

**Università degli Studi di Padova**

---

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE  
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

## **Analisi energetica dell'edificio RFX nell'Area della Ricerca CNR di Padova**

Energetic analysis of the RFX building in the CNR Research Area of Padua

Laureando:  
**Mirko Marchesin**  
Matricola 1080290

Relatore:  
**Ch.mo Prof. Ing. Michele De Carli**  
Correlatore:  
**Dott. Ing. Francesco Fellin, Ph.D.**



**CONSORZIO RFX**  
*Ricerca Formazione Innovazione*



Consiglio Nazionale delle Ricerche

---

Anno Accademico 2016 – 2017



ANALISI ENERGETICA DELL'EDIFICIO  
RFX NELL'AREA DELLA RICERCA CNR  
DI PADOVA

Mirko Marchesin



## Sommario

Il presente lavoro si inserisce in un ampio piano di efficientamento energetico programmato nell'Area di Ricerca del CNR di Padova: questa tesi sviluppa un audit energetico completo per il Consorzio RFX, a partire dalla raccolta dati *in situ*, passando per la simulazione dinamica del sistema edificio-impianto, per definire infine uno spettro di soluzioni d'intervento nell'ottica del risparmio energetico. Il tutto seguendo le prescrizioni del Protocollo Internazionale di Misura e Verifica delle Prestazioni (IPMVP).

Come spesso accade per le strutture dedicate alla ricerca tecnologica d'avanguardia, la spesa per l'approvvigionamento energetico nel complesso patavino costituisce una delle principali voci di costo inserite nel bilancio d'esercizio annuale: nel caso in esame ciò si riscontra sia a causa della complessità tecnologica della sperimentazione in corso, sia per il raggiungimento ed il mantenimento di elevati standard di climatizzazione negli edifici in cui tale ricerca si concretizza a livello quotidiano.

Nell'affrontare il processo di analisi energetica si individuano e perseguono i seguenti obiettivi:

- la raccolta e l'organizzazione dei dati necessari per caratterizzare a livello energetico gli impianti e le strutture;
- l'elaborazione di un modello termoenergetico validato di simulazione dinamica per il sistema edificio-impianto;
- il rendiconto dei risultati di fabbisogno energetico attuale e l'individuazione di strategie di intervento;
- la proposta economica e la valutazione d'investimento per l'ottimizzazione della gestione energetica.



## Abstract

The present dissertation is included in a vast energy efficiency project at CNR Research Area of Padua: this thesis develops a complete energy analysis for Consorzio RFX, from on-site data collection and dynamic simulation of the building-plant system, to the proposal of a range of alternatives for energy savings. The whole work follows the procedures of the International Performance Measurement and Verification Protocol (IPMVP).

As often happens at state of the art research facilities, energy supply expense is one of the main cost entries for the Paduan compound in its Financial Report: this is due both to the technological complexity of the actual experimental research and in order to achieve and guarantee the highest HVAC (Heating Ventilation and Air Conditioning) standards inside the buildings where the research takes place on a daily basis.

Developing the energy analysis process, some major tasks are identified and followed:

- data collection and management for energetic characterisation of plants and structures;
- processing of a thermoenergetics validated model for the building-plant system dynamic simulation;
- report of the current energy consumption and exploration of strategic intervention options;
- investment proposal to optimise the energy management.



# Indice

<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
<b>1 Descrizione del Complesso</b>	<b>9</b>
1.1 Consiglio Nazionale delle Ricerche . . . . .	9
1.2 Consorzio RFX . . . . .	11
1.3 Descrizione degli impianti di Area . . . . .	14
1.3.1 Centrale Termica . . . . .	16
1.3.2 Centrale Frigorifera . . . . .	18
1.3.3 Alimentazione elettrica . . . . .	21
1.4 Descrizione dell'edificio IGI-RFX . . . . .	21
1.4.1 Caratteristiche dell'involucro . . . . .	26
1.4.2 Impianti termici e frigoriferi . . . . .	28
<b>2 Audit energetico</b>	<b>35</b>
2.1 Protocollo IPMVP . . . . .	35
2.1.1 Dettaglio della procedura . . . . .	36
2.2 Analisi dei consumi attuali di energia . . . . .	39
2.2.1 Esame delle bollette . . . . .	40
2.3 Monitoring . . . . .	43
2.3.1 Raccolta ed elaborazione dei dati . . . . .	44
2.3.2 Criteri di ripartizione dei consumi . . . . .	47
2.4 Prestazioni energetiche . . . . .	54

2.4.1	Baseyear Energy Data . . . . .	54
2.4.2	Indici di prestazione energetica attuali . . . . .	58
<b>3</b>	<b>Energy analysis</b>	<b>59</b>
3.1	Presentazione del codice di calcolo . . . . .	60
3.1.1	TRNSYS . . . . .	61
3.1.2	Sintesi dell'implementazione numerica . . . . .	62
3.2	Modellazione del sistema edificio-impianto . . . . .	63
3.2.1	Individuazione delle zone termiche . . . . .	64
3.2.2	Definizione delle stratigrafie . . . . .	67
3.2.3	Modellazione dell'ombreggiatura . . . . .	71
3.2.4	Analisi dei carichi interni . . . . .	74
3.2.5	Modellazione degli impianti . . . . .	79
3.3	Implementazione del modello . . . . .	83
3.3.1	Sviluppo del modello . . . . .	84
<b>4</b>	<b>Elaborazione dei risultati</b>	<b>87</b>
4.1	Output delle simulazioni . . . . .	87
4.2	Calcoli preliminari . . . . .	88
4.2.1	Determinazione dei consumi degli ausiliari . . . . .	88
4.2.2	Calcolo del rendimento complessivo del sistema . . . . .	89
4.3	Prestazioni energetiche simulate . . . . .	96
4.3.1	Confronto con i dati contabilizzati . . . . .	96
4.3.2	Profili di consumo . . . . .	98
4.3.3	Indici di prestazione energetica simulati . . . . .	103
<b>5</b>	<b>Riqualficazione energetica</b>	<b>105</b>
5.1	Contesto generale . . . . .	106
5.1.1	Enti e proprietà private . . . . .	106
5.1.2	Pubblica Amministrazione . . . . .	107

5.1.3	Energy Service Companies . . . . .	108
5.2	Energy Conservation Measures . . . . .	111
5.2.1	Proposte di intervento . . . . .	112
5.2.2	Preventivo di spesa . . . . .	114
5.3	Measurement & Verification . . . . .	117
5.3.1	Energy Savings . . . . .	117
5.3.2	Consumi degli ausiliari dotati di inverter . . . . .	119
5.4	Analisi del risparmio economico . . . . .	124
5.4.1	Calcolo del risparmio in bolletta . . . . .	124
5.4.2	Flussi di cassa e rendimento finanziario . . . . .	126
	<b>Conclusioni</b>	<b>129</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>133</b>
	<b>Sitografia</b>	<b>141</b>
	<b>Indice analitico</b>	<b>145</b>
	<b>Appendice A</b>	<b>147</b>
	<b>Appendice B</b>	<b>155</b>
	<b>Appendice C</b>	<b>159</b>



# Elenco delle figure

1	Impianti da fonti di energia rinnovabile. . . . .	3
2	Efficienza energetica in Italia. . . . .	5
1.1	Vista aerea del complesso dell'Area della Ricerca di Padova. . . . .	10
1.2	Vista aerea dell'Istituto Gas Ionizzati, sede del Consorzio RFX. . . . .	12
1.3	Principali programmi di ricerca scientifica del Consorzio RFX. . . . .	13
1.4	Planimetria generale dell'Area della Ricerca. . . . .	15
1.5	Stacco della rete di teleriscaldamento e raffrescamento. . . . .	16
1.6	Generatori di calore installati nella Centrale Termica. . . . .	17
1.7	Gruppi frigoriferi e torri evaporative installati nella Centrale Frigorifera. . . . .	19
1.8	Schema sintetico dell'impianto elettrico di Area. . . . .	22
1.9	Planimetria dell'edificio IGI-RFX. . . . .	24
1.10	Tipologie principali di sviluppo architettonico dei locali di IGI-RFX. . . . .	25
1.11	Vista della muratura di tamponamento del corpo R1. . . . .	28
1.12	Principali centrali per il trattamento dell'aria. . . . .	33
1.13	Terminali idronici dell'aggregato Uffici e terminali aeraulici di RFX. . . . .	34
2.1	Schema a blocchi della procedura sequenziale dell'IPMVP. . . . .	37
2.2	Consumo di energia di Area su base mensile nelle bollette energetiche. . . . .	42

2.3	Schema generale dei contabilizzatori di energia termica e frigorifera. . . . .	45
2.4	Esempio di posizionamento dei sensori dei contabilizzatori. . . . .	47
2.5	Profili mensili di consumo di energia termica e frigorifera. . . . .	57
3.1	Estratto della rilevazione strumentale dei parametri termoi- grometrici. . . . .	68
3.2	Trasmittanza termica $U$ al variare del rapporto $s/\lambda$ . . . . .	71
3.3	Superfici verticali interessate dal fenomeno dell'ombreggiatura. . . . .	73
3.4	Estratto della distribuzione temporale dei carichi interni su foglio di calcolo. . . . .	78
3.5	Diagramma psicrometrico per il regime di climatizzazione estiva. . . . .	82
3.6	Visualizzazione su interfaccia grafica del modello di calcolo. . . . .	83
4.1	Grafici dei fabbisogni energetici annuali simulati e contabilizzati. . . . .	99
4.2	Profili mensili simulati di consumo di energia termica e frigo- rifera. . . . .	102
5.1	Modello di business per l'efficienza energetica delle ESCo. . . . .	110
5.2	Dispositivi per gli interventi di riqualificazione energetica. . . . .	116
3	Rilevazione strumentale dei parametri termoi- grometrici. . . . .	150
4	Grafico dei fabbisogni annuali simulati post interventi di riqualificazione divisi per aggregato (1). . . . .	162
5	Grafico dei fabbisogni annuali simulati post interventi di riqualificazione divisi per aggregato (2). . . . .	163

# Elenco delle tabelle

1.1	Dati di targa dei generatori di calore. . . . .	18
1.2	Dati di targa delle pompe di circolazione. . . . .	18
1.3	Dati di targa dei gruppi frigoriferi e delle torri evaporative. . . . .	20
1.4	Dimensioni principali, superfici e volumi netti dei corpi di IGI-RFX. . . . .	27
1.5	Dati di targa di macchine e terminali per il trattamento dell'aria. . . . .	32
2.1	Consumo di energia termica ed elettrica in bolletta. . . . .	41
2.2	Fac-simile di scheda di lettura dei contabilizzatori. . . . .	44
2.3	Elaborazione dati delle letture F1 (IGI-RFX). . . . .	46
2.4	Ripartizione effettiva del carico termico. . . . .	49
2.5	Quote mensili di energia termica di IGI-RFX rilevate presso i contabilizzatori rispetto al consumo termico totale ricavato dalle bollette di Area. . . . .	50
2.6	Ripartizione effettiva del carico frigorifero. . . . .	52
2.7	Quote mensili di energia elettrica dedicata al raffrescamento di IGI-RFX rilevate presso i contabilizzatori rispetto al consumo elettrico totale ricavato dalle bollette di Area e alle rilevazioni in Centrale Frigorifera. . . . .	53
2.8	Profili di consumo di energia ottenuti secondo i criteri di ripartizione derivati dalle letture dei contabilizzatori. . . . .	56

2.9	Consumo specifico annuale per il riscaldamento e il raffrescamento. . . . .	58
3.1	Suddivisione di IGI-RFX in zone termiche. . . . .	66
3.2	Dettaglio delle stratigrafie delle strutture principali. . . . .	72
3.3	Fattori di contemporaneità dei carichi interni. . . . .	77
3.4	Valore assoluto dei carichi interni suddivisi per zona. . . . .	79
4.1	Potenza assorbita ed energia elettrica annuale consumata dai sistemi ausiliari di ventilazione. . . . .	90
4.2	Valori dei rendimenti degli impianti di climatizzazione. . . . .	95
4.3	Risultati dell'elaborazione dati della simulazione dinamica. . . . .	97
4.4	Confronto tra fabbisogni annuali simulati e contabilizzati. . . . .	100
4.5	Profili di consumo di energia ottenuti tramite simulazione dinamica. . . . .	101
4.6	Consumo specifico annuale simulato per il riscaldamento e il raffrescamento. . . . .	103
5.1	Preventivo di massima per l'intervento di primo livello. . . . .	115
5.2	Preventivo di massima per gli interventi di secondo livello. La linea tratteggiata separa gli interventi di competenza del Consorzio RFX e quelli del CNR. . . . .	118
5.3	Prestazioni energetiche in seguito agli interventi di riqualificazione. . . . .	120
5.4	Consumo specifico annuale simulato post interventi per il riscaldamento e il raffrescamento. . . . .	121
5.5	Potenza assorbita ed energia elettrica annuale consumata dai sistemi ausiliari di ventilazione post interventi di riqualificazione. . . . .	123
5.6	Costo medio dell'energia pre e post interventi di riqualificazione. . . . .	125
5.7	Analisi del rendimento finanziario degli investimenti. . . . .	128

8	Scheda tecnica sintetica della strumentazione di misura. . . .	149
9	Modellazione dell'ombreggiatura derivata da ostruzioni. . . .	157
10	Dettaglio del calcolo del rendimento di distribuzione. . . .	158
11	Fabbisogni annuali simulati post interventi di riqualificazione.	161



# Introduzione

Risparmio energetico, progresso tecnologico, sviluppo sostenibile e decarbonizzazione dell'economia sono tra gli argomenti principali nella discussione della questione energetica, ovvero l'interrogativo che si pone nei confronti dell'effetto delle attività umane e dell'impiego di risorse di energia sull'alterazione dell'ecosistema del pianeta.

Da un lato, la discussione viene indirizzata dalla spinta etica e morale volta a contrastare le modificazioni climatiche di derivazione antropica, evidentemente inequivocabili per la maggior parte della comunità scientifica internazionale e del grande pubblico (sebbene la matrice controversiale in questo genere di tematiche sia oggi più che mai percepibile). Dall'altro lato, l'uso razionale e sostenibile dell'energia porta con sé un'immediata opportunità economica, tale da generare un mercato in rapida espansione e diffusamente popolato anche dalle aziende, dalle corporazioni e addirittura dai governi nazionali che fanno dello sfruttamento delle fonti fossili il loro *core business*:

- la Cina, tradizionalmente legata allo sfruttamento del carbon fossile come fonte energetica primaria e responsabile da sola dell'emissione di quasi un terzo dei gas ad effetto serra<sup>1</sup> (*greenhouse gases*, GHG) a livello globale si è recentemente imposta come primo produttore<sup>2</sup> e utilizzatore di tecnologie basate sull'energia solare ed eolica (Figura 1);

---

<sup>1</sup>Global Carbon Project (GCP), 2016.

<sup>2</sup>China National Energy Administration (NEA), 2016.

- gli Stati Uniti d'America, secondo responsabile del consumo di energia e dell'emissione dei GHG su scala globale dopo la Cina, nonostante il recente dietrofront politico dell'amministrazione federale sull'Accordo di Parigi successivo alla COP 21<sup>3</sup>, presentano sensibili tassi di crescita in entrambi i mercati citati.

L'Unione Europea, a cui si può ricondurre complessivamente circa il 10% dell'emissione globale di GHG, sostiene con vigore l'impulso verso la cosiddetta *green economy*, ratificando programmi volti principalmente a contenere l'emissione di gas climalteranti, a promuovere l'impiego di energia ricavata da fonti rinnovabili e ad incrementare l'efficienza energetica generale. Il *20-20-20 Climate Package* del piano *Europe2020*, finanziato tramite il programma di stanziamento *Horizon2020*, prevede a tal proposito i seguenti obiettivi per il 2020 (variazione rispetto ai livelli del 1990):

**20%:** contenimento dell'emissione di GHG;

**20%:** quota del fabbisogno di energia ricavata da fonti rinnovabili.

**20%:** incremento dell'efficienza energetica;

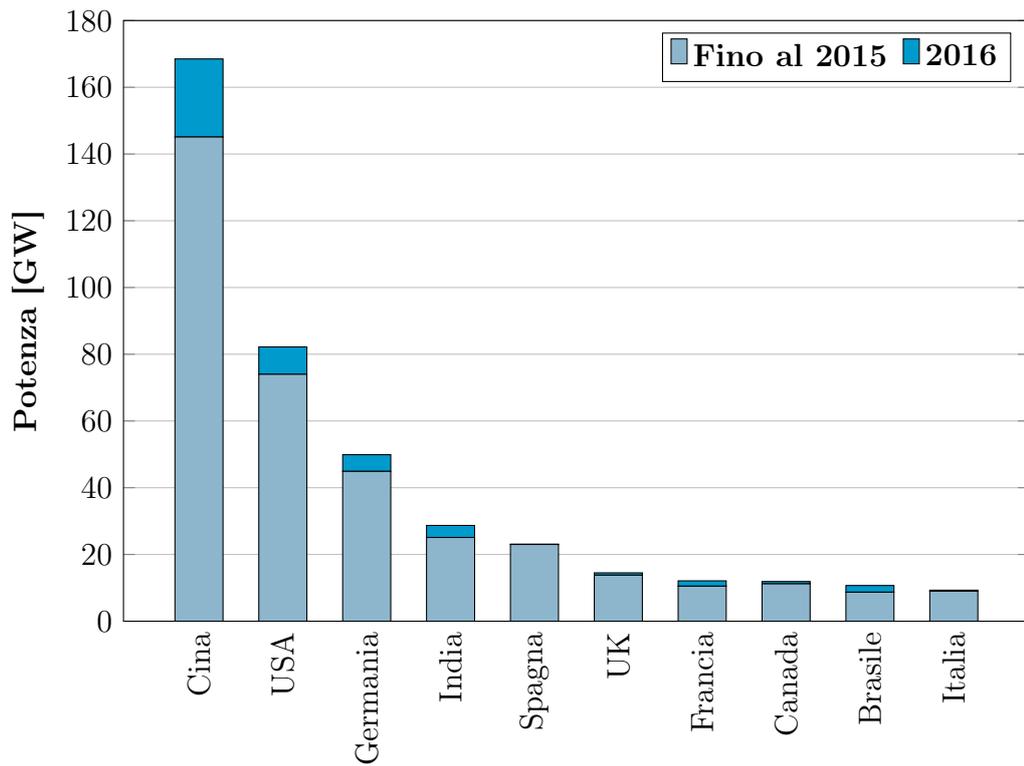
Per il 2030 il pacchetto si riconfigura nella versione 40-27-27 (−40% GHG, 27% rinnovabili, +27% efficienza), ma non è esclusa la possibilità di ridiscutere gli obiettivi e di renderli ancor più ambiziosi.

Nel 2015 il valore del mercato globale dell'industria e dei servizi per l'efficienza energetica viene quantificato<sup>4</sup> in 221 miliardi di dollari americani (circa il 14% dell'intero valore del mercato dell'energia), con un incremento pari al 6% su base annuale: la quota per la riqualificazione del parco edilizio in ambito residenziale e commerciale corrisponde a oltre la metà del totale, con un incremento annuale ancor più evidente (9%).

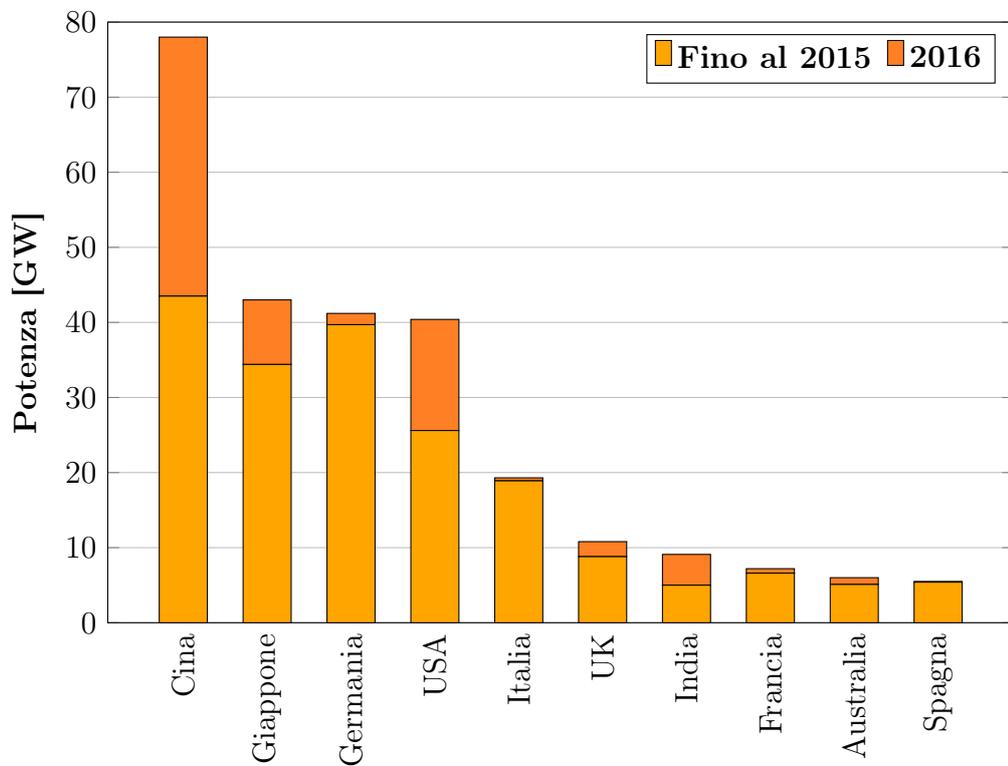
---

<sup>3</sup>United Nations Climate Change Conference, 2015.

<sup>4</sup>International Energy Agency (IEA), 2016, Energy Efficiency Market Report.



(a) Impianti eolici [GWEC, 2016].



(b) Impianti solari fotovoltaici [IEA PVPS, 2016].

**Figura 1:** Impianti da fonti di energia rinnovabile: incremento annuale della potenza installata (2015 - 2016).

Il mercato degli investimenti in efficienza energetica a livello nazionale in Italia<sup>5</sup> segue una crescita su base annuale rappresentata nel grafico di Figura 2a, con il volume d'affari trainato dal comparto residenziale (3 miliardi di €, 56% del totale nel 2015, di cui oltre un terzo derivato dalla sola installazione di pompe di calore). L'industria manifatturiera segue con circa 1,8 miliardi di € (32%), mentre il settore terziario (Pubblica Amministrazione compresa) chiude l'elenco con un più modesto risultato di 0,65 miliardi di € (14%). Le previsioni per il 2017 suggeriscono un incremento di circa il 7% su base annuale, per un valore di mercato che potrebbe raggiungere complessivamente i 6,4 miliardi di €.

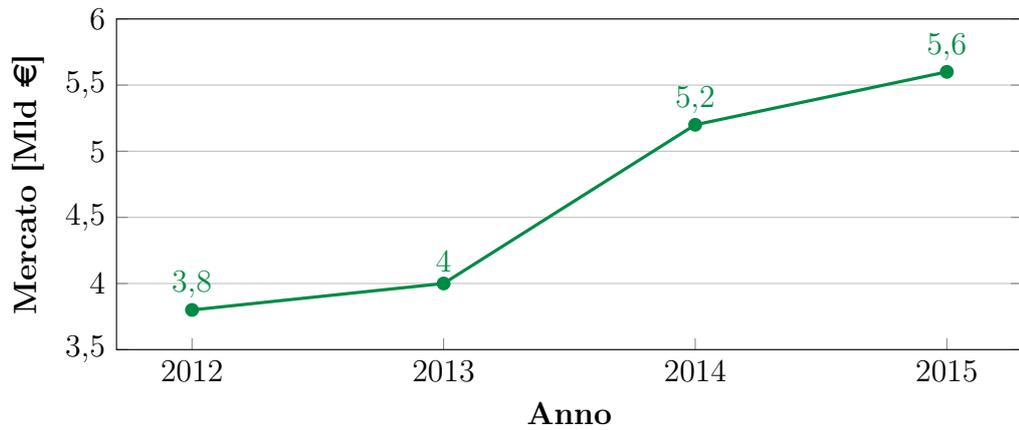
Come risultato di tali investimenti si possono riscontrare dei sensibili incrementi dell'efficienza energetica, qualora misurati secondo indici che ne possano quantificare l'effettiva incidenza sui consumi. La tradizionale misura dell'intensità energetica, semplice rapporto tra il consumo interno lordo di energia primaria e il prodotto interno lordo di uno Stato, contiene al proprio interno fattori variabili non direttamente pertinenti con l'efficienza energetica in sé: basti pensare che una contrazione del livello dei consumi causata dalla crisi economica viene numericamente registrata al pari di un intervento di efficienza energetica. Tra i vari fattori è possibile nominare lo sviluppo economico, la distribuzione delle risorse nei settori economici e la fascia climatica di appartenenza.

Ad oggi sono disponibili indici di derivazione più sofisticata, maggiormente rappresentativi dell'effettivo incremento di efficienza energetica: è il caso dell'indice ODEX<sup>6</sup>, di cui se ne riporta l'andamento relativo al quadriennio 2012 - 2015 nel grafico di Figura 2b. L'incremento cumulato dell'indice nel periodo (1,5%) è attualmente inferiore alla media europea (2,2%).

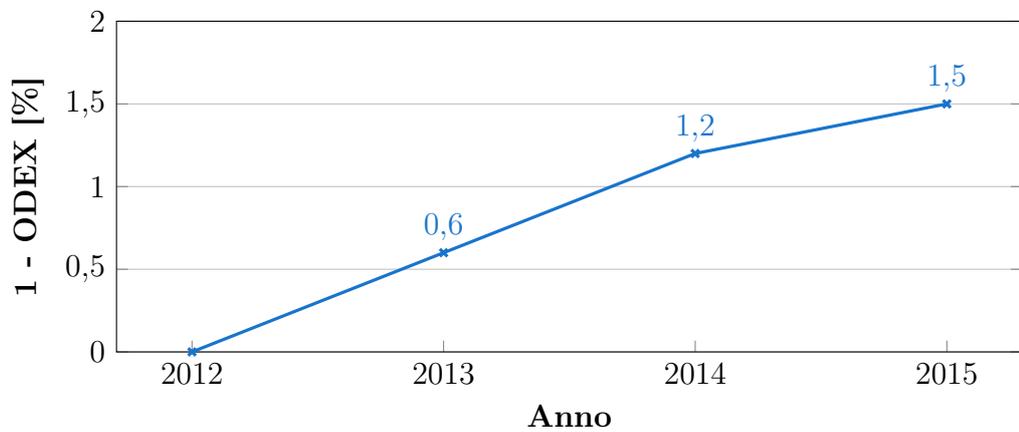
---

<sup>5</sup>Energy & Strategy Group del Politecnico di Milano, 2016, Energy Efficiency Report.

<sup>6</sup>Odyssee-Mure project, 2016, Odyssee energy efficiency index (ODEX). Poiché un indice ODEX pari a 90 indica un 10% di incremento dell'efficienza energetica, se ne riporta la differenza rispetto all'unità (in termini percentuali) per immediatezza di consultazione.



(a) Valore di mercato degli investimenti in efficienza energetica.



(b) Indice di incremento dell'efficienza energetica.

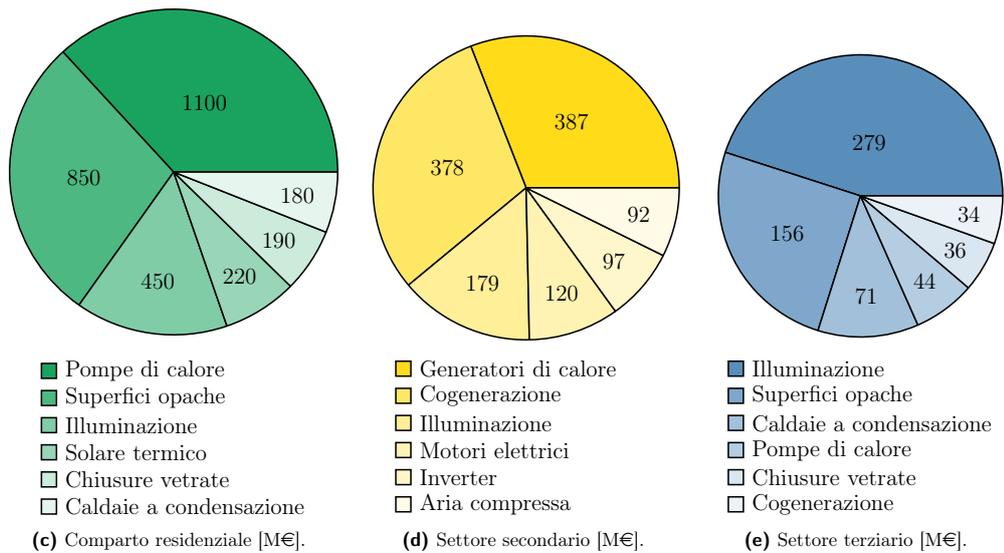


Figura 2: Efficienza energetica in Italia: valore di mercato, indice di crescita annuale e principali investimenti divisi per settore economico (2015).

Il presente lavoro di tesi si inserisce in questo contesto, andando a completare un ampio progetto di riqualificazione generale dell'Area della Ricerca CNR di Padova (attualmente valutata<sup>7</sup> come terzo distretto più energivoro dell'Ente di ricerca, dopo quelli di Pisa e di Bologna), nell'ottica dell'imminente rinnovo del suo parco edilizio e del futuro ammodernamento dei sistemi centralizzati di gestione e distribuzione dell'energia [25].

Il lavoro, in particolare, mira a realizzare un piano di riqualificazione del complesso sede del Consorzio RFX: l'edificio principale, con uno sviluppo in superficie di circa 7600 m<sup>2</sup> per oltre 46 000 m<sup>3</sup> di volume netto climatizzato, possiede un fabbisogno annuale di energia primaria per la climatizzazione degli ambienti pari a circa 220 tep<sup>8</sup>, rappresentativo del 60% del fabbisogno per la climatizzazione dell'intera Area della Ricerca (370 tep).

L'iter di realizzazione del progetto si compone di quattro fasi principali:

1. la verifica del livello di consumo attuale tramite l'analisi della bollette energetiche e il monitoraggio sistematico dei consumi tramite sistemi di contabilizzazione dell'energia;
2. la campagna di misura ed elaborazione dati per la costruzione e la successiva calibrazione del modello termoenergetico del sistema edificio-impianto;
3. l'individuazione delle opportune strategie di intervento per la riqualificazione e l'incremento dell'efficienza energetica dell'edificio, prevedendone in modo realistico l'impatto sul fabbisogno di energia tramite la simulazione dinamica del modello precedentemente messo a punto;
4. la redazione dello studio di fattibilità tecnico-economica e la valutazione della redditività degli investimenti finanziari del *retrofit* proposto.

---

<sup>7</sup>Consiglio Nazionale delle Ricerche, 2013, Rapporto sull'efficienza energetica.

<sup>8</sup>Tonnellate equivalenti di petrolio calcolate in sede di audit, secondo i parametri di conversione del Ministero dello Sviluppo Economico (Circolare del 12 dicembre 2014).

Si osservi che lo scopo finale della trattazione non vuole essere la riproduzione illustrativa e fine a sé stessa delle pratiche tecniche in uso nell'analisi energetica. L'approccio è per quanto possibile di tipo rigoroso nel rispetto della normativa corrente, sfrutta le procedure del Protocollo Internazionale di Misura e Verifica dei Risultati (IPMVP), prevede l'utilizzo di strumentazione certificata e di codici di calcolo sofisticati, affinché il piano finale possa considerarsi effettivamente implementabile nell'ottica dell'ottimizzazione della gestione energetica.



# Capitolo 1

## Descrizione del Complesso

In questo capitolo si offre una descrizione d'insieme dell'Area di Ricerca di Padova: si caratterizzano qualitativamente strutture e impianti esaminati nella realizzazione dell'audit energetico, trattandone in modo sintetico quelli relativi ai lavori precedenti a questa tesi e focalizzando invece l'attenzione su quelli di competenza del Consorzio RFX.

### 1.1 Consiglio Nazionale delle Ricerche

La sezione di presentazione, contenuta nel sito internet del CNR, offre la seguente descrizione dell'Ente di ricerca:

«Il Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) è la più grande struttura pubblica di ricerca in Italia. Fondata nel 1923, ha operato in passato come consulente di Governo in materia di ricerca e come fondo di finanziamento per i *grants* della ricerca universitaria.

Dal 1989 il CNR è un Ente di ricerca, con la missione di realizzare progetti di ricerca, promuovere l'innovazione e la competitività del sistema industriale nazionale, l'internazionalizzazione del sistema di ricerca nazionale, e di fornire tecnologie e soluzioni ai bisogni emergenti nel settore pubblico e privato.»



**Figura 1.1:** Vista aerea del complesso dell'Area della Ricerca di Padova [80].

Attualmente può contare su oltre 8000 dipendenti, la metà dei quali impiegati direttamente nell'attività scientifica, a cui si aggiungono oltre 4000 ricercatori impegnati in attività di post-dottorato all'interno dell'Ente.

L'Area di Ricerca di Padova, realizzata a partire dal 1975, sorge in una zona industriale situata a sud-est del territorio urbano cittadino: si sviluppa su una superficie recintata di circa  $170\,000\text{ m}^2$  ed è costituita da oltre  $20\,000\text{ m}^2$  di superfici lorde di calpestio per gli edifici.

Circa  $60\,000\text{ m}^2$  di tale superficie recintata sono oggi di proprietà del Consorzio Zona Industriale e Porto Fluviale di Padova (ZIP), che ne ha affidato poco più di un sesto alla Fondazione Città della Speranza, nello specifico per la Torre di Ricerca dell'Istituto di Ricerca Pediatrica, operativa a partire dalla seconda metà del 2013 (visibile in Figura 1.1). È doveroso notare che tale struttura è energeticamente indipendente dal CNR di Padova.

A livello organizzativo si evidenzia una suddivisione in unità di ricerca denominate "Istituti"<sup>1</sup>, tra i quali è possibile annoverare anche l'Istituto Gas Ionizzati (IGI), le cui strutture sono oggetto dell'analisi contenuta nel presente lavoro.

Gran parte degli stabili presenti nell'Area è di natura modulare-prefabbricata, ad eccezione dei Servizi Generali (edificio multipiano al cui interno si trovano

---

<sup>1</sup>La descrizione approfondita degli Istituti del CNR di Padova può essere reperita nella tesi di laurea precorritrice del presente lavoro (si veda a proposito [35, p. 7]) oppure il sito dell'Area della Ricerca di Padova [75]).

la mensa, la caffetteria, sale riunioni e una biblioteca), di IGI (più recente di circa un decennio rispetto agli altri edifici, architettonicamente più esteso e complesso e servito da impianti termotecnici di tecnologia più sofisticata) e dei nuovi edifici in corso di costruzione (visibili in Figura 1.4).

## 1.2 Consorzio RFX

Il Consorzio RFX è un istituto giuridico costituito nel 1996 che prende il nome dal progetto di confinamento magnetico del plasma per la fusione nucleare controllata “*Reversed Field eXperiment*”, promosso da EURATOM<sup>2</sup> a partire nel 1984 all’interno dell’Ente di ricerca patavino.

A livello organizzativo si tratta di un’aggregazione delle seguenti entità:

1. CNR, nello specifico dell’Istituto Gas Ionizzati;
2. ENEA, Ente per le Nuove Tecnologie, l’Energia e l’Ambiente;
3. Università degli Studi di Padova;
4. INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare;
5. Acciaierie Venete S.p.A., gruppo industriale locale.

Sede del Consorzio RFX è l’edificio denominato IGI appartenente al medesimo Istituto, concesso dal CNR in comodato d’uso (Figura 1.2).

All’interno dell’Area di Padova, il Consorzio RFX si occupa di attività di ricerca nel settore della fusione nucleare<sup>3</sup>. Tra i vari programmi di ricerca, sono anzitutto degni di nota l’esperimento *RFX-mod*<sup>4</sup> (Figura 1.3a) e la realizzazione di strutture ed impianti dedicati allo sviluppo di tecnologie

---

<sup>2</sup>*European Atomic Energy Community*, altresì denominato CEEA, Comunità Europea dell’Energia Atomica [78].

<sup>3</sup>Per maggiori informazioni si rimanda al sito [74] oppure all’opuscolo dedicato [1].

<sup>4</sup>Si tratta del più grande esperimento a confinamento magnetico del tipo *Reversed Field Pinch* (RFP) attualmente in esercizio nel mondo.



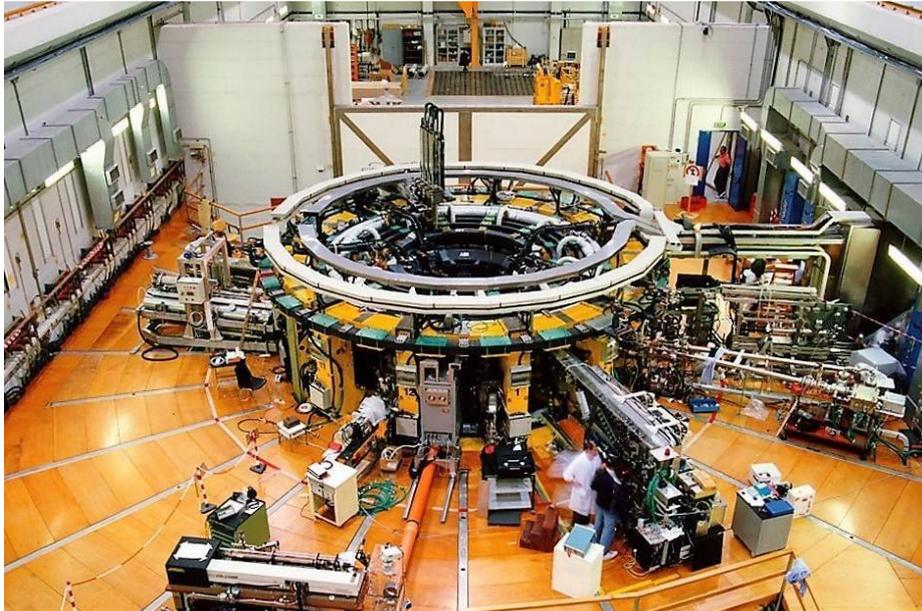
**Figura 1.2:** Vista aerea dell'Istituto Gas Ionizzati, sede del Consorzio RFX [80].

collegate ad ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*), il progetto internazionale sperimentale di reattore a fusione di tipo *Tokamak* (configurazione alternativa a quella di RFX-mod) in corso di realizzazione nella Francia meridionale [81].

L'edificio cardine del progetto di supporto a ITER, denominato PRIMA NBTF (dall'acronimo del progetto principale, *Padua Research on ITER Megavolt Accelerator*, e del complesso per il test del sistema di iniezione di fascio di neutri<sup>5</sup> *Neutral Beam Test Facility*), è tuttora in corso di realizzazione (Figura 1.3b): una volta a regime, ospiterà un sistema sorgente di ioni negativi (*SPIDER*, attualmente in fase di ultimazione, come visibile in Figura 1.3c) e un prototipo di iniettore di neutri (*MITICA*, di cui attualmente sono in costruzione le infrastrutture, vedasi Figura 1.3d). Poiché il complesso PRIMA NBTF non è al momento pienamente operativo, se ne rimanda l'analisi a ulteriori ed eventuali seguiti di questa tesi.

---

<sup>5</sup>Gli iniettori di particelle neutre contribuiscono a trasferire energia al plasma, aumentando le prestazioni e l'efficienza dei dispositivi a confinamento magnetico.



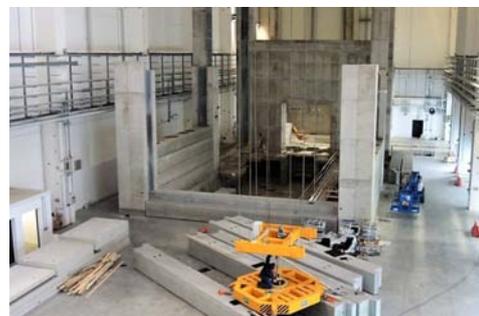
(a) Macchina dell'esperimento RFX-mod.



(b) Edificio PRIMA NBTF, in corso di costruzione avanzata.



(c) La sorgente di ioni SPIDER all'interno della schermatura neutronica.



(d) Realizzazione della schermatura che ospiterà l'iniettore di neutri MITICA.

