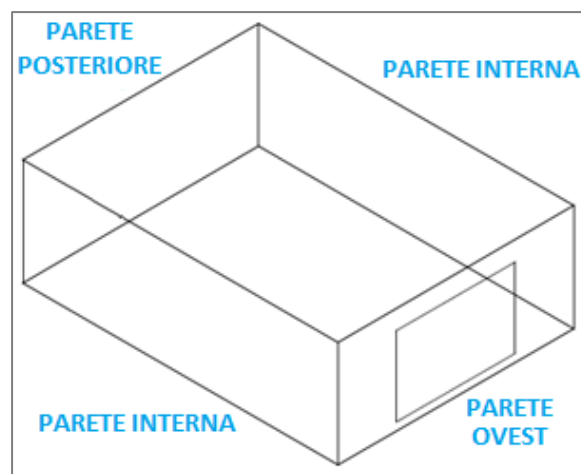


Figura 4.18 - Edificio utilizzato nei test case.

I materiali costituenti i muri hanno sono descritti nella seguente tabella (tabella 4.11). Il valore di assorbività della radiazione è pari a 0.6 per le pareti e 0.9 per il tetto. Per la trasmittanza di tutte le superfici si è considerato il valore di 0.9; tale valore porta ad avere dei coefficienti di scambio termico radiante pari a: 5.5 W/(m<sup>2</sup>K), valido sia per pareti interne che esterne.

Tabella 4.11 - Materiali costituenti le superfici opache.

SUPERFICI OPACHE DEI TEST TRATTI DALLA UNI 15265				
ELEMENTO (dall'esterno verso l'interno)	Spessore [m]	k [W/mK]	Densità [kg/m <sup>3</sup> ]	Cp [J/kgK]
<b>MURO ESTERNO: TIPOLOGIA 1</b>				
<b>Outer layer</b>	0.115	0.99	1800	850
<b>Insulating layer</b>	0.06	0.04	30	850

Masonry	0.175	0.79	1600	850
Internal plastering	0.015	0.70	1400	850
<b>MURO INTERNO: TIPOLOGIA 2</b>				
Gypsum plaster	0.012	0.21	900	850
Mineral wool	0.1	0.04	30	850
Gypsum plaster	0.012	0.21	900	850
<b>SOFFITTO: TIPOLOGIA 3C</b>				
Plastic covering	0.004	0.23	1500	1500
Cement floor	0.06	1.40	2000	850
Mineral wool	0.04	0.04	50	850
Concrete	0.18	2.10	2400	850
<b>PAVIMENTO: TIPOLOGIA 3F</b>				
Concrete	0.18	2.10	2400	850
Mineral wool	0.04	0.04	50	850
Cement floor	0.06	1.40	2000	850
Plastic covering	0.004	0.23	1500	1500
<b>SOFFITTO: TIPOLOGIA 4C</b>				
Plastic covering	0.004	0.23	1500	1500
Cement floor	0.06	1.40	2000	850
Mineral wool	0.04	0.04	50	850
Concrete	0.18	2.10	2400	850
Mineral wool	0.10	0.04	50	850
Acoustic board	0.02	0.06	400	840
<b>PAVIMENTO: TIPOLOGIA 4F</b>				
Acoustic board	0.02	0.06	400	840
Mineral wool	0.10	0.04	50	850
Concrete	0.18	2.10	2400	850
Mineral wool	0.04	0.04	50	850
Cement floor	0.06	1.40	2000	850
Plastic covering	0.004	0.23	1500	1500
<b>SOFFITTO: TIPOLOGIA 5</b>				
Rain protection	0.004	0.23	1500	1300
Insulating	0.04	0.04	50	850
Concrete	0.18	2.10	2400	850

✓ **FINESTRE**

Nei test-case si utilizzano due tipologie di finestre, la prima (SHADED DP) è provvista di un sistema di ombreggiamento, la seconda (DP) no. Entrambe le finestre sono costituite da un doppio vetro. I valori di resistenza termica e le caratteristiche globali delle due tipologie di finestre sono indicati nella tabella 4.12:

**Tabella 4.12 - Caratteristiche delle superfici vetrate.**

CARATTERISTICHE FINESTRA: SHADED DP							
Superficie	N° Vetri	Rse	Rec	Ric	Rsi	g	Ug
7 m <sup>2</sup>	2	0.0435 m <sup>2</sup> K/W	0.08 m <sup>2</sup> K/W	0.173 m <sup>2</sup> K/W	0.125 m <sup>2</sup> K/W	0.2	2.37 W/(m <sup>2</sup> K)

CARATTERISTICHE FINESTRA: DP						
Superficie	N° Vetri	Rse	Ric	Rsi	g	Ug
7 m <sup>2</sup>	2	0.0435 m <sup>2</sup> K/W	0.173 m <sup>2</sup> K/W	0.125 m <sup>2</sup> K/W	0.77	2.93 W/(m <sup>2</sup> K)

DATI DI INPUT

Per completare la costruzione dei modelli da utilizzare nelle simulazioni è necessario definire le seguenti grandezze in ingresso:

✓ FILE DATI METEO

Il file di dati meteorologici utilizzato nei codici di calcolo è stato ricavato dal software Meteonorm sulla base delle indicazioni fornite della norma UNI 15265. La località di riferimento è la cittadina di Trappes, situata vicino a Parigi. Il file meteo di partenza non prende in considerazione l'ora solare bensì quella legale. I principali parametri del sito sono riepilogati nella seguente tabella:

**Tabella 4.13 - Riepilogo di alcuni dati meteorologici utilizzati (Parigi).**

Latitudine	Longitudine	Altitudine	Temperatura minima annuale	Temperatura massima annuale	Temperatura media annuale
49° Nord	2° Ovest	159 m	-6.50 °C	33.25 °C	11.41 °C

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

✓ INFILTRAZIONI e VENTILAZIONE

Le infiltrazioni di aria esterna sono pari a 0 volumi/ora e tale valore è da considerarsi costante per tutto l'anno. I ricambi d'aria, effettuati con sola aria esterna sono pari a 1 volumi/ora. La ventilazione è presente soltanto nei giorni feriali, dalle 8:00 alle 18:00.

✓ APPORTI INTERNI GRATUITI

Gli apporti interni gratuiti sono pari a 20 W/m<sup>2</sup>, sono composti soltanto da calore sensibile suddiviso nelle seguenti componenti: 0% radiativo; 100% convettivo. Tali apporti sono presenti soltanto nei giorni feriali dalle 8:00 alle 18:00. Gli apporti interni gratuiti sono presenti in tutti i test case, ad eccezione dei numeri 3-7-11.

✓ COEFFICIENTI DI SCAMBIO TERMICO CONVETTIVO ESTERNI E INTERNI

I coefficienti di scambio termico convettivo delle superfici opache e trasparenti sono i seguenti: 2.5 W/m<sup>2</sup>K per le superfici interne; 17.5 W/m<sup>2</sup>K per le superfici esterne

✓ DISTRIBUZIONE IRRADIAZIONE SOLARE INTERNA

La distribuzione di energia solare, passante attraverso le superfici vetrate verso l'interno dell'ambiente, è così definita: 23.7% colpisce il pavimento; 23.7% va verso il soffitto; la parete ovest assorbe il 3.7%; alle restanti pareti arriva il 48.9%.

✓ SISTEMA DI VENTILAZIONE MECCANICA – SET UP TERMOSTATI

I sistemi di riscaldamento e raffrescamento utilizzati considerano soltanto il calore sensibile, trascurando completamente quello latente. Inoltre per quanto riguarda il riscaldamento si assume che il sistema funzioni soltanto ad aria, portando a uno scambio termico che è al 100% di tipo convettivo e 0% radiante. La potenza dei sistemi di riscaldamento e raffrescamento è infinita, con efficienza degli impianti pari al 100%. Le temperature di set-point impostate sono le seguenti: per il riscaldamento si utilizzano 20°C; per il raffrescamento 26°C; entrambi senza banda morta. A seconda dei test si utilizza un diverso tempo di accensione degli impianti. I test dall'1 al 4 utilizzano l'impianto acceso in continuazione per tutti i giorni della settimana. Nei test dal 5 al 12 il riscaldamento e il raffrescamento sono impostati per funzionare dal Lunedì al Venerdì, dalle 8:00 alle 18:00.

DESCRIZIONE DEI TEST CASE

Procediamo con la descrizione dei vari test case. I primi 4 test non sono considerati obbligatori dalla UNI 15265 ma servono soltanto per verificare le basiche operazioni di modellazione, i test di validazione veri e propri, utilizzati per definire le caratteristiche di qualità dei codici dinamici, sono quelli numerati dal 5 al 12. Il test N°1 rappresenta il caso di riferimento su cui costruire tutta la sequenza di test successivi. Le sue caratteristiche in termini di:



geometria; apporti interni; ventilazione; infiltrazioni, sono state descritte in precedenza. Le differenze tra i vari tipi di test sono riepilogate nella tabella 4.14.

**Tabella 4.14 - Differenza tra i test case UNI 15265.**

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

## RISULTATI SIMULAZIONI

I dati di output dei codici dovranno essere elaborati in modo da ottenere i consumi mensili e annuali per riscaldamento ( $Q_H$ ) e raffrescamento ( $Q_C$ ). I consumi annuali saranno confrontati con i valori di riferimento riportati nella UNI 15265 ( $Q_{H,ref}$  e  $Q_{C,ref}$ ). Tale confronto prevede il calcolo dei parametri  $rQ_H$  e  $rQ_C$  che serviranno per classificare i risultati ottenuti secondo un livello di accuratezza decrescente (A-B-C). I valori  $rQ_H$  e  $rQ_C$  si calcolano con le seguenti relazioni:

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

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

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

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

$$\text{Level A : } rQ_H \leq 0.05 \quad \text{and} \quad rQ_C \leq 0.05$$

$$\text{Level B : } rQ_H \leq 0.10 \quad \text{and} \quad rQ_C \leq 0.10$$

$$\text{Level C : } rQ_H \leq 0.15 \quad \text{and} \quad rQ_C \leq 0.15$$

I risultati ottenuti sono riportati nella tabella 4.15. Per i test di controllo (6-12) si registra un livello di accuratezza di tipo A e B. Considerando il valor medio di  $rQ_H$  e  $rQ_C$  per tutti i casi esaminati (1-12) si ottiene un valore di deviazione globale, considerando la somma di riscaldamento e raffrescamento, di circa il 5%. Analizzandoli separatamente si ricava che per il riscaldamento il valore di scostamento è del 6%, per il raffrescamento invece ci attestiamo intorno al 4%.

Tabella 4.15 - Risultati ottenuti con TRNSYS e confronto con i valori di riferimento della UNI 15265.

Test	RIFERIMENTO UNI 15265			TRNSYS					
	Qh,ref	Qc,ref	Qtot,ref	QHEAT	QCOOL	rQh	rQc	Level	Media
N°1	748	234	982	902	280	15.68%	4.74%	C-D	10.2%
N°2	723	201	923	872	239	16.13%	4.13%	C-D	10.1%
N°3	1369	43	1412	1496	59	9.05%	1.13%	B	5.1%
N°4	567	1531	2098	717	1485	7.14%	2.19%	B	4.7%
N°5	463	202	665	481	243	2.75%	6.23%	B	4.5%
N°6	510	185	695	551	222	5.96%	5.31%	B	5.6%
N°7	1067	20	1087	1062	29	0.46%	0.86%	A	0.7%
N°8	313	1133	1446	355	1102	2.91%	2.17%	A	2.5%
N°9	747	158	905	716	239	3.44%	8.91%	B	6.2%
N°10	574	192	767	565	257	1.23%	8.37%	B	4.8%
N°11	1395	14	1409	1321	31	5.27%	1.20%	B	3.2%
N°12	534	928	1462	545	968	0.76%	2.73%	A	1.7%
	<i>kWh</i>	<i>kWh</i>	<i>kWh</i>	<i>kWh</i>	<i>kWh</i>	<b>5.90%</b>	<b>4.00%</b>		<b>4.95%</b>

Nelle figure 4.19 e 4.20 è apprezzabile la buona corrispondenza tra i valori calcolati con TRNSYS e quelli di riferimento riportati in letteratura. In ascisse è riportato il N° del TEST, in ordinate il consumo annuale in kWh.

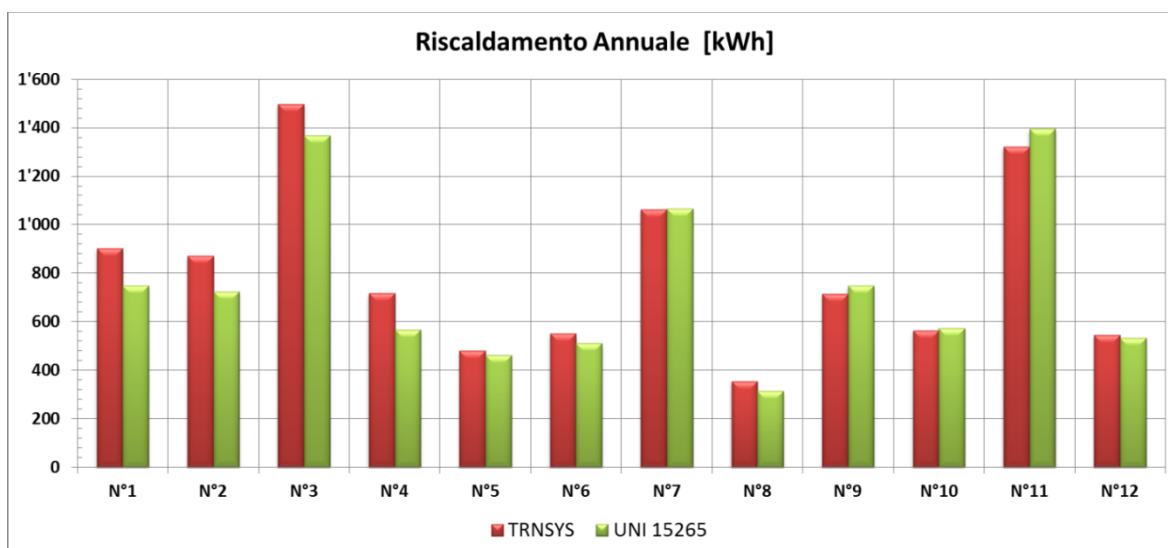


Figura 4.19 - Confronto risultati di Riscaldamento annuo tra TRNSYS e UNI 15265.

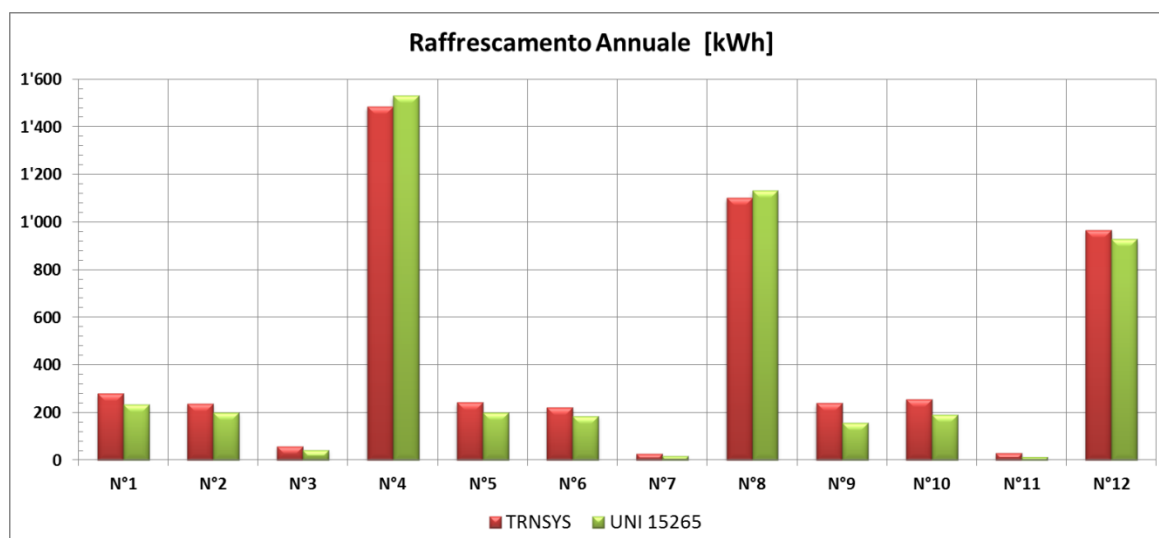


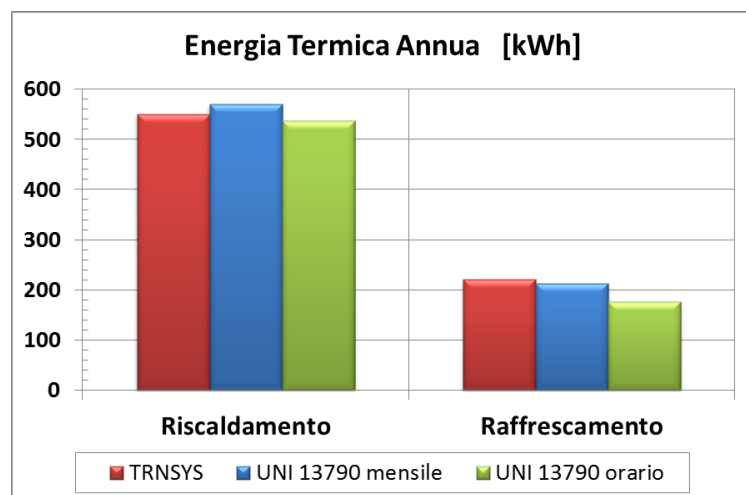
Figura 4.20 - Confronto risultati di Raffrescamento annuo tra TRNSYS e UNI 15265.

Per il test N° 6 è stato eseguito un ulteriore confronto con i risultati riportati nella UNI 13790 e ottenuti con due diverse tecniche di calcolo: metodo stazionario mensile; metodo orario semplificato. Riportiamo i risultati mensili e annuali di riscaldamento e raffrescamento nella tabella 4.16.

**Tabella 4.16 - Risultati mensili ottenuti con TRNSYS e confronto con i valori riportati nella UNI 13790.**

MESE	RISCALDAMENTO [kWh]			RAFFRESCAMENTO [kWh]		
	TRNSYS	UNI 13790 orario	UNI 13790 mensile	TRNSYS	UNI 13790 orario	UNI 13790 mensile
Gennaio	143	137	147	0	0	0
Febbraio	105	91	92	0	0	0
Marzo	52	40	43	0	0	3
Aprile	16	25	28	0	0	3
Maggio	1	0	1	16	5	20
Giugno	0	0	0	44	37	44
Luglio	0	0	0	65	82	77
Agosto	0	0	0	80	44	45
Settembre	0	0	0	18	8	17
Ottobre	10	20	24	0	0	2
Novembre	86	102	104	0	0	0
Dicembre	137	120	132	0	0	0
<b>TOT ANNUO</b>	<b>551</b>	<b>537</b>	<b>571</b>	<b>222</b>	<b>177</b>	<b>213</b>

Nella figura seguente sono presentati i valori di energia termica annuale necessaria per il riscaldamento e il raffrescamento del caso modellato. Nella tabella 4.17 è invece riportata l'analisi delle differenze tra i risultati annuali del calcolo dinamico effettuato con TRNSYS e i risultati del metodo stazionario mensile e orario semplificato, riportati nella UNI 13790.



**Figura 4.21 - Differenze consumi TRNSYS vs. UNI 13790**

Calcolo Differenza Annuale Riscaldamento	
TRNSYS vs UNI orario	2.58%
TRNSYS vs UNI mensile	-3.59%
Calcolo Differenza Annuale Raffrescamento	
TRNSYS vs UNI orario	20.26%
TRNSYS vs UNI mensile	4.04%

**Tabella 4.17 - TRNSYS vs. UNI 13790**

Il calcolo dell'energia termica necessaria per il riscaldamento mostra una sostanziale convergenza tra il metodo dinamico (TRNSYS) e quelli stazionari, la differenza è dell'ordine del 2-4%, con TRNSYS che si pone in posizione intermedia. I valori di raffrescamento maggiori si ottengono con TRNSYS, la differenza tra il metodo dinamico e quello stazionario mensile è del 4%. Il calcolo del raffrescamento mostra una sostanziale sottostima, di circa il 20%, del metodo orario semplificato rispetto sia al calcolo dinamico (TRNSYS) che a quello stazionario mensile.

Completiamo l'analisi analizzando i risultati mensili riportati nelle figure 4.22 e 4.23. I valori mensili di riscaldamento ottenuti con TRNSYS mostrano un sostanziale accordo con quelli di riferimento riportati nella norma UNI 13790. Per il calcolo di raffrescamento le differenze maggiori si riscontrano nei mesi di luglio e agosto. Infatti, entrambi i metodi stazionari identificano il mese di luglio come quello di maggior carico, mentre TRNSYS lo colloca ad agosto. Nei restanti mesi dell'anno i valori dei tre metodi presentano minori discrepanze.

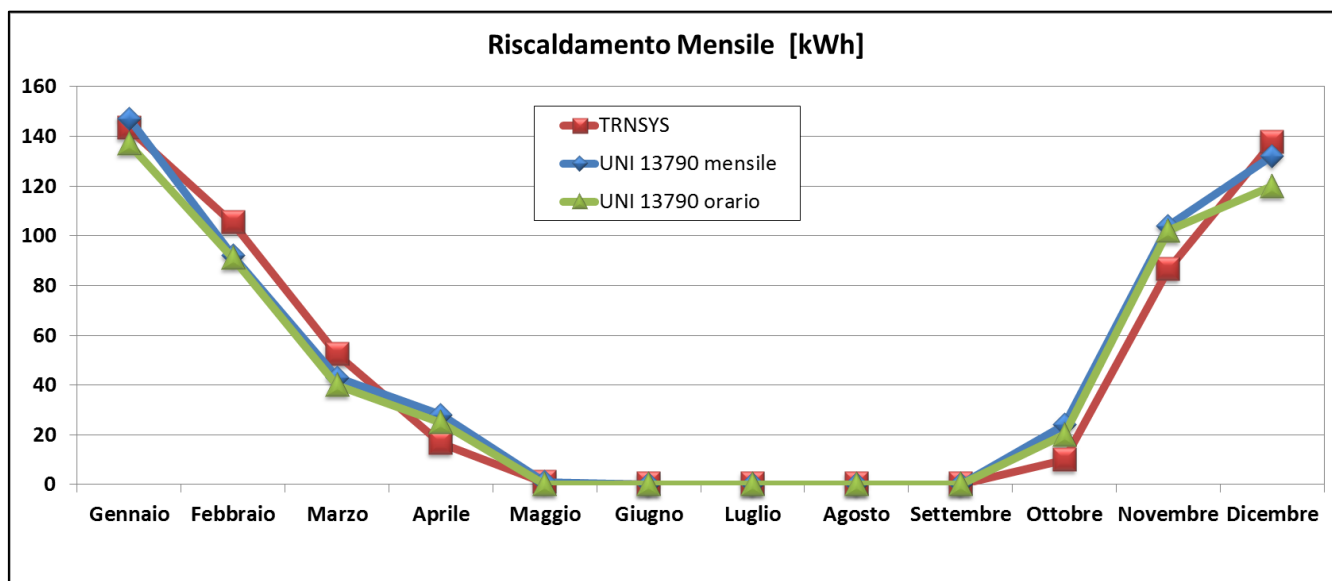


Figura 4.22 - Risultati mensili di TRNSYS e UNI 13790 (RISCALDAMENTO).

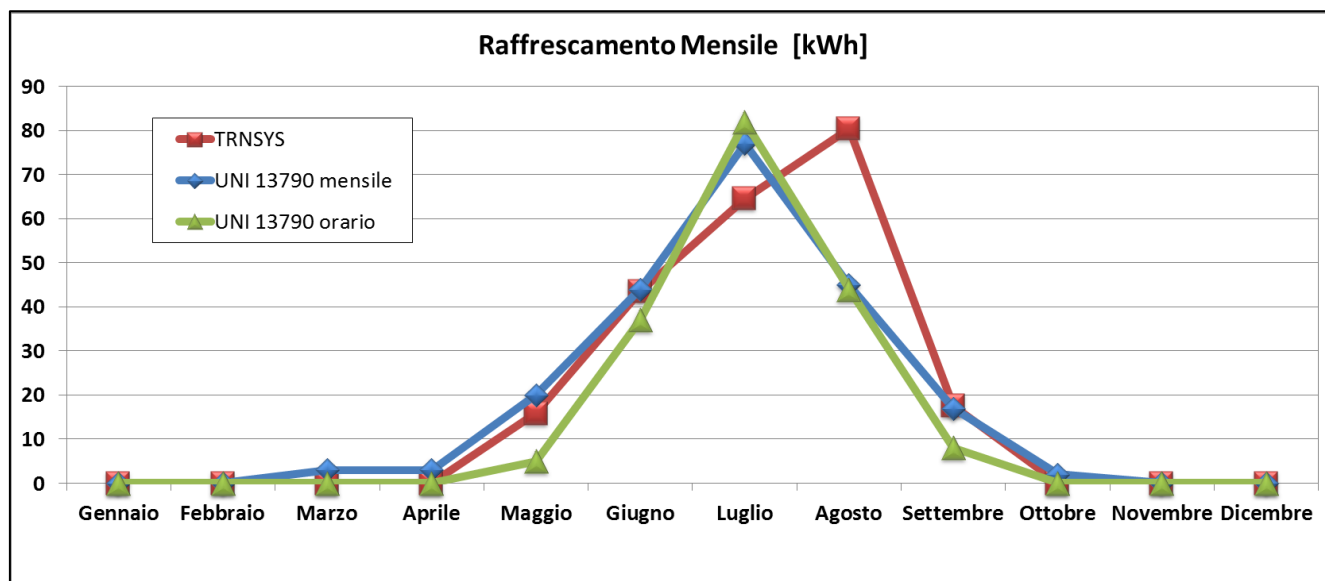


Figura 4.23 - Risultati mensili di TRNSYS e UNI 13790 (RAFFRESCAMENTO).

## 4.2 MODELLAZIONE CORPO CENTRALE AOB

In questo paragrafo sarà descritta la metodologia utilizzata per costruire il modello del corpo centrale dell'AOB da utilizzare nelle simulazioni. Nella prima parte (4.2.1) saranno presentate tutte le operazioni preliminari necessarie per definire il modello termico; nella seconda parte (4.2.2) sarà esposta la procedura con cui tale modello è stato implementato su TRNSYS; infine sarà presentata (4.2.3) una breve trattazione sul modello matematico alla base del codice.

#### 4.2.1 DEFINIZIONE DEL MODELLO

L'operazione di definizione del modello rappresenta lo stadio primario del lavoro di modellizzazione. In questa fase occorre definire cosa si vuole modellare e soprattutto come s'intende farlo, stabilendo il grado di risoluzione geometrica, le approssimazioni e le semplificazioni necessarie per passare dal problema reale al modello fisico e a infine quello numerico. Descriveremo quindi quali sono i dati in ingresso necessari per definire il modello e come sono state individuate le zone termiche che lo compongono.

##### 4.2.1.1 DATI IN INGRESSO

La fase preliminare del lavoro prevede il reperimento di tutti quei dati che consentiranno la corretta definizione geometrica e termofisica delle strutture componenti l'AOB. Sono inoltre necessari i dati climatici della località in cui il complesso ospedaliero è situato. Nello specifico, occorre recuperare le seguenti informazioni:

❖ **PLANIMETRIE AOB e CARATTERISTICHE TERMOFISICHE STRUTTURE**

Attraverso l'analisi delle planimetrie dell'AOB e dei dati forniti dal personale dell'ufficio tecnico, è stato possibile reperire le seguenti informazioni necessarie per costruire le zone termiche: dimensioni degli ambienti (lunghezza, larghezza, altezza, confini con altri ambienti); destinazione d'uso dei locali (tipologia di utilizzo e occupazione dei locali); tipologia e caratteristiche delle strutture opache e trasparenti che lo compongono (vedi Appendice B) e loro posizionamento nella zona termica.

❖ **DATI CLIMATICI**

Poiché la simulazione dinamica dell'AOB è effettuata su base oraria, è necessario avere a disposizione i dati climatici delle località di riferimento sotto forma oraria. Si è deciso, perciò, di utilizzare il software METONORM [22] che, grazie alla sua completa banca dati, consente di ottenere i dati meteorologici orari di qualunque località terrestre. Ciò avviene interpolando i dati delle prime 3-4 stazioni vicine alla località di riferimento, individuata univocamente attraverso l'inserimento delle coordinate geografiche quali latitudine e longitudine. I dati climatici utilizzati nella simulazione in TRNSYS sono: irradiazione diretta e diffusa su superficie orizzontale; temperatura di bulbo secco; umidità relativa; velocità del vento.

**Tabella 4.18 - Riepilogo di alcuni dati meteorologici caratteristici di Cagliari.**

Latitudine	Longitudine	Altitudine	Temperatura minima annuale	Temperatura massima annuale	Temperatura media annuale
39.1° Nord	9°7 Est	23 m	1.25 °C	36.90 °C	17.28 °C

Irradiazione globale annuale (orizzontale)	Irradiazione normale annuale	Irradiazione diretta annuale (orizzontale)	Irradiazione diffusa annuale (orizzontale)
1662 kWh/m <sup>2</sup>	1752 kWh/m <sup>2</sup>	1011 kWh/m <sup>2</sup>	651 kWh/m <sup>2</sup>

La località in cui è situata l'Azienda Ospedaliera Brotzu è la città di Cagliari (Latitudine: 39.22°; Longitudine: 9.13°; Altezza sul livello del mare: 17 m). Per la temperatura è stata utilizzata la banca dati di Meteonorm relativa agli anni 1996-2005; per l'irradiazione solare si considera invece il periodo 1981-2000. Il file contenente i dati orari, relativi a un intero anno solare, viene calcolato dal software interpolando i valori ottenuti dalle seguenti stazioni meteorologiche: Cagliari-Elmas (8 km); Decimomannu (21 km); Capo Frasca (82 km); Capo Bellavista (93 km); Alghero (173 km). I numeri indicati tra parentesi indicano la distanza tra l'AOB e le stazioni meteo indicate.

Tabella 4.19 - Dati climatici medi mensili di Cagliari.

DATI METEOROLOGICI DI CAGLIARI [VALORI MEDI MENSILI]				
MESI	Temperatura b.s.	Umidità Relativa	Velocità Vento	Irradiazione Globale Piano Orizzontale
gennaio	9.8	82.0	3.4	7.7
febbraio	9.9	77.0	3.9	10.5
marzo	12.3	74.0	4.0	15.6
aprile	14.4	72.0	4.4	18.8
maggio	18.9	68.0	4.3	22.9
giugno	23.4	61.0	4.4	26.3
luglio	25.6	60.0	4.9	25.9
agosto	26.3	64.0	4.2	22.6
settembre	22.4	69.0	3.8	18.2
ottobre	19.4	75.0	3.5	12.7
novembre	14.2	79.0	3.3	8.4
dicembre	10.9	81.0	3.4	6.8
Unità di Misura	°C	%	m/s	MJ/(m <sup>2</sup> g)
<b>Media Annuale</b>	<b>17.3</b>	<b>71.8</b>	<b>4.0</b>	<b>16.4</b>

#### 4.2.1.2 INDIVIDUAZIONE ZONE TERMICHE

L'unità di simulazione utilizzata da TRNSYS nel modellare un edificio è la zona termica, cioè uno o più ambienti che hanno in comune i valori delle grandezze termoigrometriche, conseguenza di una simile destinazione d'uso del locale. Per questo motivo occorre stabilire a priori una strategia che consenta di identificare in maniera univoca la categoria di utilizzo di ogni ambiente costituente l'ospedale, tenendo conto delle prescrizioni normative [6] e apportando le opportune semplificazioni che consentano di ottenere il giusto compromesso tra la risoluzione-accuratezza del modello e i tempi di calcolo, entrambi correlati al numero di zone termiche da simulare.

Le grandezze termoigrometriche che caratterizzano le varie tipologie di zone termiche sono:

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

I valori di tali grandezze per le varie destinazioni d'uso dei locali, che compongono le strutture ospedaliere, sono riportati nel D.P.R del 14 gennaio 1997 [6]. È importante notare che non è stata definita una temperatura invernale o estiva di progetto, così come succede per gli usi civili abitativi, ma dei valori di temperatura minima e massima in modo da limitare l'intervallo entro cui devono variare questi parametri nelle varie zone. Questo è dovuto alle particolari esigenze degli ospedali, che devono garantire ai pazienti lo stesso comfort, con le stesse caratteristiche di benessere ambientale, per tutto l'anno.

Dalle planimetrie dell'ospedale è possibile stabilire la destinazione d'uso dei vari locali. Applicando le prescrizioni del D.P.R. 14/01/97, sono state individuate circa venti diverse tipologie di zone termiche, caratterizzate ognuna da un nome identificativo e dai valori dei parametri termoigrometrici. Nell'individuare le zone termiche sono state compiute delle semplificazioni che hanno permesso di contenere la tipologia e il numero di zone entro una quantità compatibile con le potenzialità dei codici di calcolo utilizzati.

Ulteriori semplificazioni sono state effettuate nel considerare gli apporti interni gratuiti dovuti ai macchinari presenti nei vari locali e alla presenza di persone. Poiché la quantificazione degli apporti interni gratuiti, per una struttura della taglia e complessità come l’AOB, è particolarmente complessa, si è deciso di utilizzare i valori relativi alle strutture ospedaliere indicati dalla norma UNI 11300. Per quanto riguarda il calore sensibile, il valore impostato è pari a  $8 \text{ W/m}^2$  ripartito equamente (50%-50%) tra parte convettiva e radiativa. In base ai dati di occupazione degli ambienti, ricavato dal numero di persone (pazienti, personale, visitatori) che ogni giorno affollano la struttura, è stato possibile stimare, sempre in osservazione della norma UNI 11300, l’apporto gratuito del calore latente; tale valore è generato dalla presenza di umidità pari a  $0.008 \text{ (kg}_{\text{vap}}/\text{h})/\text{m}^2$  che corrisponde a circa  $7.7 \text{ W/m}^2$ .

Un esempio del lavoro di preparazione delle zone termiche è presentato nella figura 4.24. A sinistra è visibile la planimetria relativa a una parte del reparto di Medicina 2, situato all’8° piano, in cui è indicata la destinazione d’uso di ogni locale. A destra è riportato il risultato finale, in cui a ogni ambiente è assegnato un colore, la cui legenda è riportata nella tabella 4.20, che ne indica la tipologia di zona termica di appartenenza. Questo lavoro permette di semplificare notevolmente i disegni CAD su cui si deve lavorare per l’implementazione su TRNSYS, consentendo di ottimizzare i tempi di lavoro ed evitare errori visivi sul riconoscimento delle zone termiche.

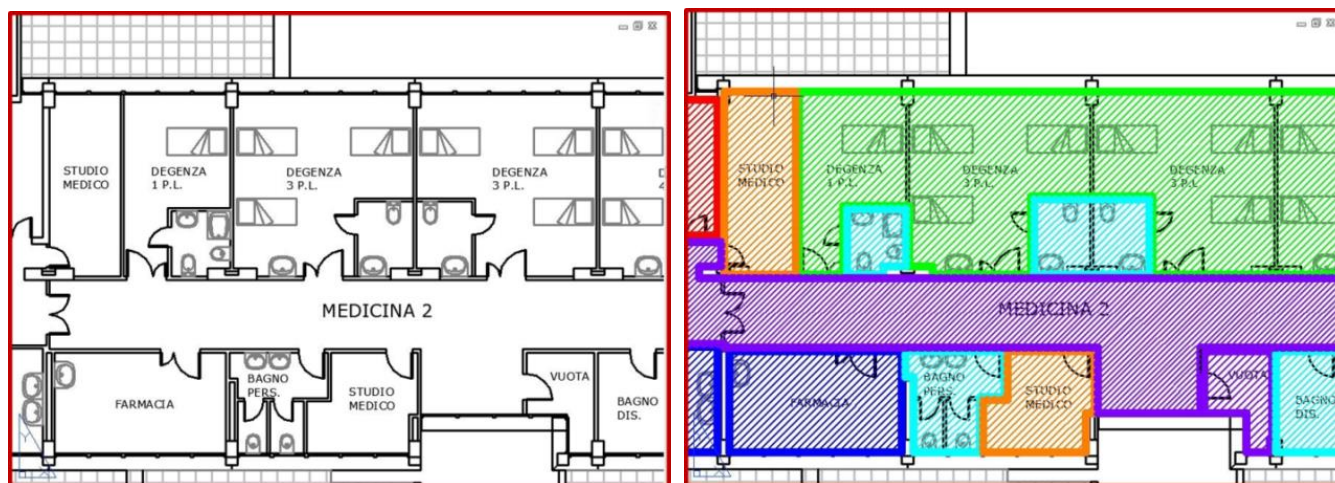


Figura 4.24 - Individuazione delle zone termiche.

Nella tabella 4.20 sono riportate le tipologie di zone termiche utilizzate nella modellazione e i rispettivi valori delle grandezze termoigrometriche. Sempre nella stessa tabella sono riportati i volumi netti occupati dalle varie tipologie di zone termiche e la loro incidenza sul volume netto totale dell’edificio. Data la grande frammentazione delle voci riportate nelle figure precedenti, abbiamo raccolto le diverse zone termiche in cinque macro-categorie di utilizzo che aiutano a inquadrare meglio la distribuzione delle volumetrie all’interno dell’AOB (figura 4.25, tabella 4.21). Alla voce “*Degenze-Servizi*” rientrano tutte quelle zone destinate all’accoglienza e soggiorno dei pazienti e in generale del pubblico, i servizi igienici; tali zone sono caratterizzate da richieste energetiche medio-alte, con consumi più elevati concentrati nei locali dedicati alla terapia intensiva. Gli “*Utilizzi Medicali*” comprendono tutti quegli ambienti dedicati alle attività mediche di diagnosi e cura, rientrano in questa categoria le farmacie e i laboratori, gli studi medici, le sale operatorie, gli studi di diagnostica (radiografia, TAC, PET, simili) etc. In questa categoria rientrano le utenze più energivore, sia dal punto di vista termico che elettrico, dell’intero ospedale; esse sono: sale operatorie, sale parto, diagnostica, preparazione interventi, obitorio. I “*Depositi-Magazzini*” occupano circa il 6% del volume dell’edificio e sono caratterizzati da richieste energetiche molto basse. Nella voce “*Collegamenti*” includiamo gli atri, i corridoi, gli ascensori, e in generale tutti quei locali il cui unico scopo è garantire il collegamento orizzontale e/o verticale tra i vari ambienti dell’ospedale. La volumetria occupata da questi ambienti è la più estesa e copre circa il 40% del totale, essi si distinguono per bassi consumi energetici. Alla voce “*Usi tecnici-Uffici*” si ricollegano tutti quegli ambienti occupati dal personale tecnico e amministrativo necessario per il funzionamento della struttura ospedaliera, tali ambienti sono contraddistinti da richieste energetiche medio-basse.

Tabella 4.20 - Tipologia di zone termiche utilizzate.

CATEGORIA DI UTILIZZO	COLORE CAD	CONDIZIONI TERMOIGROMETRICHE					VOLUMETRICHE	
		Temp. Min [°C]	Temp. Max [°C]	U. rel [%]	Ventilazione [Vol/h]	Apporti Interni	Volume m <sup>3</sup>	%
Degenza - Dialisi - Pubblico		20 (22)*	27	40 - 60	2	SI	18'816	9.1%
Terapia Intensiva		20	24	40 - 60	6	SI	956	0.5%
Servizi		20	28	40 - 60	12	SI	9'146	4.4%
Farmacie - laboratori		20	26	45 - 55	2	SI	5'256	2.5%
Usi medici		21	28	40 - 60	3	SI	44'497	21.5%
Diagnostica		20	27	40 - 60	4	SI	4'790	2.3%
Preparazione Interventi		20	28	40 - 60	8	SI	3'095	1.5%
Sale Operatorie		20	24	40 - 60	15	SI	1'887	0.9%
Sale Parto		22	26	30 - 60	6	SI	257	0.1%
Morgue		20	25	40 - 60	8	SI	901	0.4%
Sale con salme		8**	18	55 - 65	15	SI	718	0.3%
Depositi - Magazzini		18	///	///	3	NO	12'096	5.9%
Cucina		18	30**	///	5	SI	1'824	0.9%
Uffici - Mensa		20	26	40 - 60	1	SI	13'190	6.4%
Sterilizzazione		20	27	40 - 60	6	SI	1'359	0.7%
Officine		18	30	///	4	SI	1'172	0.6%
Vani tecnici - Locali servizio		///	///	///	///	NO	5'266	2.5%
Ascensori		///	///	///	///	NO	5'931	2.9%
Hall		20	28	40 - 60	1	SI (1/2)	3'642	1.8%
Corridoi - Scale		20	29 (27)***	(40- 60)*	2	SI	71'891	34.8%
<b>TOTALE</b>							<b>206'689</b>	<b>100.0%</b>

\* Per degenze pediatriche    \*\* Valori non obbligatori    \*\*\* Corridoio Morgue

La destinazione d'uso dei vari piani dell'AOB è correlata alle diverse attività che vi hanno luogo. Dal 2° all'11° piano, con l'esclusione del 5°, sono localizzati vari reparti specialistici, con un utilizzo delle volumetrie molto simile, e caratterizzati dalla presenza prevalente di degenze. Il 5° piano, essendo assegnato al blocco operatorio, avrà una distribuzione degli ambienti in cui gli "Utilizzi Medicali" saranno preponderanti, comportando un consumo energetico molto elevato. Dal piano seminterrato (-1) al 1° piano, oltre alle degenze e agli utilizzi medicali, vi è la presenza dei principali magazzini e di tutti gli uffici tecnici e amministrativi della struttura. Il blocco costituito dalla Hall e dalla nuova torre degli ascensori, a causa della sua diversa stratigrafia e destinazione d'uso rispetto alle altre zone, in fase di simulazione sarà trattato separatamente dal resto dell'edificio.

CATEGORIA DI UTILIZZO (SEMPLIFICATA)	AOB	
	Volume m <sup>3</sup>	%
Degenze - Servizi	28'919	14.0%
Utilizzi Medicali	61'400	29.7%
Depositi - Magazzini	12'096	5.9%
Collegamenti	81'463	39.4%
Usi tecnici - Uffici	22'811	11.0%
<b>TOTALE</b>	<b>206'689</b>	<b>100.0%</b>

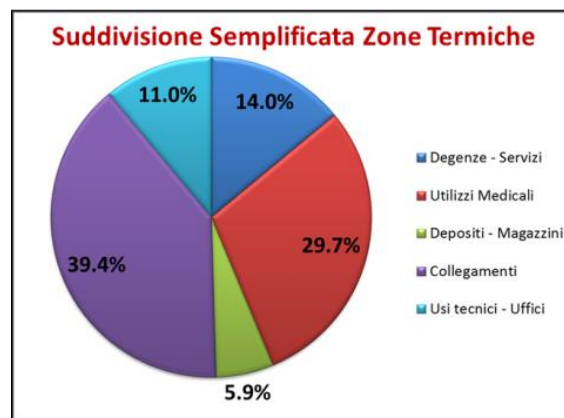


Tabella 4.21 - Figura 4.25 - Volumi e loro incidenza per le diverse categorie di zona termica.



Nella tabella 5.22 è riportata la distribuzione delle categorie di utilizzo degli ambienti per i vari piani che costituiscono il corpo centrale dell'AOB. Nella Tabella 5.23 riepiloghiamo i risultati ottenuti dalla definizione delle zone termiche, indicando i volumi netti dei singoli piani e la loro incidenza sul totale, l'incidenza del volume climatizzato sul volume netto totale e il numero di zone termiche assegnate per ciascun piano; anche in questo caso il blocco Torre-Hall di nuova costruzione sarà considerato separatamente dal resto dei piani.

**Tabella 4.22 - Distribuzione percentuale delle volumetrie, nei diversi piani, per destinazione d'uso.**

CATEGORIA DI UTILIZZO (SEMPLIFICATA)	SUDDIVISIONE VOLUMI DELLE ZONE TERMICHE PER PIANO													
	Hall-Torre	11°	10°	9°	8°	7°	6°	5°	4°	3°	2°	1°	Piastra	-1
Degenze - Servizi	0%	20%	32%	28%	36%	27%	29%	2%	36%	22%	18%	14%	7%	3%
Utilizzi Medicali	13%	31%	22%	25%	22%	30%	26%	48%	19%	35%	41%	10%	41%	30%
Depositi - Magazzini	0%	2%	3%	3%	2%	3%	5%	5%	3%	1%	3%	1%	3%	16%
Collegamenti	87%	47%	43%	42%	40%	39%	40%	40%	41%	40%	38%	53%	40%	23%
Usi tecnici - Uffici	0%	0%	0%	2%	0%	1%	0%	4%	1%	1%	1%	23%	9%	28%

**Tabella 4.23 - Riepilogo dimensioni dei piani e numero di zone termiche assegnate.**

Piano	Volume netto [m <sup>3</sup> ]	Distribuzione Volumi	Volume netto climatizzato [m <sup>3</sup> ]	Incidenza zone climatizzate	N° Zone termiche
T-Hall	8'396	4.1%	6'338	75.5%	21
11	4'563	2.2%	4'190	91.8%	38
10	7'938	3.8%	7'554	95.2%	59
9	8'924	4.3%	8'349	93.6%	77
8	8'944	4.3%	8'521	95.3%	73
7	9'078	4.4%	8'608	94.8%	63
6	9'626	4.7%	9'178	95.3%	67
5	12'128	5.9%	11'192	92.3%	69
4	9'195	4.4%	8'719	94.8%	65
3	8'619	4.2%	8'087	93.8%	65
2	9'778	4.7%	9'272	94.8%	53
1	20'624	10.0%	20'163	97.8%	50
0	39'657	19.2%	39'092	98.6%	86
-1	49'219	23.8%	44'757	90.9%	81
<b>TOT.</b>	<b>206'689</b>	<b>100.0%</b>	<b>194'019</b>	<b>93.9%</b>	<b>867</b>

#### 4.2.2 IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO

Il modello dell'AOB, presentato nel paragrafo precedente, deve essere ora implementato su TRNSYS. In questa sezione descriveremo pertanto tutti i passaggi necessari per inserire nel codice tutte le informazioni descritte in precedenza, specificando fin da subito quali sono le semplificazioni adottate allo scopo di ottenere un modello il più completo possibile ma nello stesso tempo di facile utilizzo e con ridotti tempi di calcolo.

Data la complessità della struttura esaminata, soprattutto dal punto di vista impiantistico, per esigenza di calcolo, si è ritenuto necessario trascurare la modellazione degli impianti di erogazione presenti nell'edificio. Ciò non significa che nel modello implementato non esista un impianto di climatizzazione, ma semplicemente che tale impianto è del tutto generale e ha un comportamento ideale le cui prestazioni non dipendono dalla sua tipologia. Ad esempio, se in inverno si vuole mantenere la temperatura di una zona sopra i 20°C, il codice calcolerà l'energia necessaria trascurando che sia un impianto a tutt'aria a compiere l'intervento piuttosto che un impianto a ventilconvettori, radiatori, pompe di calore, etc. Inoltre non si è imposto un limite alla potenza termica necessaria per compiere le operazioni di regolazione delle condizioni termoigrometriche. Queste assunzioni implicano che i

risultati ottenuti sono legati soltanto alle caratteristiche termofisiche della struttura, alle forzanti esterne (condizioni meteo) e ai settaggi delle grandezze termogrometriche adottati nelle varie zone termiche.

Considerando la dimensione della struttura in analisi e i limiti di TRNSYS nella gestione del numero di zone termiche e soprattutto delle grandezze fisiche, è stato necessario dividere la simulazione in più parti. La strategia adottata prevede la simulazione separata di 40 blocchi in cui è stato diviso l'AOB. Ognuno dei 13 livelli (piani) dell'ospedale è stato diviso in 3 ali così chiamate: ala Est, Sud, Centro-Nord (vedi figura 4.26), i nomi sono dovuti alla direzione geografica

verso cui sono rivolti i bracci principali che si diramano dall'atrio centrale. Per i piani che vanno dal 2° all'11°, tale distinzione permette di distinguere nettamente i due reparti in cui è suddiviso il piano (Ali Est e Sud) e l'atrio principale con i collegamenti verticali (Ala centro Nord). Per i piani rimanenti, dal 1° al seminterrato, tale divisione in 3 parti non coincide più con i reparti ma contraddistingue tre zone aventi circa la stessa volumetria. Un blocco a parte è costituito dalla Hall e dalla Torre ascensori di nuova costruzione che si sviluppa dal 1° all'11° piano.

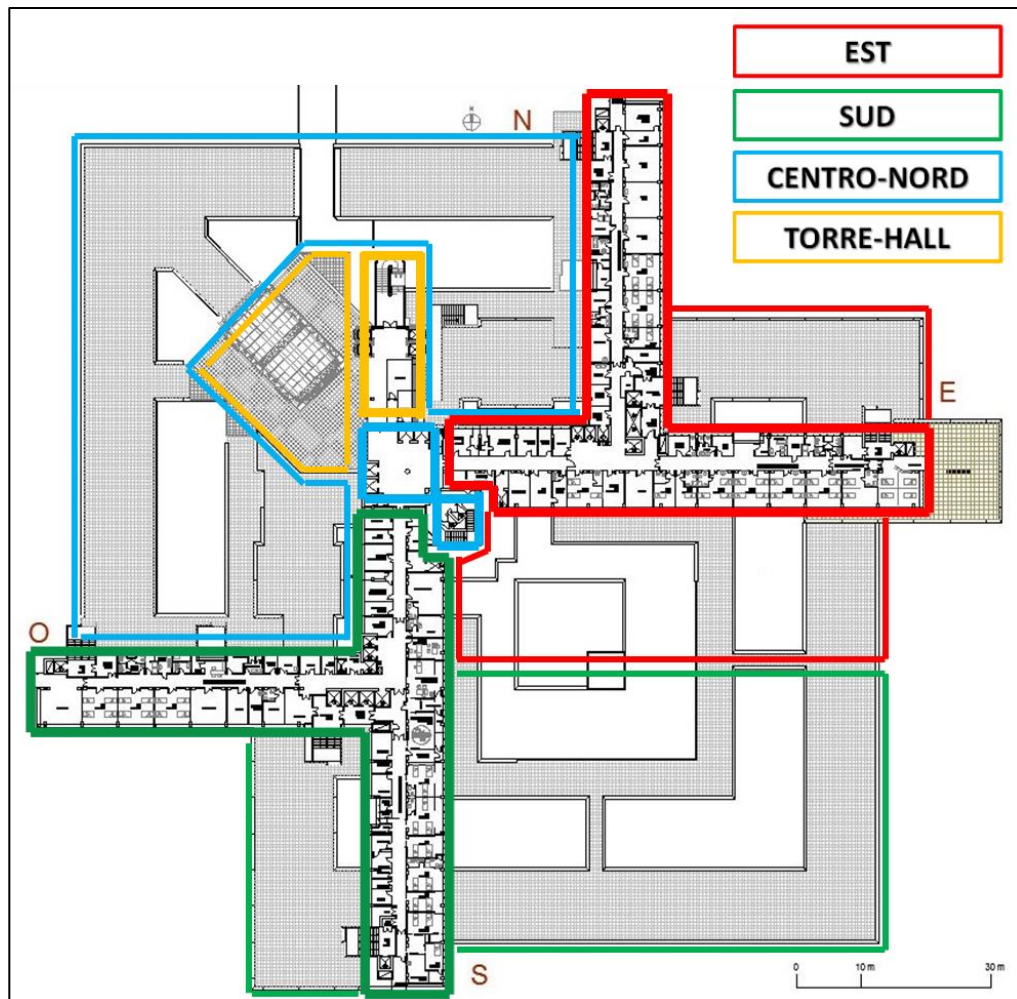


Figura 4.26 - Suddivisione in ali dell'AOB.

Essendo questa una struttura di nuova costruzione, aggiunta di recente al corpo storico dell'edificio, si è deciso di modellarla a parte. In totale si hanno quindi 3 ali per ognuno dei 13 livelli dell'ospedale più un singolo blocco contenente Torre e Hall, per un totale di 40 blocchi.

Un'altra importante scelta da compiere in questa fase preparatoria riguarda la scelta dell'avanzamento temporale del solutore numerico. Tale scelta deve essere un compromesso tra l'esigenza di accuratezza e velocità di calcolo, pertanto si è deciso che tutte le simulazioni siano eseguite considerando un avanzamento temporale di quindici minuti, i risultati ottenuti dovranno essere integrati su base oraria in modo da avere come file di output una matrice con numero di righe uguale a 8760 valori, pari al numero di ore che costituiscono un anno.

Nel corso di questa sezione presenteremo in dettaglio tutte le operazioni svolte su TRNSYS. Nella prima sezione si esaminerà la preparazione del modello vero e proprio nel Simulation Studio. Vista l'importanza della fase di modellazione dell'edificio, eseguita con TRNBuild, si è deciso di dedicare una sezione separata, la seconda, a questa singola fase del lavoro. Nella terza fase presenteremo brevemente il modello matematico alla base del codice, nella quarta si presenteremo il codice implementato su Matlab che serve per analizzare contemporaneamente i risultati delle 40 simulazioni che compongono il modello dell'AOB. Infine, nell'ultima

parte descriveremo sinteticamente come è stato sviluppato cronologicamente il lavoro di simulazione, a partire da un modello semplificato, fino ad arrivare a quello definitivo descritto in questo lavoro.

#### 4.2.2.1 SIMULATION STUDIO

Il “Simulation Studio” è lo strumento di Trnsys che permette di costruire e gestire il modello matematico dell’edificio preso in esame. Tale modello, vedi figura 4.27, prevede l’utilizzo di tutta una serie di Type, o più di essi raccolti in diverse macro, cui sono impartite le seguenti funzioni:

- GESTIONE DATI DI INPUT: fanno parte di questa voce le macro intitolate “Dati Climatici”, “Shading”, “Forzanti”.
- STRUMENTI DI GESTIONE: cui appartiene l’elemento denominato “Controllo”.
- MODELLAZIONE EDIFICIO: comprendente il Type 56, indicato in figura con il nome “Edificio-AOB”, responsabile dell’interfacciamento tra il Simulation Studio e TRNBuild.
- GESTIONE RISULTATI IN OUTPUT: fanno parte di questa voce le due macro chiamate “Plottaggi”, “Stampa risultati”.

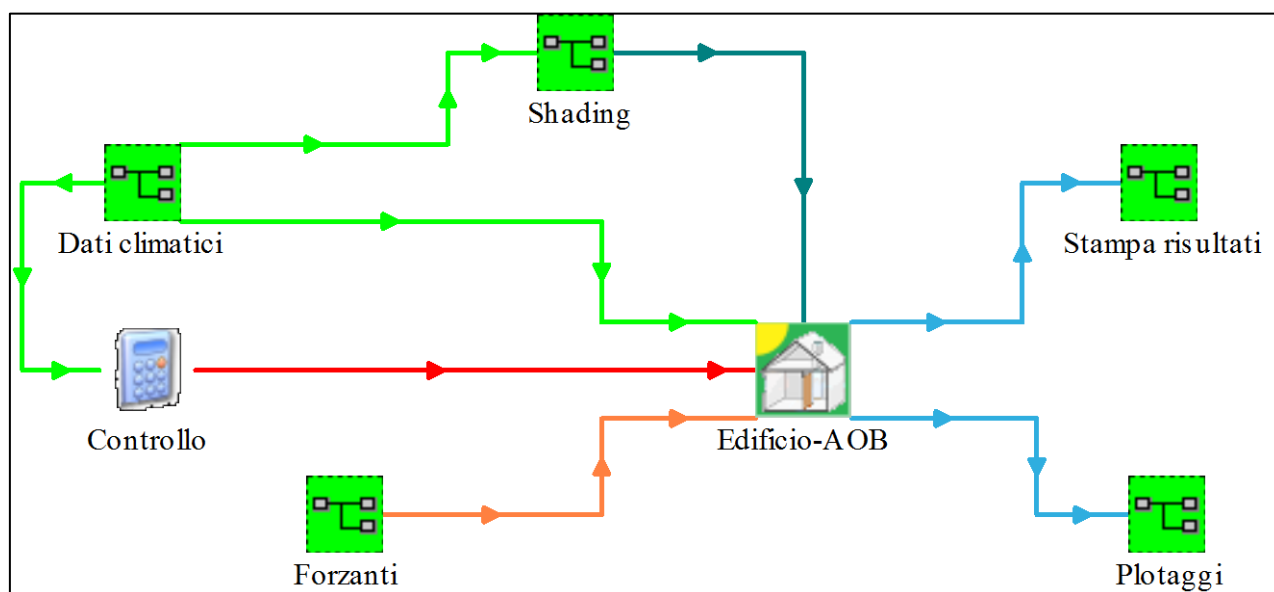


Figura 4.27 - Schermata generale “Simulation Studio”.

Segue una spiegazione dettagliata del funzionamento dei singoli blocchi funzionali. In tale descrizione, per esigenze di brevità, non sarà riportato il modello matematico dei vari Type utilizzati, rimandando il lettore al manuale d’utilizzo del codice [17].

#### ✓ DATI CLIMATICI

La Macro dei dati climatici contiene i seguenti elementi: Type 15.6; Type 65d; blocco equazioni. Al Type 15.6 è assegnato il compito di leggere il file di dati meteo fornito dal software Metonorm in formato .tm2 e calcolare, impostando il modello matematico più adeguato, le varie componenti (diretta, diffusa, riflessa) di irradiazione per le superfici comunque inclinate e orientate che compongono la struttura. Il calcolo dell’irradiazione incidente sulle superfici comunque inclinate e orientate è effettuato considerando un’albedo fissa di 0.2 e il modello di cielo

anisotropo di Perez [17] [22]. Il blocco equazioni consente una conversione delle unità di misura degli output del Type 15.6 per renderle più adatte alla visualizzazione video, eseguita dal Type 65d.

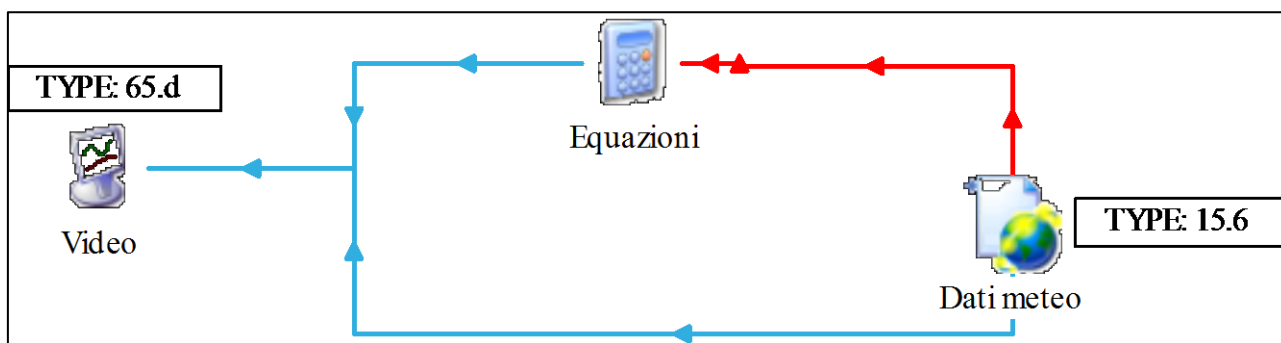


Figura 4.28 - Macro: "Dati Climatici".

✓ SHADING

Il codice TRNSYS non calcola in automatico l'ombreggiatura degli edifici. Le pareti dell'ospedale in cui sono proiettate delle ombre, sia da parte di edifici confinanti sia dell'ospedale stesso, devono pertanto avere come dati in ingresso dei valori d'irradiazione che annoverino i periodi in cui tale parete è ombreggiata. Questo lavoro è svolto da diversi Type 68 racchiusi nella macro denominata "Shading", che elabora i valori dell'irradiazione diretta e degli angoli di altezza solare in uscita dalla macro "Dati Climatici", restituendo dei valori che tengono conto delle ombre. La procedura seguita per la modellazione degli ombreggiamenti è la seguente: si è diviso il perimetro dell'AOB in 11 diverse superfici verticali (figura 4.29) e per ogni parete è stato considerato un solo valore di ombreggiamento; la porzione di cielo è stata divisa in 16 settori equi distanziati di 22.5° sessagesimali e ad ogni parete è stato assegnato di un sistema di riferimento polare (figura 4.30) con origine nella mezzeria della parete. In ogni singolo piano, dal 1° e fino all'11°, e per ognuno dei settori, è stata calcolata l'ostruzione verticale, anch'essa in gradi, causa del fenomeno dell'ombreggiamento. È stata così compilata, per ogni singolo piano, una matrice contenente gli angoli d'ostruzione per tutti e 16 i settori in cui si è diviso lo spazio circostante. Tali matrici sono poi lette dai vari Type 68, uno per ogni parete e per singolo piano, ed utilizzate come base per il calcolo dell'ombreggiamento. Nella tabella 4.24 è riportato un esempio con i valori delle ostruzioni per le pareti verticali del quinto piano.

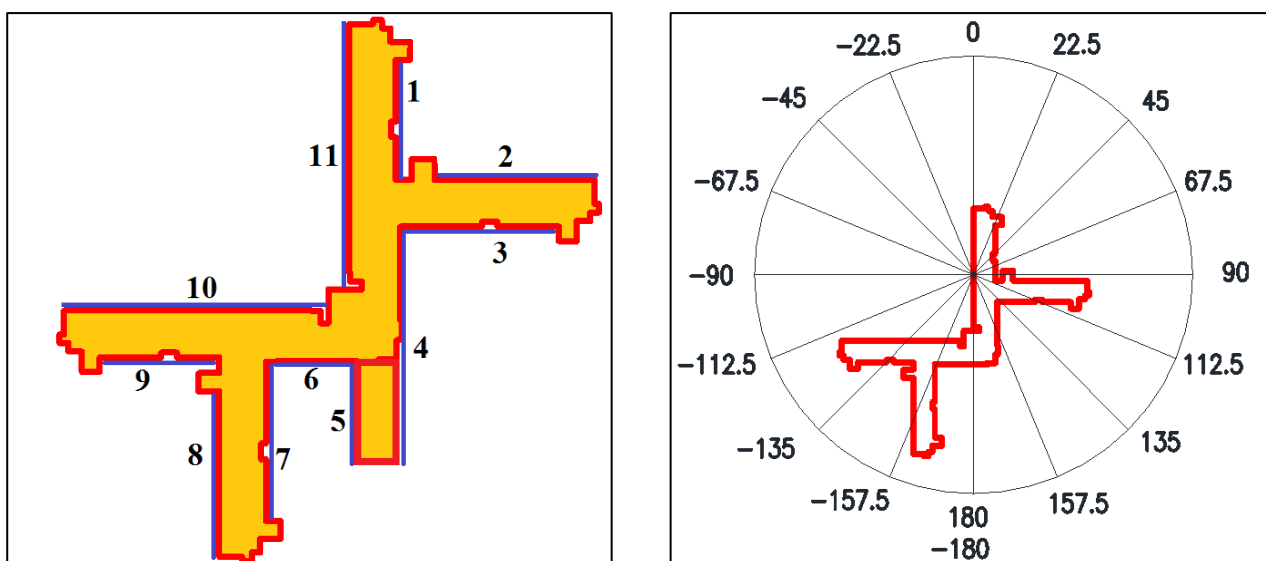


Figure 4.29 - 4.30 - Nomenclatura pareti (sinistra), esempio di creazione dell'ombra (destra).

Tabella 4.24 - Esempio dei valori dell'ostruzione per il 5° piano dell'AOB.

ANGOLI		OMBRE SU SUPERFICI (Angoli d'ostruzione) 5° Piano										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
		OVEST	SUD	NORD	OVEST	EST	NORD	OVEST	EST	NORD	SUD	EST
NORD	-180.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	35.9
	-157.5	0	0	18.9	0	0	59.2	0	0	0	0	29.7
NORD-EST	-135.0	0	0	33.0	0	30.3	56.9	0	0	0	0	23.6
	-112.5	0	0	40.0	0	37.3	49.9	0	0	0	0	0
EST	-90.0	0	41.6	42.2	0	39.5	32.7	0	0	0	0	0
	-67.5	0	39.3	0	0	37.3	0	0	0	0	0	0
SUD-EST	-45.0	0	32.1	0	0	50.4	0	0	32.1	0	0	0
	-22.5	0	0	0	0	57.6	0	0	39.2	0	0	0
SUD	0.0	0	0	0	36.7	60.3	0	42.6	41.6	0	0	0
	22.5	0	0	0	34.5	0	0	40.3	0	0	0	0
SUD-OVEST	45.0	0	0	0	27.8	0	0	33.3	0	0	23.6	0
	67.5	0	0	0	0	0	0	37.3	0	0	29.7	0
OVEST	90.0	0	0	0	0	0	58.5	39.5	0	50.3	36.0	0
	112.5	23.7	0	0	0	0	56.4	0	0	47.1	0	0
NORD-OVEST	135.0	38.9	0	0	0	0	49.0	0	0	40.4	0	0
	157.5	46.7	0	0	0	0	0	0	0	24.7	0	0
NORD	180.0	49.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

✓ EDIFICIO-AOB

La modellazione del comportamento termico dell'edificio è affidata al Type 56. Poiché tal elemento rappresenta il nucleo centrale del programma, data la sua importanza, rimandiamo a una più approfondita descrizione nella sezione 4.2.2.2.

✓ CONTROLLO

Per garantire il corretto funzionamento del modello è stato necessario predisporre diversi sistemi di controllo e gestione della simulazione. Questi sistemi di controllo sono implementati utilizzando lo strumento "Equation" che consente maggiore versatilità e semplicità rispetto ai Type presenti in libreria. I sistemi di controllo utilizzati agiscono sui dati climatici in ingresso all'edificio e sull'impianto di riscaldamento e raffrescamento. Il controllo sui dati climatici ha permesso di verificare, nella fase di messa a punto del codice, la congruità fisica del comportamento termico della struttura e la correttezza del collocamento delle varie zone termiche costituenti il modello. Il controllo dell'impianto prevede la possibilità di disattivare/attivare il riscaldamento, il raffrescamento, la ventilazione all'interno dell'edificio; per quest'ultimo caso è possibile prevedere anche la funzione di attenuazione per periodi giornalieri o stagionali prestabiliti.

✓ FORZANTI

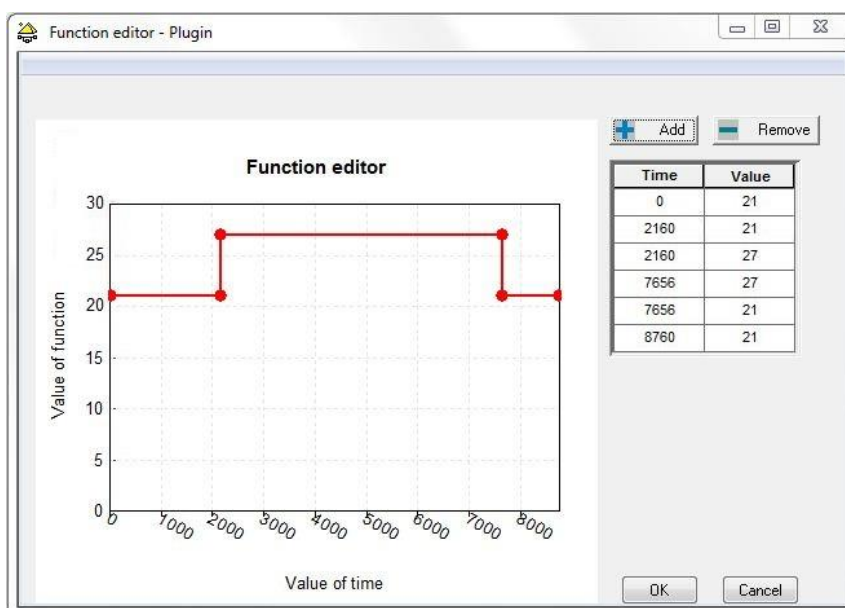


Figura 4.31 - Esempio di forzante utilizzata come condizione al contorno.

Questa macro è utilizzata per imporre le condizioni al contorno presenti nelle zone di separazione delle varie ali. Queste condizioni sono assegnate imponendo i valori di temperatura delle zone confinanti, ipotizzando che esse si trovino esattamente nei valori minimi e massimi, rispettivamente per il periodo invernale (15 Novembre – 28 Febbraio) ed estivo (1 Marzo – 14 Novembre) del loro range assegnato nella fase di definizione delle zone termiche. Nella figura seguente è presentato un esempio in cui la zona di confine impone una *boundary condition* di 21-27°C.

✓ STAMPA RISULTATI

Questa macro consente l’elaborazione e il salvataggio su un file, in formato .dat, dei risultati delle simulazioni. Tali grandezze, fornite come output dal Type 56 (edificio), devono essere indirizzate verso i Type 24 e 25c. Il primo esegue un’integrazione oraria dei risultati della simulazione e li invia al Type 25c che compie il salvataggio di tutte le grandezze in una matrice così definita: il numero di colonne è pari alle grandezze fisiche oggetto dell’analisi; le righe sono 8761, ossia il numero di ore presenti in un anno più una riga contenente le condizioni iniziali di simulazione all’istante temporale zero.

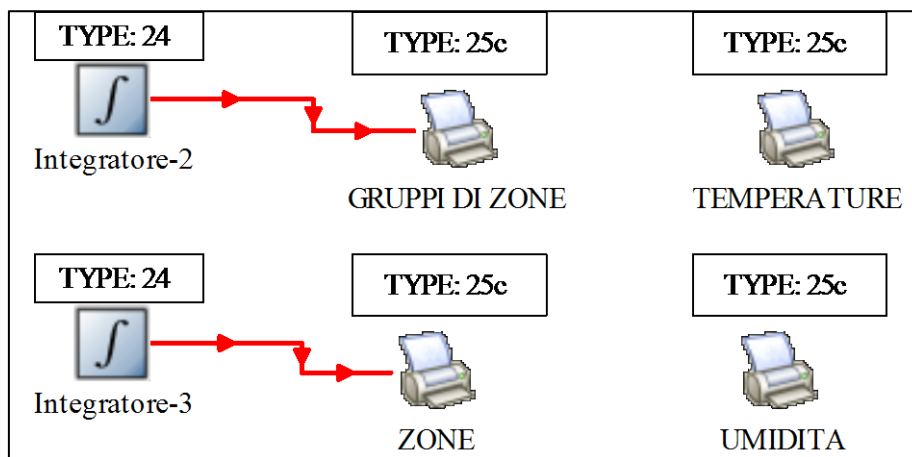


Figura 4.32 - Macro: “Stampa risultati”.

✓ PLOTTAGGI

Con questa macro è possibile vedere stampati a video i plottaggi con i risultati delle simulazioni. La stampa a video è compiuta da alcuni Type 65d, inoltre, è presente un blocco “Equation” che svolge il compito di convertire alcune unità di misura in modo da facilitarne il riconoscimento visivo.

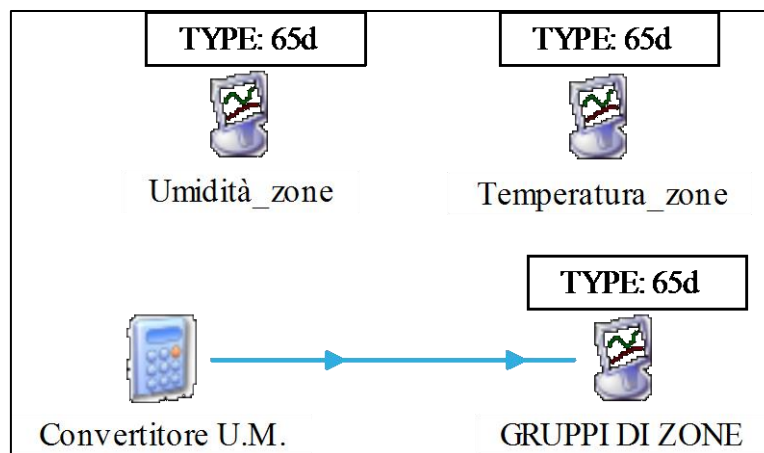


Figura 4.33 - Macro: “Plottaggi”.

Nelle figure 4.34a-b presentiamo, a scopo dimostrativo, il plottaggio di temperatura e umidità corrispondente alle condizioni climatiche esterne e ad alcuni ambienti situati nell’undicesimo piano.

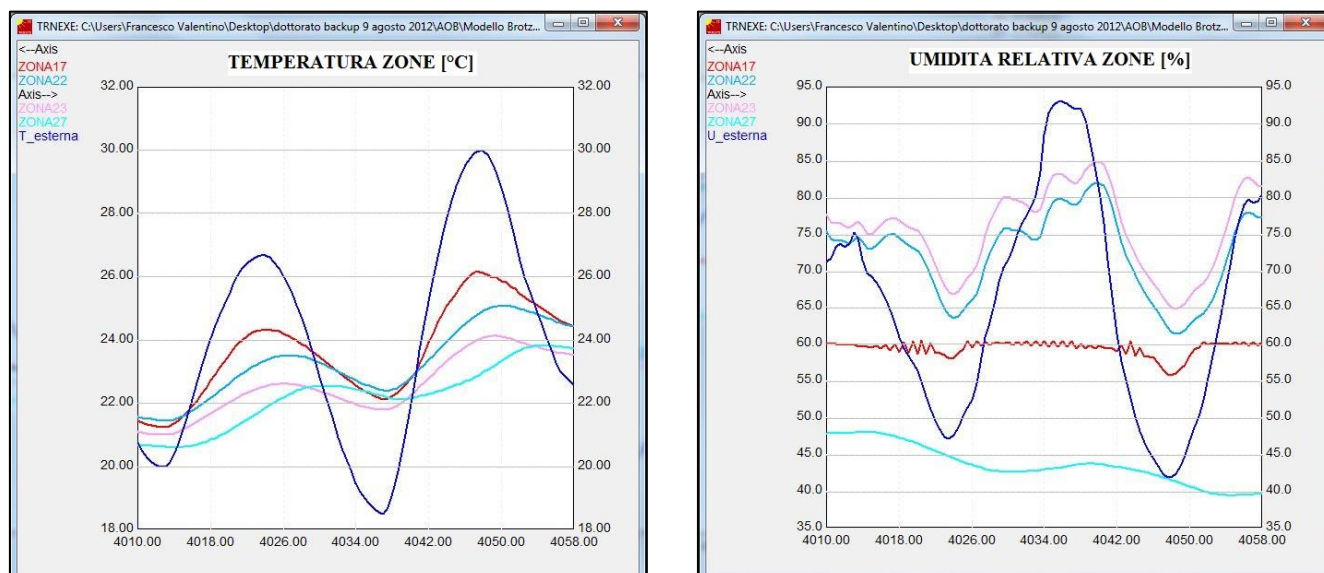


Figure 4.34a-b - Esempi di Plottaggio: Temperatura (sinistra), Umidità relativa (destra).

#### 4.2.2.2 TRNBUILD

Utilizzando l'applicazione TRNBUILD è possibile modellare il comportamento termico dell'edificio. I passaggi necessari per la costruzione del modello sono riportati in dettaglio nei seguenti punti:

✓ **GESTIONE INPUT**

Il primo passaggio consiste nel definire tutte le grandezze d'input che dal "Simulation Studio" devono pervenire al Type 56, per essere poi processate da TRNBUILD. Possiamo dividere queste grandezze nelle seguenti categorie:

- **DATI METEOROLOGICI:** costituiti da: temperatura ambiente [°C]; umidità relativa [%]; temperatura del cielo [°C]; irradiazione diretta e totale [kJ/(h m<sup>2</sup>)] su tutte le superfici orizzontali e verticali, sia quelle ombreggiate che quelle in piena esposizione; angolo di incidenza [°] della radiazione diretta su tutte le superfici verticali che compongono la struttura dell'ospedale.
- **CONDIZIONI AL CONTORNO:** ovvero le temperature delle zone adiacenti a quelle simulate che non compaiono nel modello perché facenti parte di un'altra ala che viene simulata separatamente. I valori di temperatura considerati sono quelli minimi e massimi dell'intervallo imposto dalla normativa [6].
- **PARAMETRI DI CONTROLLO:** in questa categoria rientrano i parametri utilizzati per controllare l'accensione, lo spegnimento, la regolazione degli impianti. I primi due parametri assumono valori discreti pari a 1 se l'impianto è acceso, 0 se l'impianto è spento. L'ultimo parametro può assumere valori continui tra 0 e 1, tale possibilità è stata implementata nel caso in futuro si voglia simulare uno scheduling giornaliero, settimanale o mensile prestabilito.

✓ **DEFINIZIONE CARATTERISTICHE STRUTTURE**

Terminata la descrizione delle grandezze d'input, necessarie per permettere il funzionamento del modello, si passa alla fase di creazione delle strutture opache e trasparenti che compongono l'involucro dell'edificio.

STRUTTURE OPACHE

La prima fase del lavoro prevede la costruzione di una libreria contenente le caratteristiche termofisiche dei materiali che compongono le stratigrafie delle superfici opache. Questo lavoro è realizzato tramite il “Layer Type Manager” presente in TRNBUILD. Per ogni strato che vogliamo definire, occorre dichiararne la tipologia, scegliendo se si tratta di un elemento massivo o meno, nel primo caso bisogna fornire le seguenti caratteristiche del materiale: conduttività termica [kJ/(h m K)]; capacità termica [kJ/(kg K)]; densità [kg/m<sup>3</sup>]. Nel caso di un materiale non massivo si indica soltanto il valore della resistenza termica [(h m<sup>2</sup> K)/ kJ].

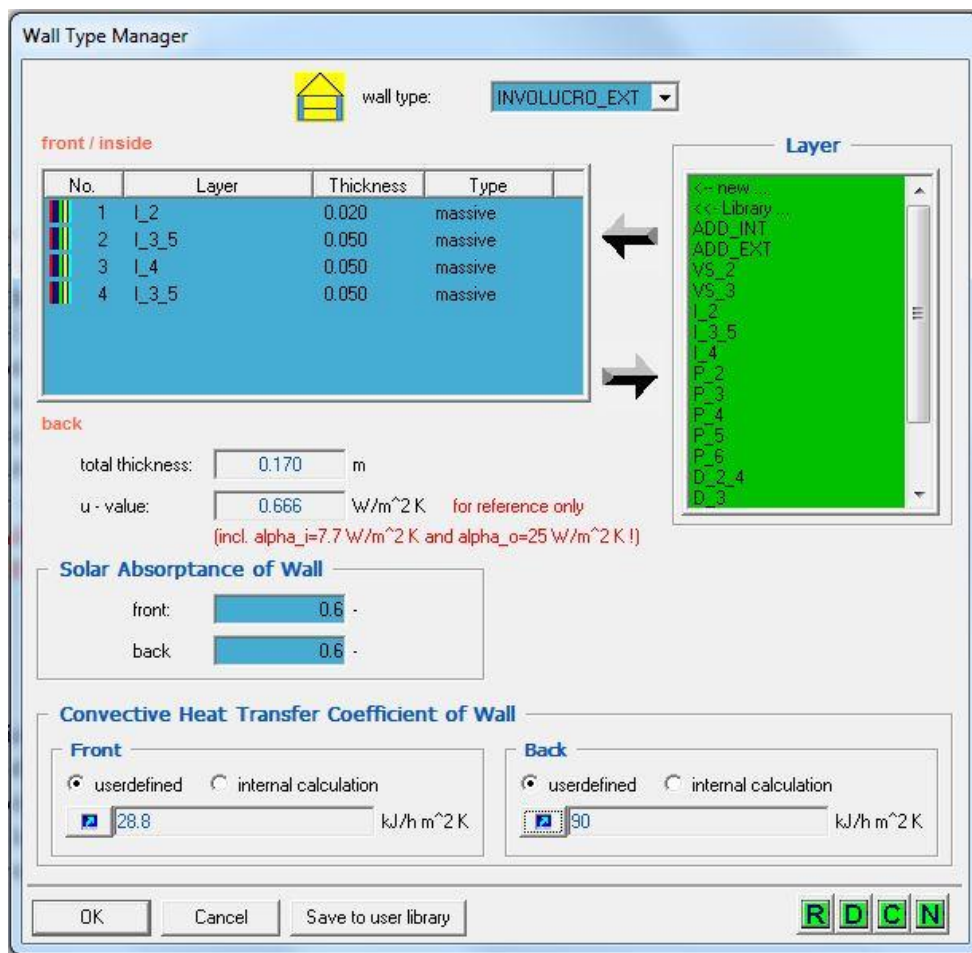


Figura 4.35 - Schermata del “Wall Type Manager”.

Terminata la compilazione della libreria dei materiali, si passa all’unione dei vari strati per costruire le pareti opache. Questa seconda fase è realizzata utilizzando il “Wall Type Manager” (figura 4.35). Per ogni superficie occorre definire la sequenza stratigrafica dei *layer* con i relativi spessori, l’assorbanza solare interna ed esterna, i coefficienti di scambio termico convettivi interni ed esterni della parete. Il coefficiente di scambio termico normalmente indicato in letteratura ingloba sia la parte convettiva sia quella radiativa; in TRNSYS bisogna definire soltanto la parte convettiva, poiché quella radiativa è calcolata automaticamente. I valori dei coefficienti utilizzati sono i seguenti:

Tabella 4.25 - Coefficienti di scambio termico convettivo

COEFFICIENTI DI SCAMBIO TERMICO CONVETTIVO		
Tipologia di Superficie	Interno [W/(m <sup>2</sup> K)]	Esterno [W/(m <sup>2</sup> K)]
Pareti Interne	3	3
Pareti Esterne	8	25
Solaio Intermedio	6	6

Seguendo la procedura appena descritta, sono state costruite tutte le superfici opache che compongono l’edificio e che sono riportate nell’appendice B.

STRUTTURE TRASPARENTI

La costruzione delle strutture trasparenti (vetrate, infissi etc.) non è in TRNBUILD così immediata come quella delle superfici opache. Non è possibile, infatti, definire tutte le caratteristiche termofisiche dei vetri e dei telai ma



bisogna ricorrere alle librerie del programma e scegliere le tipologie di vetro e d'infisso le cui caratteristiche più si avvicinano a quelle individuate in fase di rilievo (appendice B). Per ogni tipologia di superficie opaca implementata sono stati impostati i seguenti valori dei coefficienti di scambio termico convettivo: 11 kJ/(h m<sup>2</sup> K) per l'interno; 64 kJ/(h m<sup>2</sup> K) per l'esterno. La gestione delle superfici opache avviene tramite il "Window Type Manager" di cui riportiamo la schermata nella figura seguente.

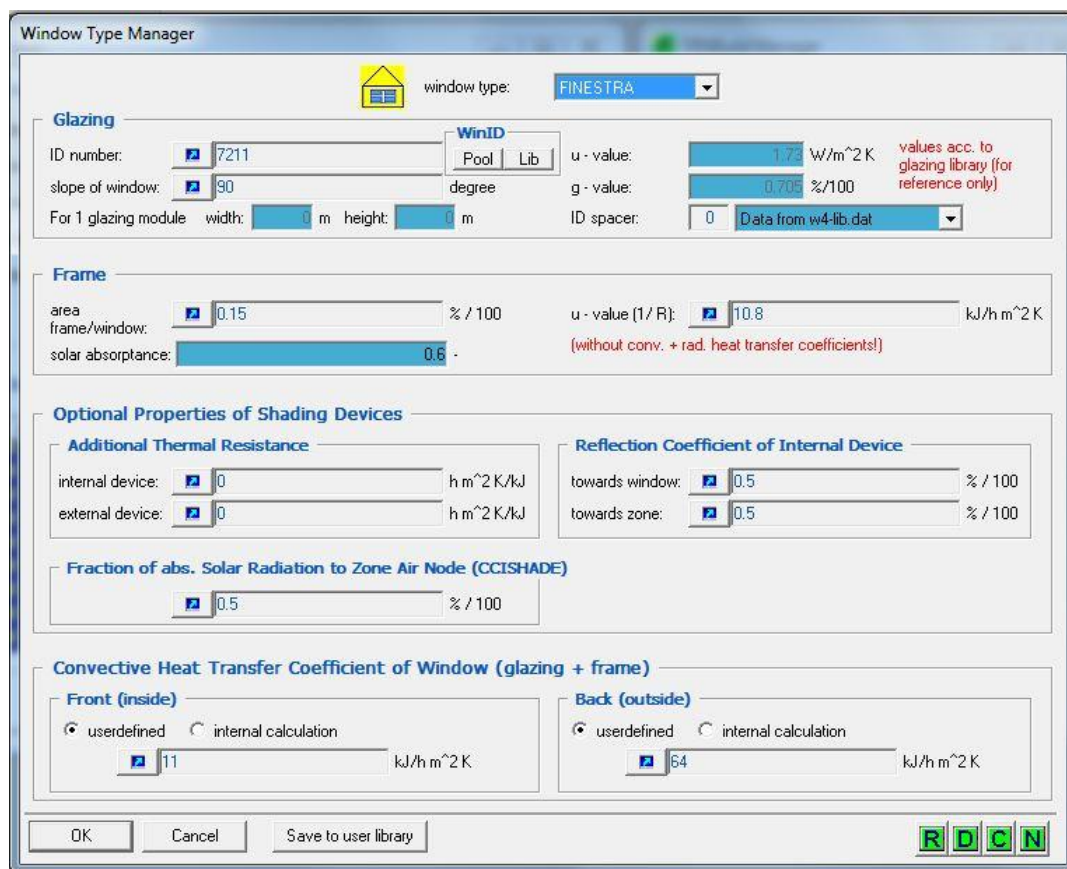


Figura 4.36 - Schermata del "Window Type Manager".

✓ COSTRUZIONE GEOMETRICA ZONE

Per identificare geometricamente una zona bisogna svolgere la seguente sequenza di passaggi: si aggiunge una nuova zona al "TRNBuild Manager", assegnandole un nome identificativo; s'inserisce il volume netto della zona (volume d'aria compresa all'interno della zona); si prosegue aggiungendo le superfici opache che costituiscono la zona, specificando il materiale di cui sono composte e l'area totale della parete, comprensiva delle superfici trasparenti. Per ogni parete inserita occorre definirne la categoria, scelta tra le seguenti: external, internal, adjacent, boundary. Alla categoria external competono tutte le pareti che si affacciano verso l'esterno dell'edificio, in questo caso occorre indicare l'orientamento della parete (comprensivo di ombreggiamento nel caso sia presente) e il "view factor to sky" pari a 0.5 per pareti verticali e 1 per pareti orizzontali. Nella categoria internal rientrano tutte quelle superfici che si trovano esclusivamente all'interno della zona termica, ad esempio i tramezzi interni alle stanze. La categoria adjacent comprende le superfici di confine con le altre zone termiche. Le boundary contengono tutte le pareti che hanno delle caratteristiche al contorno ben definite, queste ultime sono utilizzate soltanto per caratterizzare le pareti di confine tra un'ala e l'altra cui sono applicate le condizioni al contorno descritte in precedenza. Per le pareti contenenti superfici vetrate bisogna compiere un successivo passaggio che consiste nello scegliere la tipologia di vetrata da adottare, indicandone la superficie lorda. Nella seguente figura sono visibili tutti i parametri geometrici appena descritti, corrispondenti a una zona del 10° piano.

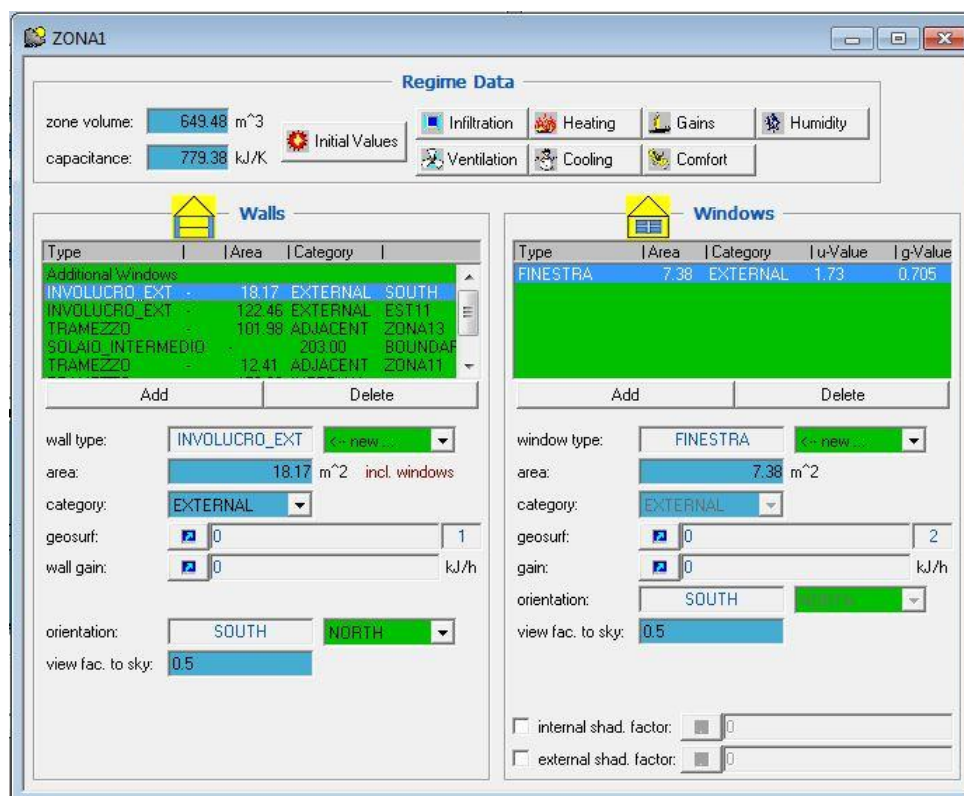


Figura 4.37 - Schermata riepilogativa della ZONA.

#### ✓ SET-UP CONDIZIONI TERMOIGROMETRICHE

Terminata la costruzione geometrica delle zone termiche, si passa alla definizione dei parametri termoigrometrici di seguito riportati:

- RICAMBI D'ARIA (VENTILAZIONE)

Nella voce ventilazione raggruppiamo sia quella naturale sia quella forzata. L'ammontare della ventilazione è assegnato imponendo il numero di ricambi d'aria, in volumi/ora, per tutte le zone termiche dell'edificio. L'aria di rinnovo è sempre di provenienza esterna, quindi i valori di temperatura e umidità di rinnovo sono pari a quelli atmosferici.

- TEMPERATURA INTERNA

Per ogni zona termica deve essere assegnata la temperatura minima di riscaldamento e la massima di raffrescamento in cui deve essere mantenuto tale ambiente. Se, ad esempio, una zona deve mantenere la sua temperatura interna compresa tra il range 21°C-27°C, allora imporrò 21°C come temperature di riscaldamento e 27°C per il raffrescamento (figure 4.38a-b). Operando in questo metodo non si ha distinzione tra periodo invernale ed estivo ma il controllo di temperatura è effettuato tutto l'anno su un intervallo di operatività, garantendo quindi le condizioni di benessere secondo le prescrizioni delle normative [6]. Per la fase di riscaldamento e raffrescamento si può decidere infine se imporre un limite alla potenza termica, tale potenzialità non è stata attivata perché si vogliono conoscere i consumi a prescindere dalla tipologia d'impianto utilizzato. Solo per la fase di riscaldamento si può decidere la modalità con cui il calore deve essere introdotto dall'impianto verso l'ambiente, distinguendo tra parte convettiva e radiativa.

- UMIDITÀ RELATIVA

Il controllo dell'umidità avviene tramite gli "Heating Type Manager" e "Cooling Type Manager" riportati nelle figure 4.38a-b. Ciò avviene imponendo i valori minimi e massimi, rispettivamente in riscaldamento e raffrescamento, corrispondenti all'intervallo desiderato. Con riferimento alla figura citata, se si vuole mantenere

una determinata zona all'interno dell'intervallo di umidità relativa del 40%-60%, si dovrà impostare il 40% di umidificazione nell'Heating Type Manager e il 60% di deumidificazione nel Cooling Type Manager.

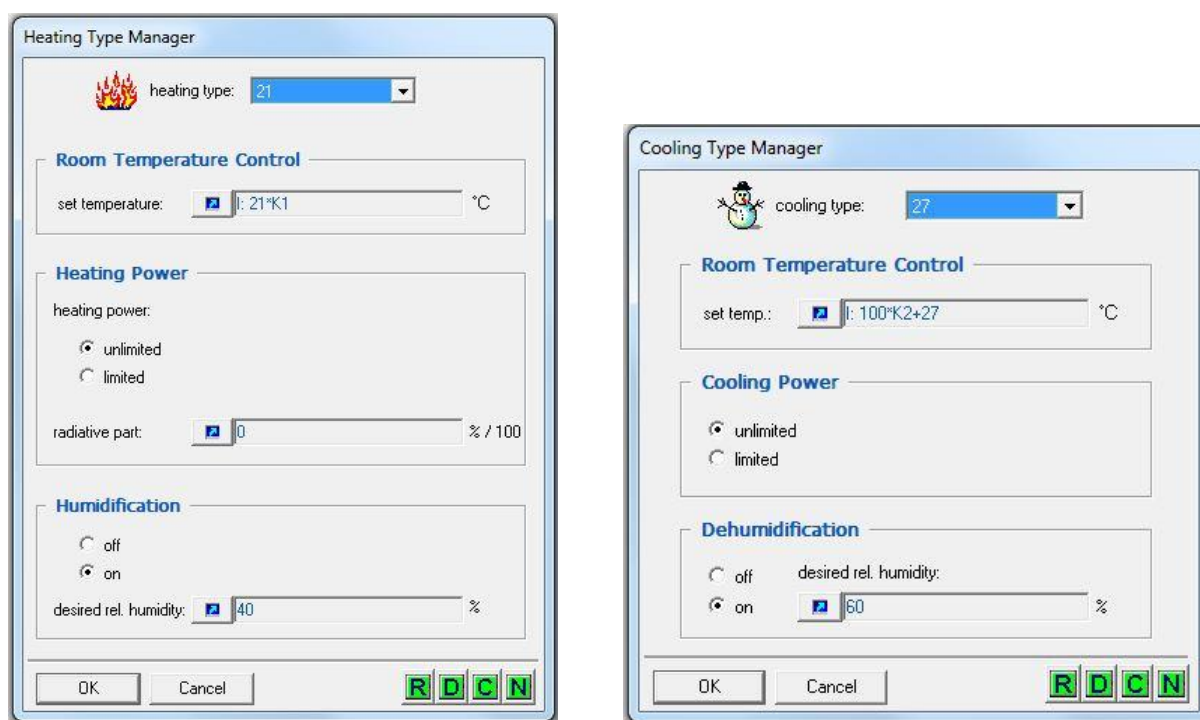


Figure 4.38a - 4.38b - Schermate del “Heating Type Manager” e del “Cooling Type Manager”.

✓ APPORTI INTERNI

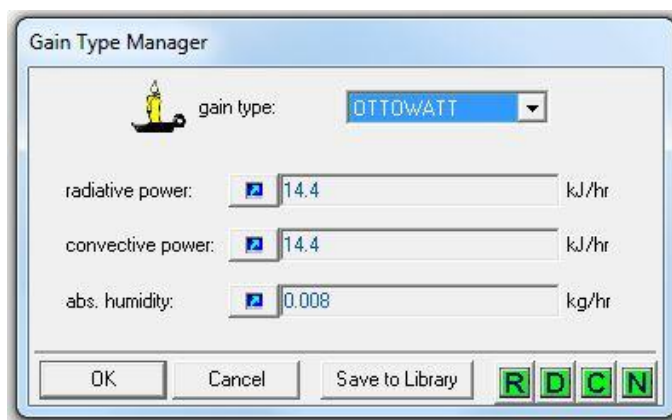


Figura 4.39 - Schermata del “Gain Type Manager”.

Per ogni zona termica occorre indicare se sono presenti gli apporti interni gratuiti e la loro composizione in carico sensibile, convettivo e radiativo, e carico latente. Tutti gli apporti interni sono stati definiti in rapporto alla superficie ( $\text{kJ}/(\text{h m}^2)$  o  $\text{W}/\text{m}^2$ ), pertanto devono essere poi moltiplicati per il valore della superficie netta (superficie calpestata) per ogni singola zona termica. La gestione degli apporti interni gratuiti avviene tramite il “Gain Type Manager” riportato nella figura 4.39.

✓ GESTIONE OUTPUT

Seguendo i passaggi appena descritti, è stato possibile costruire il modello dell'AOB. Ora è necessario stabilire quali informazioni, tra le innumerevoli possibilità fornite dal codice, possono essere utili per l'analisi dei consumi dell'AOB. Distinguiamo due tipologie di output disponibili: quelli concernenti una singola zona termica o a un gruppo di zone. Degli output della prima categoria si è deciso di considerare le seguenti grandezze: temperatura, umidità relativa, calore sensibile per riscaldamento, calore sensibile per il raffrescamento. Tali grandezze sono state

utilizzate soltanto nella fase iniziale di messa a punto del codice, con lo scopo di controllare che non ci fossero errori e/o anomalie nella costruzione delle zone termiche, nei set-up delle condizioni termoigrometriche, e nei sistemi di controllo utilizzati. Le grandezze di output effettivamente utilizzate nella fase di post-processing sono gli output globali di gruppi di zone, i cui risultati non si riferiscono a una zona specifica ma all'intero gruppo di zone selezionato, nel nostro caso tutte le zone termiche dell'ala modellata. Tali grandezze sono:

➤ SQHEAT:	calore sensibile per il riscaldamento	[kJ]
➤ SQCOOL:	calore sensibile per il raffrescamento	[kJ]
➤ SQVENT:	calore sensibile per la ventilazione	[kJ]
➤ SQGCON:	parte convettiva degli apporti interni gratuiti	[kJ]
➤ SGQRAD:	parte radiativa degli apporti interni gratuiti	[kJ]
➤ SQLATG:	calore latente globale (umidificazione [+]; deumidificazione [-])	[kJ]
➤ SQCSUR:	scambi termici convettivi tra superfici e aria	[kJ]

#### 4.2.2.3 ELABORAZIONE RISULTATI (MATLAB)

La scelta di dividere la simulazione dell'AOb in 40 parti e la mole di dati risultanti dalle simulazioni, ha comportato la necessità di dover ricorrere ad un programma, esterno a TRNSYS, che effettui l'elaborazione dei dati e restituisca le grandezze di interesse per l'analisi energetica. È stato quindi implementato su MATLAB un programma che, partendo dai dati orari, esegue le seguenti tre tipologie di analisi:

- ❖ ANALISI CONSUMI ANNUALI NEI PIANI: il codice rende i consumi annuali totali [kWh] e specifici [kWh/m<sup>3</sup>] per riscaldamento e raffrescamento di ogni singolo piano e delle tre ali che compongono il piano.
- ❖ ANALISI POTENZE DI PICCO: il codice restituisce i valori della potenza termica di picco [kW] per riscaldamento e raffrescamento. Assieme ai valori di potenza è indicata l'ora e il giorno dell'anno in cui tale picco si manifesta, unitamente alle condizioni atmosferiche esterne corrispondenti a tale istante: temperatura di bulbo secco [°C], umidità relativa [%], pressione atmosferica [kPa], velocità del vento [m/s].
- ❖ ANALISI CONSUMI MENSILI AOB: in questo caso il codice elabora i dati su base mensile, restituendo i valori di energia termica [kWh] necessaria mensilmente per riscaldare e/o raffrescare l'intera struttura. In quest'analisi sono inoltre riportati i valori mensili delle voci che compongono il bilancio energetico globale: scambi termici convettivi, ventilazione, apporti interni gratuiti (solo parte sensibile), calore latente (apporti gratuiti e operazioni di umidificazione e deumidificazione).

Le tre tipologie di analisi appena presentate possono essere svolte anche solo per un piano o reparto (ala) della struttura considerata. Nella figura 4.40 è presentato il diagramma a blocchi del programma, implementato in MATLAB, per l'elaborazione dei risultati generati da TRNSYS. Nel codice è possibile distinguere quattro blocchi, indicati con colore diverso, a ognuno dei quali è stato assegnato il seguente compito:

- I. MAIN: è il cuore del programma, esso si occupa di gestire il corretto funzionamento degli altri tre blocchi.
- II. INPUT: è il blocco che fa da interfaccia, attraverso l'uso di finestre grafiche, tra il codice e l'utente, permettendo la scelta delle tipologie di analisi che si vogliono eseguire. Tale blocco si occupa anche del caricamento dei file contenenti i risultati delle simulazioni di TRNSYS.
- III. ELABORAZIONI: questa è la parte del codice che si occupa di portare a termine tutte le elaborazioni descritte in precedenza.
- IV. OUTPUT: è il blocco che consente la compilazione del report e la creazione dei grafici contenenti i risultati di tutti le elaborazioni.

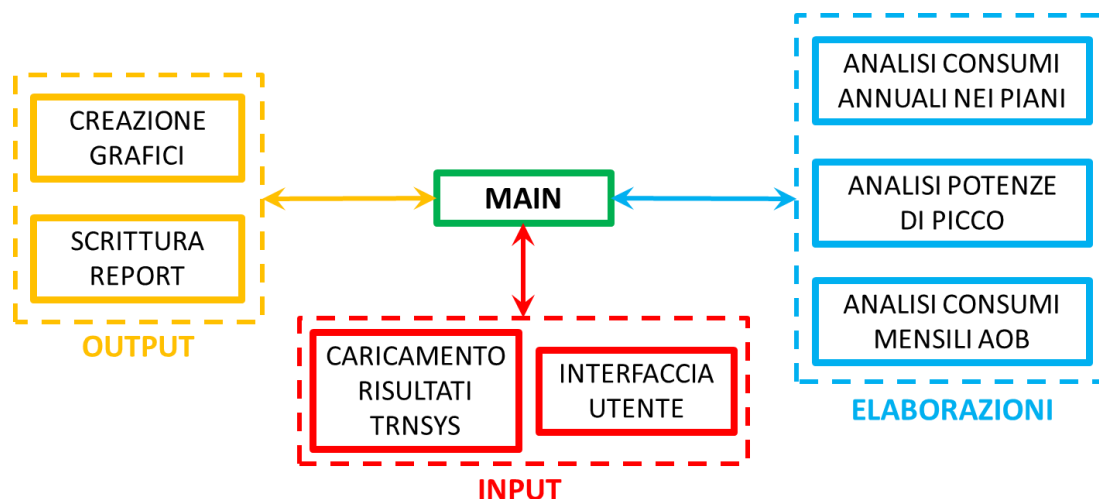


Figura 4.40 - Schema a blocchi del programma implementato su Matlab.

#### 4.2.2.4 SVILUPPO CRONOLOGICO DEL CODICE

Il modello dinamico dell'AOB è stato sviluppato in quattro fasi successive che hanno prodotto le seguenti versioni del codice di cui riportiamo le caratteristiche principali:

##### V0: Modello Base

[Febbraio - Luglio 2011]

Questa versione del codice è stata realizzata nel periodo Febbraio-Luglio 2011 ed è stata portata avanti in collaborazione con l'Ing. M. Usai nell'ambito di una tesi di laurea specialistica [23]. Lo scopo di questa versione del codice è stato quello di fornire una base addestrativa semplice e flessibile, necessaria per capire come utilizzare al meglio TRNSYS-TRNBuild e testare le varie tipologie di Type presenti nelle librerie del programma, fino ad arrivare a un'architettura definitiva del codice nel *Simulation Studio*. Tale Modello Base permetteva di simulare il comportamento dei piani: 11°; 10°; 9°; 8°; 1°; Piano Piastra; Piano Seminterrato. In mancanza dei dati stratigrafici aggiornati si è deciso di utilizzare dei valori antecedenti al periodo di ristrutturazione. I set-up di temperatura e ricambi d'aria impostati nel programma erano conformi alle prescrizioni del DPR 14-01-97.

##### V0+: Modello Base Modificato

[Settembre - Ottobre 2011]

In questa seconda versione del codice, messa a punto tra Settembre-Ottobre del 2011, sono state implementate delle migliorie aventi l'obiettivo di far convergere il modello al comportamento reale dell'edificio. Il primo intervento ha riguardato l'implementazione del modello del 5° piano. In seguito sono stati inseriti gli apporti interni gratuiti, limitati alla sola parte di calore sensibile, ed è stato migliorato il sistema di controllo dell'umidità relativa per seguire nel modo più fedele possibile il DPR 14-1-97. Infine è stato introdotto il sistema di ombreggiamento (semplificato) dell'edificio.

##### V1: Modello con Impianto Ideale

[Novembre 2011 - Gennaio 2012]

Questa è la versione definitiva che è stata utilizzata per generare i risultati riportati nei paragrafi seguenti. Questo modello ci permette di risalire ai consumi che avrebbe l'AOB utilizzando le prescrizioni del DPR 14-1-97, senza considerare il comportamento degli impianti realmente presenti nell'edificio. In questa versione è stato modellato l'intero edificio del corpo centrale dell'AOB. È stata inoltre eseguita una revisione delle zone termiche, sia per razionalizzarne la tipologia che per ottimizzarne il numero in modo da sfruttare al meglio le risorse di calcolo. Sono state inoltre utilizzate le caratteristiche stratigrafiche e termofisiche reali delle superfici opache e trasparenti dell'AOB, così come riportate nell'appendice B. Infine, è stato completato il lavoro introducendo la parte latente degli apporti interni gratuiti.

4.2.3 MODELLO MATEMATICO TRNSYS-TRNBUILD

BILANCI ENERGETICI DELLA ZONA TERMICA

L'elemento di calcolo su cui compiere tutte le considerazioni matematiche è costituito dalla zona termica, un'entità non geometrica che descrive il comportamento termico di uno o più locali che si vuole modellare. Il modello matematico è a parametri concentrati, per cui la singola zona termica è descritta come un nodo, caratterizzato dalla capacità termica del volume d'aria della zona stessa, cui sono applicate le diverse correlazioni di bilancio energetico [17].

❖ BILANCIO ENERGETICO N°1: SCAMBIO TERMICO per CONVEZIONE

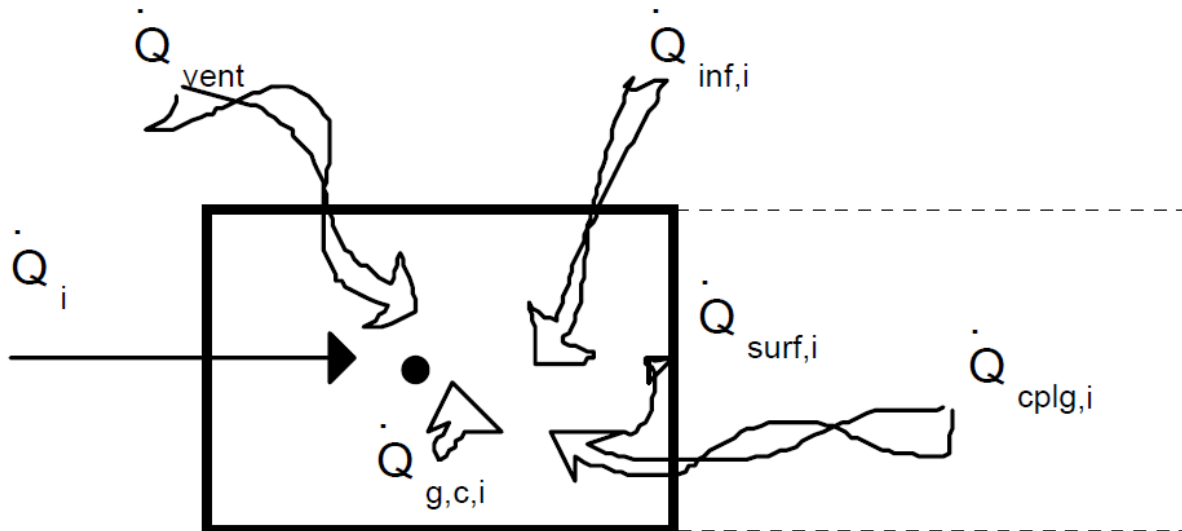


Figura 4.41 – Bilancio energetico della zona termica (convezione) [17].