**Figura 1.3:** Principali programmi di ricerca scientifica del Consorzio RFX.

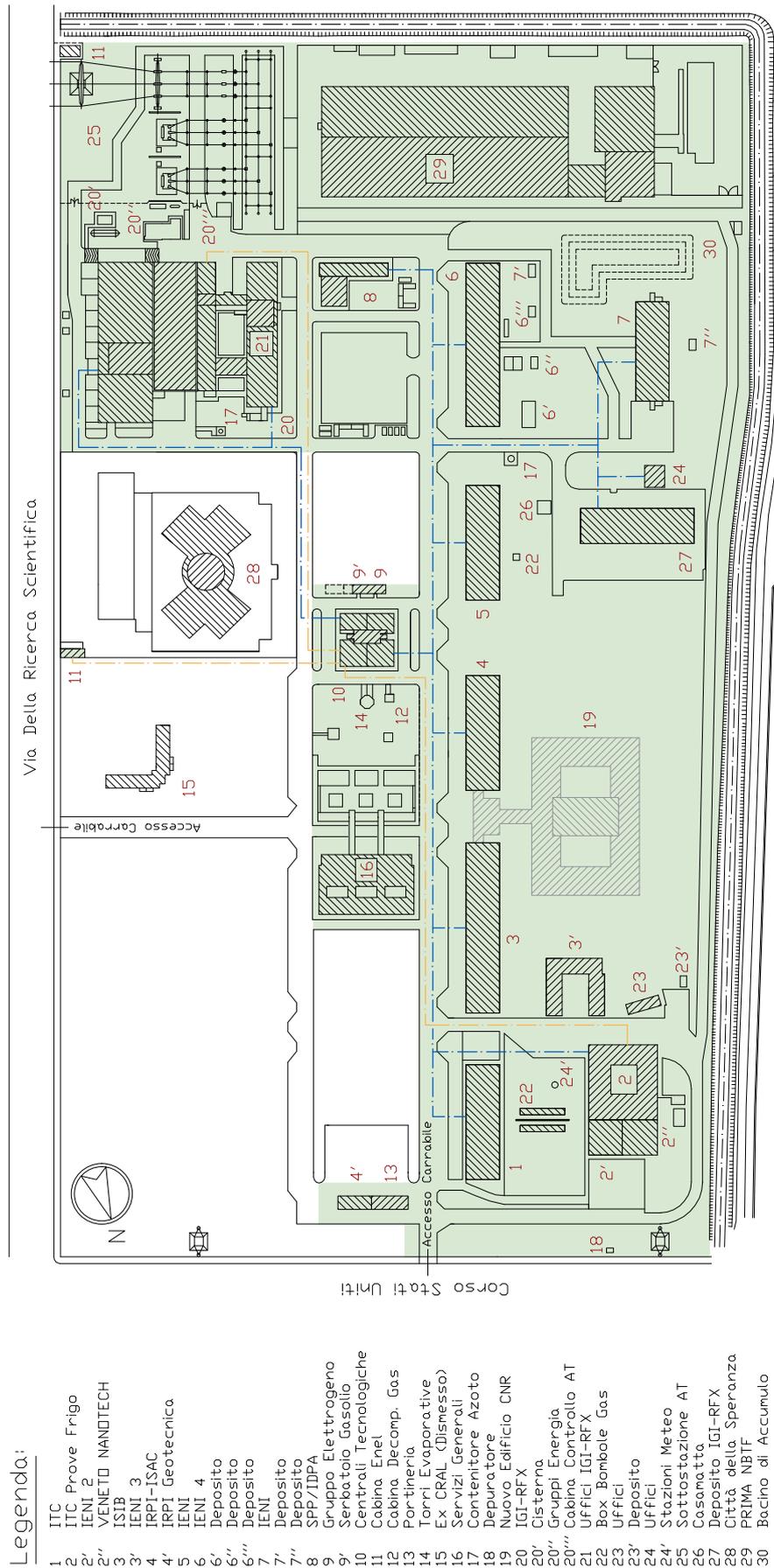
### 1.3 Descrizione degli impianti di Area

Il complesso IGI oggetto dello studio è collegato alla rete di teleriscaldamento e raffrescamento di Area alimentata dall'edificio "10", altresì denominato "Centrali Tecnologiche", visibile in Figura 1.4: situato in posizione baricentrica rispetto all'Area di Ricerca, è costituito da una centrale termica, da una centrale frigorifera, dalla cabina di Media Tensione e dal locale quadri di Bassa Tensione.

Dall'edificio 10 si dipartono le alimentazioni elettriche e le reti di teleriscaldamento e raffrescamento che alimentano tutti gli Istituti di Area, i Servizi Generali e IGI (eccetto quindi i soli Istituto di Ricerca Pediatrica e PRIMA NBTF, dotati di impianti di produzione termofrigorifera e di cabine MT indipendenti).

Le condotte sono parzialmente interrato e parzialmente in cavedio in proporzione variabile all'interno dell'Area. Ogni ramo è costituito da una tubatura di mandata e da una di ritorno, sia per l'acqua calda che per l'acqua refrigerata; sono inoltre presenti una tubatura per l'acqua di consumo e una per i sistemi antincendio, come si può osservare nello stacco della mandata in centrale di Figura 1.5.

La ripartizione della portata viene effettuata mediante due collettori di mandata, uno per il fluido caldo e uno per quello freddo, dai quali si diramano tre macrocircuiti, uno dei quali interamente dedicato a IGI-RFX; la circolazione si chiude presso i due analoghi collettori di ritorno ed è garantita da un sistema di pompe a portata costante. Le tubature dirette a IGI-RFX sono del tipo precoibentato e si sviluppano quasi interamente in percorso interrato, eccezion fatta per gli stacchi scoperti in corrispondenza dei collegamenti con gli impianti tecnici dell'edificio.



**Figura 1.4:** Planimetria generale dell'Area della Ricerca con schema delle reti elettriche (giallo), di teleriscaldamento e raffrescamento (blu); sono visibili il nuovo edificio laboratori CNR e il complesso PRIMA NBTF, rispettivamente in fase progettuale e di avanzata realizzazione.



**Figura 1.5:** Stacco della rete di teleriscaldamento e raffrescamento di Area presso il livello inferiore dell'edificio 10.

### 1.3.1 Centrale Termica

La Centrale Termica di Area è costituita da un locale al cui interno sono installati tre generatori di calore, con focolare ad inversione di fiamma, allacciati ad un'unica fornitura di gas metano (Figura 1.6): i due generatori di taglia maggiore sono alimentati da bruciatori bistadio ad aria soffiata (uno con controllo pneumatico, l'altro elettronico), mentre il terzo (di taglia inferiore poiché dedicato al solo post-riscaldamento delle CTA in regime estivo) è dotato di bruciatore monostadio. Le caldaie sono state rinnovate nel periodo tra il 2003 e il 2006; per i dati di targa si faccia riferimento alla Tabella 1.1 [64].

La temperatura di rete viene impostata in modo manuale dagli operatori del Servizio Manutenzione, generalmente nell'intervallo tra i 75 e gli 80 °C per il periodo invernale; usualmente nel periodo estivo viene ridotta a circa 65 °C.

La circolazione nel circuito è affidata a quattro pompe di mandata a portata costante, due delle quali impiegate solamente come riserva in caso di guasti o manutenzione; le specifiche tecniche, comuni per tutte le unità, si trovano in Tabella 1.2 [64].



(a) ICI REX 62 (620 kW).



(b) Ecoflam 3000 (3000 kW).



(c) ICI REX 400 (3950 kW).

**Figura 1.6:** Generatori di calore installati nella Centrale Termica; le caldaie ICI sono accoppiate a bruciatori di marchio Baltur, mentre Ecoflam è dotata di bruciatore proprietario.

**Tabella 1.1:** Dati di targa dei generatori di calore;  $P_t$  indica la potenza termica massima,  $\eta$  il rendimento termico nominale.

Marca	Modello	$P_t$ [kW]	$\eta$ al 100%	$\eta$ al 30%
ICI	REX 62	620	0,923	0,907
Ecoflam	3000.1 TL	3000	0,923	0,902
ICI	REX 400	3950	0,955	0,956

**Tabella 1.2:** Dati di targa delle pompe di circolazione;  $P_{ass}$  indica la potenza assorbita, mentre per la prevalenza si indicano i metri di colonna d'acqua equivalente.

$P_{ass}$ [kW]	Prevalenza [m]	Portata [m <sup>3</sup> ]
18,5	30	130

Nel locale Centrale Termica sono inoltre presenti tre serbatoi di circa 10 m<sup>3</sup> l'uno, due dei quali per esigenze di espansione dei fluidi ed inerzia termica, mentre il terzo viene utilizzato per il semplice stoccaggio dell'acqua di consumo.

### 1.3.2 Centrale Frigorifera

La Centrale Frigorifera di Area è servita da due gruppi frigoriferi dotati di compressori a vite installati nel 2004 (Figura 1.7a), sostituiti di due gruppi analoghi ormai obsoleti: la loro temperatura di mandata viene impostata manualmente e generalmente mantenuta costante e pari a 9°C; i gruppi frigoriferi sono accoppiati a due torri evaporative a tiraggio forzato e circuito aperto (Figura 1.7b).

Il sistema di regolazione non permette attualmente di variare in modo efficiente la temperatura lato condensazione in funzione di quella ambientale: essendo la temperatura della sorgente fredda fissata, i gruppi frigoriferi



(a) McQuay WHS 210 (735 kW) e 464 (1629 kW).



(b) Sital Klima 180 (910 kW) e 400 (2002 kW).

**Figura 1.7:** Gruppi frigoriferi e torri evaporative installati nella Centrale Frigorifera.

**Tabella 1.3:** Dati di targa dei gruppi frigoriferi e delle relative torri evaporative;  $P_f$  indica la potenza frigorifera nominale, mentre “EER” è l’acronimo di *Energy Efficiency Ratio*, ovvero Indice di Efficienza Energetica, pari al rapporto tra il calore asportato dal sistema e l’energia elettrica necessaria per asportarlo. Per le torri,  $P_{diss}$  indica la potenza termica dissipata nominale,  $P_{vent}$  quella elettrica assorbita dai ventilatori.

(a) Dati di targa dei gruppi frigoriferi.

Marca	Modello	$P_f$	$P_{ass}$	EER
		[kW]		
McQuay	WHS 210.2 ST	735	171	4,44
McQuay	WHS 464.4 ST	1629	366	4,60

(b) Dati di targa delle torri evaporative.

Marca	Modello	$P_{diss}$	$P_{vent}$
		[kW]	
Sital Klima	180	910	15
Sital Klima	400	2002	44

lavorano pertanto in condizioni di EER costante durante il corso dell’anno. Il fluido refrigerante è R134a per entrambi i gruppi; per i dati di targa di refrigeratori e torri si faccia riferimento alle Tabelle 1.3a e 1.3b [34].

Il circuito è alimentato da sei pompe di circolazione a portata costante di taglia variabile, due delle quali esclusivamente dedicate come riserva. In regime invernale il solo gruppo di taglia inferiore viene mantenuto attivo per soddisfare le necessità di energia frigorifera di IGI-RFX; la circolazione è garantita da una pompa di mandata dedicata (con specifiche analoghe ai modelli installati nella centrale termica, vedasi Tabella 1.2).

Si presti attenzione che IGI-RFX è anche dotato di refrigeratori raffreddati ad aria installati nei propri locali tecnici: tuttavia, trattandosi perlopiù di sistemi di condizionamento locale per utenze tecnologiche o di emergenza per utenze sensibili, se ne tralascia sia la descrizione che il bilancio energetico nel seguito del lavoro, in linea con le assunzioni reperibili in [21, p. 5].

### 1.3.3 Alimentazione elettrica

Fatta eccezione per il sistema di alimentazione elettrica dell'esperimento RFX (dotato di una stazione ad altissima tensione direttamente connessa alla rete di trasmissione Terna a 400 kV), l'allacciamento elettrico di Area è interamente affidato ad una cabina a torre di media tensione 20 kV con punto di lettura di natura fiscale: da qui si sviluppano due linee, la prima raggiunge l'edificio Centrali Tecnologiche precedentemente citato, la seconda si allaccia a una cabina di media tensione denominata "IGI" appartenente a IGI-RFX. Entrambi gli allacciamenti sono forniti di contabilizzatore di energia (non fiscale).

Nelle Centrali Tecnologiche (cabina MT) avviene la trasformazione in BT che alimenta gran parte degli Istituti e i Servizi Generali; IGI-RFX e ITC (Istituto per le Tecnologie della Costruzione<sup>6</sup>) sono invece dotati di linee MT dedicate e cabine di trasformazione locali. Si inserisce uno schema elettrico semplificato (Figura 1.8) e si omettono ulteriori particolari, non essendo l'argomento strettamente pertinente alla trattazione.

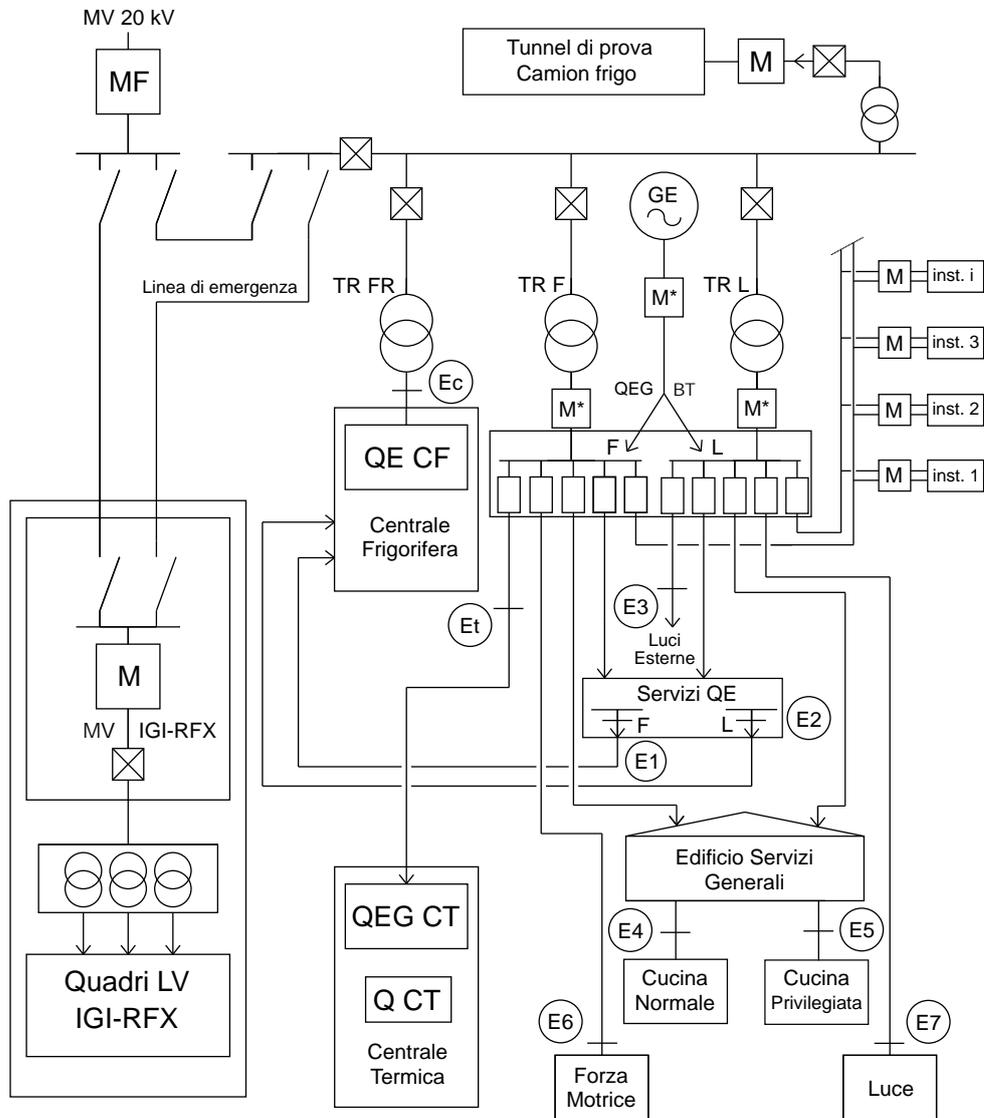
## 1.4 Descrizione dell'edificio IGI-RFX

L'edificio in sé è decisamente complesso se paragonato agli altri Istituti dell'Area della Ricerca ed è inoltre dotato di sottostrutture di dimensioni e caratteristiche estremamente variabili, motivi per cui è doveroso scegliere un approccio di analisi sufficientemente dettagliato per apprezzarne le sfumature determinanti nella costruzione del modello di calcolo.

Il fabbricato sede dell'Istituto Gas Ionizzati è localizzato nella porzione sud-est della superficie recintata che delimita l'Area, a stretto contatto, per evidenti questioni logistiche, con la stazione elettrica che alimenta gli

---

<sup>6</sup>Indicato con il numero "2" come ITC Prove Frigo nella piantina di Figura 1.4.



**Figura 1.8:** Schema sintetico dell'impianto elettrico di Area:  $\boxed{MF}$ ,  $\boxed{M}$  e  $\boxed{M^*}$  sono rispettivamente dei punti di misura di natura fiscale, interni (non fiscali) e interni momentaneamente non affidabili;  $\textcircled{Ei}$  sono dei punti di lettura di recente installazione (2013) [24].

impianti dedicati all'esperimento. Torna utile ai fini dello studio esaminare la denominazione dei corpi dell'edificio, la cui numerazione progressiva permette di raggrupparne e identificarne con immediatezza gli spazi e le funzioni principali, come si può evincere dal seguente elenco e dalla planimetria contenuta in Figura 1.9.

**R1:** uffici, biblioteca e sale riunioni;

**R2:** ingresso e collegamento coperto lato sud;

**R3:** uffici e collegamento coperto lato nord;

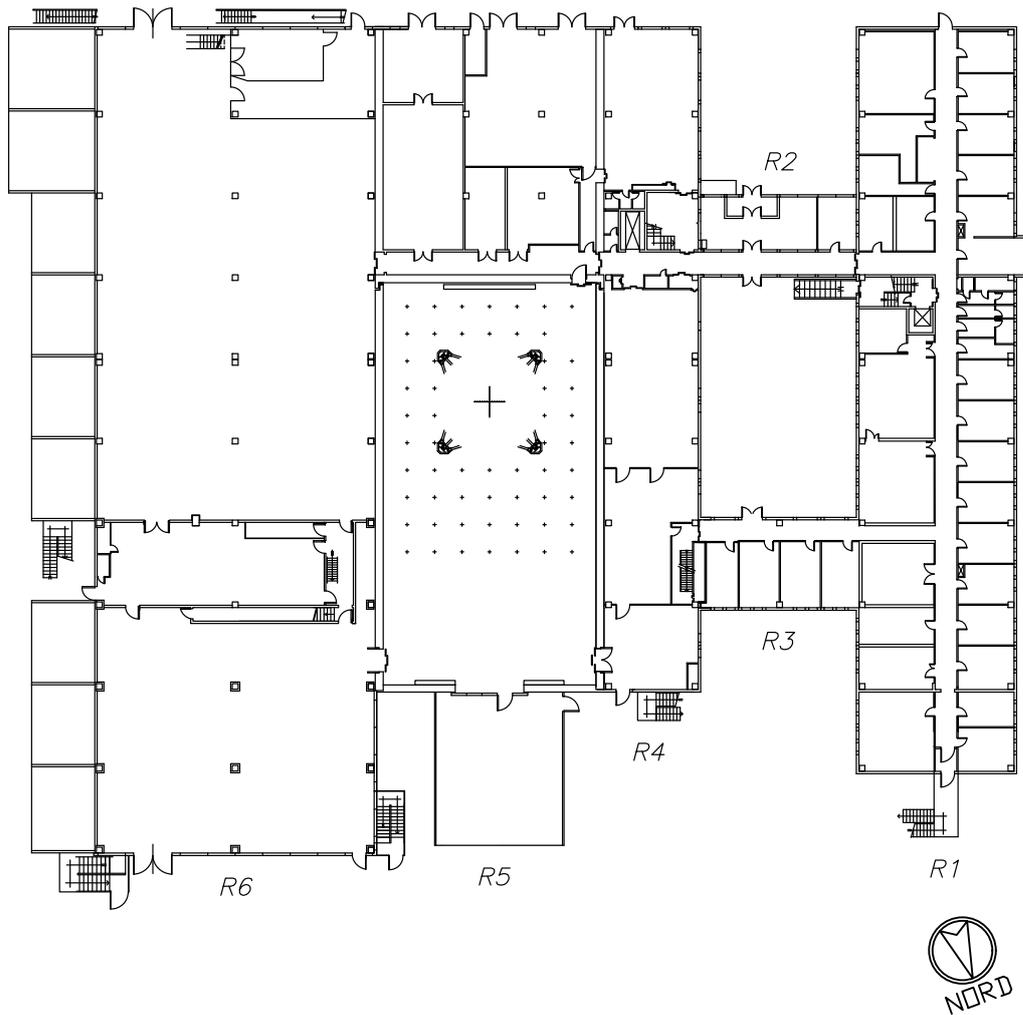
**R4:** laboratori, diagnostiche e officine;

**R5:** sala esperimento e montaggi;

**R6:** sale alimentazioni elettriche, sala controllo locale (SCL) e cabina MT di esperimento.

La costruzione dell'edificio risale a metà anni '80 e si evolve in maniera sequenziale durante il corso degli anni per una molteplicità di ragioni:

1. la maggior parte dell'opera edilizia per il corpo principale ha inizio nel 1986;
2. un intero piano supplementare di uffici (R1-R2-R3) viene aggiunto durante l'edificazione del complesso, a partire dal 1988;
3. a seguito di un disastroso incendio datato dicembre 1999, si provvede alla quasi totale ricostruzione (ripristino degli impianti incluso) del corpo R6 che ospita le alimentazioni elettriche dell'esperimento RFX;
4. un ulteriore ampliamento è messo in opera nel 2004, a partire dall'ala nord degli uffici in R1, su tutti e tre i piani.



**Figura 1.9:** Planimetria dell'edificio IGI-RFX (piano terra).



(a) Locali compatti dell'aggregato Uffici.



(b) Locali con sviluppo a tutta altezza dell'aggregato RFX.

**Figura 1.10:** Tipologie principali di sviluppo architettonico dei locali di IGI-RFX.

L'insieme complessivo può essere sommariamente diviso in due aggregati secondo il principio architettonico generale adottato nella progettazione: da un lato si trovano i corpi R1-R2-R3-R4 con sviluppo multipiano e solai intermedi (Figura 1.10a), mentre l'altro lato è costituito dai corpi R5 e R6, elevati a tutta altezza (Figura 1.10b). Il motivo di tale divisione è da ricercarsi nella destinazione d'uso di tali aggregati, la quale può essere rispettivamente sintetizzata in questo modo:

- il primo aggregato è generalmente dedicato ad uffici e laboratori, con locali di dimensioni comunque contenute (per immediatezza di trattazione, nel seguito ci si riferisce genericamente a tale aggregato come "Uffici");
- il secondo aggregato ospita l'esperimento in sé e tutto il sistema di alimentazione elettrica al suo servizio, con locali sostanzialmente analoghi a capannoni industriali (allo stesso modo, tale aggregato prende nel seguito semplicemente il nome di "RFX").

Come si può facilmente intuire dalla descrizione, Uffici è costituito dai corpi R1, R2, R3 e R4, mentre RFX dai corpi R5 ed R6. Si specifica che R4, benché sostanzialmente funzionale all'esperimento, rientra ai fini

della presente trattazione nell'aggregato Uffici per la caratteristica di corpo multipiano analoga ad R1.

### 1.4.1 Caratteristiche dell'involucro

Grazie ad un'estesa ed approfondita campagna di ricerca, i cui riferimenti verranno opportunamente segnalati all'occorrenza, è possibile descrivere sia le caratteristiche globali dell'involucro edilizio, sia il dettaglio delle singole strutture che lo costituiscono. Inizialmente, si offre una visione d'insieme preliminare a livello dimensionale: in Tabella 1.4 sono presenti le quote degli sviluppi in lunghezza principali dei singoli moduli, oltre alla loro superficie totale calpestabile e al volume netto climatizzato.

L'irreperibilità di dati certi ed univoci circa le altezze in prospetto dell'edificio<sup>7</sup> rende necessario l'intervento tramite misurazione in loco: per l'occasione si utilizza un misuratore di distanza laser (distanziometro) di marchio Bosch certificato secondo *ISO 16331-1* [39], il cui sensore ottico soddisfa abbondantemente le prestazioni minime richieste per le misure (nel caso in esame 1,5 mm per l'accuratezza della misura e 100 m per la portata, come riportato in Appendice A). Si inseriscono le altezze rilevate dalle coperture dell'edificio (ringraziando il personale del Servizio Manutenzione per l'accesso presso le coperture non calpestabili) nella presente Tabella 1.4, mentre si tralascia per beneficio di sintesi l'elenco delle singole altezze interpiano, consultabili per esteso assieme a tutte le dimensioni caratteristiche nei *file* del modello dell'edificio.

A livello di stratigrafia, l'involucro della sezione Uffici è costituito, per quanto riguarda la muratura perimetrale, da pannelli di tamponamento in calcestruzzo armato con struttura multistrato "*a sandwich*" (con riempimento

---

<sup>7</sup>In particolar modo per quanto riguarda le altezze interpiano, fortemente variabili all'interno dell'edificio poichè definite da solette, sopraelevazioni e controsoffitti di tipologia eterogenea.

**Tabella 1.4:** Dimensioni principali ( $L_1$ ,  $L_2$ ,  $H$ ), superfici calpestabili ( $S$ ) e volumi netti climatizzati ( $V$ ) dei corpi di IGI-RFX.

Corpo	$L_1$	$L_2$ [m]	$H$	$S$ [m <sup>2</sup> ]	$V$ [m <sup>3</sup> ]
R1	65,8	14,0	10,9	2674	7931
R2	13,6	7,2	10,7	167	500
R3	13,6	8,2	10,9	345	1034
R4	58,6	8,5	10,9	1280	4097
R5	58,6	20,0	16,7	1149	18 157
R6	24,7	73,0	8,9	1983	14 674
Tot				7598	46 393

di materiale isolante), eccezion fatta per l'ampliamento superiore edificato in opera con una semplice muratura di mattoni e isolante interno (Figura 1.11). Il solaio alla base è del tipo “*Hourdis*”, con vespaio su tavelloni e massetto in calcestruzzo posati su muretti di mattoni. Il solaio di copertura è del tipo “*Predalles*” con struttura portante in calcestruzzo armato alleggerito, con cappa termoisolante, guaina impermeabile e ulteriore strato isolante poroso. I solai interpiano sono analoghi a quelli di copertura, con la sostituzione degli elementi isolanti da parte di un massetto in calcestruzzo. Dei semplici laterizi forati formano la struttura dei tramezzi interni, le porte interne sono in legno tamburato mentre i serramenti esterni sono realizzati con profilati di alluminio muniti di vetrocamera (con prestazioni classificate secondo la norma di riferimento dell'epoca per i serramenti, ovvero la *UNI 7979* [38]).

L'aggregato RFX, rispetto agli Uffici, è sostanzialmente differente sia a livello costruttivo che di scelta dei materiali di costruzione, dovendo accogliere al suo interno elementi di natura molto più sensibile a livello di gestione e sicurezza: la struttura perimetrale è pertanto costituita dai medesimi pannelli di tamponamento della sezione precedente, sostenuti però da un muro pieno<sup>8</sup> in calcestruzzo armato; quest'ultimo costituisce tutta la

<sup>8</sup>R5 è realizzato come un bunker in calcestruzzo armato, a scopo di radioprotezione.



**Figura 1.11:** Vista della muratura di tamponamento del corpo R1. La sopraelevazione aggiunta in opera è facilmente identificabile dal diverso colore dell'intonaco esterno.

muratura interna dello stabile. Il pavimento è realizzato da una gettata di calcestruzzo su una base di ghiaione inferiore, mentre il solaio di copertura<sup>9</sup> è del tipo a tegoloni in calcestruzzo armato precompresso, sulla cui sommità giace lo strato impermeabile e termicamente isolante. Gli elementi vetrati sono analoghi ai precedenti, le porte interne sono in lega leggera (fatta eccezione per il portone blindato per l'accesso in sala esperimento), mentre i portoni esterni sono realizzati in semplice lamiera d'acciaio e sono dotati di coibentazione interna.

#### 1.4.2 Impianti termici e frigoriferi

In questa sezione si presenta l'attuale struttura impiantistica all'interno di IGI-RFX. Analogamente alla trattazione precedente, anche per questo aspetto si riscontra una spiccata dualità nella gestione impiantistica dei due aggregati dell'edificio: Uffici è servito da un impianto ad aria primaria con

---

<sup>9</sup>A livello strutturale si noti che il solaio di copertura di R5 non è calpestabile, mentre in R6 è portante.

terminali ad acqua per ogni ambiente, mentre RFX è fornito di un impianto di climatizzazione a tutta aria. Si elencano nel seguito le unità considerate nell'analisi energetica, tralasciando quelle che, per funzionamento fortemente discontinuo oppure occasionale<sup>10</sup>, non incidono in maniera sufficientemente apprezzabile nel calcolo [7].

Si riassumono in Tabella 1.5a i locali serviti e le caratteristiche delle Centrali Di Zona (CDZ) [19, 20, 66]; le potenzialità di impianto<sup>11</sup> vengono riportate per consultazione, pur non essendo prese direttamente in esame dal modello di calcolo).

Le unità di marchio Thermac risalgono all'opera di costruzione originale di IGI-RFX, mentre quelle di marchio FAST sono di più recente installazione a causa dell'incendio del 1999, che ha reso forzatamente necessaria la sostituzione delle macchine precedenti: a conferma di ciò le unità FAST, a differenza delle unità Thermac, sono tutte configurate con un più moderno schema in cui è prevista la sezione di ricircolo della portata elaborata.

CDZ 3, che alimenta la sala esperimento, è del tipo multizona, con tre zone di derivazione dotate di batterie di postriscaldamento dedicate asservite a una regolazione di zona indipendente<sup>12</sup>.

Si tenga presente che CDZ 6 è l'unica centrale provvista di recuperatore di calore, in particolare della tipologia rotativa (efficienza nominale di recupero termico fino al 75%, in questo caso abbassata al 60% a causa della vetustà della macchina); non potendo risalire agli schemi costruttivi dell'epoca, si segnala che i dati di targa di tale unità sono risultato di una stima (a partire

---

<sup>10</sup>Durante il funzionamento a pieno carico dell'esperimento si rivela talvolta necessario impiegare sistemi ausiliari per lo smaltimento del calore prodotto dagli impianti sperimentali; tali sistemi sono in buona parte serviti da raffreddamento con torre evaporativa o da refrigeratori condensati ad aria di proprietà diretta del Consorzio RFX [21].

<sup>11</sup>Per le CDZ dell'aggregato RFX i valori delle potenze non fanno riferimento ai dati di targa originali ma a una stima delle condizioni operative attuali, ricalcolate nella perizia per il ripristino degli edifici post incendio [31].

<sup>12</sup>La potenza termica relativa  $P_{+,p}$  inserita in Tabella 1.5a si riferisce alla somma delle potenze delle tre batterie di postriscaldamento di zona [19].

dal confronto con le unità 1 e 2 del medesimo produttore).

A queste centrali principali se ne sommano altre di dimensioni più contenute, di servizio in locali dove si rende necessario un controllo sulla climatizzazione più sofisticato, a causa delle attività che si svolgono al loro interno oppure per la tipologia di apparecchiature presenti:

1. Sala Riunioni Principale in R1, dotata di una UTA con portata d'aria d'immissione pari a  $1500 \text{ m}^3/\text{h}$ , da tempo fuori servizio per irreperibilità di ricambi (trascurata nel calcolo) [66];
2. Sala Controllo Centrale (SCC) in R3, dotata di tre condizionatori di precisione di marchio RC Condizionatori, per una portata d'aria di rinnovo di  $830 \text{ m}^3/\text{h}$  e una potenza frigorifera sensibile di  $86 \text{ kW}$  [60];
3. Centro Elaborazione Dati (CED) in R4, contenente due condizionatori di precisione sempre di RC, per una portata d'aria di rinnovo di  $700 \text{ m}^3/\text{h}$  e una potenza frigorifera sensibile di  $68 \text{ kW}$  [60];
4. Sala Refrigerazione in R5, servita da una UTA marchiata Aircontrol, denominata "AIRCTA23", con portata d'aria d'immissione di  $2300 \text{ m}^3/\text{h}$  e potenza non indicata [4];
5. Locale Saldatura in R5, servito da un'altra UTA Aircontrol, denominata "AIRCTA26", dotata di sezione di ricircolo, con portata d'immissione di  $2650 \text{ m}^3/\text{h}$  e potenza nuovamente non indicata [4].

Per le specifiche di funzionamento e di regolazione delle CDZ si rimanda al successivo modello degli impianti, esaminato in dettaglio nel Capitolo 2.

I terminali d'impianto per R1, R2 ed R3 sono dei semplici ventilconvettori a due tubi installati a parete, di quattro taglie diverse (a seconda della superficie dell'ambiente in cui si trovano). In R4 sono presenti delle unità locali di trattamento aria a quattro tubi, di cinque taglie diverse. Per quanto

concerne l'aria primaria, la quasi totalità della portata è configurata con ripresa d'aria a perdere tramite torrini di estrazione, eccezion fatta per la sezione di ricircolo collegata alla CDZ 6. In Tabella 1.5b si offrono i dati salienti dei terminali [21, 3], specificando che le sigle e i valori tra parentesi indicano le unità più vetuste prodotte da Seveso, originariamente installate e in corso di sostituzione con unità di marchio Aermec.

RFX, essendo dotato di impianti a tutta aria, è caratterizzato dalla sola presenza di griglie d'immissione (per quanto riguarda la sala esperimento in R5), griglie di ripresa (R5 e sala alimentazioni R6), bocchette (SCL e altri locali in R5) e diffusori alettati ad effetto elicoidale (sale alimentazioni in R6).

**Tabella 1.5:** Dati di targa di macchine e terminali per il trattamento dell'aria.

- (a) Specifiche tecniche delle Centrali Di Zona; con le diciture  $P_+$ ,  $P_-$  e  $P_{+p}$  si intendono rispettivamente le potenze delle batterie di preriscaldamento, di raffreddamento/deumidificazione e di postriscaldamento.

Locali	Volume [m <sup>3</sup> ]	CDZ	Marca	Portata [m <sup>3</sup> /h]	$P_+$	$P_-$	$P_{+p}$
R1, R2, R3	6400	1	Thermac	5400	48	46	37
R1, R2, R3	4300	6	Thermac	3200	24	23	19
R4	4800	2	Thermac	5650	48	46	37
R5	15 800	3	FAST	49 000	105	204	100
R6 Toroidale	4500	4T	FAST	15 000	32	57	30
R6 Poloidale	8900	4P	FAST	25 000	54	105	50
R6 SCL	1200	5	FAST	13 000	30	52	25

- (b) Specifiche tecniche dei ventilconvettori e delle unità locali di trattamento dell'aria; la portata d'aria è elaborata con il ventilatore regolato su velocità media; per la potenza termica e frigorifera ci si riferisce a temperature dell'acqua in ingresso pari nell'ordine a 50 e 7°C, con  $\Delta T$  rispettivamente di 10 e 5°C.

Locali	Tipo	Portata [m <sup>3</sup> /h]	$P_t$ [kW]	$P_f$
R1, R2, R3	A (TX1)	350 (–)	1,5 (–)	1,1 (–)
	B (TX2)	450 (290)	2,4 (2,3)	1,5 (0,9)
	C (TX3)	720 (410)	3,3 (3,3)	2,6 (1,4)
	D (TX4)	980 (574)	6,8 (6,7)	3,3 (1,6)
R4	8DC12	1820	22,0	10,4
	8DC16	2430	29,3	14,4
	8DC18	2580	33,0	16,2
	PR60	2000	–	6,5
	UCD9B	1400	17,5	7,2
	UCD15P	800	9,2	3,4



(a) CDZ 1.



(b) CDZ 2.



(c) CDZ 6.



(d) CDZ 3 e 4P.



(e) CDZ 5 e 4T.



(f) AIRCTA 26.

**Figura 1.12:** Principali centrali per il trattamento dell'aria.



(a) Fan coil a due tubi Seveso.



(b) Fan coil a due tubi Aermec.



(c) Fan coil a quattro tubi Seveso.



(d) Fan coil a quattro tubi Aermec.



(e) Griglie della sala esperimento.



(f) Diffusore delle sale alimentazioni.

**Figura 1.13:** Terminali idronici dell'aggregato Uffici (a-b-c-d) e terminali aeraulici di RFX (e-f).

# Capitolo 2

## Audit energetico

In questo capitolo viene presentata la fase di raccolta dati e informazioni necessarie allo studio dei consumi energia: in primo luogo se ne ricostruisce lo storico, esaminando le bollette di Area relative alle forniture di energia elettrica e di gas metano. Successivamente si procede con la rilevazione periodica dei reali consumi delle singole macrounità termiche e frigorifere di Area, tramite l'impiego di contabilizzatori di energia di recente installazione all'interno dei locali delle Centrali Tecnologiche.

Il confronto delle due famiglie di dati e l'imposizione delle effettive quote di ripartizione dei consumi permettono di ricavare un profilo di fabbisogno energetico indipendente per il solo Consorzio RFX, da impiegare sia nel calcolo delle prestazioni energetiche preliminari, sia come riferimento nella taratura del modello di simulazione numerica del sistema edificio-impianto.

### 2.1 Protocollo IPMVP

L'approccio di analisi impiegato nella realizzazione di questa tesi si fonda sui principi dell'*International Performance Measurement and Verification Protocol* (IPMVP) [58], ovvero il Protocollo Internazionale di Misura e Verifica dei Risultati: si tratta uno strumento rigoroso che raccoglie le

migliori pratiche di riferimento in ambito di efficienza e riqualificazione energetica, su cui attualmente si basano la Normativa Internazionale, la Normativa Europea e, di conseguenza, quella Italiana: si vedano a riguardo le norme *UNI EN 15900* e la successiva *UNI CEI EN ISO 50001* [46].

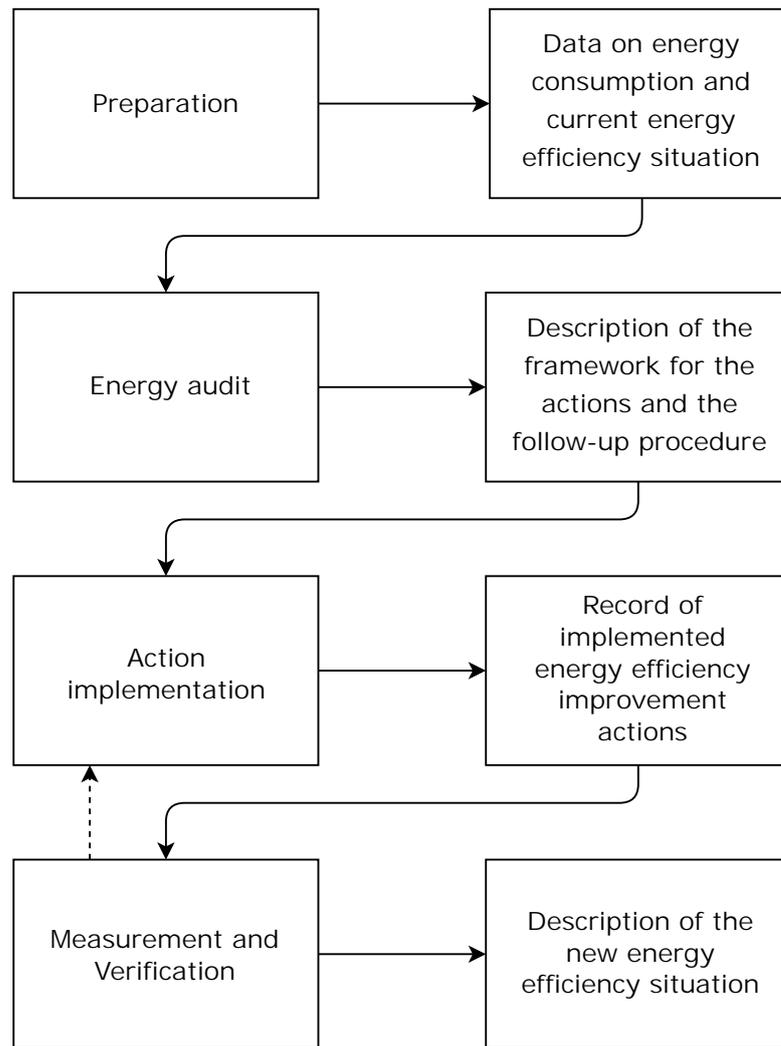
Il Protocollo ha origine nel 1994 presso lo *United States Department of Energy* (U.S. DoE) [87] e diventa la norma di riferimento in suolo americano dal 1996; successivi sviluppi portano l'IPMVP ad attingere alle norme dell'*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE, *Guidelines 14-2002*) [28], in ambito di misura e risparmio energetico, la cui validità tecnica è riconosciuta a livello internazionale.

Ad oggi tutto ciò che concerne l'IPMVP viene gestito dall'organizzazione non profit *Efficiency Valuation Organization* (EVO) [77], il cui partner sul suolo nazionale è la Federazione Italiana per l'uso Razionale dell'Energia (FIRE) [79], associazione tecnico-scientifica indipendente e senza scopo di lucro situata a Roma.

### 2.1.1 Dettaglio della procedura

Si esplicita sinteticamente la struttura del Protocollo, servendosi delle linee guida e della documentazione reperite presso FIRE [18, 26, 27].

La procedura generale di "*Energy Efficiency Service*" è composta da una precisa successione di fasi, descritta nel seguito secondo l'attuale denominazione formale e illustrata graficamente nello schema a blocchi di Figura 2.1, riproduzione dello schema equivalente contenuto nella norma tecnica *UNI CEI EN 15900* [44, p. 4], a sua volta derivata dalla Direttiva 2006/32/CE del Parlamento Europeo (integrata e sostituita dalla più recente Direttiva 2012/27/EU).



**Figura 2.1:** Schema a blocchi della procedura sequenziale dell'IPMVP.

1. *Preparation*: preparazione preliminare del lavoro;
2. *Data on energy consumption and current energy efficiency situation*: raccolta dei dati sui consumi e sull'attuale livello di efficienza energetica;
3. *Energy audit*: fase operativa di diagnosi energetica;
4. *Description of the framework for the actions and the follow-up procedure*: descrizione degli interventi e delle successive procedure di verifica energetica;

5. *Action implementation*: realizzazione degli interventi di riqualificazione energetica;
6. *Record of implemented energy efficiency improvement actions*: registrazione degli interventi di efficienza energetica;
7. *Measurement and Verification*: misura e verifica dei consumi e del risparmio energetico;
8. *Description of the new energy efficiency situation*: descrizione del nuovo livello di efficienza energetica.

Il processo di Measurement and Verification (M&V) è il caposaldo del protocollo IPMVP, poiché solo tramite una corretta misurazione del nuovo livello di efficienza energetica si possono quantificare i risparmi e i benefici della riqualificazione: ciò è di fondamentale importanza per rendere rigorosa la progettazione dell'intervento, oltre che per giustificarne l'investimento finanziario e valutarne l'effettiva redditività nel tempo.

Una misura di una grandezza è di tipo indiretto quando si può solamente ricavare a partire da misure di grandezze ad essa relative; è il caso del risparmio energetico [58, p. 17]:

$$En. Savings = Baseyear En. Use - Post Retrofit En. Use \pm Adj$$

dove il *Baseyear Energy Use* indica il livello di consumo della situazione attuale e il *Post-Retrofit Energy Use* si riferisce al livello successivo alla realizzazione degli interventi di efficientamento. *Adj* indica gli aggiustamenti necessari per rendere coerenti le due misure di consumo tra il periodo di riferimento e quello di valutazione attuale, includendo eventuali variazioni delle condizioni al contorno (tra le quali, ad esempio, il cambiamento del

tempo atmosferico, del livello di occupazione degli edifici e delle dotazioni impiantistiche presenti al loro interno).

Il M&V è proposto nel Protocollo secondo due metodologie principali [2]:

- “Metodo dell’isolamento delle Azioni di Miglioramento dell’Efficienza Energetica (AMEE)”, in cui si misura l’impatto del solo intervento di efficientamento, tipicamente con un sistema di misurazione dedicato;
- “Metodo dell’intero Impianto/Struttura”, per il quale invece la misurazione deve interessare l’intero complesso soggetto all’intervento di riqualificazione.

La procedura impiegata nella realizzazione del presente lavoro appartiene al secondo tipo di metodologia ed è elencata nel Protocollo IPMVP come “*Option D: Calibrated Simulation*”, ovvero simulazione calibrata del sistema edificio-impianto tramite implementazione di un modello di calcolo del sistema stesso [58, p. 22]. Ulteriori dettagli sull’impiego pratico dell’opzione D sono offerti nel Capitolo 3, interamente dedicato alla fase di modellazione del sistema edificio-impianto di IGI-RFX.

## 2.2 Analisi dei consumi attuali di energia

La contabilizzazione in regime fiscale dell’energia è presente nella fornitura di gas metano ed energia elettrica solo a livello dell’intera Area di Ricerca; per i consumi elettrici del Consorzio RFX, come accennato nel Capitolo 1, è disponibile una contabilizzazione interna afferente alla cabina MT dedicata all’edificio IGI-RFX.

Si propone un esame delle bollette della fornitura di gas metano di Area, non ritenendo tuttavia ammissibile la ripartizione dei consumi alle singole utenze tramite criteri predeterminati. I lavori di analisi energetica sviluppati in passato (non supportati dalla contabilizzazione) prevedevano la

ripartizione dei consumi su base volumetrica, ovvero gli edifici con il maggior volume lordo riscaldato sono quelli che proporzionalmente necessitano di più energia per garantire il regime di climatizzazione richiesto: tale modalità di ripartizione introduce semplificazioni<sup>1</sup> non trascurabili per quanto riguarda IGI-RFX, data la sua caratterizzazione sensibilmente più complessa rispetto agli altri Istituti. Al suo interno sono infatti presenti locali di notevole altezza, sistemi di climatizzazione di diverse tipologie e, in particolare, un complicato regime di carichi interni legato alla natura della sperimentazione: tutte queste caratteristiche risultano peculiari se confrontate con gli altri edifici presenti nell'Area.

Per quanto riguarda la fornitura elettrica, le scelte e le procedure sono analoghe, con la sola differenza che in questo caso si procede con lo studio supplementare delle letture in cabina MT di IGI-RFX: la natura non fiscale non è un parametro vincolante in questo tipo di analisi, pertanto si ritengono le rilevazioni ugualmente affidabili.

### 2.2.1 Esame delle bollette

L'esame delle bollette coinvolge gli anni 2012, 2013, 2014 e 2015: non si tratta di un campione inferente per costruire un profilo medio statisticamente accettabile, tuttavia ai fini di questa tipologia di studio può essere considerato ampiamente rilevante.

L'effettiva disponibilità di dati di consumo su base pluriennale consente di effettuare un'analisi più dettagliata dei consumi, perlomeno rispetto ad un approccio tramite *Test Reference Year* (TRY, ovvero Anno Meteorologico Tipo), così come suggerito dalla letteratura di riferimento [14, 59]: il TRY è, infatti, un anno medio generato da algoritmi statistici su campioni di

---

<sup>1</sup>La differenza tra consumi reali e consumi generati secondo criteri di ripartizione predeterminati si è resa esplicita solo in seguito ai primi esami dei dati dei contabilizzatori di energia (2013).

**Tabella 2.1:** Consumo di energia termica ed elettrica nelle bollette di Area.

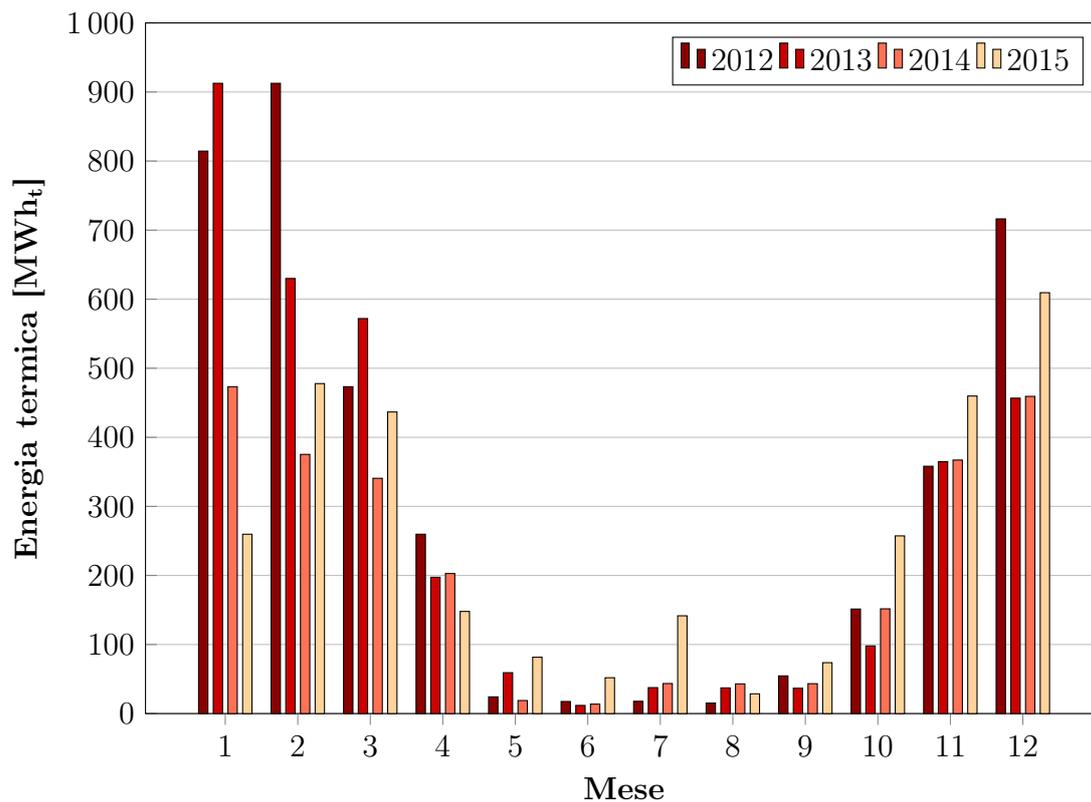
Mese	Consumo Termico				Consumo Elettrico			
	2012	2013	2014	2015	2012	2013	2014	2015
	[MWh <sub>t</sub> ]				[MWh]			
Gen	814,4	769,1	458,1	525,3	471,7	450,0	400,4	358,2
Feb	912,6	630,0	375,3	477,8	503,6	402,9	379,3	401,7
Mar	473,3	572,0	340,7	436,7	478,3	464,5	432,0	461,0
Apr	259,7	197,4	202,8	147,9	416,1	428,0	420,4	387,2
Mag	24,2	59,2	18,9	81,6	496,0	457,6	446,9	452,3
Giu	17,5	11,8	13,7	51,9	599,1	494,8	465,6	511,1
Lug	17,8	37,6	43,5	141,6	693,8	569,4	550,4	630,2
Ago	15,2	37,2	43,0	28,6	591,0	391,7	403,7	433,4
Set	54,6	36,7	43,3	73,7	535,0	459,4	494,7	503,0
Ott	151,4	98,0	151,7	257,3	506,7	430,0	386,4	398,6
Nov	358,1	364,7	367,1	459,8	424,4	434,8	390,3	350,4
Dic	716,3	456,7	459,3	609,4	455,0	420,1	403,0	491,9
Tot	3815,1	3270,3	2517,5	3291,6	6170,7	5403,2	5173,1	5379,0

dati meteorologici eterogenei, distribuiti su un orizzonte temporale di alcune decine di anni, provenienti da stazioni di proprietà di vari enti<sup>2</sup>, sia pubblici che privati, con strumentazioni e metodologie differenti (spesso non conformi all'attuale normativa internazionale [53]).

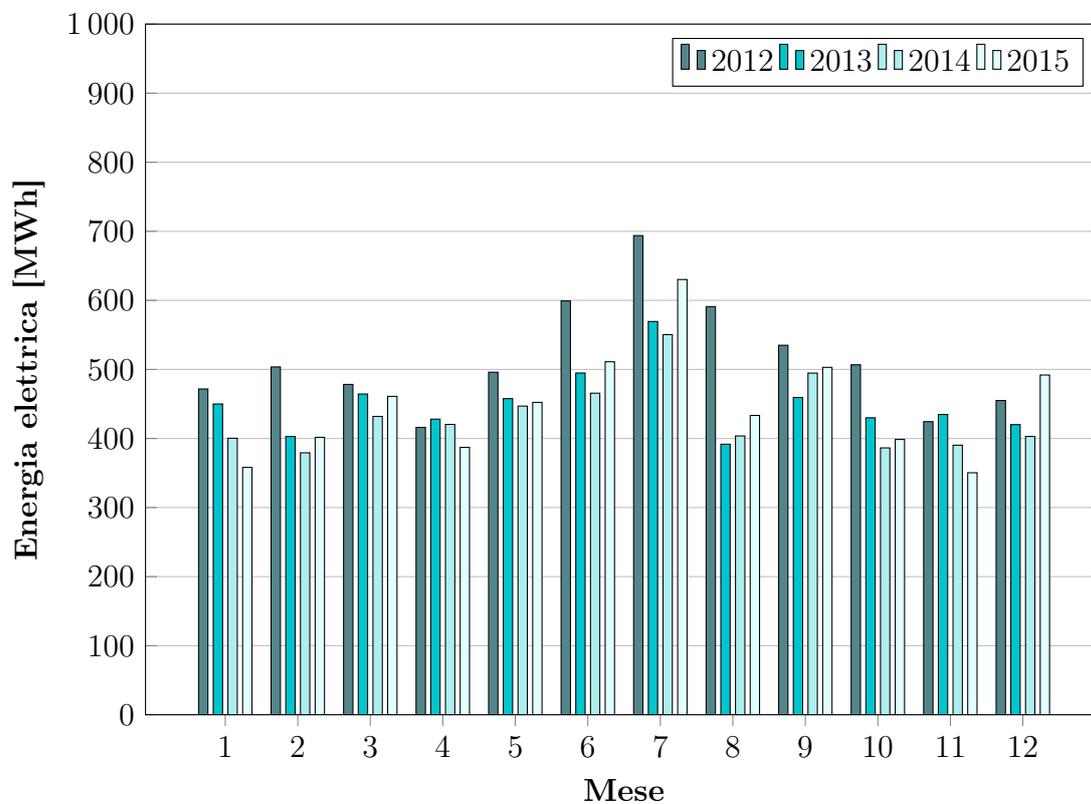
La Tabella 2.1 e i relativi grafici di Figura 2.2 riportano il consumo di metano<sup>3</sup> e di energia elettrica contabilizzati dai fornitori a livello fiscale per l'Area. Si possono notare dei picchi temporali di richiesta, in modo particolare per il metano, dovuti essenzialmente alla presenza saltuaria di attività particolarmente energivore: è il caso, per esempio, del tunnel climatizzato per la verifica dell'isolamento termico dei veicoli frigoriferi, parte dell'Istituto ITC Prove Frigo citato in precedenza.

<sup>2</sup>Spesso la distribuzione geografica dei dati non è nemmeno sufficientemente fitta da poter registrare efficacemente le condizioni ambientali del luogo interessato.

<sup>3</sup>L'energia termica viene riportata in [MWh<sub>t</sub>], secondo la procedura proposta nel Paragrafo 2.3.



(a) Consumo termico di Area.



(b) Consumo elettrico di Area.

Figura 2.2: Consumo di energia di Area su base mensile nelle bollette energetiche.

## 2.3 Monitoring

Con “*Energy Management System*” (EMS) si intende un sistema di gestione dell’energia tipicamente costituito da un calcolatore e da una varietà di strumenti di misurazione ad esso interfacciati, allo scopo di monitorare l’evoluzione temporale dei consumi di energia.

L’apparato tecnico impiegato per il *monitoring* (monitoraggio) dei consumi è costituito da dispositivi certificati *UNI EN 1434* di marchio Coster, installati nel 2013 in seguito a un progetto di ottimizzazione della ripartizione dei costi e di incremento dell’efficienza energetica generale all’interno dell’Area della Ricerca [24].

I sensori si trovano nel piano interrato dell’edificio Centrali Tecnologiche, in corrispondenza degli allacciamenti idrici delle reti di teleriscaldamento e raffrescamento (Figura 2.4): le centraline sono tre (Figura 2.3), una per IGI-RFX (F1), una per gli altri Istituti (F2) e una per i Servizi Generali (F3), ognuna di esse fornita di contatore di consumi<sup>4</sup> [MWh] e di misuratore volumetrico della portata [m<sup>3</sup>], sia per l’acqua calda che per l’acqua refrigerata.

Il sistema è provvisto di lettura locale dei parametri su terminale con schermo integrato e di apparato di telegestione incorporato con connessione C-Bus (controllo locale e/o *wireless* tramite personal computer con interfaccia software dedicata).

La descrizione riassuntiva delle specifiche tecniche dei contabilizzatori di energia, reperita presso il produttore, può essere consultata in Appendice A; per esaminare ulteriori dettagli si faccia riferimento alla documentazione tecnica estesa [13].

---

<sup>4</sup>Il consumo di energia viene calcolato a partire dalla rilevazione della temperatura del fluido vettore, tramite il posizionamento strategico di sonde termometriche (una per la mandata e una per il ritorno per ogni condotta).

**Tabella 2.2:** Fac-simile di scheda di lettura dei contabilizzatori.

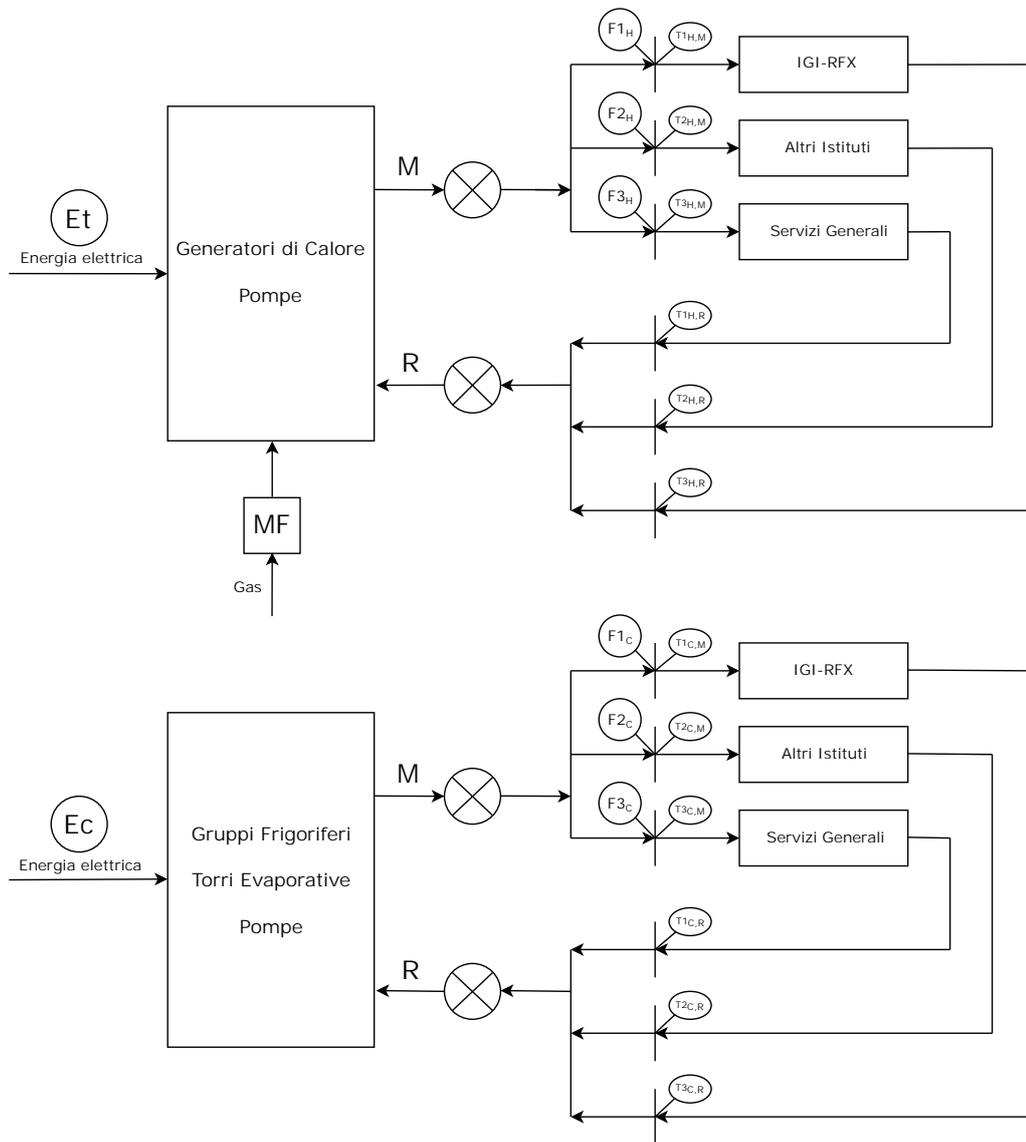
<b>Data</b>	<b>F1</b>		<b>F2</b>		<b>F3</b>	
../../..	[MWh]	[m <sup>3</sup> ]	[MWh]	[m <sup>3</sup> ]	[MWh]	[m <sup>3</sup> ]
Calda						
Refrigerata						
<b>Ec</b>						
[MWh]						
En. Elettrica						

### 2.3.1 Raccolta ed elaborazione dei dati

La raccolta dati viene effettuata principalmente con l'accesso diretto al terminale presso le Centrali Tecnologiche: i dati vengono tabulati (si veda Tabella 2.2), suddividendo consumi energetici e volumi di acqua calda e refrigerata per le singole utenze; tra le letture si inserisce anche il consumo di energia elettrica registrato presso il contabilizzatore dedicato alla Centrale Frigorifera di Area (Ec, Figura 1.8), in modo da poter opportunamente correlare l'energia spesa per alimentare i gruppi frigoriferi e quella registrata dal contabilizzatore dell'acqua refrigerata.

Occasionalmente si raccolgono dati per un'intera giornata lavorativa, tramite lettura ad intervalli di trenta minuti, per monitorare l'andamento giornaliero dei consumi.

L'elaborazione dati viene eseguita tramite foglio di calcolo, sia per l'acqua calda che per quella refrigerata (Tabelle 2.3a - 2.3b): lo scopo è ricavare un profilo medio di consumo per IGI-RFX al fine di misurare l'energia effettivamente spesa per il solo riscaldamento e il solo raffrescamento.



**Figura 2.3:** Schema generale dei contabilizzatori di energia termica e frigorifera. M e R indicano rispettivamente i collettori di mandata e di ritorno da cui si diramano i tre circuiti delle macrouutenze principali.

**Tabella 2.3:** Elaborazione dati delle letture F1 (IGI-RFX). Come indicato in Tabella, la prima successione di letture si riferisce al biennio 2013/14, la seconda al 2016/17; con C/G si indica il consumo medio giornaliero ottenuto dal rapporto tra il consumo [MWh] e i giorni che intercorrono tra la lettura e quella successiva.

(a) Elaborazione dati delle letture: acqua calda.

Riferimento	Letture [MWh <sub>t</sub> ]	Data	Consumo [MWh <sub>t</sub> ]	Giorni	C/G [MWh <sub>t</sub> /g]
GIU 2013	688,8	09-giu	35,1	21	1,7
LUG	723,9	01-lug	38,6	27	1,4
AGO/SET/OTT	762,5	28-lug	174,7	98	1,8
NOV	937,2	03-nov	107,1	27	4,0
DIC/GEN	1044,3	01-dic	336,5	63	5,3
FEB 2014	1380,8	03-feb	186,4	34	5,5
	1567,2	11-mar			
GIU/LUG 2016	3121,5	30-mag	105,9	51	2,1
AGO/SET	3227,4	21-lug	68,6	72	1,0
OTT	3296,0	03-ott	162,0	30	5,4
NOV/DIC	3458,0	04-nov	491,0	68	7,2
GEN 2017	3949,0	12-gen	86,7	11	7,9
	4035,7	24-gen			

(b) Elaborazione dati delle letture: acqua refrigerata.

Riferimento	Letture [MWh <sub>f</sub> ]	Data	Consumo [MWh <sub>f</sub> ]	Giorni	C/G [MWh <sub>f</sub> /g]
GIU 2013	688,0	09-giu	165,7	21	7,9
LUG	853,7	01-lug	192,6	27	7,1
AGO/SET/OTT	1046,3	28-lug	459,1	98	4,7
NOV	1505,4	03-nov	86,3	27	3,2
DIC/GEN	1591,7	01-dic	133,9	63	2,1
FEB 2014	1725,6	03-feb	110,0	34	3,2
	1835,6	11-mar			
GIU/LUG 2016	3669,2	30-mag	317,1	51	6,2
AGO/SET	3986,3	21-lug	371,7	73	5,1
OTT	4358,0	03-ott	175,0	33	5,3
NOV/DIC	4533,0	04-nov	204,0	68	3,0
GEN 2017	4737,0	12-gen	28,9	11	2,6
	4765,9	24-gen			



Figura 2.4: Esempio di posizionamento dei sensori dei contabilizzatori.

### 2.3.2 Criteri di ripartizione dei consumi

L'approccio all'analisi varia secondo la tipologia di fluido termovettore:

- **Acqua Calda:** l'energia termica [kWh<sub>t</sub>] potenzialmente ottenibile dalla combustione del metano è definita dalla Relazione (2.1):

$$E'_t = V_0 \cdot \Delta_c H_i^0 \quad (2.1)$$

dove  $V_0$  [Sm<sup>3</sup>] è il volume del combustibile<sup>5</sup> e  $\Delta_c H_i^0$  è il suo potere calorifico inferiore misurato in [kWh/Sm<sup>3</sup>] (grandezza reperibile presso il fornitore del gas e in questo caso pari a 9,54 kWh/Sm<sup>3</sup>); l'energia termica alla mandata del teleriscaldamento, presso i sensori dei contabilizzatori, è con buona approssimazione pari all'energia termica del combustibile per il rendimento termico dei generatori di calore:

$$E_t = E'_t \cdot \eta_t \quad (2.2)$$

<sup>5</sup>Il metro cubo standard [Sm<sup>3</sup>], indicato anche con [Smc], misura la quantità di gas contenuta in 1 m<sup>3</sup> alla temperatura di 288,15 K (15 °C) e alla pressione assoluta di 1,013 25 bar.

avendo l'accortezza di definire il rendimento termico nelle particolari circostanze. Essendo i generatori di taglia diversa (Tabella 1.1) e avendo funzionamento tipicamente parzializzato durante il corso dell'anno, si sceglie di definire il rendimento termico per la seguente trattazione come la media dei singoli rendimenti termici a carichi parziali, pesata per la taglia dei singoli generatori, così come si evince sinteticamente in Tabella 2.4a.

Per correlare l'energia termica equivalente al gas consumato dai generatori di calore con l'energia termica necessaria al riscaldamento dell'acqua del teleriscaldamento è sufficiente esaminare il profilo di consumo rilevato dai contabilizzatori; si tenga presente che, durante la stagione estiva, l'energia termica viene esclusivamente dedicata al postriscaldamento delle CTA di IGI-RFX<sup>6</sup>, mentre durante il resto dell'anno IGI-RFX è responsabile di una percentuale variabile rispetto al consumo totale di Area (si vedano le quote rilevate in Tabella 2.4b).

Non essendo le quote riferite a periodi strettamente coincidenti con l'inizio e la fine dei mesi dell'anno, risulta necessario normalizzare i profili su base mensile, introducendo una procedura ricorsiva: dalle letture si ricava il profilo medio di consumo di IGI-RFX (moltiplicando il C/G relativo al mese per i giorni del mese stesso, mediando nel caso di presenza di letture multiple), lo si divide per il profilo medio mensile di consumo totale dell'Area contabilizzato in bolletta<sup>7</sup>, ricavando i  $[MWh_t/MWh_{t,tot}]$ ; si impone tale grandezza pari all'unità per i mesi estivi (per quanto detto in precedenza) e pari alle quote rilevate in Tabella 2.4b per i mesi presenti nelle letture; si ricalcolano infine i

---

<sup>6</sup>Tipicamente gli Istituti e gli edifici, IGI-RFX escluso, sono serviti dal riscaldamento da ottobre ad aprile: ai fini di questa trattazione (e con ottimo riscontro ai contabilizzatori), durante la stagione estiva, il consumo di energia termica di IGI-RFX sarà dunque pari al totale del consumo di energia termica dell'intera Area di Ricerca.

<sup>7</sup>Il profilo medio si riferisce alla media aritmetica mensile dei consumi presenti in bolletta e consultabili in Tabella 2.1.

**Tabella 2.4:** Ripartizione effettiva del carico termico.

(a) Ripartizione del carico termico ai generatori di calore e calcolo del rendimento medio ponderato al 30% del carico.

Generatore	$P_t$ [MWh <sub>t</sub> ]	$P_t/P_{t,tot}$	$\eta_{30\%}$
REX 62	620	0,08	0,907
3000.1 TL	3000	0,40	0,902
BGN 390 LX	3950	0,52	0,956

$$\eta_{30\%,p} = 0,931$$

(b) Quote di energia termica di IGI-RFX rilevate presso i contabilizzatori rispetto agli altri Istituti e ai Servizi Generali di Area.

Riferimento	Consumo		Quota
	IGI-RFX [MWh <sub>t</sub> ]	Altri	IGI-RFX [MWh <sub>t</sub> /MWh <sub>t,tot</sub> ]
GIU 2013	35,1	0,0	1,00
LUG	38,6	0,0	1,00
AGO/SET/OTT	174,7	71,5	0,71
NOV	107,1	110,3	0,49
DIC/GEN	336,5	395,8	0,46
FEB 2014	186,4	282,7	0,40
GIU/LUG 2016	105,9	0,0	1,00
AGO/SET	68,6	24,7	0,74
OTT	162,0	89,0	0,65
NOV/DIC	491,0	448,0	0,52
GEN 2017	86,7	161,3	0,35

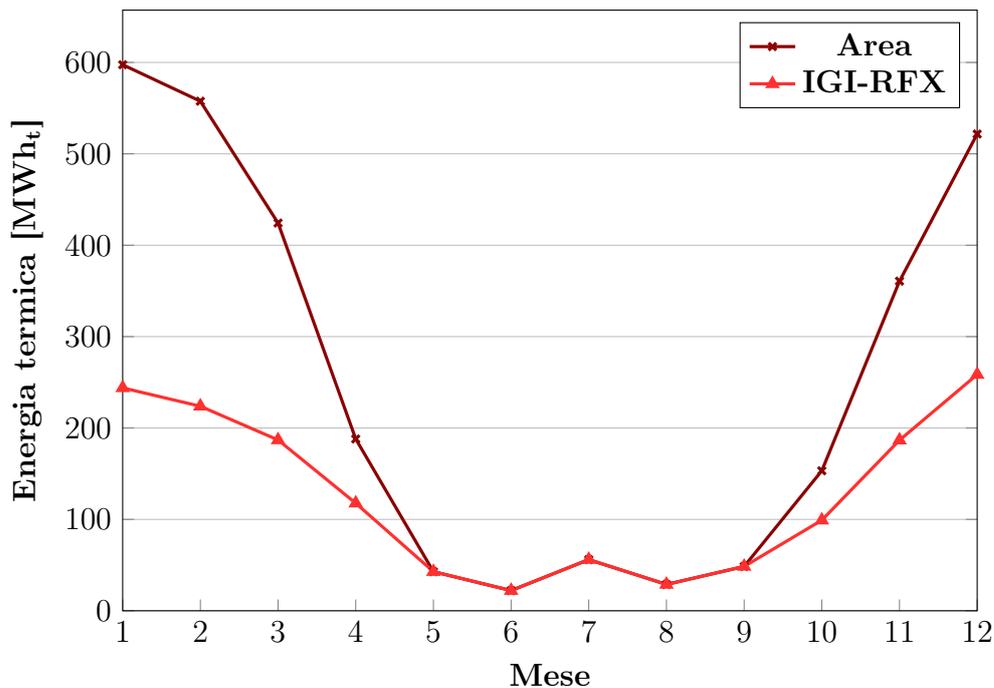
coefficienti C/G per ricostruire il profilo medio di consumo di IGI-RFX (in Tabella 2.5 è presente il risultato finale della procedura con il relativo grafico).

**Tabella 2.5:** Quote mensili di energia termica di IGI-RFX rilevate presso i contabilizzatori rispetto al consumo termico totale ricavato dalle bollette di Area. Si può osservare che, secondo questa procedura, su base annuale IGI-RFX è responsabile del 50% dei consumi di energia termica di Area.

(a) Quote mensili tabulate di consumo termico di IGI-RFX rispetto al consumo termico totale di Area ( $Q_{\text{IGI-RFX}}$ ).

Mese	C/G [MWh <sub>t</sub> /g]	IGI-RFX [MWh <sub>t</sub> ]	$Q_{\text{IGI-RFX}}$ [MWh <sub>t</sub> /MWh <sub>t,tot</sub> ]	Area [MWh <sub>t,tot</sub> ]
Gen	7,9	243,9	0,41	597,5
Feb	7,9	223,8	0,40	557,6
Mar	6,0	186,9	0,44	424,3
Apr	3,9	117,7	0,63	188,0
Mag	1,4	42,8	1,00	42,8
Giu	0,7	22,1	1,00	22,1
Lug	1,8	56,0	1,00	56,0
Ago	0,9	28,8	1,00	28,8
Set	1,6	48,5	1,00	48,5
Ott	3,2	99,1	0,65	153,2
Nov	6,2	186,7	0,52	360,7
Dic	8,3	258,5	0,50	521,7
Tot		1514,8	0,50	3001,2

(b) Andamento mensile dei consumi termici di IGI-RFX rispetto al consumo termico totale di Area.



- **Acqua Refrigerata:** non essendo presente una contabilizzazione in bolletta dell'energia elettrica dedicata agli impianti frigoriferi, la correlazione tra quest'ultima e l'energia elettrica totale necessita di un passaggio intermedio. Nemmeno in questo caso ci si può affidare a un criterio di proporzionalità predeterminato tra i consumi elettrici e quelli frigoriferi (in linea con quanto discusso nel Paragrafo 2.2).

Le letture dei contabilizzatori offrono un profilo sommario di carico analogo alla precedente trattazione riguardante l'acqua calda: è dunque possibile confrontare i consumi frigoriferi rilevati per IGI-RFX con quelli totali di Area; in seguito è sufficiente servirsi della Relazione (2.3) tra energia elettrica spesa ( $E_e$ ) ed energia frigorifera ottenuta all'interno del sistema gruppo frigorifero ( $E_f$ ), ricordando la definizione di EER introdotta nel Capitolo 1:

$$EER = \frac{Q}{L} = \frac{E_f}{E_e} \quad (2.3)$$

Le macchine frigorifere sono due, hanno taglia ed EER diversi e durante il corso dell'anno risultano entrambe operative e a pieno carico, entrambe operative a carico parziale, oppure alternate secondo necessità (a giudizio degli operatori addetti alle Centrali di Area): in linea con il lavoro precedente a questa tesi [35, p. 49], riguardante gli Istituti e i Servizi Generali di Area, si sceglie di ripartire l'energia elaborata dai gruppi frigoriferi in modo proporzionale alla loro potenza frigorifera di targa (si veda la Tabella 1.3a). L'EER risultante dal sistema equivalente è pertanto la media degli EER delle singole macchine, pesata per la quota di carico elaborata dalle stesse, come risulta dalla Tabella 2.6a.

Dividendo i consumi di energia frigorifera rilevati dai contabilizzatori per l'EER<sub>p</sub>, si ottiene un profilo mensile di consumo di energia elettrica

**Tabella 2.6:** Ripartizione effettiva del carico frigorifero.**(a)** Ripartizione del carico frigorifero e calcolo dell'EER medio ponderato.

<b>Gruppo</b>	<b><math>P_f</math></b> <b>[MWh<sub>f</sub>]</b>	<b><math>P_f/P_{f,tot}</math></b>	<b>EER</b>
WHS 210.2 ST	735	0,31	4,44
WHS 464.4 ST	1629	0,69	4,60

$$\mathbf{EER}_p = 4,55$$

**(b)** Quote di energia frigorifera di IGI-RFX rilevate presso i contabilizzatori rispetto agli altri Istituti e ai Servizi Generali di Area.

<b>Riferimento</b>	<b>Consumo</b>		<b>Quota</b>
	<b>IGI-RFX</b>	<b>Altri</b>	<b>IGI-RFX</b>
	<b>[MWh<sub>f</sub>]</b>		<b>[MWh<sub>f</sub>/MWh<sub>f,tot</sub>]</b>
GIU 2013	165,7	12,6	0,93
LUG	192,6	152,2	0,56
AGO/SET/OTT	459,1	95,1	0,83
NOV	86,3	0,0	1,00
DIC/GEN	133,9	0,0	1,00
FEB 2014	110,0	0,0	1,00
GIU/LUG 2016	317,1	169,5	0,65
AGO/SET	371,7	245,2	0,60
OTT	175,0	0,0	1,00
NOV/DIC	204,0	0,0	1,00
GEN 2017	28,9	0,0	1,00

impiegata a scopo di raffrescamento.

Dopo aver esaminato le letture tra IGI-RFX e resto dell'Area (Tabella 2.6b), è possibile ripetere la procedura utilizzata per il consumo di metano e l'energia termica contabilizzata, potendo lavorare sul medesimo livello energetico (pari a quello dell'energia elettrica). Si ottengono così le quote di energia elettrica impiegata da IGI-RFX ai fini del raffrescamento rispetto a quella totale contabilizzata presso l'Area.

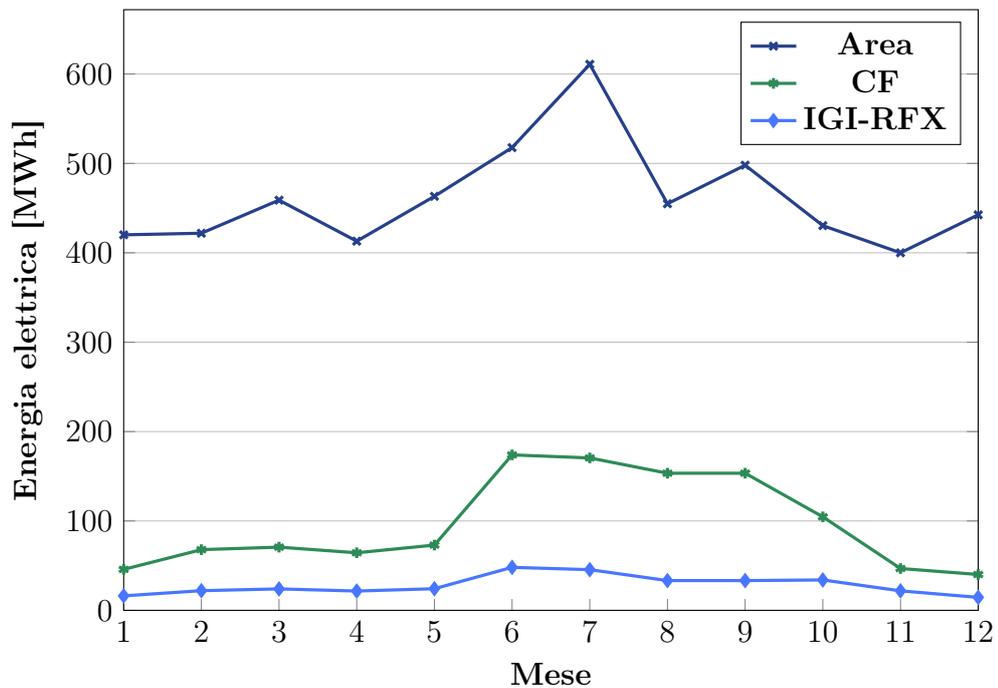
Potendo inoltre contare sui rilievi dei consumi elettrici della Centrale Frigorifera, si approfondisce l'analisi ricercando le quote mensili di

**Tabella 2.7:** Quote mensili di energia elettrica dedicata al raffreddamento di IGI-RFX rilevate presso i contabilizzatori rispetto al consumo elettrico totale ricavato dalle bollette di Area e alle rilevazioni in Centrale Frigorifera (CF). Secondo questa procedura, l'energia elettrica dedicata al raffreddamento di IGI-RFX è il 6% su base annua dell'energia elettrica consumata dall'Area, il 29% di quella consumata in CF.

(a) Quote mensili tabulate di consumo elettrico a scopo di raffreddamento di IGI-RFX rispetto al consumo elettrico totale di Area ( $Q_{\text{IGI-RFX}|_{\text{Area}}}$ ) e a quello rilevato in CF ( $Q_{\text{IGI-RFX}|_{\text{CF}}}$ ).

Mese	C/G [MWh/g]	IGI-RFX [MWh]	$Q_{\text{IGI-RFX} _{\text{Area}}}$ [MWh/MWh <sub>tot</sub> ]	$Q_{\text{IGI-RFX} _{\text{CF}}}$ [MWh/MWh <sub>tot</sub> ]	Area [MWh <sub>tot</sub> ]	CF [MWh <sub>tot</sub> ]
Gen	0,5	16,2	0,04	0,35	420,1	45,8
Feb	0,7	22,0	0,05	0,32	421,9	67,9
Mar	0,8	24,0	0,05	0,34	458,9	70,7
Apr	0,7	21,6	0,05	0,34	413,0	64,4
Mag	0,8	24,2	0,05	0,33	463,2	73,0
Giu	1,6	48,1	0,09	0,28	517,7	173,9
Lug	1,5	45,5	0,07	0,27	610,9	170,5
Ago	1,1	33,3	0,07	0,22	454,9	153,4
Set	1,1	33,3	0,07	0,22	498,0	153,4
Ott	1,1	34,0	0,08	0,33	430,4	104,6
Nov	0,7	21,8	0,05	0,47	400,0	46,8
Dic	0,5	14,5	0,03	0,36	442,5	40,1
Tot		338,4	0,06	0,29	5531,5	1164,3

(b) Andamento mensile dei consumi elettrici dedicati al raffreddamento di IGI-RFX rispetto al consumo elettrico totale di Area e a quello rilevato in CF.



energia elettrica impiegata per il raffrescamento di IGI-RFX rispetto al totale di energia elettrica contabilizzata in Centrale (punto di rilievo Ec). È però doveroso specificare che i rilievi presso Ec conteggiano, oltre all'energia elettrica dei gruppi frigoriferi, anche quella destinata alle pompe di circolazione, all'illuminazione del locale, ai quadri elettrici di servizio e ai ventilatori delle torri evaporative.

Il risultato finale della procedura è consultabile in Tabella 2.7 e nel relativo grafico.

## 2.4 Prestazioni energetiche

### 2.4.1 Baseyear Energy Data

In questa sezione vengono presentati i *Baseyear Energy Data*, ovvero i dati di consumo annuale attuali di IGI-RFX. Vengono impiegate le quote di consumo C/G precedentemente ricavate per elaborare i profili di consumo mensile a partire dalle bollette di Area: come risultato si ottengono due profili per ogni anno di contabilizzazione esaminato, di cui si allegano i dati numerici contenuti nelle Tabelle 2.8a - 2.8b e i grafici in Figura 2.5.

Nella stessa Tabella 2.8 si procede al calcolo dei due profili medi annuali (con relativa deviazione standard  $\sigma$ ), uno per l'energia termica e uno per quella frigorifera: come si può notare, l'andamento del consumo di energia termica appare piuttosto irregolare nel corso degli anni in osservazione, in modo particolare durante la stagione estiva (la deviazione standard  $\sigma$  sulla misura nel mese di luglio è pressoché pari alla misura stessa, a causa di un consumo anomalo registrato a luglio 2015); l'andamento del consumo di energia frigorifera, al contrario, risulta decisamente più uniforme, con una  $\sigma$  inferiore al 10% della misura nella maggior parte dei mesi dell'anno (e comunque sempre inferiore al 20%).

Per contestualizzare i dati in base alle condizioni meteorologiche si inserisce il parametro “Gradi Giorno” (GG), ovvero la somma annuale su base giornaliera delle differenze positive tra la temperatura media giornaliera  $T_{amb}$  e la temperatura convenzionale<sup>8</sup>  $T_0$ , in regime di riscaldamento (Gradi Giorno invernali), o di raffrescamento (Gradi Giorno estivi), come rispettivamente indicato in Relazione (2.4) e (2.5):

$$GG_i = \sum_{i=1}^n T_0 - T_{amb,i} \quad (2.4)$$

$$GG_e = \sum_{i=1}^n T_{amb,i} - T_0 \quad (2.5)$$

Risulta evidente dalla definizione che, in linea generale e a parità di altri fattori, tanto più grande è tale somma e tanto maggiore sarà il consumo di energia necessaria a garantire condizioni interne adeguate durante il periodo di riscaldamento; viceversa, per una somma estiva inferiore, il consumo di energia per il raffrescamento sarà altrettanto minore. Tale andamento può essere pienamente riscontrato nei dati presentati, eccezion fatta per l’anomalo consumo di energia termica durante l’anno 2012 (ricordando che il 2012 è l’unico anno in esame precedente agli interventi di riqualificazione citati ad inizio Capitolo).