Per il generico nodo d'aria  $i$  è possibile scrivere il seguente bilancio energetico (figura 4.41), relativo agli scambi termici per convezione, limitati al solo calore sensibile:

$$\dot{Q}_i = \dot{Q}_{inf,i} + \dot{Q}_{vent} + \dot{Q}_{g,c,i} + \dot{Q}_{cplg,i} + \dot{Q}_{surf,i} \quad \text{Eq. 4.1}$$

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

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

$$\dot{Q}_{inf,i} = \dot{m}_{inf} \cdot C_p \cdot (T_o - T_i) \quad \text{Eq. 4.2}$$

dove  $T_i$  è la temperatura del nodo  $i$ ,  $T_{outside}$  la temperatura dell'aria esterna,  $\dot{m}_{inf}$  la portata massica d'aria esterna che si infila nell'ambiente,  $C_p$  il calore specifico dell'aria.

$\dot{Q}_{vent}$  è l'apporto termico correlato alla ventilazione forzata (Es. impianto HVAC).

$$\dot{Q}_{vent} = \dot{m}_{vent} \cdot C_p \cdot (T_{vent} - T_i) \quad \text{Eq. 4.3}$$

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

$\dot{Q}_{g,c,i}$  sono gli apporti interni gratuiti convettivi, originati dalla presenza di apparecchiature fonti di calore, dall'illuminazione, dalla presenza di persone, etc.

$\dot{Q}_{cplg,i}$  è l'energia scambiata tramite passaggio d'aria tra una zona termica e l'altra dell'edificio, sia essa climatizzata o meno.

$$\dot{Q}_{cplg,i} = \dot{m}_{cplg,i} \cdot C_p \cdot (T_{zone,j} - T_i) \quad \text{Eq. 4.4}$$

in cui  $T_{zone,j}$  è la temperatura dell'aria nella zona  $j$ , mentre  $\dot{m}_{coupl}$  è la portata massica d'aria dell'aria scambiata tra la zona termica  $i$  e quella  $j$ .

$\dot{Q}_{surf,i}$  è la quantità di calore scambiata, per convezione, tra l'aria all'interno della zona termica e tutte le pareti (sia opache che trasparenti) che la delimitano. Lo sviluppo di questo termine sarà affrontato più avanti.

❖ BILANCIO ENERGETICO N°2: SCAMBIO TERMICO per IRRAGGIAMENTO

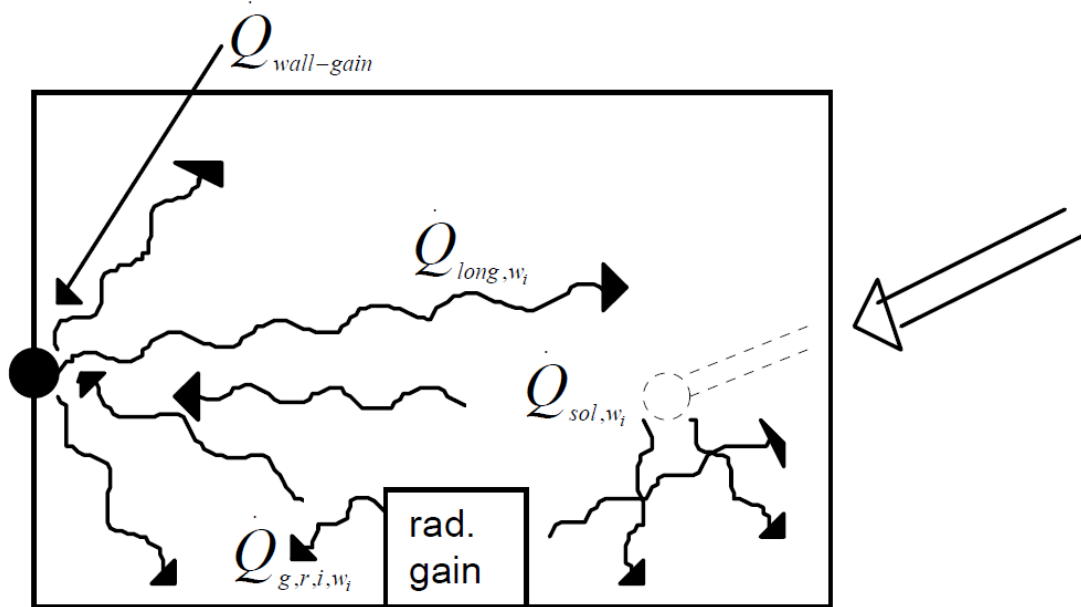


Figura 4.42 – Apporti energetici su parete (irraggiamento) [17].

Passiamo alla scrittura del bilancio energetico, relativo allo scambio termico per solo irraggiamento (figura 4.42), della generica parete  $i$ :

$$\dot{Q}_{r,wi} = \dot{Q}_{g,r,i,wi} + \dot{Q}_{sol,wi} + \dot{Q}_{long,wi} + \dot{Q}_{wall-gain} \quad \text{Eq. 4.5}$$

dove  $\dot{Q}_{r,wi}$  è il flusso termico radiativo verso il nodo che rappresenta la parete,  $\dot{Q}_{g,r,i,wi}$  è relativo agli apporti interni gratuiti radiativi,  $\dot{Q}_{sol,wi}$  è l'apporto solare verso la parete, causato dalla radiazione solare che ha attraversato le superfici trasparenti (vetrate),  $\dot{Q}_{long,wi}$  è la radiazione a onde lunghe (infrarosso) scambiata tra la parete  $i$  e le altre superfici della zona termica,  $\dot{Q}_{wall-gain}$  rappresenta l'eventuale apporto radiante, definito dall'utente, sul nodo che rappresenta la superficie.

❖ BILANCIO ENERGETICO N°3: SCAMBIO TERMICO su una PARETE

Gli scambi termici in una generica superficie, sia essa opaca o trasparente, sono riportati in maniera semplificata nella figura 4.43. Possiamo considerare la parete come costituita da due strati: quello esterno a temperatura  $T_{s,o}$  che si trova a contatto con l'aria ambiente alla temperatura  $T_{a,o}$  e che scambia calore per convezione ( $\dot{q}_{c,s,o}$ ) e irraggiamento ( $\dot{q}_{r,s,o}$ ); quello interno a temperatura  $T_{s,i}$  che scambia anch'esso con la zona termica, a temperatura  $T_i$ , del calore per convezione ( $\dot{q}_{c,s,i}$ ) e irraggiamento ( $\dot{q}_{r,s,i}$ ). Occorre inoltre considerare, in accordo con la 4.5, il flusso termico radiativo costituito dagli apporti solari e/o dagli apporti interni, che viene assorbito dalle due pareti  $S_{s,o}$  e  $S_{s,i}$ , dove ( $S_S = \dot{Q}_{g,r,i,wi} + \dot{Q}_{sol,wi}$ ). Per quanto riguarda il calore scambiato per conduzione, possiamo distinguere due flussi termici: il primo che avviene dalla superficie esterna verso il cuore della parete ( $\dot{q}_{s,o}$ ); l'altro ( $\dot{q}_{s,i}$ ) che dal cuore della parete va verso la superficie interna a contatto con la zona termica  $i$ .

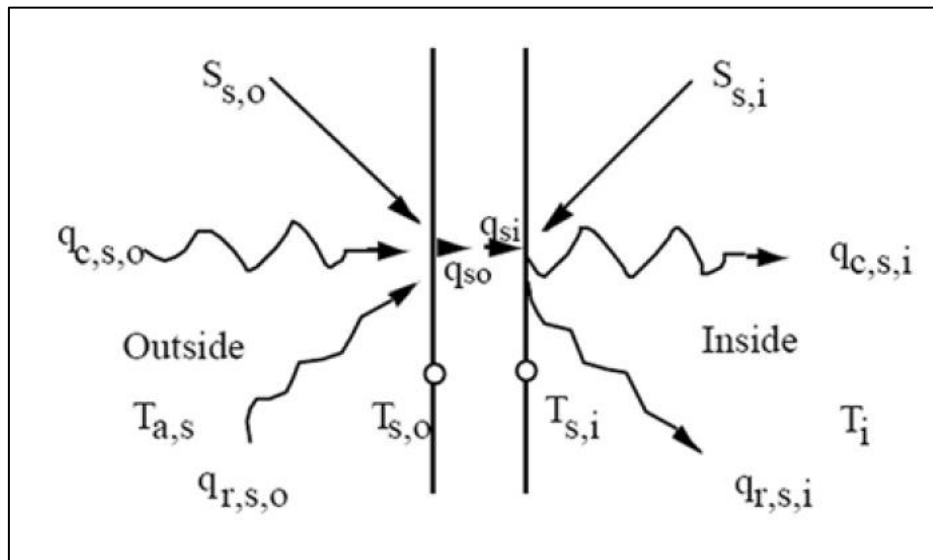


Figura 4.43 – Flussi di calore attraverso una superficie [17].

Il modello di parete appena descritto, viene modellato da TRNSYS utilizzando la metodologia delle funzioni di trasferimento (Mitalas e Arsenault [17]), ossia all'utilizzo di equazioni che legano lo scambio termico conduttivo con i valori delle temperature di parete, tramite delle serie di coefficienti numerici ( $a_s^k$ ,  $b_s^k$ ,  $c_s^k$ ,  $d_s^k$ ). In questo modo la parete viene vista come una scatola nera, trascurando il profilo di temperatura nel solido, descrivendone però la storia termica in termini di temperatura di parete e flusso termico entrante e uscente. Tali equazioni sono delle serie numeriche, vedi 4.6-7, il cui indice  $k$  indica l'istante temporale in cui è eseguita la valutazione,  $k=0$  per l'istante attuale,  $k=1$  per l'istante precedente, etc.

$$\dot{q}_{s,i} = \sum_{k=0}^{n_{bs}} b_s^k \cdot T_{s,o}^k - \sum_{k=0}^{n_{cs}} c_s^k \cdot T_{s,i}^k - \sum_{k=0}^{n_{ds}} d_s^k \cdot \dot{q}_{s,i}^k \quad \text{Eq. 4.6}$$

$$\dot{q}_{s,o} = \sum_{k=0}^{n_{as}} a_s^k \cdot T_{s,o}^k - \sum_{k=0}^{n_{bs}} b_s^k \cdot T_{s,i}^k - \sum_{k=0}^{n_{ds}} d_s^k \cdot \dot{q}_{s,i}^k \quad \text{Eq. 4.7}$$

L'utilizzo di questa tecnica è valido sia per le pareti opache che per quelle trasparenti (vetrate). In quest'ultimo caso il codice modella la vetrata come un muro senza massa, parzialmente trasparente alla radiazione solare ma opaco a quella a onde lunghe (infrarosso). Le equazioni 4.6-7 sono sempre valide ma i valori dei coefficienti diventano:

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

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

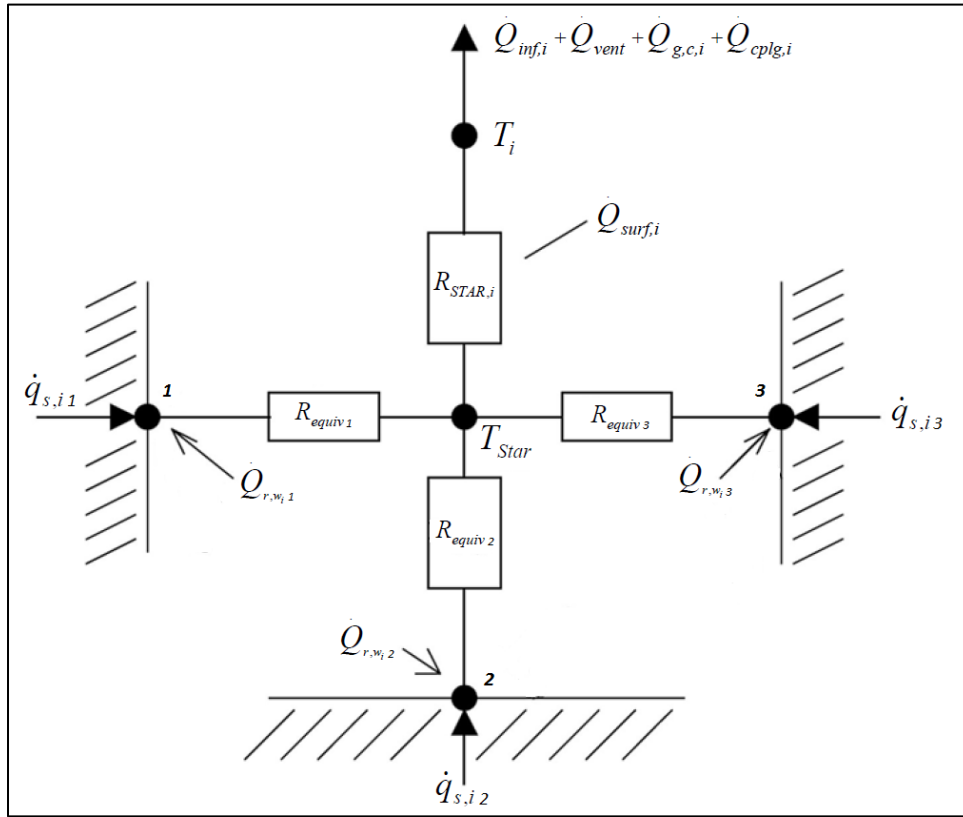
Per i dettagli sul comportamento termico e ottico delle finestre, data la complessità del problema che esula dalla nostra analisi, si rimanda il lettore alla consultazione della guida del codice [17].

La risoluzione del problema degli scambi termici (convettivi, radiativi e conduttivi) che interessano la zona termica, ossia il nodo  $i$ , si ottiene considerando contemporaneamente le informazioni contenute nelle equazioni 4.1 e 4.5-7. Come si può ben notare, tutto verte sul calcolo della quantità  $\dot{Q}_{surf,i}$ , che compare nella 4.1, e che può essere espressa con la seguente relazione:

$$\dot{Q}_{surf,i} = \frac{1}{R_{star,i}} \cdot (T_{star,i} - T_i) \quad \text{Eq. 4.8}$$



dove  $R_{star,i}$  è la resistenza termica interposta tra il nodo  $i$ , alla temperatura  $T_i$ , e il nodo fittizio  $star$ , alla temperatura  $T_{star,i}$ . L'utilizzo di questo nodo virtuale serve per semplificare il problema dello scambio termico convettivo e radiante tra pareti e aria, trasformandolo nella risoluzione di una rete di resistenze a stella come quella mostrata nell'esempio in figura 4.44. Dall'analisi della figura si può notare come questo approccio, consenta di modellare il problema fisico in maniera molto elegante: il nodo  $i$  scambia energia termica per sola convezione



( $\dot{Q}_{inf,i} + \dot{Q}_{vent} + \dot{Q}_{g,c,i} + \dot{Q}_{cplg,i}$ ) con l'ambiente esterno, altre zone termiche, o la stessa zona termica; inoltre si ha scambio termico convettivo ( $\dot{Q}_{surf,i}$ ) tra il nodo  $i$  e il nodo virtuale alla temperatura  $T_{star}$ . A sua volta il nodo virtuale scambia calore per sola convezione e irraggiamento con i nodi di parete alla temperatura  $T_s$  che a loro volta sono interessati da un apporto energetico dovuto all'irraggiamento, vedi 4.5 e figure 4.42-3, e alla conduzione di parete, risolta con l'accorgimento delle funzioni di trasferimento.

Figura 4.44 – Rete a stella per una zona con tre superfici [17].

Volendo considerare unitamente tutti i fenomeni fisici appena descritti, si può rielaborare l'equazione 4.8, riscrivendola in modo da evidenziare il legame con le temperature esterne alle pareti della zona termica, includendo così, oltre allo scambio termico convettivo, anche il fenomeno dello scambio termico per conduzione e irraggiamento:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{surf,i} = & \sum_{j=1}^{Adj. \ surface} \sum_{i=1}^{i \ to \ j} A_S \cdot B_{S1} \cdot T_{star,j} + \sum^{ext.surface} A_S \cdot B_S \cdot T_a + \sum^{int.walls} A_S \cdot B_{S1} \cdot T_{star,i} + \\ & + \sum^{known} \sum^{bound} A_S \cdot B_S \cdot T_{b,s} - \sum^{in \ zone \ i} \sum^{surface} A_S (C_S \cdot T_{star,i} - D_S - S_{S,i}) \end{aligned} \quad Eq. 4.9$$

in cui  $A_S$  è l'area della generica superficie  $S$ ,  $T_{star,j}$  è la temperatura del nodo virtuale sito nella zona termica  $j$  (adiacente alla zona  $i$  che stiamo esaminando),  $T_a$  è la temperatura dell'aria esterna,  $T_{b,s}$  è relativa ad una parete a cui sia stata assegnata la temperatura come condizione al contorno (Es. pavimento radiante). I valori degli altri coefficienti presenti nella 4.9 si ricavano tramite le seguenti relazioni:

$$B_S = \frac{e_s \cdot h_{s,o}}{(1-f_s)} \quad Eq. 4.10$$

$$B_{S1} = \frac{e_{s1}}{(1-f_s)} \left( \frac{1}{R_{equiv,i} \cdot A_{s,i}} \right) \quad Eq. 4.11$$

$$C_S = \frac{f_s}{(f_s-1)} \left( \frac{1}{R_{equiv,i} \cdot A_{s,i}} \right) \quad \text{Eq. 4.12}$$

$$D_S = \frac{f_s \cdot S_{s,i} + e_s \cdot (S_{s,o} - \dot{q}_{s,o}) + \dot{q}_{s,i}}{(1-f_s)} \quad \text{Eq. 4.13}$$

$$e_s = \frac{b_s^o}{a_s^o + h_{s,o}} \quad \text{Eq. 4.14}$$

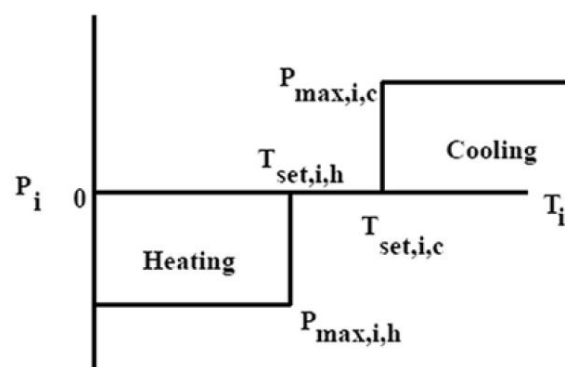
$$e_{s1} = \frac{b_s^o}{a_s^o + \frac{1}{R_{equiv,i} \cdot A_{s,i}}} \quad \text{Eq. 4.15}$$

$$f_s = (b_s^o \cdot e_s - c_s^o) R_{equiv,i} \cdot A_{s,i} \quad \text{Eq. 4.16}$$

dove  $h_{s,o}$  è il coefficiente di scambio termico convettivo della parete esterna,  $R_{equiv,i}$  è la resistenza termica presente tra il nodo virtuale **star** e la parete **s** considerata.

### CLIMATIZZAZIONE DELLA ZONA TERMICA

La strategia utilizzata da TRNSYS per il controllo della climatizzazione all'interno di una zona termica è esemplificata nella figura 4.45. La variabile di controllo è la temperatura della zona  $T_i$ , se essa rientra all'interno dell'intervallo di set-point delimitato dalla temperature  $T_{set,i,h}$  e  $T_{set,i,c}$ , rispettivamente estremo inferiore e superiore, allora non vi è necessita di far intervenire l'impianto e la temperatura  $T_i$  può fluttuare liberamente (Free-Floating). Nel caso la temperatura della zona  $T_i$  si porti al di sotto della  $T_{set,i,h}$ , interviene l'impianto di riscaldamento che somministra la potenza termica  $P_i$ , necessaria per far risalire la temperatura della zona fino al valore minimo accettabile di  $T_{set,i,h}$ . La situazione è speculare per la stagione estiva, se la  $T_i$  assume valori superiori a  $T_{set,i,c}$  interviene l'impianto di raffrescamento, che sottrarrà all'ambiente la potenza termica  $P_i$  fino a riportare la temperatura di zona al valore massimo consentito  $T_{set,i,c}$ . La convenzione disegno adottata dal codice prevede valori negativi per la potenza in riscaldamento e valori positivi per il raffrescamento. Qualora si voglia considerare la potenza dell'impianto installato nell'edificio reale, è possibile limitare i valori delle potenze di riscaldamento e raffrescamento a dei valori massimi scelti dall'utente ( $P_{max,i,h}$ ;  $P_{max,i,c}$ ).



**Figura 4.45 – Strategia di controllo della climatizzazione [17].**

#### ❖ TEMPERATURA CON FLUTTUAZIONE LIBERA (FREE-FLOATING)

Nel caso di fluttuazione libera della temperatura all'interno della zona termica, riscontrabile sia quando non vi è necessita di far intervenire l'impianto di climatizzazione sia per gli ambienti non climatizzati, è possibile scrivere la seguente relazione:

$$C_i \frac{d}{dt} T_i = \dot{Q}_i \quad \text{Eq. 4.17}$$

dove  $C_i$  non è nient'altro che la capacità termica della zona termica, espressa in J/K.

Per poter passare da una formulazione differenziale ad una alle differenze finite, possiamo metter in relazione il termine  $T_i$  con i valori all'inizio ( $T_{i,\tau-\Delta t}$ ) e alla fine ( $T_{i,\tau}$ ) del passo temporale  $\Delta t$ , ipotizzando un andamento delle temperature lineare:

$$T_i = \frac{T_{i,\tau} + T_{i,\tau-\Delta t}}{2} \quad \text{Eq. 4.18}$$

Unendo le equazioni 4.1, 4.8, 4.9, 4.17-18 ed estendendo la trattazione a tutte le zone termiche che compongono l'edificio, si perviene ad un set di equazioni lineari, le cui incognite sono i valori medi delle temperature nei nodi della zona  $\bar{T}$  e in quelli virtuali  $\bar{T}_{star}$ . La risoluzione di questo problema si può dimostrare riconducibile alla soluzione di una matrice avente la seguente forma:

$$[X][\bar{T}] = [Z] \Rightarrow \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} \\ X_{21} & X_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{T} \\ \bar{T}_{star} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 4.19}$$

dove

$$X_{11,ii} = \left( \sum^{i \text{ to } j}_{\text{surface}} \dot{m}_{cplg,s} + \dot{m}_{inf,i} + \sum_k^{n \text{ vent}} \dot{m}_{vent,k,i} \right) \cdot C_p + \frac{2C_i}{\Delta t} + \frac{1}{R_{star,i}} + \sum^{\text{known bound}} \dot{m}_{cplg,i} \cdot C_p \quad \text{Eq. 4.20}$$

$$X_{11,ij} = - \sum_{j=1}^{\text{Adj. surface}} \sum_{i=1}^{i \text{ to } j} \dot{m}_{cplg,s} \cdot C_p \quad \text{per } i \neq j \quad \text{Eq. 4.21}$$

$$X_{12,ii} = X_{21,ii} = - \frac{1}{R_{star,i}} \quad \text{Eq. 4.22}$$

$$X_{12,ij} = X_{21,ij} = 0 \quad \text{per } i \neq j \quad \text{Eq. 4.23}$$

$$X_{22,ii} = - \sum^{\text{int.walls}} A_S \cdot B_{S1} - \sum^{\text{in zone } i}_{\text{surface}} A_S \cdot C_S + \frac{1}{R_{star,i}} \quad \text{Eq. 4.24}$$

$$X_{22,ij} = - \sum_{j=1}^{\text{Adj. walls}} \sum_{i=1}^{i \text{ to } j} A_S \cdot B_{S1} \quad \text{Eq. 4.25}$$

$$Z_{1,i} = \dot{m}_{inf,i} \cdot C_p \cdot T_a + \sum^{\text{known bound}} \dot{m}_{cplg,i} \cdot C_p \cdot T_{b,s} + \sum_k^{n \text{ vent}} \dot{m}_{vent,k,i} \cdot C_p \cdot T_{v,k} + \frac{2C_i \cdot T_{i,\tau-\Delta t}}{\Delta t} + \dot{Q}_{g,c,i} \quad \text{Eq. 4.26}$$

$$Z_{2,i} = \left( \sum^{\text{ext.surface}} A_S \cdot B_S \right) \cdot T_a + \sum^{\text{known bound}} A_S \cdot B_S \cdot T_{b,s} + \sum^{\text{in zone } i}_{\text{surface}} A_S (D_S + S_{S,i}) \quad \text{Eq. 4.27}$$

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

$$[\bar{T}] = [X]^{-1}[Z] \quad \text{Eq. 4.28}$$

#### ❖ RISCALDAMENTO E RAFFRESCAMENTO

Nel caso l'impianto di climatizzazione sia acceso, la 4.17 dev'essere riscritta per tenere conto della potenza necessaria per il riscaldamento o il raffrescamento.

$$C_i \frac{d}{dt} T_i = \dot{Q}_i - P_i \quad \text{Eq. 4.29}$$

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

$$[\bar{T}'] = [X']^{-1}[Z'] \quad \text{Eq. 4.30}$$

occorre in questo caso distinguere due diverse possibilità: nella prima, in cui l'impianto è alla sua potenzialità massima ( $P_{max,i,h}$  oppure  $P_{max,i,c}$ ) e la temperatura della zona cade all'esterno dell'intervallo di set-point (estremi compresi), si ha una condizione di temperatura fluttuante; nel secondo scenario l'impianto funziona al di sotto della sua potenza massima e la temperatura dell'ambiente è da considerarsi pari esattamente a  $T_{set,i,h}$  o  $T_{set,i,c}$ , la prima per il riscaldamento e l'ultima per il raffreddamento. Per il primo caso, impianto alla massima potenza e temperatura fluttuante, valgono le seguenti relazioni:

$$X'_{ij} = X_{ij} \quad \text{per tutte le } i \text{ e } j \quad \text{Eq. 4.31}$$

$$Z'_i = Z_i + P_{max,i,h} \quad \text{oppure} \quad Z'_i = Z_i - P_{max,i,c} \quad \text{Eq. 4.32}$$

Per il secondo caso, potenza dell'impianto inferiore alla massima e temperature uguali a quelle di set-point, alcuni elementi della matrice subiscono, rispetto al caso con temperatura fluttuante, la seguente modifica:

$$[\bar{T}'] = \begin{bmatrix} P_i \\ \bar{T}_{star} \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 4.33}$$

$$X'_{11,ii} = 1 \quad \text{Eq. 4.34}$$

$$X'_{21,ii} = 0 \quad \text{Eq. 4.35}$$

$$Z'_{2,i} = Z_{2,i} - X_{11,ii} \cdot T_{req,i} \quad \text{Eq. 4.36}$$

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

$$T_{req,i} = \frac{T_{set,i} + T_{i,\tau-\Delta t}}{2} \quad \text{Eq. 4.37}$$

La procedura di calcolo utilizzata dal codice prevede un primo calcolo effettuato come se si trattasse di un caso di free-floating puro (set di equazioni 4.19-28), al termine del quale si effettua un controllo sul valore di temperatura  $T_i$ . Se il valore ottenuto non rientra nell'intervallo desiderato il codice effettua un secondo calcolo, valutando l'ammontare del riscaldamento e raffreddamento necessario. Se questi valori sono superiori ai limiti di potenza dell'impianto è necessario un terzo calcolo con temperatura fluttuante, utilizzando le equazioni 4.31-32. A seconda della strategia di controllo impostata dall'utente, sarà quindi il codice stesso a scegliere i valori degli elementi della matrice ( $X'$ ,  $Z'$ ) che più si adattano al problema modellato.

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

$$M_{eff,i} \frac{d\omega_i}{dt} = \dot{m}_{inf,i} (\omega_a - \omega_i) + \sum_k^{n_{vent}} \dot{m}_{vent,k,i} (\omega_{vent} - \omega_i) + W_{g,i} + \sum_{i=1}^{i \text{ to } j}^{surface} \dot{m}_{cplg,s} (\omega_j - \omega_i) \quad \text{Eq. 4.38}$$

dove  $M_{eff,i}$  è la capacitanza termica (latente) effettiva della zona,  $\omega_i$  l'umidità assoluta della zona termica,  $\omega_a$  l'umidità assoluta dell'aria esterna,  $\omega_{vent}$  l'umidità assoluta dell'aria utilizzata per effettuare la ventilazione

forzata,  $W_{g,i}$  sono gli apporti termici gratuiti di calore latente,  $\omega_j$  l'umidità assoluta relativa all'aria presente nella zona termica j-esima

La 4.38 viene risolta tramite una subroutine del codice TRNSYS, chiamata DIFFEQ, che permette di calcolare il valore dell'umidità assoluta all'interno della zona termica. La gestione dell'umidità relativa è effettuata nello stesso modo di quello della temperatura, si verifica se il valore ricade o meno all'interno dell'intervallo delimitato dai due valori di set-point. Se l'umidità relativa è minore del limite inferiore occorrerà apportare del carico latente umidificando l'aria, nel caso il valore sia compreso nei limiti si ha una situazione di umidità in fluttuazione libera (free-floating), infine, se l'umidità relativa è maggiore del limite superiore si deumidifica l'ambiente sottraendo carico latente. La quantità di calore latente, positiva per la deumidificazione e negativa per l'umidificazione, da somministrare o sottrarre all'ambiente ( $\dot{Q}_{lat,i}$ ) viene valutata tramite la seguente espressione:

$$\dot{Q}_{lat,i} = h_v \left( \dot{m}_{inf,i}(\omega_a - \omega_{req,i}) + \sum_k^n \dot{m}_{vent,k,i}(\omega_{vent} - \omega_{req,i}) + W_{g,i} + \sum_{i=1}^{surface\ to\ j} \dot{m}_{cplg,s}(\omega_{j,\tau-\Delta t} + \omega_{i,\tau-\Delta t}) - \frac{M_{eff,i}(\omega_{req,i} - \omega_{i,\tau-\Delta t})}{\Delta t} \right) \tag{Eq. 4.39}$$

con  $h_v$  che indica il calore latente di vaporizzazione dell'acqua, e  $\omega_{req,i}$  che rappresenta il valore di set-point in umidificazione o deumidificazione.

### 4.3 RISULTATI OTTENUTI

In questo paragrafo saranno presentati i risultati della simulazione dinamica dell'AOB effettuata con TRNSYS. I risultati saranno presentati seguendo il seguente ordine: consumi globali di energia termica; consumi energetici per piano; analisi delle potenze di picco.

#### 4.3.1 CONSUMI GLOBALI DI ENERGIA TERMICA

Nella tabella 4.26 e in figura 4.46 è riportato il consumo annuale di energia termica, suddiviso in riscaldamento e raffrescamento, per l'intera struttura dell'AOB. Si riporta inoltre il consumo specifico, in kWh/m<sup>3</sup>, di energia termica per unità di volume riscaldato. A fronte di un impiego globale di energia termica pari a 9'361 MWh, si ha la seguente distribuzione dei consumi: 2/3 per il carico di riscaldamento (6'021 MWh); il restante 1/3 è necessario per raffrescamento (3'340 MWh).

CONSUMI TERMICI dell'AOB		
Riscaldamento sensibile	5'815.7	MWh
Riscaldamento latente	205.7	MWh
<b>Riscaldamento totale</b>	<b>6'021.5</b>	<b>MWh</b>
Raffrescamento sensibile	1'403.7	MWh
Raffrescamento latente	1'936.1	MWh
<b>Raffrescamento totale</b>	<b>3'339.8</b>	<b>MWh</b>
CONSUMI SPECIFICI dell'AOB		
Riscaldamento specifico	31.04	kWh/m <sup>3</sup>
Raffrescamento specifico	17.21	kWh/m <sup>3</sup>

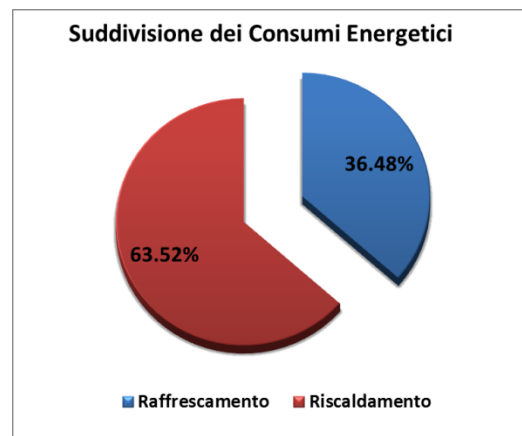


Tabella 4.26 - Figura 4.46 - Consumi energetici annuali per riscaldamento e raffrescamento.

Il 97% dell'energia necessaria per il riscaldamento, circa 5'816 MWh, serve per soddisfare il carico sensibile; il fabbisogno richiesto per l'umidificazione dell'aria negli ambienti rappresenta soltanto una modesta frazione del totale. Nel caso del raffrescamento il carico termico è così suddiviso: il 42%, pari a 1'404 MWh, è necessario per il carico sensibile; il restante 58%, corrispondente a 1'936 MWh, serve per la deumidificazione dell'aria negli ambienti.

Nella figura 4.47 è riportato l'andamento mensile dei consumi per riscaldamento e raffrescamento. Nel mese di gennaio si registrano i maggiori consumi di energia per riscaldamento, 1'389 MWh. La maggior parte del fabbisogno termico è concentrata nei mesi da dicembre a marzo; con un consumo di 4'721 MWh essi rappresentano il 79% del consumo annuo totale per riscaldamento. Il mese con il maggior carico termico per raffrescamento è agosto, 914 MWh. Il 75% del carico termico estivo è concentrato nei mesi che vanno da giugno a settembre. I consumi mensili per riscaldamento e raffrescamento sono stati ricavati sommando algebricamente le diverse voci che compongono il bilancio energetico (tabella 4.27 e figura 4.48). Il codice Trnsys permette di individuare le seguenti voci di consumo: scambi termici superfici-aria delle zone termiche; ventilazione; apporti interni gratuiti; calore latente totale. Il primo termine considera tutti gli scambi termici conduttivi e convettivi tra le superfici trasparenti-opache e l'aria contenuta all'interno della zona termica. In questo termine sono quindi presenti le dispersioni di calore verso l'esterno e gli apporti solari interni ed esterni. Il secondo termine, ventilazione, tiene conto dell'energia associata ai volumi d'aria di ricambio espulsa e reintegrata dall'ambiente esterno. Gli apporti interni gratuiti considerano il calore sensibile generato dalle persone e dai macchinari presenti nella struttura. Il calore latente totale è costituito dall'energia necessaria per gli interventi di umidificazione e deumidificazione e dagli apporti interni gratuiti di calore latente, generati prevalentemente dalle persone presenti nell'edificio.

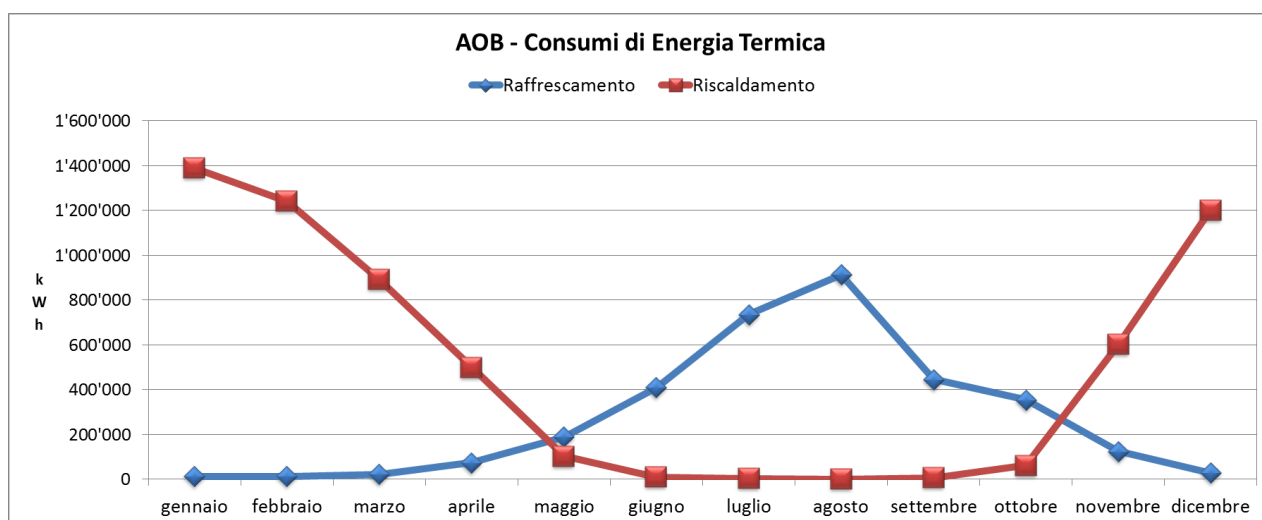


Figura 4.47 - Consumi energetici mensili per riscaldamento e raffrescamento.

Tabella 4.27 - Consumi mensili con bilancio energetico.

Energia Termica mensile per Riscaldamento e Raffrescamento												
Energia Termica [MWh]	gennaio	febbraio	marzo	aprile	maggio	giugno	luglio	agosto	settembre	ottobre	novembre	dicembre
Riscaldamento	1'389.0	1'240.2	891.1	498.8	101.8	8.6	2.3	0.3	6.0	61.3	601.9	1'200.9
Raffrescamento	12.4	12.2	22.6	74.0	189.2	409.8	734.7	913.6	445.8	354.1	123.6	28.7
Scambi Superfici-Aria	-139	-92	15	110	142	194	240	254	217	149	12	-122
Ventilazione	-1551	-1399	-1211	-927	-537	-317	-144	-80	-404	-506	-935	-1396
Apporti Interni	341	308	341	330	341	330	341	341	330	341	330	341
Calore Latente Totale	-28	-45	-14	62	141	194	296	398	296	309	115	5

Nella figura seguente sono riportate le varie voci che compongono il bilancio termico dell'AOB.

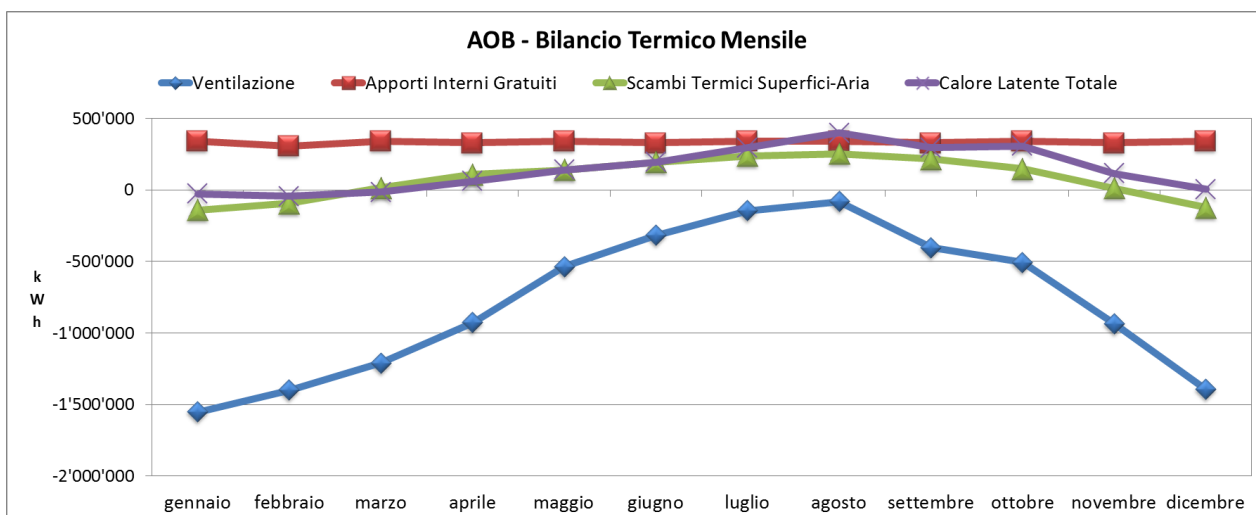


Figura 4.48 - Voci che compongono il bilancio energetico.

La ventilazione (ricambi d'aria) è la voce che più incide sul consumo energetico, essa infatti rappresenta il principale contributo al fabbisogno termico dei mesi invernali, superando di quasi un ordine di grandezza la somma algebrica delle altre tre voci che compongono il bilancio. Al contrario, nel periodo estivo, la ventilazione gioca un ruolo poco incisivo, che, essendo di segno negativo, contribuisce marginalmente al raffreddamento degli ambienti. Nel periodo tra dicembre e febbraio, la voce "scambi termici superfici-aria" presenta valori negativi, ciò è dovuto alla predominanza delle dispersioni rispetto agli apporti solari. Nel restante periodo dell'anno, in particolare tra maggio e ottobre, gli apporti solari superano le dispersioni, causando un carico termico che dovrebbe essere smaltito dall'impianto di condizionamento. È importante notare l'andamento della curva concernente il calore latente totale; essa dà contributi rilevanti al carico termico tra il mese di giugno e quello di ottobre, mentre nella restante parte dell'anno il suo contributo al carico/fabbisogno termico è sostanzialmente inferiore, se non trascurabile, rispetto a quello delle altre voci del bilancio.

### 4.3.2 CONSUMI ENERGETICI PER PIANO

Tabella 4.28 - Analisi dei consumi energetici per piano.

Si analizzi ora il consumo di energia termica nei vari piani che compongono la struttura. Nella tabella 4.28 e figura 4.49 sono riportati i consumi di energia termica per riscaldamento e raffreddamento, l'incidenza dei consumi sul totale e il valore di consumo specifico per ciascun piano dell'ospedale. Dalla figura 4.49 si evince chiaramente come la distribuzione dei consumi all'interno della struttura non sia omogenea, la causa di ciò va ricercata sia

Piani	Riscaldamento			Raffreddamento		
	Consumo	Incidenza	C. Specifico	Consumo	Incidenza	C. Specifico
11° Piano	121	2%	28.8	59	2%	14.0
10° Piano	227	4%	30.1	113	3%	15.0
9° Piano	246	4%	29.5	136	4%	16.2
8° Piano	275	5%	32.3	145	4%	17.0
7° Piano	294	5%	34.2	156	5%	18.2
6° Piano	334	6%	36.4	177	5%	19.3
5° Piano	613	10%	54.8	320	10%	28.6
4° Piano	252	4%	28.9	132	4%	15.2
3° Piano	318	5%	39.3	153	5%	19.0
2° Piano	307	5%	33.1	131	4%	14.1
1° Piano	469	8%	23.2	306	9%	15.2
Piano Piastra	1'082	18%	27.7	573	17%	14.7
Piano Seminterrato	1'362	23%	30.4	809	24%	18.1
Torre-Hall	121	2%	19.1	129	4%	20.4
<b>TOTALE AOB</b>	<b>6'021</b>	<b>100%</b>	<b>31.0</b>	<b>3'340</b>	<b>100%</b>	<b>17.2</b>
	<i>MWh</i>	<i>%</i>	<i>kWh/m<sup>3</sup></i>	<i>MWh</i>	<i>%</i>	<i>kWh/m<sup>3</sup></i>

nella diversa distribuzione delle volumetrie, sia alle diverse attività che vengono svolte nei vari piani. Il 60% dei consumi termici è, infatti, concentrato in soli quattro (5° piano; 1° piano; piano piastra; seminterrato) dei quattordici livelli totali in cui è stata suddivisa la struttura.

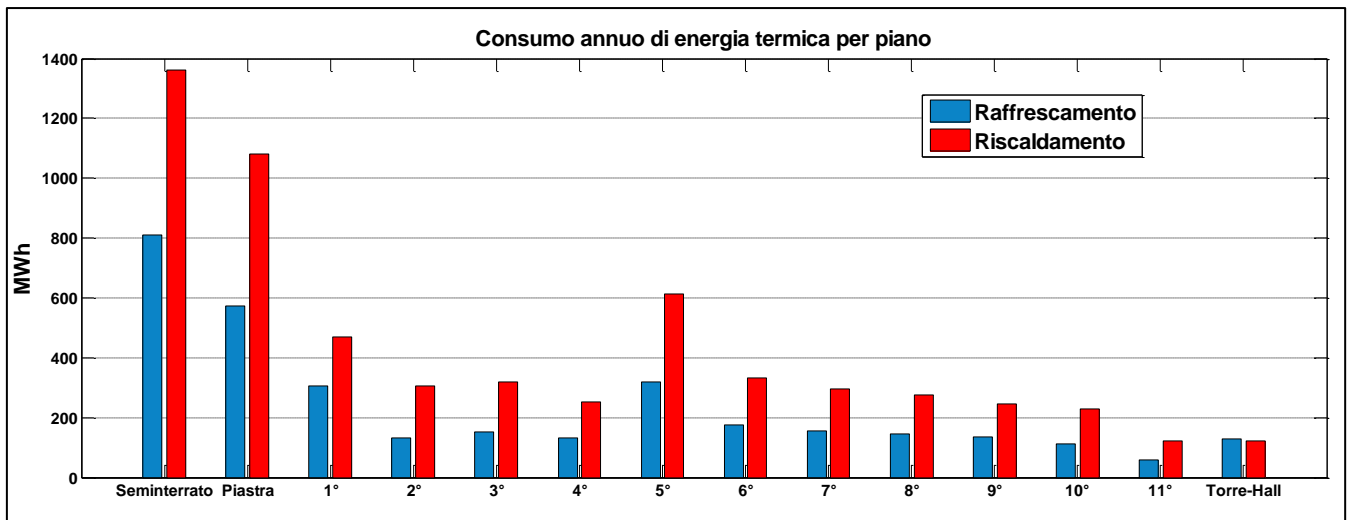


Figura 4.49 - Consumi termici, riscaldamento e raffrescamento, per ogni piano.

Per capire se la differenza nei consumi è dovuta soltanto alla diversa volumetria, o se bisogna ricercare altre cause, occorre analizzare i consumi specifici riportati in figura 4.50. Si possono notare diversi piani che si discostano sensibilmente dal valore medio di circa 31 kWh/m<sup>3</sup> (linea rossa). Ciò è dovuto alle particolari condizioni termo-igrometriche legate alle attività svolte. Nel 5° piano sono allocati i quattro blocchi operatori principali che servono l'ospedale; nel 3° piano si trovano le sale parto e i reparti neonatali che richiedono temperature maggiori del resto dell'ospedale. Al 1° piano, un'intera ala è dedicata agli uffici e ai servizi non sanitari per il pubblico, mentre il blocco Torre-Hall funge da zona di collegamento tra le varie parti dell'ospedale. Ciò comporta, per gli ultimi due casi esaminati, un consumo minore per il riscaldamento, dovuto a condizioni termo-igrometriche meno gravose.

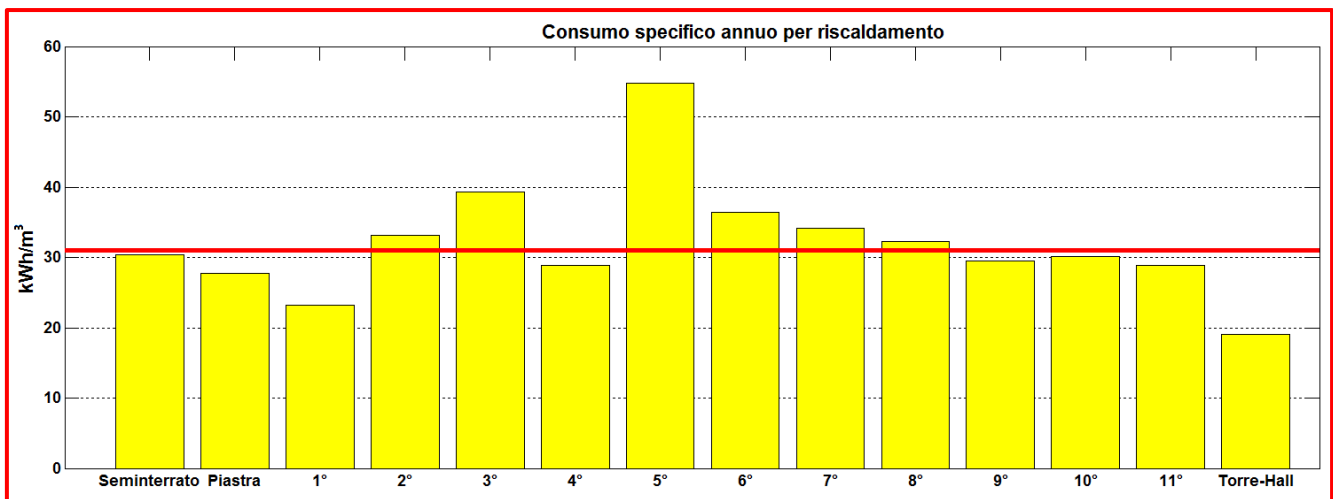


Figura 4.50 - Consumi specifici per piano (Riscaldamento).

Un'analisi simile alla precedente può essere condotta per i carichi di raffrescamento, vedi figura 4.51. Anche in questo caso il 5° piano è quello che, a causa delle sale operatorie, presenta i consumi maggiori. Si noti una differenza sostanziale, rispetto al grafico precedente, nella zona Torre-Hall. Mentre per il riscaldamento tale zona registrava i minori consumi, per il raffrescamento possiamo notare dei consumi superiori alla media (linea blu). Ciò è dovuto alla presenza di diverse superfici vetrate che aumentano gli apporti solari e di riflesso un aumento della richiesta di energia termica frigorifera. Il piano seminterrato presenta dei valori di consumo leggermente superiori



alla media, nonostante gli apporti solari siano in pratica nulli. Ciò è dovuto alla presenza della Morgue, caratterizzata da un elevato carico frigorifero necessario per mantenere le basse temperature (< 18°C) e gli elevati valori di ricambio d'aria necessari per garantire le condizioni igieniche adeguate.

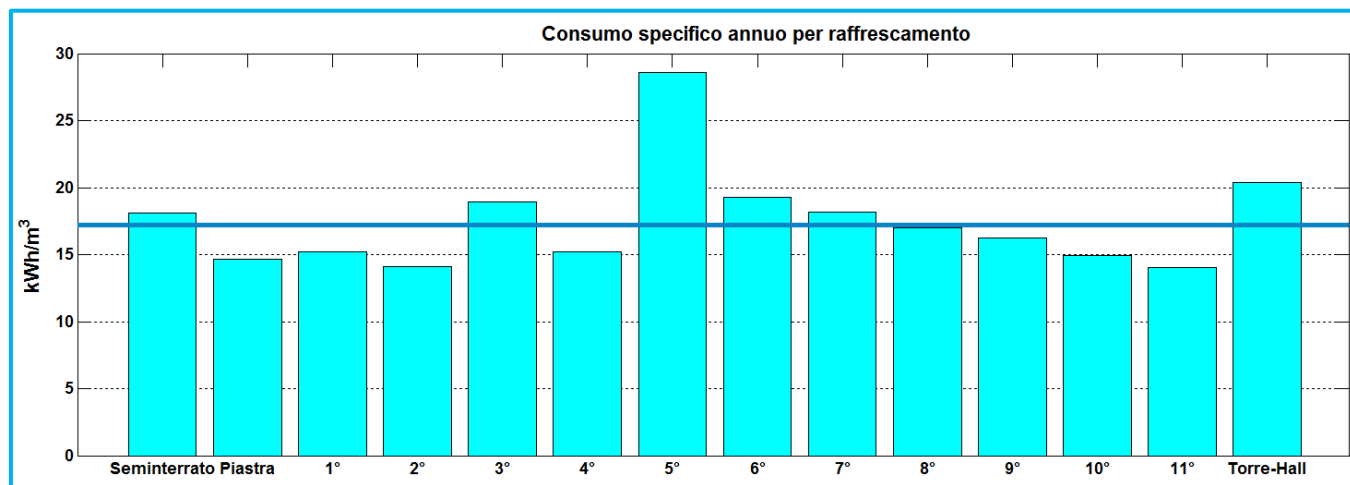


Figura 4.51 - Consumi specifici per piano (Raffrescamento).

### 4.3.3 ANALISI DELLE POTENZE DI PICCO

Saranno ora presentati i risultati che si riferiscono alle potenze di picco per riscaldamento e raffrescamento. Nella tabella 4.29 e figura 4.52 riportiamo i valori ottenuti, specificando anche il giorno e l'ora di picco, con le relative condizioni atmosferiche registrate in quell'istante temporale. L'analisi delle potenze di picco mostra una sostanziale equivalenza tra carico per riscaldamento e frigorifero. Il carico di picco per riscaldamento è di 4.44 MW, e si registra nella metà di febbraio, nelle ore immediatamente precedenti l'alba. Il carico di picco per raffrescamento è di 4.65 MW, e si registra nella seconda metà di luglio, nelle prime ore del pomeriggio. Mentre nel riscaldamento il carico latente incide poco sulla potenza di picco, meno del 12%, nel raffrescamento, il carico latente per deumidificazione richiede il 37% della potenza totale di picco (1'719 kW).

AOB - Potenze di Picco			
	Riscaldamento	Raffrescamento	U.M.
Potenza tot.	4'442	4'650	kW
Carico Sensibile	3'926	2'931	kW
Carico Latente	516	1'719	kW
Data	15 Febbraio	21 Luglio	
Ora	6:00-7:00	15:00-16:00	
T. esterna	1.3	36.9	°C
U. relativa	94	46	%
P. atmosferica	101.0	101.2	kPa
Vento	7.7	2.2	m/s

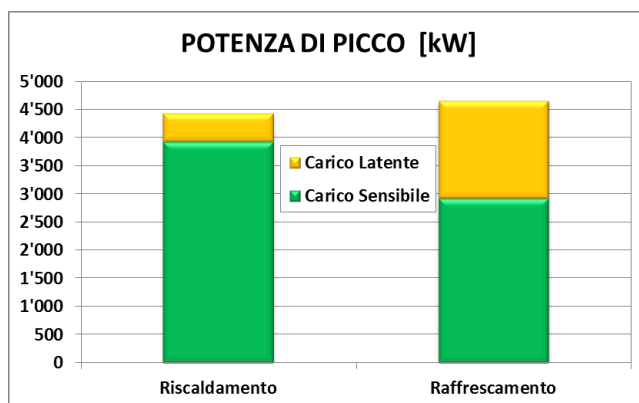


Tabella 4.29 – Figura 4.52 - Potenze di Picco dell'intero AOB.