Le rilevazioni della temperatura ambiente provengono dal Centro Meteo di Teolo (PD) dell’Agenzia Regionale per la Prevenzione e Protezione Ambientale del Veneto (ARPAV) [72]: le misure, su base oraria, sono relative alla stazione meteorologica di Legnaro, distante circa 7 km in linea d’aria in direzione sud-est rispetto all’Area della Ricerca di Padova.

---

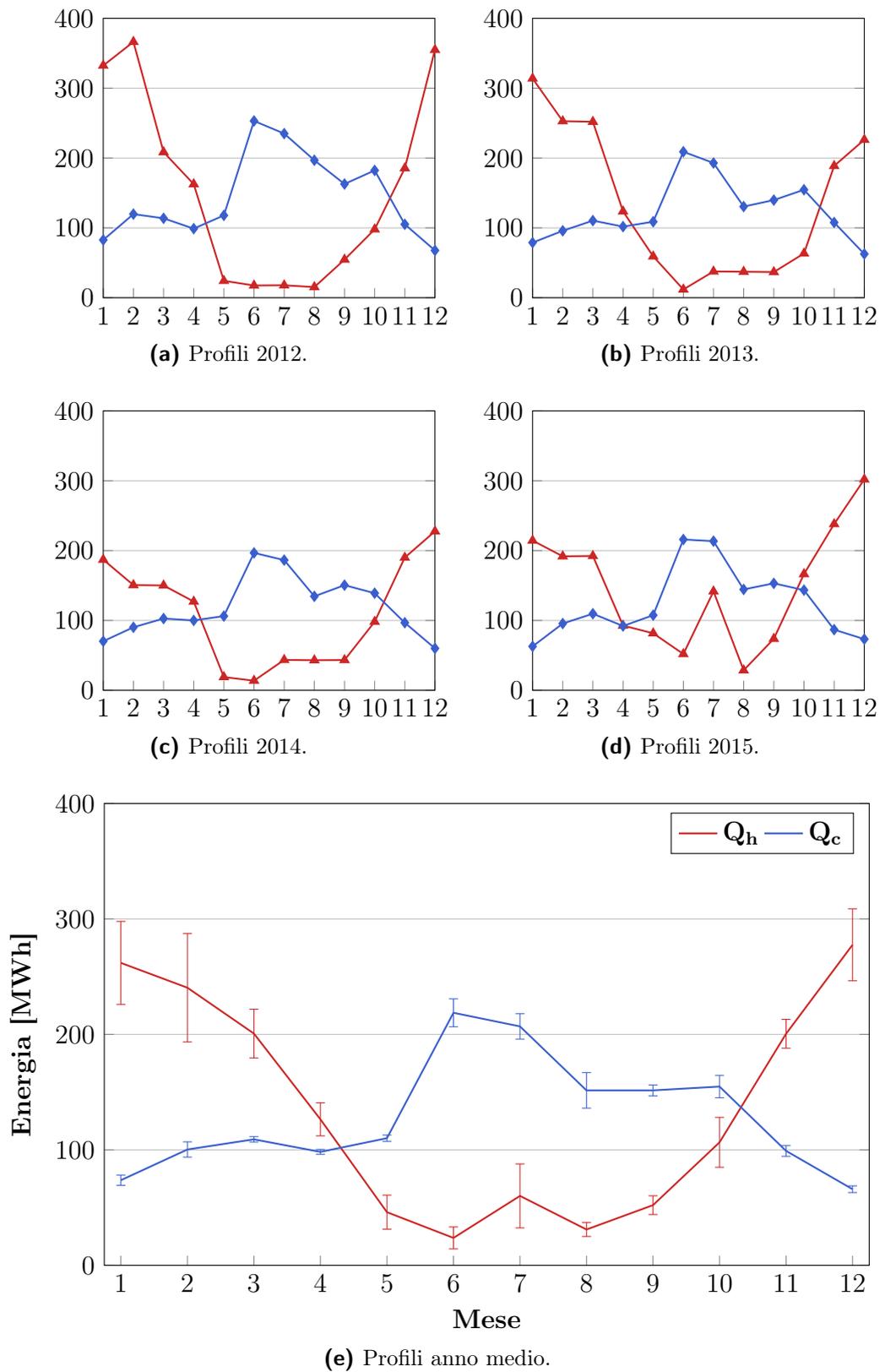
<sup>8</sup>In questa trattazione viene fissata pari a 20 °C: per il riscaldamento si opera in linea con le indicazioni contenute nella norma *UNI EN ISO 15927-6* [54], per il raffrescamento su assunzione in fase preliminare, in assenza di indicazioni normative specifiche.

**Tabella 2.8:** Profili di consumo di energia ottenuti secondo i criteri di ripartizione derivati dalle letture dei contabilizzatori.**(a)** Profili di consumo di energia termica di IGI-RFX.

Mese	2012	2013	2014	2015	Medio
[MWh <sub>t</sub> ]					
Gen	332,4	313,9	187,0	214,4	261,9
Feb	366,3	252,8	150,6	191,8	240,4
Mar	208,5	251,9	150,1	192,3	200,7
Apr	162,6	123,6	127,0	92,6	126,4
Mag	24,2	59,2	18,9	81,6	46,0
Giu	17,5	11,8	13,7	51,9	23,7
Lug	17,8	37,6	43,5	141,6	60,1
Ago	15,2	37,2	43,0	28,6	31,0
Set	54,6	36,7	43,3	73,7	52,1
Ott	97,9	63,4	98,1	166,4	106,5
Nov	185,4	188,7	190,0	238,0	200,5
Dic	354,9	226,2	227,6	301,9	277,6
GG <sub>i</sub>	2105,6	2412,4	1939,8	2443,1	2225,2
Tot	1837,2	1603,2	1292,8	1774,8	1627,0

**(b)** Profili di consumo di energia frigorifera di IGI-RFX.

Mese	2012	2013	2014	2015	Medio
[MWh <sub>f</sub> ]					
Gen	82,7	78,9	70,2	62,8	73,7
Feb	119,7	95,8	90,2	95,5	100,3
Mar	113,7	110,4	102,7	109,6	109,1
Apr	98,9	101,8	100,0	92,0	98,2
Mag	117,9	108,8	106,2	107,5	110,1
Giu	253,1	209,0	196,7	215,9	218,7
Lug	235,0	192,9	186,4	213,5	206,9
Ago	196,8	130,5	134,5	144,4	151,5
Set	162,8	139,8	150,5	153,1	151,5
Ott	182,3	154,6	139,0	143,4	154,8
Nov	105,1	107,7	96,7	86,8	99,1
Dic	67,7	62,6	60,0	73,2	65,9
GG <sub>e</sub>	471,5	351,5	224,2	445,7	373,2
Tot	1735,9	1492,8	1433,1	1497,7	1539,8



**Figura 2.5:** Profili mensili di consumo di energia termica e frigorifera di IGI-RFX calcolati per gli anni in esame e consumi mensili medi con relative barre d'incertezza.

**Tabella 2.9:** Consumo specifico annuale per il riscaldamento e il raffrescamento.

Indice	2012	2013	2014	2015	Media
	[kWh/m <sup>3</sup> ]				
CS <sub>i</sub>	39,6	34,6	27,9	38,3	35,1
CS <sub>e</sub>	37,4	32,2	30,9	32,3	33,2

### 2.4.2 Indici di prestazione energetica attuali

Per avere un riferimento riguardo le prestazioni energetiche attuali, si effettua una valutazione del consumo specifico di energia (CS) dedicata al riscaldamento e al raffrescamento di IGI-RFX: si introducono dunque i parametri di CS<sub>i</sub> e CS<sub>e</sub>, ovvero rispettivamente il consumo specifico di energia per la climatizzazione invernale ed estiva. Essi rappresentano la misura del fabbisogno annuale di energia per il riscaldamento e il raffrescamento Q [kWh], rapportata al volume netto climatizzato dei locali V [m<sup>3</sup>], come si evince dalla Relazione (2.6):

$$CS_{i(e)} = \frac{Q_{i(e)}}{V_i} \quad (2.6)$$

Contrariamente alle procedure standard di certificazione energetica attraverso indici di prestazione, in cui è necessario ricostruire il fabbisogno termico e frigorifero a partire dal calcolo delle dispersioni dell'involucro edilizio (come succede, per esempio, per gli edifici residenziali), in questa analisi si opera direttamente attraverso i profili annui di consumo registrati nel presente Paragrafo; si osservi che, dovendo confrontare gli indici attuali con quelli relativi agli interventi di riqualificazione per poterne misurare in modo immediato i possibili vantaggi, gli indici contenuti in Tabella 2.9 sono calcolati considerando gli effettivi andamenti annuali dei regimi di riscaldamento e raffrescamento dell'edificio IGI-RFX.

# Capitolo 3

## Energy analysis

Scopo del presente Capitolo è la descrizione della realizzazione del modello termoenetico di IGI-RFX, in linea con le prescrizioni dell'opzione D di M&V del protocollo IPMVP.

Per mezzo della simulazione dinamica del modello eseguita al calcolatore, è possibile il raggiungimento di due obiettivi fondamentali per le finalità di analisi energetica:

1. la determinazione delle prestazioni energetiche dettagliate attuali del sistema edificio-impianto di IGI-RFX;
2. il riscontro del risparmio energetico generabile dagli interventi di riqualificazione proposti.

Affinché la simulazione possa ritenersi adeguatamente calibrata, è necessario verificare la compatibilità dei risultati ottenuti dalla simulazione stessa con gli effettivi consumi registrati dal sistema di contabilizzazione dell'energia (Capitolo 2).

### 3.1 Presentazione del codice di calcolo

L'opzione D presente nel protocollo IPMVP riporta la presente descrizione sintetica [58, p. 21]:

*«Savings are determined through simulation of the energy use of components or the whole facility. Simulation routines must be demonstrated to adequately model actual energy performance measured in the facility. This option usually requires considerable skill in calibrated simulation.»*

Si evince che la procedura di valutazione del risparmio energetico deve passare per la simulazione energetica (correttamente validata) dell'intero sistema edificio-impianto, come verrà esplicitato nel seguito del presente Capitolo.

In termini generali, la simulazione termoenergetica è una procedura che consiste nella realizzazione di un modello numerico (*“Simulation Model”*) adatto a descrivere il comportamento del sistema edificio-impianto: al variare delle condizioni al contorno, dall'andamento temporale dei parametri climatici (tra cui spiccano, tra tutti, la temperatura e l'umidità relativa dell'aria esterna) a quello relativo alle sollecitazioni termiche interne (tra cui, a titolo di esempio, il carico termico dovuto all'occupazione degli ambienti da parte del personale o quello relativo alla dissipazione di calore da parte degli impianti tecnologici e di illuminazione), l'algoritmo di simulazione offre come risultato i fabbisogni di energia necessari al mantenimento delle condizioni termoigrometriche imposte agli impianti di climatizzazione.

La complessità di effettuare l'analisi in regime dinamico, a differenza del caso stazionario, permette di apprezzare l'evoluzione del comportamento del sistema edificio-impianto in un intervallo di tempo molto breve: nel caso in esame, si è scelto di osservare l'andamento dei parametri *indoor* (quali la temperatura e l'umidità relativa dell'aria) su base oraria, in modo da determinarne con sufficiente dettaglio la risposta alle sollecitazioni termiche

(quali l'irraggiamento e l'ombreggiatura degli ambienti) o ai fenomeni in generale (quali l'inerzia termica delle superfici dell'involucro) di natura prettamente transitoria.

Per il dettaglio matematico del modello termoenergetico si rimanda alla consultazione del testo *“Simulation and numerical methods: energy modeling for buildings and components.”* [15, p. 78], curato da Michele De Carli, relatore della presente tesi e professore associato presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale (DII) dell'Università degli Studi di Padova.

In ogni caso, essendo la simulazione dinamica degli edifici una riproduzione matematica di fenomeni termofisici generalmente complessi, è bene precisare che si tratta chiaramente di una procedura di tipo approssimato: è compito del responsabile dell'analisi energetica garantire il livello di dettaglio necessario a caratterizzare l'involucro, gli impianti, le attività e l'ambiente esterno, in modo da permettere all'algorithmo di restituire un'analisi sufficientemente accurata e rappresentativa della realtà.

### 3.1.1 TRNSYS

Per la simulazione dinamica di IGI-RFX viene impiegato il software commerciale *TRNSYS*<sup>1</sup>, sviluppato dal *Solar Energy Laboratory* (SEL) dell'Università di Wisconsin-Madison [85] e distribuito da *Thermal Energy System Specialists Inc.* (TESS): si tratta di uno dei programmi più affidabili ed apprezzati in ambito di simulazioni energetiche di notevole complessità in vari campi dell'ingegneria, grazie all'ampia disponibilità di librerie modulari personalizzabili (denominate *“type”*) per le più varieguate implementazioni, per l'interfaccia grafica semplice e per l'immediata compatibilità con i più noti elaboratori di testo e calcolo numerico. È inoltre dotato di una documentazione tecnica completa nei contenuti e di semplice consultazione [65].

---

<sup>1</sup>Acronimo di *“TRaNsient SYstem Simulation program”*, viene utilizzato in licenza dal CNR di Padova nella versione 17 del codice.

### 3.1.2 Sintesi dell'implementazione numerica

Il concetto alla base del programma è il collegamento modulare delle singole type, in modo da generare un'analisi arbitrariamente complessa come sommatoria di contributi basilari più semplici.

Nel caso in esame si fa pertanto ricorso alle seguenti type, elencate in base all'ordine logico di risoluzione da parte del programma:

- type 9: lettura di dati esterni (impiegata nella lettura dei dati meteorologici, di quelli caratterizzanti il regime degli impianti e di quelli relativi ai carichi interni);
- type 33: determinazione dei parametri psicrometrici dell'aria esterna;
- type 16: determinazione dei parametri di radiazione solare;
- type 69: calcolo della "temperatura del cielo" (*sky temperature*), necessaria alla definizione del regime di irraggiamento;
- type 77: calcolo della temperatura del terreno per gli scambi termici con il suolo;
- type 34-67: calcolo dell'ombreggiamento dovuto all'ostruzione solare da parte di superfici verticali;
- type 56: implementazione del sistema edificio-impianto, realizzata tramite l'interfaccia grafica dedicata "*TRNBuild*";
- type 65: stampante a schermo in tempo reale dei risultati della simulazione dinamica;
- type 46: stampante su file esterno dei risultati per il *post-processing*.

Il collegamento sequenziale delle type all'interno dell'interfaccia grafica del programma (chiamata "*Simulation Studio*") avviene con il principio di

concatenazione dei modelli *black box* della teoria dei sistemi: l'operatore si disinteressa delle operazioni svolte all'interno delle type (almeno finché non sopraggiunge l'esigenza di personalizzarne la struttura interna), occupandosi di far corrispondere convenientemente gli output di una con gli input della successiva.

## 3.2 Modellazione del sistema edificio-impianto

La preparazione preliminare della modellazione prevede un estensivo ed approfondito lavoro di ricerca dei parametri e delle grandezze coinvolte nella simulazione: quanti più dati rappresentativi è possibile ricavare, tanto più dettagliato e verosimile alla realtà sarà il modello fisico e, di conseguenza, quello numerico. Il limite superiore a tale lavoro è l'effettiva disponibilità di tempo e di risorse poiché, in un sistema della complessità di IGI-RFX, la volontà di perseguire la massima accuratezza nella definizione del modello porta inevitabilmente a scontrarsi con una serie di difficoltà; nel caso specifico, tali difficoltà possono essere in tal modo riassunte:

- per un edificio risalente a metà anni '80, è evidente che la disponibilità di buona parte della documentazione tecnica è severamente limitata dall'organizzazione e dalla completezza dell'archivio cartaceo, oltre che dalla molteplicità delle fonti (trattandosi di opere realizzate in contesto pubblico);
- essendo IGI-RFX dotato di una moltitudine variegata di corpi, il modello deve necessariamente infittire il proprio grado di dettaglio ad ogni sostanziale variazione architettonica e funzionale;
- la notevole complessità generale della distribuzione del personale e della dotazione tecnologica limitano la precisa collocazione nello spazio e nel tempo delle sollecitazioni termiche interne;

- il complessivo degli impianti, oltre a essere costituito da una gran varietà di singoli elementi (spesso decisamente eterogenei tra loro), è frequentemente governato da logiche di regolazione non espressamente misurabili nella pratica (a causa della vetustà degli stessi sistemi di regolazione) e pertanto di ardua implementazione numerica.

Il grado di risoluzione nella definizione del modello è nuovamente responsabilità di chi effettua l'analisi energetica. Se da un lato è sovente inutile ricercare un'eccessiva sofisticazione del modello, dall'altro è necessario tenere ben presente il limite inferiore: un'approssimazione eccessiva, soprattutto se applicata senza cognizione di causa (o senza tenerne traccia durante l'avanzamento del lavoro), rischia di influire negativamente sulla capacità del modello di rappresentare in maniera sufficientemente apprezzabile i fenomeni fisici coinvolti nel sistema reale. Il risultato conseguente sarà necessariamente inaccurato, e con esso qualsiasi successiva considerazione.

### 3.2.1 Individuazione delle zone termiche

Il primo passo nella definizione del modello del sistema edificio-impianto è la determinazione delle cosiddette “zone termiche”, ovvero degli ambienti in cui le grandezze termoigrometriche (temperatura, umidità relativa e ventilazione) vengono controllate in modo analogo, con la medesima architettura e orientazione, con simile destinazione di utilizzo e occupazione dei locali.

I risultati<sup>2</sup> della suddivisione, sintetizzati in Tabella 3.1, portano alla definizione di sedici diverse zone termiche, undici delle quali afferenti all'aggregato Uffici (in rosso, per una volumetria netta totale di circa 13 600 m<sup>3</sup>) e le cinque restanti all'aggregato RFX (in blu, 32 800 m<sup>3</sup>). La zona termica di dimensioni più contenute coincide con l'atrio di accesso all'edificio, mentre

---

<sup>2</sup>Nell'individuazione delle zone termiche, si sceglie di non tenere conto dei cavedi e dei vani scala non riscaldati.

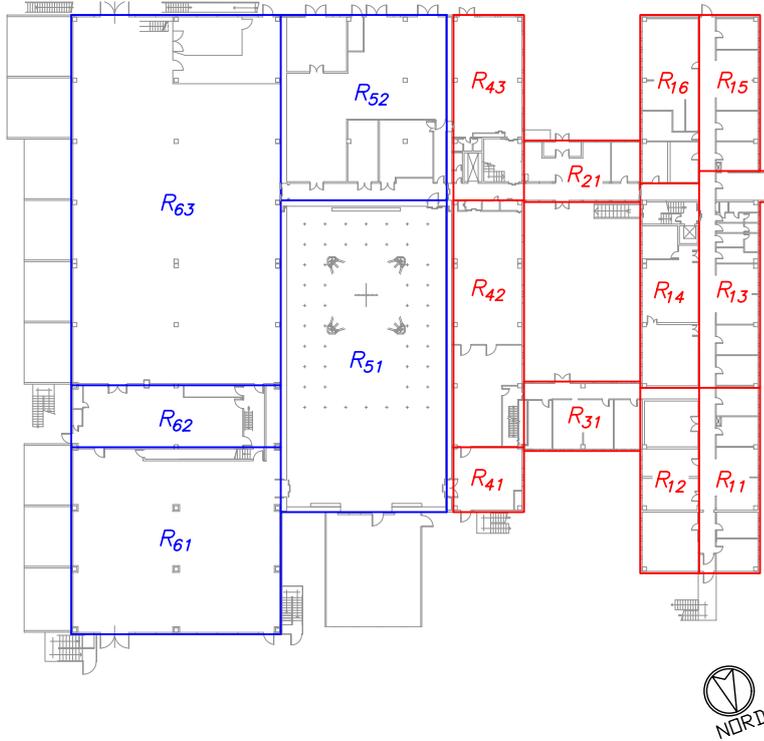
quella di dimensioni maggiori (pari a poco meno di un quarto della volumetria totale dell'edificio) contiene la sala di R5 al cui interno è installata la macchina cuore dell'esperimento RFX-mod.

L'umidità relativa viene considerata costante per tutte le zone, poiché mantenuta nell'intervallo di comfort igrometrico (40-60%); valgono le stesse considerazioni per l'entità delle infiltrazioni d'aria (si assume nel calcolo il valore di 0,1 Vol/h, tipico del regime di ventilazione meccanica controllata).

È doveroso notare che tutti i parametri elencati fanno riferimento alle attuali logiche di regolazione e controllo gestite dal personale responsabile degli impianti, non a valori suggeriti o imposti dalle normative risalenti al periodo di costruzione, né da quelle correnti: ciò è giustificato dalla necessità di realizzare un modello di consumo energetico rappresentativo dell'effettiva situazione attuale, direttamente confrontabile con l'audit energetico completato nel Capitolo 2.

Ad ulteriore conferma della procedura, si installano dei sensori di termoigrometrici muniti di *data logger* (registratore elettronico di dati) di marchio Testo e di proprietà della ditta Prisma Engineering di Villatora di Saonara (PD); la strumentazione viene posizionata in punti strategici della suddivisione in zone di IGI-RFX, al fine di analizzare i set point effettivi dei seguenti locali:

- ① ufficio al secondo piano del corpo R1, lato nord (registrazione in regime di riscaldamento invernale);
- ② corridoio al primo piano del corpo R4, in prossimità dei box laser (registrazione in regime di raffrescamento estivo);
- ③ soppalco della sala esperimento al primo piano di R5, lato ovest.

**Tabella 3.1:** Suddivisione di IGI-RFX in zone termiche.**(a)** Vista in pianta delle zone termiche.**(b)** Volumetrie, grandezze termoigrometriche e occupazione del personale nelle zone termiche definite.

Zona	Vol [m <sup>3</sup> ]	Vol [%]	T <sub>inv</sub> [°C]	T <sub>est</sub>	Vent [Vol/h]	Pers
R <sub>11</sub>	1432	3,1			0,91	33
R <sub>12</sub>	1342	2,9			0,91	28
R <sub>13</sub>	1019	2,2			0,91	17
R <sub>14</sub>	1339	2,9			1,00	18
R <sub>15</sub>	1445	3,1			0,91	22
Uffici R <sub>16</sub>	1352	2,9	25	22	0,91	37
R <sub>21</sub>	500	1,1			0,91	2
R <sub>31</sub>	1034	2,2			0,98	13
R <sub>41</sub>	620	1,3			1,38	11
R <sub>42</sub>	2294	4,9			1,38	28
R <sub>43</sub>	1184	2,6			1,38	5
R <sub>51</sub>	11 256	24,3			0,27	0
R <sub>52</sub>	6901	14,9			0,31	15
RFX R <sub>61</sub>	4493	9,7	22	22	0,33	7
R <sub>62</sub>	1237	2,7			1,05	10
R <sub>63</sub>	8944	19,3			0,28	8
Tot	46 392	100,0				254

Le zone interessate sono indicate nella piantina di Figura 3.1a, mentre i risultati della rilevazione di una giornata lavorativa tipo sono raccolti sinteticamente nei grafici di Figura 3.1b (l'asse delle ascisse rappresenta il tempo di misurazione in minuti). Dell'enorme mole di dati, vengono proposti 288 campionamenti rappresentativi, ad intervalli di 5 minuti, per un totale di 1440 minuti di rilevazione (ovvero 24 ore, a partire dalle 4.00 del mattino); si segnala inoltre l'inizio e la fine dell'orario lavorativo.

Le temperature registrate rispecchiano i valori impostati nella simulazione, a meno di lievi oscillazioni (al più di 1 °C) dovute con ogni probabilità all'occasionale vicinanza del sensore al personale presente o di passaggio nel locale.

Il complessivo delle rilevazioni termoigrometriche, la scheda tecnica commerciale della strumentazione utilizzata e il relativo certificato di taratura sono reperibili in Appendice A [67, 68].

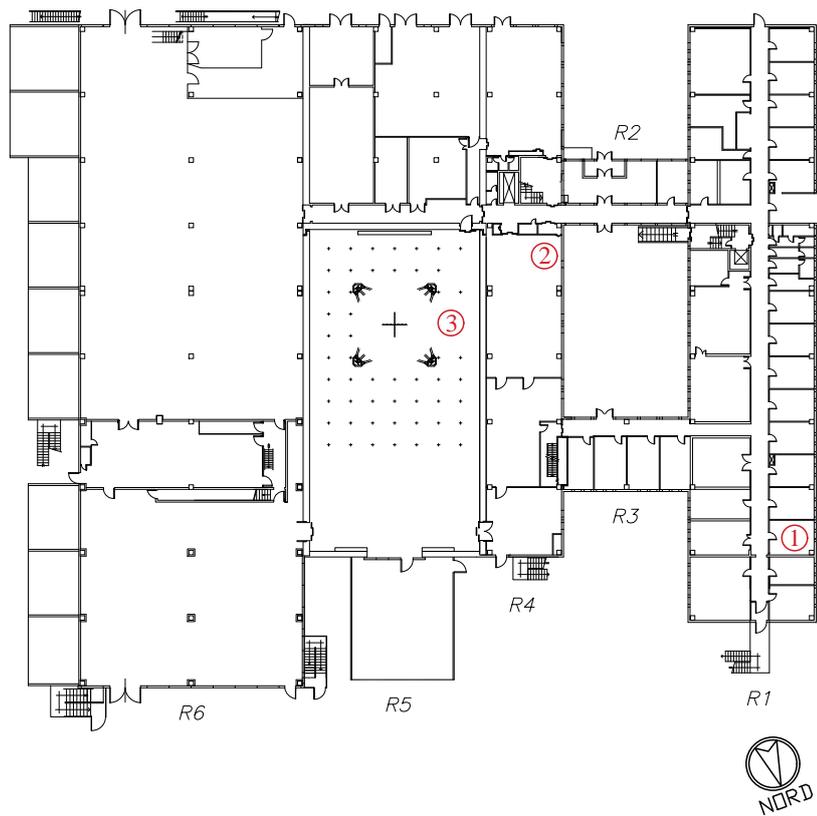
### 3.2.2 Definizione delle stratigrafie

Dall'elenco descrittivo riportato nel Paragrafo 1.4, si definiscono ora in modo specifico le stratigrafie delle diverse strutture che compongono l'involucro di IGI-RFX. Per ogni elemento delle strutture, si riportano i parametri caratteristici necessari all'implementazione: lo spessore ( $s$ ), la conducibilità termica ( $\lambda$ ), il calore specifico ( $c_p$ ) e la densità ( $\rho$ ).

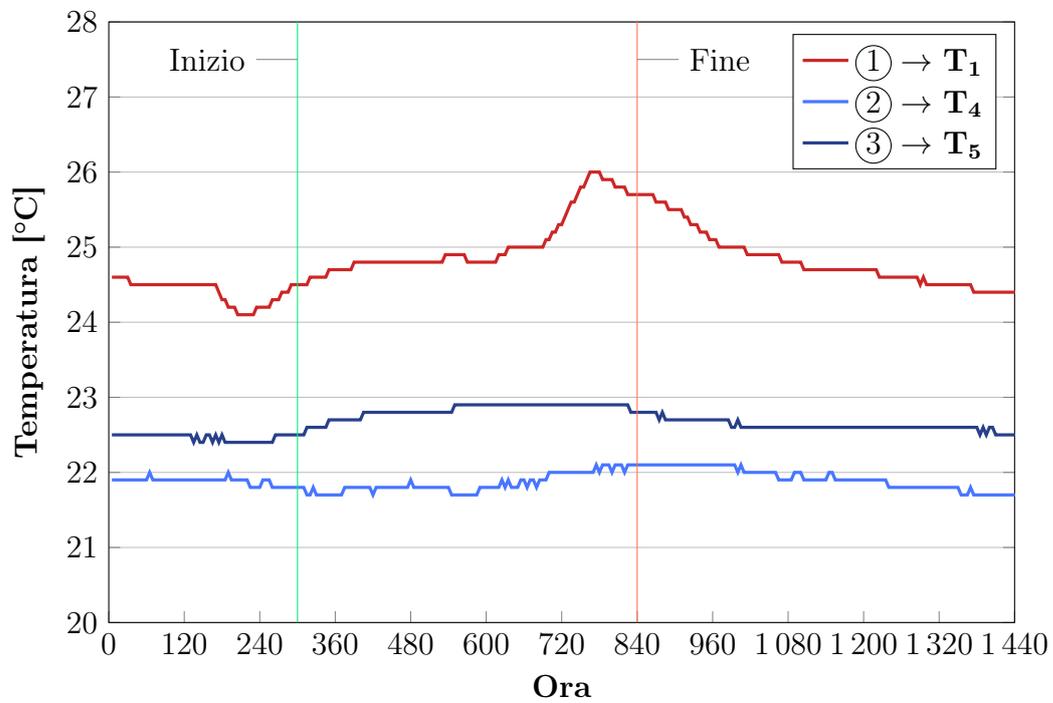
Poiché da capitolato sono disponibili solamente i valori di trasmittanza termica delle intere strutture ( $U$ ), si deve ricorrere all'impiego delle norme tecniche relative ai materiali da costruzione, nello specifico la *UNI 10351* [41] e la *UNI 10355* [42] (quest'ultima essenzialmente specifica per gli elementi in muratura e i solai<sup>3</sup>).

---

<sup>3</sup>In caso di occasionale necessità di maggiore livello di dettaglio, si utilizzano le procedure di calcolo dei parametri caratteristici contenute nella *UNI EN 1745* [37].



(a) Posizionamento dei datalogger.



(b) Temperature registrate.

**Figura 3.1:** Estratto della rilevazione strumentale dei parametri termoigrometrici di IGI-RFX.

Per comodità di esposizione, le strutture coinvolte nel calcolo vengono numerate secondo il seguente ordine:

1. muratura di tamponamento in calcestruzzo armato dell'aggregato Uffici e del corpo R6;
2. muratura di tamponamento in mattoni della sopraelevazione dell'aggregato Uffici;
3. muratura esterna in calcestruzzo armato del corpo R5;
4. solaio su vespaio alla base dell'aggregato Uffici;
5. pavimento su ghiaione dell'aggregato RFX;
6. solaio di copertura dell'aggregato Uffici e del corpo R6;
7. solaio di copertura a tegoloni in calcestruzzo armato del corpo R5;
8. superfici trasparenti (serramenti, vetrate e porte vetrate);
9. porte in legno;
10. porte e portoni in lamiera d'acciaio.

Per le superfici trasparenti è necessario definire le dimensioni e i fattori solari degli elementi in vetro, il materiale con cui sono realizzati i telai e il rapporto tra le loro superfici e quelle degli interi elementi finestrati; inoltre, il modello non richiede la definizione degli spessori e delle conducibilità, ma solo delle trasmittanze e del fattore solare (ovvero il rapporto tra l'energia termica globalmente trasmessa<sup>4</sup> dal vetro e quella complessivamente incidente su di esso).

---

<sup>4</sup>I sistemi di schermatura (in questo caso, tende alla veneziana e pellicole antisolari) contribuiscono a smorzare il fattore solare ed è pertanto necessario tenerne conto nella realizzazione del modello.

Per lo scambio termico attraverso solette sospese sopra vespaio, la norma *UNI TS 11300-1* [55, p. 24] impone di ridurre la trasmittanza nominale del 20%, come se il flusso termico avesse luogo attraverso un ambiente non riscaldato (dunque non direttamente con il terreno); inoltre, per il vespaio si riporta solamente lo spessore dello strato, trattandosi di un'intercapedine in aria (“*massless layer*”, strato privo di massa).

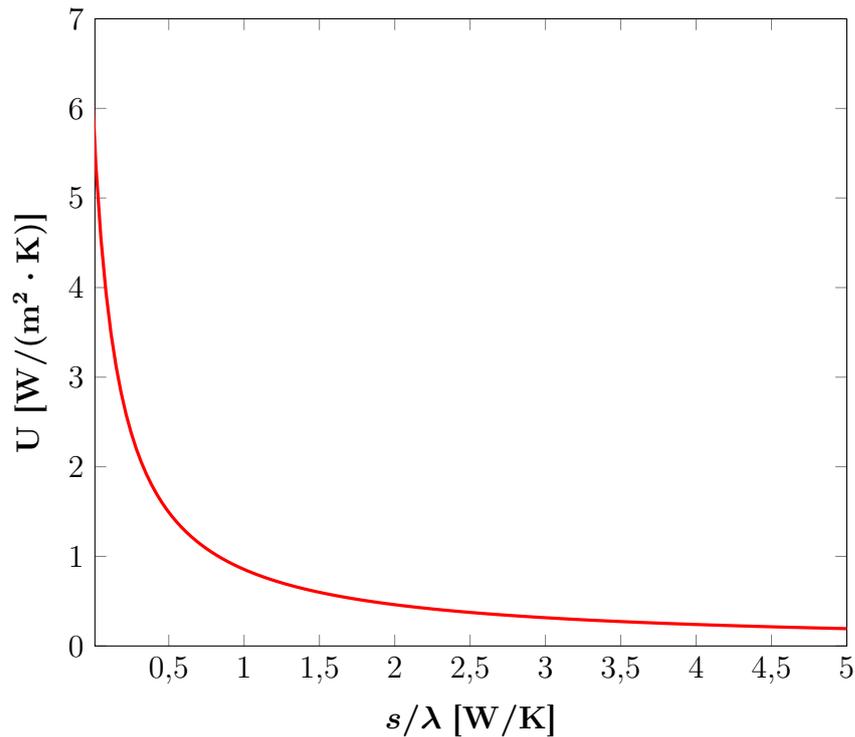
Si utilizza l'opzione *massless layer*, sebbene in modo tecnicamente improprio, anche per la cappa termoisolante del solaio di copertura tipo Predalles, poiché non risulta possibile determinarne né la geometria né il tipo di materiale di cui è costituita: si attribuisce pertanto il necessario valore alla resistenza termica dello strato affinché la trasmittanza complessiva della struttura modellata raggiunga il valore definito da capitolato, pur ammettendo una lieve sottostima delle grandezze legate alla massa (come, ad esempio, l'inerzia termica).

La medesima procedura viene impiegata per i portoni in lamiera, dato il notevole valore della loro trasmittanza termica, non ottenibile direttamente tramite il modello predefinito del programma: l'equazione che gestisce<sup>5</sup>  $U$ , per  $s/\lambda$  tendente a zero (si veda il grafico in Figura 3.2), restituisce un massimo locale<sup>6</sup> pari a  $5,89 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , sempre e comunque inferiore all'obiettivo di  $7,54 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , valore registrato nel capitolato. L'utilizzo dell'opzione *massless layer* consente, in questo caso, di definire la trasmittanza semplicemente come il reciproco della resistenza  $R$  [ $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ] opportunamente scelta; essendo la massa delle aperture in lamiera una frazione poco significativa di quella complessiva dell'edificio, è a maggior ragione ammissibile anche in questo caso trascurarne le grandezze ad essa correlate.

---

<sup>5</sup>In cui  $\alpha_i$  e  $\alpha_e$  sono, rispettivamente, i coefficienti di scambio termico convettivo tra ambiente e superficie interna ed esterna della struttura [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ].

<sup>6</sup>Il campo di variabilità di  $s$  è compreso tra 0 e 1 m, estremi esclusi, mentre  $\lambda$  è strettamente maggiore di zero.



**Figura 3.2:** Trasmittanza termica  $U$  al variare del rapporto  $s/\lambda$ .

$$\lim_{s/\lambda \rightarrow 0^+} U = \lim_{s/\lambda \rightarrow 0^+} \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_e}} = 5,89$$

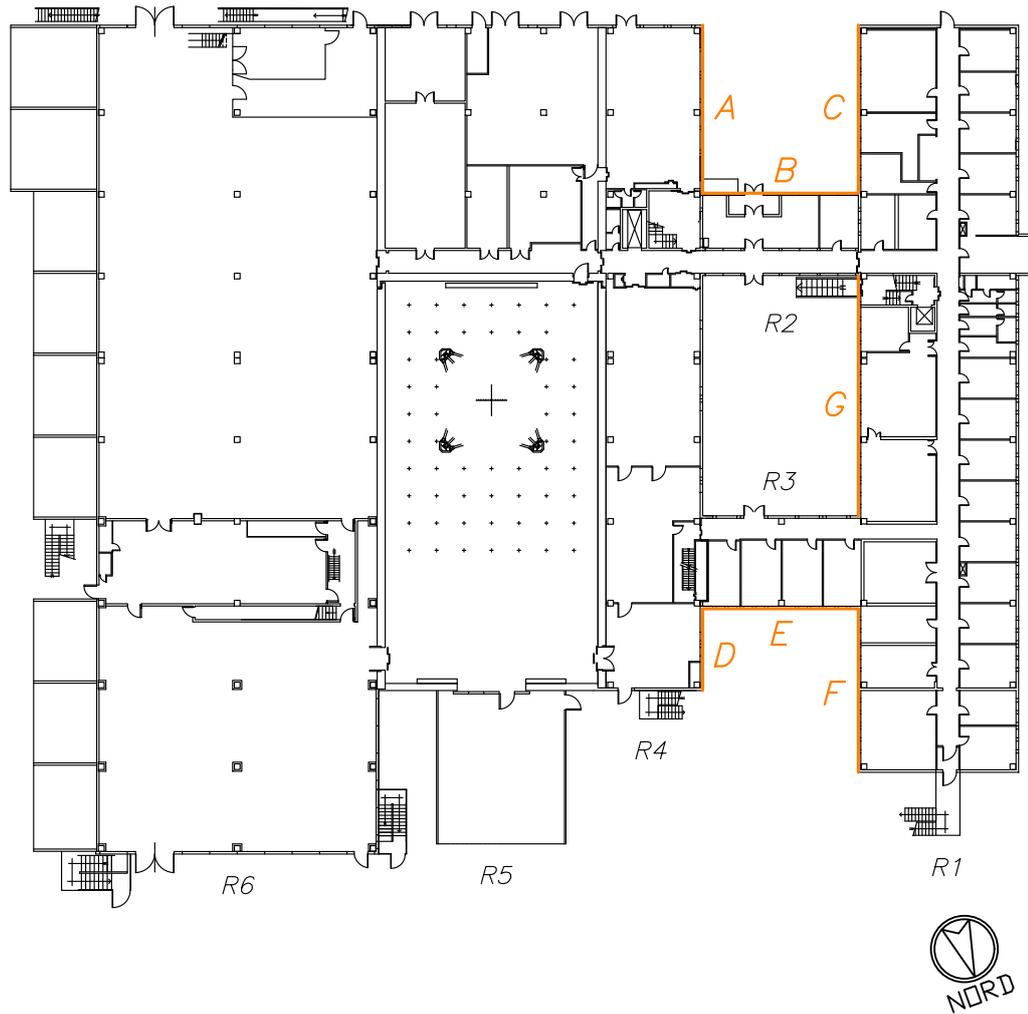
Le stratigrafie complete delle strutture sono riportate in Tabella 3.2, con gli elementi costituenti elencati dallo strato più interno a quello più esterno dell'involucro.

### 3.2.3 Modellazione dell'ombreggiatura

La struttura dell'edificio IGI-RFX presenta delle ostruzioni alla propagazione della radiazione solare rappresentate dalle superfici verticali segnalate in pianta nella Figura 3.3. TRNSYS è in grado di implementare tali ostruzioni, abbattendo localmente il coefficiente di irraggiamento delle superfici oscurate, tenendo conto della posizione variabile della sorgente luminosa e della ripartizione tra quota di radiazione diretta e diffusa.

**Tabella 3.2:** Dettaglio delle stratigrafie delle strutture principali di IGI-RFX; “Cls” indica le varie tipologie di calcestruzzo (“Clsa” quello armato), “PS” è l’abbreviazione di polistirolo e “PU” quella di poliuretano.

		s	$\lambda$	$c_p$	$\rho$	U
		[m]	[W/(m · K)]	[J/(kg · K)]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[W/(m <sup>2</sup> · K)]
1	Intonaco	0,020	0,700	1000	1200	0,79
	Clsa	0,120	2,000	900	2300	
	PS	0,040	0,055	1250	25	
	Cls	0,060	0,240	1000	600	
	Intonaco	0,020	1,000	1000	1800	
2	Intonaco	0,020	0,700	1000	1200	0,32
	Laterizio	0,120	0,270	840	800	
	PU	0,040	0,034	1400	25	
	Laterizio	0,120	0,270	840	800	
	Intonaco	0,020	1,000	1000	1800	
3	Cls	0,400	1,500	1000	2300	0,58
	Clsa	0,120	2,000	900	2300	
	PS	0,040	0,055	1250	25	
	Cls	0,120	0,240	1000	600	
	Intonaco	0,020	1,000	1000	1800	
4	Massetto	0,100	1,750	1000	2000	1,51
	Tavelloni	0,240	0,550	1000	1800	
	Vespaio	0,345	-	-	-	
5	Cls	0,400	0,350	1000	1100	0,60
	Ghiaia	0,400	1,200	1000	1700	
6	Clsa	0,120	2,000	900	2300	0,13
	PS	0,310	0,055	1250	25	
	Clsa	0,120	2,000	900	2300	
	Cappa	0,080	-	-	-	
	Guaina	0,004	0,170	840	1200	
	Leca	0,140	0,090	230	280	
	Ghiaia	0,050	1,200	1000	1700	
7	Clsa	0,140	2,000	900	2300	0,41
	Cappa	0,080	-	-	-	
	Cls	0,100	0,240	1000	600	
	Guaina	0,004	0,170	840	1200	
	Leca	0,140	0,090	230	280	
	Ghiaia	0,050	1,200	1000	1700	
8	Vetrata	-	-	800	2500	3,00
9	Porte	0,040	0,230	750	850	2,90
10	Portoni	-	-	500	7900	7,54



**Figura 3.3:** Superfici verticali di IGI-RFX interessate dal fenomeno dell'ombreggiatura.

Riguardo alle superfici precedentemente citate, è possibile ricavare le seguenti osservazioni:

- A, B e C si ostruiscono in modo vicendevole tra loro;
- D, E ed F si comportano in modo analogo, con la differenza che l'ala D presenta un'estensione più contenuta;
- G è parte di un cortile interno e, a causa della sua orientazione, rimane in ombra per buona parte del tempo (ricevendo sostanzialmente la sola radiazione diffusa).

La type 34 viene impiegata in caso di superfici di tipologia “*wingwall*”, ovvero quando l’ombreggiatura è localmente generata da pareti verticali adiacenti (A-B, B-C, C-B e D-E, E-F, F-E). La type 67 conteggia, tramite un complesso sistema di coordinate (in parte cartesiane per posizione nel piano e dimensioni delle pareti e in parte orizzontali per la loro collocazione spaziale), l’effetto di ombreggiatura di un’ostruzione generica (“*obstruction*”); le superfici che si ostruiscono con questa modalità sono A con C e D con F (e, reciprocamente, C con A e F con D). Le pareti interessate da questa seconda modalità vengono inoltre suddivise in due *opening*, ovvero vengono discretizzate in due sottopareti sezionando a due terzi della loro altezza con un piano parallelo al terreno: ciò si rende necessario per distribuire in modo più uniforme l’effetto dell’ombreggiatura (altrimenti concentrato in un singolo punto baricentrico di ogni singola superficie) e per tenere conto che i piani superiori ricevono la radiazione solare diretta per una quantità di tempo superiore rispetto a quelli inferiori (data l’architettura e l’orientazione dell’edificio). Il calcolo esteso della modellazione delle ostruzioni con la type 67 è consultabile in Appendice B, in Tabella 9.

### 3.2.4 Analisi dei carichi interni

Come ripetuto in diverse occasioni, la complessa varietà delle destinazioni d’uso dell’edificio rende altrettanto complicata la determinazione di un regime di carichi interni accurato. I contributi a tale regime possono essere rappresentati, con buona precisione, dal seguente elenco:

1. occupazione degli ambienti e delle postazioni da parte del personale durante l’orario di lavoro;
2. impianto di illuminazione degli ambienti, costituito essenzialmente da lampade a fluorescenza;

3. dotazione di computer, strettamente legata alle postazioni di lavoro (e quindi al personale);
4. presenza di apparecchi elettrici ed elettronici, in buona parte relativi ai sistemi di alimentazione (quadri di potenza) e di diagnostica dell'esperimento (quadri di controllo);
5. attività con impiego di macchine utensili (officina meccanica) o altro tipo di servizi (officina elettrica, locale saldatura);
6. carichi interni di tipologia varia esclusivamente collegati al funzionamento dell'esperimento RFX-mod.

In seguito alla determinazione della tipologia dei vari contributi, è necessario stabilirne in modo ragionevolmente dettagliato l'entità, la percentuale dissipata per effetto radiativo, conduttivo e convettivo e la distribuzione nel tempo. Dove disponibili, si raccolgono i valori di potenza termica dissipata forniti dai costruttori, dagli installatori o da capitolato (come nel caso dei carichi interni strettamente legati all'esperimento RFX-mod [7]); in alternativa si procede con il calcolo approssimato, che per illuminazione e computer segue, nella presente trattazione, le direttive emanate nel "*National Calculation Methodology*" (NCM) dall'ente britannico *Building Research Establishment* (BRE) [36, 86]:

- le lampade a fluorescenza dissipano calore in modo proporzionale alla potenza elettrica installata, al parametro illuminamento e al sistema di montaggio impiegato;
- i computer dissipano calore a seconda della tipologia dei componenti installati, specialmente per quanto riguarda lo schermo in dotazione.

Per quadri elettrici e macchine utensili si esegue una stima in base ai cataloghi dei produttori e all'esperienza di personale elettrotecnico qualificato (nello specifico, si ringrazia la ditta TECMAN di Marchesin Renato).

Per l'occupazione degli ambienti da parte del personale si utilizzano i valori standard contenuti nello stesso TRNSYS, riferiti alla norma tecnica per l'ergonomia degli ambienti termici *UNI EN ISO 7730* [50, p. 18]: i valori della dissipazione termica (sia in termini di calore sensibile che latente) sono riportati in funzione della tipologia di attività, definite nello specifico come "04" (attività relative a Uffici) e "06" (RFX)<sup>7</sup>.

La tipologia di meccanismo di trasmissione del calore dissipato è assunta come puro scambio convettivo, essendo le temperature dei corpi generalmente contenute (eccezion fatta per i sistemi di illuminazione, a cui si attribuisce una percentuale del 30% di scambio per irraggiamento).

Per contabilizzare correttamente l'entità dei carichi interni si introducono dei fattori di contemporaneità del carico (valori compresi tra 0 e 1), ricavati in seguito a un'approfondita campagna di osservazione e consultazione con il personale: l'impianto di illuminazione non è mai simultaneamente acceso in tutta la sua estensione, così come il personale non si trova in ogni momento tutto all'interno dell'edificio e, allo stesso modo, le risorse tecnologiche non vengono impiegate in modo continuo (Tabella 3.3). La sintesi dei risultati calcolati per le singole zone è contenuta in Tabella 3.4.

Per la distribuzione temporale dei carichi interni in primo luogo si definisce il livello di dettaglio della simulazione, in seguito si costruisce un complesso foglio di calcolo a ingressi binari; impostato il calcolo su base oraria (8760 ore annuali), si compone un algoritmo che per ogni singola zona termica assegna un moltiplicatore orario alle celle, inserendo valori pari a uno quando il

---

<sup>7</sup>04 si può intendere come lavoro in posizione sedentaria con attività di digitazione in postazione autonoma; 06 si riferisce invece all'attività in posizione eretta presso postazioni con banco da lavoro industriale.

**Tabella 3.3:** Fattori di contemporaneità dei carichi interni di IGI-RFX. Legenda: personale (Pers.), illuminazione (Ill.), computer (PC), quadri elettrici ed elettronici per controllo/diagnostica e *data center* (Quadri), macchinari e servizi tecnologici (Macc.), carichi relativi a RFX-mod (RFX).

	<b>Pers.</b>	<b>Ill.</b>	<b>PC</b>	<b>Quadri</b>	<b>Macc.</b>	<b>RFX</b>
f	0,90	0,60	0,70	0,80	0,10	0,33

carico deve essere attivato, pari a zero altrimenti. Le discriminanti principali nell'attivazione dei carichi<sup>8</sup> sono i regimi di lavoro riscontrati all'interno degli aggregati:

- gli Uffici lavorano a pieno regime dal lunedì al venerdì (dalle ore 9 alle 18) e a personale circa dimezzato il sabato (dalle 9 alle 13);
- RFX lavora in modo analogo agli Uffici dal martedì al venerdì e non prevede un regime di occupazione parziale.

Il modello tiene conto dei periodi di chiusura per le festività nazionali e per disposizioni interne al Consorzio (solitamente una ventina di giorni distribuiti nel periodo natalizio e nell'intorno di ferragosto); RFX osserva dei periodi di fermo più estesi, poichè la sosta natalizia tipicamente si prolunga fino alla seconda settimana di gennaio, mentre la sosta estiva occupa tutto il mese di agosto. In Figura 3.4 si può osservare un estratto esemplificativo<sup>9</sup> del corposo foglio di calcolo, al cui interno si possono riscontrare i moltiplicatori binari e il loro effetto sui carichi interni di zona.

<sup>8</sup>Con l'eccezione dei quadri elettrici, in funzione sempre e indipendentemente dall'occupazione dell'edificio.

<sup>9</sup>La versione rappresentata appartiene a una fase avanzata della trattazione, non avendo in questo contesto nessun valore se non quello esclusivamente illustrativo.

				FAN COIL		VENT		WORK		ILLUMINAZIONE												
				UFF	work	UFF	work	RFX	work	UFF	work	RFX	work	R1_1	R1_2	R1_3	R1_4	R1_5	R1_6	R2_1	R3_1	
1:8760	Giorno	Mese	Ora																			
2809	28	aprile	1:00:00 AM	martedì	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8249.3	8250.9	5871.9	7714.3	8326.0	7789.5	2877.8	5953.8	
2810	28	aprile	2:00:00 AM	martedì	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8249.3	8250.9	5871.9	7714.3	8326.0	7789.5	2877.8	5953.8	
2811	28	aprile	3:00:00 AM	martedì	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8249.3	8250.9	5871.9	7714.3	8326.0	7789.5	2877.8	5953.8	
2812	28	aprile	4:00:00 AM	martedì	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8249.3	8250.9	5871.9	7714.3	8326.0	7789.5	2877.8	5953.8	
2813	28	aprile	5:00:00 AM	martedì	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8249.3	8250.9	5871.9	7714.3	8326.0	7789.5	2877.8	5953.8	
2814	28	aprile	6:00:00 AM	martedì	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8249.3	8250.9	5871.9	7714.3	8326.0	7789.5	2877.8	5953.8	
2815	28	aprile	7:00:00 AM	martedì	1	0	0	1	0	0	0	0	0	8249.3	8250.9	5871.9	7714.3	8326.0	7789.5	2877.8	5953.8	
2816	28	aprile	8:00:00 AM	martedì	1	1	1	1	0	0	0	0	0	8249.3	8250.9	5871.9	7714.3	8326.0	7789.5	2877.8	5953.8	
2817	28	aprile	9:00:00 AM	martedì	1	1	1	1	1	1	1	1	1	8249.3	8250.9	5871.9	7714.3	8326.0	7789.5	2877.8	5953.8	
2818	28	aprile	10:00:00 AM	martedì	1	1	1	1	1	1	1	1	1	8249.3	8250.9	5871.9	7714.3	8326.0	7789.5	2877.8	5953.8	
2819	28	aprile	11:00:00 AM	martedì	1	1	1	1	1	1	1	1	1	8249.3	8250.9	5871.9	7714.3	8326.0	7789.5	2877.8	5953.8	
2820	28	aprile	12:00:00 PM	martedì	1	1	1	1	1	1	1	1	1	8249.3	8250.9	5871.9	7714.3	8326.0	7789.5	2877.8	5953.8	
2821	28	aprile	1:00:00 PM	martedì	1	1	1	1	1	1	1	1	1	8249.3	8250.9	5871.9	7714.3	8326.0	7789.5	2877.8	5953.8	
2822	28	aprile	2:00:00 PM	martedì	1	1	1	1	1	1	1	1	1	8249.3	8250.9	5871.9	7714.3	8326.0	7789.5	2877.8	5953.8	
2823	28	aprile	3:00:00 PM	martedì	1	1	1	1	1	1	1	1	1	8249.3	8250.9	5871.9	7714.3	8326.0	7789.5	2877.8	5953.8	
2824	28	aprile	4:00:00 PM	martedì	1	1	1	1	1	1	1	1	1	8249.3	8250.9	5871.9	7714.3	8326.0	7789.5	2877.8	5953.8	
2825	28	aprile	5:00:00 PM	martedì	1	1	1	1	1	1	1	1	1	8249.3	8250.9	5871.9	7714.3	8326.0	7789.5	2877.8	5953.8	
2826	28	aprile	6:00:00 PM	martedì	1	1	1	1	1	1	1	1	1	8249.3	8250.9	5871.9	7714.3	8326.0	7789.5	2877.8	5953.8	
2827	28	aprile	7:00:00 PM	martedì	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8249.3	8250.9	5871.9	7714.3	8326.0	7789.5	2877.8	5953.8	
2828	28	aprile	8:00:00 PM	martedì	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8249.3	8250.9	5871.9	7714.3	8326.0	7789.5	2877.8	5953.8	
2829	28	aprile	9:00:00 PM	martedì	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8249.3	8250.9	5871.9	7714.3	8326.0	7789.5	2877.8	5953.8	
2830	28	aprile	10:00:00 PM	martedì	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8249.3	8250.9	5871.9	7714.3	8326.0	7789.5	2877.8	5953.8	
2831	28	aprile	11:00:00 PM	martedì	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8249.3	8250.9	5871.9	7714.3	8326.0	7789.5	2877.8	5953.8	
2832	28	aprile	12:00:00 AM	martedì	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8249.3	8250.9	5871.9	7714.3	8326.0	7789.5	2877.8	5953.8	

**Figura 3.4:** Estratto della distribuzione temporale dei carichi interni su foglio di calcolo (24 ore). È possibile osservare i moltiplicatori per i regimi di lavoro di Uffici e RFX (rispettivamente in giallo ed arancione); il funzionamento degli impianti e dei terminali è segnalato dai moltiplicatori in blu (terminali ad acqua) e verde (terminali aeratici).

**Tabella 3.4:** Valore assoluto dei carichi interni suddivisi per zona. Il carico interno più importante è, come prevedibile, quello legato all'esperimento; esso si può tuttavia considerare a pieno regime per una quota modesta del tempo durante l'anno, rendendo di fatto il suo peso nell'analisi equivalente a quello degli altri contributi sommati tra loro.

Zona	Pers.	Ill.	PC	Quadri	Macc.	RFX
[kW]						
$R_{11}$	2,4	2,3	3,5	0,0	0,0	0,0
$R_{12}$	2,0	2,3	2,9	1,8	0,0	1,2
$R_{13}$	1,2	1,6	1,8	0,0	0,0	0,0
$R_{14}$	1,3	2,1	1,9	0,0	0,0	0,0
$R_{15}$	1,6	2,3	2,3	0,0	0,0	0,0
$R_{16}$	2,6	2,2	3,9	0,0	0,0	0,0
$R_{21}$	0,1	0,8	0,2	0,0	0,0	0,0
$R_{31}$	0,9	1,7	1,4	2,8	0,0	0,1
$R_{41}$	0,8	0,9	1,2	1,2	0,7	0,0
$R_{42}$	2,0	3,4	2,9	10,0	0,0	6,6
$R_{43}$	0,4	1,8	0,5	0,0	0,0	0,0
$R_{51}$	0,0	3,4	0,0	0,0	0,0	57,8
$R_{52}$	1,1	2,1	1,6	0,4	0,1	0,0
$R_{61}$	0,5	2,6	0,7	0,0	0,0	14,9
$R_{62}$	0,7	1,7	1,1	4,1	0,0	0,0
$R_{63}$	0,6	5,2	0,8	0,0	0,0	19,8
Tot	18,2	36,5	26,7	20,3	0,8	100,4

### 3.2.5 Modellazione degli impianti

TRNSYS richiede di impostare per gli impianti le temperature di immissione dell'aria (in questo caso, aria neutra a 20 °C per gli Uffici e a 22 °C per RFX) e i ricambi orari di ventilazione per le singole zone, oltre alle temperature di set point dei terminali ad acqua dove previsti; come nel caso precedente, riguardante i carichi interni, la distribuzione temporale del funzionamento degli impianti viene assegnata all'esterno, tramite moltiplicatori binari (si vedano le barre blu e verdi della Figura 3.4): nel caso di IGI-RFX, gli impianti si trovano in regime di funzionamento continuo (giorno e notte) per tutta la durata dell'anno, ad esclusione del periodo natalizio e di quello estivo, in cui è comunque garantita una portata minima necessaria a mantenere sotto controllo l'umidità dell'aria (per non incorrere nel danneggiamento dei numerosissimi elementi elettrici ed elettronici presenti).

È doveroso osservare che, con questo approccio, il programma non registra l'energia necessaria per portare l'aria elaborata dagli impianti alle condizioni di immissione in ambiente, interpretando i dati in ingresso come equivalenti alle condizioni dell'aria esterna: è pertanto fondamentale calcolare a parte l'energia trasferita dagli scambiatori di calore delle CTA all'aria immessa in ambiente, altrimenti il fabbisogno riguarderebbe i soli consumi generati dai terminali ad acqua.

In questa trattazione si fa nuovamente ricorso a dei fogli di calcolo, di cui se ne illustra nel seguito la sintesi del principio di base a seconda del regime di funzionamento:

- **Inverno:** non essendo di norma operative le sezioni umidificanti delle CTA, l'aria prelevata dall'ambiente esterno ( $T_{est}$ ) viene semplicemente riscaldata fino alle condizioni di immissione ( $T_{imm}$ ), sottraendo calore all'acqua calda che percorre la batteria di scambio termico; il bilancio di potenza termica [kW], per la  $j$ -esima ora della simulazione, è pertanto il seguente<sup>10</sup> (3.1):

$$P_{a,j} = \dot{m}c_p(T_{imm} - T_{est,j}) \quad (3.1)$$

in cui  $\dot{m}$  è la portata di massa dell'aria elaborata [kg/s] (al netto della percentuale coinvolta nel recupero termico e nella sezione di ricircolo) e  $c_p$  è il suo calore specifico a pressione costante (pari in queste condizioni a 1005 J/(kg · K)). L'energia termica totale per riscaldare l'aria è semplicemente la somma delle singole potenze orarie, per ogni ora in cui la temperatura di immissione risulta superiore a quella esterna:

$$Q_a = \sum_j P_{a,j}$$

---

<sup>10</sup>Essendo le temperature di immissione diverse per Uffici e RFX, è necessario calcolare separatamente i due contributi.

- **Estate:** l'aria viene inizialmente raffreddata dalla batteria alimentata ad acqua refrigerata e in seguito riscaldata fino alla temperatura di immissione desiderata; il calcolo si complica, poiché varia continuamente il contenuto di umidità all'interno dell'aria processata (deumidificazione nella batteria fredda e successivo adeguamento alle condizioni di immissione tramite batteria di postriscaldamento). Nella batteria fredda la temperatura media è sempre sufficientemente inferiore al punto di rugiada dell'aria quando questa si trova almeno in condizioni di immissione ( $T > T_{imm}$  e  $\varphi > \varphi_{imm}$ ).

Per le generiche<sup>11</sup> condizioni esterne, si traccia nel diagramma psicrometrico il segmento  $\overline{eb}$ , rappresentativo del processo di raffreddamento con deumidificazione (Figura 3.5); la potenza frigorifera associata al processo può essere conteggiata con un bilancio termico (3.2), in cui con  $h$  si indica l'entalpia specifica riferita all'unità di massa dell'aria umida [kJ/kg] (l'entalpia specifica dell'aria esterna viene calcolata ora per ora dalla type 33 di TRNSYS).

$$P_{a,j} = \dot{m}(h_{est,j} - h_{bat}) \quad (3.2)$$

L'energia frigorifera, in analogia con il caso precedente, risulta:

$$Q_a = \sum_j P_{a,j}$$

L'energia per postriscaldare l'aria fino alle condizioni di immissione ( $\overline{bm}$ ) viene conteggiata come nel caso del riscaldamento invernale (e va anch'essa a contribuire al calcolo del fabbisogno termico).

---

<sup>11</sup>Il punto di inizio trasformazione indicato è generico, mentre nel calcolo viene determinato a partire dalle condizioni esterne e tenendo conto del processo di miscelazione con l'aria in condizioni ambiente (dove previsto); il punto di fine trasformazione conteggia invece sia l'efficienza del processo di scambio termico che l'effetto di bypass dell'aria all'interno della batteria.

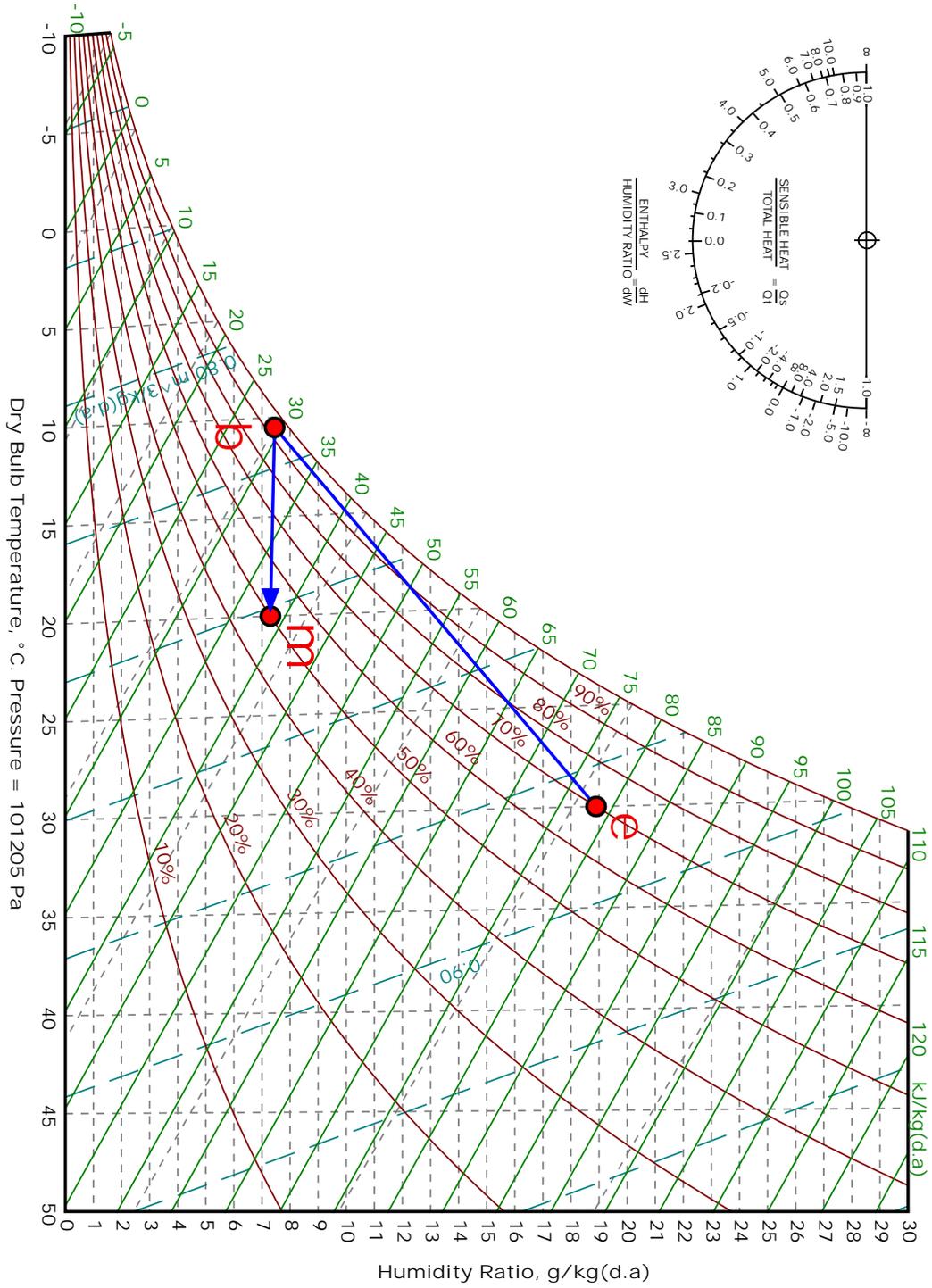


Figura 3.5: Diagramma psicrometrico per il regime di climatizzazione estiva (Fonte: FlyCarpet).

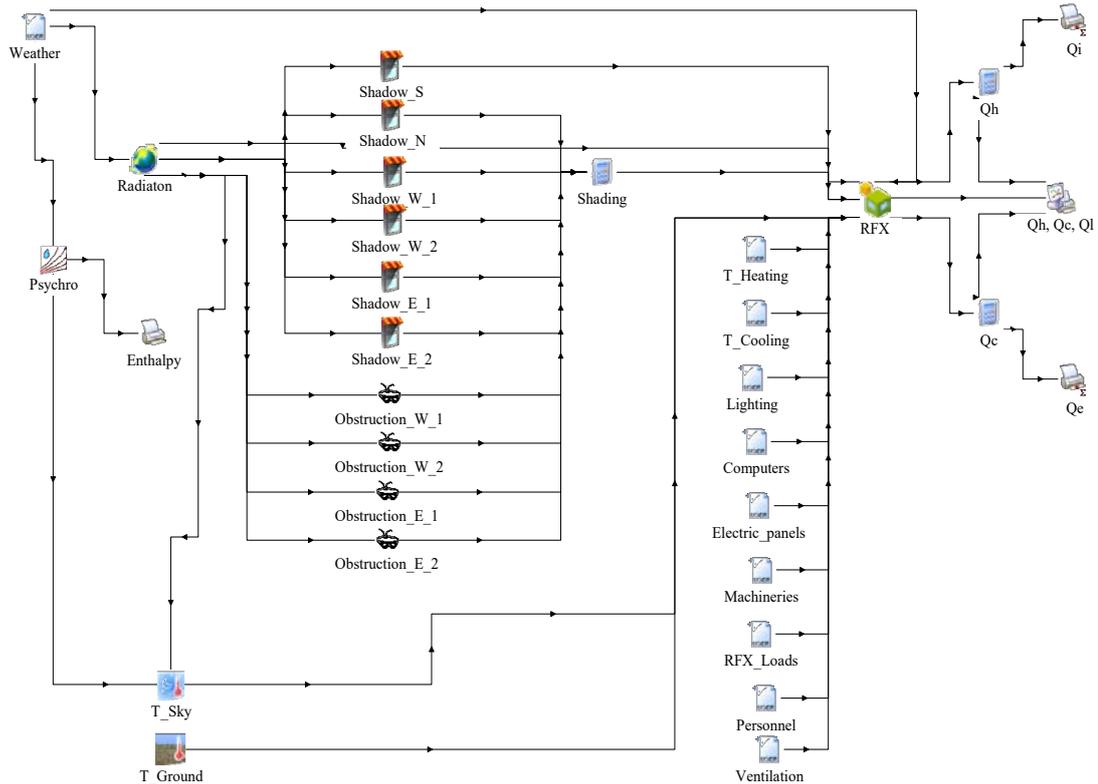


Figura 3.6: Visualizzazione su interfaccia grafica del modello di calcolo.

### 3.3 Implementazione del modello

Una volta definiti gli input e i parametri del calcolo, è possibile impostare la *routine* del programma, collegando in modo opportuno le varie type. La Figura 3.6 riporta l'interfaccia grafica Simulation Studio, al cui interno la routine si divide in quattro sezioni principali (visibili da sinistra verso destra) affrontate dall'algorithm di calcolo in modo sequenziale:

- I. sezione contenente i dati meteorologici e ai parametri termoigrometrici;
- II. direttamente conseguente dal modello della radiazione solare, questa sezione restituisce il calcolo dell'ombreggiamento delle superfici;
- III. qui è presente il cuore della procedura, al cui interno si trova il modello di IGI-RFX completo dei relativi impianti e dei carichi interni;
- IV. è la sezione di output del codice, composta da una stampante su schermo e da due stampanti su file esterno.

### 3.3.1 Sviluppo del modello

Il modello di calcolo per la simulazione dinamica di IGI-RFX è realizzato in collaborazione con l'ing. Giulia Alessio, dottoranda presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale (DII) afferente all'Università degli Studi di Padova. Le fasi del suo sviluppo vengono riportate in ordine sequenziale, benché le procedure siano profondamente interconnesse tra loro e, molto spesso, operativamente ricorsive:

1. procedura preliminare di addestramento all'utilizzo dei metodi numerici per la soluzione dei problemi di analisi energetica degli edifici e studio delle tipologie di modellazione fisica del sistema edificio-impianto;
2. fase di apprendimento del software di simulazione dinamica TRNSYS, con implementazione di problemi reali di dimensioni contenute (edifici di destinazione residenziale);
3. intensa campagna di raccolta dati e consultazione di documentazione archiviata presso il CNR e il Consorzio RFX, con implementazione parallela di primo tentativo in TRNSYS (impostazione delle zone termiche, definizione della stratigrafia e bilanci termici degli impianti di trattamento dell'aria);
4. elaborazione dello storico dei dati dei contabilizzatori di energia e contemporanea rilevazione in prima persona, allo scopo di valutare la convergenza del codice di calcolo;
5. primo profondo intervento di sofisticazione del codice, riguardante l'affinamento del modello matematico per l'ombreggiatura (separazione tra wingwall e obstruction) e i carichi interni (attribuzione degli input da foglio di calcolo esterno);

6. misurazione sul campo dei parametri termoigrometrici delle zone, revisione completa della raccolta dati e intervento di livello intermedio sul codice, con buon riscontro di convergenza (moduli degli scarti inferiori al 30%, scarto medio inferiore al 20%);
7. secondo profondo intervento di sofisticazione del codice, riguardante gli impianti di trattamento dell'aria e la distribuzione spaziale dei carichi interni, con eccellente e definitivo riscontro di convergenza (moduli degli scarti inferiori al 15%, scarto medio inferiore al 7%).



# Capitolo 4

## Elaborazione dei risultati

Si presentano nel seguito i risultati della simulazione dinamica; essi, allo stato di output del programma, non rappresentano ancora in modo rigoroso il fabbisogno direttamente paragonabile con quello contabilizzato, poiché il modello numerico dell'edificio non tiene conto dei fenomeni che coinvolgono le perdite di efficienza dei sistemi di gestione della climatizzazione. Ulteriormente, si presenta l'esito della procedura di calibrazione ricorsiva introdotta nel Capitolo 3.

### 4.1 Output delle simulazioni

Si sceglie, in fase di impostazione delle simulazioni, di restituire gli output (orari, mensili e annuali) per le seguenti grandezze:

- $Q_{h,i}$ : fabbisogno di energia termica per il riscaldamento dell' $i$ -esima zona termica;
- $Q_{c,i}$ : fabbisogno di energia frigorifera per il raffrescamento dell' $i$ -esima zona termica;
- $T_i$ : temperatura registrata nell' $i$ -esima zona termica, al fine di confronto con le temperature misurate in situ.

Il fabbisogno simulato totale ( $Q_{h,tot}$  e  $Q_{c,tot}$ ) viene convenientemente separato in due contributi distinti: quelli relativi alle zone termiche dell'aggregato Uffici ( $Q_{h,uff}$  e  $Q_{c,uff}$ ) e quelli relativi a RFX ( $Q_{h,rfx}$  e  $Q_{c,rfx}$ ), in modo da poter esaminare in modo approfondito le necessarie discontinuità nella gestione energetica all'interno dell'edificio. La suddivisione avviene in modo automatico all'esterno del software di simulazione, grazie a delle routine sistematicamente inserite in fase di calcolo; tutti i dati sono disponibili su base oraria (output diretto della simulazione), mensile e annuale (queste ultime, calcolate tramite type 46 ai fini del successivo post-processing).

## 4.2 Calcoli preliminari

### 4.2.1 Determinazione dei consumi degli ausiliari

A livello preliminare, in funzione della trattazione successiva, si conteggiano tutti i consumi di energia collegati agli impianti di climatizzazione che non generano un effetto utile<sup>1</sup> (ovvero quando tale energia non è direttamente impiegata per riscaldare e raffrescare gli ambienti). Tra le numerose fonti di consumo, l'energia elettrica fornita ai motori trifase che azionano i ventilatori delle CDZ è senza dubbio quella più ingente: essa infatti rappresenta oltre il 90% dei consumi elettrici generati dagli impianti di climatizzazione di cui è dotato IGI-RFX.

Per determinare la potenza elettrica assorbita dai motori, si deve in primo luogo osservare che, data la vetustà delle macchine, non è prevista alcuna variazione di velocità<sup>2</sup> dei motori stessi: il punto di funzionamento del ventilatore, reperibile per ogni centrale nelle relative schede tecniche [19, 66],

---

<sup>1</sup>Si conteggiano i contributi a valle dei punti di rilievo dei contabilizzatori di energia: non rientrano dunque nell'analisi pompe e ventilatori operanti nelle Centrali Tecnologiche.

<sup>2</sup>Se non modificando manualmente il rapporto di trasmissione nel sistema a pulegge che collega motore e ventilatore, fatto che non si verifica all'atto pratico nelle presenti circostanze.

determina in modo univoco il punto di funzionamento del motore, a cui corrisponde una determinata potenza elettrica assorbita. Conteggiando la potenza assorbita per ogni ora di funzionamento si ottiene l'energia elettrica dedicata ai sistemi ausiliari di ventilazione, separata nel suo contributo fisso  $E_{e, \text{fis}}$  (CDZ 3 e 5, a causa della necessità di controllare l'umidità in ambienti dotati di apparecchiature sensibili, funzionano in modo continuo) e variabile  $E_{e, \text{var}}$  (Tabella 4.1).

Questa procedura può essere di fatto saltata se consideriamo che i motori sono dimensionati sulle effettive necessità al momento dell'installazione delle CDZ (e riportano la potenza assorbita semplicemente come dato di targa); si sceglie comunque di esaminare il corrente funzionamento del sistema motore-ventilatore per verificare l'affidabilità delle schede tecniche (generalmente datate) e per omogeneità di trattazione con le procedure successive contenute nel Capitolo 5 (in cui il punto di funzionamento del ventilatore viene opportunamente modificato).

Nel presente calcolo vengono ignorate le CDZ secondarie, il cui contributo risulta trascurabile a causa delle potenze assorbite decisamente ridotte (come nel caso dei condizionatori di precisione di CED e SCL) o del funzionamento fortemente discontinuo nel tempo (unità a servizio della Sala Refrigerazione e del Locale Saldatura).

Allo stato attuale, con gli impianti di climatizzazione in regime discontinuo comunque attivi durante la quasi totalità dell'anno (ferie escluse), l'energia elettrica nel suo contributo variabile e quella nel suo contributo fisso sono sostanzialmente equiparabili a livello numerico.

### 4.2.2 Calcolo del rendimento complessivo del sistema

L'energia termica e frigorifera restituita dal risultato del fabbisogno simulato non contemplano i seguenti fenomeni di perdita di efficienza, conteggiati con

**Tabella 4.1:** Potenza assorbita ed energia elettrica annuale consumata dai sistemi ausiliari di ventilazione;  $P_{\text{man}}$  e  $P_{\text{rip}}$  indicano rispettivamente le potenze elettriche dei ventilatori di mandata e di ripresa dell'aria per ogni CDZ. Si ricordi che RFX possiede più del doppio del volume di ambienti climatizzati rispetto a Uffici.

CDZ	$P_{\text{man}}$ [kW]	$P_{\text{rip}}$	$E_{\text{e,fis}}$	$E_{\text{e,var}}$ [MWh]	$E_{\text{e,tot}}$
1	2,2	0,8			
6	2,2	2,2	0,0	87,2	87,2
2	2,2	0,8			
3	22,0	11,0			
4P	11,0	5,5			
4T	7,5	3,0	381,1	226,5	607,6
5	7,5	3,0			
Tot	54,6	26,3	381,1	313,7	694,8

dei rendimenti secondo la nomenclatura e le stime presenti nella normativa tecnica di riferimento *UNI TS 11300-2/3* [56, 57] (rispettivamente per il riscaldamento e il raffrescamento):

$\eta_e$ : rendimento di emissione dei terminali d'impianto;

$\eta_r$ : rendimento di regolazione degli impianti;

$\eta_g$ : rendimento di generazione in centrale (per i soli generatori di calore);

$\eta_d$ : rendimento di distribuzione dell'energia termica e frigorifera attraverso la rete di fluidi termovettori.

Il fabbisogno lordo ( $Q_{\text{h,tot}}$  e  $Q_{\text{c,tot}}$ ), ovvero quello riscontrabile all'atto della misurazione presso i contabilizzatori di energia localizzati presso le centrali di Area, si ottiene semplicemente dividendo il fabbisogno netto dell'edificio ( $Q_{\text{h,tot}}^*$  e  $Q_{\text{c,tot}}^*$ , output della simulazione) per i vari rendimenti citati, secondo la Relazione (4.1); nella formulazione si include il rendimento

complessivo  $\eta$ , prodotto dei singoli rendimenti:

$$Q_{h(c),tot} = \frac{Q_{h(c),tot}^*}{\eta_e \cdot \eta_r \cdot \eta_d \cdot \eta_g} = \frac{Q_{h(c),tot}^*}{\eta} \quad (4.1)$$

- $\eta_e$ : i terminali di impianto, come ampiamente trattato, sono sia di tipo idronico che ad aria. Per i ventilconvettori degli Uffici le norme suggeriscono il valore di 0,94 in regime di riscaldamento e di 0,98 in raffrescamento. Per griglie e bocchette di RFX, in regime di raffrescamento è semplicemente 0,97, mentre in regime di riscaldamento il valore è in funzione dell'altezza dei locali: il valore finale di 0,91, risultato della media pesata dei valori di rendimento per l'altezza dei locali, è tuttavia analogo al valore rappresentativo dei locali con sviluppo a tutta altezza (che costituiscono oltre il 75% del volume riscaldato di RFX);
- $\eta_r$ : la regolazione dei terminali idronici è affidata a controllori ambiente modulanti (rendimento 0,95 in riscaldamento e 0,96 in raffrescamento), mentre per gli impianti a tutta aria le regolazioni sono di tipologia più semplice (*on-off* e ricircolo della portata), ma gestite in modo autonomo e variabile da parte degli addetti: si sceglie di utilizzare il valore 0,94 per entrambi i regimi di climatizzazione;
- $\eta_g$ : per il rendimento medio stagionale nella generazione del calore si può fare riferimento alla sezione apposita del Capitolo 2 riguardante l'audit energetico (si veda nello specifico la Tabella 2.4a);
- $\eta_d$ : essendo la rete di distribuzione di Area particolarmente complessa e notevolmente estesa, si propone un approccio di tipo alternativo alla normativa, necessariamente molto più sofisticato: l'analisi è basata sulla determinazione approssimata del fenomeno di scambio termico tra l'acqua che attraversa le condotte e il terreno in cui sono posate.

Per un cilindro cavo di materiale omogeneo, con conducibilità termica  $\lambda$  [W/(m · K)], lunghezza assiale  $l$  [m], raggio interno  $r_1$  [m] (soggetto a temperatura  $T_1$  [K]) ed esterno  $r_2$  ( $T_2$ ), la soluzione dell'equazione di conduzione termica offre come risultato  $q_d$ , il flusso di calore attraverso lo strato cilindrico semplice [W] (4.2) [12, p. 47]:

$$q_d = \frac{T_1 - T_2}{\frac{1}{2\pi l \lambda} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (4.2)$$

Volendo impiegare tale modello per le condotte della rete di distribuzione, basta far corrispondere  $T_1$  e  $T_2$  alle temperature dell'acqua e del terreno,  $r_1$  e  $r_2$  al raggio interno della tubatura (in corrispondenza dell'inizio e della fine dello strato di coibentazione<sup>3</sup>); aggiungendo il fenomeno di scambio convettivo dell'acqua, ci si riconduce similmente all'espressione contenuta in Relazione (4.3):

$$q_d = \frac{T_1 - T_2}{\frac{1}{2\pi l \lambda} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{2\pi r_1 l h}} \quad (4.3)$$

in cui  $h$  è il coefficiente di scambio convettivo dell'acqua che scorre nel tubo [W/(m<sup>2</sup> · K)]. Le grandezze costanti e facilmente reperibili sono contenute nella Tabella 10a in Appendice B, mentre le rimanenti sono di derivazione più laboriosa e, generalmente, variabili nel tempo:

$T_1$ : la temperatura dell'acqua all'interno del tubo possiede inizialmente un valore pari alla temperatura di mandata registrata presso la centrale ( $T_{\text{man}}$ ) e varia in modo prevedibile in funzione del carico termico (o frigorifero) che l'edificio necessita secondo il risultato

---

<sup>3</sup>Volendo impiegare il modello di strato cilindrico semplice, si ignora lo spessore della tubatura vera e propria, in quanto la resistenza termica alla conduzione dell'acciaio nero di cui è composta è di un paio di ordini di grandezza inferiore a quella dello strato isolante [33].

della simulazione; si tratta di risolvere, ora per ora, i seguenti bilanci energetici:

$$T_{1,h} = T_{man} - \frac{q_{h,sim}}{\dot{m} \cdot c_p}$$

$$T_{1,c} = T_{man} + \frac{q_{c,sim}}{\dot{m} \cdot c_p}$$

$T_2$ : la temperatura del terreno intorno alle condotte varia in modo continuo nel tempo, con un andamento sinusoidale smorzato e sfasato rispetto alla temperatura dell'aria esterna (si veda il grafico esplicativo di Figura 10c in Appendice B, calcolato per il caso in esame su base giornaliera). Come accennato nel Capitolo 3, TRNSYS permette di ottenerne i valori orari in funzione della media annuale della temperatura esterna, dell'ampiezza tra il valore massimo e il valore medio e del numero di giorni tra l'inizio dell'anno e il giorno in cui si raggiunge il valore minimo; gli altri parametri coinvolti nel calcolo sono la densità, la conducibilità termica e il calore specifico del terreno, oltre alla profondità a cui sono posizionate le condotte;

h: è certamente il parametro più complesso da ricavare, nonché quello in cui risiedono le maggiori approssimazioni rispetto al comportamento reale del sistema; per la presente trattazione si sceglie di seguire la procedura contenuta nei testi di riferimento internazionale per la trasmissione del calore [29, 30]. Per convezione forzata, torna utile l'espressione semplificata di *Dittus-Boelter* in Relazione (4.4):

$$h = \frac{\lambda_w}{d_h} \cdot Nu \quad (4.4)$$

in cui  $\lambda_w$  è semplicemente la conducibilità termica dell'acqua,  $d_h$  è

il diametro idraulico della tubatura [m] (che per una condotta circolare risulta pari al diametro interno) e  $Nu$  indica il numero di Nusselt del fluido nelle condizioni operative. Si può dimostrare che tale numero, in regime di deflusso laminare (si vedano i valori del numero di Reynolds in Tabella 10b presente in Appendice B), è essenzialmente approssimabile con una costante; per la sua stima, in condizioni di scambio di calore con temperatura superficiale della tubatura costante, circostanza verosimile nella presente situazione, la letteratura concorda nel suggerire semplicemente il valore di 3,66.

Occorre osservare che le proprietà dei fluidi e dei materiali, oltre a variare nel tempo, sono tipicamente funzione della temperatura: nel caso dell'acqua, per il calcolo della densità, della conducibilità termica, della viscosità dinamica e del calore specifico a pressione costante, si impiega il software commerciale “*REFPROP*” distribuito dall'agenzia governativa statunitense *National Institute of Standards and Technology* (NIST) [88]. La dipendenza relativa alla pressione è invece decisamente meno marcata e risulta dunque poco significativa, perlomeno per il campo di valori raggiunto nella rete di distribuzione (in base alla prevalenza massima offerta dalle pompe di circolazione,  $p_{\max} = 30 \text{ m c.a.} \approx 300 \text{ kPa}$ ).