Nella tabella 4.30 sono riportati i valori delle potenze di picco per i singoli piani. L'incidenza percentuale è pressoché identica a quella dei consumi (vedi tabella 4.28) e anche in questo caso circa il 57% della potenza totale è da attribuirsi ai seguenti piani: 5°; 1°; piano piastra; seminterrato.

Tabella 4.30 - Potenze di picco di ogni singolo piano e loro incidenza.

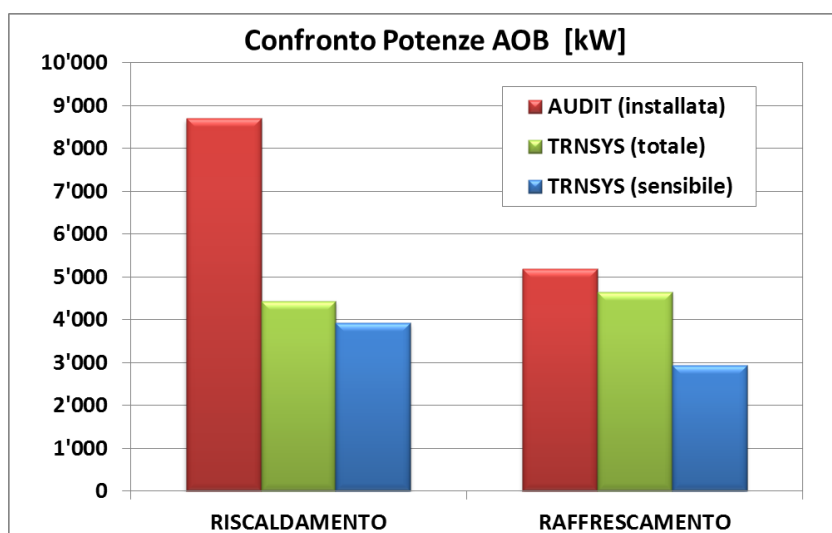
Piani	Riscaldamento		Raffrescamento	
	P. Picco	Incidenza	P. Picco	Incidenza
11° Piano	94	2%	95	2%
10° Piano	176	4%	179	4%
9° Piano	198	4%	209	4%
8° Piano	213	5%	221	5%
7° Piano	222	5%	233	5%
6° Piano	247	6%	258	6%
5° Piano	422	9%	441	9%
4° Piano	196	4%	205	4%
3° Piano	229	5%	233	5%
2° Piano	228	5%	221	5%
1° Piano	372	8%	410	9%
Piano Piastra	813	18%	862	19%
Piano Seminterrato	933	21%	907	20%
Torre-Hall	100	2%	179	4%
<b>TOTALE AOB</b>	<b>4'442</b>	<b>100%</b>	<b>4'650</b>	<b>100%</b>
	<i>kW</i>	<i>%</i>	<i>kW</i>	<i>%</i>

#### 4.4 CONFRONTO RISULTATI SIMULAZIONE-AUDIT

In questo paragrafo confronteremo i risultati ottenuti tramite TRNSYS con quelli dell'audit energetico (vedi capitoli precedenti). La prima verifica riguarderà le potenze termiche installate e i carichi di picco, la seconda verterà sui consumi termici annuali e mensili per riscaldamento e raffrescamento.

##### 4.4.1 POTENZE TERMICHE

Nella figura e tabella seguenti sono riportati i valori delle potenze termiche installate nell'AOB e le potenze di picco ottenute con la simulazione dinamica.



RISCALDAMENTO [kW]	
Potenza Installata nell'AOB	8'700
Potenza di Picco (carico sensibile)	3'926
Potenza di Picco (carico totale)	4'442
RAFFRESCAMENTO [kW]	
Potenza Installata nell'AOB	5'188
Potenza di Picco (carico sensibile)	2'931
Potenza di Picco (carico totale)	4'650

Figura 4.53 – Tabella 4.31 - Confronto tra potenze termiche installate e risultati simulazioni.

La potenza delle caldaie, che devono soddisfare anche il carico per l'acqua calda sanitaria, è quasi il doppio della potenza di picco calcolata, garantendo un ampio margine di riserva. Considerando il carico di raffrescamento globale, costituito da quello sensibile e latente, la potenza delle macchine frigorifere è superiore a quella di picco soltanto del 10%.

**4.4.2 CONSUMI ANNUALI E MENSILI**

Per confrontare i risultati dell’audit con quelli delle simulazioni è necessario elaborare ulteriormente entrambi i dati in modo che il confronto sia fatto sulle stesse basi e ipotesi modellistiche. Le modifiche effettuate sono di seguito illustrate.

Nel modello implementato su TRNSYS, il calcolo del calore latente non considera le operazioni di sotto-raffreddamento e postriscaldamento necessarie agli impianti reali per effettuare la deumidificazione degli ambienti, occorre sottrarre tale quantità ai risultati dell’audit. Si è pertanto proceduto nel seguente modo: è stato valutato l’ammontare dell’energia necessaria per il postriscaldamento, prendendo come riferimento il valore di riscaldamento rilevato nel mese di agosto, 94’289 kWh. Questa quantità è stata utilizzata come base per calcolare la quantità di calore sottrarre ai carichi di riscaldamento e raffrescamento nel periodo da Maggio a Ottobre, pesando opportunamente i valori ottenuti per tener conto delle variazioni mensili di carico frigorifero. Inoltre nell’AOB, l’umidificazione degli ambienti viene effettuata esclusivamente nei reparti critici con sistemi alimentati elettricamente, il cui consumo non è stato possibile quantificare e di conseguenza inserire nei risultati dell’audit. Pertanto, dai valori ottenuti tramite simulazione con TRNSYS è stata sottratta la quota di calore latente necessaria per l’umidificazione degli ambienti. Occorre inoltre considerare che nell’AOB sono presenti diversi recuperatori di calore che agiscono su diversi impianti di aria primaria. Tenendo conto dell’utilizzo che ne viene fatto, si è stimata la prestazione di questi impianti, considerando il recupero di 1/10 del calore sensibile legato alla ventilazione. Tale calore recuperato è sottratto ai fabbisogni termici invernali e al carico termico estivo, escludendo i mesi che vanno da Maggio a Ottobre per il riscaldamento e i mesi da Novembre a Maggio per il raffrescamento.

I risultati della simulazione non tengono conto del funzionamento degli impianti e conseguentemente dei rendimenti di distribuzione, emissione e regolazione. Poiché le misurazioni sono effettuate a valle degli impianti di produzione dell’energia termica, il rendimento di generazione è trascurato. Considerando le tipologie d’impianti utilizzati nella struttura e i dati di letteratura [24] [25] [26], sono stati ipotizzati i seguenti valori di rendimento:

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

da cui deriva un rendimento globale che varia tra il 76-88%. Nello sviluppo dei calcoli è stato adottato il valore intermedio dell’82%. Tenendo conto di questo parametro, che comporta una maggiorazione dei risultati delle simulazioni, si può ritenere il confronto con i dati dell’audit più realistico.

**Tabella 4.32 - Confronto dei consumi termici, mensili e annuali, tra le simulazioni e l’audit.**

MESI	RISCALDAMENTO [kWh]		RAFFRESCAMENTO [kWh]	
	AUDIT	TRNSYS	AUDIT	TRNSYS
GENNAIO	1'058'870	1'456'302	78'081	15'083
FEBBRAIO	953'676	1'272'398	58'600	14'928
MARZO	809'073	895'820	86'800	27'543
APRILE	501'257	484'260	177'802	90'223
MAGGIO	178'980	116'233	280'657	230'756
GIUGNO	54'789	5'493	780'172	461'040
LUGLIO	21'183	18	1'218'998	878'404
AGOSTO	0	9	1'361'680	1'104'374
SETTEMBRE	43'376	5'283	811'157	494'384
OTTOBRE	156'734	73'457	399'724	370'153
NOVEMBRE	441'674	612'503	230'473	150'693
DICEMBRE	954'006	1'265'800	76'587	34'980
<b>TOTALE</b>	<b>5'173'619</b>	<b>6'187'576</b>	<b>5'560'731</b>	<b>3'872'561</b>

Nella tabella 4.32 sono stati riportati i valori mensili e annuali del consumo per riscaldamento e raffrescamento ottenuti con le simulazioni e con l'audit. Nella figura 4.54 è rappresentato il confronto dei consumi annuali tra caso simulato e dati reali. Il confronto dei risultati mostra come i valori di consumo annuali ottenuti con le simulazioni dinamiche, rispetto ai risultati dell'audit energetico, siano superiori di circa il 20% per il riscaldamento (+19.6%) e inferiori del 30% per il raffrescamento (-30.36%).

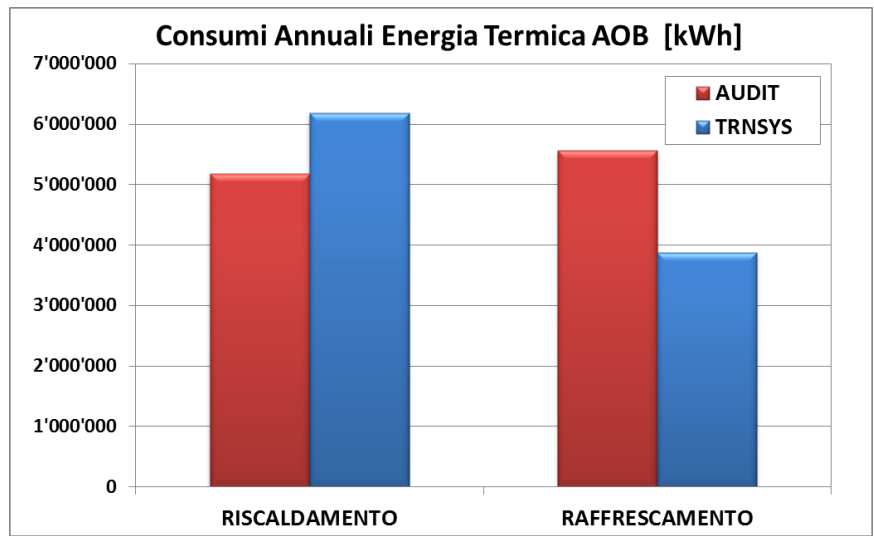


Figura 4.54 - Confronto consumi termici annuali simulazioni-audit.

Nelle figure 4.55 - 56 sono riportati i grafici con il confronto dei valori mensili di riscaldamento e raffrescamento. Così come succede per i valori annuali, anche in quelli mensili i dati di audit sono differenti da quelli simulati, seppur le curve mostrino lo stesso andamento, in particolar modo con la disposizione dei picchi di consumo minimo e massimo.

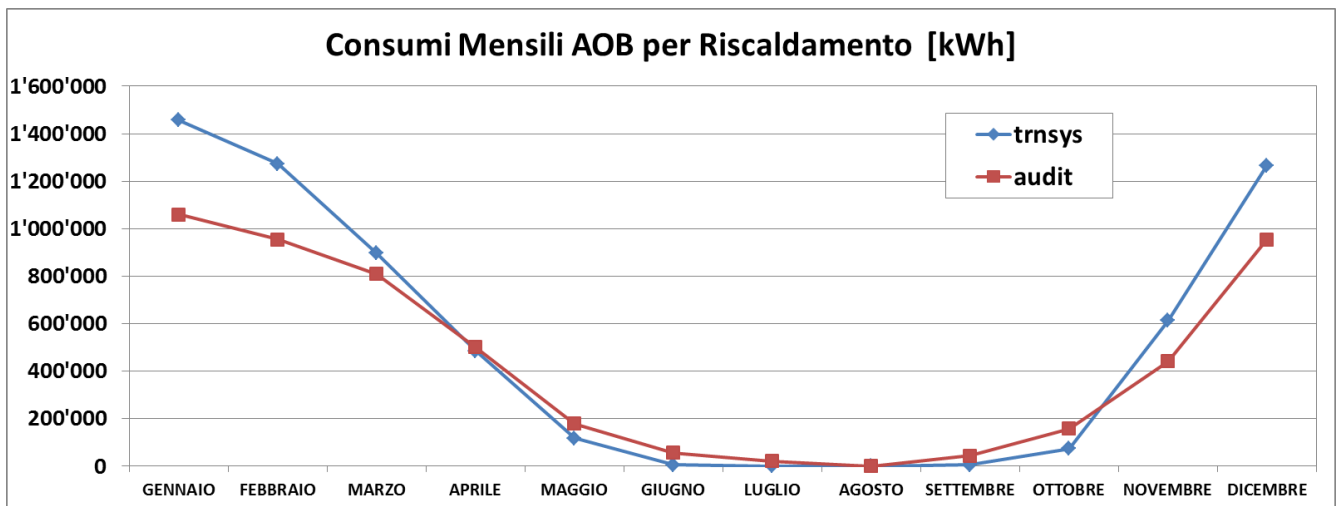


Figura 4.55 - Confronto tra le simulazioni e l'audit sui consumi mensili per riscaldamento.

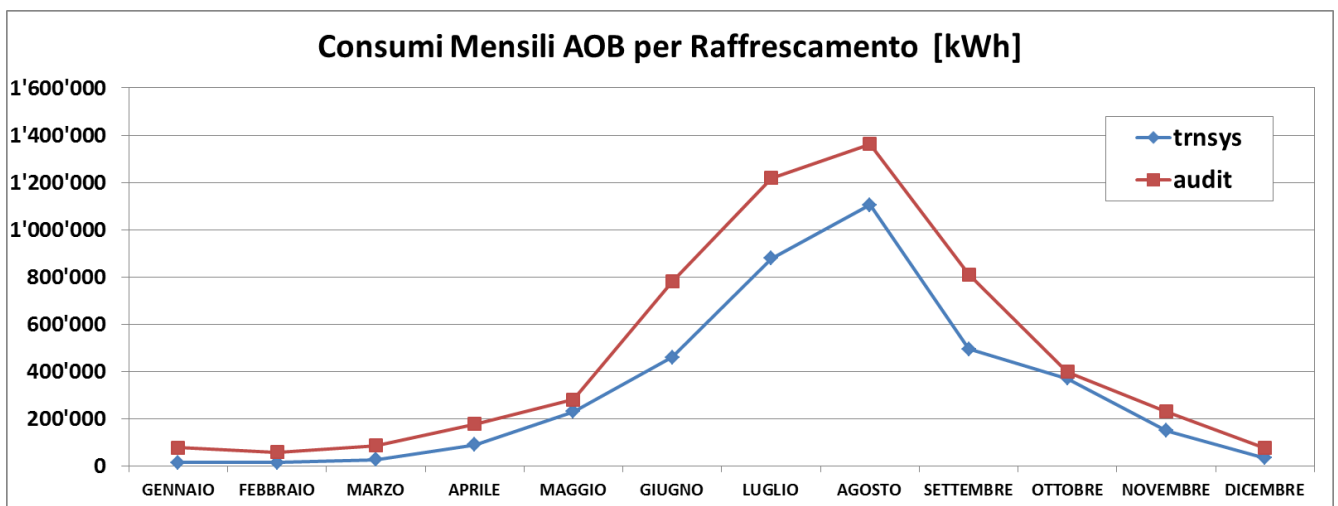


Figura 4.56 - Confronto tra le simulazioni e l'audit sui consumi mensili per raffrescamento.

Considerando la complessità del sistema edificio-impianto dell'AOB e la difficoltà nella sua modellazione e rappresentazione numerica, i risultati ottenuti con la simulazione dinamica possono considerarsi soddisfacenti. Il confronto tra dati reali e simulazioni ha mostrato una differenza di circa il 20-30%. Questa discrepanza tra valori rilevati e risultati numerici potrebbe attribuirsi alle seguenti cause:

- Le simulazioni sono svolte imponendo per ogni zona termica le condizioni termoigrometriche prescritte dal D.P.R. 14/01/97. Le tipologie d'impianti installati nell'AOB non sono in grado di garantire le stesse condizioni utilizzate in fase di simulazione, ciò induce il personale tecnico della struttura a impostare con la regolazione i parametri termoigrometrici in modo da garantire l'utenza più svantaggiata, fornendo di conseguenza maggior energia in zone in cui non è necessaria e comportando un aggravio dei consumi energetici.
- La regolazione puntuale delle condizioni termoigrometriche dei locali esiste soltanto per tutti quegli ambienti considerati critici (sale operatorie, terapia intensiva, etc.). Per tutto il resto della struttura non esiste una regolazione centralizzata, per cui i pazienti, il personale medico, o semplici passanti, sono in grado di intervenire sulle temperature (operando sui termostati dei ventilconvettori) o sui ricambi d'aria (aprendo le finestre ad libitum). I consumi termici sono di conseguenza influenzati da fenomeni di sovrariscaldamento o sotto-raffrescamento causato dalla percezione soggettiva, da parte degli utenti, delle reali condizioni ambientali. Questo comporta l'ulteriore problema che non è possibile stabilire quali siano le reali condizioni termoigrometriche presenti in gran parte della struttura, rendendo molto critica una simulazione dinamica basata sulle effettive condizioni d'utilizzo dei locali.
- Nella struttura è presente un elevato numero di pompe di calore (split) di piccola potenza le cui modalità di funzionamento sono fuori dal controllo del personale tecnico. Ciò comporta seri problemi di controllo sulla regolazione delle condizioni termoigrometriche d'interzone dell'ospedale. Data l'impossibilità di monitorare la quantità di energia termica erogata da queste pompe di calore, e i loro relativi consumi elettrici, nei risultati dell'audit manca una quota di energia termica che invece dovrebbe essere correttamente contabilizzata se si vogliono fare dei confronti più realistici con i risultati delle simulazioni.

## 5 ANALISI DEGLI INTERVENTI PROPOSTI PER IL RISPARMIO ENERGETICO

In questo capitolo saranno presentate e analizzate diverse proposte d'intervento atte sia a migliorare la gestione dell'energia da parte dell'AOB, sia a ottenere dei risparmi sulla bolletta energetica annua. Nel corso della ricerca, per ovvi limiti di tempo e risorse, sia finanziarie che umane, non è stato possibile vagliare tutti gli innumerevoli interventi che è possibile attuare. Pertanto, la nostra attenzione è stata concentrata su quelli interventi giudicati più urgenti o che offrivano le migliori prospettive di remunerazione economica, scartando alcuni interventi già ampiamente analizzati in lavori precedenti [9], come ad esempio il retrofitting dell'impianto d'illuminazione interna ed esterna.

Nella prima parte del capitolo sarà presentato lo studio di fattibilità tecnico economica degli interventi che riguardano il miglioramento delle prestazioni termofisiche dell'involucro della struttura. Nella seconda sezione si esamineranno le problematiche riscontrate e gli interventi proposti per il miglioramento dei sistemi di monitoraggio e la regolazione dell'energia. Infine, nell'ultima parte del capitolo, saranno presentati gli interventi effettuabili sugli impianti di produzione dell'energia, implementando sistemi di generazione combinata (cogenerazione e trigenerazione) e alcune tecnologie a energie rinnovabili (solare termico e fotovoltaico), tutti corredati da analisi di fattibilità tecnico-economica.

### 5.1 INTERVENTI SULL'INVOLUCRO

I primi interventi di risparmio energetico proposti riguardano il miglioramento dell'isolamento termico dell'involucro. Nelle tabelle 5.1 e 5.2 sono riportati i valori di trasmittanza delle superfici trasparenti e opache presenti nell'AOB, e il confronto di tali valori con quelli limite imposti dalla normativa vigente (Decreto 26/01/2012 tabella 1 Allegato B) [27], evidenziando con il colore rosso le superfici che presentano valori superiori a quelli prescritti. Per quanto riguarda le superfici opache, si è scelto di intervenire sulle superfici indicate con i codici SO3-SO5-SO6, analizzando la fattibilità tecnico economica della costruzione di un cappotto termico. Sono state escluse dall'intervento le superfici SO10-SO11, in quanto i valori di trasmittanza sono abbastanza prossimi a quelli limite e per via del fatto che una parte significativa degli ambienti che circoscrivono non è riscaldato. Non sarà invece proposto alcun intervento sulle superfici vetrate, oggetto recentemente (2003-2007) di un intervento di riqualificazione, perché rientrano tutte, tranne la ST8, ampiamente all'interno dei valori di legge. Quest'ultima superficie, vedi Appendice B, poiché delimita delle zone non riscaldate (vani ascensori) non sarà soggetta ad alcuna analisi d'intervento.

**Tabella 5.1 - Verifica di trasmittanza delle superfici trasparenti.**

CODICE (Appendice B)	DENOMINAZIONE	TRASMITTANZA	LIMITI LEGGE
ST1	Finestre a nastro (corpo principale)	1.98	2.60
ST2	Facciata terminale corridoi	1.99	2.60
ST3	Vetrata verticale vani scala	2.48	2.60
ST4	Vetrata vano scala principale	2.58	2.60
ST5	Facciata Trauma Center	2.10	2.60
ST6	Infissi Trauma Center	2.00	2.60
ST7	Facciata - cupola Hall	1.92	2.60
ST8	<b>Vetrata ascensori (nuova torre)</b>	<b>4.10</b>	<b>2.60</b>
ST9	Infissi torre ascensori	2.00	2.60
		<b>W/(m<sup>2</sup>K)</b>	<b>W/(m<sup>2</sup>K)</b>

Tabella 5.2 – Verifica di trasmittanza delle superfici opache.

CODICE (Appendice B)	DENOMINAZIONE	TRASMITTANZA	LIMITI LEGGE
SO1	Solaio di copertura – terrazze	0.298	0.380
SO2a	Solaio intermedio (caso a)	1.884	///
SO2b	Solaio intermedio (caso b)	1.959	///
SO3	<b>Tamponatura in pannello a sandwich</b>	<b>0.666</b>	<b>0.400</b>
SO4	Partizioni interne	1.928	///
SO5	<b>Pareti vani scala</b>	<b>3.460</b>	<b>0.400</b>
SO6	<b>Pannello di copertura Trauma Center</b>	<b>2.233</b>	<b>0.380</b>
SO7	Tamponatura Trauma Center	0.346	0.400
SO8	Solaio di copertura Hall	0.262	0.380
SO9	Tamponatura Hall	0.134	0.400
SO10	<b>Pannello verticale vano scala – torre ascensori</b>	<b>0.559</b>	<b>0.400</b>
SO11	<b>Pannello orizzontale vano scala – torre ascensori</b>	<b>0.577</b>	<b>0.380</b>
		W/(m <sup>2</sup> K)	W/(m <sup>2</sup> K)

Gli interventi di efficientamento dell'involucro analizzati sono:

- ✓ **INTERVENTO A:** isolamento termico delle superfici SO3-SO5-SO6, da realizzarsi tramite posa di pannelli di polistirene estruso di vario spessore, al fine di riportare i valori di trasmittanza termica delle pareti al di sotto del limite di legge (vedi figura 5.1) [27]. Gli spessori di isolante necessari per questo primo intervento sono: 8 cm per la superficie SO3; 12 cm per le superfici SO5 e SO6.
- ✓ **INTERVENTO B:** isolamento termico delle superfici SO3-SO5-SO6 tramite posa di pannelli di polistirene estruso dallo spessore di 20 cm. Con questo intervento si vuole sovra isolare l'involucro dell'edificio, portando i valori di trasmittanza ben al di sotto dei valori limiti di legge.

12-2-2010		GAZZETTA UFFICIALE DELLA REPUBBLICA ITALIANA		Serie generale - n. 35	
Zona climatica	strutture opache verticali	strutture opache orizzontali o inclinate		Chiusure apribili e assimilabili (**)	
		Coperture	Pavimenti (*)		
A	0,54	0,32	0,60	3,7	
B	0,41	0,32	0,46	2,4	
C	0,34	0,32	0,40	2,1	
D	0,29	0,26	0,34	2,0	
E	0,27	0,24	0,30	1,8	
F	0,26	0,23	0,28	1,6	

(\*) Pavimenti verso locali non riscaldati o verso l'esterno  
 (\*\*) Conformemente a quanto previsto all'articolo 4, comma 4, lettera c), del decreto Presidente della Repubblica 2 aprile 2009, n. 59, che fissa il valore massimo della trasmittanza (U) delle chiusure apribili e assimilabili, quali porte, finestre e vetrine anche se non apribili, comprensive degli infissi.”

Roma, 26 gennaio 2010

*Il Ministro: SCAIOLA*

10A01747

Figura 5.1 - Tabella 2 dell'Allegato B del Decreto 26/01/2010 [27].

Le principali caratteristiche termofisiche dell'isolante (lastre di polistirene estruso) preso in esame sono le seguenti:

- Conduttività Termica: 0.040 W/(m K)
- Densità: 30 kg/m<sup>3</sup>
- Calore Specifico: 1.25 kJ/(kg K)

Nella tabella 5.3 sono riportati i nuovi valori di trasmittanza delle pareti opache su cui eseguire gli interventi di isolamento e l'ammontare di isolante necessario per ogni tipologia di superficie.

**Tabella 5.3 – Nuovi valori di trasmittanza delle superfici oggetto d'intervento.**

CODICE	DENOMINAZIONE	SUPERFICIE da ISOLARE	TRASMITTANZA		
			INIZIALE	INTERVENTO A	INTERVENTO B
SO3	Tamponatura in pannello a sandwich	18'465	0.666	0.286	0.154
SO5	Pareti vani scala	4'270	3.460	0.304	0.189
SO6	Pannello di copertura Trauma Center	950	2.233	0.290	0.184
		m <sup>2</sup>	W/(m <sup>2</sup> K)	W/(m <sup>2</sup> K)	W/(m <sup>2</sup> K)

L'analisi di queste due proposte d'intervento è stata effettuata utilizzando il modello dinamico dell'ospedale Brotzu messo a punto nel corso del dottorato di ricerca (vedi capitolo precedente). Il risparmio energetico ottenibile con l'intervento è stato calcolato sottraendo dai valori di consumo calcolati con le stratigrafie originali i nuovi valori di fabbisogno e carico termico calcolati con la nuova stratigrafia contenente il cappotto termico. Per tener in considerazione la differenza tra il modello numerico e i valori reali di consumo, il valore di risparmio energetico è stato pesato tramite i valori consumo ricavati tramite l'audit. I valori così corretti sono stati poi divisi per il rendimento medio annuo delle caldaie (Riscaldamento) e dei gruppi frigo (Raffrescamento), vedi capitolo 3, in modo da ottenere i risparmi di combustibile e di energia elettrica associati al risparmio di energia termica per riscaldamento e raffrescamento.

Il costo specifico totale degli interventi è pari a 44 €/m<sup>2</sup> per quello A e 48 €/m<sup>2</sup> per l'intervento B. L'incidenza della fornitura del materiale ammonta a 16 €/m<sup>2</sup> per la proposta A e 20 €/m<sup>2</sup> per quella B. La restante parte del prezzo è uguale per i due interventi ed è costituita dai ponteggi, 15 €/m<sup>2</sup>, e dal costo della manodopera 13 €/m<sup>2</sup>. Il costo totale è quindi pari a 1'042 k€ per l'intervento A; 1'137 k€ per l'intervento B.

Le analisi economiche degli interventi A e B sono state condotte considerando i seguenti parametri:

- Durata dell'Analisi Economica: 25 anni
- Tasso di Inflazione: 3%
- Deriva Combustibile: 4%
- Tasso di Sconto: 5%

Gli indicatori utilizzati per confrontare le varie proposte di intervento: Risparmio Economico (in €/anno); Emissioni Evitate (in tCO<sub>2</sub>/anno); Riduzione Consumi Elettrici e Termici (in kWh e in % sul consumo globale annuo). Il calcolo delle emissioni evitate è stato effettuato considerando i seguenti fattori di emissione: 0.450 kgCO<sub>2</sub>/kWh per l'energia elettrica; 0.275 kgCO<sub>2</sub>/kWh per il combustibile Ecoden [13][28-30]. Oltre ai tre parametri appena citati sarà effettuata un'analisi economica più dettagliata comprendente l'analisi dei flussi di cassa e il calcolo del VAN, PBT (tempo di ritorno dell'investimento) e IRR (tasso interno di rendimento).



Nella tabella 5.4 sono riportati i risultati ottenuti in termini di risparmio di energia e i valori degli indicatori economici calcolati tramite l'analisi dei flussi di cassa (figura 5.2).

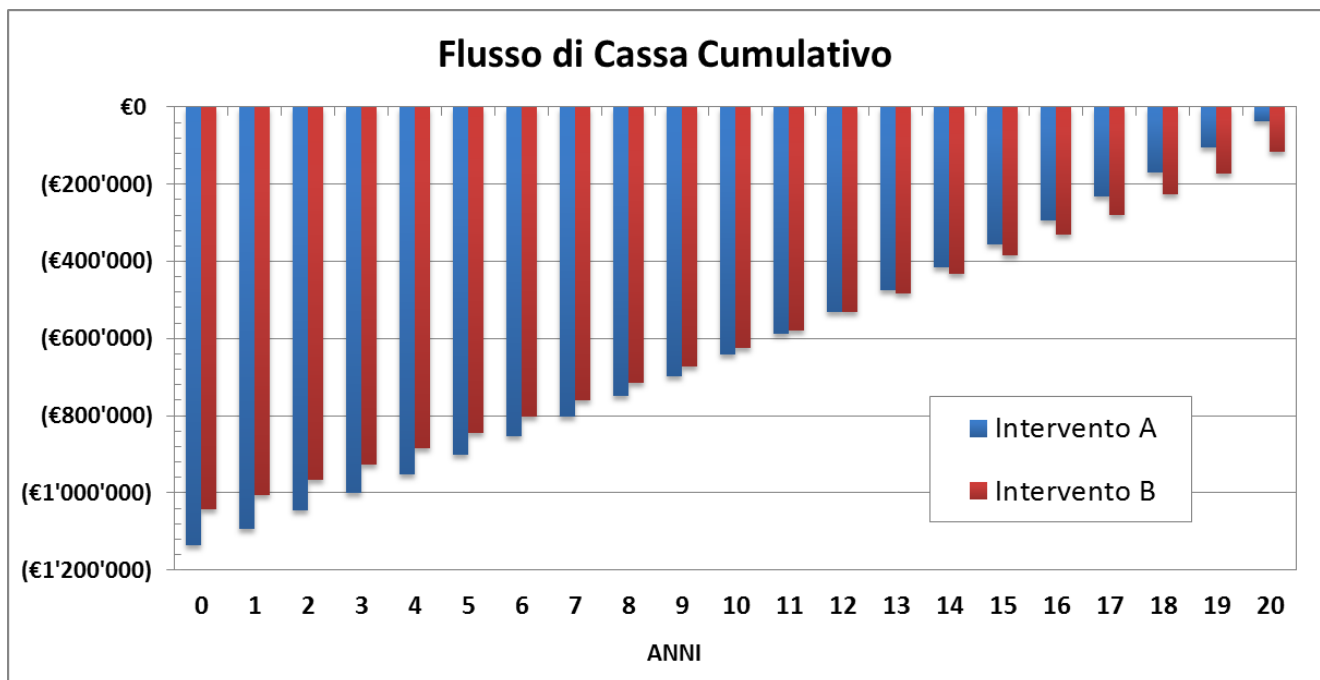


Figura 5.2 – Flussi di cassa per i due interventi proposti.

Tabella 5.4 – Risultati analisi di fattibilità tecnico-economica degli interventi.

ANALISI ENERGETICA - AMBIENTALE			
	INTERVENTO A	INTERVENTO B	
INVESTIMENTO INIZIALE	1'042'138	1'136'878	€
RISPARMIO ENERGIA TERMICA	347'707	416'307	kWh/anno
RIDUZIONE CONSUMI TERMICI	4.00	4.79	%
RISPARMIO ENERGIA ELETTRICA	8'051	7'050	kWh/anno
RIDUZIONE CONSUMI ELETTRICI	0.07	0.06	%
RIDUZIONE EMISSIONI CO <sub>2</sub>	99	118	tCO <sub>2</sub> /anno
ANALISI ECONOMICA			
	INTERVENTO A	INTERVENTO B	
INVESTIMENTO INIZIALE	1'042'138	1'136'878	€
RISPARMIO ECONOMICO ANNUO	38'008	45'078	€/anno
VAN	-114'877	-37'127	€
PBT (TEMPO DI RITORNO INVESTIMENTO)	22.0	20.5	anni
IRR (TASSO INTERNO DI RENDIMENTO)	negativo	negativo	%

Secondo l'intervento proposto, si ha un risparmio totale di energia pari a circa il 4-5% (356-423 MWh), di cui la parte termica, legata ai consumi invernali per il riscaldamento, è largamente prevalente rispetto a quella elettrica, legata invece al carico estivo per raffrescamento. Le riduzioni d'immissioni di CO<sub>2</sub> ottenibili ammontano intorno alle 100-120 t/anno.

L'analisi economica presenta valori negativi per le entrambe le proposte d'intervento, con la soluzione B che presenta i migliori valori degli indicatori economico-finanziari. La causa della scarsa redditività dell'investimento

deve andarsi a ricercare nel fatto che a fronte degli elevati costi di realizzazione i risparmi economici annui ottenibili, 38'000 €/anno per la proposta A e 45'000 €/anno per l'intervento B, non sono in grado di ripagare l'investimento entro i 20 anni, presi come riferimento per la durata dell'analisi, comportando quindi valori negativi del VAN e dell'IRR. I tempi di ritorno ottenuti non sono risultati molto distanti dal limite temporale prefissato, 22 per l'intervento A e 20.5 per il B, lasciando quindi dei margini di operatività nel caso si manifesti l'esigenza di un intervento obbligatorio sulla facciata dell'edificio.

## 5.2 INTERVENTI SUI SISTEMI DI MONITORAGGIO DELL'ENERGIA

Il monitoraggio e la gestione dell'energia sono aspetti particolarmente rilevanti, che opportunamente ottimizzati consentono di migliorare notevolmente il lavoro di gestione, da parte del personale tecnico dell'azienda ospedaliera, e l'individuazione immediata di disservizi e inefficienze. Nel corso del progetto di ricerca sono state individuate due aree d'intervento, la prima riguarda il monitoraggio delle centrali tecnologiche dell'ospedale, la seconda interessa la gestione dell'energia termica nei vari piani.

### 5.2.1 MONITORAGGIO CENTRALI TECNOLOGICHE

Durante il lavoro che ha poi portato alla stesura dell'audit energetico, sono state rilevate diverse criticità riguardo alla possibilità di misurare e monitorare delle grandezze fisiche legate ai flussi energetici all'interno dell'AOB. In particolare, sono state riscontrate le seguenti problematiche:

- Malfunzionamento del sistema di acquisizione e registrazione delle misure legate ai consumi di energia termica per il riscaldamento e per la produzione di ACS.
- Mancanza di sistemi di acquisizione e registrazione delle seguenti grandezze: produzione termica dei gruppi frigoriferi; consumi volumetrici d'acqua calda sanitaria; consumo del combustibile (Ecoden) che alimenta le caldaie.

Per quanto riguarda il primo punto, tali malfunzionamenti sono stati individuati durante le prime fasi dell'audit elaborando e analizzando i risultati delle acquisizioni (vedi paragrafi 3.1.1 e 3.1.2). Per ovviare a tale problema è stato eseguito un intervento di manutenzione, verifica e taratura della strumentazione di misura, eseguito dalla ditta GDM e realizzato tra dicembre 2011 e febbraio 2012, su commissione della stessa AOB.

La mancanza di diversi sistemi di monitoraggio ha causato parecchie difficoltà nella ricostruzione dei consumi energetici. Si è deciso quindi di intervenire, vincolati dalle risorse finanziarie disponibili, su quei sistemi ritenuti essenziali per il completamento dell'audit energetico, rimandando alle decisioni future dell'AOB gli interventi meno necessari. Data la particolare criticità nella mancanza di un sistema di monitoraggio dell'energia termica prodotta dai gruppi frigoriferi, si è deciso, nella primavera del 2012, di acquistare e installare quattro contatori di calore, uno per gruppo, le cui caratteristiche sono state descritte nella sezione 2.2.5.2.

Ulteriori punti di criticità sono dovuti alla mancanza di un sistema di registrazione dei consumi volumetrici ( $m^3/h$ ) di acqua calda sanitaria e del consumo di combustibile. Ambedue queste grandezze sono state comunque ricostruite partendo da misurazioni indirette, come per l'acqua calda sanitaria (par. 3.1.2), oppure dalle misure registrate su supporti cartacei dal personale tecnico dell'azienda, come per il caso del consumo giornaliero di combustibile (par. 3.2.1.1). Per entrambe queste grandezze si consiglia l'AOB di dotarsi di appositi sistemi di monitoraggio e registrazione, che consentirebbero un controllo regolare dei consumi e agevolerebbero il lavoro di gestione da parte del personale tecnico.

A completamento del lavoro sui sistemi di monitoraggio dei consumi, occorrerebbe inoltre prendere in considerazione la possibilità di monitorare l'energia elettrica erogata dai trasformatori del Power Center, distinguendo così le seguenti tipologie di carico elettrico: illuminazione; forza motrice e corrente industriale;

centrali tecnologiche; riserva. Vista la criticità nel valutare i consumi elettrici della centrale frigorifera e l'EER stagionale, considerando inoltre il suo importante peso nei consumi elettrici estivi, è stato acquistato e installato un sistema per il monitoraggio degli assorbimenti elettrici. Nell'autunno del 2012 si è potuto installare un sistema di monitoraggio costituito da sei multimetri trifase (vedi descrizione nel par. 2.2.5.2): quattro per misurare i consumi elettrici dei compressori dei gruppi frigo; uno per i consumi della pompa di circolazione posta tra il condensatore e il gruppo Daikin (N°4); uno per la misura degli assorbimenti dei due ventilatori collocati nella torre evaporativa del gruppo N°4.

### 5.2.2 MONITORAGGIO SEPARATO DEI PIANI (ENERGIA TERMICA)

Il controllo e la gestione dell'energia termica consumata nei vari piani è un elemento cruciale per l'abbattimento dei consumi. I risultati dell'audit (Capitolo 3) si riferiscono, infatti, al solo consumo globale dell'ospedale e non a quelli per piano, o meglio ancora, per singolo reparto. La conoscenza più dettagliata di tali consumi consente di rilevare le specificità e le necessità energetiche correlate alle diverse prestazioni sanitarie erogate, permettendo così di studiare degli interventi di risparmio energetico ottimizzati sulle esigenze specifiche di ciascun reparto. Il monitoraggio non deve comprendere soltanto il semplice consumo dell'energia, bensì la verifica puntuale dei parametri microclimatici di ogni ambiente. Tale importanza è stata rilevata quando si è proceduto con il confronto tra i dati di consumo rilevati e i risultati delle simulazioni effettuate con il modello dinamico (vedi paragrafo 4.4.2). La differenza tra questi valori, circa il +20% per il riscaldamento e -30% per il raffrescamento, è stata attribuita principalmente alla difformità tra i valori dei parametri termoigrometrici (temperatura, umidità e ventilazione) utilizzati nelle simulazioni sulla base della normativa [6], e quelli realmente utilizzati all'interno dell'AOB, che in diversi casi non possono essere ottimizzati. Infatti, escludendo i reparti critici dell'ospedale (blocchi operatori, terapia intensiva, reparto neonatale, etc.), non è possibile il controllo, da parte del personale tecnico, di tali parametri, la cui regolazione è lasciata alle sensazioni soggettive di benessere, se non alle cattive abitudini, dei pazienti, dei visitatori o dei dipendenti dell'azienda.

Per capire l'importanza del monitoraggio delle condizioni microclimatiche interne e valutarne la loro influenza sui consumi termici, è stata compiuta un'analisi parametrica utilizzando il modello dinamico dell'AOB (vedi descrizione nel capitolo 4). Tale analisi è stata compiuta circoscrivendo il problema al solo piano ottavo dell'ospedale, scelto come campione rappresentativo per via della destinazione d'uso dei suoi locali, e implementando diverse configurazioni d'utilizzo degli impianti, caratterizzate dal variare dei seguenti parametri termoigrometrici: temperatura minima e massima [°C]; ricambi d'aria [Volumi/ora]; umidità relativa minima e massima [%]. In totale sono state esaminate dieci diverse configurazioni (tabella 5.5): nelle prime nove i valori di tali parametri sono gli stessi per tutti gli ambienti che costituiscono il piano; nell'ultima configurazione esaminata, indicata come caso E, i valori dei parametri termoigrometrici sono differenziati in base alla destinazione d'uso dei locali.

**Tabella 5.5 - Riepilogo delle configurazioni implementate.**

PARAMETRI TERMOIGROMETRICI	CASO BASE	CASO A		CASO B		CASO C		CASO D		CASO E
		MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	
TEMPERATURA	24±3°C	24±4°C	24±2°C	24±3°C		24±3°C		24±4°C	24±2°C	D.P.R. 14-01-97
VENTILAZIONE	3 Vol/h	3 Vol/h		2 Vol/h	4 Vol/h	3 Vol/h		2 Vol/h	4 Vol/h	D.P.R. 14-01-97
UMIDITÀ RELATIVA	50±10%	50±10%		50±10%		50±15%	50±5%	50±15%	50±5%	D.P.R. 14-01-97

- **CASO BASE:** questa è la configurazione di riferimento in cui i valori dei parametri termoigrometrici sono in grado di soddisfare i requisiti di legge in quasi la totalità dei locali presenti nel piano esaminato [6]. La temperatura interna di tutti gli ambienti climatizzati è mantenuta per tutto l'anno entro l'intervallo 24±3°C. Ciò implica una temperatura minima consentita di 21°C (periodo invernale) e una massima di 27°C (periodo estivo). La ventilazione meccanica è imposta a 3 Vol/h, con prelievo dell'aria esterna e senza ricircolo.

L'umidità relativa è controllata nell'intervallo  $50\pm 10\%$ , corrispondente a un valore minimo del 40% nel periodo invernale e un valore massimo del 60% durante il periodo estivo.

- **CASO A** (Variazione della Temperatura): in questo caso compaiono due configurazioni chiamate A-min. e A-max. I valori di ventilazione e umidità relativa sono uguali a quelli del caso base. Nel caso A-min si aumenta l'intervallo di temperature di  $1^\circ\text{C}$ , arrivando a  $24\pm 4^\circ\text{C}$  (T. minima  $20^\circ\text{C}$ ; T. massima  $28^\circ\text{C}$ ). Nel caso A-max l'intervallo di temperature diminuisce di  $1^\circ\text{C}$ , ovvero  $24\pm 2^\circ\text{C}$  (T. minima  $22^\circ\text{C}$ ; T. massima  $26^\circ\text{C}$ ).
- **CASO B** (Variazione della Ventilazione): i valori di temperatura e umidità relativa restano immutati come nel caso base, mentre la ventilazione è stata fatta variare di 1 Vol/h. Nel caso B-min si avranno quindi 2 Vol/h di ricambio, mentre nel caso B-max si avranno 4 Vol/h di ricambio.
- **CASO C** (Variazione dell'Umidità Relativa): in questo caso, temperature e ventilazione sono uguali al caso base, varia soltanto il controllo dell'umidità relativa. Nella configurazione C-min, l'intervallo di umidità relativa è stato aumentato di cinque punti fino al  $50\pm 15\%$ ; nella configurazione C-max si è passati invece al  $50\pm 5\%$ .
- **CASO D** (A + B + C): in questa configurazione si valuta l'effetto combinato sui consumi delle modifiche apportate con i casi A, B e C. Nella configurazione D-min l'intervallo di temperatura è fissato a  $24\pm 4^\circ\text{C}$ , la ventilazione meccanica è pari a 2 Vol/h, il range di umidità è del  $50\pm 15\%$ . La configurazione D-max presenta un intervallo di temperatura di  $24\pm 2^\circ\text{C}$ , la ventilazione è fissata a 4 Vol/h e il range di umidità relativa è portato al  $50\pm 5\%$ .
- **CASO E** (Zone Termiche Differenziate): i valori dei tre parametri di controllo (Temperatura, Umidità, Ventilazione) non sono più comuni per tutti gli ambienti bensì differenziati per tipologia d'utilizzo dei locali, si tratta quindi dello stesso approccio adottato per la simulazione dell'intero edificio, descritta nel capitolo precedente.

I risultati ottenuti, per brevità di trattazione lavoreremo soltanto sui valori annuali di energia termica per riscaldamento e raffrescamento, sono riportati nella tabella 5.6.

**Tabella 5.6 - Consumi annuali per riscaldamento e raffrescamento dell'8° piano dell'AOB.**

Risultati 8° Piano (Consumi Annuali)	CASO BASE	CASO A (Temperature)		CASO B (Ventilazione)		CASO C (Umidità)		CASO D (A + B + C)		CASO E  Zone Termiche
		MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	
Riscaldamento [kWh]	315'673	260'841	378'331	192'419	443'739	308'194	337'805	155'845	574'667	274'960
Differenza percentuale (rispetto al Caso Base)	0.0%	-17.4%	19.8%	-39.0%	40.6%	-2.4%	7.0%	-50.6%	82.0%	-12.9%
Raffrescamento [kWh]	182'292	151'670	223'128	162'147	213'002	138'103	250'384	105'280	344'490	144'807
Differenza percentuale (rispetto al Caso Base)	0.0%	-16.8%	22.4%	-11.1%	16.8%	-24.2%	37.4%	-42.2%	89.0%	-20.6%

Soffermando l'attenzione sui consumi per riscaldamento (tabella 5.6, figura 5.3), si può notare come la ventilazione sia il fattore maggiormente incidente sui consumi, infatti, la variazione di  $\pm 1$  Vol/h comporta un aumento/diminuzione di circa il  $\pm 40\%$  sull'energia da destinare al riscaldamento. La modifica di  $1^\circ\text{C}$  nei settaggi di temperature incide invece sui consumi per il 17-20%. Variazioni nei settaggi di umidità relativa non comportano invece sostanziali cambiamenti nel fabbisogno annuale di energia. L'effetto combinato dei tre fattori (temperatura, ventilazione, umidità) implica una variazione del riscaldamento che va da -51% a +82%. È importante notare come

il risparmio di energia ottenibile nella configurazione Dmin (159.8 MWh) sia inferiore a quello ottenibile (185.6 MWh) sommando il risparmio ottenuto separatamente dai casi Amin, Bmin e Cmin. Viceversa il maggiore consumo, rispetto al caso base, ottenuto nella configurazione Dmax (259 MWh) è superiore alla somma dei maggiori consumi ottenuti nei casi Amax, Bmax e Cmax. Analizzando i risultati del caso E, relativo alla simulazione multizonale con condizioni climatiche interne diversificate in base alla destinazione d'uso del locale, si ottiene un risparmio di energia, rispetto al caso base, di circa il 13%.

Analizzando il carico termico per raffrescamento (tabella 5.6, figura 5.3), risulta evidente come il controllo dell'umidità relativa costituisca, al contrario del riscaldamento, un punto particolarmente critico. Si noti, infatti, come una modifica del  $\pm 10\%$  sull'intervallo di controllo comporti una variazione del carico termico del 24-37%. L'incidenza delle temperature di set-point è simile al caso del riscaldamento, con una variazione dei consumi pari a circa il 17-22%. Al contrario di quello che avviene con il riscaldamento, la ventilazione non ha particolari effetti sui consumi, con un'incidenza stimabile intorno a 11-17%. L'effetto combinato di temperatura, ventilazione e umidità, porta a risultati simili a quelli ottenuti per il carico di riscaldamento, ossia una variazione del carico termico che va dal -42% al +89%. Tramite la gestione climatica separata dei vari locali, caso E, si ottiene un risparmio di energia del 21%, convalidando la validità di questa scelta di gestione sulle condizioni termoigrometriche interne nei vari locali dell'ospedale.

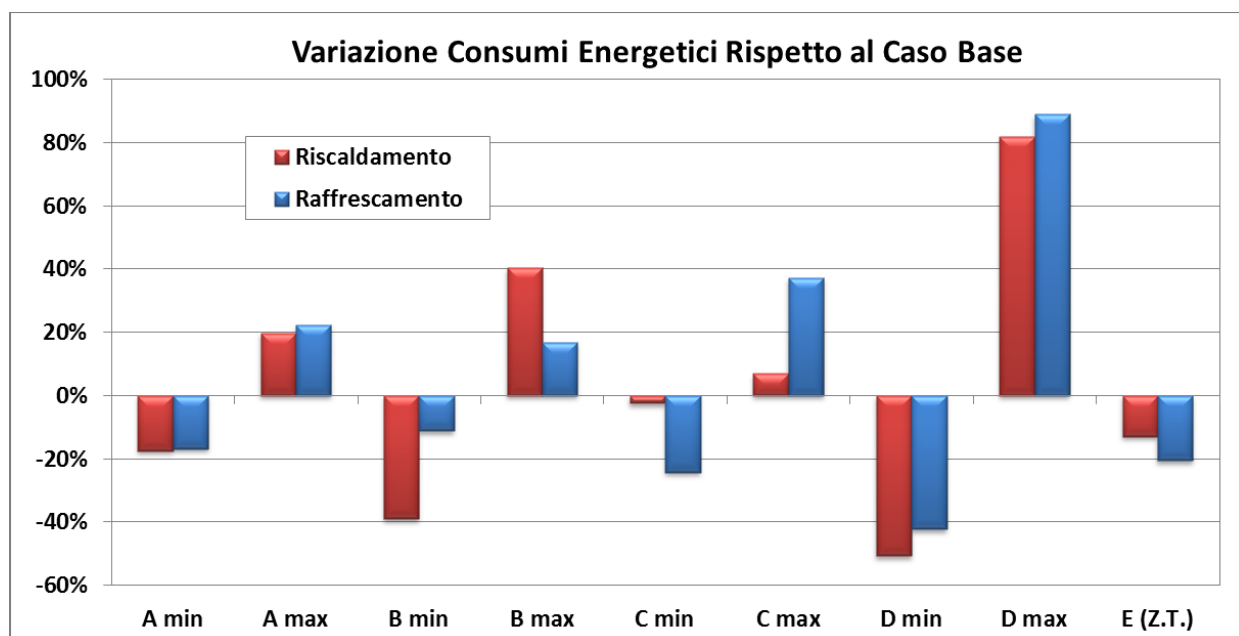


Figura 5.3 - Variazione percentuale dei consumi energetici rispetto al caso base.

Da questa breve analisi, si è potuto accertare che la ventilazione (ricambi d'aria) e il controllo dell'umidità relativa siano i due parametri la cui variazione incide maggiormente sui consumi termici, rispettivamente per il riscaldamento e raffrescamento dei vari ambienti dell'AOB. È stato inoltre evidenziato come una strategia di gestione "puntuale" e "remota" dei parametri di controllo microclimatici, ossia la regolazione separata per ogni locale e sotto il controllo esclusivo del personale tecnico dell'azienda, possa consentire dei risparmi sui consumi, garantendo contemporaneamente sia il rispetto delle normative vigenti, sia le condizioni di benessere conformi alla tipologia di servizio sanitario erogato. Se da un lato questa strategia di controllo è più onerosa in fase di realizzazione, i vantaggi attesi, in termini di comfort per gli utenti e soprattutto di riduzione degli sprechi energetici, può rappresentare una valida soluzione, meritevole di ulteriori e più approfonditi studi, per migliorare la sostenibilità economica ed ambientale della struttura presa in esame.

Sulla base di queste riflessioni, col fine di migliorare il controllo e la gestione dei consumi termici, sono proposti i seguenti interventi che riguardano il sistema di monitoraggio nei vari piani:

- Installazione di sistemi per l'acquisizione dei consumi di energia termica per i singoli piani o reparti, suddivisi per tipologie d'impianto di erogazione (radiatori, ventilconvettori, UTA, etc.).
- Installazione di termoigrometri, atti ad acquisire i valori di temperatura e umidità relativa di almeno 10-15 ambienti campione per reparto (20-30 per piano).

Attuando questi interventi sarà possibile ottenere i seguenti risultati:

- Migliorare il livello di dettaglio dell'audit energetico, consentendo di stabilire la quota di consumo dei vari reparti e individuandone eventuali criticità e potenzialità di risparmio energetico.
- Migliorare l'utilizzo degli impianti già esistenti, privilegiando l'utilizzo dei sistemi più efficienti e il raggiungimento dei livelli qualitativi dell'aria richiesti dalla normative vigenti.
- Calibrare con maggior dettaglio il modello dinamico implementato, ottenendo una migliore corrispondenza tra dati rilevati e risultati numerici, come dimostrato dalla forte escursione dei valori di consumi termici calcolati con l'analisi parametrica sopra esposta.
- Predisporre futuri piani d'intervento che consentano di ottenere una regolazione puntuale e ottimizzata dei parametri impiantistici (temperature del fluido termovettore, portate d'aria primaria, etc.) in modo da garantire il soddisfacimento delle richieste di carico termico proprie dei reparti/piani serviti.

### 5.3 INTERVENTI SUGLI IMPIANTI

In quest'ultima sezione del capitolo sarà sviluppata l'analisi tecnico-economica di diverse soluzioni impiantistiche aventi come obiettivo finale il risparmio energetico, e di conseguenza economico, dell'azienda ospedaliera Brotzu. Tali proposte d'intervento riguardano esclusivamente l'autoproduzione di energia termica ed elettrica, intervenendo sugli impianti primari (centrali termiche-frigorifere ed elettriche), escludendo a priori interventi sugli impianti di distribuzione ed erogazione (UTA, Fan-Coils, motori elettrici, etc.) dell'energia e sulle modalità di utilizzo della stessa da parte degli utenti.