La Relazione (4.3) è pertanto determinabile ora per ora tramite foglio elettronico: la somma dei flussi termici annuali tra acqua e terreno costituisce le perdite per il sistema di distribuzione ( $Q_{d,h}$  e  $Q_{d,c}$ , rispettivamente per le condotte alimentate da acqua calda e da acqua refrigerata), di cui si può quindi calcolare il rendimento per mezzo delle Relazioni (4.5):

**Tabella 4.2:** Valori dei rendimenti degli impianti di climatizzazione.

Regime	Tipologia	$\eta_e$	$\eta_r$	$\eta_g$	$\eta_d$	$\eta$
Riscaldamento	Idronico	0,94	0,95	0,931	0,958	0,797
	Tutta aria	0,91	0,94			0,763
Raffrescamento	Idronico	0,98	0,96	-	0,99	0,931
	Tutta aria	0,97	0,94			0,903

$$\eta_{d,h} = \frac{Q_{h,tot}}{Q_{h,tot} + Q_{d,h}} = 0,958 \quad (4.5)$$

$$\eta_{d,c} = \frac{Q_{c,tot}}{Q_{c,tot} + Q_{d,c}} = 0,99 \quad (4.6)$$

ovvero il rendimento di distribuzione è il rapporto tra l'energia utile fornita all'edificio e l'energia complessivamente erogata dal sistema di produzione.

Per l'acqua refrigerata si sceglie di mantenere una cifra significativa in meno dopo la virgola, poiché la scarsa differenza di temperatura tra l'acqua stessa e il terreno (mediamente non più di 3 K) spinge il presente modello verso valori prossimi all'unità: per non ammettere risultati troppo ottimistici, derivati dalle necessarie semplificazioni intrinseche in questo tipo di calcolo, si sceglie di troncare la terza cifra significativa del rendimento per mantenere un margine di sicurezza e non sottodimensionare le perdite.

Nella Tabella 4.2 sono riassunti i valori dei rendimenti esaminati nella presente sezione: come è lecito attendersi, l'efficienza degli impianti operativi in regime di raffrescamento è generalmente più elevata rispetto a quelli in riscaldamento (del 15% circa sia per gli impianti ad aria primaria che per quelli a tutta aria).

### 4.3 Prestazioni energetiche simulate

I consumi di energia ottenuti dall'elaborazione dei risultati delle simulazioni dinamiche di IGI-RFX sono riassunti in Tabella 4.3; esaminando i valori medi dei fabbisogni annuali, è possibile in via preliminare effettuare delle osservazioni di tipo quantitativo:

- il fabbisogno totale di energia termica è lievemente superiore (+10%) rispetto a quello di energia frigorifera;
- il fabbisogno di energia termica dell'aggregato Uffici è decisamente superiore (+95%) rispetto a quello di RFX;
- il fabbisogno di energia frigorifera dell'aggregato Uffici è di poco inferiore (-25%) rispetto a quello di RFX.

Nonostante la volumetria climatizzata inferiore, l'aggregato Uffici risulta sensibilmente più energivoro di RFX: per quanto riguarda il riscaldamento, ciò si verifica sostanzialmente a causa della maggior incidenza della ventilazione (dovuta alla maggior presenza del personale nei locali) e al set point della temperatura più alto (25 °C); per il raffrescamento estivo la situazione risulta mitigata dal fatto che Uffici è climatizzato solamente da maggio a settembre, con la stessa temperatura di set point di RFX (22 °C).

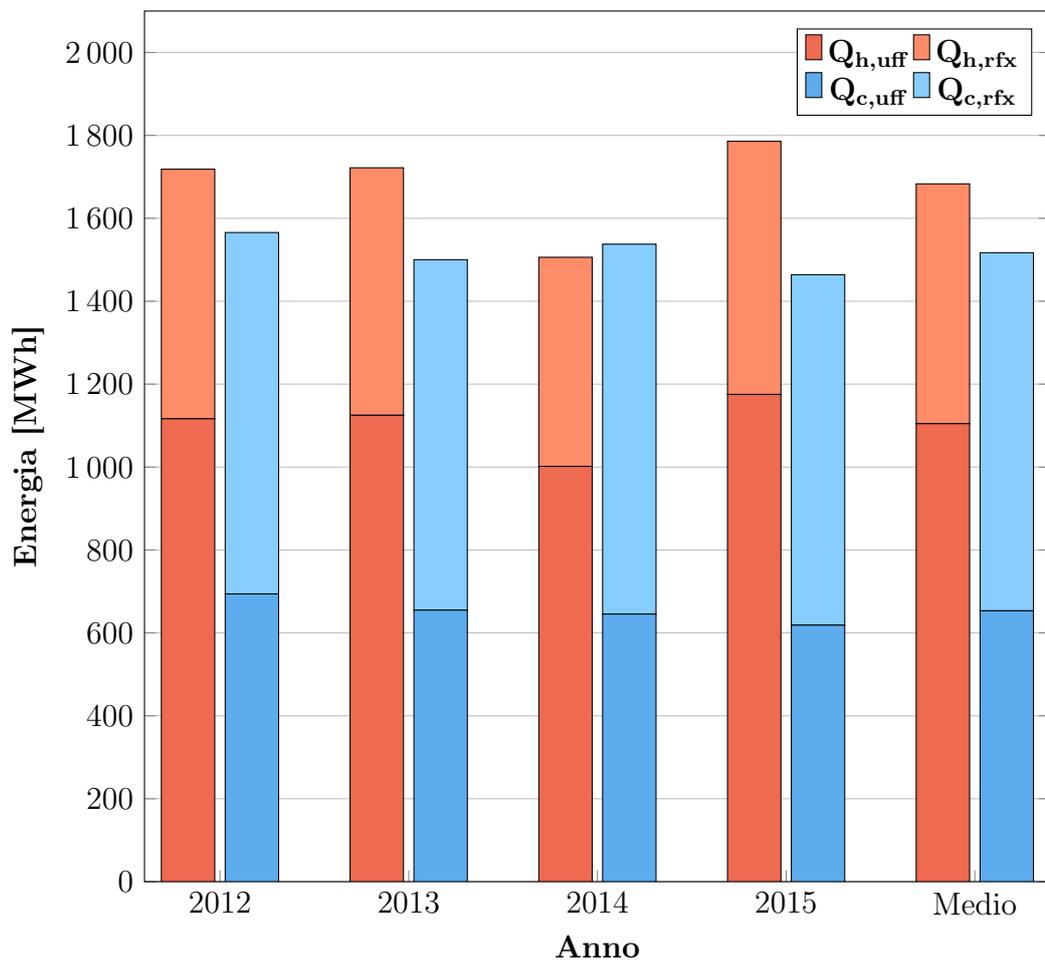
#### 4.3.1 Confronto con i dati contabilizzati

Il confronto con i dati di consumo contabilizzati presenti nel Capitolo 2 permette di valutare l'effettiva affidabilità del modello numerico di IGI-RFX: quanto più simile è il riscontro sulla situazione attuale, tanto più accurate risulteranno le stime dei risparmi energetici conseguibili tramite gli interventi di riqualificazione.

Si ricorda che lo scostamento, per definizione, è calcolato con la semplice differenza tra il valore reale di una grandezza e il suo valore misurato (in

**Tabella 4.3:** Risultati dell'elaborazione dati della simulazione dinamica.**(a)** Fabbisogni annuali simulati di Uffici e RFX.

Anno	$Q_{h,uff}$	$Q_{h,rfx}$	$Q_{h,tot}$	$Q_{c,uff}$	$Q_{c,rfx}$	$Q_{c,tot}$
	[MWh]					
2012	1116,5	602,0	1718,5	694,0	871,7	1565,7
2013	1125,0	596,9	1721,7	655,0	845,2	1500,2
2014	1001,8	504,2	1506,0	645,5	892,1	1537,6
2015	1175,2	610,6	1785,8	618,7	845,3	1464,0
Medio	1104,7	578,4	1683,0	653,3	863,7	1516,8

**(b)** Grafico dei fabbisogni annuali simulati divisi per aggregato.

questo caso, la differenza tra valore contabilizzato e simulato); per quanto riguarda lo scarto medio campionario, esso si ottiene come segue:

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|}{n}$$

in cui  $x_i$  sono i campioni (in questo caso, i singoli scostamenti) e  $\bar{x}$  il loro valore medio (con segno);  $n$  altro non è che il numero dei campioni (pari al numero di anni simulati).

Il risultato del confronto è visibile in Tabella 4.4 e nei relativi istogrammi di Figura 4.1: a livello annuale lo scarto medio è inferiore al 7% per quanto riguarda il fabbisogno di riscaldamento e del 5% per quanto riguarda il raffrescamento. Il valore massimo dello scostamento per il riscaldamento si presenta nel 2014 (circa il 14% in eccesso per i dati simulati), la cui causa è da riscontrarsi nell'occasionale assenza di richiesta di energia termica da parte di alcuni edifici di Area; il massimo dello scostamento frigorifero si realizza invece nel 2012 (11% in difetto per i dati simulati), ma il suo valore è sufficientemente contenuto da rientrare nel livello di approssimazione intrinseco al modello numerico e all'audit energetico, senza che ci sia la necessità di ricercarne eventuali cause.

In ogni caso, la disparità tra dati effettivi e simulati è decisamente ridotta: il modello numerico può ritenersi abbondantemente convergente per un sistema edificio-impianto di tale complessità e, di conseguenza, la simulazione dinamica risulta favorevolmente calibrata per gli scopi successivi della trattazione.

### 4.3.2 Profili di consumo

L'importante mole di lavoro necessaria a completare le simulazioni di quattro annate di fabbisogni termici e frigoriferi di IGI-RFX (rispetto ad un approccio

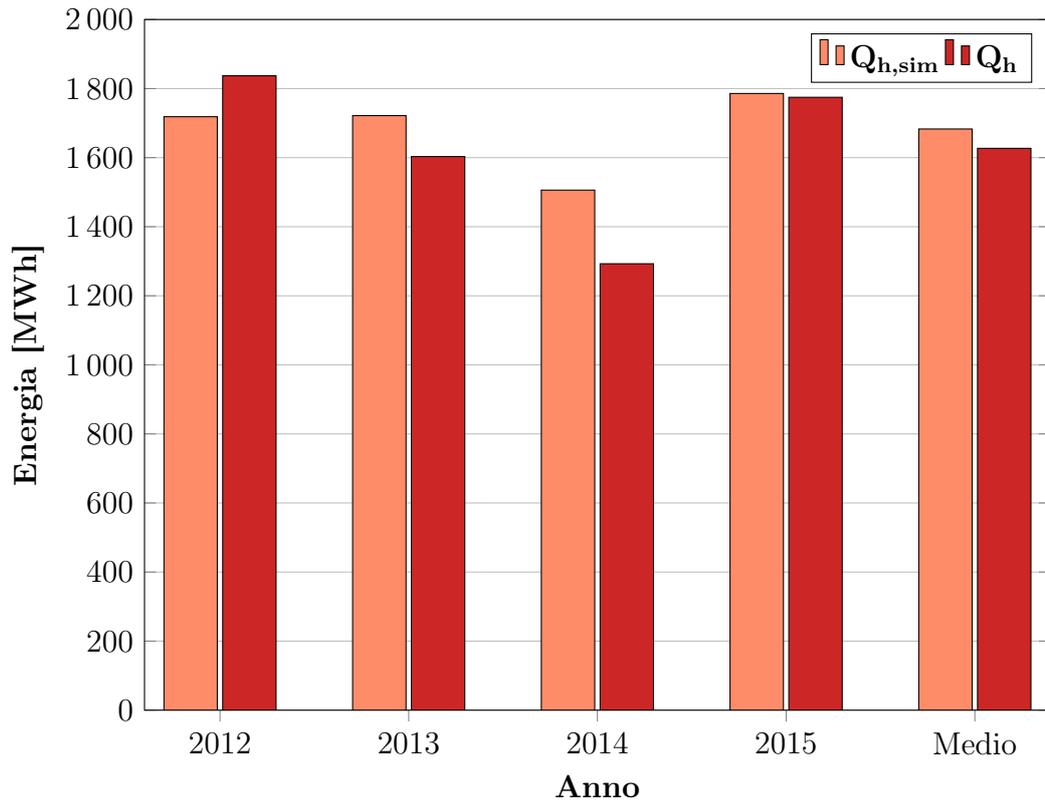
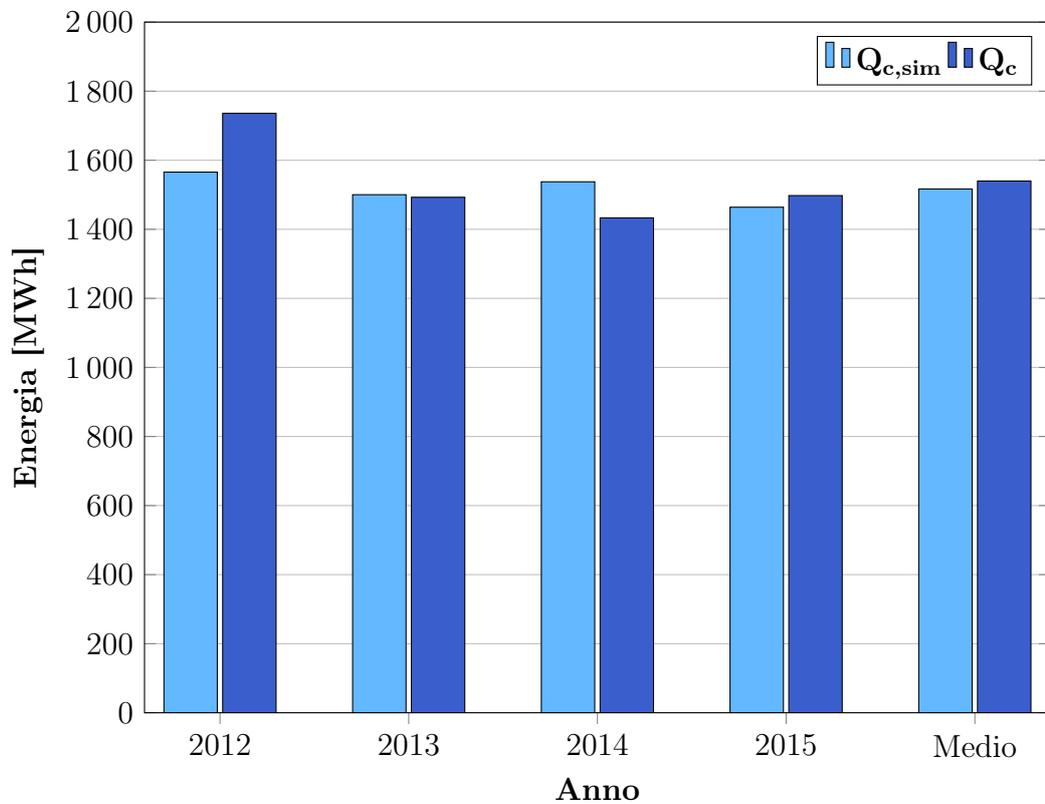
(a) Fabbisogno termico simulato ( $Q_{h,sim}$ ) e contabilizzato ( $Q_h$ ).(b) Fabbisogno frigorifero simulato ( $Q_{c,sim}$ ) e contabilizzato ( $Q_c$ ).

Figura 4.1: Grafici dei fabbisogni energetici annuali simulati e contabilizzati.

**Tabella 4.4:** Confronto tra fabbisogni di energia annuali simulati ( $Q_{h(c),sim}$ ) e contabilizzati ( $Q_{h(c)}$ ).

Anno	$Q_{h,sim}$ [MWh]	$Q_h$	$S_h$ [%]	$Q_{c,sim}$ [MWh]	$Q_c$	$S_c$ [%]
2012	1837,2	1718,5	6,9	1735,9	1565,7	10,9
2013	1603,2	1721,7	-6,9	1492,8	1500,2	-0,5
2014	1292,8	1506,0	-14,2	1433,1	1537,6	-6,8
2015	1774,8	1785,8	-0,6	1497,7	1464,0	2,3
Medio	1683,0	1627,0	-3,7	1516,8	1539,8	1,5
$\delta$			6,4			5,1

tramite TRY) viene premiata nel calcolo dei profili di consumo mensile: come si può osservare in Tabella 4.5 e nei grafici contenuti in Figura 4.2, l'andamento dei consumi mensili simulati rispecchia in modo decisamente fedele quello dei consumi derivati dall'audit (linee tratteggiate), specialmente per quanto riguarda il fabbisogno termico<sup>4</sup>. Il fabbisogno frigorifero viene invece leggermente sovrastimato durante i mesi più freddi e sottostimato durante quelli più caldi, pur conservando un andamento complessivo conforme con quello reale.

Il vantaggio dell'approccio pluriennale è peraltro evidente nel grafico dell'anno medio: il risultato della media annuale livella le locali discontinuità di consumo dovute alla variegata numerosità di fattori difficilmente determinabili in modo opportuno nel modello (a causa dell'irreperibilità dei dati, della mancanza di informazioni e della naturale improponibilità di approssimare IGI-RFX con un modello fisico oltremodo complicato). Si può pertanto affermare che le simulazioni interpretano correttamente i consumi di IGI-RFX non soltanto su base annuale, ma anche su base mensile (con un livello di precisione necessariamente inferiore, ma comunque discreto).

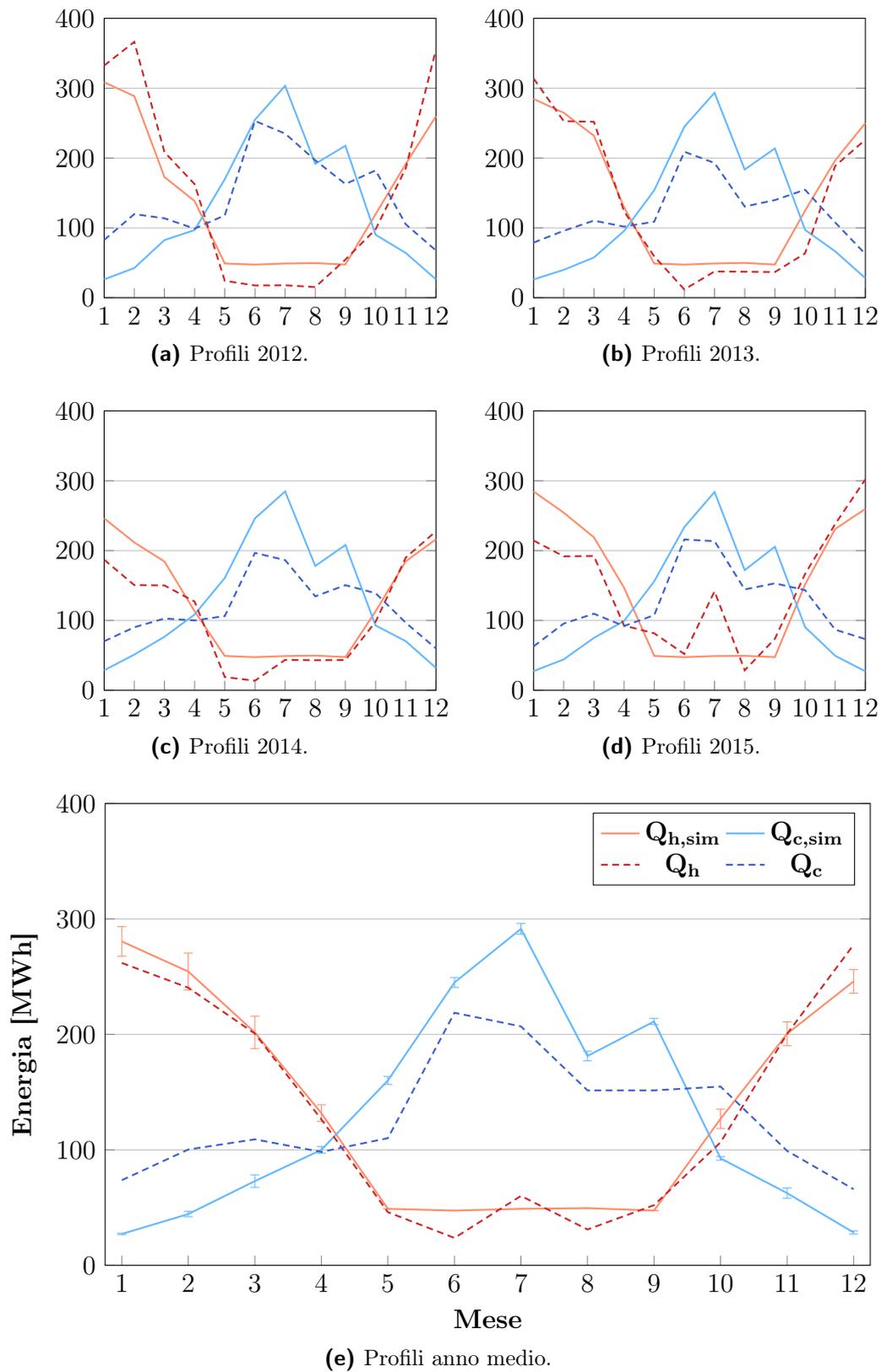
<sup>4</sup>Questo perché l'energia termica contabilizzata in Centrale viene esclusivamente dedicata agli impianti di climatizzazione, mentre l'energia elettrica impiegata ai fini del raffrescamento rappresenta soltanto una minima frazione di quella consumata nell'Area.

**Tabella 4.5:** Profili di consumo di energia ottenuti tramite simulazione dinamica.**(a)** Profili simulati di consumo di energia termica.

Mese	2012	2013	2014	2015	Medio
[MWh <sub>t</sub> ]					
Gen	307,9	284,1	245,7	284,2	280,5
Feb	288,1	264,3	211,3	253,8	254,4
Mar	172,5	231,6	184,0	218,5	201,7
Apr	138,1	129,4	112,9	146,6	131,8
Mag	48,9	48,9	49,0	49,0	48,9
Giu	47,4	47,4	47,4	47,4	47,4
Lug	48,9	48,9	48,9	48,9	48,9
Ago	49,4	49,7	49,6	49,2	49,5
Set	47,4	47,4	47,4	47,4	47,4
Ott	119,4	124,3	112,9	151,1	126,9
Nov	191,1	196,2	184,3	230,4	200,5
Dic	259,3	249,5	215,7	259,2	245,9
GG <sub>i</sub>	2105,6	2412,4	1939,8	2443,1	2225,2
Tot	1718,5	1721,7	1506,0	1785,8	1683,0

**(b)** Profili simulati di consumo di energia frigorifera.

Mese	2012	2013	2014	2015	Medio
[MWh <sub>f</sub> ]					
Gen	26,2	26,1	28,6	27,4	27,1
Feb	42,5	39,9	51,1	44,2	44,4
Mar	82,5	57,6	76,6	75,0	72,9
Apr	96,9	95,5	108,5	99,2	100,0
Mag	169,7	153,8	160,8	156,0	160,1
Giu	254,8	244,9	246,1	233,7	244,9
Lug	303,4	293,4	284,7	283,9	291,4
Ago	191,7	183,5	178,0	172,0	181,3
Set	217,6	213,8	208,0	205,5	211,2
Ott	90,1	97,2	92,7	90,5	92,6
Nov	64,1	66,4	70,3	49,4	62,5
Dic	26,3	28,0	32,1	27,1	28,4
GG <sub>e</sub>	471,5	351,5	224,2	445,7	373,2
Tot	1565,7	1500,2	1537,6	1464,0	1516,8



**Figura 4.2:** Profili mensili simulati di consumo di energia termica e frigorifera di IGI-RFX calcolati per gli anni in esame e consumi mensili medi con relative barre d'incertezza.

**Tabella 4.6:** Consumo specifico annuale simulato per il riscaldamento ( $CS_i$ ) e il raffrescamento ( $CS_e$ ).

<b>(a) Consumo specifico globale.</b>											
Indice	2012		2013		2014		2015		Medio		
	[kWh/m <sup>3</sup> ]										
$CS_{i,sim}$	37,0	37,1	32,5	38,5	36,3						
$CS_{e,sim}$	33,8	32,3	33,1	31,6	32,7						

<b>(b) Consumo specifico per aggregato.</b>											
Indice	2012		2013		2014		2015		Medio		
	Uff	RFX	Uff	RFX	Uff	RFX	Uff	RFX	Uff	RFX	
[kWh/m <sup>3</sup> ]											
$CS_i$	82,3	18,2	82,9	16,8	73,9	15,4	86,7	18,6	81,4	17,3	
$CS_e$	51,2	26,6	48,3	25,7	47,6	27,2	45,6	25,7	48,2	26,3	

### 4.3.3 Indici di prestazione energetica simulati

Così come introdotto per i dati contabilizzati nel Capitolo 2, anche per il fabbisogno simulato si riportano i consumi specifici di energia per valutare le prestazioni energetiche di IGI-RFX (rapportando il fabbisogno annuale simulato per il volume lordo totale dei locali); in questo caso, avendo a disposizione anche i fabbisogni relativi ai singoli aggregati, risulta interessante proporre il consumo specifico separato di Uffici e RFX, in modo da poter trovare nuovamente riscontro di tutte le considerazioni proposte in fase di elaborazione dati. La sintesi dei consumi specifici è consultabile in Tabella 4.6.



# Capitolo 5

## Riqualificazione energetica

La riqualificazione energetica di un edificio consiste nel retrofit tecnologico delle strutture e degli impianti, al fine di razionalizzare il flusso di energia tra l'edificio stesso e l'ambiente. I principali vantaggi di tale operazione sono i seguenti:

- la riduzione dei consumi e il conseguente sgravio economico nella bolletta energetica;
- l'incremento del benessere termoigrometrico percepito dagli occupanti degli ambienti interni;
- il contenimento delle emissioni di gas climalteranti e del loro relativo impatto ambientale;
- la possibilità di ottimizzare la gestione energetica tramite la contabilizzazione del calore;
- l'immediato aumento di valore patrimoniale dell'immobile sul mercato.

Il lavoro di tesi si propone di trattare e valutare i vantaggi ottenibili dall'intervento sull'edificio IGI-RFX, formulando una serie di proposte di retrofit (comprehensive di analisi di fattibilità degli interventi e di stima degli

investimenti finanziari) e misurandone le prestazioni tramite il modello termoenergetico validato del sistema edificio-impianto: la differenza tra la situazione attuale e la situazione post retrofit è, a meno delle incertezze di modello e di procedura, la stima del risparmio energetico conseguibile.

## 5.1 Contesto generale

Nella presente sezione si inquadra l'intervento proposto in questo lavoro nel contesto attuale dell'efficientamento energetico, riprendendone i metodi e gli strumenti fondamentali affinché possano essere quanto più prossimi alle effettive procedure di riqualificazione energetica.

Si propone una sintesi del quadro normativo di riferimento (nazionale ed europeo) e della tipologia di mercato più recentemente affermatasi in ambito di efficienza energetica.

### 5.1.1 Enti e proprietà private

Il quadro legislativo nazionale [71] in tema di efficienza energetica ha origine in seguito alla crisi petrolifera di inizio anni '70, a cui lo Stato italiano risponde tramite la promulgazione della Legge 373/76, di fatto ponendo le basi per la verifica energetica e la successiva procedura di certificazione introdotte con la successiva Legge 10/91. La Direttiva 2002/91/CE dell'Unione Europea dirige successivamente la normativa italiana (Decreto Legislativo 192/2005, 311/2006 e Decreto Ministeriale 26/6/2009 con successivi adeguamenti e modifiche) verso l'efficientamento energetico generale, differenziando regime di riscaldamento e raffrescamento, al fine di contenere il fabbisogno di energia dei sistemi edificio-impianto: si introducono degli indici di consumo specifico di energia primaria (misurati in  $[\text{kWh}/\text{m}^2]$  annuali), si prescrive la

certificazione regolamentata delle prestazioni energetiche e si impongono dei requisiti minimi di efficienza per gli edifici di nuova costruzione.

Tutto ciò vale in modo particolare per edifici a destinazione d'uso residenziale, ma la questione si ripropone in modo parallelo anche in ambito commerciale ed industriale. In ogni caso, il denominatore comune generale, oltre al risparmio energetico e ai fattori precedentemente citati, è costituito dalla varietà dei meccanismi di incentivo e sgravio fiscale riguardanti gli investimenti finanziari per le opere di riqualificazione (si possono citare, esclusivamente a titolo di esempio, i Titoli di Efficienza Energetica o il cosiddetto Conto Termico).

### 5.1.2 Pubblica Amministrazione

Anche in contesto pubblico è percepibile la spinta legislativa verso l'efficienza e la razionalizzazione delle risorse energetiche: in particolare, il recente Decreto Legislativo 102/2014 esplicita la proposta di investimento di 355 milioni di € per il periodo 2014-2020 necessaria per il "Programma di Riqualificazione Energetica della Pubblica Amministrazione Centrale" (PREPAC), il cui fine è quello di rendere ogni anno più efficiente almeno il 3% di superficie coperta utile del patrimonio edilizio statale.

L'impegno viene promosso anche a livello di pubbliche relazioni; tra tutte, spicca "Italia in classe A", la prima Campagna Nazionale di informazione e formazione sull'Efficienza Energetica promossa dal Ministero dello Sviluppo Economico e messa in pratica da ENEA: il piano, di durata triennale, prevede un ampio programma di sensibilizzazione, formazione e informazione riguardante l'efficienza energetica, rivolto in particolar modo alle grandi imprese, alle famiglie, agli studenti, agli istituti di credito e alla Pubblica Amministrazione stessa.

### 5.1.3 Energy Service Companies

Le “*Energy Service Companies*” (ESCO) sono società di recente diffusione operanti nell’ambito dell’efficienza energetica: il core business prevede la stipulazione di un contratto con il cliente finale, in modo tale che esso sia svincolato dagli oneri di progettazione, intervento e investimento finanziario. Le particolarità fondamentali del servizio offerto si rendono esplicite nella definizione formale di ESCo, introdotta dalla Direttiva 2006/32/CE e recepita in Italia dal Decreto Legislativo 115/2008<sup>1</sup>:

«Persona fisica o giuridica che fornisce servizi energetici e/o altre misure di miglioramento dell’efficienza energetica nelle installazioni o nei locali dell’utente e, ciò facendo, accetta un certo margine di rischio finanziario. Il pagamento dei servizi forniti si basa sul miglioramento dell’efficienza energetica conseguito e sul raggiungimento degli altri criteri di rendimento stabili.»

A differenza del generico<sup>2</sup> modello d’impresa dei servizi di consulenza energetica, una ESCo presenta dunque dei tratti peculiari (si veda a proposito la Figura 5.1a [70]):

- l’investimento finanziario per gli interventi viene sostenuto dalla ESCo, tramite capitale proprio o tramite intervento di istituti di credito<sup>3</sup>;
- la remunerazione per il servizio offerto si basa sull’effettivo esito degli interventi, per mezzo della riscossione di un canone (fisso o variabile) sul risparmio in bolletta;

---

<sup>1</sup>A cui fa seguito la più recente certificazione nella norma tecnica *UNI CEI 11352* [43].

<sup>2</sup>Di cui si distingue formalmente la denominazione nella stessa Direttiva, tramite l’appellativo *Energy Service Provider Companies*” (ESPC).

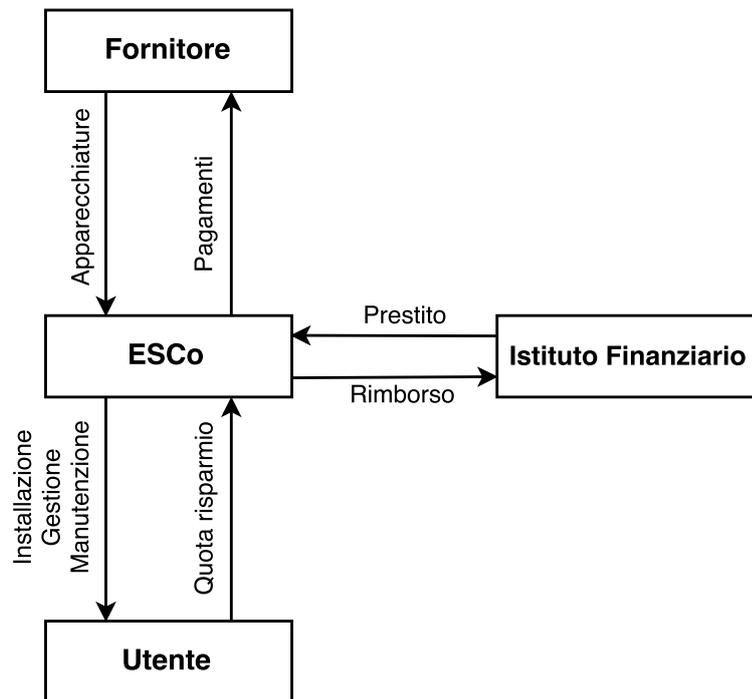
<sup>3</sup>Tale modello finanziario prende il nome di “*Third Party Financing*” (TPF), ovvero Finanziamento Tramite Terzi (FTT).

- il rapporto tra ESCo e cliente viene sancito da un contratto, nel cui oggetto la società fornisce delle garanzie legali (tra tutte, la misura del risparmio energetico conseguibile).

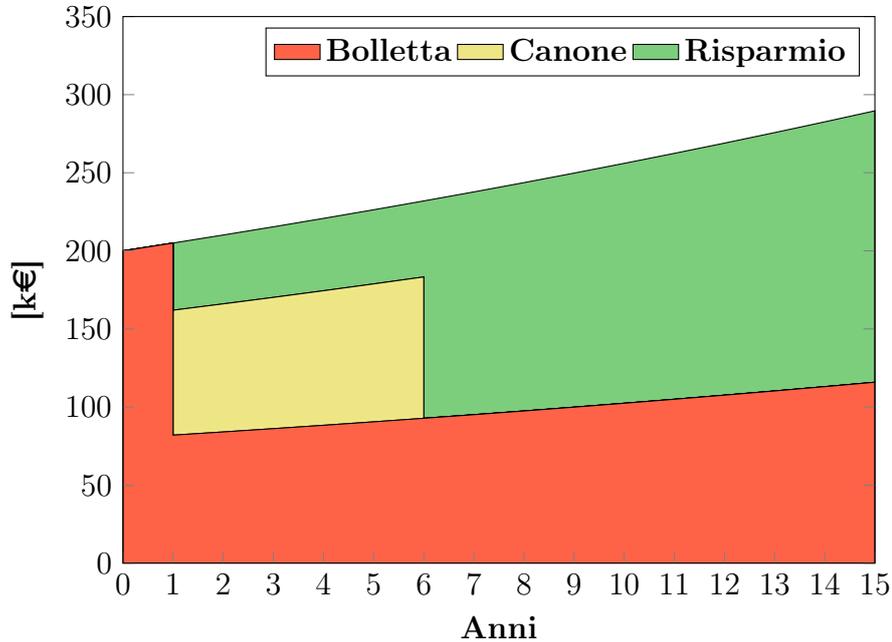
Il Contratto di Prestazione Energetica, o “*Energy Performance Contract*” (EPC) nella terminologia anglosassone, regola pertanto il rapporto tra fornitore di servizi e cliente, indicando gli oneri di entrambe le parti e quantificando i risultati di risparmio previsti, sui quali la ESCo percepisce la propria remunerazione (Figura 5.1b); il compimento dell’accordo si può genericamente riassumere tramite le seguenti azioni:

1. diagnosi energetica;
2. verifica normativa;
3. studio di fattibilità tecnico-economica;
4. progetto esecutivo, finanziamento e messa in opera;
5. gestione e manutenzione degli impianti;
6. monitoraggio, verifica delle prestazioni e del risparmio.

Da tutto ciò si evince chiaramente che una procedura di questo genere, da cui dipendono sia il rischio finanziario che commerciale della ESCo e la soddisfazione del cliente, necessita di un sistema di valutazione del risparmio conseguito quanto più oggettivo e accurato possibile. In questo contesto la verifica tramite IPMVP, come esplicitato nel Capitolo 2, non solo eleva il valore professionale del presente lavoro, ma permette di simulare efficacemente l’intera procedura (almeno fino al limite del caso studio, per i punti 1, 2, 3, 6).



(a) Partner nella realizzazione degli interventi per l'incremento dell'efficienza energetica.



(b) Schema sintetico di un EPC quinquennale a canone fisso (efficienza +60%, rincaro energia +2,5%). Il canone (in giallo) è percepito dalla ESCo come remunerazione dell'investimento, il risparmio (in verde) è il beneficio all'utente.

Figura 5.1: Modello di business per l'efficienza energetica delle ESCo.

## 5.2 Energy Conservation Measures

Con “*Energy Conservation Measures*” (ECMs) si definiscono tutte le attività volte a incrementare l’efficienza energetica di un sistema edificio-impianto, generalmente tramite l’intervento sul sistema stesso (riqualificazione edilizia e impiantistica) oppure mediante la razionalizzazione delle risorse e delle abitudini delle persone al suo interno.

Nel prosieguo del lavoro si separano convenientemente le tipologie di intervento, poiché il contratto di comodato d’uso di IGI tra CNR e Consorzio RFX prevede che la gestione e la manutenzione (ordinaria e straordinaria) delle macchine HVAC e degli impianti strettamente collegati sia di competenza del Consorzio stesso; l’intervento sull’involucro edilizio spetta invece al CNR.

Pur essendo IGI-RFX un edificio a consumo specifico relativamente elevato (media annuale di 35,1 kWh/m<sup>3</sup> e 33,2 kWh/m<sup>3</sup> rispettivamente in regime di riscaldamento e raffrescamento, come calcolato a partire dalle bollette nel Capitolo 2), dal punto di vista dell’involucro edilizio non può considerarsi di certo scadente: i serramenti e le tenute sono di buona qualità e in discreto stato di conservazione, mentre le murature e i solai (in particolar modo quelli di copertura) possiedono trasmittanze termiche relativamente contenute, perlomeno se confrontate con il resto del parco edilizio dell’Area (edifici più vetusti di oltre un decennio rispetto a IGI-RFX, gran parte dei quali di natura modulare-prefabbricata senza nessun accorgimento per l’isolamento termico).

In attesa della costruzione e dell’ingresso a regime del nuovo edificio laboratori del CNR, che in linea di massima ospiterà gran parte degli Istituti che oggi risiedono negli edifici modulari, si sceglie di concentrare l’attenzione sull’aspetto impiantistico di IGI-RFX, non essendo l’intervento sull’involucro attualmente una priorità.

### 5.2.1 Proposte di intervento

Il limite principalmente evidente del regime di climatizzazione di IGI-RFX è il funzionamento continuo delle macchine HVAC e di tutti i relativi ausiliari, 24 ore su 24, per tutta la settimana (8760 ore annuali<sup>4</sup>): i terminali ad acqua e, soprattutto, le batterie per il trattamento dell'aria, si trovano ad elaborare oltre il 75% dell'energia complessiva durante la settimana per mantenere in condizioni di comfort termico locali non occupati. Se per certe situazioni, come visto, ciò rappresenta una necessità (sala macchine e sale dotate di strumentazioni e diagnostiche igroscopicamente sensibili), per il resto si tratta certamente di una fonte di inefficienza (parzialmente giustificata dalla complessità di garantire le condizioni di comfort da parte delle macchine stesse in regime di funzionamento discontinuo).

I livelli di intervento possono dunque essere così numerati, con la discriminante di sostituire o meno le CDZ obsolete:

1. parzializzazione moderata del regime di climatizzazione (da orario continuo a feriale);
2. parzializzazione completa del regime di climatizzazione (da orario continuo a orario lavorativo giornaliero).

Il primo livello è di tipo conservativo e viene esaminato per contenere momentaneamente i costi, preservando quanto più possibile lo *status quo*, non potendo garantire l'efficienza delle macchine durante i continui transitori di accensione<sup>5</sup> (le macchine più fatiscenti non possiedono una regolazione sufficientemente accurata né offrono garanzie di prestazioni stabili).

---

<sup>4</sup>Fatta eccezione per l'occasionale spegnimento di alcune macchine durante i periodi di ferie e manutenzione programmata o straordinaria.

<sup>5</sup>Dato il prolungato fermo macchine, si deve anche tenere conto dei tempi necessari ad esaurire il transitorio verso le condizioni di comfort, anticipando opportunamente l'accensione prima dell'inizio dell'orario lavorativo (anticipo calcolato variabile da input esterno, in genere non più di 2 h).

Il secondo livello lascia decisamente più libertà di manovra, pertanto ad esso si possono aggiungere dei sottolivelli di intervento volti ad aumentare sensibilmente l'efficienza complessiva degli impianti:

- 2a.** esclusione del circuito idronico dei ventilconvettori dell'aggregato Uffici a locali non occupati;
- 2b.** installazione di *inverter* per la regolazione della portata d'aria elaborata dalle CDZ dell'aggregato RFX<sup>6</sup>;
- 2c.** adeguamento delle condizioni termoigrometriche ai livelli di riferimento della normativa attuale.

Si osservi che l'esclusione del circuito idronico dei ventilconvettori (soluzione 2a), da realizzarsi tramite sei elettrovalvole di bypass, non è da sola sufficiente per interromperne il funzionamento: per garantirne lo spegnimento completo si deve intervenire tramite un interruttore temporizzato programmabile presso ognuno dei sei quadri elettrici di zona (uno per ogni piano di R1 e R4, dotati di circuito indipendente dedicato alle alimentazioni di suddetti terminali).

I convertitori statici di frequenza (soluzione 2b), comunemente denominati *inverter*, sono dei dispositivi impiegati per regolare la velocità di rotazione dei motori trifase, essendo la velocità stessa diretta funzione della frequenza di alimentazione elettrica. L'utilizzo dell'*inverter* nelle macchine per il trattamento dell'aria permette dunque di spostare convenientemente il punto di funzionamento dei ventilatori centrifughi, sgravando così il carico del motore in regime di parzializzazione, semplicemente abbassando il numero di giri. Tenendo presente che la potenza elettrica assorbita dai ventilatori delle CDZ è pari alla quasi totalità della potenza elettrica assorbita da tutti gli ausiliari d'impianto (si veda nuovamente il Capitolo 4 a proposito),

---

<sup>6</sup>Il retrofit delle CDZ dell'aggregato Uffici prevede l'installazione di macchine già comprensive di *inverter*.

l'installazione degli inverter presso le pompe di circolazione non sembra altrettanto prioritaria e viene rimandata ad indagini successive.

Si segnala che in sede di sopralluogo, in collaborazione con il personale incaricato dell'azienda Johnson Controls Systems and Service Italy Srl di Cadoneghe (PD), viene scartata l'ipotesi di inserire delle sezioni di ripresa (dove non originariamente previste) per l'impiego di recuperatori di calore: se da un lato per le macchine dell'aggregato Uffici la causa è la mancanza di spazio all'interno dei locali tecnici, dall'altro lato per le CDZ dell'aggregato RFX si prende atto delle complessità impiantistiche e dell'onerosità eccessiva dell'installazione (ricordando che il regime di ricircolo è decisamente elevato e che si tratta, in ogni caso, di macchine risalenti al 2001).

L'intervento 2c prevede l'abbassamento delle temperature di set point per i locali serviti da terminali idronici (aggregato Uffici). Si impongono i valori al limite della soglia di tolleranza stabiliti nel Decreto del Presidente della Repubblica 74/2013 [16]: 22 °C in regime di riscaldamento e 24 °C in regime di raffrescamento. Il DPR specifica inoltre il limite di esercizio degli impianti termici per la climatizzazione invernale, pari a 14 ore giornaliere per edifici ubicati in zona climatica E: la soluzione 2c può essere pertanto considerata pienamente compatibile con le direttive attuali.

### 5.2.2 Preventivo di spesa

La parzializzazione del regime di funzionamento delle CDZ si realizza tramite l'inserimento di un comando di marcia/arresto per le unità ventilanti, collegato a un interruttore temporizzato programmabile (Tabella 5.1): la soluzione prevede, oltre all'acquisto dei dispositivi, un semplice quadro di controllo (contabilizzato globalmente nel prezzo del comando) e l'installazione da parte di un tecnico qualificato; per la CDZ 1 si rende necessaria l'installazione di due moduli aggiuntivi, oltre a quello in centrale, essendo dotata di due

**Tabella 5.1:** Preventivo di massima per l'intervento di primo livello.

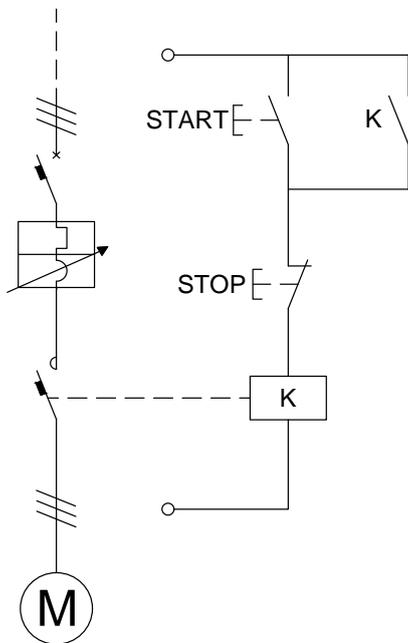
CDZ	Tipologia	Marca	Cod.	Q.	P. un.	P. tot. [€]
1	Comando M/A	-	-	3	250,00	750,00
	Temporizzatore	Siemens	7LF4521-0	3	138,23	414,69
	Interfaccia	Siemens	7LF4941-0	1	221,35	221,35
	Installazione	-	-	3 h	30,00	90,00
2, 6	Comando M/A	-	-	2	250,00	500,00
	Temporizzatore	Siemens	7LF4521-0	2	138,23	276,46
	Installazione	-	-	2 h	30,00	60,00
RFX	Temporizzatore	Siemens	7LF4521-0	4	138,23	138,23
	Installazione	-	-	2 h	30,00	60,00
						<b>3231,73</b>

torrini di estrazione (la macchina lavora in sola mandata).

Si sceglie in via cautelativa di non applicare il regime parzializzato ai locali con apparecchiature critiche dal punto di vista termoigrometrico, ovvero tutto il corpo R5 (CDZ 3), la Sala Controllo Locale in R6 (CDZ 6), la Sala Controllo Centrale in R3 (tre condizionatori di precisione) e il Centro Elaborazione Dati in R4 (due condizionatori di precisione).

Tutti i prezzi riportati derivano dai cataloghi dei produttori [62, 63] e/o da offerte commerciali richieste (al netto degli sconti sulle quantità della fornitura), mentre l'imposta sul valore aggiunto (IVA) viene calcolata direttamente sul totale dell'intervento; i dispositivi non a catalogo, il materiale di consumo non indicato e la manodopera sono stimati secondo il Prezzario del Comune di Padova (aggiornamento 2015), arrotondando all'intero superiore dopo l'adeguamento secondo l'indice di inflazione media annuale.

La sostituzione delle CDZ dell'aggregato Uffici, in ogni caso, è decisamente consigliabile: se non per motivi di carattere energetico, almeno per altrettanto validi motivi di carattere tecnico (pena il fuori servizio nel breve periodo). L'opportunità di installare macchine dotate di tecnologia allo stato dell'arte consente inoltre di implementare più facilmente le strategie di primo livello (sono necessari i soli temporizzatori per le CDZ degli Uffici, così come



(a) Schema semplificato del comando M/A (con dispositivo di protezione dalle sovracorrenti e contattore).

(b) Interruttore temporizzato programmabile.



(c) Convertitori statici di frequenza per impiego HVAC.

**Figura 5.2:** Dispositivi per gli interventi di riqualificazione energetica.

accade già per quelle di RFX); l'elenco incrementale degli interventi per ogni sottolivello si trova in Tabella 5.2. All'atto pratico il sottolivello 2c non prevede spese ulteriori rispetto a 2b e ne viene dunque omessa la descrizione.

## 5.3 Measurement & Verification

### 5.3.1 Energy Savings

Si impiega il modello termoeconomico di IGI-RFX precedentemente validato per la simulazione degli interventi di riqualificazione, riportando la baseline (0) a titolo di confronto (Tabella 5.3); si inseriscono i valori calcolati caso per caso per quanto riguarda la media annuale, mentre per l'elenco completo annuale (Tabella 11) e gli output orari della simulazione si invita a consultare l'Appendice C. Si noti che la soluzione 2b, agli effetti del calcolo da parte di TRNSYS, è perfettamente equivalente alla 2a.

I risultati del calcolo offrono degli interessanti spunti di riflessione:

- la soluzione conservativa (1) permette di ridurre del 15% il fabbisogno complessivo di energia termica e dell'8% quello di energia frigorifera;
- la parzializzazione completa del regime di climatizzazione e il bypass del circuito dei ventilconvettori (2a) porta il risparmio termico a sfiorare il 50% (con un contributo al risparmio confrontabile per Uffici e RFX), mentre quello frigorifero si assesta sul 23% (in questo caso, il vincolo delle CDZ critiche di RFX penalizza chiaramente il risparmio);
- a parità di fattori con il punto precedente, il solo adeguamento delle temperature di set point (2c) porta con sé un ulteriore risparmio di circa il 7% in regime di riscaldamento (oltre 100 MWh) e del 3% in regime di raffrescamento (poco meno di 50 MWh).

**Tabella 5.2:** Preventivo di massima per gli interventi di secondo livello. La linea tratteggiata separa gli interventi di competenza del Consorzio RFX e quelli del CNR.

<b>(a) Sottolivello 2a.</b>							
CDZ	Tipologia	Marca	Cod.	Q.	P. un.	P. tot. [€]	
1	Sost. CTA	YORK	AHU 4,30	1	15 472,48	15 472,48	
	Inverter	Siemens	6SL3223(3)	3	1698,82	5096,46	
	Temporizzatore	Siemens	7LF4521-0	3	138,23	414,69	
	Interfaccia	Siemens	7LF4941-0	1	221,35	221,35	
	Installazione	-	-	3 h	30,00	90,00	
2	Sost. CTA	YORK	AHU 4,30	1	13 253,13	13 253,13	
	Temporizzatore	Siemens	7LF4521-0	2	138,23	276,46	
	Installazione	-	-	3 h	30,00	90,00	
6	Sost. CTA	YORK	AHU 6,00	1	19 922,26	19 922,26	
	Temporizzatore	Siemens	7LF4521-0	1	138,23	138,23	
	Installazione	-	-	3 h	30,00	90,00	
RFX	Temporizzatore	Siemens	7LF4521-0	1	138,23	138,23	
	Installazione	-	-	2 h	30,00	60,00	
						<b>67450,39</b>	
	Elettrovalvola	-	-	6	312,00	936,00	
	Temporizzatore	Siemens	7LF4521-0	9	138,23	1244,07	
	Materiale	-	-	-	-	1000,00	
	Installazione	-	-	8 h	30,00	240,00	
						<b>4172,49</b>	
<b>(b) Sottolivello 2b.</b>							
CDZ	Tipologia	Marca	Cod.	Q.	P. un.	P. tot. [€]	
1	Sost. CTA	YORK	AHU 4,30	1	15 472,48	15 472,48	
	Inverter	Siemens	6SL3223(3)	3	1698,82	5096,46	
	Temporizzatore	Siemens	7LF4521-0	3	138,23	414,69	
	Interfaccia	Siemens	7LF4941-0	1	221,35	221,35	
	Installazione	-	-	3 h	30,00	90,00	
2	Sost. CTA	YORK	AHU 4,30	1	13 253,13	13 253,13	
	Temporizzatore	Siemens	7LF4521-0	2	138,23	276,46	
	Installazione	-	-	3 h	30,00	90,00	
6	Sost. CTA	YORK	AHU 6,00	1	19 922,26	19 922,26	
	Temporizzatore	Siemens	7LF4521-0	2	138,23	276,46	
	Installazione	-	-	3 h	30,00	90,00	
RFX			6SL3223(3)	2	1524,44	3048,88	
			6SL3223(5,5)	1	1698,82	1698,82	
		Inverter	Siemens	6SL3223(7,5)	2	2068,12	4136,24
				6SL3223(11)	2	2622,09	5244,18
				6SL3223(22)	1	4468,60	4468,60
		Temporizzatore	Siemens	7LF4521-0	1	138,23	138,23
		Installazione	-	-	8 h	30,00	240,00
	Materiale	-	-	-	-	2000,00	
						<b>92717,84</b>	
	Elettrovalvola	-	-	6	312,00	936,00	
	Temporizzatore	Siemens	7LF4521-0	9	138,23	1244,07	
	Installazione	-	-	8 h	30,00	240,00	
	Materiale	-	-	-	-	1000,00	
						<b>4172,49</b>	

Globalmente, l'intervento profondo sugli impianti di IGI-RFX può consentire un risparmio annuo di oltre 900 MWh di energia termica e di quasi 400 MWh di energia frigorifera, riequilibrando i fabbisogni dei due aggregati (attualmente sproporzionati, con l'aggregato Uffici decisamente più energivoro di RFX pur contando su un volume climatizzato assai minore): per un confronto al netto della volumetria si fa nuovamente ricorso ai consumi specifici, consultabili in Tabella 5.4.

### 5.3.2 Consumi degli ausiliari dotati di inverter

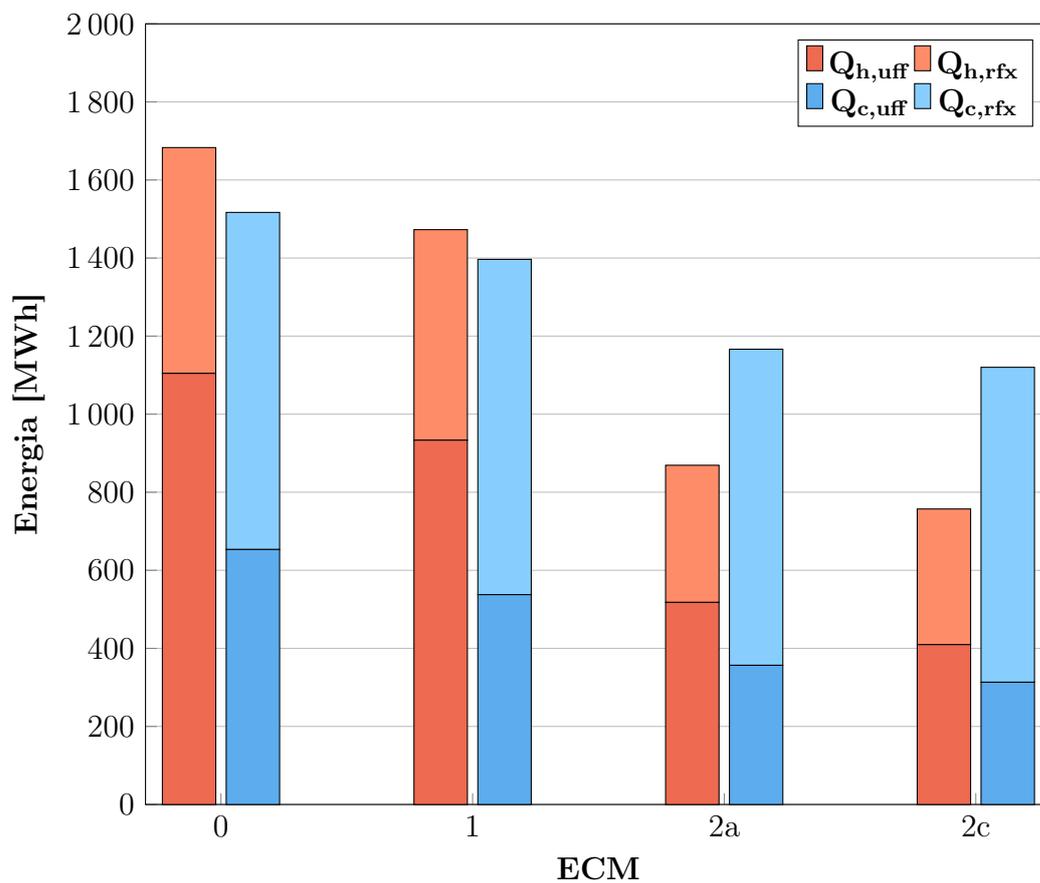
Prima di affrontare l'analisi del ritorno economico degli interventi, è necessario calcolare il contributo al risparmio non computabile direttamente nel modello, ovvero quello dovuto all'energia assorbita dagli ausiliari elettrici; si riprendono le procedure introdotte nel precedente Capitolo 4, ricalcolando opportunamente il punto di funzionamento dei ventilatori centrifughi delle CDZ dotate di inverter (intervento 2b).

Poiché nell'aggregato RFX il regime di ricircolo è decisamente elevato (circa il 90% dell'aria estratta passa nelle sezioni di ricircolo), si può pensare di ridurre il numero di giri per abbassare di conseguenza la portata elaborata, in funzione della pressione statica minima per vincere le perdite di carico dell'impianto. Tuttavia, dall'esame delle curve caratteristiche, si osserva che il funzionamento intrinseco delle unità ventilanti installate non supporta direttamente questa opzione, poiché i punti di funzionamento attuali risultano spostati verso la zona di instabilità provocata dal fenomeno del pompaggio: parzializzare meccanicamente la portata elaborata non si traduce in un incremento di pressione statica e si rischia solamente di oltrepassare il limite di instabilità.

Come diretta conseguenza, un minor numero di giri riduce sicuramente il valore della pressione statica, senza possibilità di correggere la situazione

**Tabella 5.3:** Prestazioni energetiche di IGI-RFX in seguito agli interventi di riqualificazione.**(a)** Fabbisogni medi annuali simulati e valore assoluto del decremento percentuale post-ECM.

		$Q_{h,uff}$	$Q_{h,rfx}$	$Q_{h,tot}$	$Q_{c,uff}$	$Q_{c,rfx}$	$Q_{c,tot}$
		[MWh]					
0		1104,6	578,4	1683,1	653,3	863,6	1516,9
1	Media	933,4	539,3	1472,7	537,6	859,0	1396,6
2a		517,8	351,3	869,1	356,6	809,8	1166,3
2c		409,6	347,5	757,1	313,2	806,9	1120,1
1		15,5	6,8	15,2	17,7	0,5	7,9
2a	%	53,1	39,3	48,4	45,4	6,2	23,1
2c		62,9	39,9	55,0	52,1	6,6	26,2

**(b)** Grafico dei fabbisogni annuali simulati di IGI-RFX post-ECM divisi per aggregato.

**Tabella 5.4:** Consumo specifico annuale simulato post interventi per il riscaldamento ( $CS_i$ ) e il raffrescamento ( $CS_e$ ) di IGI-RFX. Si noti come gli interventi riequilibrino il consumo specifico parziale dei due aggregati, specialmente per quanto riguarda il regime di raffrescamento.

**(a)** Consumo specifico globale post-ECM.

Indice	0	1	2a	2c
	[kWh/m <sup>3</sup> ]			
$CS_{i,sim}$	36,3	31,7	18,7	16,3
$CS_{e,sim}$	32,7	30,1	25,1	24,1

**(b)** Consumo specifico per aggregato post-ECM.

Indice	0		1		2a		2c	
	Uff	RFX	Uff	RFX	Uff	RFX	Uff	RFX
	[kWh/m <sup>3</sup> ]							
$CS_{i,sim}$	81,4	17,3	68,8	16,4	38,2	10,7	30,2	10,6
$CS_{e,sim}$	48,2	26,3	39,7	26,2	26,3	24,7	23,1	24,6

intervenendo sulle serrande delle macchine. In ragione di ciò, si ipotizza che il carico richiesto dall'impianto nelle circostanze attuali possa ragionevolmente ammettere un decremento della pressione statica non superiore al 10% del riferimento nominale, da cui si può calcolare il valore della portata secondo la Relazione (5.1):

$$\sqrt{\frac{p_2}{p_1}} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{Q_2}{Q_1} = 95\% \quad (5.1)$$

dove  $p$ ,  $n$  e  $Q$  indicano rispettivamente la pressione statica, il numero di giri e la portata d'aria. Il livello di pressione statica richiesto ai ventilatori di mandata per l'attraversamento dell'aria nelle sezioni delle macchine non viene modificato. Non è da escludere che il valore limite del decremento ammissibile<sup>7</sup> possa essere più elevato, soprattutto per le centrali maggiormente sovradimensionate, ma in ogni caso esso va determinato con precisione in sede di regolazione post intervento.

<sup>7</sup>Si tenga conto che anche la pressione statica richiesta dall'impianto decresce con legge quadratica in funzione della riduzione della portata in movimento nei canali.

L'analisi della potenza elettrica assorbita dai motori viene effettuata tramite il software proprietario del produttore delle unità ventilanti [73]. In linea generale, se come visto le riduzioni di flusso e pressione variano in modo rispettivamente lineare e quadratico rispetto alla riduzione del numero di giri, per la potenza assorbita il decremento avviene con legge cubica: da ciò risulta chiaramente esplicito il vantaggio immediato di seguire la reale curva di carico adottando la soluzione degli inverter (che in aggiunta, rispetto ai sistemi di regolazione meccanica, non penalizza<sup>8</sup> nemmeno il rendimento del sistema ai carichi parziali).

Si verifica la conformità della procedura di installazione degli inverter tenendo sotto controllo il corretto funzionamento dei diffusori elicoidali [69] presenti nelle Sale Alimentazioni: dai calcoli si evince che per ogni centrale la portata limite dominante è sempre quella necessaria a prevenire il fenomeno del pompaggio, poichè quella minima per garantire un lancio del getto d'aria adeguato è di almeno un ordine di grandezza inferiore.

La Tabella 5.5 contiene i risultati sintetici per la soluzione 2a (senza inverter) e la soluzione 2b (con inverter), in modo tale da separare il risparmio di energia intrinseco generato dalla parzializzazione del regime di climatizzazione; per le CDZ dell'aggregato Uffici, pur dotate di inverter dalla soluzione 2a in poi, si esegue il calcolo cautelativamente con l'assorbimento elettrico nominale. La soluzione 2b, secondo le stime preliminari e nonostante le limitazioni evidenziate, permette di contenere il consumo elettrico di circa 107 MWh all'anno (poco più del 20% del consumo elettrico di 2a). Si aggiunge la soluzione 2b', risultato del calcolo cautelativo ammettendo un decremento della pressione statica utile non superiore al 5%: il risparmio ottenibile risulta comunque almeno del 15%.

---

<sup>8</sup>Se correttamente installato, l'inverter aumenta il rendimento elettrico del motore (per ragioni che esulano da questa trattazione), pertanto non è da escludere che il rendimento globale del sistema di ventilazione possa addirittura incrementare in modo sensibile.

**Tabella 5.5:** Potenza assorbita ed energia elettrica annuale consumata dai sistemi ausiliari di ventilazione post interventi di riqualificazione; nel presente calcolo, la soluzione 2c è analoga a 2b.

**(a)** Potenza assorbita ed energia elettrica degli ausiliari.

Caso	CDZ	$P_{\text{man}}$ [kW]	$P_{\text{rip}}$ [kW]	$E_{\text{e,fis}}$ [MWh]	$E_{\text{e,var}}$ [MWh]	$E_{\text{e,tot}}$ [MWh]
	1	2,2	0,8			
	6	2,2	2,2	0,0	31,2	31,2
	2	2,2	0,8			
-----						
	3	22,0	11,0			
2a	4P	11,0	5,5	381,1	80,9	462,0
	4T	7,5	3,0			
	5	7,5	3,0			
	Tot	54,6	26,3			
	3	19,3	8,9			
2b'	4P	8,8	3,5	315,4	66,3	381,7
	4T	5,8	2,3			
	5	5,3	1,8			
	Tot	38,2	15,7			
	3	18,3	8,1			
2b	4P	8,8	3,5	293,4	61,2	354,6
	4T	5,8	2,3			
	5	5,3	1,8			
	Tot	38,2	15,7			
	3	18,3	8,1			
2b	4P	8,8	3,5	293,4	61,2	354,6
	4T	5,8	2,3			
	5	5,3	1,8			
	Tot	38,2	15,7			
	3	18,3	8,1			
2b	4P	8,8	3,5	293,4	61,2	354,6
	4T	5,8	2,3			
	5	5,3	1,8			
	Tot	38,2	15,7			
	3	18,3	8,1			
2b	4P	8,8	3,5	293,4	61,2	354,6
	4T	5,8	2,3			
	5	5,3	1,8			
	Tot	38,2	15,7			
	3	18,3	8,1			
2b	4P	8,8	3,5	293,4	61,2	354,6
	4T	5,8	2,3			
	5	5,3	1,8			
	Tot	38,2	15,7			
	3	18,3	8,1			
2b	4P	8,8	3,5	293,4	61,2	354,6
	4T	5,8	2,3			
	5	5,3	1,8			
	Tot	38,2	15,7			
	3	18,3	8,1			
2b	4P	8,8	3,5	293,4	61,2	354,6
	4T	5,8	2,3			
	5	5,3	1,8			
	Tot	38,2	15,7			
	3	18,3	8,1			
2b	4P	8,8	3,5	293,4	61,2	354,6
	4T	5,8	2,3			
	5	5,3	1,8			
	Tot	38,2	15,7			
	3	18,3	8,1			
2b	4P	8,8	3,5	293,4	61,2	354,6
	4T	5,8	2,3			
	5	5,3	1,8			
	Tot	38,2	15,7			
	3	18,3	8,1			
2b	4P	8,8	3,5	293,4	61,2	354,6
	4T	5,8	2,3			
	5	5,3	1,8			
	Tot	38,2	15,7			
	3	18,3	8,1			
2b	4P	8,8	3,5	293,4	61,2	354,6
	4T	5,8	2,3			
	5	5,3	1,8			
	Tot	38,2	15,7			
	3	18,3	8,1			
2b	4P	8,8	3,5	293,4	61,2	354,6
	4T	5,8	2,3			
	5	5,3	1,8			
	Tot	38,2	15,7			
	3	18,3	8,1			
2b	4P	8,8	3,5	293,4	61,2	354,6
	4T	5,8	2,3			
	5	5,3	1,8			
	Tot	38,2	15,7			
	3	18,3	8,1			
2b	4P	8,8	3,5	293,4	61,2	354,6
	4T	5,8	2,3			
	5	5,3	1,8			
	Tot	38,2	15,7			
	3	18,3	8,1			
2b	4P	8,8	3,5	293,4	61,2	354,6
	4T	5,8	2,3			
	5	5,3	1,8			
	Tot	38,2	15,7			
	3	18,3	8,1			
2b	4P	8,8	3,5	293,4	61,2	354,6
	4T	5,8	2,3			
	5	5,3	1,8			
	Tot	38,2	15,7			
	3	18,3	8,1			
2b	4P	8,8	3,5	293,4	61,2	354,6
	4T	5,8	2,3			
	5	5,3	1,8			
	Tot	38,2	15,7			
	3	18,3	8,1			
2b	4P	8,8	3,5	293,4	61,2	354,6
	4T	5,8	2,3			
	5	5,3	1,8			
	Tot	38,2	15,7			
	3	18,3	8,1			
2b	4P	8,8	3,5	293,4	61,2	354,6
	4T	5,8	2,3			
	5	5,3	1,8			
	Tot	38,2	15,7			
	3	18,3	8,1			
2b	4P	8,8	3,5	293,4	61,2	354,6
	4T	5,8	2,3			
	5	5,3	1,8			
	Tot	38,2	15,7			
	3	18,3	8,1			
2b	4P	8,8	3,5	293,4	61,2	354,6
	4T	5,8	2,3			
	5	5,3	1,8			
	Tot	38,2	15,7			
	3	18,3	8,1			
2b	4P	8,8	3,5	293,4	61,2	354,6
	4T	5,8	2,3			
	5	5,3	1,8			
	Tot	38,2	15,7			
	3	18,3	8,1			
2b	4P	8,8	3,5	293,4	61,2	354,6
	4T	5,8	2,3			
	5	5,3	1,8			
	Tot	38,2	15,7			
	3	18,3	8,1			
2b	4P	8,8	3,5	293,4	61,2	354,6
	4T	5,8	2,3			
	5	5,3	1,8			
	Tot	38,2	15,7			
	3	18,3	8,1			
2b	4P	8,8	3,5	293,4	61,2	354,6
	4T	5,8	2,3			
	5	5,3	1,8			
	Tot	38,2	15,7			
	3	18,3	8,1			
2b	4P	8,8	3,5	293,4	61,2	354,6
	4T	5,8	2,3			
	5	5,3	1,8			
	Tot	38,2	15,7			
	3	18,3	8,1			
2b	4P	8,8	3,5	293,4	61,2	354,6
	4T	5,8	2,3			
	5	5,3	1,8			
	Tot	38,2	15,7			
	3	18,3	8,1			
2b	4P	8,8	3,5	293,4	61,2	354,6
	4T	5,8	2,3			
	5	5,3	1,8			
	Tot	38,2	15,7			
	3	18,3	8,1			
2b	4P	8,8	3,5	293,4	61,2	354,6
	4T	5,8	2,3			
	5	5,3	1,8			
	Tot	38,2	15,7			
	3	18,3	8,1			
2b	4P	8,8	3,5	293,4	61,2	354,6
	4T	5,8	2,3			
	5	5,3	1,8			
	Tot	38,2	15,7			
	3	18,3	8,1			
2b	4P	8,8	3,5	293,4	61,2	354,6
	4T	5,8	2,3			
	5	5,3	1,8			
	Tot	38,2	15,7			
	3	18,3	8,1			
2b	4P	8,8	3,5	293,4	61,2	354,6
	4T	5,8	2,3			
	5	5,3	1,8			
	Tot	38,2	15,7			
	3	18,3	8,1			
2b	4P	8,8	3,5	293,4	61,2	354,6
	4T	5,8	2,3			
	5	5,3	1,8			
	Tot	38,2	15,7			
	3	18,3	8,1			
2b	4P	8,8	3,5	293,4	61,2	354,6
	4T	5,8	2,3			
	5	5,3	1,8			
	Tot	38,2	15,7			
	3	18,3	8,1			
2b	4P	8,8	3,5	293,4	61,2	354,6
	4T	5,8	2,3			
	5	5,3	1,8			
	Tot	38,2	15,7			
	3	18,3	8,1			
2b	4P	8,8	3,5	293,4	61,2	354,6
	4T	5,8	2,3			
	5	5,3	1,8			
	Tot	38,2	15,7			
	3	18,3	8,1			
2b	4P	8,8	3,5	293,4	61,2	354,6
	4T	5,8	2,3			
	5	5,3	1,8			
	Tot	38,2	15,7			
	3	18,3	8,1			
2b	4P	8,8	3,5	293,4	61,2	354,6
	4T	5,8	2,3			
	5	5,3	1,8			
	Tot	38,2	15,7			
	3	18,3	8,1			
2b	4P	8,8	3,5	293,4	61,2	354,6
	4T	5,8	2,3			
	5	5,3	1,8			
	Tot	38,2	15,7			
	3	18,3	8,1			
2b	4P	8,8	3,5	293,4	61,2	354,6
	4T	5,8	2,3			
	5	5,3	1,8			
	Tot	38,2	15,7			
	3	18,3	8,1			
2b	4P	8,8	3,5	293,4	61,2	354,6
	4T	5,8	2,3			
	5	5,3	1,8			
	Tot	38,2	15,7			
	3	18,3	8,1			
2b	4P	8,8	3,5	293,4	61,2	354,6
	4T	5,8	2,3			
	5	5,3	1,8			
	Tot	38,2	15,7			
	3	18,3	8,1			
2b	4P	8,8	3,5	293,4	61,2	354,6
	4T	5,8	2,3			
	5	5,3	1,8			
	Tot	38,2	15,7			
	3	18,3	8,1			
2b	4P	8,8	3,5	293,4	61,2	354,6
	4T	5,8	2,3			
	5	5,3	1,8			
	Tot	38,2	15,7			
	3	18,3	8,1			
2b	4P	8,8	3,5	293,4	61,2	354,6
	4T	5,8	2,3			
	5	5,3	1,8			
	Tot	38,2	15,7			
	3	18,3	8,1			
2b	4P	8,8	3,5	293,4	61,2	354,6
	4T	5,8	2,3			
	5	5,3	1,8			
	Tot	38,2	15,7			
	3	18,3	8,1			
2b	4P	8,8	3,5	293,4	61,2	354,6
	4T	5,8	2,3			
	5	5,3	1,8			
	Tot	38,2	15,7			
	3	18,3	8,1			
2b	4P	8,8	3,5	293,4	61,2	354,6
	4T	5,8	2,3			
	5	5,3</				

## 5.4 Analisi del risparmio economico

Nell'analisi del risparmio economico ottenibile in seguito alla riqualificazione si definisce il risparmio stesso come la differenza tra i consumi energetici attuali e quelli misurati per ogni singolo intervento. Il valore finale del risparmio viene riportato come contenimento dei costi quantificati nella bolletta energetica, con cui si procede successivamente alla valutazione dell'investimento finanziario.

### 5.4.1 Calcolo del risparmio in bolletta

Per quantificare il risparmio energetico in termini economici (Tabella 5.6) è sufficiente calcolare la differenza di energia richiesta tra il fabbisogno medio attuale e il fabbisogno medio simulato post intervento per quanto riguarda l'energia termica, l'energia frigorifera e l'energia dedicata agli ausiliari [MWh].

Il valore in [€] si ricava semplicemente moltiplicando tali contributi secondo le seguenti Relazioni:

$$C_h = \frac{Q_h}{\Delta_c H_i^0} \cdot c_c \cdot 1000 \quad (5.2)$$

$$C_c = \frac{Q_c}{EER} \cdot c_e \cdot 1000 \quad (5.3)$$

$$C_e = E_{e,tot} \cdot c_e \cdot 1000 \quad (5.4)$$

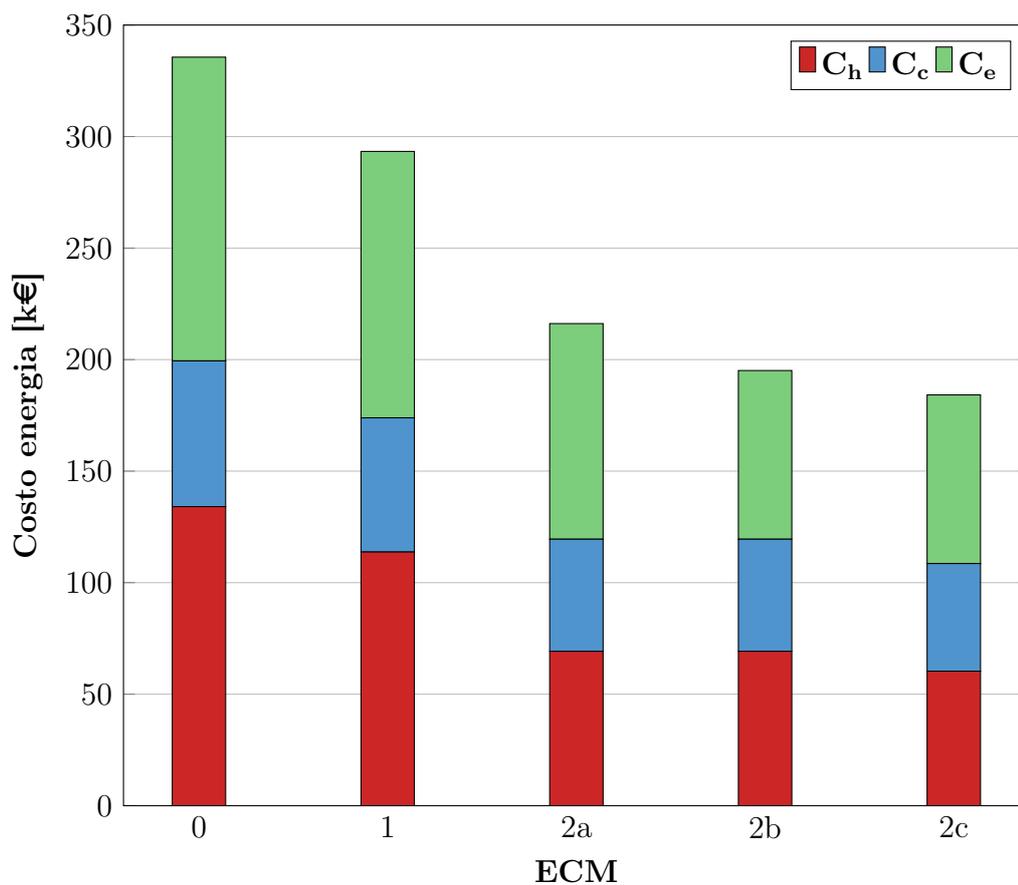
in cui, come riportato nel Capitolo 2,  $\Delta_c H_i^0$  e  $EER_p$  sono rispettivamente il potere calorifico inferiore del combustibile (9,54 kWh/Sm<sup>3</sup>) e l'EER medio ponderato delle macchine frigorifere (4,55);  $c_c$  è il costo del combustibile per unità di volume, pari a 0,76 €/Smc, mentre  $c_e$  è il costo dell'unità contabilizzata di energia elettrica, pari a 0,196 €/kWh.

**Tabella 5.6:** Costo medio dell'energia pre e post interventi di riqualificazione.

(a) Costo medio annuale dell'energia e decremento percentuale assoluto post-ECM. I valori vengono arrotondati per eccesso agli interi superiori.

	$C_h$	$C_c$	$C_e$	Tot
	[€]			
0	134 084	65 344	136 181	335 609
1	113 738	60 162	119 439	293 339
2a Media	69 237	50 241	96 668	216 146
2b	69 237	50 241	75 617	195 095
2c	60 315	48 251	75 617	184 183
1	15	8	12	13
2a %	48	23	29	36
2b	48	23	45	42
2c	55	26	45	45

(b) Confronto del costo medio annuale dell'energia post-ECM.



### 5.4.2 Flussi di cassa e rendimento finanziario

Poiché il costo dell'intervento di competenza del CNR è una frazione decisamente contenuta del costo totale degli interventi, si decide di accorparlo a quello di competenza del Consorzio RFX: la procedura è in linea teorica impropria, ma all'atto pratico svincola il presente lavoro dall'analisi separata dei flussi di cassa e dalla quantificazione del sistema di pagamento interno delle bollette. Ragionevolmente, nell'interpellare una ESCo per l'attuazione degli interventi, è lecito attendersi che uno dei due soggetti si incarichi come unica parte attiva nella stipula del contratto, per poi affidarsi ad un meccanismo successivo di attribuzione dei costi e dei ricavi.

La procedura di valutazione dell'investimento (*Capital Budgeting*) fa affidamento su degli strumenti classici di natura finanziaria, quali il Valore Attuale Netto (o *Net Present Value*, NPV, nella versione anglosassone) e il tempo di ritorno attualizzato (*Discounted Payback Period*, DPP); non volendosi addentrare nello specifico della derivazione di tali indici finanziari, se ne riporta soltanto la formulazione operativa ricavata in funzione del flusso di cassa (*Cash Flow*<sup>9</sup>, CF) generato dagli interventi.

$$NPV = \sum_{t=1}^N CF_t \cdot \frac{1+i}{d-i} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{1+i}{1+d} \right)^t \right] + CF_0$$

$$DPP = N|_{NPV=0}$$

I parametri del calcolo sono i seguenti:

d: *discount rate*, tasso di sconto dell'investimento;

i: *inflation rate*, indice d'inflazione del costo dell'energia;

N: orizzonte temporale dell'investimento in anni.

---

<sup>9</sup>Poiché la procedura applicata introduce l'attualizzazione e l'adeguamento del flusso di cassa all'inflazione, si riporta anche la notazione conseguente del *Discounted Cash Flow* (DCF).

Pur essendo generalmente presenti delle agevolazioni finanziarie in ambito di investimenti sull'efficienza energetica, il tasso di sconto viene assunto in via conservativa pari al 5%; allo stesso modo, per il tasso di inflazione non si va oltre ad un valore di 1,5%, mentre l'orizzonte temporale viene quantificato in 5 anni per l'intervento di livello 1 e in 10 anni per gli interventi di livello 2 (su stima del limite di fuori servizio rispettivamente delle macchine nell'aggregato Uffici e di quelle in RFX). Si incrementa il valore dell'investimento iniziale del 10% per una stima di massima degli oneri di perizia e progettazione (arrotondando per eccesso al centinaio superiore), non tenendo inoltre conto degli eventuali sgravi fiscali legati agli interventi di riqualificazione energetica.

Dai risultati riportati in Tabella 5.7 si può osservare come il Valore Attuale Netto sia decisamente molto elevato per ogni soluzione d'intervento: ciò si verifica grazie al fatto che, pur con investimenti contenuti, si genera un risparmio medio annuale rispetto alla situazione attuale che va dal 13% del livello 1 al 36, 42 e 45% del livello 2 (Tabella 5.6). In tutti e quattro i casi tale risparmio supera abbondantemente il costo degli interventi, pertanto risulta chiaramente che il tempo di ritorno dell'investimento cade entro i limiti del primo anno successivo alla riqualificazione.

Pur confrontando i valori con la media annuale delle bollette dell'intera Area della Ricerca (circa 1 300 000 €), comprensiva degli ingenti consumi termici degli edifici più datati e degli ancor più significativi consumi elettrici delle apparecchiature sperimentali, si ottiene che gli interventi di riqualificazione vera e propria (livello 2) del solo IGI-RFX sono attualmente in grado di garantire come minimo il 10% di risparmio energetico medio annuale.

**Tabella 5.7:** Analisi del rendimento finanziario degli investimenti.**(a)** 1.  $CF_0 = 3600 \text{ €}$ ,  $R = 38600 \text{ €}$ .

	CF	$\sum$ DCF [€]	NPV	DPP [anni]
0	-3600	-3600	170 937	< 1
1	38 600	33 713		
2	38 600	69 783		
3	38 600	104 650		
4	38 600	138 355		
5	38 600	170 937		

**(b)** 2a.  $CF_0 = 74200 \text{ €}$ ,  $R = 119400 \text{ €}$ .

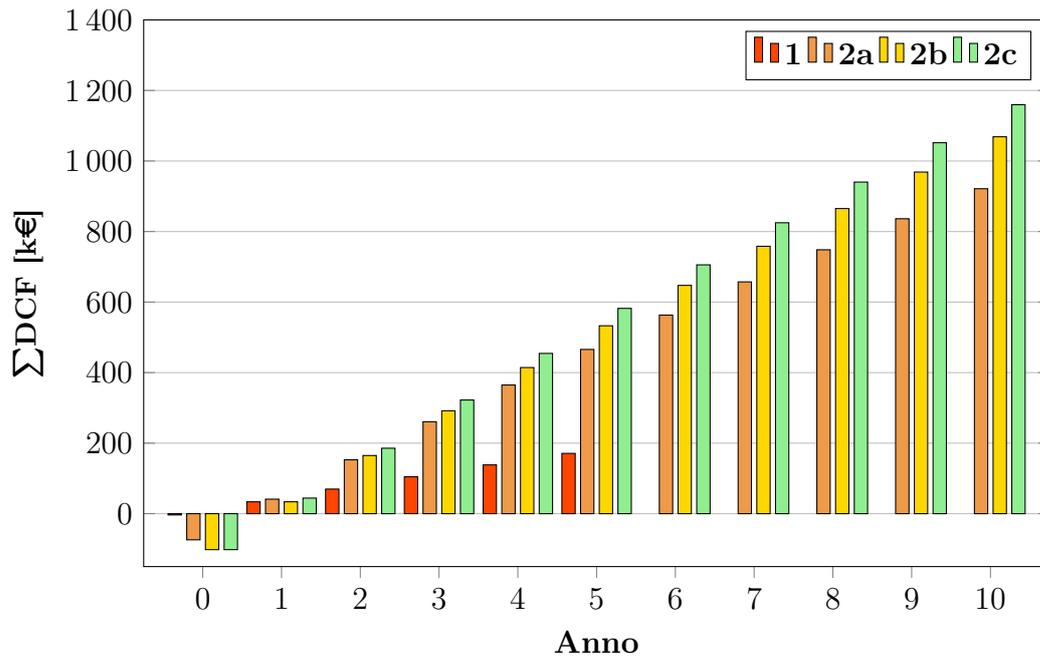
	CF	$\sum$ DCF [€]	NPV	DPP [anni]
0	-74 200	-74 200	921 397	< 1
1	119 400	41 220		
2	119 400	152 793		
3	119 400	260 646		
4	119 400	364 905		
5	119 400	465 688		
6	119 400	563 112		
7	119 400	657 288		
8	119 400	748 325		
9	119 400	836 327		
10	119 400	921 397		

**(c)** 2b.  $CF_0 = 102000 \text{ €}$ ,  $R = 140400 \text{ €}$ .

	CF	$\sum$ DCF [€]	NPV	DPP [anni]
0	-102 000	-102 000	1 068 701	< 1
1	140 400	33 720		
2	140 400	164 916		
3	140 400	291 739		
4	140 400	414 334		
5	140 400	532 843		
6	140 400	647 402		
7	140 400	758 142		
8	140 400	865 190		
9	140 400	968 670		
10	140 400	1 068 701		

**(d)** 2c.  $CF_0 = 102000 \text{ €}$ ,  $R = 151300 \text{ €}$ .

	CF	$\sum$ DCF [€]	NPV	DPP [anni]
0	-102 000	-102 000	1 159 589	< 1
1	151 300	44 257		
2	151 300	185 638		
3	151 300	322 307		
4	151 300	454 420		
5	151 300	582 129		
6	151 300	705 582		
7	151 300	824 919		
8	151 300	940 278		
9	151 300	1 051 792		
10	151 300	1 159 589		

**(e)** Flussi di cassa cumulati degli interventi.

# Conclusioni

Il presente lavoro di tesi affronta il tema dell'efficienza energetica sotto numerosi aspetti: dalla diagnosi energetica dell'intera Area della Ricerca alla caratterizzazione dei consumi specifici di ogni aggregato di edifici, dalla determinazione dei consumi attuali per mezzo di sistemi di contabilizzazione dell'energia all'implementazione di modelli termoenergetici per la loro verifica e per la conseguente proposta tecnico-economica di interventi di riqualificazione.