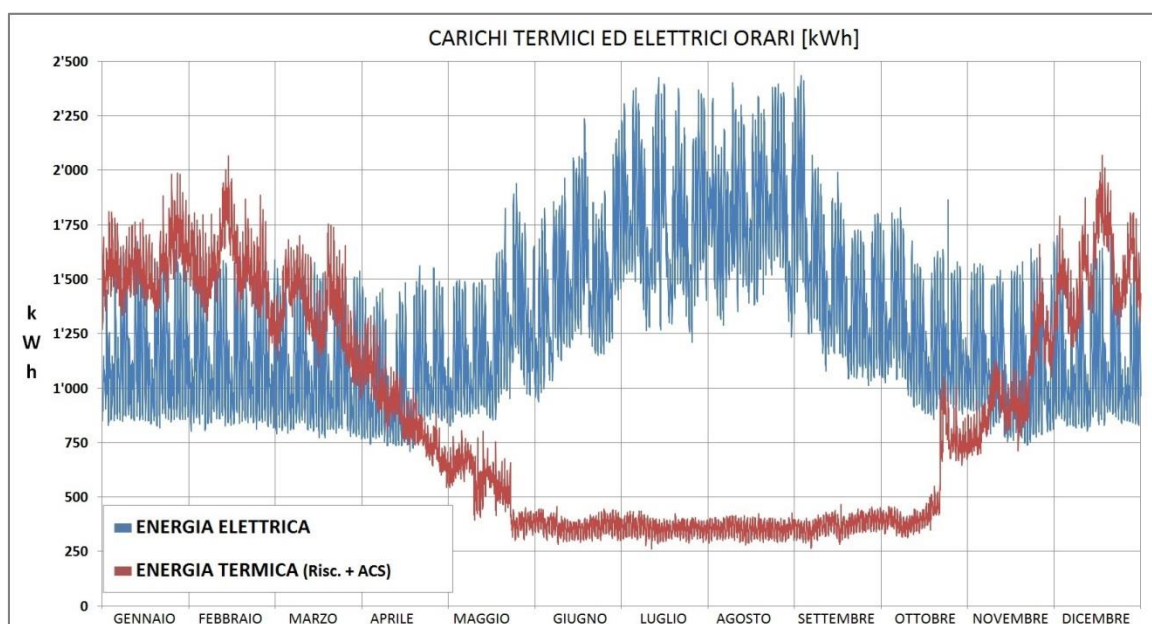
All'inizio sarà dedicata una breve sezione per descrivere le caratteristiche del carico elettrico e termico, fondamentale per effettuare i calcoli delle varie proposte d'intervento, e dei principali indicatori energetico-economico-ambientali per confrontarle. Seguirà una breve presentazione del codice, Homer, utilizzato per effettuare i calcoli. Successivamente saranno descritte separatamente le varie proposte di risparmio energetico, ovvero l'utilizzo del solare termico, solare fotovoltaico, cogenerazione, trigenerazione. Per ognuna di esse saranno esaminate diverse configurazioni allo scopo di individuare quale sia quella che garantisce le migliori prestazioni energetiche, economiche e ambientali. Terminato lo studio disgiunto delle quattro proposte, si procederà con l'esame di un sistema multienergetico costituito da più tipologie impiantistiche che lavorano contemporaneamente per soddisfare le varie richieste di carico energetico dell'A.O.B. Le proposte ritenute più interessanti saranno poi oggetto di uno studio più approfondito, necessario per verificarne la reale fattibilità economica.

L'analisi tecnica delle varie proposte sarà effettuata attraverso il calcolo orario delle prestazioni dell'impianto sulla base dei carichi, anch'essi orari, relativi ad un anno tipo di funzionamento. Tali carichi sono stati ricavati dall'audit energetico, vedi capitolo 3, elaborando i dati dei consumi elettrici e termici degli anni 2008-2012. Le caratteristiche principali dei carichi energetici, suddivisi in energia elettrica, riscaldamento e acqua calda sanitaria, sono riportate nella seguente tabella.

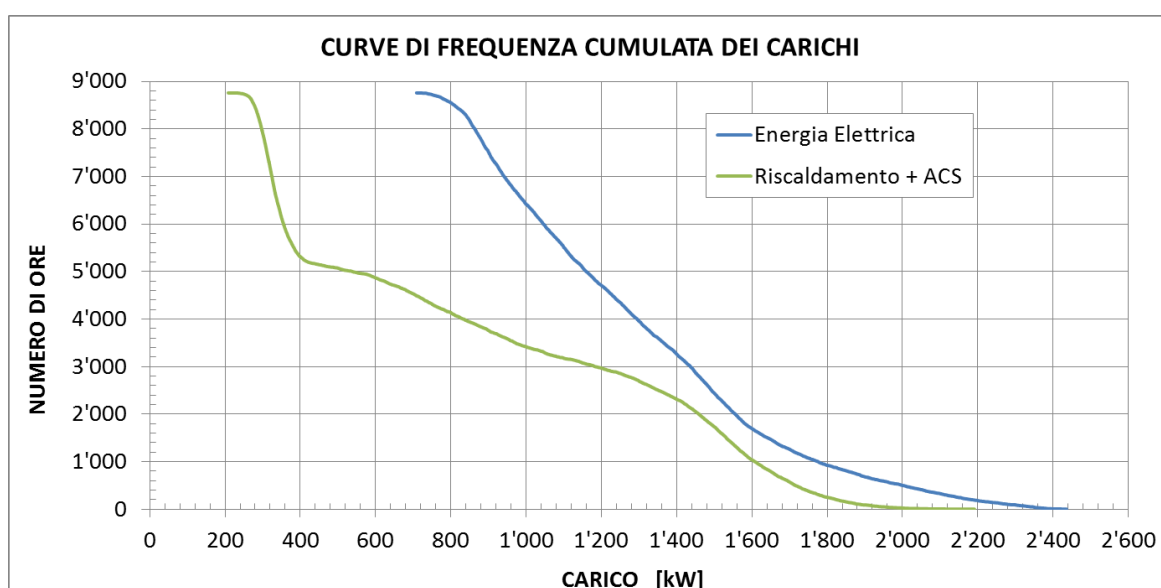
**Tabella 5.7 - Caratteristiche dei carichi energetici.**

	ENERGIA ELETTRICA	RISCALDAMENTO	ACQUA CALDA SANITARIA	
CONSUMO GIORNALIERO	31'168	15'216	5'520	kWh/g
CONSUMO ANNUALE	11'376	5'554	2'015	MWh
POTENZA MEDIA	1'299	634	230	kW
POTENZA di PICCO	2'436	1'863	314	kW
FATTORE di CARICO	0.533	0.340	0.732	///
VARIABILITÀ GIORNALIERA	9.72	23.6	2.00 (imposta)	%
VARIABILITÀ ORARIA	6.37	7.22	5.00 (imposta)	%

L'andamento orario dei carichi, per l'anno tipo di riferimento, è riportato nella figura 5.4. In figura 5.5 sono mostrate le curve di frequenza cumulata relative all'energia termica ed elettrica, tali curve sono di fondamentale importanza per stabilire i limiti inferiori e superiori delle taglie dei cogeneratori.



**Figura 5.4 - Carichi orari elettrici e termici per un anno tipo.**



**Figura 5.5 - Curve di frequenza cumulata dei carichi elettrici e termici per un anno tipo.**

L'energia elettrica è acquistata dalla rete, il combustibile che alimenta le caldaie è l'Ecoden. Tramite l'analisi storica dei costi e un'indagine di mercato [13] [28-31] è stato possibile risalire ai costi di fornitura dell'energia, tali valori, attualizzati all'anno 2012, sono riportati nella tabella 5.8. Sempre nella stessa tabella sono riportate le caratteristiche e i costi dei combustibili utilizzati nelle proposte di risparmio che contemplano la cogenerazione e trigenerazione (Gasolio, Ecoden, GPL). In questi ultimi casi, oltre al costo di mercato del combustibile è necessario considerare il costo defiscalizzato, da utilizzare per la quota di combustibile effettivamente elaborato dal cogeneratore. Un discorso a parte va fatto per il GPL, infatti le dinamiche di contrattazione e la grande variabilità dei prezzi nel mercato sardo non consentono di fissare un prezzo attendibile. Per questo motivo sono stati considerati diversi scenari con il prezzo, compreso di defiscalizzazione, variabile tra 0.6 €/l e 1 €/l.

**Tabella 5.8 - Caratteristiche delle fonti energetiche considerate nei calcoli [13] [28-31].**

FONTE ENERGETICA	PCI	Densità	Costo	Costo Specifico	Fattori di Emissione CO <sub>2</sub>
<b>Elettricità Fascia F1</b>				23.02	450
<b>Elettricità Fascia F2</b>				14.54	450
<b>Elettricità Fascia F3</b>				11.94	450
<b>Ecoden</b>	41.78	0.94	1.15	10.54	275
<b>Ecoden defiscalizzato</b>	41.78	0.94	1.08	9.90	275
<b>Gasolio</b>	43.2	0.82	1.45	14.74	267
<b>Gasolio defiscalizzato</b>	43.2	0.82	0.98	9.96	267
<b>GPL (min.)</b>	45.2	0.565	0.6	8.46	231
<b>GPL (max)</b>	45.2	0.565	1	14.10	231
	<i>MJ/kg</i>	<i>kg/l</i>	<i>€/l</i>	<i>c€/kWh</i>	<i>gCO<sub>2</sub>/kWh</i>

Le analisi economiche sono state condotte considerando i valori dei seguenti parametri:

- Durata dell'Analisi Economica: 20 anni
- Tasso di Inflazione: 3%
- Deriva Combustibile: 4%
- Tasso di Sconto: 5%

Le grandezze utilizzate per confrontare le varie proposte di intervento sono simili a quelle utilizzate per l'analisi dell'isolamento termico dell'involucro (par. 5.1): Risparmio Economico (in €/anno); Emissioni Evitate (in tCO<sub>2</sub>/anno). In aggiunta a quest'ultime è stato considerato anche il Risparmio Energia Primaria (in MWh/anno), calcolato considerando un fattore di conversione tra energia elettrica e primaria di 2.44 kWhp/kWhe [13]. Il risparmio economico annuo rappresenta il parametro più importante, il cui valore è stato oggetto di massimizzazione in caso di analisi di proposte di risparmio mutuamente esclusive. Oltre ai tre parametri appena citati, per le migliori proposte di risparmio si è fatta un'analisi economica più dettagliata comprendente l'analisi dei flussi di cassa e il calcolo del VAN, PBT (tempo di ritorno dell'investimento) e IRR (tasso interno di rendimento).

### 5.3.1 PROCEDURE E SOFTWARE DI CALCOLO

L'analisi delle varie proposte d'intervento è stata effettuata utilizzando i seguenti software: HOMER [3] [32], TRNSYS 16 [2], Excel. Il codice, HOMER, è stato utilizzato per eseguire le simulazioni dei diversi scenari e delle configurazioni impiantistiche, sia quelle separate che quelle multi-energia. Anche l'analisi delle emissioni e parte rilevante di quella economica è stata condotta con questo codice.



HOMER è un programma sviluppato dall'U.S. National Renewable Energy Laboratory (NREL) con lo scopo di fornire uno strumento per l'analisi preliminare di sistemi ibridi, costituiti da un mix di generatori elettrici e/o termici tradizionali e da sistemi operanti con tecnologie rinnovabili. Le possibilità di analisi concesse dal codice riguardano vari aspetti del progetto, quello puramente energetico, quello economico e infine quello ambientale. L'utilità di questo software sta nella possibilità di simulare contemporaneamente molteplici configurazioni impiantistiche, permettendo quindi di ottimizzare il sistema in termini di tipologie di generatori, fonti energetiche primarie, taglie dei sistemi, modalità di funzionamento, etc. Ulteriore vantaggio è dato dalla possibilità di effettuare simultaneamente diverse analisi di sensitività sui parametri chiave del progetto, consentendo quindi di implementare dei modelli multi-scenario. L'ottimizzazione delle configurazioni è valutata su base economica, lasciando all'utente la possibilità di inserire svariati vincoli di carattere energetico o ambientale. Data la varietà di sistemi implementabili, per limitare la complessità di utilizzo e garantire tempi di calcolo accettabili, i modelli matematici che descrivono le varie componenti dell'impianto hanno un livello di dettaglio inferiore rispetto ad altri codici dedicati ad una specifica tipologia impiantistica. Inoltre il calcolo, seppure condotto con una discretizzazione temporale oraria o inferiore, non è di tipo dinamico, ma stazionario. Questo rende HOMER una via di mezzo tra i codici di tipo statistico che non lavorano sulle serie di dati orari, come RETScreen [33], e i codici dinamici, TRNSYS, o specifici per una tipologia impiantistica. Il codice HOMER va visto quindi come uno strumento utile per fare una prima cernita tra le innumerevoli configurazioni impiantistiche possibili, ottimizzando la redditività economica dell'intervento rispettando i vincoli imposti dal progettista.

Il codice TRNSYS è servito per i calcoli dell'energia prodotta dagli impianti solari termici, questa scelta è stata obbligata dalla mancata implementazione in HOMER di questa tipologia di sistemi. Il codice Excel è servito per la preparazione dei dati in ingresso ad HOMER, ovvero i dati di carico orario termico ed elettrico, le curve di funzionamento dei cogeneratori, la distribuzione dei carichi per la trigenerazione, etc. Sempre con Excel è stata condotta l'analisi economica dettagliata, comprendente l'elaborazione finale dei flussi dei cassi e il calcolo di alcuni indicatori economici non presenti in HOMER.

### 5.3.2 SISTEMI ANALIZZATI

Saranno ora esaminate nel dettaglio le varie tipologie impiantistiche proposte per il risparmio energetico. Presenteremo prima le varie proposte separatamente per passare poi all'analisi dei sistemi multienergetici.

#### 5.3.2.1 SOLARE TERMICO

La tipologia d'impianto proposto (figura 5.6) ha lo scopo di fornire una parte dell'energia termica necessaria per la produzione di acqua calda sanitaria. L'impianto prevede l'utilizzo di vari collettori piani [B] a circolazione forzata che alimentano un primo serbatoio tampone [C] da cui parte un circuito secondario [D] che si riunisce all'impianto di produzione di ACS attualmente presente [A-F] nell'A.O.B.

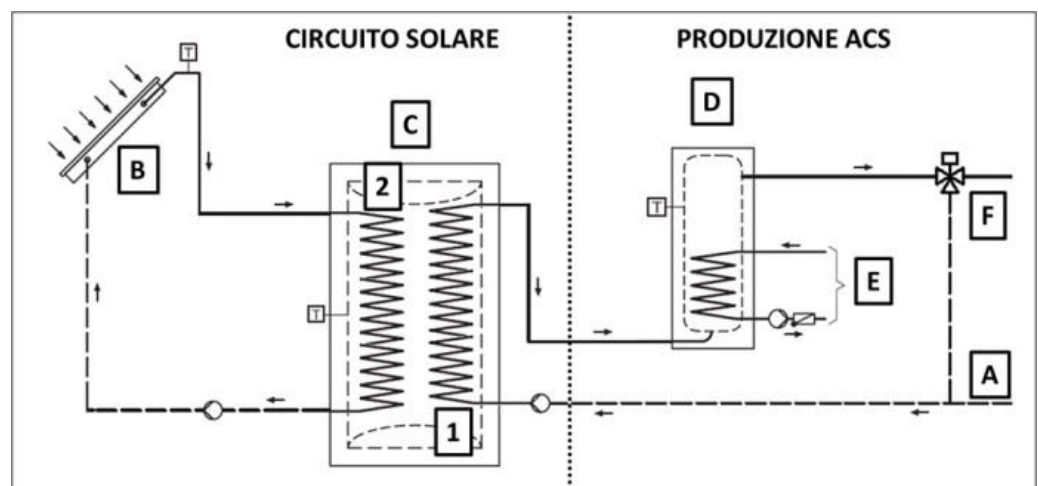


Figura 5.6 – Schema semplificato dell'impianto solare proposto.

Tabella 5.9 - Caratteristiche impianto solare termico.

Dati Tecnici dei Collettori – Impianto		
Tipologia	Collettore piano a doppio vetro	
Area Lorda Collettore	2.56	m <sup>2</sup>
Area Netta Collettore	2.19	m <sup>2</sup>
Fr(τ <sub>α</sub> )	0.809	
FrUI	3.927	W/(m <sup>2</sup> K)
τ'α'/τ <sub>α</sub>	0.95	
Fluidi Termovettore	Acqua – Glicol etilenico	
Portata Nominale	72	kg/h/m <sup>2</sup>
Volume di Accumulo	61	litri/m <sup>2</sup>

La località di installazione è Cagliari, il montaggio dei collettori piani avviene con inclinazione ( $\beta$ ) di 35° , orientamento in direzione SUD (angolo di Azimut uguale a zero) e considerando una riflettanza pari a 0.2. Il costo totale dell'impianto, comprensivo di acquisto e installazione, è stato stimato pari a 1'100 €/m<sup>2</sup>; i costi annui di gestione sono molto contenuti e pari a 10 €/m<sup>2</sup>; la vita utile dell'impianto è supposta in 20 anni.

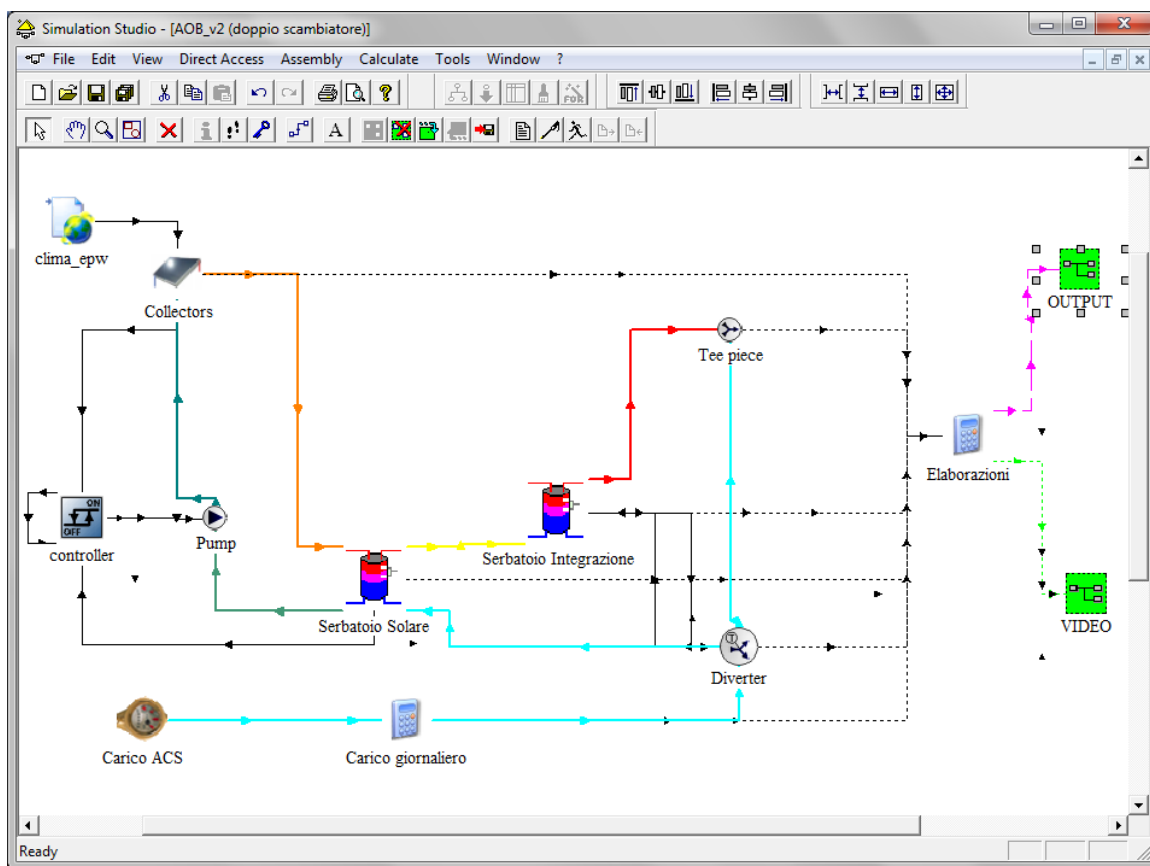


Figura 5.7 - Modello dinamico dell'impianto solare implementato su TRNSYS.

È stata effettuata un'analisi delle prestazioni tecnico economiche dell'impianto al variare della superficie di collettori installata, partendo da un numero minimo di 150 collettori (329 m<sup>2</sup>) fino ad arrivare a 750 collettori (1'643 m<sup>2</sup>) con passo 150. Le cinque configurazioni d'impianto saranno d'ora in avanti indicate con lettere da A fino a E in ordine crescente di superficie. I calcoli della produzione di ACS sono svolti attraverso simulazione dinamica oraria tramite il software TRNSYS 16. Il modello utilizzato (riportato in figura 5.7) è stato messo a punto adattando un modello già esistente messo a punto da Caredda e alter [34-36]. I risultati orari di energia ausiliaria,

che deve essere fornita dal sistema tradizionale, sono utilizzati come input per Homer in modo da avere delle nuove curve di ACS da utilizzare per l'analisi dei sistemi multienergetici.

Per verificare l'affidabilità del modello dinamico utilizzato, è stato effettuato il confronto con il metodo stazionario della F-Chart [37]. La comparazione tra i due metodi è stata eseguita analizzando i valori del fattore di contributo solare (FCS) annuo (figura 5.8), ossia del rapporto, espresso in percentuale, tra l'energia fornita dall'impianto solare e il carico termico richiesto dall'utenza. Tale analisi mostra dei valori molto prossimi, con il calcolo dinamico che ha una produzione mediamente più bassa del 2% rispetto alla F-Chart.

I risultati dell'analisi energetica-economica delle varie proposte di impianto solare termico sono riportati nella tabella 5.10. Nella tabella sono riportati i parametri più importanti degli impianti solari proposti, l'energia elettrica e termica acquistata dall'AOB prima (in rosso) e dopo l'intervento, i parametri di confronto tra le varie proposte (costi totali, emissioni di CO<sub>2</sub>, energia primaria consumata).

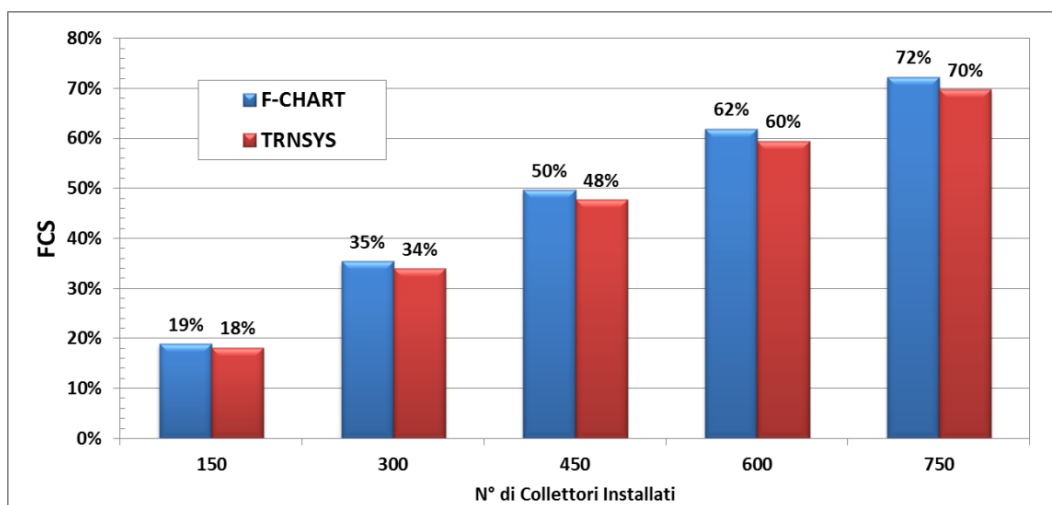


Figura 5.8 - Confronto del FCS tra modello di calcolo dinamico (Trnsys) e stazionario (F-Chart).

Tabella 5.10 - Risultati dell'analisi energetico-economica degli impianti solari termici.

CONFIGURAZIONE	DATI DELL'IMPIANTO SOLARE				ACQUISTO ANNUO DI ENERGIA		PARAMETRI		
	N° Collettori	Superficie Captante	Volume Accumulo	FCS	Energia elettrica	Combustibile Caldaie	Costi Totali	Emissioni CO <sub>2</sub>	Energia Primaria
AOB Attuale					11'376	8'700	2'799'251	7'538	36'447
Solare Termico A	150	329	20'000	18.2	11'376	8'278	2'772'605	7'421	36'025
Solare Termico B	300	657	40'000	34.0	11'376	7'912	2'751'840	7'319	35'659
Solare Termico C	450	986	60'000	47.7	11'376	7'595	2'736'204	7'231	35'342
Solare Termico D	600	1'314	80'000	59.5	11'376	7'322	2'725'213	7'155	35'069
Solare Termico E	750	1'643	100'000	69.8	11'376	7'083	2'717'847	7'089	34'830
		<i>m<sup>2</sup></i>	<i>litri</i>	<i>%</i>	<i>MWh</i>	<i>MWh</i>	<i>€/anno</i>	<i>t/anno</i>	<i>MWh/anno</i>

Tutti e cinque gli impianti proposti comportano un risparmio di combustibile per le caldaie, ciò implica un risparmio nei costi annui di gestione, nell'energia primaria consumata dalla struttura e la riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub>. Queste due ultime quantità sono riportate nelle figure 5.9-10.

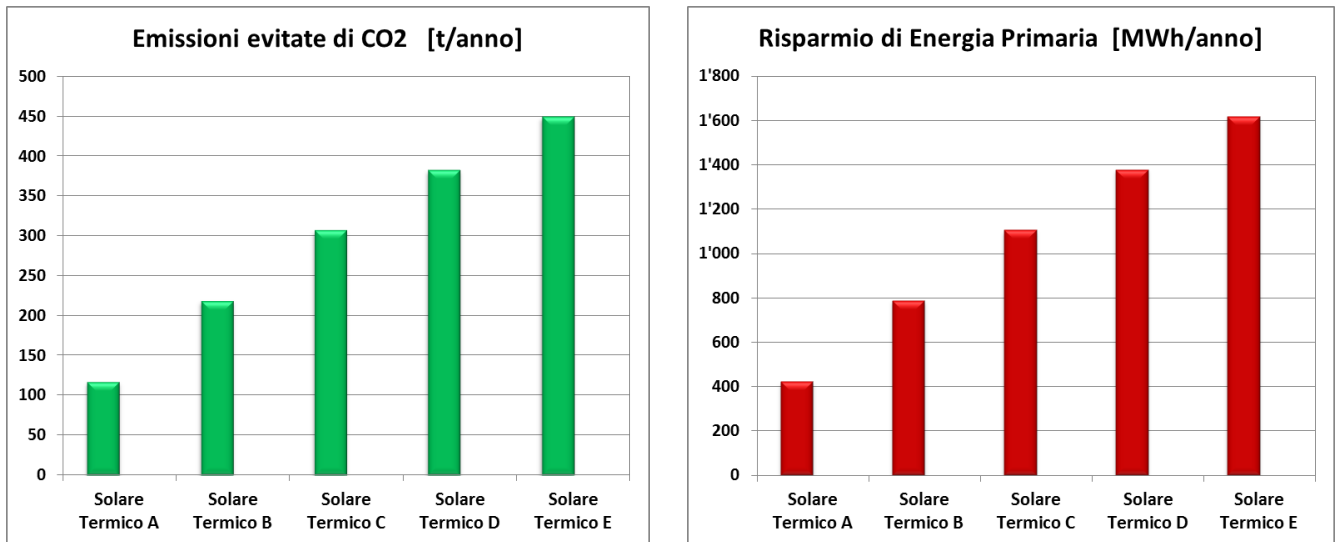


Figure 5.9-10. Emissioni (CO<sub>2</sub>) evitate e risparmio di energia primaria per gli impianti solari termici.

Tra le cinque proposte impiantistiche presentate, verranno ulteriormente esaminate dal punto di vista economico soltanto le tre intermedie, escludendo gli impianti indicati con le lettere A ed E. Il primo per via della ridotta quantità di ACS prodotta, anche nei mesi estivi; l'ultimo per via dell'elevato FCS registrato nei mesi estivi, che può dare luogo a problemi di stagnazione nelle ore centrali della giornata. I flussi di cassa cumulativi delle proposte B, C e D, sono riportati nella figura 5.11. I VAN delle tre proposte sono tutti positivi, con valori crescenti al crescere della superficie captante. Lo stesso andamento si ha per il risparmio economico annuo, le emissioni evitate di CO<sub>2</sub> e il risparmio di energia primaria. Il tempo di ritorno degli investimenti è di circa 8-10 anni, mentre il tasso interno di rendimento varia tra l'8.8% e il 10.7%. Questi ultimi due parametri hanno un andamento inverso rispetto agli altri, decrescendo all'aumentare della superficie di accumulo.

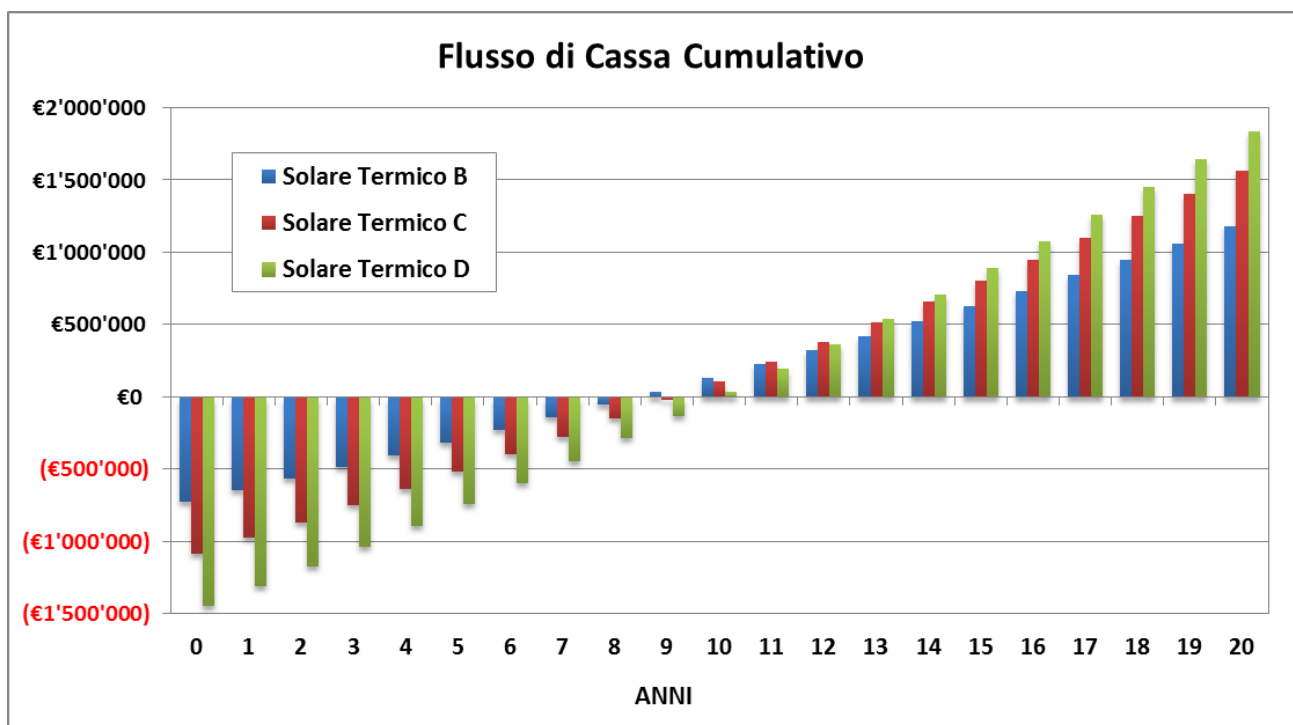


Figura 5.11. Flusso di cassa cumulativi delle tre proposte d'intervento, solare termico, scelte.

**Tabella 5.11 - Riepilogo risultati dell'analisi tecnico-economica degli impianti solari termici scelti.**

CONFIGURAZIONI SCELTE	Solare Termico B	Solare Termico C	Solare Termico D	
VAN	1'180'266	1'569'501	1'843'110	€
PBT	8.52	9.11	9.74	anni
IRR	10.73%	9.73%	8.76%	%
Risparmio Economico	47'411	63'047	74'038	€/anno
Emissioni evitate CO <sub>2</sub>	219	307	383	t/anno
Risparmio Energia Primaria	788	1'105	1'378	MWh/anno

### 5.3.2.2 SOLARE FOTOVOLTAICO

L'impianto solare fotovoltaico ha il compito di soddisfare una parte del fabbisogno elettrico dell'AOB. I principali dati tecnici dell'impianto sono riportati nella tabella 5.12. La località di installazione è Cagliari, il montaggio dei collettori piani avviene con inclinazione ( $\beta$ ) di 30°, orientamento in direzione SUD (angolo di Azimut uguale a zero) e considerando una riflettanza pari a 0.2. Il costo totale dell'impianto, comprensivo di acquisto e installazione, è stato stimato pari a 6'000 €/kWp; i costi annui di gestione sono pari a 0 €/anno; sono previsti dei cicli di manutenzione globale e sostituzione di alcune componenti dell'impianto (inverter, etc.) ogni 5 anni di funzionamento, tali interventi hanno un costo pari a 250 €/kWp, la vita utile dell'impianto è supposta in 20 anni. Per il calcolo degli incentivi si è considerato il quinto Conto Energia [38], la tariffa premio sull'energia consumata in sito è pari a 45 €/MWh, calcolata sulla base delle tariffe del secondo semestre di applicazione e relativa alle installazioni speciali (pergole, serre, pensiline, etc.) con potenze comprese tra 200 e 1'000 kW. È stato considerato un ulteriore incentivo di 10 €/MWh, previsto nel caso di utilizzo di componenti "MADE in EU". Non è stata considerata la tariffa omnicomprensiva, prevista nel caso di vendita di energia alla rete, poiché la potenza installata è in grado di produrre soltanto una piccola parte dell'energia elettrica richiesta dall'AOB.

**Tabella 5.12 - Caratteristiche impianto solare fotovoltaico.**

Dati Tecnici dei Pannelli – Impianto		
Tipologia	Monocristallino	
Area Lorda	1.26	m <sup>2</sup>
Efficienza Cella (STC)	21.6	%
Efficienza Modulo (STC)	19.0	%
Potenza Modulo	240	W
NOCT	44.0	°C
Temperature coeff. of Power	-0.3	%/°C
Derating Factor	85	%
Rendimento Inverter	94	%

Il calcolo della produzione elettrica dell'impianto fotovoltaico sarà effettuato tramite il software Homer, ipotizzando l'installazione di un numero di pannelli corrispondenti alle seguenti tre seguenti potenze: 300 - 400 - 500 kWp, indicate con le lettere A, B e C. Le superfici installate corrispondenti sono: 1'575-2'100-2'625 m<sup>2</sup>.

Nella tabella 5.13 sono riportati i risultati ottenuti considerando i tre impianti proposti. Come successo per gli impianti solari termici, anche per quelli fotovoltaici si registra un risparmio di energia primaria, di emissioni climalteranti e un risparmio sui costi energetici annui, anche se questi ultimi di minore entità rispetto al solare termico.

Tabella 5.13 - Risultati dell'analisi energetico-economica degli impianti solari fotovoltaici.

CONFIGURAZIONE	DATI DELL'IMPIANTO SOLARE				ACQUISTO ANNUO DI ENERGIA		PARAMETRI		
	N° Collettori	Superficie Captante	Potenza Installata	Produzione Elettrica	Energia elettrica	Combustibile Caldaie	Costi Totali	Emissioni CO <sub>2</sub>	Energia Primaria
AOB Attuale				0	11'376	8'700	2'799'251	7'538	36'447
SOLARE PV A	1'250	1'575	300	460'383	10'944	8'700	2'787'966	7'343	35'392
SOLARE PV B	1'667	2'100	400	613'845	10'799	8'700	2'778'037	7'278	35'040
SOLARE PV C	2'083	2'625	500	767'305	10'655	8'700	2'768'109	7'214	34'688
		<i>m<sup>2</sup></i>	<i>kWp</i>	<i>kWh</i>	<i>MWh</i>	<i>MWh</i>	<i>€/anno</i>	<i>t/anno</i>	<i>MWh/anno</i>

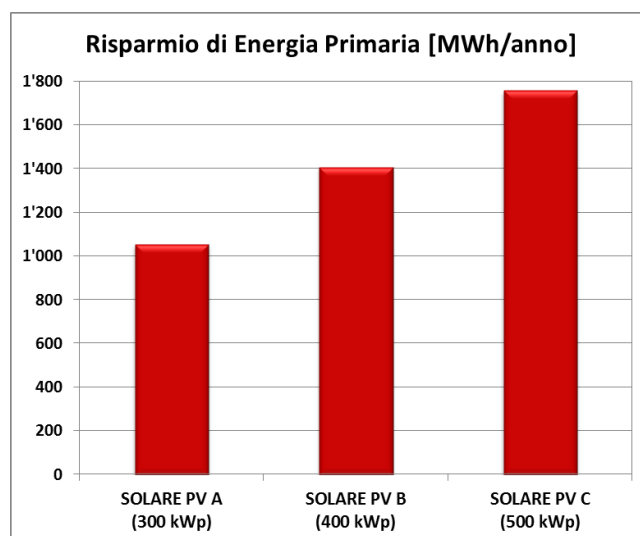
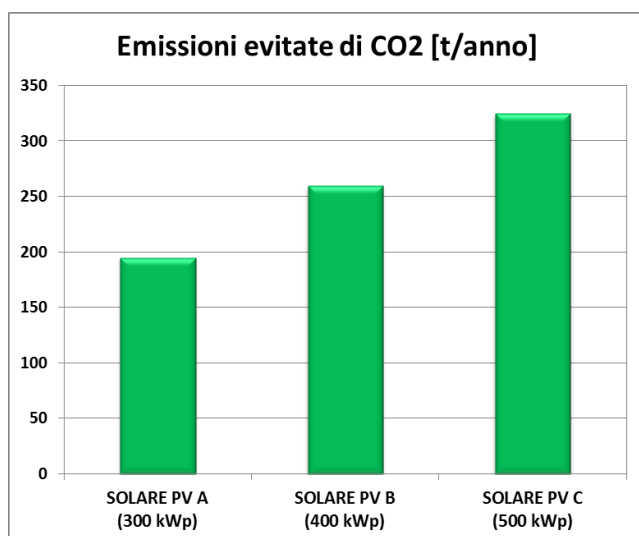


Figura 5.12-13 - Emissioni (CO<sub>2</sub>) evitate e risparmio di energia primaria per gli impianti solari fotovoltaici.

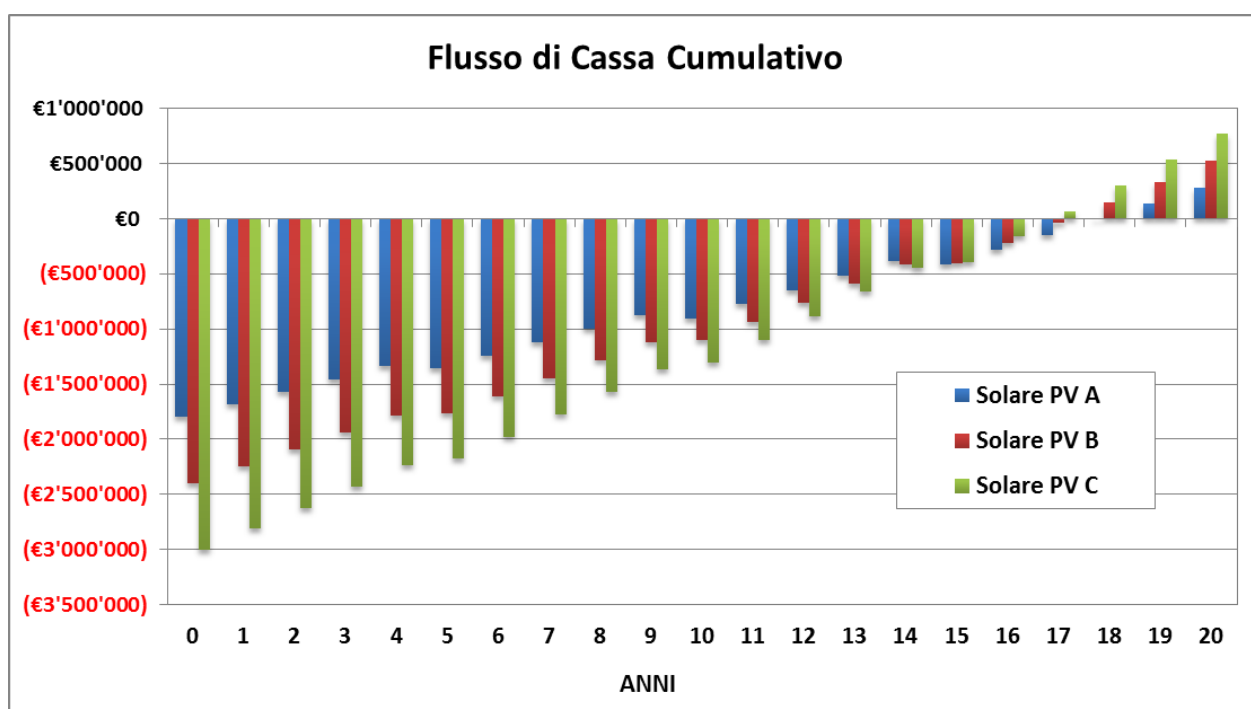


Figura 5.14 - Flusso di cassa cumulativi delle tre proposte d'intervento, solare fotovoltaico, scelte.

L'analisi dei flussi di cassa cumulativi e dei principali indicatori economici, figura 5.14 e tabella 5.14, mostra come l'investimento nel solare fotovoltaico, pure in presenza del conto energia, sia economicamente poco conveniente. Sia i lunghi tempi di ritorno, intorno ai 16-18 anni, sia il basso tasso interno di rendimento, 1-2%, sconsigliano l'utilizzo di questa tecnologia. C'è da considerare inoltre l'importante investimento iniziale richiesto dal fotovoltaico che porta ad immobilizzare importanti quote di capitale che potrebbe essere utilizzato con maggiore profitto in altre soluzioni impiantistiche.

**Tabella 5.14 - Riepilogo risultati dell'analisi tecnico-economica degli impianti solari PV scelti.**

CONFIGURAZIONI SCELTE	Solare PV A	Solare PV B	Solare PV C	
VAN	280'942	528'096	775'250	€
PBT	18.02	17.20	16.7	anni
IRR	1.35%	1.88%	2.19%	%
Risparmio annuo	11'285	21'214	31'142	€/anno
Emissioni evitate CO <sub>2</sub>	195	260	325	t/anno
Risparmio Energia Primaria	1'055	1'407	1'759	MWh/anno

### 5.3.2.3 COGENERAZIONE

Analizzeremo ora la proposta d'installazione di un impianto di cogenerazione per la produzione di parte dei fabbisogni termici ed elettrici del complesso AOB. Saranno considerate tre diverse tipologie di cogeneratori: microturbine a gas, motori a combustione interna ad accensione comandata, motori a combustione interna ad accensione spontanea. Per ognuna di queste tipologie saranno analizzate le prestazioni al variare della taglia, partendo dal valore minimo di 200 kWe fino ad arrivare alla taglia massima di 1'000 kWe, con passo di 200 kWe. La scelta di tali valori avviene dall'analisi della curva di frequenza cumulata di carico (figura 5.5), imponendo un valore minimo di potenza termica tale da consentire un utilizzo della macchina superiore alle 5'000 ore e un valore massimo corrispondente a 0 ore di funzionamento, corrispondente a circa 2'000 kW termici.

Le principali caratteristiche tecniche dei vari cogeneratori sono riportati nella tabella 5.15.

**Tabella 5.15 - Caratteristiche impianti di cogenerazione.**

	Microturbine	MCI Diesel	MCI Otto	
Alimentazione	GPL	Ecoden-Gasolio	GPL	
Rendimento Termico Nominale	46	42	45	%
Rendimento Elettrico Nominale	33	40	38	%
Carico minimo	2-10	30	30	%
Vita Utile	40'000	75'000	75'000	ore

Il costo di acquisto e installazione delle microturbine è stato stimato pari a 1'200 €/kWe, il costo di sostituzione a termine delle vita utile è di 1'000 €/kWe, il costo di gestione annuo è di 2 c€/kWe per ogni ora di funzionamento.

Per i MCI si ha la seguente variazione di costo con la taglia:

- Costo di acquisto e installazione
  - 200 kW: 1'300 €/kWe
  - 400 kW: 1'200 €/kWe
  - 600 kW: 1'100 €/kWe
  - 800 kW: 1'000 €/kWe
  - 1'00 kW: 900 €/kWe

- Costo di sostituzione
  - 200 kW: 1'200 €/kWe
  - 400 kW: 1'100 €/kWe
  - 600 kW: 1'000 €/kWe
  - 800 kW: 900 €/kWe
  - 1'00 kW: 800 €/kWe

Il costo annuo di gestione degli MCI va calcolato considerando 3 c€/kWe per ogni ora di funzionamento.

Considerando l'incertezza sui costi del GPL, occorre definire diversi scenari di costo per ognuno dei cogeneratori impiegati. Per le microturbine e per i MCI ad accensione comandata si considerano i seguenti scenari di costo del GPL: 0.6-0.7-0.8-0.9-1 €/l, che di seguito saranno per comodità indicati con le lettere: B-C-D-E-F. Per i MCI ad accensione spontanea alimentati da olio denso BTZ (Ecoden) e gasolio non è necessario fare la stessa distinzione del GPL. Inoltre, per ognuno degli scenari proposti occorre considerare la presenza di diverse taglie di cogeneratori: da 200 a 1'000 kWe. In totale saranno quindi esaminate 105 combinazioni, scegliendo per ciascun scenario di costo la migliore soluzione impiantistica, escludendo a priori la possibilità di operare simultaneamente con più generatori alimentati da diverse fonti energetiche. Un'altra ipotesi semplificativa adottata sta nel trascurare, data la loro bassa incidenza sui parametri economici, l'influenza degli eventuali TEE (certificati bianchi) conseguibili nel caso di cogenerazione ad alto rendimento (CAR) [39].

Per implementare la procedura di calcolo oraria su Homer, è necessario avere a disposizione le curve caratteristiche delle varie macchine con le prestazioni al variare del carico. Tali curve sono state ricavate dai costruttori dei cogeneratori [31] o dalla letteratura specializzata [29]. A scopo esemplificativo, nella figura 5.15 è riportata la variazione del rendimento elettrico dei MCI e di due microturbine a gas, scegliendo quelle con la potenza minima e massima, in funzione del carico nominale (espresso in percentuale).

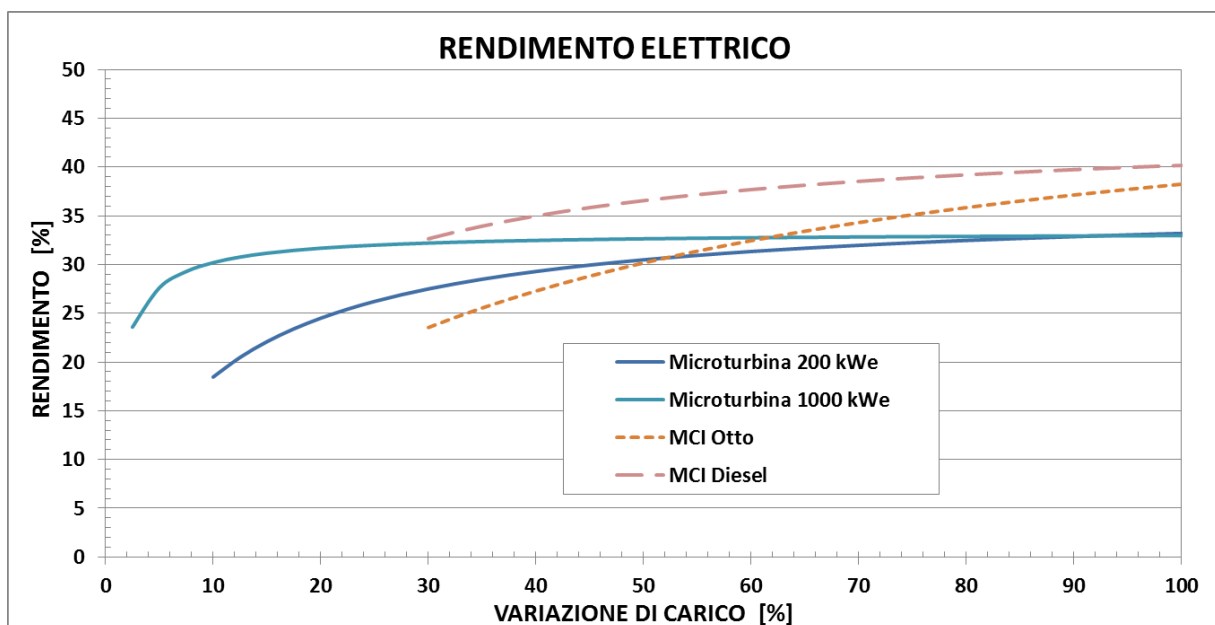


Figura 5.15 - Variazione del rendimento elettrico in funzione del carico.

I risultati ottenuti sono riportati nella tabella 5.16, per ogni scenario si presenta soltanto la taglia con la quale si raggiungono i migliori risultati economici in termini di Costi annui di gestione. Nelle figure susseguenti la tabella sono riportati i valori delle emissioni evitate di CO<sub>2</sub> e il risparmio di energia primaria conseguito con la cogenerazione. Non tutti i casi esaminati sono positivi, ad esempio nello scenario F (costo del GPL pari a 1 €/l) il prezzo del combustibile che alimenta i cogeneratori è così elevato che non vi è alcuna convenienza economica nel far partire le macchine, siano esse microturbine o MCI.



Tabella 5.16 - Risultati dell'analisi energetico-economica degli impianti cogenerativi.

CONFIGURAZIONE	DATI DEL COGENERATORE			ACQUISTO ANNUO DI ENERGIA			PARAMETRI		
	Taglia Cogeneratore	Alimentazione	Ore di Funzionamento	Energia Elettrica	Combustibile Caldaie	Combustibile Cogeneratore	Costi Totali	Emissioni CO <sub>2</sub>	Energia Primaria
AOB				11'376	8'700	0	2'799'251	7'538	36'447
Microturbine B	1'000	GPL (0.6 €/l)	2'438	9'289	5'375	6'341	2'669'736	7'193	34'373
Microturbine C	1'000	GPL (0.7 €/l)	1'581	10'039	6'569	4'064	2'734'983	7'317	35'118
Microturbine D	1'000	GPL (0.8 €/l)	1'026	10'379	7'114	3'026	2'783'186	7'373	35'454
Microturbine E	0	GPL (0.9 €/l)	0	11'376	8'700	0	2'799'251	7'538	36'447
Microturbine F	0	GPL (1.0 €/l)	0	11'376	8'700	0	2'799'251	7'538	36'447
MCI_B	1'000	GPL (0.6 €/l)	2'772	8'883	5'183	6'715	2'637'741	7'047	33'565
MCI_C	1'000	GPL (0.7 €/l)	1'426	10'096	6'900	3'450	2'704'373	7'288	34'975
MCI_D	1'000	GPL (0.8 €/l)	1'163	10'213	7'105	3'076	2'750'155	7'308	35'091
MCI_E	1'000	GPL (0.9 €/l)	845	10'531	7'554	2'210	2'788'589	7'369	35'450
MCI_F	0	GPL (1.0 €/l)	0	11'376	8'700	0	2'799'251	7'538	36'447
MCI_D_Ecoden	1'000	Ecoden	1'674	9'877	6'853	3'810	2'696'273	7'409	34'752
MCI_D_Gasolio	1'000	Gasolio	1'680	9'865	6'867	3'805	2'696'937	7'371	34'731
	<i>kWe</i>		<i>ore</i>	<i>MWh</i>	<i>MWh</i>	<i>MWh</i>	<i>€/anno</i>	<i>t/anno</i>	<i>MWh</i>

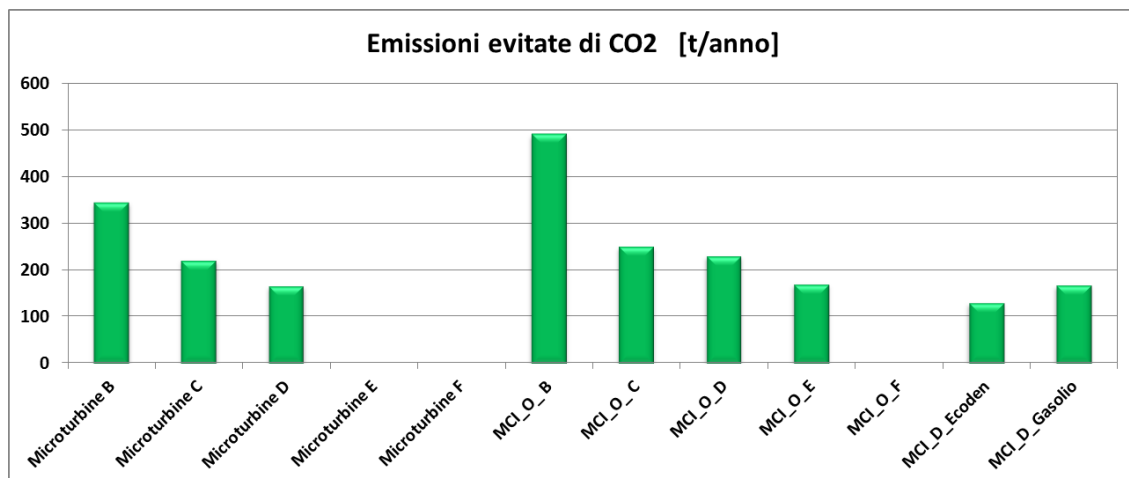


Figura 5.16 - Emissioni (CO<sub>2</sub>) evitate per gli impianti di cogenerazione proposti.

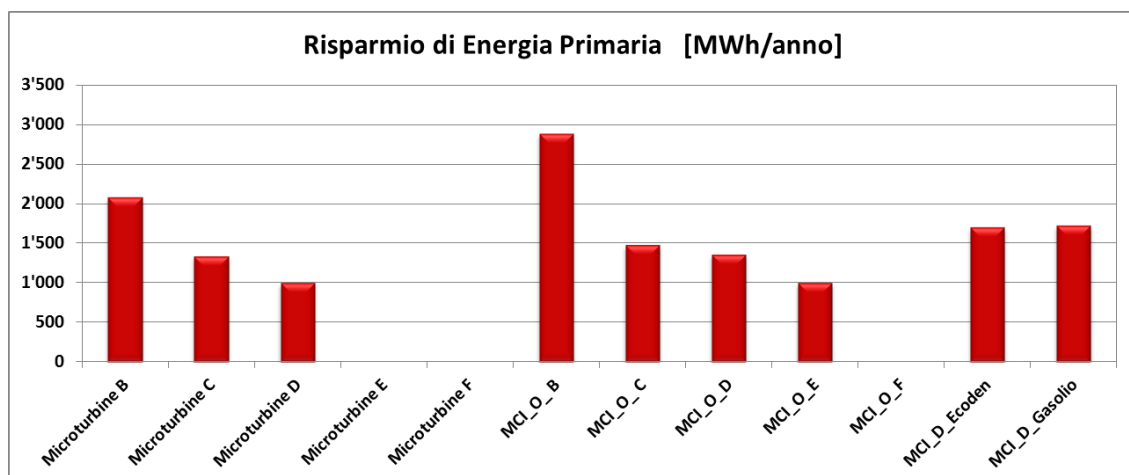


Figura 5.17 - Risparmio di energia primaria per gli impianti di cogenerazione proposti.

Eseguendo un'attenta analisi dei risultati si può notare che, tra tutti i scenari esaminati, soltanto i seguenti due meritano un'ulteriore analisi approfondita: nello scenario B (GPL a 0.6 €/l) la migliore soluzione è il motore a combustione interna da 1'000 kWe; gli scenari da C a F devono essere scartati perché al posto di essi conviene impiegare il MCI da 1'000 kWe alimentato a gasolio. Tutte le microturbine alimentate a GPL sono meno prestanti rispetto ai motori a combustione interna alimentati con GPL per qualunque scenario di costo analizzato. Inoltre, poiché non vi è grande differenza tra gli MCI alimentati con gasolio ed Ecoden, la scelta è caduta sul primo per le migliori prestazioni in termini di risparmio di energia primaria ed emissioni di CO<sub>2</sub> evitate.

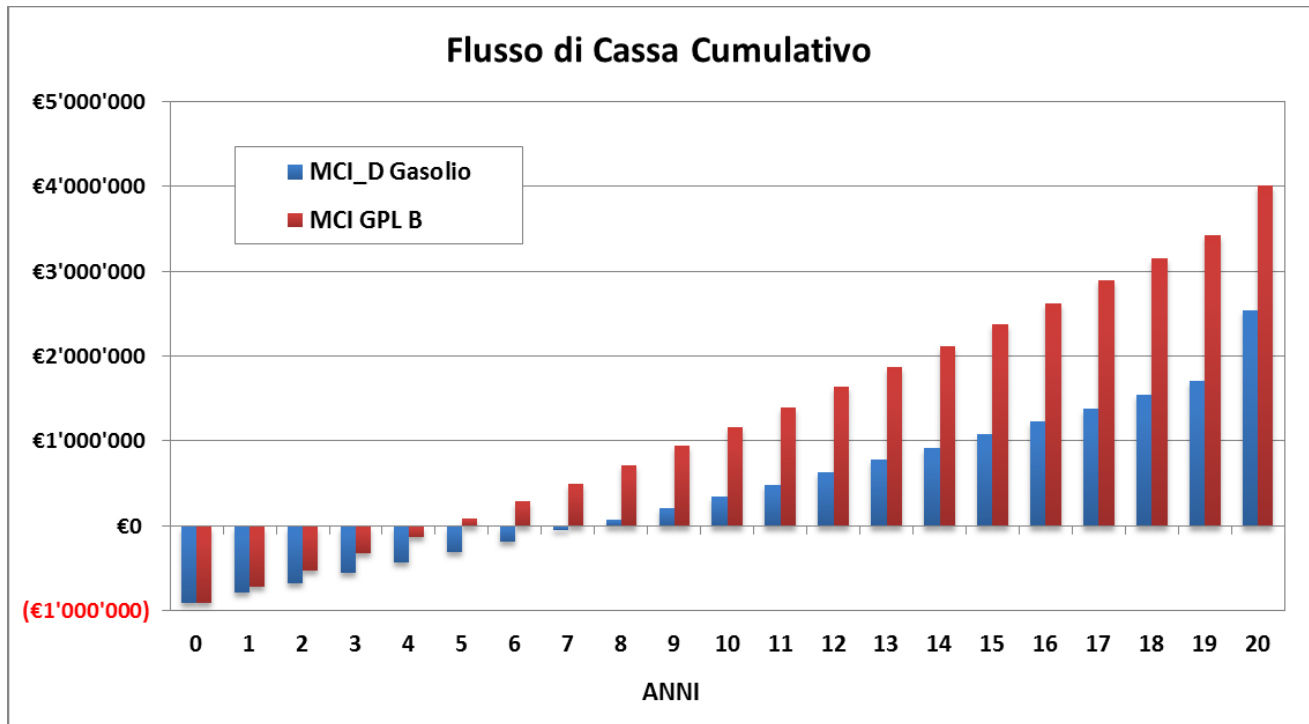


Figura 5.18 - Flusso di cassa cumulativi dei due scenari cogenerativi.

L'analisi dei principali indicatori economici, tabella 5.17, mostra come la cogenerazione sia una valida proposta per il risparmio energetico ed economico. I tempi di ritorno e la redditività dell'investimento sono strettamente legati al prezzo di acquisto del combustibile per alimentare i cogeneratori. Nel peggior caso possibile, MCI a Gasolio, si hanno comunque un tempo di ritorno dell'investimento inferiore agli otto anni e un risparmio economico pari a circa 100'000 €. Anche dal punto di vista ambientale, emissioni ed energia primaria, si ottengono buone prestazioni che fanno ulteriormente propendere per la soluzione cogenerativa.

Tabella 5.17 - Riepilogo risultati dell'analisi tecnico-economica degli impianti di cogenerazione.

CONFIGURAZIONI SCELTE	MCI_D Gasolio	MCI GPL B	
VAN	2'547'019	4'020'670	€
PBT	7.35	4.59	anni
IRR	13.98%	22.62%	%
Risparmio Economico	102'314	161'510	€/anno
Emissioni evitate CO <sub>2</sub>	167	492	t/anno
Risparmio Energia Primaria	1'715	2'882	MWh/anno

### 5.3.2.4 TRIGENERAZIONE

Data la particolare distribuzione temporale dei carichi termici ed elettrici, vedi figura 5.4, sfasati a causa del riscaldamento e del raffrescamento, è stata valutata la possibilità di utilizzare la trigenerazione. Data l'impossibilità di simulare un impianto di trigenerazione su Homer, è stato adottato un approccio semplificato che consiste nell'utilizzare lo stesso modello matematico adottato per la cogenerazione, variando le curve di carico elettrico e termico considerando che una parte del carico frigorifero sia soddisfatta da macchine ad assorbimento. La tipologia di macchina presa in considerazione è del tipo a singolo effetto, si è ipotizzato un COP medio annuo costante e pari a 0.8. Questo valore, insieme al COP medio annuo dell'impianto a compressione già utilizzato nell'AOB e pari a 2.7, è stato utilizzato per convertire una parte del carico elettrico in carico termico. Nell'analisi sono state considerate diverse configurazioni in cui il 20-40-60% dell'intero carico frigorifero viene coperto dalle macchine ad assorbimento, mentre la restante quota dall'impianto tradizionale oggi presente nella struttura. Le potenze degli assorbitori relative ai carichi menzionati sono rispettivamente 630, 1'260, 1'890 kWf. I cogeneratori utilizzati sono gli stessi risultanti dall'analisi sulla cogenerazione del paragrafo precedente. Saranno esaminati i due migliori scenari di costo ottenuti per la cogenerazione: il primo, scenario B, con MCI alimentati a GPL con prezzo di 0.6 €/l; per prezzi del GPL superiori ai 0.7 €/l risulta più conveniente utilizzare i MCI alimentati a gasolio. I costi degli impianti dipendono dalla potenza frigorifera installata, per questo motivo è stata utilizzata una funzione di costo ricavata dalla letteratura [40] che correla il costo specifico €/kWf con le dimensioni dell'impianto. Il costo di manutenzione dipende dalla produttività dell'impianto ed è stato stimato in 0.01 €/kWh frigorifero prodotto. La vita utile delle macchine ad assorbimento è stata ipotizzata pari a 20 anni. Nella tabella seguente sono riportati dati e costi delle tre configurazioni impiantistiche esaminate.

**Tabella 5.18 - Dati e costi degli impianti ad assorbimento al variare del carico frigorifero prodotto.**

Carico Frigorifero	Potenza Installata	COP medio	Costo Impianto	Costi Gestione
20	630	0.8	145'700	11'800
40	1'260	0.8	208'400	23'500
60	1'890	0.8	257'000	35'300
%	kWf		€	€/anno

**Tabella 5.19 - Risultati dell'analisi energetico-economica degli impianti di trigenerazione.**

CONFIGURAZIONE	DATI GENERALI IMPIANTI			ACQUISTO ANNUO DI ENERGIA			PARAMETRI		
	Taglia Cogeneratore	Alimentazione	Potenza Assorbitore	Energia Elettrica	Combustibile Caldaie	Combustibile Cogeneratore	Costi Anni Totali	Emissioni CO <sub>2</sub>	Energia Primaria Utilizzata
AOB	0			0	11'376	8'700	0	2'799'251	7'538
MCI_B + ASS 0%	1'000	GPL (0.6 €/l)	2'772	0	8'883	5'183	6'715	2'637'741	7'047
MCI + ASS 0%	1'000	Gasolio	1'680	0	9'865	6'867	3'805	2'696'937	7'371
MCI_B + ASS 20%	800	GPL (0.6 €/l)	3'972	630	8'297	6'145	7'455	2'708'323	7'227
MCI + ASS 20%	800	Gasolio	2'869	630	8'969	7'567	5'183	2'775'465	7'534
MCI_B + ASS 40%	1'000	GPL (0.6 €/l)	4'776	1'260	6'438	5'400	11'465	2'759'345	7'144
MCI + ASS 40%	1'000	Gasolio	2'811	1'260	8'186	8'383	6'285	2'847'897	7'704
MCI_B + ASS 60%	1'000	GPL (0.6 €/l)	5'441	1'890	5'353	5'790	13'341	2'828'874	7'213
MCI + ASS 60%	1'000	Gasolio	2'835	1'890	7'729	9'613	6'533	2'936'910	7'907
	kWe		kWp	MWh	MWh	MWh	€/anno	t/anno	MWh/anno

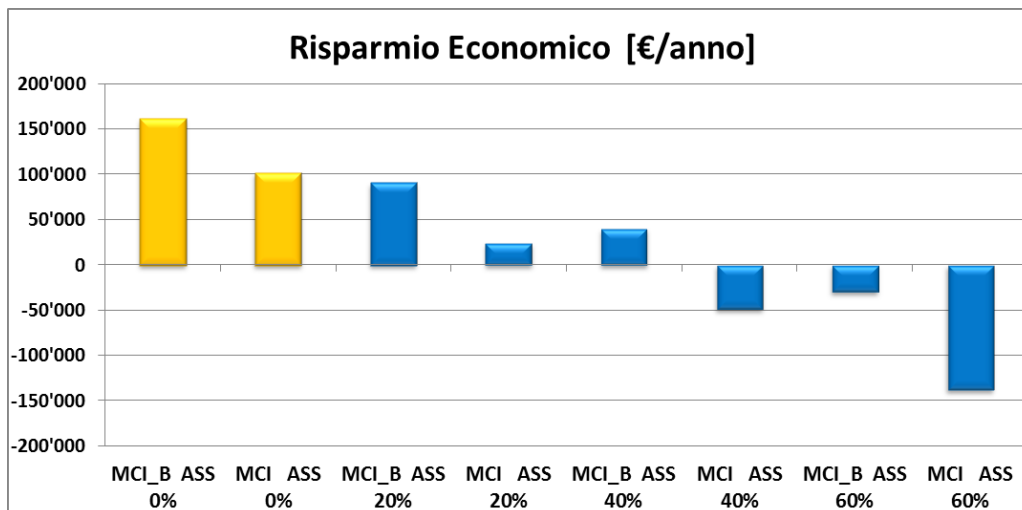


Figura 5.19 - Risparmi economici per gli impianti di trigenerazione proposti.

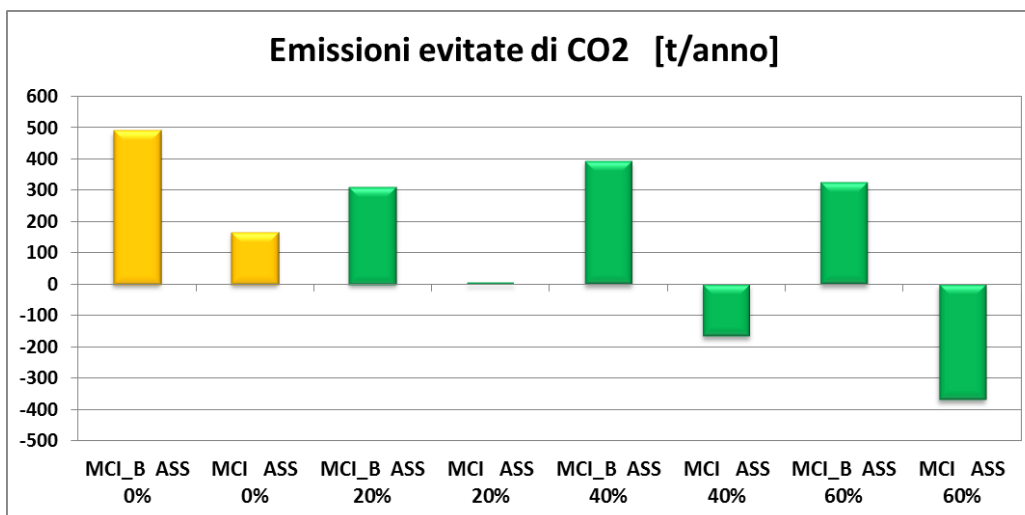


Figura 5.20 - Emissioni (CO<sub>2</sub>) evitate per gli impianti di trigenerazione proposti.

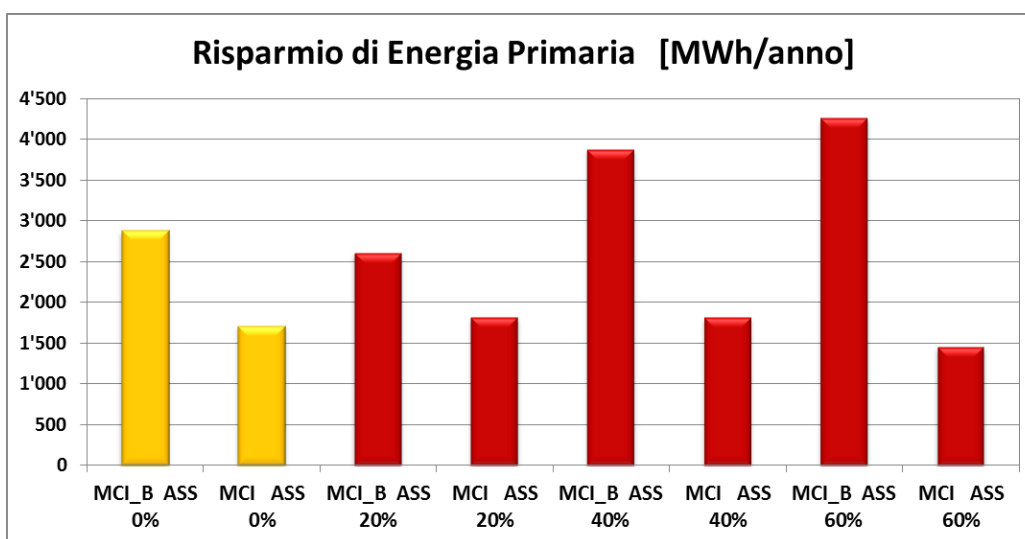


Figura 5.21 - Risparmio di energia primaria per gli impianti di trigenerazione proposti.

Come si può notare nella figura 5.19, la trigenerazione, indicata con le barre blu, non porta alcun vantaggio economico rispetto alla sola cogenerazione, indicata con le barre gialle. Oltre a presentare dei risparmi economici

inferiori alla cogenerazione si nota che all'aumentare della quota di energia frigorifera prodotta dalle macchine ad assorbimento si ha un marcato decremento dei risparmi, fino ad arrivare a valori di risparmio negativi, indici di un maggior costo di questa tecnologia rispetto alla situazione attualmente esistente nell'AOB. Una situazione simile è visibile per le emissioni di CO<sub>2</sub>, che aumentano (nella figura 5.20 si nota la diminuzione della riduzione di emissioni) rispetto alla semplice cogenerazione. Per quanto riguarda il risparmio di energia primaria, figura 5.21, si hanno visibili vantaggi soltanto nel caso di scenario B, ovvero MCI alimentato con del GPL acquistato a 0.6 €/l.

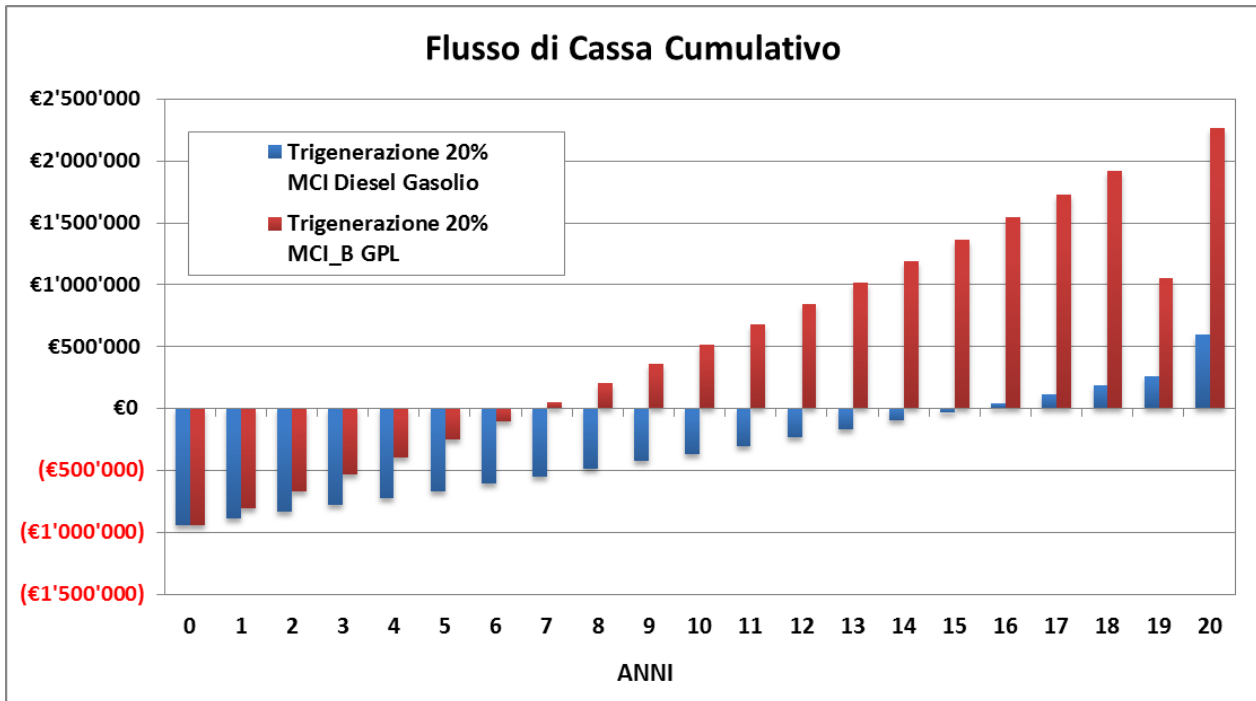


Figura 5.22 - Flussi di cassa cumulativi dei due scenari trigenerativi.

Completiamo ora l'analisi economica con l'esame dei flussi di cassa cumulativi, figura 5.22, e dei principali indicatori economici, tabella 5.20. Data la scarsa attrattiva economica dell'investimento, consideriamo soltanto la configurazione in cui si ha la minima produzione di energia frigorifera attraverso trigenerazione, 20% del carico frigorifero. Tutti gli indicatori economici della trigenerazione sono peggiorativi dei corrispettivi indici della cogenerazione. Il VAN diminuisce di circa 2 Milioni di €, i tempi di ritorno raddoppiano per il caso di cogeneratore a MCI alimentato Gasolio mentre per lo scenario con MCI a GPL l'aumento è molto più contenuto, circa 2 anni. Anche il tasso interno di rendimento subisce un netto peggioramento, diminuendo di quasi 8-10 punti percentuali per tutte le configurazioni esaminate.

Tabella 5.20 - Riepilogo risultati dell'analisi tecnico-economica degli impianti trigenerativi.

CONFIGURAZIONI SCELTE	MCI_D Gasolio ASSORB. 20%	MCI GPL B ASSORB. 20%	
VAN	592'138	2'263'574	€
PBT	15.43	6.67	anni
IRR	4.20%	14.56%	%
Risparmio Economico	23'786	90'928	€/anno
Emissioni evitate CO <sub>2</sub>	5	311	t/anno
Risparmio Energia Primaria	1'821	2'611	MWh/anno

### 5.3.2.5 SISTEMA MULTIENERGETICO

Con il termine “Multienergetico” s’intende una tipologia di sistema in cui più fonti energetiche, tradizionali e/o rinnovabili, contribuiscono contemporaneamente a soddisfare le richieste energetiche dell’utenza. Lo schema semplificato del sistema multienergetico studiato per l’AOB è riportato nella figura 5.23. Per far fronte alle diverse richieste energetiche delle utenze (ACS, Riscaldamento, Raffrescamento, Elettricità) sono proposti i seguenti sistemi:

- un impianto solare termico dedicato alla sola produzione di ACS;
- un impianto fotovoltaico per integrare le richieste di energia elettrica in BT;
- un impianto di cogenerazione, che produce contemporaneamente energia elettrica e termica per alimentare direttamente (ACS e riscaldamento) o indirettamente, tramite le macchine ad assorbimento, tutti fabbisogni termici;
- le caldaie e i gruppi frigo già presenti nella struttura, che saranno entrambi utilizzati come sistemi ausiliari e d’integrazione.

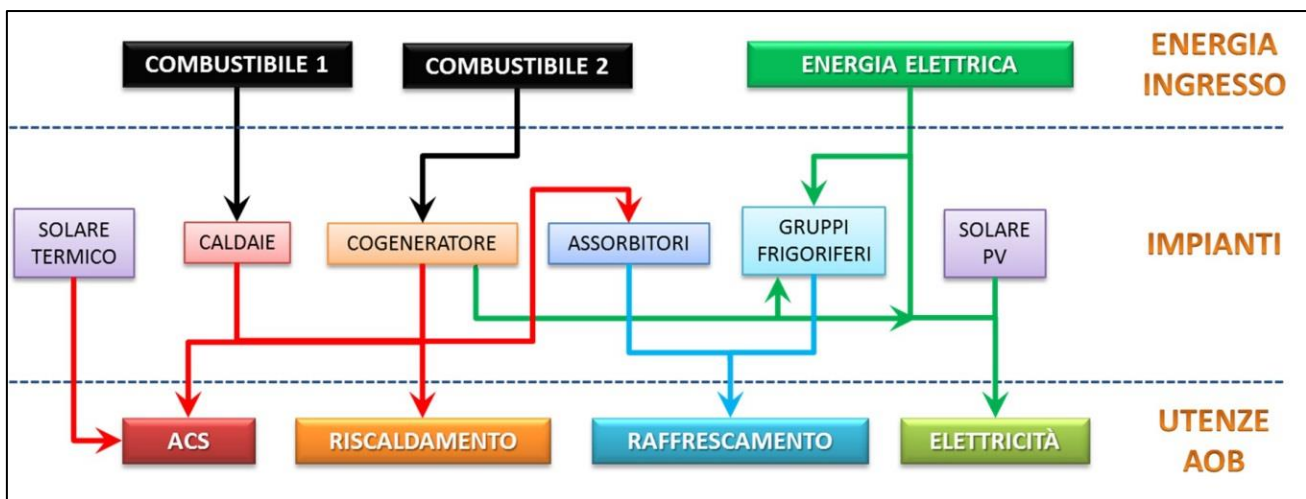


Figura 5.23 – Schema a blocchi del sistema multienergetico analizzato.

Prima di procedere con l’analisi dei sistemi multienergetici, ricapitoliamo i risultati, ottenuti nei paragrafi precedenti, relativi alle prestazioni economiche dei singoli impianti presi separatamente. Nella tabella 5.21 sono riportati i valori dei cinque indicatori adottati, nelle figure seguenti sono presentati gli andamenti di VAN, PBT e IRR.

Tabella 5.21 - Riepilogo dei risultati delle analisi tecnico-economiche precedenti.

CONFIGURAZIONI SCELTE	COGENERAZIONE		TRIGENERAZIONE		UNITÀ DI MISURA
	MCI GPL 1'000 kW (Scenario 1)	MCI Gasolio 1'000 kW (Scenari 2-3)	MCI GPL 1 MW Assorb. 20% (Scenario 1)	MCI Gasolio 1 MW Assorb. 20% (Scenari 2-3)	
VAN	4'020'670	2'547'019	2'263'574	592'138	€
PBT	4.59	7.35	6.67	15.43	anni
IRR	22.62	13.98	14.56	4.20	%
RISPARMIO ECONOMICO	161'510	102'314	90'928	23'786	€/anno
EMISSIONI EVITATE CO <sub>2</sub>	492	167	311	5	t/anno
RISPARMIO ENERGIA PRIMARIA	2'882	1'715	2'611	1'821	MWh/anno

CONFIGURAZIONI SCELTE	SOLARE TERMICO			SOLARE FOTOVOLTAICO			UNITÀ DI MISURA
	300 Collettori (657 m <sup>2</sup> ) FCS: 34%	450 Collettori (986 m <sup>2</sup> ) FCS: 48%	600 Collettori (1'314 m <sup>2</sup> ) FCS: 56%	1'575 m <sup>2</sup> 300 kWp	1'667 m <sup>2</sup> 400 kWp	2'083 m <sup>2</sup> 500 kWp	
VAN	1'180'266	1'569'501	1'843'110	280'942	528'096	775'250	€
PBT	8.52	9.11	9.74	18.02	17.20	16.70	anni
IRR	10.73	9.73	8.76	1.35	1.88	2.19	%
RISPARMIO ECONOMICO	47'411	63'047	74'038	11'285	21'214	31'142	€/anno
EMISSIONI EVITATE CO <sub>2</sub>	219	307	383	195	260	325	t/anno
RISPARMIO ENERGIA PRIMARIA	788	1'105	1'378	1'055	1'407	1'759	MWh/anno

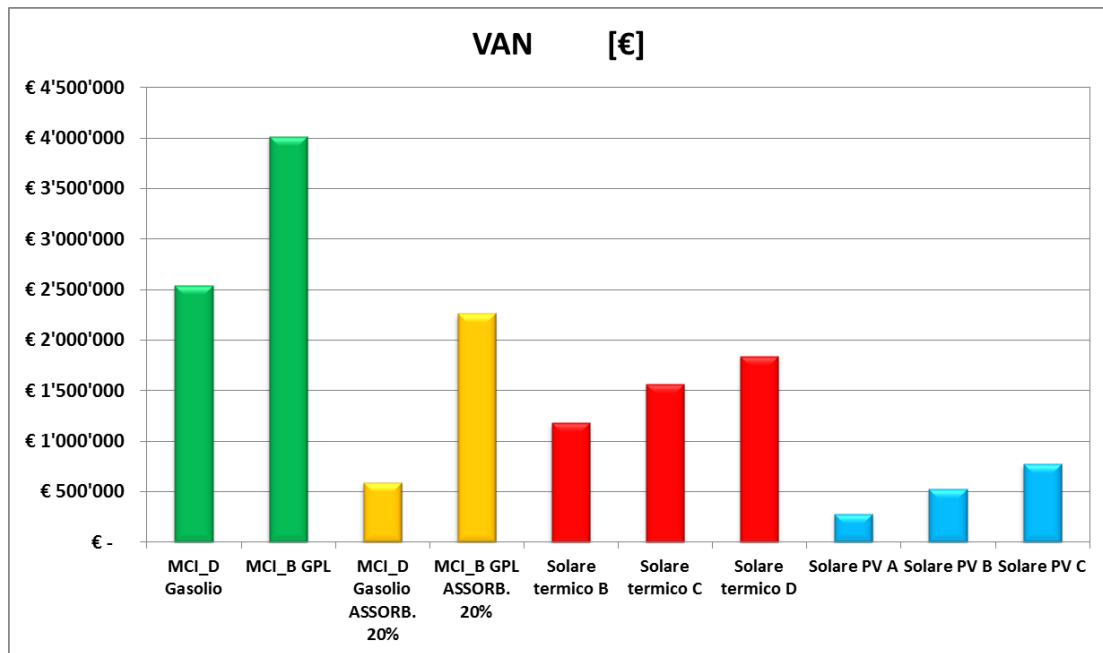


Figura 5.24 - Analisi del VAN degli impianti esaminati.

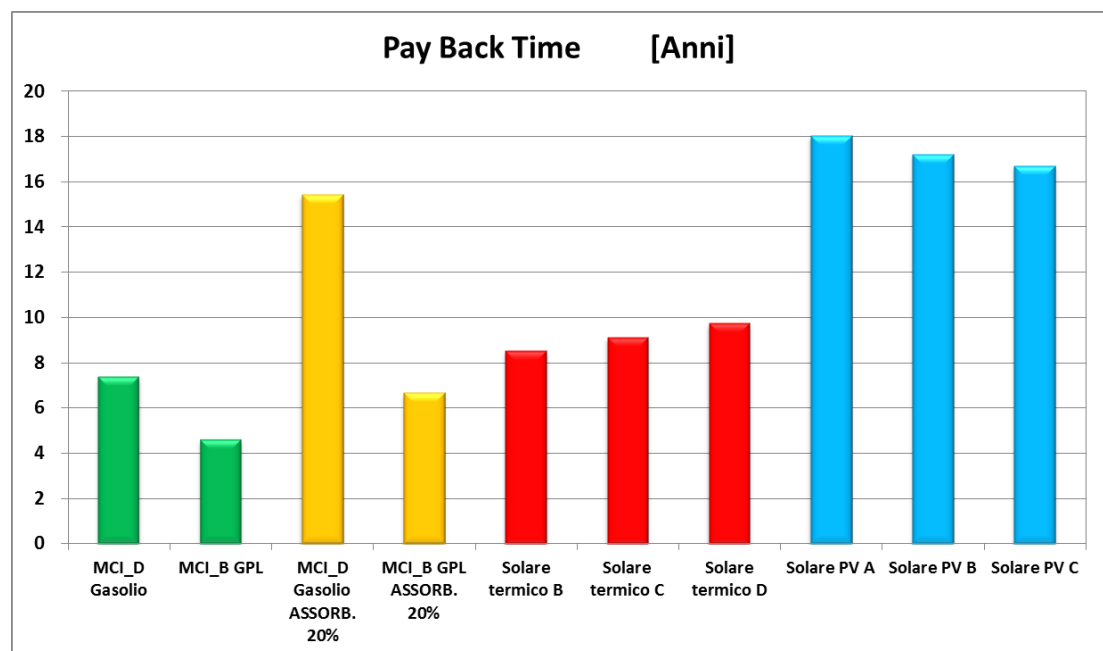
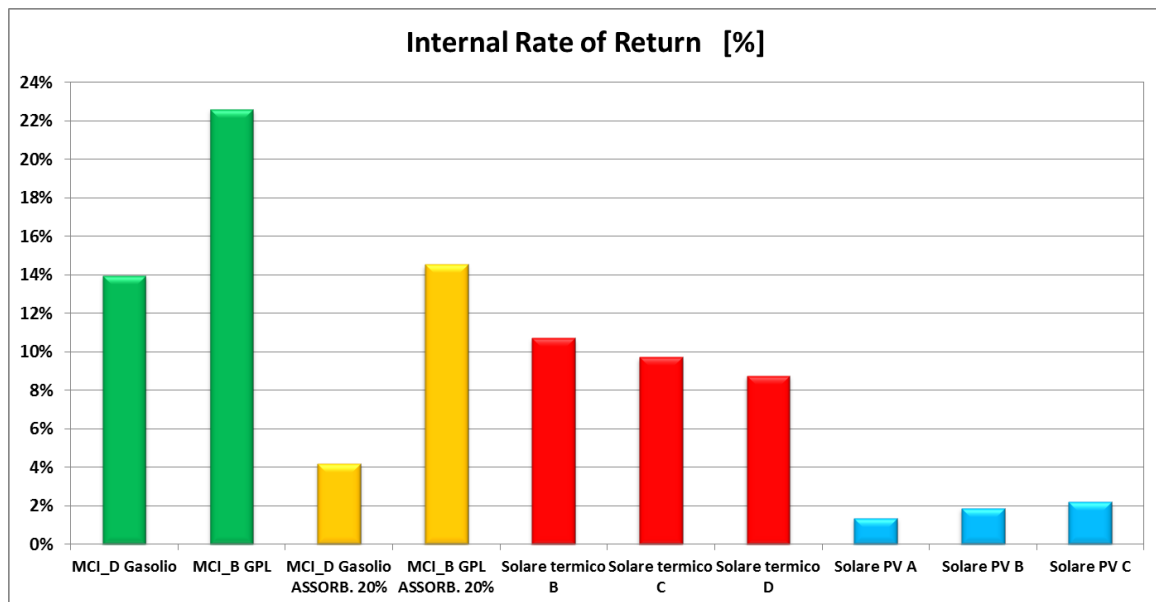


Figura 5.25 - Analisi del Pay Back Time degli impianti esaminati.



**Figura 5.26 - Analisi del Tasso Interno di Rendimento degli impianti esaminati.**

Tra le quattro soluzioni proposte, la cogenerazione è sicuramente quella con le migliori prestazioni economiche, ossia VAN elevati e tempi di ritorno contenuti. L'utilizzo della trigenerazione porta ad un deterioramento di codesti parametri e, data la mutua esclusività di queste due proposte, occorre scartare l'ipotesi trigenerativa dalla modellazione del sistema multienergetico. Gli impianti fotovoltaici presentano le peggiori performance economiche, nonostante ciò la configurazione C, corrispondente a 500 kWp, sarà inclusa nel modello multienergetico in modo da verificare la sua influenza su un sistema complesso costituito da più impianti.

Esaminiamo ora il sistema multienergetico costituito dalla combinazione degli impianti cogenerativi, solari termici e solari fotovoltaici. L'analisi sarà condotta separatamente per entrambi gli scenari di costo del combustibile descritti in precedenza. Date le buone prestazioni degli impianti cogenerativi, essi saranno sempre inclusi nel modello e costituiranno la base per le combinazioni con gli impianti solari termici, nelle configurazioni B-C-D, e con l'impianto fotovoltaico C, quello con le migliori prestazioni economiche. Per ogni scenario esaminato saranno quindi presenti otto diverse combinazioni impiantistiche. I risultati ottenuti sono presentati nelle tabelle seguenti.

**Tabella 5.22 - Risultati sistemi multienergetici per lo scenario 1.**

SCENARIO 1: Costo GPL 0,6 €/l [8.46 c€/kWh]								
CONFIGURAZIONI			INDICATORI ECONOMICI-ENERGETICI-AMBIENTALI					
Cogeneratore	Solare Termico	Solare PV	VAN	PBT	IRR	Risparmio Economico	Emissioni CO <sub>2</sub> Evitate	Risparmio Energia Primaria
MCI Otto 1'000 kW	0	0	4'020'670	4.58	22.62	161'510	492	2'882
MCI Otto 1'000 kW	657	0	4'909'058	6.09	16.64	197'197	672	3'447
MCI Otto 1'000 kW	986	0	5'224'071	6.68	14.96	209'850	752	3'713
MCI Otto 1'000 kW	1'314	0	5'435'368	7.26	13.54	218'338	816	3'920
MCI Otto 1'000 kW	0	500	4'581'368	10.40	8.04	201'014	799	4'533
MCI Otto 1'000 kW	657	500	5'489'803	10.38	8.08	237'506	981	5'107
MCI Otto 1'000 kW	986	500	5'810'820	10.47	7.96	250'401	1'061	5'375
MCI Otto 1'000 kW	1'314	500	6'028'425	10.65	7.74	259'142	1'126	5'584
	<i>m<sup>2</sup></i>	<i>kWp</i>	<i>€</i>	<i>anni</i>	<i>%</i>	<i>€/anno</i>	<i>tCO<sub>2</sub>/anno</i>	<i>MWh/anno</i>



Tabella 5.23 - Risultati sistemi multienergetici per lo scenario 2.

SCENARIO 2: Costo Gasolio 0.98 €/l [9.96 c€/kWh]								
CONFIGURAZIONI			INDICATORI ECONOMICI-ENERGETICI-AMBIENTALI					
Cogeneratore	Solare Termico	Solare PV	VAN	PBT	IRR	Risparmio Economico	Emissioni CO <sub>2</sub> Evitate	Risparmio Energia Primaria
MCI Diesel 1'000 kW	0	0	2'547'019	7.35	13.98	102'314	167	1'715
MCI Diesel 1'000 kW	657	0	3'548'824	8.18	12.05	142'556	374	2'383
MCI Diesel 1'000 kW	986	0	3'894'382	8.61	11.21	156'437	460	2'672
MCI Diesel 1'000 kW	1'314	0	4'130'735	9.09	10.38	165'931	533	2'920
MCI Diesel 1'000 kW	0	500	3'032'868	13.26	5.43	142'906	483	3'394
MCI Diesel 1'000 kW	657	500	4'052'520	12.45	6.08	183'865	691	4'070
MCI Diesel 1'000 kW	986	500	4'402'445	12.33	6.14	197'922	777	4'361
MCI Diesel 1'000 kW	1'314	500	4'642'743	12.39	6.06	207'574	851	4'609
	<i>m<sup>2</sup></i>	<i>kWp</i>	<i>€</i>	<i>anni</i>	<i>%</i>	<i>€/anno</i>	<i>tCO<sub>2</sub>/anno</i>	<i>MWh/anno</i>

La scelta della migliore configurazione è stata fatta tenendo conto di alcune condizioni sugli indicatori economici, utilizzati come metro di giudizio per l'analisi delle varie proposte. L'obiettivo primario che si è inteso perseguire è stato la ricerca della configurazione che massimizzi il VAN, e quindi il risparmio economico annuo, garantendo simultaneamente un PBT inferiore ai 10 anni e un tasso intero di rendimento (IRR) superiore al 10%. Data per certa la presenza di un cogeneratore le cui caratteristiche dipendono dallo scenario esaminato, la configurazione multienergetica scelta, in termini di superficie di collettori solari e presenza del fotovoltaico, è stata la stessa per tutti gli scenari. Per quanto riguarda la superficie di solare termico, si è deciso di non superare la quota di 1'000 m<sup>2</sup> a causa degli spazi limitati disponibili. La configurazione che soddisfa questi requisiti è quella che prevede i seguenti impianti (figura 5.27):

- ❖ **COGENERAZIONE** (Scenario 1): MCI a ciclo Otto, alimentato a GPL, da 1'000 kWe
- ❖ **COGENERAZIONE** (Scenario 2): MCI a ciclo Diesel, alimentato a Gasolio, da 1'000 kWe
- ❖ **SOLARE TERMICO**: 450 collettori (986 m<sup>2</sup>)
- ❖ **SOLARE FOTOVOLTAICO**: nessuno
- ❖ **TRIGENERAZIONE**: nessuno

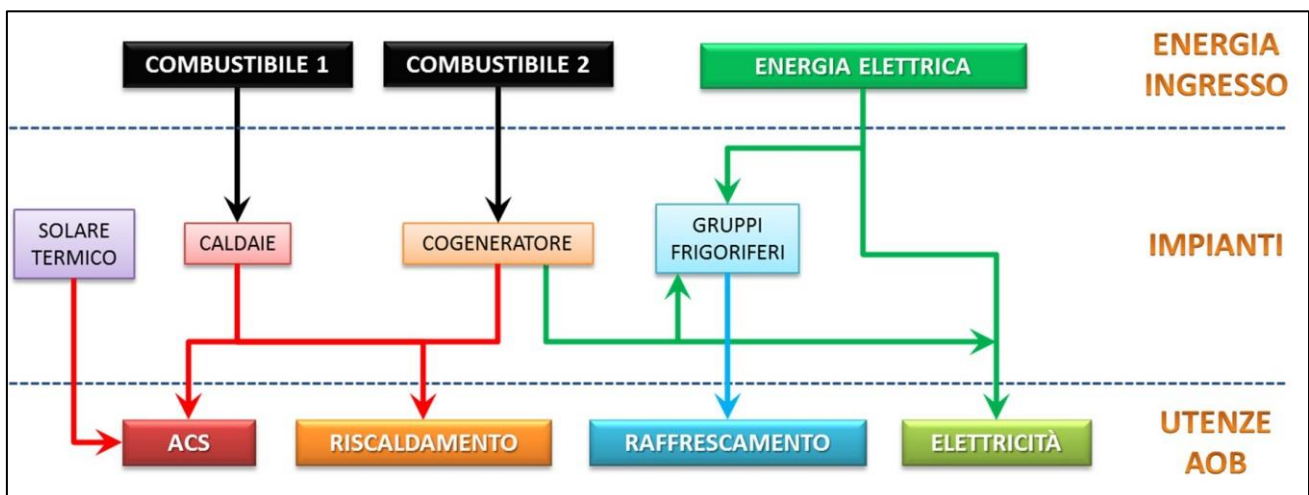


Figura 5.27 – Schema a blocchi del sistema multienergetico proposto per l'intervento.

5.3.3 ANALISI DETTAGLIATA SISTEMI PROPOSTI

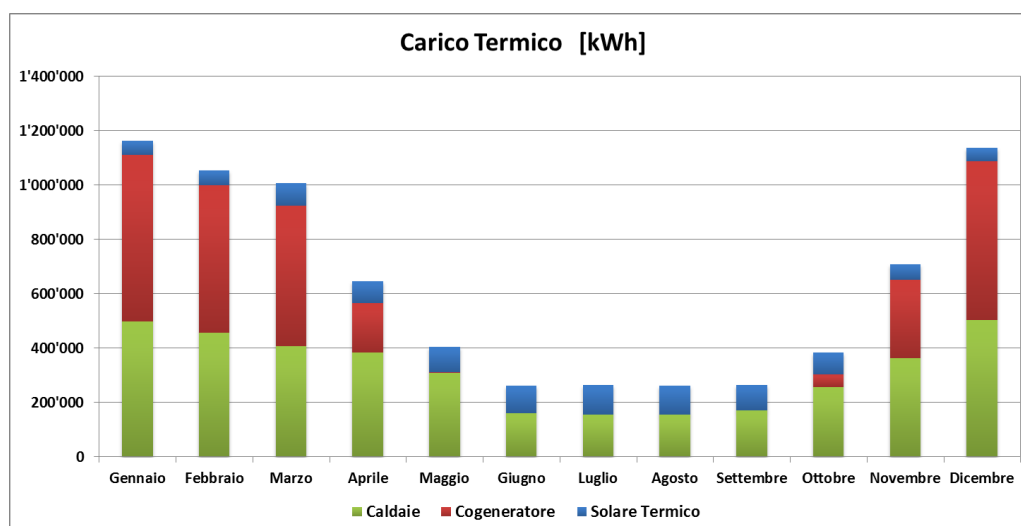
Saranno ora esaminate in maggior dettaglio le prestazioni tecnico-economiche degli impianti proposti per i due scenari di costo esaminati.

**SCENARIO N° 1**

Questo scenario prevede la possibilità di acquisto del GPL, per l'alimentazione dei cogeneratori, a un prezzo di 0.6 €/l, corrispondente a 8.46 c€/kWh. Il prezzo qui utilizzato è relativo all'utente finale, al netto quindi di tutti i costi delle infrastrutture e della defiscalizzazione per cogenerazione. L'impianto comprende l'utilizzo di un motore a combustione interna da 1'000 kWe alimentata a Gpl e 450 collettori solari termici, per un'area utile di 986 m<sup>2</sup>. Tale impianto è quindi in grado di produrre energia elettrica ed energia termica, sia per gli usi di riscaldamento che per la produzione di ACS. La produzione mensile di energia, da parte dell'impianto proposto, è riportata nella tabella 5.24 e nelle figure 5.28-29.

**Tabella 5.24. Produzione di energia dell'impianto operante secondo lo scenario 1.**

MESI	RICHIESTA DI CARICO AOB		SCENARIO DI INTERVENTO N° 1: COGENERATORE a GPL MCI da 1'000 kW, SUPERFICIE DI COLLETTORI SOLARI TERMICI da 986 m <sup>2</sup> , COSTO del GPL 0.6 €/litro [8.46 c€/kWh]				
			ENERGIA ELETTRICA	ENERGIA TERMICA		CARICO RESTANTE (Fonti Tradizionali)	
	Elettrico	Termico	Cogeneratore	Solare Termico	Cogeneratore	Rete	Caldaie
Gennaio	840'571	1'165'625	518'583	52'352	613'733	321'988	499'540
Febbraio	755'059	1'056'115	457'551	56'185	542'801	297'508	457'129
Marzo	799'279	1'008'715	424'601	83'534	515'674	374'678	409'507
Aprile	742'968	646'776	125'568	78'807	184'046	617'400	383'923
Maggio	885'658	404'810	751	93'344	1'525	884'906	309'941
Giugno	1'066'176	263'160	0	101'416	0	1'066'176	161'744
Luglio	1'320'005	264'790	0	108'686	0	1'320'005	156'103
Agosto	1'349'988	262'409	0	107'416	0	1'349'988	154'992
Settembre	1'080'648	265'968	0	94'332	0	1'080'648	171'636
Ottobre	914'674	383'681	24'024	80'313	45'689	890'650	257'679
Novembre	796'824	709'056	210'823	56'061	288'526	586'001	364'470
Dicembre	824'426	1'137'576	492'342	49'215	583'936	332'084	504'426
<b>TOTALE</b>	<b>11'376'276</b>	<b>7'568'681</b>	<b>2'254'243</b>	<b>961'661</b>	<b>2'775'930</b>	<b>9'122'033</b>	<b>3'831'089</b>
	<i>kWh</i>	<i>kWh</i>	<i>kWh</i>	<i>kWh</i>	<i>kWh</i>	<i>kWh</i>	<i>kWh</i>



**Figura 5.28 - Produzione di energia termica dell'impianto operante secondo lo scenario 1.**

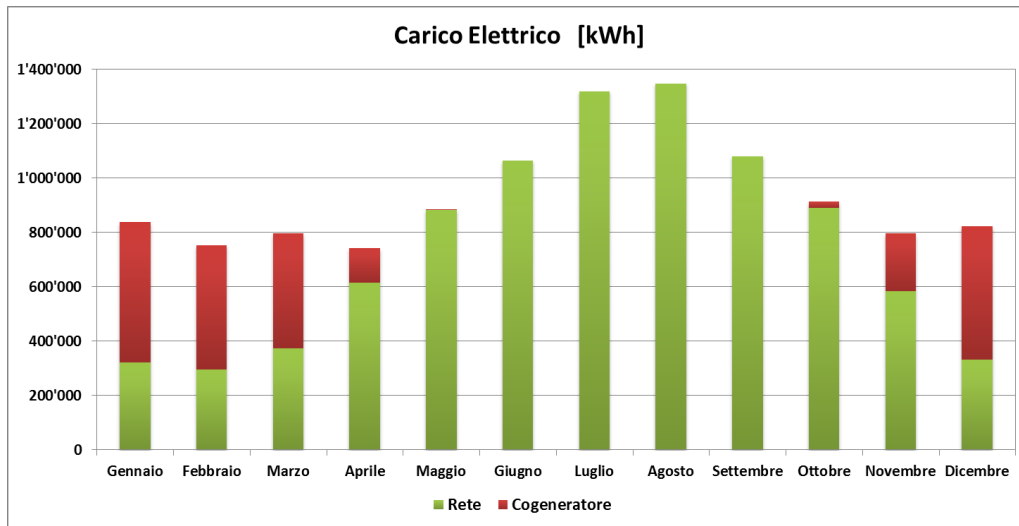


Figura 5.29 - Produzione di energia elettrica dell'impianto operante secondo lo scenario 1.

L'impianto proposto è in grado di autoprodurre il 19.8% dell'energia elettrica e il 49.4% dell'energia termica richiesta dall'AOB, per un'autoproduzione totale del 31.6% dell'energia necessaria per il funzionamento dell'ospedale. L'autoproduzione, com'è chiaramente visibile dalle figure, è concentrata maggiormente nel periodo invernale, tra i mesi di novembre e aprile. Nel restante periodo dell'anno l'autoproduzione elettrica e termica per riscaldamento è pressoché assente, a causa dello spegnimento dell'impianto cogenerativo, funzionante per 2'485 h/anno. In questi mesi resta in funzione il solo solare termico che autoproduce poco più della metà del fabbisogno di ACS. La quota di energia annua fornita da fonte rinnovabile è del 5.1%, 47.7% per la sola quota di ACS, tutta quanta dovuta al solare termico.

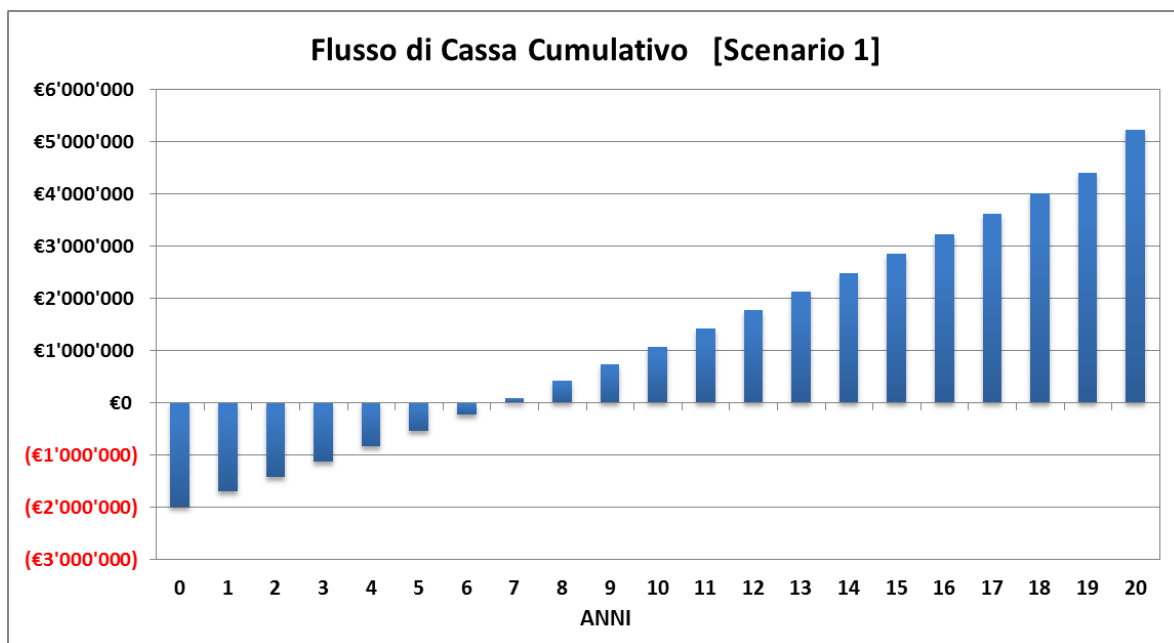


Figura 5.30 - Flussi di cassa cumulativi per la proposta d'intervento operante secondo lo scenario 1.

Il risparmio di energia primaria è pari a 3'713 MWh/anno (-10.2 %) con un taglio sulle emissioni di CO<sub>2</sub> di 752 t/anno (-9.98%). L'investimento iniziale richiesto per l'impianto è di 1'984 k€, il 45.4% per l'impianto di cogenerazione e il restante 54.6% per il solare termico. L'analisi dei flussi di cassa cumulativi, figura 5.30, porta al calcolo dei parametri economici riportati nella tabella 5.25.

**Tabella 5.25 - Indicatori tecnico-economici-ambientali.**

VAN	5'224'071	€
PBT	6.68	anni
IRR	14.96	%
RISPARMIO ECONOMICO	209'850	€/anno
EMISSIONI EVITATE CO <sub>2</sub>	752	t/anno
RISPARMIO ENERGIA PRIMARIA	3'713	MWh/anno

Il tempo di ritorno ottenuto, inferiore ai 7 anni, e il tasso di rendimento, circa il 15%, sono indici di un buon investimento in grado di generare discreti risparmi economici annui, pari a poco meno di 210 k€/anno. Il bilancio economico, tabella 5.26, mostra i costi energetici annui e la loro suddivisione, sia nella situazione attuale che in quella post-intervento. La loro differenza genera il risparmio economico annuo appena menzionato. Nel caso dell'intervento si ha un costo totale (installazione, sostituzione, combustibile, manutenzione, gestione) livellato, calcolato considerando i 20 anni di funzionamento, di 660.2 k€/anno, il 92% dei quali è destinato all'impianto di cogenerazione. Considerando l'energia annua prodotta dalle diverse sezioni dell'impianto, sezione solare e sezione cogenerativa, si ottengono i seguenti costi specifici per l'energia prodotta:

- COGENERATORE: 12.06 c€/kWh (elettrico e termico)
- SOLARE TERMICO: 5.55 c€/kWh

Per fare un confronto con la situazione presente occorre ricordare che in assenza di interventi il costo di approvvigionamento attuale dell'energia è di 14.78 c€/kWh, comprendente sia l'elettrico che il termico.

**Tabella 5.26 - Bilancio economico per la proposta d'intervento operante secondo lo scenario 1.**

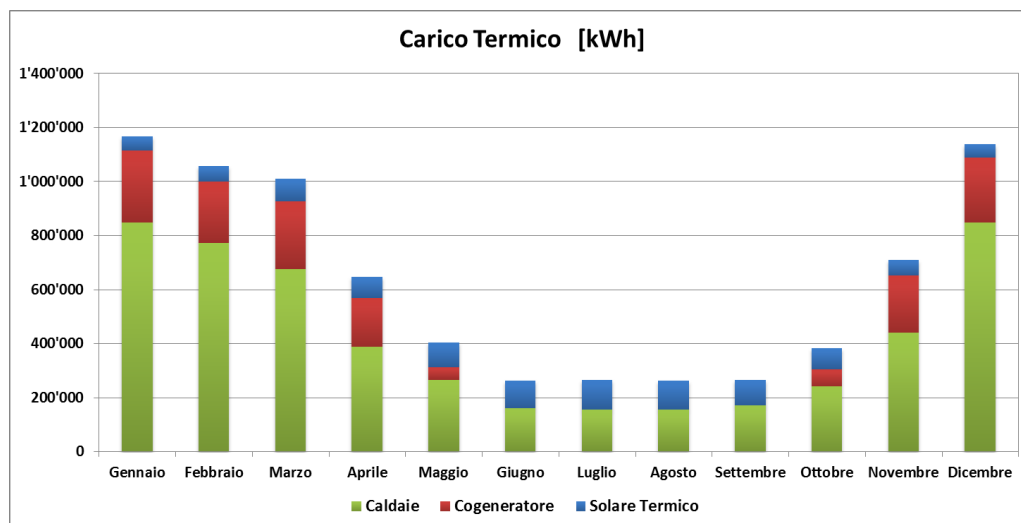
SITUAZIONE ATTUALE AOB		
Acquisto Energia Elettrica	1'882'179	€
Acquisto Energia Termica	917'072	€
<b>TOTALE</b>	<b>2'799'251</b>	<b>€</b>
INTERVENTO PROPOSTO		
Acquisto Energia Elettrica	1'462'453	€
Acquisto Energia Termica	466'785	€
Combustibile Cogenerazione	512'296	€
Ammortamento Impianti	63'461	€
Costi Gestione Impianti	84'405	€
<b>TOTALE</b>	<b>2'589'400</b>	<b>€</b>
<b>RISPARMIO ANNUO</b>	<b>209'851</b>	<b>€</b>

### **SCENARIO N° 2**

In questo scenario si ha un costo del GPL molto elevato, superiore o uguale a 0.7 €/l, per cui il cogeneratore viene alimentato con gasolio acquistato ad un prezzo di 0.98 €/l, corrispondente a 9.96 c€/kWh. L'impianto comprende l'utilizzo di una motore a combustione interna da 1'000 kWe alimentato a Gasolio e 450 collettori solari termici, per un area utile di 986 m<sup>2</sup>. La produzione mensile di energia, da parte dell'impianto proposto, è riportato nella tabella 5.27 e nelle figure 5.31-32.

**Tabella 5.27 - Produzione di energia dell'impianto operante secondo lo scenario 2.**

MESI	RICHIESTA DI CARICO AOB		SCENARIO DI INTERVENTO N° 2: COGENERATORE a GASOLIO MCI da 1'000 kW, SUPERFICIE DI COLLETTORI SOLARI TERMICI da 986 m <sup>2</sup> , COSTO del GASOLIO 0.98 €/litro [9.96 c€/kWh]				
			ENERGIA ELETTRICA	ENERGIA TERMICA		CARICO RESTANTE (Fonti Tradizionali)	
	Elettrico	Termico	Cogeneratore	Solare Termico	Cogeneratore	Rete	Caldaie
Gennaio	840'571	1'165'625	251'189	52'352	264'090	589'382	849'183
Febbraio	755'059	1'056'115	217'762	56'185	229'065	537'298	770'866
Marzo	799'279	1'008'715	236'041	83'534	248'905	563'238	676'276
Aprile	742'968	646'776	161'554	78'807	179'611	581'414	388'358
Maggio	885'658	404'810	37'617	93'344	45'816	848'041	265'651
Giugno	1'066'176	263'160	0	101'416	0	1'066'176	161'744
Luglio	1'320'005	264'790	0	108'686	0	1'320'005	156'103
Agosto	1'349'988	262'409	0	107'416	0	1'349'988	154'992
Settembre	1'080'648	265'968	0	94'332	0	1'080'648	171'636
Ottobre	914'674	383'681	54'014	80'313	61'745	860'659	241'623
Novembre	796'824	709'056	196'142	56'061	213'754	600'682	439'242
Dicembre	824'426	1'137'576	228'497	49'215	240'379	595'929	847'982
<b>TOTALE</b>	<b>11'376'276</b>	<b>7'568'681</b>	<b>1'382'817</b>	<b>961'661</b>	<b>1'483'364</b>	<b>9'993'459</b>	<b>5'123'655</b>
	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh



**Figura 5.31 - Produzione di energia termica dell'impianto operante secondo lo scenario 2.**

L'impianto proposto è in grado di autoprodurre il 12.2% dell'energia elettrica e il 32.3% dell'energia termica richiesta, l'autoproduzione totale è pari al 20.2%. Come nello scenario 1, l'autoproduzione elettrica è concentrata esclusivamente nel periodo invernale, con una quantità di energia prodotta inferiore a quella acquistata dalla rete. A causa dell'alto costo del combustibile per alimentare il MCI, l'impianto di cogenerazione è in grado di funzionare con profitto soltanto quando si è nella fascia F1, da qui deriva il basso numero di ore di funzionamento, pari a 1'563 ore all'anno. L'impianto impianto solare termico funziona esattamente come nello scenario esaminato in precedenza, fornendo il 47.7% dell'ACS. La quota di energia annua fornita da fonte rinnovabile è il 5.1%. Il risparmio di energia primaria è pari a 2'672 MWh/anno (-7.3%) con un taglio sulle emissioni di CO<sub>2</sub> di 460 t/anno (-6.1%).

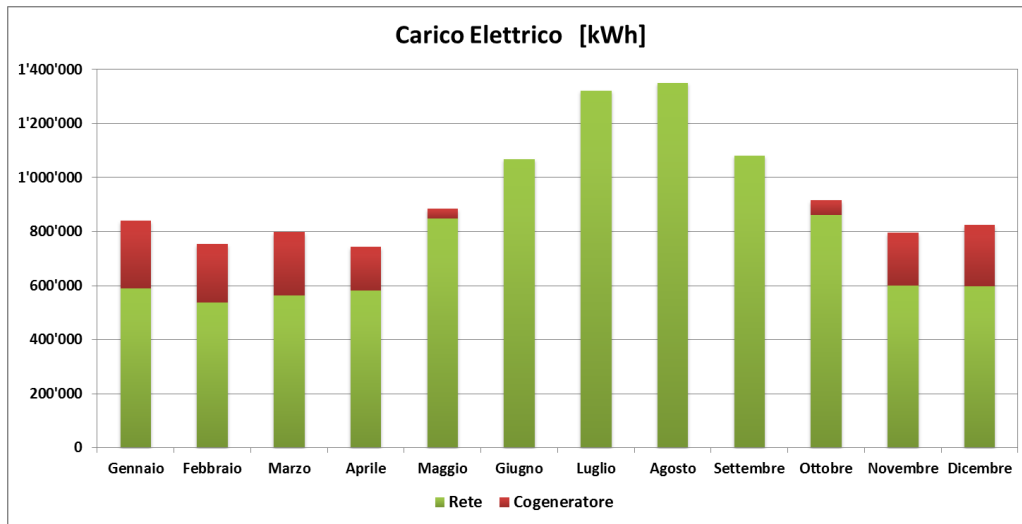
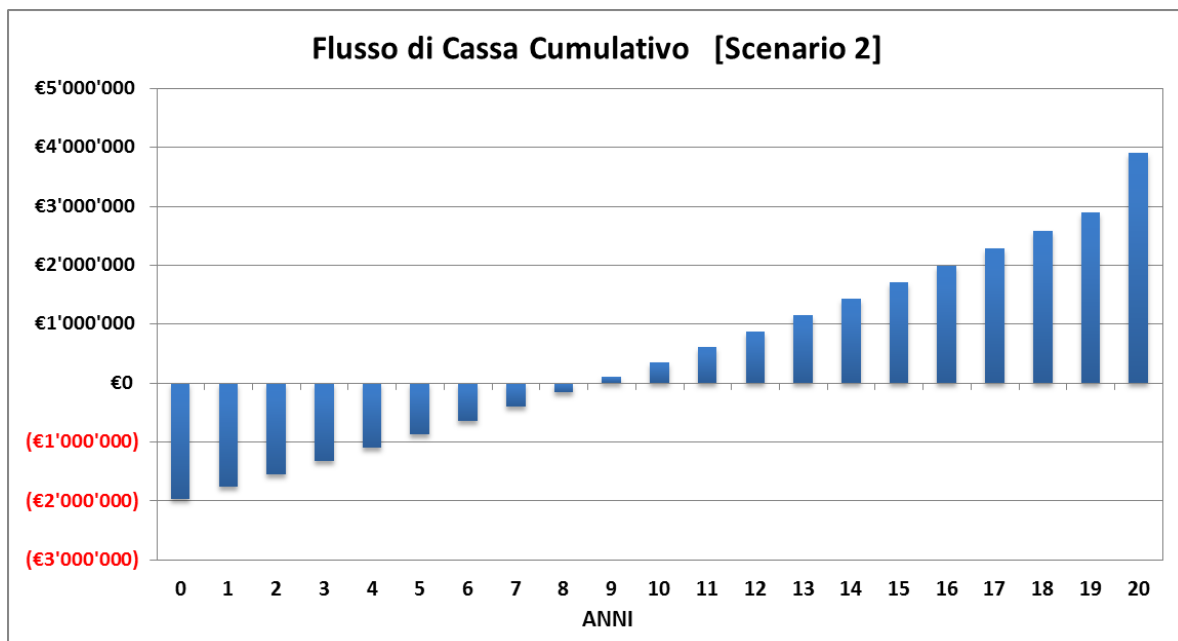


Figura 5.32 Produzione di energia elettrica dell'impianto operante secondo lo scenario 2.

L'investimento iniziale per questa proposta di intervento è di 1'984 k€, 900 k€ per l'impianto di cogenerazione, i restanti 1'084 k€ per l'impianto solare. Questo scenario è, tra i due esaminati, quello con i peggiori valori degli indicatori economici, tabella 5.28. Il tempo di ritorno è di poco inferiore ai 9 anni, il tasso interno di rendimento è del 11.2%. L'investimento permette di ottenere un risparmio economico di 157.4 k€/anno.

Tabella 5.28 - Indicatori tecnico-economici-ambientali.

VAN	3'894'382	€
PBT	8.61	anni
IRR	11.21	%
RISPARMIO ECONOMICO	156'437	€/anno
EMISSIONI EVITATE CO <sub>2</sub>	460	t/anno
RISPARMIO ENERGIA PRIMARIA	2'672	MWh/anno



5.33 - Flussi di cassa cumulativi per la proposta d'intervento operante secondo lo scenario 2.

Il costo totale livellato dell'intervento (installazione, sostituzione, combustibile, manutenzione, gestione) è di 455.6 k€/anno, di cui 88.3% a carico della sola parte cogenerativa. Considerando l'energia annua prodotta dalle diverse sezioni dell'impianto, sezione solare e sezione cogenerativa, si ottengono, a fronte di un costo attuale di 14.78 c€/kWh, i seguenti costi specifici per l'energia prodotta:

- COGENERATORE: 14.03 c€/kWh (elettrico e termico)
- SOLARE TERMICO: 5.55 c€/kWh

**Tabella 5.29 - Bilancio economico per la proposta d'intervento operante secondo lo scenario 2.**

SITUAZIONE ATTUALE AOB		
Acquisto Energia Elettrica	1'882'179	€
Acquisto Energia Termica	917'072	€
<b>TOTALE</b>	<b>2'799'251</b>	<b>€</b>
INTERVENTO PROPOSTO		
Acquisto Energia Elettrica	1'563'854	€
Acquisto Energia Termica	623'318	€
Combustibile Cogenerazione	347'270	€
Ammortamento Impianti	51'626	€
Costi Gestione Impianti	56'745	€
<b>TOTALE</b>	<b>2'642'813</b>	<b>€</b>
<b>RISPARMIO ANNUO</b>	<b>156'438</b>	<b>€</b>

Nella seguente tabella sono sintetizzati i risultati più importanti ottenuti per i due scenari esaminati:

**Tabella 5.30 - Sintesi dei risultati ottenuti per i diversi scenari.**

	SCENARIO 1	SCENARIO 2	
Tipologia di Cogeneratore	MCI accensione comandata	MCI accensione spontanea	
Combustibile Alimentazione Cogeneratore	GPL	Gasolio	
Costo Combustibile Cogeneratore	8.46	9.96	c€/kWh
Potenza Cogeneratore	1'000	1'000	kWe
Ore Funzionamento Cogeneratore	2'485	1'563	ore/anno
Superficie Solare Termico	986	986	m <sup>2</sup>
Fattore di Contributo Solare per ACS	47.7	47.7	%
Autoproduzione Termica	49.4	32.3	%
Autoproduzione Elettrica	19.8	12.2	%
Produzione da Rinnovabile	5.1	5.1	%
Investimento Iniziale	1'984'050	1'984'050	€
VAN	5'224'071	3'894'382	€
PBT	6.68	8.61	anni
IRR	14.96	11.21	%
Risparmio Economico	209'850	156'437	€/anno
Riduzione Costi Energetici Annui	7.5	5.6	%
Emissioni Evitate CO <sub>2</sub>	752	460	t/anno
Riduzione Emissioni CO <sub>2</sub>	10.0	6.1	%
Risparmio Energia Primaria	3'713	2'672	MWh/anno
Riduzione Consumo Energia Primaria	10.2	7.3	%
Costo Energia Autoprodotta	11.02	11.90	c€/kWh

## 6 CONCLUSIONI

Nel corso del dottorato di ricerca è stata realizzata la diagnosi energetica dell'Azienda Ospedaliera Brotzu, una delle più importanti realtà ospedaliere della regione Sardegna, sita nella città di Cagliari. La ricerca è stata portata avanti sviluppando le seguenti tre tematiche: audit energetico; analisi termoenergetica tramite modellazione dinamica dell'edificio; analisi di fattibilità tecnico-economica di diverse proposte d'intervento per il risparmio energetico. In questo lavoro si è fornita ampia descrizione della metodologia utilizzata per portare a termine ciascuna fase e dei risultati ottenuti, di cui si riporta una breve sintesi.

Nella prima parte del lavoro è stato eseguito l'audit energetico dell'Azienda Ospedaliera Brotzu. In questo stadio, capitoli 2-3, sono state reperite tutte le informazioni necessarie per stabilire lo stato attuale dei luoghi, con particolare attenzione sul sistema edificio-impianto e sul bilancio energetico dell'ospedale. Nella fase preparatoria del lavoro, con lo scopo di validare e integrare la documentazione tecnica fornita dall'AOB, è stato eseguito sia l'aggiornamento delle planimetrie dell'intero edificio e delle caratteristiche geometriche e fisiche delle strutture opache e trasparenti che lo costituiscono, sia l'aggiornamento delle caratteristiche tecniche degli impianti termici ed elettrici presenti nelle centrali tecnologiche (Power Center; Centrale Termica; Sottocentrale Termica; Centrale Idrica; Centrale Frigorifera) e nei vari livelli della struttura. A seguito di questa fase, che ci ha consentito di fornire una descrizione aggiornata e realistica del sistema edificio-impianto del complesso ospedaliero, si è proceduto con la raccolta dei dati storici di acquisto dell'energia termica (combustibile) ed elettrica e con il rilievo dei dati di consumo orario registrati dai sistemi di monitoraggio già presenti nella struttura. Elaborando e analizzando questi dati, seguendo la metodologia riportata nel par. 3.1, sono state rilevate diverse anomalie del sistema di monitoraggio che ci hanno portato a compiere i primi interventi, revisionando il sistema di supervisione del riscaldamento e dell'acqua calda sanitaria ed installando ex-novo dei contabilizzatori di energia nella centrale frigorifera. Di conseguenza, risolti i problemi del sistema di monitoraggio e acquisiti i nuovi dati di consumo, si è potuto effettuare il bilancio energetico dell'AOB valutando l'energia annuale e mensile in ingresso nella struttura, l'andamento storico dei consumi e la loro incidenza economica. Infine, attraverso la ricostruzione dei flussi energetici all'interno dell'ospedale e la valutazione delle prestazioni degli impianti, è stato possibile stabilire i fabbisogni energetici delle utenze e le distribuzioni orarie dei carichi, ripartiti per tipologia d'uso finale (Riscaldamento; Raffrescamento; Acqua Calda Sanitaria; Usi Elettrici). Il lavoro di audit energetico è stato concluso con l'analisi e il confronto di alcuni indicatori di consumo energetico (indici di Benchmark) dell'AOB con quelli di altre realtà ospedaliere del contesto nazionale e internazionale, mettendo in evidenza sia le differenze che le affinità riscontrate.

Nella seconda parte del lavoro è stata condotta l'analisi termoenergetica dell'AOB utilizzando un modello dinamico dell'ospedale costruito con il software TRNSYS (capitolo 4). Prima di passare alla modellazione dell'ospedale sono state compiute delle operazioni preliminari di validazione e calibrazione del codice, rese necessarie per verificare le potenzialità dello strumento di calcolo a disposizione e soprattutto per testare le capacità di modellazione dell'utilizzatore su dei semplici modelli di edificio di cui si conoscono i risultati delle simulazioni. Queste operazioni preliminari sono state svolte utilizzando dei test di riferimento tratti dalla letteratura internazionale (Standard 140 ASHRAE - BESTEST) e dalle normative europee (UNI EN 15265). Visto il buon esito delle operazioni precedenti, si è passati alla modellazione dell'edificio e alla sua implementazione nel codice di calcolo, descritta nel paragrafo 4.2. Il modello costruito è stato uno strumento molto importante, sia per il supporto della fase di audit e sia per quella successiva riguardante le proposte d'intervento. Non avendo a disposizione dei dati di consumo termico relativi ai singoli piani, bensì dei dati globali dell'intera struttura, l'utilizzo del modello dinamico ha consentito di valutare i fabbisogni e carichi termici per ogni singolo piano e reparto, mettendo in luce l'influenza delle particolari attività sanitarie sui consumi. Un'altra importante operazione svolta con il modello dinamico è stata la verificare dei risultati dell'audit, compiuta confrontando i dati reali con quelli delle simulazioni ottenute impostando all'interno degli ambienti i valori di temperatura, umidità relativa e ventilazione prescritti dalle normative vigenti. Attraverso il modello dinamico è stato possibile valutare alcune



discordanze tra i valori numerici e quelli rilevati, individuandone le cause principali data l'impossibilità di controllare puntualmente le condizioni termoigrometriche interne ai locali di diversi reparti non critici. Sempre grazie al modello, è stata svolta un'analisi parametrica dei consumi dell'ottavo piano dell'AOB, preso come campione di riferimento, al variare delle condizioni microclimatiche interne (par.5.2.2). Questo ha consentito di valutare la variazione dei fabbisogni-carichi termici al variare dei parametri di controllo degli impianti (temperature, umidità relativa, ricambi d'aria), aiutando così a comprendere l'origine di parte dei consumi energetici rilevati in fase di audit.

Nella terza parte del lavoro sono state analizzate diverse proposte d'intervento per il risparmio energetico e per il miglioramento della gestione dell'energia da parte dell'AOB (capitolo 5). Le prime proposte esaminate hanno riguardato la possibilità di migliorare le prestazioni termofisiche dell'involucro tramite l'isolamento di alcune strutture disperdenti. L'analisi di fattibilità tecnico-economica, svolta con l'ausilio del modello dinamico costruito su TRNSYS, ha permesso di valutare i risparmi energetici ottenibili e i conseguenti risparmi economici connessi. I valori non soddisfacenti degli indicatori economici, in particolar modo gli alti tempi di ritorno dell'investimento, sconsigliano l'adozione di tali interventi, che potrebbero diventare economicamente convenienti soltanto nel caso si debba intervenire, per cause di forza maggiore, sull'involucro dell'edificio. In seguito sono state esaminate le problematiche connesse con i sistemi di monitoraggio dell'energia presenti nell'ospedale, proponendo dei miglioramenti sui sistemi di supervisione installati nelle centrali tecnologiche e l'installazione di sistemi di registrazione dell'energia termica consumata nei vari piani, nonché della necessità di monitorare i valori di temperatura e umidità relativa di diversi ambienti campione di ogni reparto. Quest'ultimo aspetto risulta essere particolarmente importante, infatti, grazie all'utilizzo del modello dinamico, è stato verificato come l'eccessivo riscaldamento o raffrescamento degli ambienti, unito ad una non corretta gestione della ventilazione meccanica dei locali, comporti un notevole incremento dei consumi energetici, e quindi dei costi di gestione della struttura, unito al peggioramento delle condizioni di benessere per i pazienti e per il personale. In seguito è stata effettuata un'approfondita valutazione di fattibilità tecnico-economica sulla possibilità di utilizzare impianti alternativi per la produzione dell'energia termica ed elettrica. In quest'ottica sono stati esaminati sia impianti ad energie rinnovabili, solare termico e fotovoltaico, sia impianti di produzione combinata dell'energia, cogenerazione e trigenerazione. Di ogni impianto è stata fatta una simulazione annuale su base oraria, utilizzando le curve di carico ricavate tramite l'audit energetico, avente come obiettivo la scelta della miglior tecnologia disponibile sul mercato e della taglia ottimale per i fabbisogni dell'AOB. Tutte le proposte impiantistiche sono state prima esaminate separatamente, poi unitamente tra di loro in modo da costituire dei sistemi multienergetici. Di essi sono state esaminate nei dettagli le configurazioni impiantistiche aventi le migliori prestazioni economiche, ossia in grado di garantire importanti risparmi economici con tempi di ritorno dell'investimento ragionevoli. La scelta si è concentrata sull'utilizzo di impianti solari termici, per la sola produzione di acqua calda sanitaria, e di impianti di cogenerazione con motori a combustione interna, scartando la ipotesi trigenerativa e di solare fotovoltaico a causa degli alti tempi di ritorno dell'investimento.

In questo lavoro non è stato possibile approfondire tutti gli aspetti che riguardano la gestione dell'energia nell'Azienda Ospedaliera Brotzu. Certi aspetti sono stati volontariamente omessi, sia perché ritenuti trascurabili nel computo del bilancio energetico o perché già affrontati in lavori precedenti, mentre altri sono stati tralasciati a causa della mancanza di tempo e risorse umane, costringendoci a concentrare le risorse disponibili verso gli aspetti più importanti della ricerca. Il presente lavoro va quindi visto come un punto d'inizio sulla quale impostare un lavoro di sviluppo futuro che potrà consentire di migliorare l'audit energetico e il modello dinamico dell'ospedale, nonché d'implementare le proposte d'intervento fin qui esaminate. La diagnosi energetica fin qui elaborata è quindi uno strumento in continuo divenire, da aggiornare continuamente per tener conto delle mutate esigenze e possibilità offerte dal continuo evolversi delle condizioni al contorno (normative, tecnologie, possibilità di finanziamento, vincoli ambientali, etc.).

La metodologia e gli strumenti messi a punto nel corso del dottorato di ricerca per il caso dell'AOB preso in esame, data la loro generalità e flessibilità, possono essere estesi a diversi campi di applicazione al di là dell'edilizia sanitaria, rendendoli validi per la diagnosi energetica di strutture di uso civile, commerciale e industriale.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] N. Mandas, F. V. Caredda, O. Caboni, S. La Croce, “*Proposta di un sistema competitivo e flessibile per la riduzione del fabbisogno e l’ottimizzazione della gestione energetica dell’Azienda Ospedaliera G. Brotzu*”, Relazione Scientifica Finale, Progetto finanziato con Legge Regionale n. 7 Agosto 2007, Università di Cagliari, Dicembre 2012.
- [2] “*TRNSYS 16 Documentation*”, Volumi 1-8, Solar Energy laboratory, University of Wisconsin-Madison, USA, Gennaio 2006.
- [3] HOMER Energy LLC, <http://www.homerenergy.com>
- [4] Sito Istituzionale Azienda Ospedaliera Brotzu, <http://www.aobrotzu.it>
- [5] [http://it.wikipedia.org/wiki/Giuseppe\\_Brotzu](http://it.wikipedia.org/wiki/Giuseppe_Brotzu)
- [6] Decreto del Presidente della Repubblica, “*Ordinamento ed Organizzazione dei Servizi Sanitari ed Assistenziali*”, 14 Gennaio 1997 (G.U. 20 febbraio 1997, n. 42, S.O.).
- [7] G. Cabras, “*Aggiornamento delle planimetrie e delle caratteristiche geometriche e fisiche delle strutture dell’Azienda Ospedaliera G. Brotzu di Cagliari*”, Report interno DIMCM - Cagliari, 2011.
- [8] G. Gandolfo, “*Aggiornamento delle caratteristiche tecniche e dimensionali relative agli impianti tecnici della struttura ospedaliera AOB di Cagliari*”, Report interno DIMCM - Cagliari, 2011.
- [9] AA.VV. “*Caratterizzazione energetica dell’Azienda Ospedaliera G. Brotzu, Ospedale San Michele – Cagliari*”, Rapporto intermedio, ENEA, Settembre 2007.
- [10] IPLOM S.p.a, <http://iplom.it>
- [11] Sito ufficiale di Matlab: [www.mathworks.com](http://www.mathworks.com)
- [12] Camera di Commercio di Cagliari, “*Prezzi medi dei prodotti petroliferi rilevati nella provincia di Cagliari*”, 2012, <http://www.ca.camcom.gov.it>
- [13] Autorità per l’Energia Elettrica e il Gas, Dati Statistici e Banche Dati, <http://www.autorita.energia.it>
- [14] AA. VV. “*RICERCA SISTEMA ELETTRICO. Valutazione dei consumi nell’edilizia esistente e benchmark mediante codici semplificati: analisi di edifici ospedalieri*”, Report RSE/2009/117 ENEA, Marzo 2009.
- [15] AA.VV. “*Efficienza Energetica negli Ospedali e nelle Strutture Ospedaliere, III Edizione*”, Atti del Convegno, Milano 23-24 febbraio 2011.
- [16] AA.VV. “*Efficienza Energetica negli Ospedali e nelle Strutture Ospedaliere, IV Edizione*”, Atti del Convegno, Milano 28-29 febbraio 2012.
- [17] “*TRNSYS 16 Documentation*”, Volume 5: Mathematical Reference, Solar Energy laboratory, University of Wisconsin-Madison, USA, Gennaio 2006.
- [18] American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers ASHRAE, “*Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs*”, ANSI/ASHRAE Standard 140.
- [19] R. Judkoff – J. Neymark, “*International Energy Agency Building Energy Simulation Test (BESTEST) and Diagnostic Method*”, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Boulder Colorado, USA, Febbraio 1995.
- [20] UNI EN 15265, “*Calcolo del Fabbisogno di Energia per il Riscaldamento e il Raffrescamento degli Ambienti Mediante Metodi Dinamici, criteri generali e procedimenti di validazione*”, Norma Europea, Febbraio 2008.

- [21] UNI EN ISO 13790, “*Prestazione Energetica degli Edifici, Calcolo del Fabbisogno di Energia per il Riscaldamento e il Raffrescamento*”, Norma Europea, Giugno 2008.
- [22] Meteotest, “*Meteonorm Version 6.0, Part II:Theory*”, Handbook, Aprile 2010.
- [23] M. Usai, “*Simulazione Dinamica delle Prestazioni Energetiche dell’Azienda Ospedaliera Brotzu di Cagliari*”, Tesi di Laurea Specialistica, relatore Prof. Ing. N. Mandas, correlatore F. V. Caredda, D.I.Me.Ca. Università degli studi di Cagliari, 2011.
- [24] M. Bandini – L. Niccoli, “*Analsi Dinamica delle Prestazioni energetiche di un Complesso Ospedaliero di Grandi Dimensioni Mediante i Codici di Calcolo MC4 Suite e TRNSYS 16*”, Tesi di Laurea Specialistica, Università di Pisa, 2008.
- [25] UNI/TS 11300-2, “*Prestazione Energetica degli Edifici, Determinazione del Fabbisogno di Energia Primaria e dei Rendimenti per la Climatizzazione Invernale e per la Produzione di Acqua Calda Sanitaria*”, Specifica Tecnica, Maggio 2008.
- [26] UNI/TS 11300-3, “*Prestazione Energetica degli Edifici, Determinazione del Fabbisogno di Energia Primaria e dei Rendimenti per la Climatizzazione Estiva*”, Specifica Tecnica, Marzo 2010.
- [27] Decreto Ministero dello Sviluppo Economico 11 marzo 2008 coordinato con Decreto 26 gennaio 2010, (G.U. n. 35 del 12-02-2010).
- [28] Rapporto ISPRA, *Produzione termoelettrica ed emissioni di CO<sub>2</sub>. Fonti rinnovabili e impianti soggetti a ETS*. n. 135/2011 e successivi aggiornamenti. <http://www.isprambiente.gov.it>
- [29] M. Vio, “*Impianti di Cogenerazione*”, Editoriale Delfino, 2009
- [30] E. Fabrizio, “*Feasibility of polygeneration in energy supply systems for health-care facilities under the Italian climate and boundary conditions*”, *Energy for Sustainable Development*, 15 (2011) 92-103
- [31] Capstone, “*Product Specification Model C200*”, <http://www.microturbine.com>
- [32] T. Lambert, P. Gilman, P. Lilienthal, Capitolo 15 “*Micropower System Modeling With Homer*” tratto da “*Integration of Alternative Sources of Energy*”, di F. Farret e M. Simões, John Wiley & Sons Inc, 2006
- [33] RETScreen International, <http://www.etscreen.net>
- [34] F. V. Caredda, “*Analisi e Confronto di Sistemi per Produzione di Acqua Calda Sanitaria*”, Tesi di Laurea Specialistica, relatore Prof. Ing. N. Mandas, D.I.Me.Ca. Università degli studi di Cagliari, 2009.
- [35] F.V. Caredda, N. Mandas, “*Solare Termico e Acqua Calda Sanitaria*”, RCI (Riscaldamento, Climatizzazione, Idronica), N° 9 (Ottobre) 2010
- [36] F.V. Caredda, G. Mandas, N. Mandas, “*Solare Termico per un Ospedale*”, RCI (Riscaldamento, Climatizzazione, Idronica), N° 6 (Giugno) 2013
- [37] Duffie J.A., Beckman W. A. (2006), “*Solar Engineering of Thermal Processes*”, JOHN WILEY & SONS, INC., Third Edition, 2006
- [38] Decreto Ministero dello Sviluppo Economico 5 luglio 2012, (G.U. n. 159 del 10-07-2010).
- [39] GSE, “*Guida alla Cogenerazione ad Alto Rendimento CAR*”, Edizione N°1, marzo 2012
- [40] E. Fabrizio, M. Filippi, J. Virgone, “*An hourly modeling framework for the assessment of energy exploitation and energy converters selection and sizing in buildings*”, *Energy and Buildings*, 41 (2009) 1037-1050

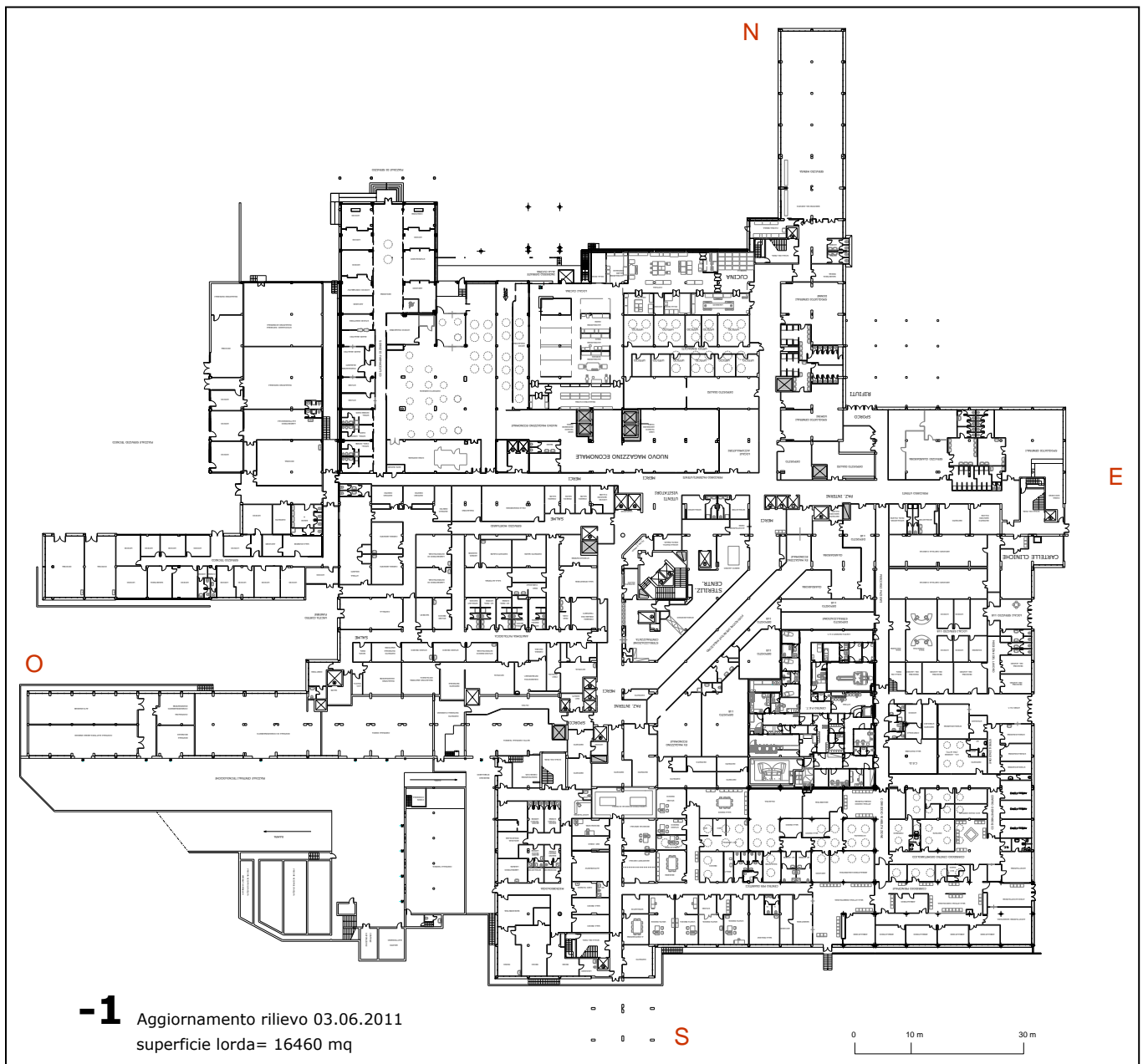
# APPENDICI

## APPENDICE A) PLANIMETRIE CORPO CENTRALE

### PIANO Seminterrato

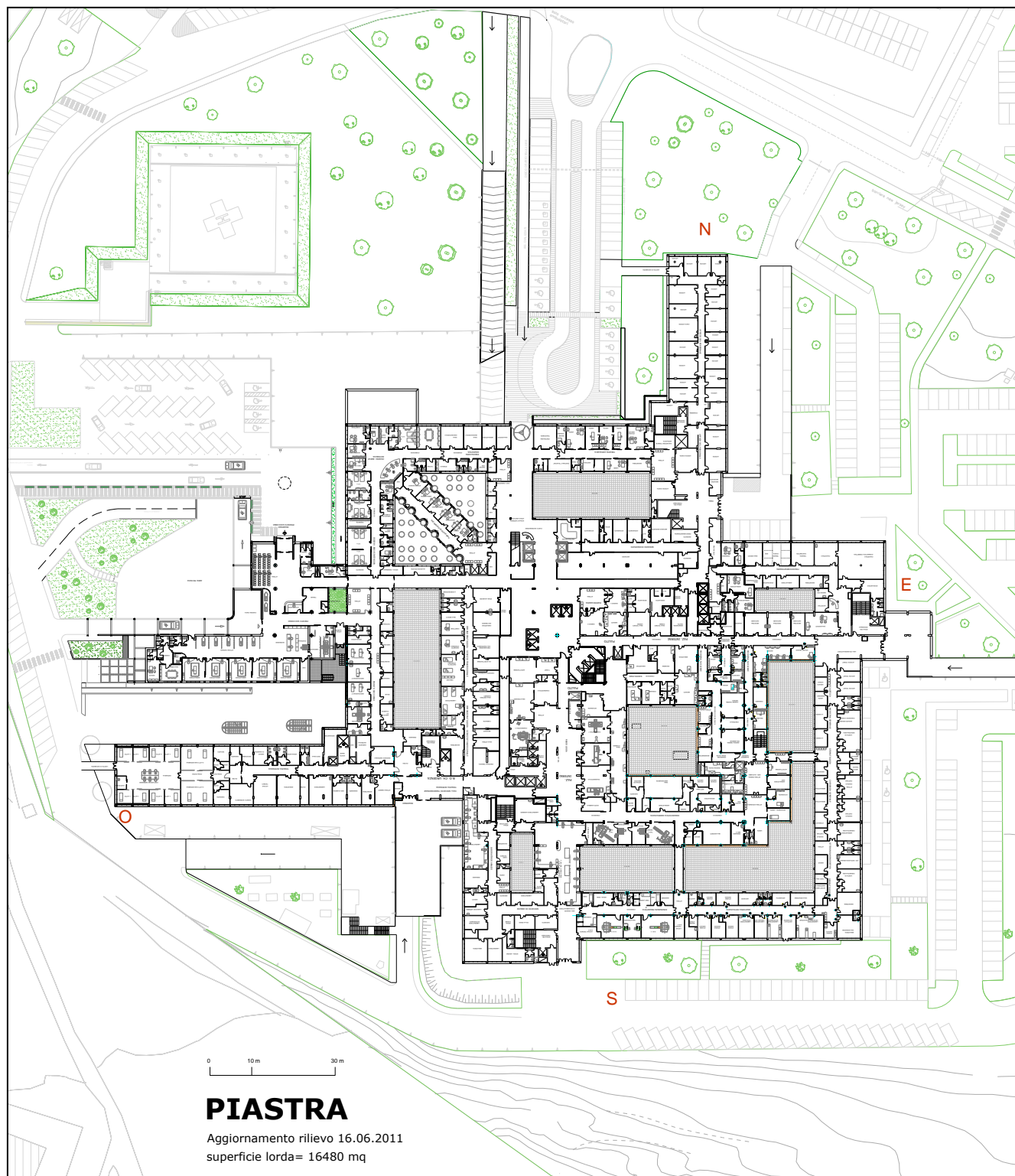
Superficie lorda: 16'460 m<sup>2</sup>

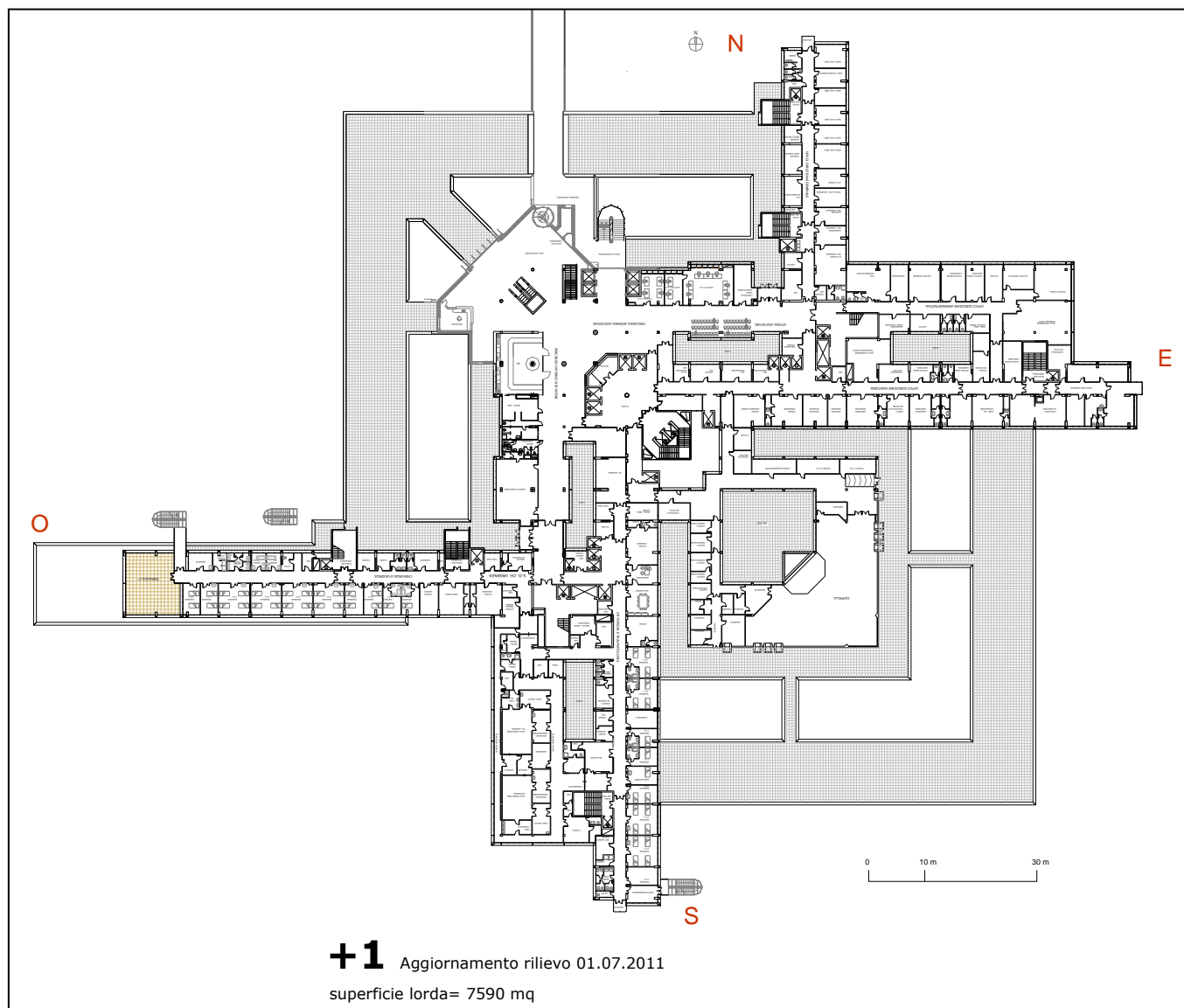
Attività svolte/Reparti: Centrali Tecnologiche, Ufficio Tecnico, Magazzini generali, Cucina, Lavanderia, Mensa, Spogliatoi, Anatomia Patologica, Morgue, Farmacia, Locali 118, Centro PET, Centro Malattie Dismetaboliche, Ambulatori Cardiologia, Ambulatori Diabetologia, Microbiologia.



**PIANO 0 (Piano Piastra)****Superficie lorda:** 16'480 m<sup>2</sup>

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

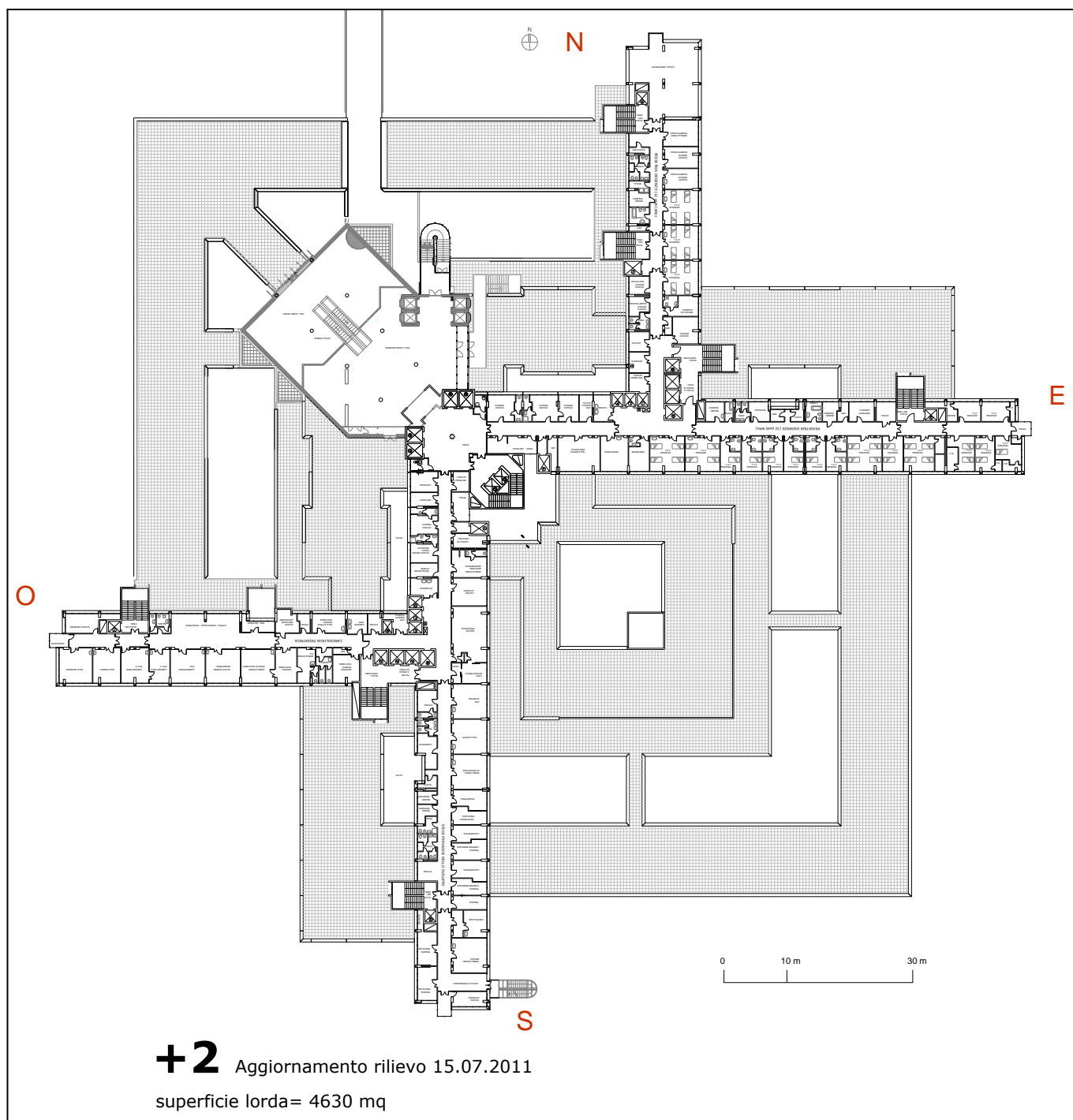


**PIANO I****Superficie lorda:** 7'590 m<sup>2</sup>**Attività svolte/Reparti:** Hall, CUP, Bar, Edicola, Banca, Cappella, Direzione Generale, Direzione Amministrativa, Direzione Sanitaria, Ortopedia, Chirurgia d'Urgenza, Sala Operatoria Chirurgia d' Urgenza, Sala operatoria Ortopedia.

## PIANO II

Superficie lorda: 4'630 m<sup>2</sup>

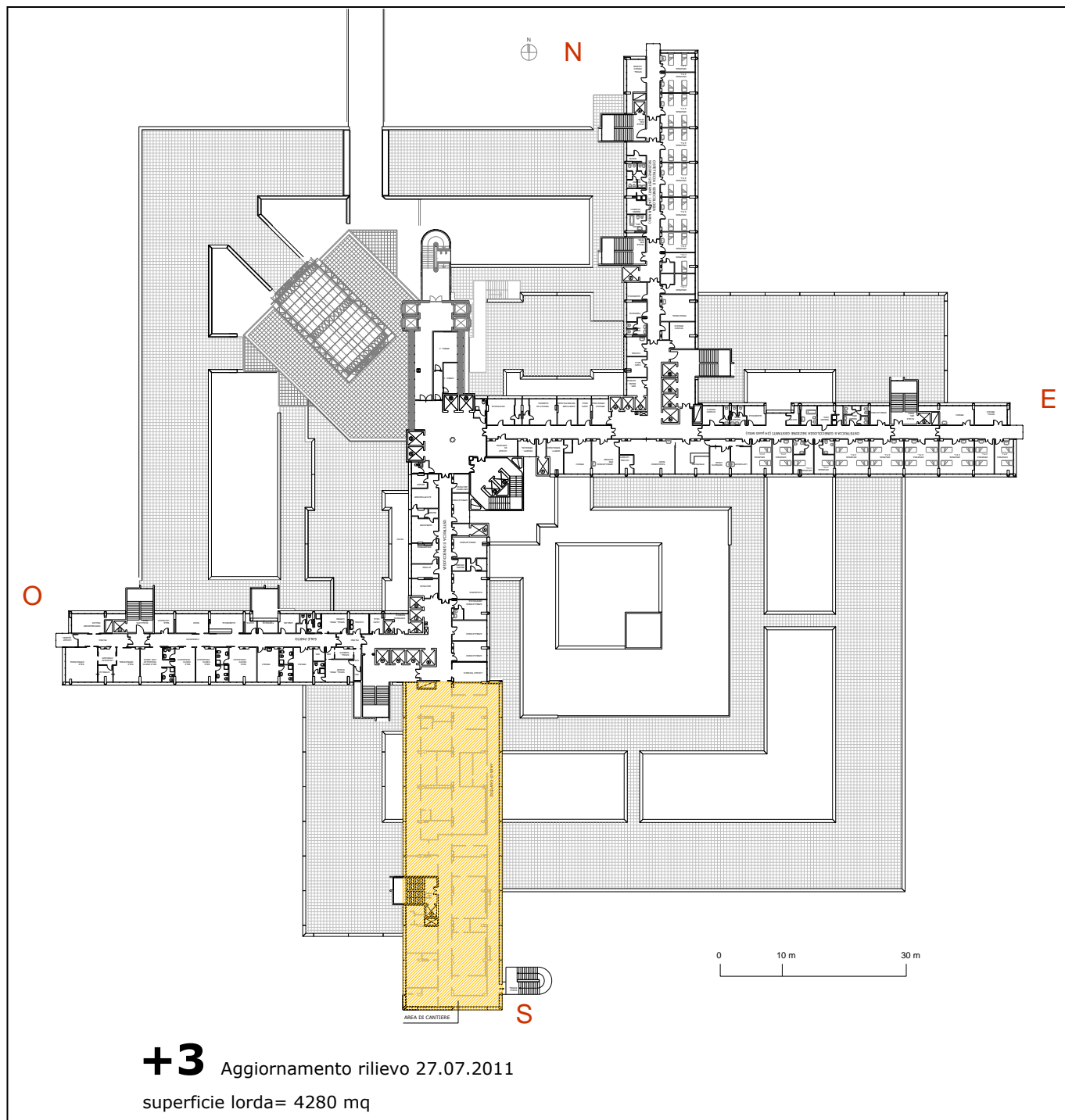
Attività svolte/Reparti: Pediatria, Cardiologia Pediatrica, Studi Pervasivi dello Sviluppo.



## PIANO III

Superficie lorda: 4'280 m<sup>2</sup>

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



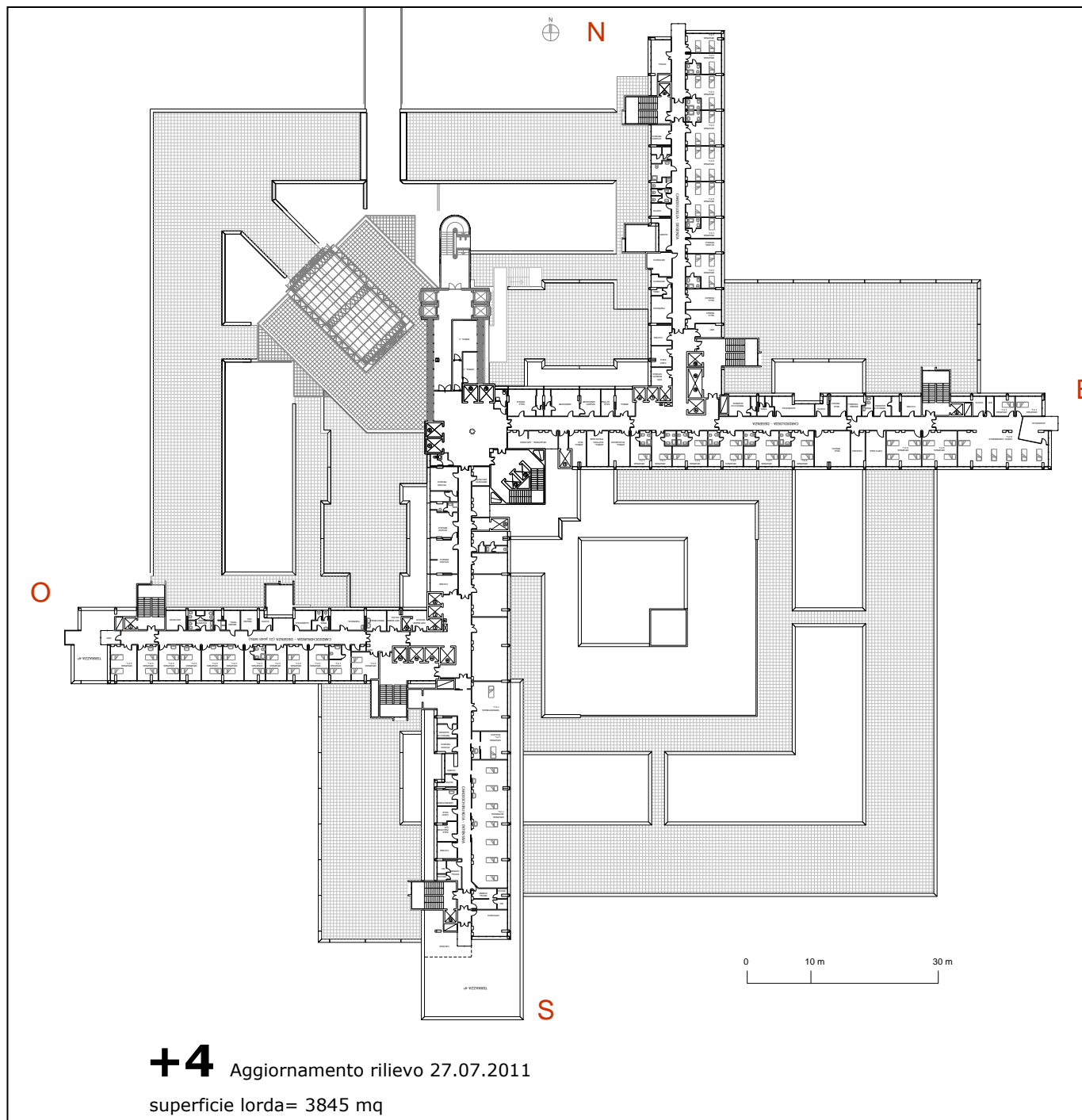
**+3** Aggiornamento rilievo 27.07.2011  
superficie lorda= 4280 mq



## PIANO IV

Superficie lorda: 3'845 m<sup>2</sup>

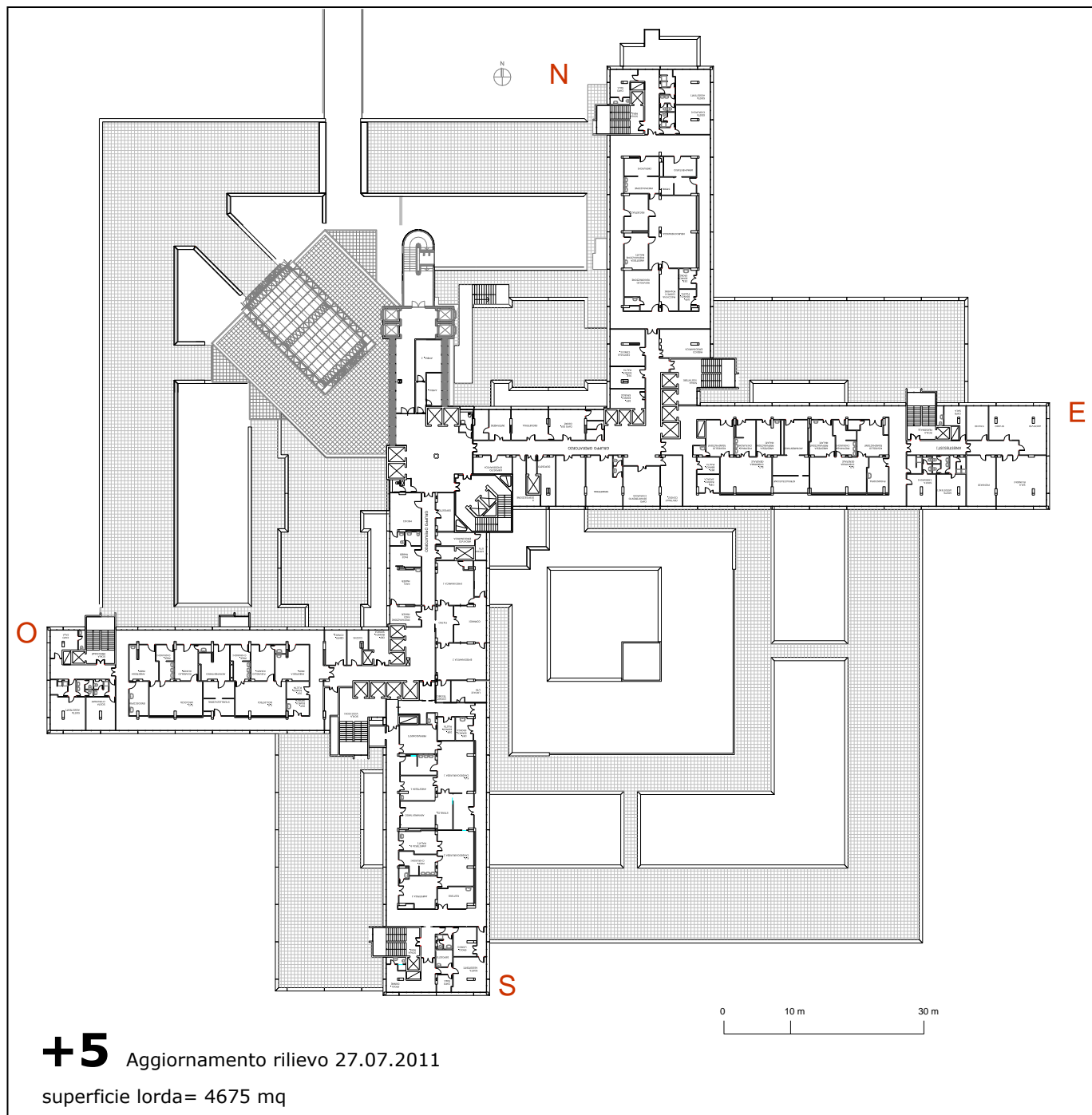
Attività svolte/Reparti: Cardiologia, Cardiochirurgia.



## PIANO V

Superficie lorda: 4'675 m<sup>2</sup>

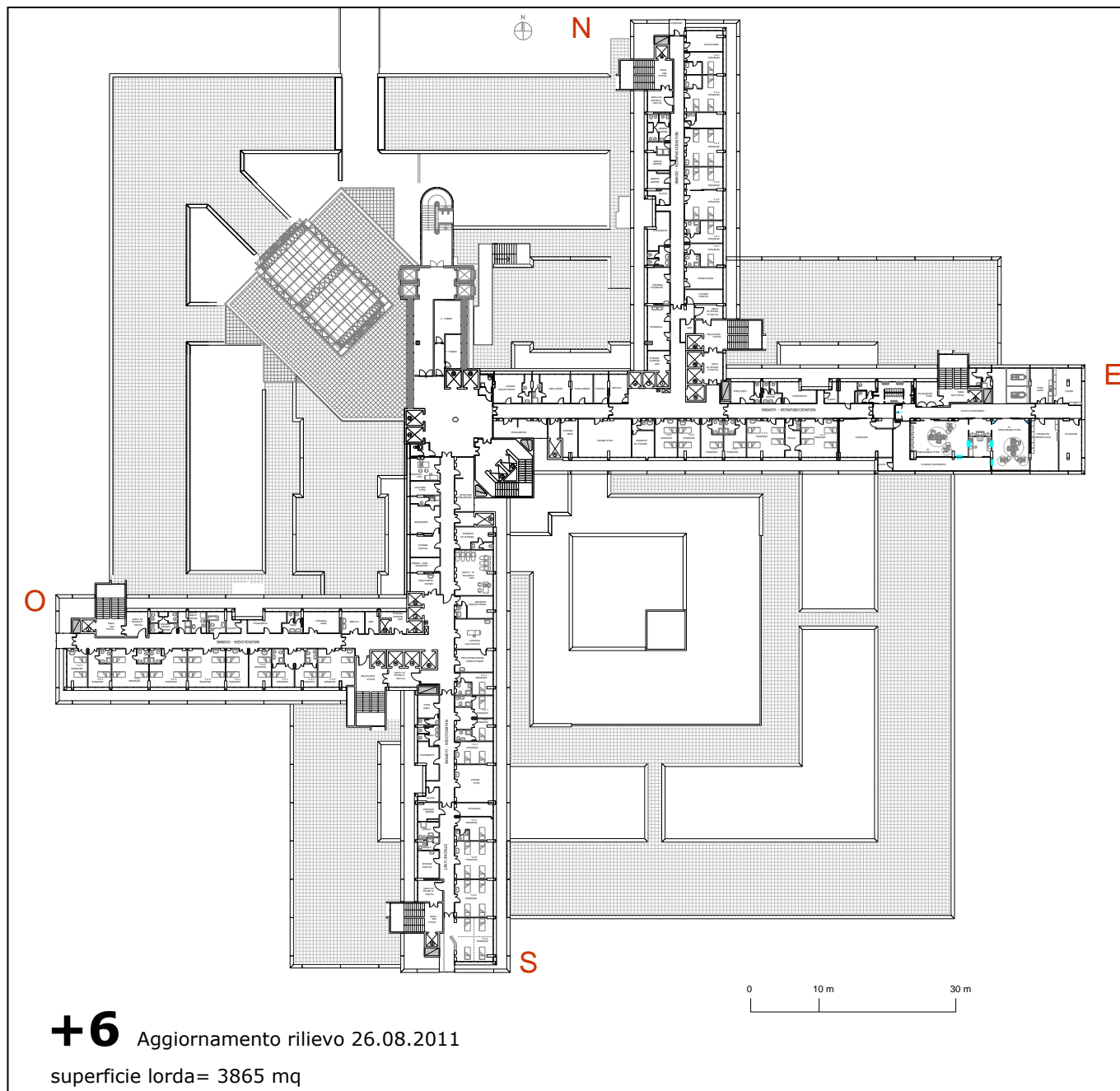
Attività svolte/Reparti: N. 4 Blocchi Operatori.

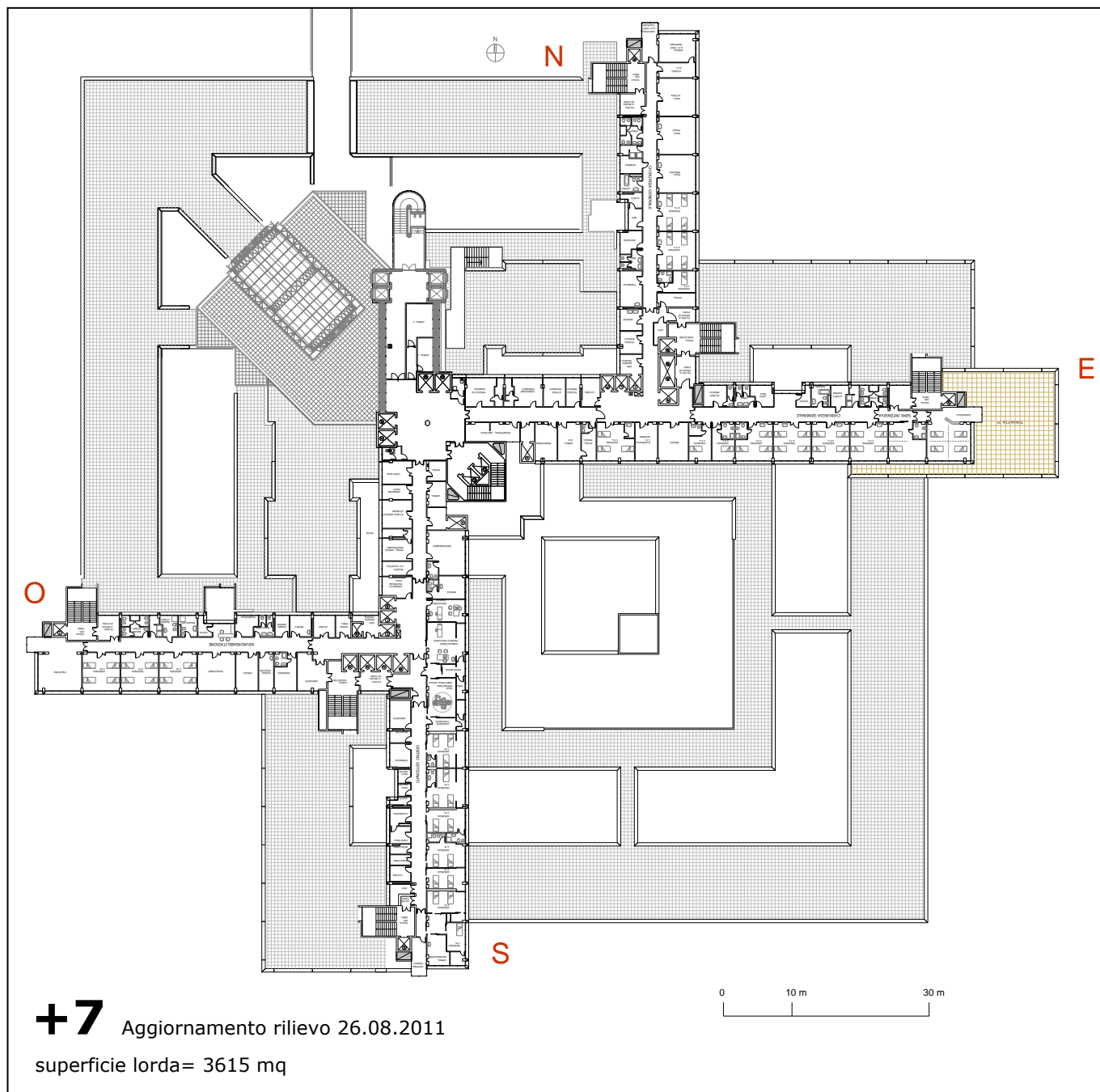


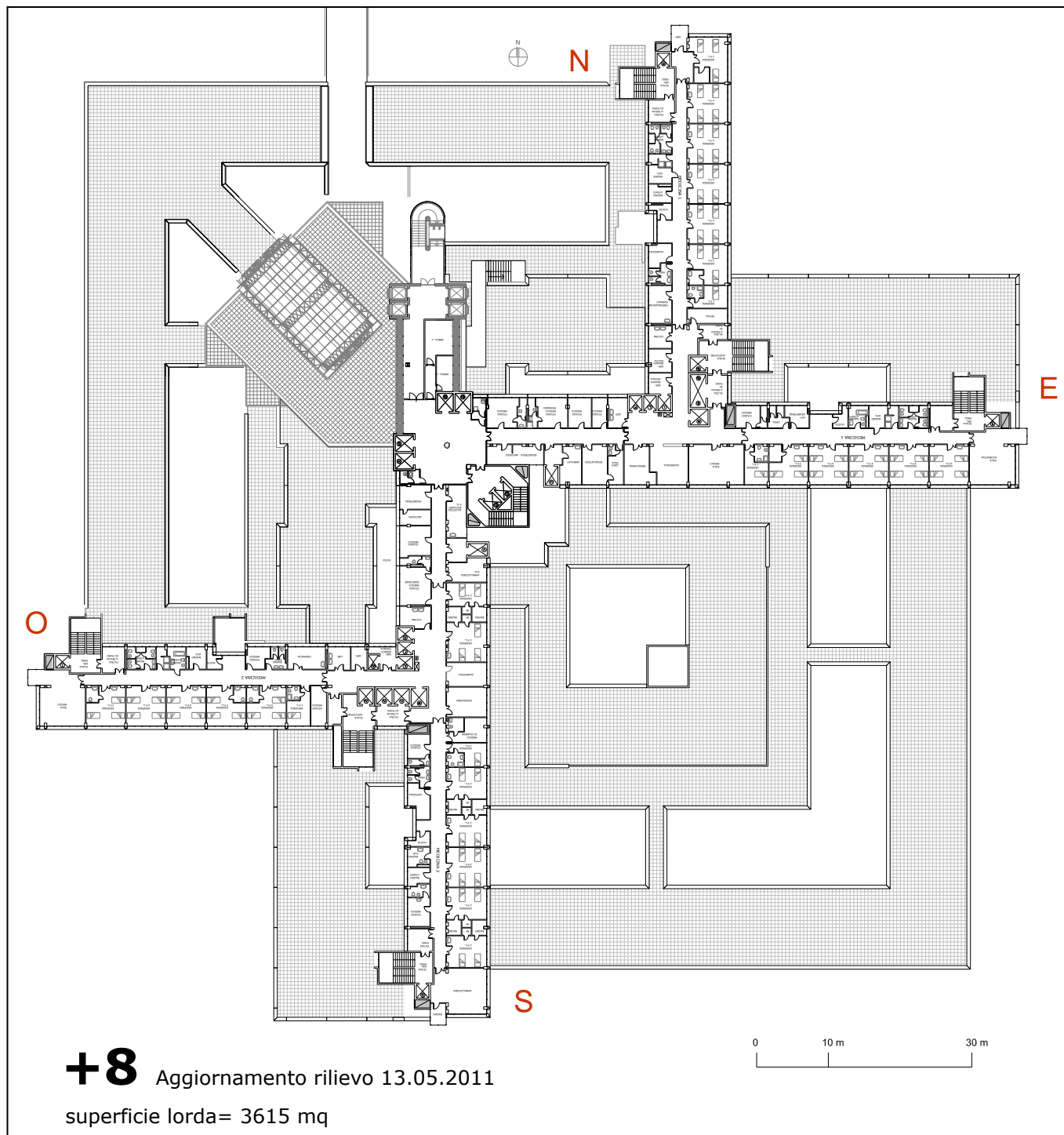
## PIANO VI

Superficie lorda: 3'865 m<sup>2</sup>

Attività svolte/Reparti: Neurologia, Neurochirurgia, Sala Operatoria Neurochirurgia, Stroke Unit.



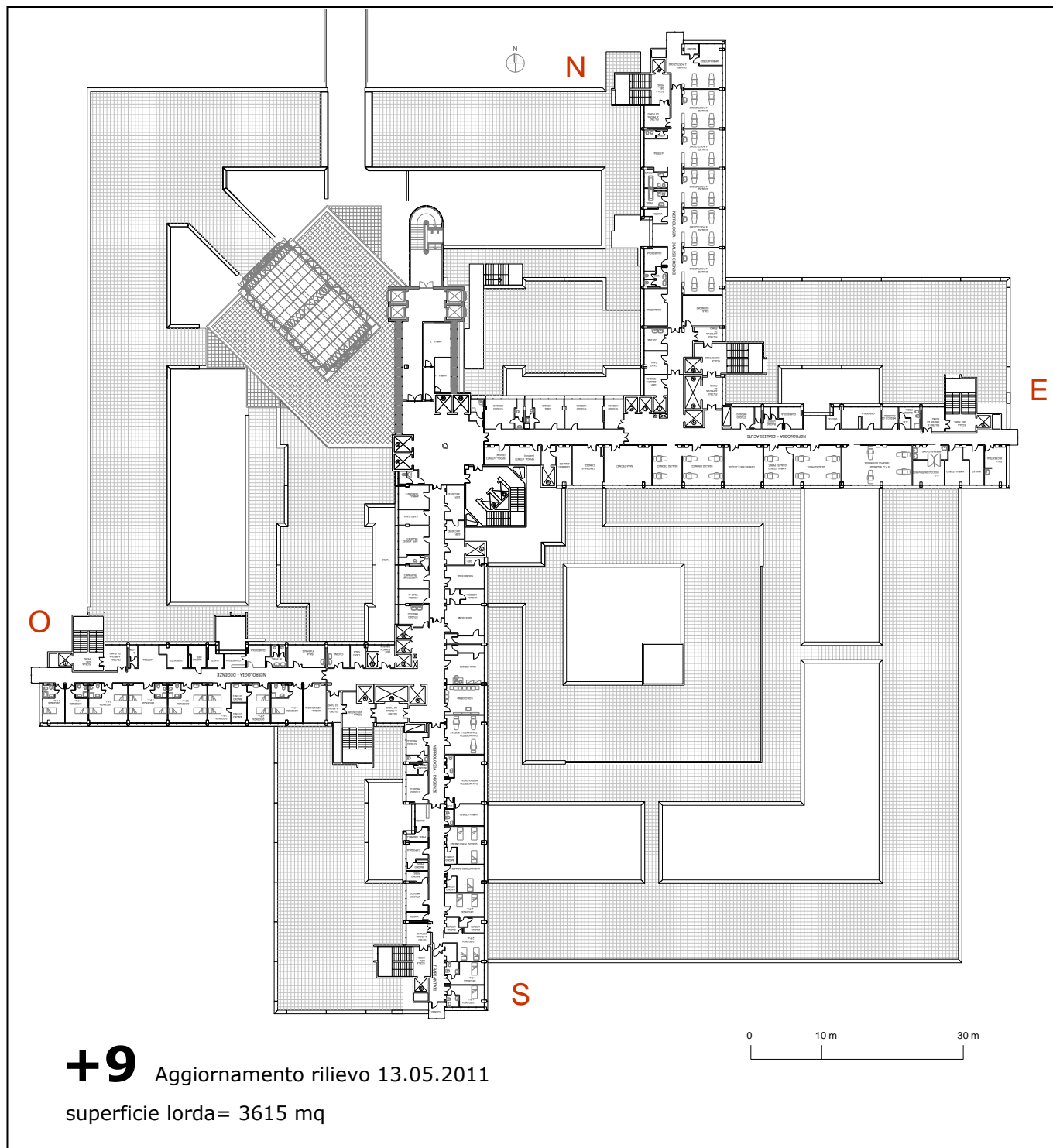
**PIANO VII****Superficie lorda:** 3'615 m<sup>2</sup>**Attività svolte/Reparti:** Chirurgia Generale, Chirurgia Maxillo-Facciale, Chirurgia Plastica, Centro Ustionati, Neuroriabilitazione.

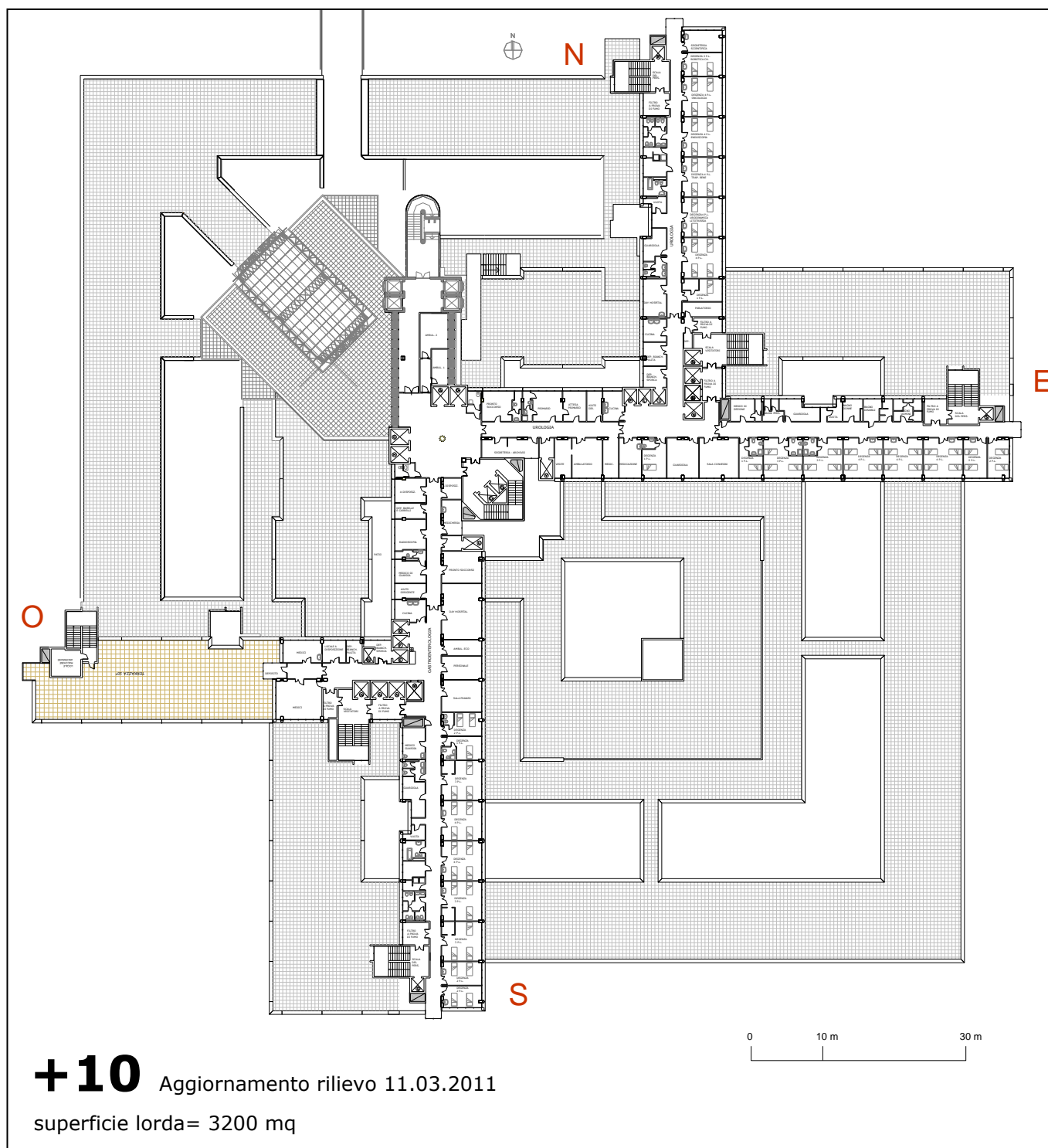
**PIANO VIII****Superficie lorda:** 3'615 m<sup>2</sup>**Attività svolte/Reparti:** Medicina 1, Medicina 2.

## PIANO IX

Superficie lorda: 3'615 m<sup>2</sup>

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

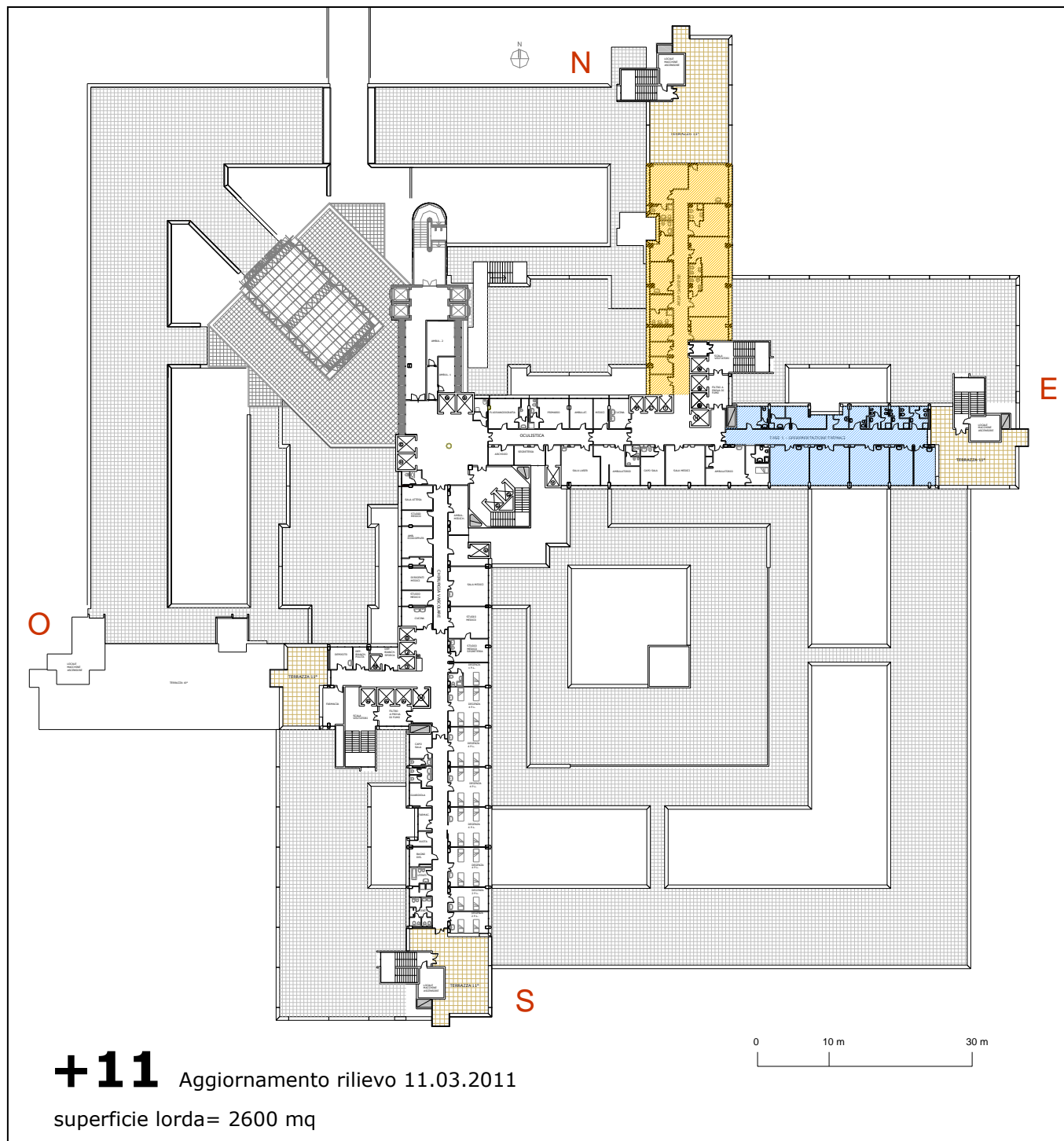


**PIANO X****Superficie lorda:** 3'200 m<sup>2</sup>**Attività svolte/Reparti:** Urologia, Gastroenterologia.

## PIANO XI

Superficie lorda: 2'600 m<sup>2</sup>

Attività svolte/Reparti: Chirurgia Vascolare, Oculistica, Sperimentazione Farmaci (Fase 1)





## APPENDICE B) CARATTERISTICHE SUPERFICI OPACHE E TRASPARENTI

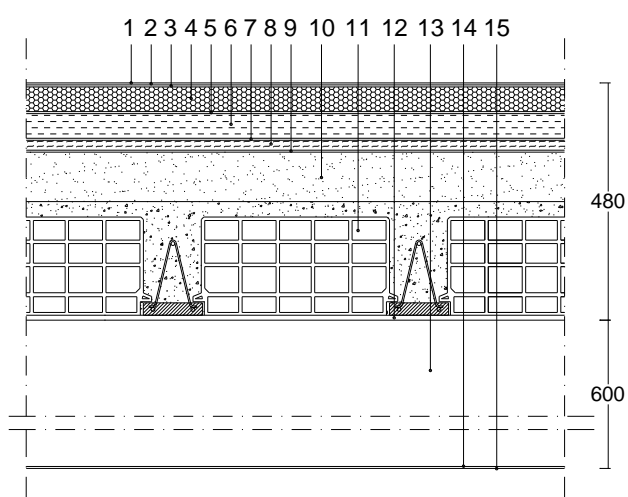
## SUPERFICI OPACHE

Tipologia di Superficie:

Solaio di copertura – Terrazze corpo principale

[Codice: SO1]

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



**Tipologia di Superficie:** Solaio intermedio corpo centrale (caso A)

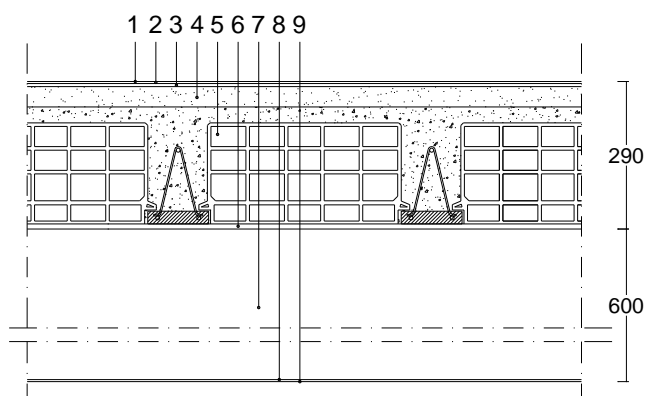
[Codice: SO2a]

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

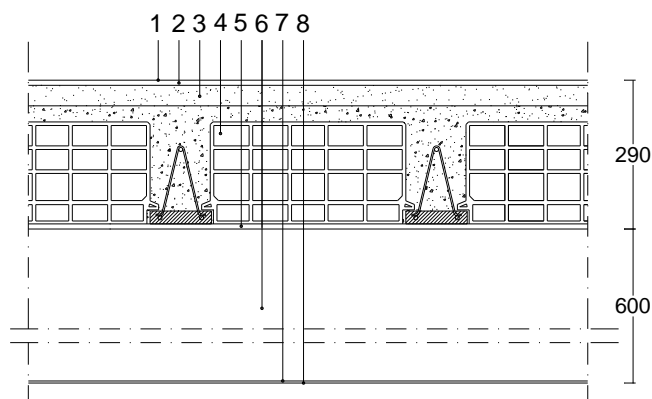
**Tipologia di Superficie:** Solaio intermedio corpo centrale (caso B)

[Codice: SO2b]

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



Solaio Intermedio Corpo Centrale (A)

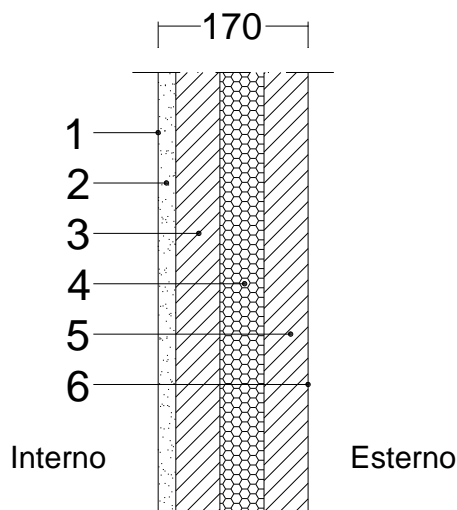


Solaio Intermedio Corpo Centrale (B)

Tipologia di Superficie: Tamponatura in pannello a sandwich

[Codice: SO3]

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



Sp. 170 mm



Tipologia di Superficie: Partizioni interne

[Codice: SO4]

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

Tipologia di Superficie: Pareti vani scala

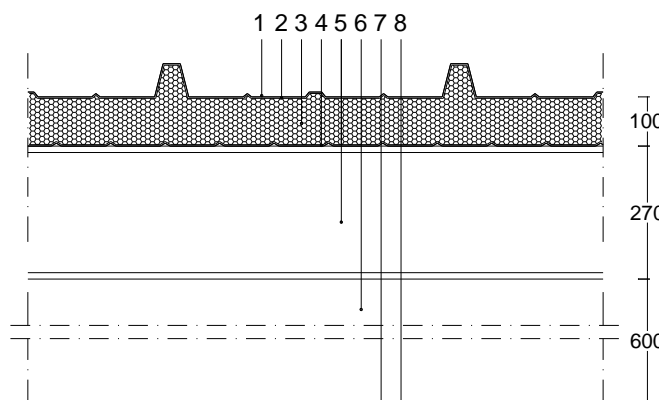
[Codice: SO5]

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

**Tipologia di Superficie:** Pannello di copertura Trauma Center

[Codice: SO6]

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



**Tipologia di Superficie:** Tamponatura Trauma Center

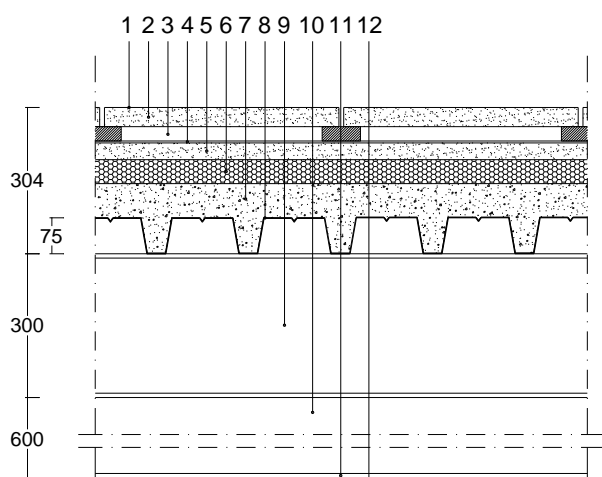
[Codice: SO7]

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

Tipologia di Superficie: Solaio di copertura Hall

[Codice: SO8]

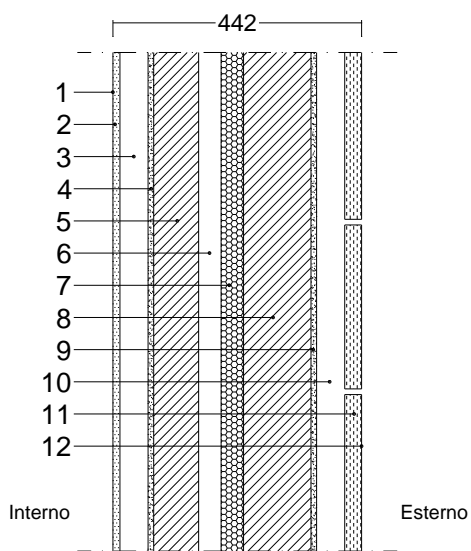
N.	DESCRIZIONE STRATO (da superiore ad inferiore)	s [mm]	k [W/mK]	Calore Specifico [J/kgK]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
1	adduttanza esterna	0			
2	quadrotto in malta cementizia 50x50 sp. 4 cm	40	1.400	840	2000
3	distanziatore in polipropilene (interc. Aria)	30	0.026	1000	1.30
4	membrana elastoplastomerica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



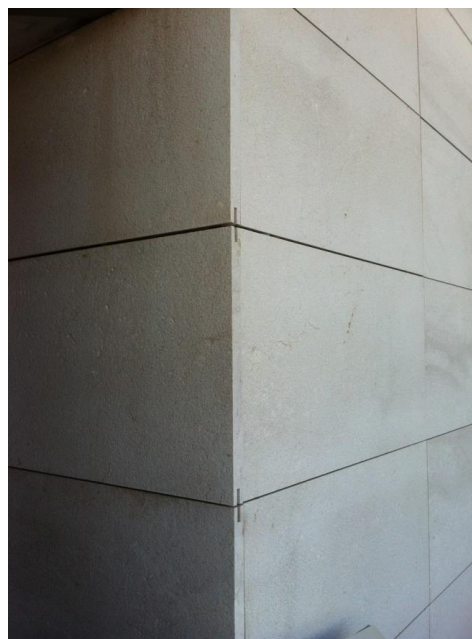
Tipologia di Superficie: Tamponatura Hall

[Codice: SO9]

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



Sp. 442 mm

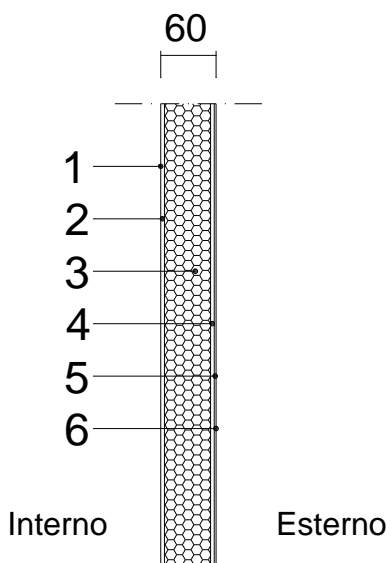


Tipologia di Superficie:

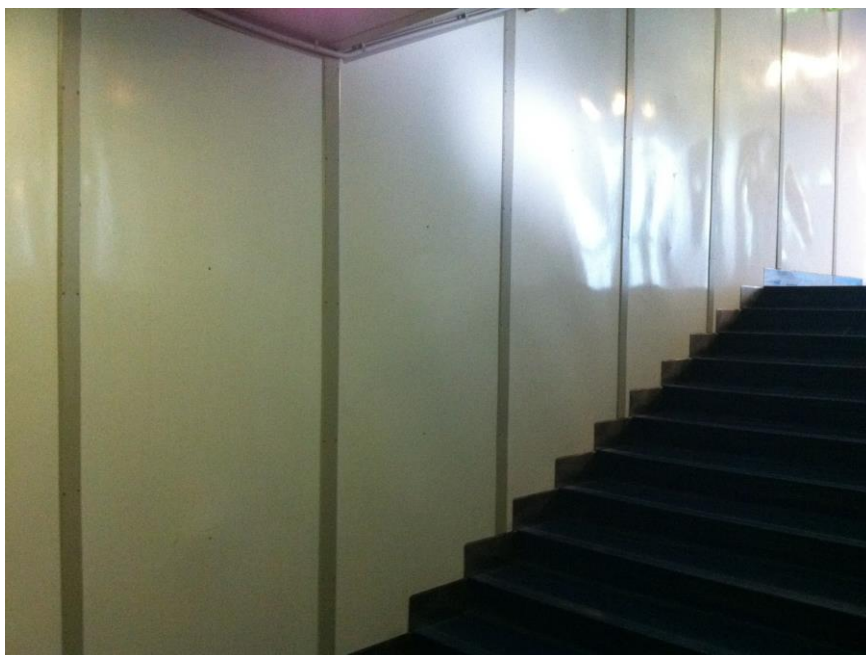
Pannello verticale vano scala – Torre ascensori

[Codice: SO10]

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



Sp. 60 mm

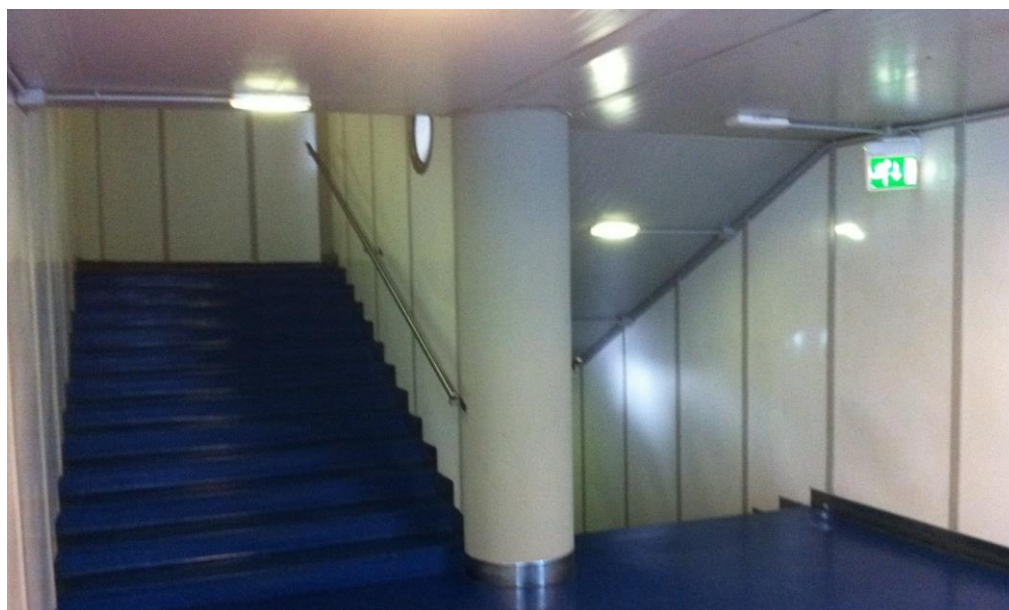
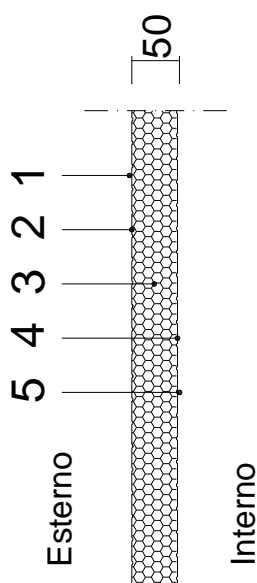


Tipologia di Superficie:

Pannello orizzontale vano scala – Torre ascensori

[Codice: SO11]

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



### SUPERFICI TRASPARENTI

Tipologia di Superficie:

Finestre a nastro (corpo principale)

[Codice: ST1]

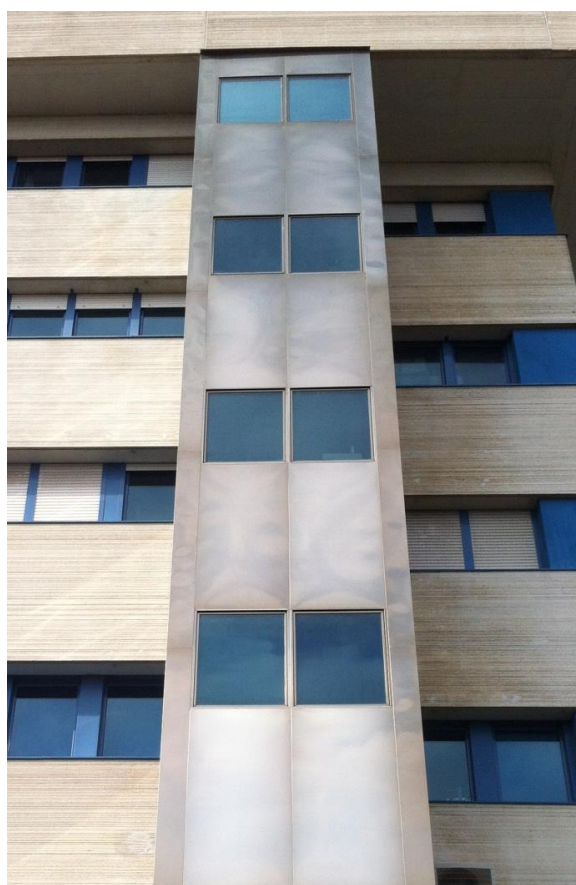
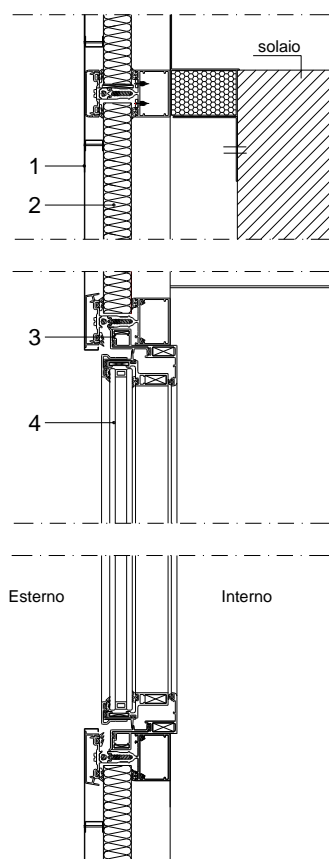
N.	DESCRIZIONE STRATO	s [mm]	k [W/mK]	C [W/m <sup>2</sup> K]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
1	telaio estruso in lega di alluminio 6060 UNI 9006/1 a taglio termico tipo "EKU 53 TT", trasmittanza termica unitaria DIN Kr=3,00 W/m <sup>2</sup> K	53		3.00	2700
2	vetrata isolante ad alta prestazione termica e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



Tipologia di Superficie: Facciata terminale corridoi

[Codice: ST2]

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





**Tipologia di Superficie:** Vetrata verticale vani scala

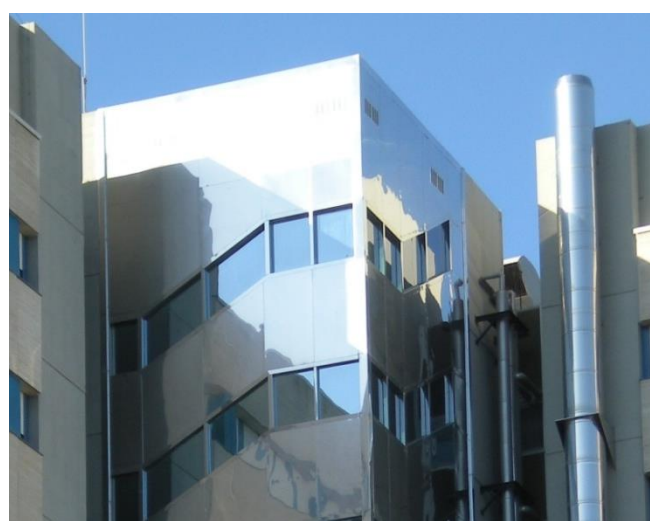
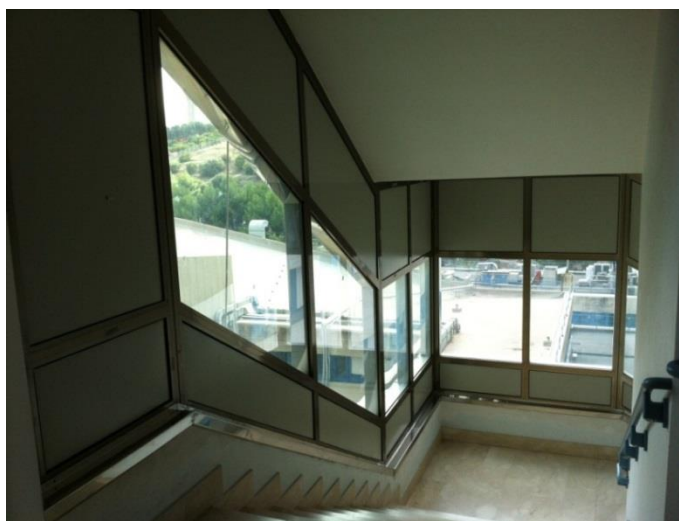
[Codice: ST3]

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

**Tipologia di Superficie:** Vetrata vano scala principale

[Codice: ST4]

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



**Tipologia di Superficie:** Facciata Trauma Center

[Codice: ST5]

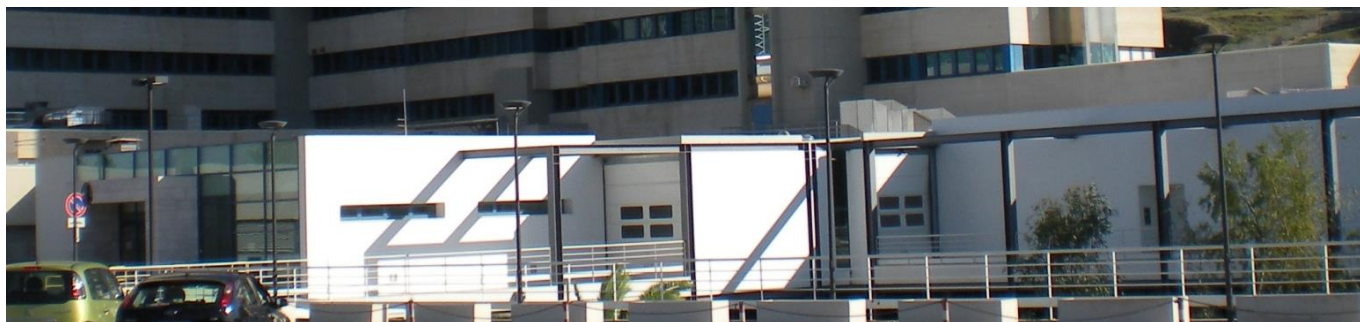
N.	DESCRIZIONE STRATO	s [mm]	k [W/mK]	C [W/m <sup>2</sup> K]	ρ [kg/m <sup>3</sup> ]
1	facciata continua realizzata con profili in lega di alluminio EN AW 6060-T5 conformi alla norma UNI 1220-2:2002 del sistema "ALL.CO. FX50"	50		2.50 5.90	2700
2	vetrata isolante ad alta prestazione termica e a controllo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



**Tipologia di Superficie:** Infissi Trauma Center

[Codice: ST6]

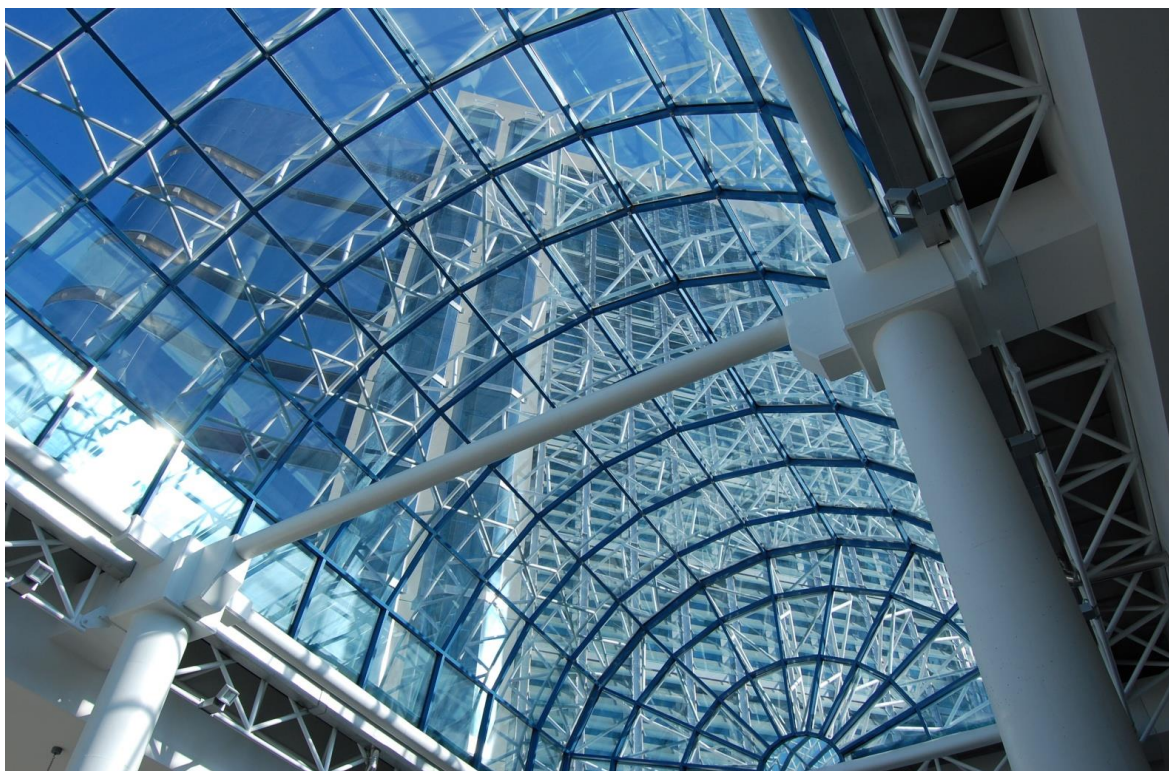
N.	DESCRIZIONE STRATO	s [mm]	k [W/mK]	C [W/m <sup>2</sup> K]	ρ [kg/m <sup>3</sup> ]
1	telaio estruso in lega di alluminio 6060 UNI 3569-66 tipo "ALL.CO. EXPORT45TT"	45		3.35	2700
2	vetrata isolante ad alta prestazione termica e a controllo solare composta da una lastra esterna di SUNERGY da 6 mm. AZUR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



**Tipologia di Superficie:** Facciata – cupola Hall

[Codice: ST7]

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



**Tipologia di Superficie:** Vetrate ascensori (nuova torre)

[Codice: ST8]

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



**Tipologia di Superficie:** Infissi torre ascensori

[Codice: ST9]

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



## APPENDICE C) CARATTERISTICHE IMPIANTI

## IMPIANTI ELETTRICI

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

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

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

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

Tabella C3 – Potenze elettriche installate negli impianti di climatizzazione.

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

Tabella C4 – Potenze elettriche delle principali apparecchiature elettromedicali.

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

## IMPIANTI TERMICI

Tabella C5– Potenze termiche delle UTA a 4 tubi.

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

n.d. dato non disponibile per questa macchina

par. risultato parziale

Tabella C6– Potenze termiche delle UTA a 2 tubi.

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

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

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



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

DATI TECNICI	VENTILATORE	RECUPERATORE TERMICO		BATTERIA SUPPLEMENTARE		PORTATA ARIA DI RINNOVO [m <sup>3</sup> /h]
		Regime Invernale [kW]	Regime Estivo [kW]	Riscaldamento [kW]	Raffrescamento [kW]	
MODELLO	Potenza [W]					
<b>XRC10</b>	147	3.71	0.96	3.22	2.04	1'000
<b>XRC15</b>	300	5.57	1.44	4.89	3.18	1'500

Tabella C9 – Potenze termiche dei Ventilconvettori.

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

n.d. dato non disponibile

Tabella C10 – Dati di targa dei Ventilconvettori.

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

Tabella C11 – Potenze termiche dei Radiatori.

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

n.d. dato non disponibile

Tabella C12 – Dati di targa dei Radiatori.

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