Il primo capitolo offre un'analisi descrittiva della situazione attuale, contestualizzando il lavoro svolto dal punto di vista organizzativo, elencando le particolarità e le connotazioni dal punto di vista burocratico ed amministrativo e, specialmente, riportando con adeguato livello di dettaglio le caratteristiche salienti degli edifici analizzati e degli impianti per la gestione dell'energia.

Il secondo capitolo presenta un'introduzione sintetica riguardante il formalismo normativo con cui si affrontano le procedure di diagnosi, misura e verifica energetica, esplicitando la prassi seguita e uniformando la terminologia tecnica a quella di riferimento (IPMVP). La successiva raccolta dati riguardante l'attuale fatturazione in bolletta energetica risulta utile come confronto ai fini della valutazione dell'effettiva ripartizione dei consumi all'interno dell'Area, di cui si presentano le quote medie annuali e mensili di consumo dei vari macrogruppi di edifici, introducendo il parametro di consu-

mo specifico, impiegato in tutto il prosieguo del lavoro data l'immediatezza della sua consultazione.

Nel terzo capitolo si sviluppa il modello termoenergetico completo del sistema edificio-impianto di IGI-RFX, con ampia descrizione dei metodi impiegati ed elevato livello di dettaglio nella realizzazione: le caratteristiche termiche e dimensionali dell'involucro edilizio derivano da effettiva verifica sul campo o da documentazione relativa al progetto esecutivo dell'edificio, mentre tutte le grandezze interne (come il regime di climatizzazione, il set point dei parametri termoigrometrici e i carichi termici) sono determinate esclusivamente tramite misura in loco in prima persona o al più derivate da consultazione con il personale responsabile.

Il quarto capitolo è funzionale alla validazione del modello e all'elaborazione dei risultati offerti dalla simulazione dinamica. Per la procedura di validazione si fa affidamento ai dati di consumo rilevato tramite la contabilizzazione dell'energia, in modo tale da quantificare a livello numerico gli scostamenti e, di conseguenza, l'incertezza di modello tra il sistema reale e quello riprodotto a calcolatore: gli scostamenti risultano assolutamente contenuti per un modello di tale complessità (mediamente inferiori al 5% e singolarmente mai superiori al 15%), pertanto le prestazioni energetiche simulate di IGI-RFX possono essere convenientemente impiegate per le analisi successive. Si compilano, in analogia con la trattazione precedente e per ulteriore verifica, i profili simulati di consumo medio annuale e mensile. Si ricorda infine che la determinazione dei fabbisogni lordi viene effettuata a partire da quelli netti (simulati) del sistema edificio-impianto, tramite la stima del rendimento medio stagionale secondo l'attuale normativa di riferimento o, in caso di impossibilità, secondo misure o modelli relativi all'attuale situazione analizzata (è il caso della determinazione dell'entità delle perdite nella rete di distribuzione dei fluidi termovettori).

Nell'ultimo capitolo si passa alla fase di proposta di intervento, verificando le previsioni di risparmio energetico degli interventi di riqualificazione secondo il modello validato precedentemente citato: lo scopo è l'individuazione delle inefficienze locali e l'ottimizzazione della gestione energetica, oltre all'adeguamento delle logiche di regolazione all'attuale normativa vigente. A seconda della profondità di intervento, il risparmio su base annuale è quantificabile fino al 45% del fabbisogno di energia per la climatizzazione di IGI-RFX (oltre il 10% dell'intero fabbisogno energetico attuale di Area). La proposta è comprensiva della valutazione economica sull'onerosità degli interventi secondo stime che, pur se preliminari, derivano generalmente da preventivi di spesa direttamente ottenuti dai fornitori.

La possibilità di quantificare l'effettivo risparmio permette di analizzare le caratteristiche di redditività degli investimenti proposti: le soluzioni con intervento più radicale sugli impianti (investimento iniziale superiore a 100 000 €) sono anche quelle più interessanti dal punto di vista della redditività, poiché in tutti i casi possiedono un elevato valore netto attualizzato (oltre 1 000 000 €, ipotizzando come orizzonte temporale d'investimento il termine di vita operativa delle attuali macchine HVAC più recenti, stimabile in una decina d'anni). Per qualsiasi soluzione proposta e pur non prevedendo forme di incentivazione in via cautelativa, il tempo di ritorno economico dell'investimento risulta sempre e comunque eccezionalmente contenuto, poiché in ogni caso inferiore al primo anno successivo all'intervento di riqualificazione energetica.



# Bibliografia

- [1] A. V., *Fisica e ingegneria della fusione: la ricerca verso una nuova fonte di energia*, Consorzio RFX, Padova, 2007.
- [2] A. V., Come misurare e verificare il risparmio energetico, FIRE, Convegno Ecomondo - KeyEnergy, Rimini, 2016.
- [3] Aermec S.p.A., *Manuali di uso e manutenzione ventilconvettori*, Archivio Ufficio Servizio Manutenzione Consorzio RFX, Padova, 2001.
- [4] Aircontrol S.n.c., *Progetto per l'installazione di unità di trattamento aria in copertura R6*, Archivio Ufficio Servizio Manutenzione Consorzio RFX, Padova, 2006.
- [5] American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, *ASHRAE Handbook: heating, ventilating and air-conditioning applications. SI edition*, ASHRAE Inc., Atlanta, GA (USA), 2015.
- [6] Baroni, G., L. Fellin, R. Zecchin, *Progetto della sede dell'Istituto Gas Ionizzati e dell'esperimento RFX in Padova. Verifica di conformità dell'isolamento termico*, Siper S.r.l, Padova, 1985.
- [7] Baroni, G., L. Fellin, R. Zecchin, *Progetto della sede dell'Istituto Gas Ionizzati e dell'esperimento RFX in Padova. Capitolato speciale d'appalto. Parte 2: Specifiche tecniche ed elenco prezzi unitari. Impianti termici*, Consiglio Nazionale delle Ricerche di Padova, Padova, 1985.

- [8] Baroni, G., L. Fellin, R. Zecchin, *Progetto di ampliamento della sede dell'Istituto Gas Ionizzati in Padova. Computo metrico estimativo*, Siper S.r.l, Padova, 1989.
- [9] Baroni, G., L. Fellin, R. Zecchin, *Progetto della sede dell'Istituto Gas Ionizzati e dell'esperimento RFX in Padova. Progetto architettonico. Variante ed ampliamento in corso d'opera*, Siper S.r.l, Padova, 1989.
- [10] Bertini, I., S. Morelli, *Le Energy service company ESCo come strumento per la diffusione dell'efficienza energetica*, Report RSE 56, ENEA, Roma, 2009.
- [11] Bo, M., A. Boeche, A. Cavallini, D. Elardo, L. A. Piterà, M. S. Venco, M. Vio, *Manuale d'ausilio alla progettazione termotecnica*, AiCARR, Milano, 2015.
- [12] Bonacina, C., A. Cavallini, L. Mattarolo, *Trasmissione del calore*, Cleup, Padova, 1992.
- [13] Coster Tecnologie Elettroniche, *IET 7383-7343. Contatore di energia termica e frigorifera e dei consumi di acqua sanitaria calda e fredda*, Coster S.p.A., Milano, 2016.
- [14] Crawley, D., Y. Huang, *Does it matter which weather data you use in energy simulations?*, American Council for an Energy-Efficient Economy Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, Pacific Grove, CA (USA), 1996.
- [15] De Carli, M., *Simulation and numerical methods. Energy modeling for buildings and components*, TERC Kft., Budapest (HU), 2013.

- [16] Decreto del Presidente della Repubblica n.74, *Regolamento recante definizione dei criteri generali in materia di esercizio, conduzione, controllo, manutenzione e ispezione degli impianti termici per la climatizzazione invernale ed estiva degli edifici e per la preparazione dell'acqua calda per usi igienici sanitari, a norma dell'articolo 4, comma 1, lettere a) e c), del D.Lgs. 19 agosto 2005, n. 192*, Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, Roma, 2013.
- [17] Decreto Legislativo n.102, *Attuazione della Direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica, che modifica le Direttive 2009/125/CE e 2010/30/UE e abroga le Direttive 2004/8/CE e 2006/32/CE*, Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, Roma, 2014.
- [18] Di Santo, D., *Riqualficazione energetica di edifici e industrie*, FIRE, Conferenza EPC, Milano, 2015.
- [19] Fast S.p.A., *Manuali tecnici delle unità di condizionamento di RFX*, Archivio Ufficio Servizio Manutenzione Consorzio RFX, Padova, 2001.
- [20] Fast S.p.A., *Caratteristiche tecniche delle unità di condizionamento di RFX*, Tonoimpianti S.a.s., Padova, 2001.
- [21] Fellin, F., *Consumi energetici frigoriferi degli edifici in uso al Consorzio RFX*, Nota tecnica interna Consorzio RFX, IP NT 193, Padova, 2013.
- [22] Fellin, F., *Richiesta di offerta per modifiche d'impianto*, Comunicazione Consorzio RFX, Padova, 2013.
- [23] Fellin, F., *Interventi finalizzati al risparmio energetico e alla contabilizzazione dei consumi energetici per gli edifici afferenti all'Area di Ricerca del CNR di Padova*, Nota tecnica interna Consorzio RFX, IP NT 195, Padova, 2014.

- [24] Fellin, F., V. Antoni, S. Bobbo, L. Fellin, C. Pagura, M. Spolaore e A. Pellizzon, *Energy costs division and plant modification in a large research complex: the experience of Padova National Research Council (CNR) Area*, Conference paper, Convegno REHVA, Riga (LVA), 2015.
- [25] Fellin, F., A. Bernardi, M. De Carli, L. Pockele, A. Galgaro, G. Mezzasalma, M. Marchesin e G. Alessio, *Diagnosi energetica e proposte di intervento per l'efficientamento della rete di teleriscaldamento e teleraffrescamento dell'Area CNR di Padova*, Conference paper, Energy 2.0 - Convegno Nazionale AiCARR, Padova, 2017.
- [26] Forni, D., *La misura e la verifica dei risparmi: il protocollo IPMVP, FIRE*, Conferenza EPC, Milano, 2015.
- [27] Forni, D., *Concetti e opzioni per standardizzare la M&V IPMVP, FIRE*, Convegno Enermanagement, Milano, 2015.
- [28] Haberl, J., C. Culp, D. Claridge, *ASHRAE's Guidelines 14-2002 for measurement of energy and demand savings: how to determine what was really saved by the retrofit*, Texas A&M University, College Station, TX (USA), 2002.
- [29] Holman, J.P., *Heat transfer*, McGraw-Hill, New York, NY (USA), 2010.
- [30] Incropera, F., P. DeWitt, T. Bergman, A. Lavine, *Fundamentals of heat and mass transfer*, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ (USA), 2011.
- [31] Ingegneria Fellin-Siper S.r.l., *Ripristino della sede dell'esperimento RFX. Perizia di variante e suppletiva 1*, Archivio Manens-TiFS, Padova, 2001.
- [32] Landis & Staefa Division, *Schede tecniche e settaggio delle apparecchiature di termoregolazione climatica*, Archivio Ufficio Servizio Manutenzione Consorzio RFX, Padova, 2002.

- [33] Logstor Industry, *Pre-insulated pipes for industrial applications*, Logstor A/S, Løgstør (DEN), 2016.
- [34] McQuay, *Water cooled screw chillers. WHS*, McQuay Italia S.p.A., Cecchina (RM), 2003.
- [35] Mezzasalma, G., *Analisi teoriche e sperimentali per la valutazione dei consumi attuali dell'Area del CNR di Padova e possibili interventi migliorativi*, Tesi di laurea magistrale, Relatore M. De Carli, Correlatore F. Fellin, Università degli Studi di Padova, Padova, 2015.
- [36] National Calculation Methodology, *Internal heat gains*, Building Research Establishment, Watford (UK), 2012.
- [37] Norma Tecnica UNI EN 1745, *Muratura e prodotti per muratura. Metodi per determinare i valori termici*, 2012.
- [38] Norma Tecnica UNI 7979, *Edilizia. Serramenti esterni (verticali). Classificazione in base alla permeabilità all'aria, tenuta all'acqua e resistenza al vento*, 1979.
- [39] Norma Tecnica UNI TS 16331-1, *Optics and optical instruments*, 2012.
- [40] Norma Tecnica UNI 10339, *Impianti aeraulici a fini di benessere. Generalità, classificazioni e requisiti. Regole per la richiesta d'offerta, l'offerta, l'ordine e la fornitura*, 1995.
- [41] Norma Tecnica UNI 10351, *Materiali da costruzione. Conduttività termica e permeabilità al vapore*, 1994.
- [42] Norma Tecnica UNI 10355, *Murature e solai. Valori della resistenza termica e metodo di calcolo*, 1994.

- [43] Norma Tecnica UNI CEI 11352, *Gestione dell'energia. Società che forniscono servizi energetici (ESCO). Requisiti generali e lista di controllo per la verifica dei requisiti*, 2014.
- [44] Norma Tecnica UNI CEI EN 15900, *Servizi di efficienza energetica. Definizioni e requisiti*, 2010.
- [45] Norma Tecnica UNI CEI EN 16247-1, *Diagnosi energetiche. Parte 1: Requisiti generali*, 2012.
- [46] Norma Tecnica UNI CEI EN ISO 50001, *Sistemi di gestione dell'energia. Requisiti e linee guida per l'uso*, 2011.
- [47] Norma Tecnica UNI EN 12831, *Impianti di riscaldamento negli edifici. Metodo di calcolo del carico termico di progetto*, 2006.
- [48] Norma Tecnica UNI EN 15251, *Criteri per la progettazione dell'ambiente interno e per la valutazione della prestazione energetica degli edifici, in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica*, 2008.
- [49] Norma Tecnica 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*, 2008.
- [50] Norma Tecnica UNI EN ISO 7730, *Ergonomics of the thermal environment. Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria*, 2006.
- [51] Norma Tecnica UNI EN ISO 10077-1, *Prestazione termica di finestre, porte e chiusure oscuranti. Calcolo della trasmittanza termica. Parte 1: Generalità*, 2007.

- [52] Norma Tecnica UNI EN ISO 13790, *Prestazione termica degli edifici. Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento e il raffrescamento*, 2008.
- [53] Norma Tecnica UNI EN ISO 15927-4, *Prestazione termoigrometrica degli edifici. Calcolo e presentazione dei dati climatici. Parte 4: Dati orari per la valutazione del fabbisogno annuale di energia per il riscaldamento e il raffrescamento*, 2005.
- [54] Norma Tecnica UNI EN ISO 15927-6, *Prestazione termoigrometrica degli edifici. Calcolo e presentazione dei dati climatici. Parte 6: Differenze di temperatura cumulate (Gradi Giorno)*, 2008.
- [55] Norma Tecnica UNI TS 11300-1, *Prestazioni energetiche degli edifici. Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale*, 2014.
- [56] Norma Tecnica UNI TS 11300-2, *Prestazioni energetiche degli edifici. Parte 2: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria*, 2014.
- [57] Norma Tecnica UNI TS 11300-3, *Prestazioni energetiche degli edifici. Parte 3: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione estiva*, 2010.
- [58] Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, *International Performance Measurement and Verification Protocol - Volume 1*, U.S. Department of Energy, Washington, D.C. (USA), 2002.
- [59] Pernigotto, G., A. Prada, D. Costola, A. Gasparella, J. Hansen, *Multi-year and reference year weather data for building energy labelling in north Italy climates*, Energy and Buildings, Vol. 72, 2014.

- [60] RC Condizionatori S.p.A., *Scheda dati tecnici unità di condizionamento CED*, Archivio Ufficio Servizio Manutenzione Consorzio RFX, Padova, 2001.
- [61] Rossi, N., *Manuale del termotecnico*, Hoepli, Milano, 2013.
- [62] Siemens Digital Factory, *Sinamics G120P. The specialist for pumps, fans and compressors*, Siemens AG, Erlangen (DEU), 2016.
- [63] Siemens Infrastructure & Cities Sector, *Orologi interruttori modulari digitali 7LF4 e meccanici 7LF5*, Siemens S.p.a., Milano, 2013.
- [64] Siram, *Schema funzionale del rinnovo centrale termica*, Siram S.p.A., Milano, 2006.
- [65] Solar Energy Laboratory, *TRNSYS 17 Documentation*, University of Wisconsin-Madison, Madison, WI (USA), 2014.
- [66] Thermac S.r.l., *Progetto per unità di condizionamento*, Sime sistemi S.p.A., Firenze, 1989.
- [67] Testo, *175 H1. Data logger per temperatura e umidità*, Testo S.p.A., Settimo Milanese (MI), 2016.
- [68] Testo - Laboratorio di Taratura, *Certificato di Taratura TST 65/2013 PD*, Testo S.p.A., Limena (PD), 2013.
- [69] Trox Italiana S.p.A., *Manuali di uso e manutenzione diffusori ad effetto elicoidale*, Archivio Ufficio Servizio Manutenzione Consorzio RFX, Padova, 2002.
- [70] Valentini, G., *Il ricorso al Finanziamento Tramite Terzi*, MICA-ENEA, Roma, 1997.

# Sitografia

[71] Agenzia Nazionale Efficienza Energetica, *Provvedimenti sull'Efficienza Energetica*.

<http://www.acs.enea.it/provvedimenti/>

[72] Agenzia Regionale per la Prevenzione e Protezione Ambientale del Veneto, *Open Data ARPAV per Meteo e Clima*.

<http://www.arpa.veneto.it/dati-ambientali/open-data/>

[73] Comefri Ventilatori, *Aeolus4 Selection Software*.

<http://download.comefri.com/aeolus4>

[74] Consorzio RFX, *The Experiment*.

<https://www.igi.cnr.it/?q=content/experiment-introduction/>

[75] Consiglio Nazionale delle Ricerche di Padova, *Istituti CNR di Padova*.

<http://www.pd.cnr.it/index.php/it/informazioni/istituti/>

[76] Elsevier, *Science Direct*.

<http://www.sciencedirect.com/>

[77] Efficiency Valuation Organization, *International Performance Measurement and Verification Protocol (IPMVP)*.

<http://evo-world.org/en/products-services-mainmenu-en/protocols/ipmvp/>

- [78] European Commission, *Nuclear Energy Research*.  
<http://ec.europa.eu/research/energy/euratom>
- [79] Federazione Italiana per l'uso Razionale dell'Energia, *Il Protocollo Internazionale di Misura e Verifica dei Risultati (IPMVP)*.  
<http://www.fire-italia.org/ipmvp/>
- [80] Google, *Maps*.  
<https://www.google.it/maps/>.
- [81] International Thermonuclear Experimental Reactor, *ITER Machine*.  
<https://www.iter.org/mach/>
- [82] Research Gate, *Publications*.  
<https://www.researchgate.net/>
- [83] Techstreet, *ASHRAE Standards*.  
<http://www.techstreet.com/publishers/ashrae/>
- [84] Università degli Studi di Padova, *Polo Bibliotecario di Ateneo*.  
<http://bibliotecadigitale.cab.unipd.it/>
- [85] University of Wisconsin-Madison College of Engineering's Solar Energy Lab, *TRaNsient SYstems Simulation Program*.  
<http://sel.me.wisc.edu/trnsys/>
- [86] UK's National Calculation Method for Non Domestic Buildings, *iSBEM Schedules. Internal heat gains*.  
<http://www.uk-ncm.org.uk/download.jsp>
- [87] US Department of Energy, *National Renewable Energy Laboratory*.  
<http://www.nrel.gov/>

[88] US National Institute of Standards and Technology, *Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties Database*.

<https://www.nist.gov/srd/refprop/>

Ultima consultazione: giugno 2017.



# Indice analitico

- Baseline Adjustments, 84
- Baseyear Energy Data, 54
- Bollette, 39
- Capital Budgeting, 126
- Carico interno, 74
- Centrale Frigorifera, 18
- Centrale Termica, 16
- CNR, 9
- Consorzio RFX, 11
- Energy Conservation Measures, 111
- Energy Management System, 43
- Energy Savings, 117
- Energy Service Companies, 108
- IGI-RFX, 21
- Impianti termici e frigoriferi, 28
- Indici di prestazione energetica
  - Attuali, 58
  - Simulati, 103
- IPMVP, 35
- Measurement & Verification, 117
- Ombreggiatura, 71
- Option D, 60
- Profili di consumo
  - Attuali, 55
  - Simulati, 98
- Rendimento, 89
- Simulation Model, 59
- Stratigrafia, 67
- TRNSYS, 61
- Type, 62
- Zona termica, 64



# Appendice A



**Tabella 8:** Scheda tecnica sintetica della strumentazione di misura.**(a)** Distanziometro con sensore laser Bosch GLM 100C.

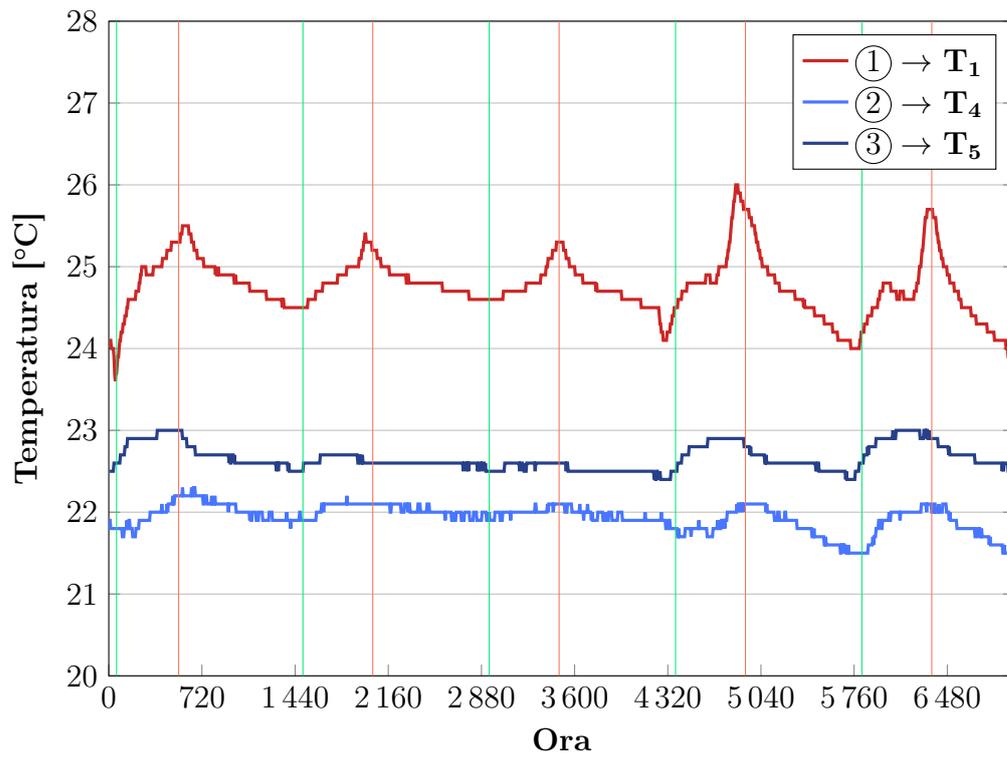
<b>Descrizione</b>	<b>Valore</b>	
Parametro	Distanza	Angolo
Sensore	Laser	Laser
Campo	0,05 m-100 m	0°-360°
Incertezza	$\pm 0,0015$ m	$\pm 0,2^\circ$
Risoluzione	0,001 m	0,1°
Campionamento (minimo)	0,5 s-4 s	
Interfaccia	Bluetooth	

**(b)** Contabilizzatore di energia Coster IET 7383.

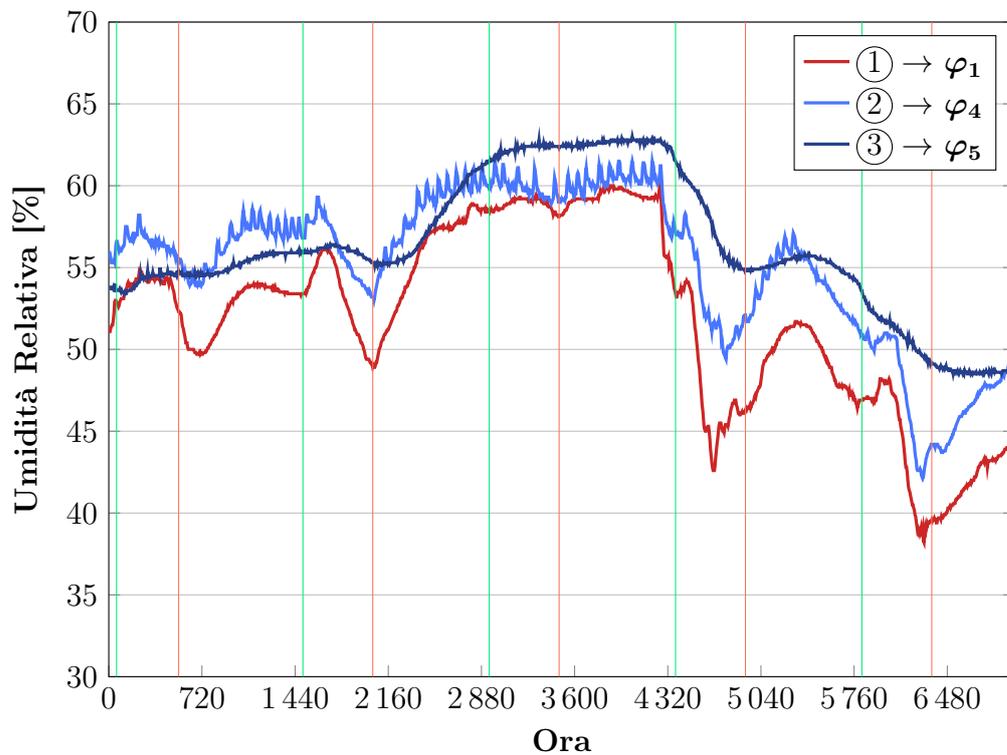
<b>Descrizione</b>	<b>Valore</b>	
Parametro	Temperatura	Portata
Sensore	Pt1000	Volumetrico
Campo	0 °C-150 °C	0,16 m <sup>3</sup> /h-20 m <sup>3</sup> /h
Incertezza	$\pm 0,5$ °C	$\pm 2$ %
Risoluzione	0,1 °C	n.d.
Campionamento	0,2 s-4 h	
Interfaccia	C-Bus	

**(c)** Misuratore termoigrometrico con data logger Testo 175 H1.

<b>Descrizione</b>	<b>Valore</b>	
Parametro	Temperatura	Umidità Relativa
Sensore	NTC	Capacitivo
Campo	-20 °C-55 °C	0 %-100 %
Incertezza	$\pm 0,4$ °C	$\pm 2$ %
Risoluzione	0,1 °C	0,1 %
Campionamento	10 s-24 h	
Interfaccia	Mini-USB/SD-card	



(a) Temperature registrate.



(b) Umidità relative registrate.

**Figura 3:** Rilevazione strumentale dei parametri termoigrometrici di IGI-RFX. Si può notare come le grandezze rispettino i regimi di comfort definiti nel Capitolo 3.



Laboratorio di taratura Testo Spa - Filiale italiana di Testo SE & Co KGaA

## Certificato di Taratura n° TST 65/2013 PD

### Misura della Temperatura ed Umidità

<b>E' costituito da:</b> number of pages	Nr. 3 pagine	<p>Il presente Certificato di Taratura è rilasciato dal Laboratorio di Taratura della <b>Testo S.p.A.</b>, il quale opera con strumenti e procedure conformi alla normativa UNI ISO 10012-2 e riconosciute dal Servizio di Taratura della <b>Testo SE &amp; Co KGaA</b> di LenzKirch, accreditato come centro di taratura DAKKS dal PTB tedesco (Physikalisch Technische Bundesanstalt; equivalente ACCREDIA). Questo riconoscimento garantisce : - la riferibilità degli strumenti , usati dal Laboratorio per i controlli di taratura, a Campioni nazionali o internazionali delle unità del Sistema Internazionale di unità SI). - la correttezza metrologica delle procedure di misura adottate dal Laboratorio.</p> <p>This Calibration Certificate has been released by the Calibration Laboratory of <b>Testo S.p.A.</b> who adopts instruments and procedures in accordance with the UNI ISO 10012-2 and approved by the Calibration Laboratory of <b>Testo SE &amp; Co KGaA</b> in Lenzkirch, recognised as a DAKKS Calibration Laboratory from the german PTB (Physikalisch Technische Bundesanstalt; equivalent to ACCREDIA). This document guarantees: - the traceability of the instruments, used in the laboratory for the Calibrations, to national or international Standards of the International System of units (SI) - the metrological accuracy of the procedures of measurement adopted by the Laboratory.</p> <p><b>Il Responsabile del Laboratorio</b> <b>RAVELLI P.I. TULLIO</b> <i>Tullio Ravello</i></p>
<b>- in data</b> date	23 gennaio 2013	
<b>- destinatario</b> consignee	PRISMA ENGINEERING SRL	
<b>- richiesta</b> application		
<b>- in data</b> date		
<b>Si riferisce a:</b> referring to	Strumento con Sonda/Sensore per la misura di Temperatura / Umidità	
<b>- costruttore</b> manufacturer	Testo AG	
<b>- modello strumento</b> device model	0563 1757-Datalogger Testo 175-H1	
<b>- serie strumento</b> device serial number	38102139/806	
<b>- modello sonda</b> model		
<b>- serie sonda</b> serial number		
<b>- data delle misure</b> date of measurement	23 gennaio 2013	
<b>- registro di laboratorio</b> laboratory reference	TST 65/2013 PD	

I risultati di misura riportati nel presente Certificato sono stati ottenuti applicando le procedure **tst 03/01-1** la cui catena di riferibilità ha inizio dai campioni di prima linea descritti nella seconda pagina del presente Certificato.

The measurement results reported in this certificate were obtained following the procedures **tst 03/01-1**. Traceability is through first line standards described in the second page of this certificate.

Le incertezze di misura dichiarate in questo certificato, sono espresse come due volte la deviazione standard cioè con un livello di confidenza pari al 95 % nel caso di una distribuzione normale.

The measurement uncertainties stated in this certificate, are estimated at the level of twice the standard deviation that means a confidence level of about 95% using a normal distribution.

E' ammessa la riproduzione conforme ed integrale del presente certificato, se autorizzata dal destinatario. Ogni riproduzione parziale o semplice citazione deve essere inoltre autorizzata dal Laboratorio di Taratura Testo S.p.A.

The reproduction of this certificate in its entirety is only permitted if authorized by the addressee. Any partial reproduction or quotation of the measurements results alone must also be authorized by the Calibration Laboratory of Testo S.p.A.

## Certificato di Taratura n° TST 65/2013 PD

### Misura della Temperatura ed Umidità

**Utente :** PRISMA ENGINEERING SRL  
VIA XI FEBBRAIO 2/A  
35020 VILLATORA DI SAONARA (PD)

Strumento ricevuto per controllo di taratura in data:

Taratura eseguita il: **23 gennaio 2013**

Certifichiamo che lo strumento descritto nel presente certificato (vedasi pagina 3) è stato controllato nel laboratorio della Testo S.p.a. in Limena, in accordo alle seguenti procedure di prova: **tst 03/01-1**

Certifichiamo altresì che la taratura è stata condotta mediante impiego della seguente strumentazione di controllo (campioni di prima linea)\*:

N° Certificato

Emesso il:

* Termoigrometro Testo Mod. 650 serie 00492119/101, sonda 0636 9741 serie 10054988 Certificato DAkks N° F17885	F17885	08/08/2012
* Termoigrometro Testo Mod. 650 serie 00492119/101, sonda 0636 9741 serie 20282155 Certificato DAkks N° F18066	F18066	08/08/2012

I ns. campioni di prima linea sono calibrati presso centri ACCREDIA o equivalenti.

Sono disponibili a richiesta copia dei certificati di taratura dei ns. campioni primari. E' possibile inoltre prendere visione delle ns. procedure di controllo di taratura degli strumenti.

Il controllo di taratura, eseguito sulla base delle ns. specifiche di controllo, è basato su misure di confronto tra la strumentazione di riferimento e la coppia da tarare (strumento indicatore più sensore funzionanti assieme).

**Il Responsabile del Laboratorio**  
**RAVELLI P.I. TULLIO**

*Tullio Ravello*

In 3a pagina: risultati del controllo di taratura.

## Certificato di Taratura n° TST 65/2013 PD Misura della Temperatura ed Umidità

### Condizioni ambientali di misura

	Unità misura	Valori di prova	
Temperatura	°C	22,3	
Pressione	mbar	995	
Umidità relativa	%	34,8	

Costruttore  
**Testo AG**

Modello strumento  
**0563 1757-Datalogger Testo 175-H1**

Numero di serie strumento  
**38102139/806**

Tipo di sensore della sonda di misura  
**NTC + Ceramico**

Modello e numero di serie della sonda

**Incertezza di misura del  
procedimento di taratura :**  $\pm 0,6$  °C  
 $\pm 1,3\%$  UR

### TABELLA DEI VALORI DI TARATURA

PARAMETRO	Unità di misura	Valore nominale	Valore campione	Valore oggetto	Scostamento
Umidità relativa	%	11,30	11,30	11,00	-0,30
Temperatura	°C	25,00	24,80	24,70	-0,10
Umidità relativa	%	75,30	75,50	75,40	-0,10
Temperatura	°C	25,00	24,80	24,70	-0,10

Lo strumento in taratura soddisfa i limiti di errore determinati dal costruttore

Annotazioni:

**Operatore della Taratura**  
Nicola Piotto

**Il Responsabile del Laboratorio**

RAVELLI P.I. TULLIO

*Tullio Ravello*



# Appendice B



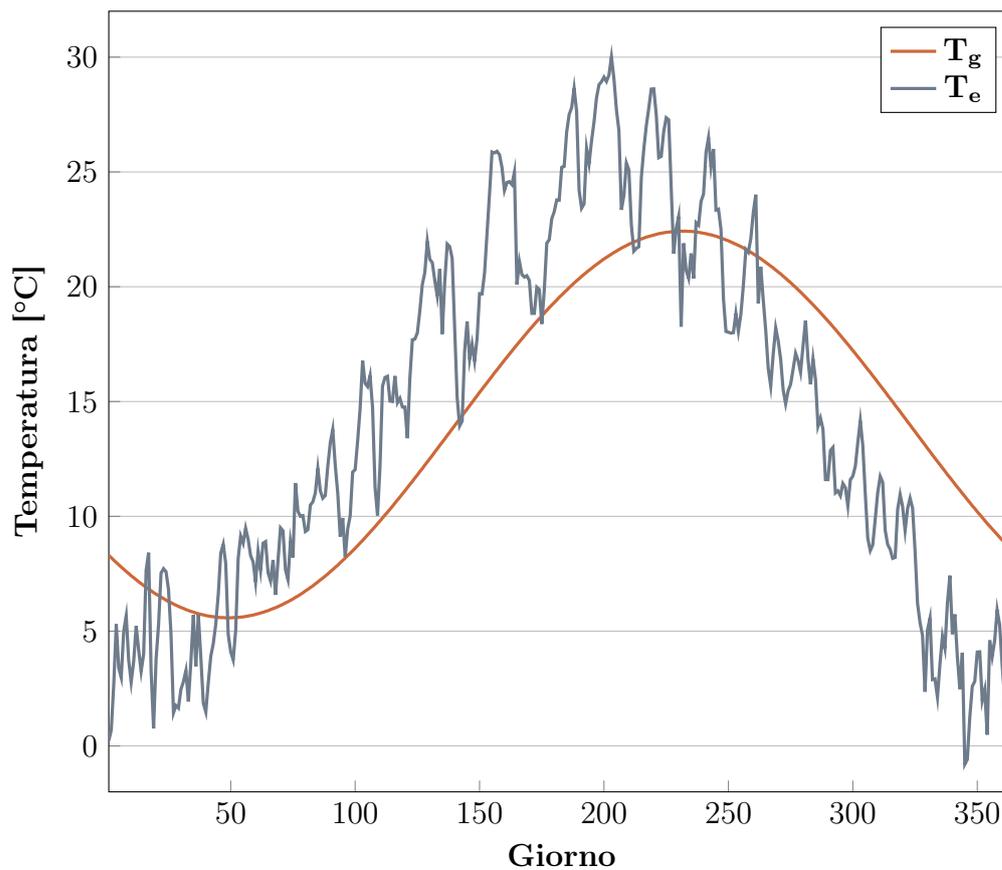


**Tabella 10:** Dettaglio del calcolo del rendimento di distribuzione.**(a)** Grandezze costanti e gruppi adimensionali nel calcolo del rendimento di distribuzione.

Acqua	$r_1$	$r_2$ [m]	$l$	$\lambda$ [W/(m · K)]	Re	Pr	Nu
Calda	0,057	0,093	350	0,025	2011	2,69	3,66
Refrigerata	0,110	0,155			210	9,08	

**(b)** Grandezze dipendenti dalla temperatura media del fluido termovettore nel calcolo del rendimento di distribuzione.

$\bar{T}_2$ [K]	$\rho_w$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda_w$ [W/(m · K)]	$\mu_w$ [mPa · s]	$c_p$ [J/(kg · K)]	$h$ [W/(m <sup>2</sup> · K)]
341,47	979,54	0,66	0,41	4188,30	20,81
285,79	999,62	0,58	1,27	4193,80	9,86

**(c)** Temperatura del terreno ( $T_g$ ) ricavata a partire dalla temperatura dell'ambiente esterno ( $T_e$ , media giornaliera per l'anno 2015).

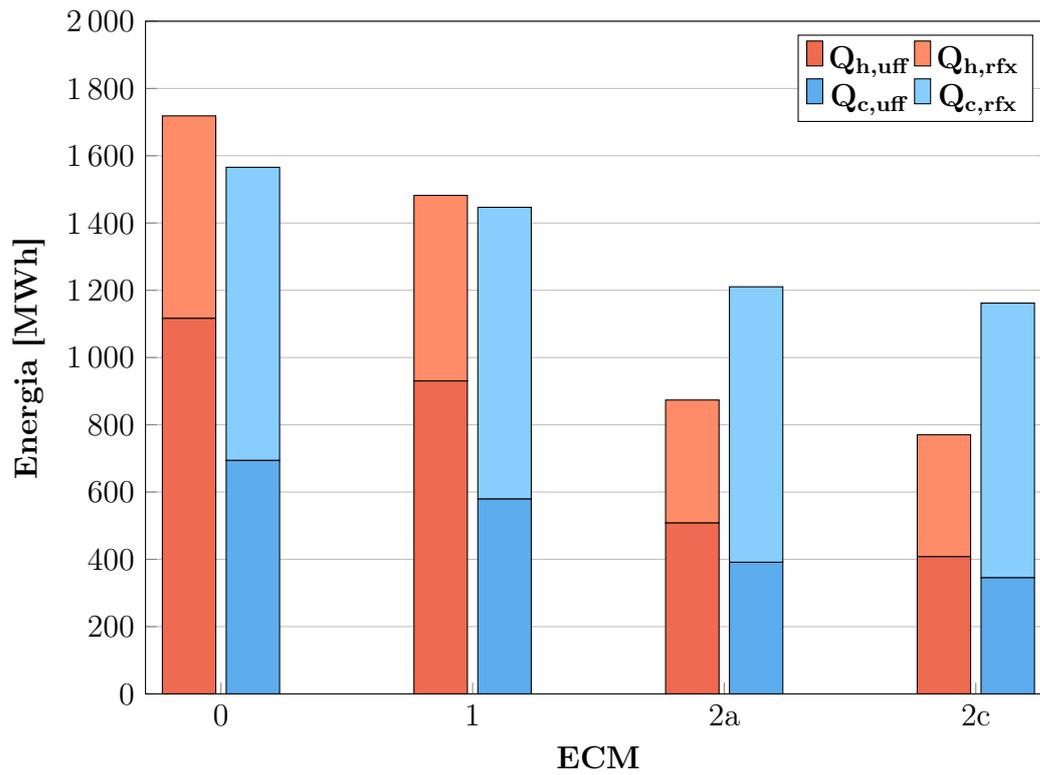
# Appendice C



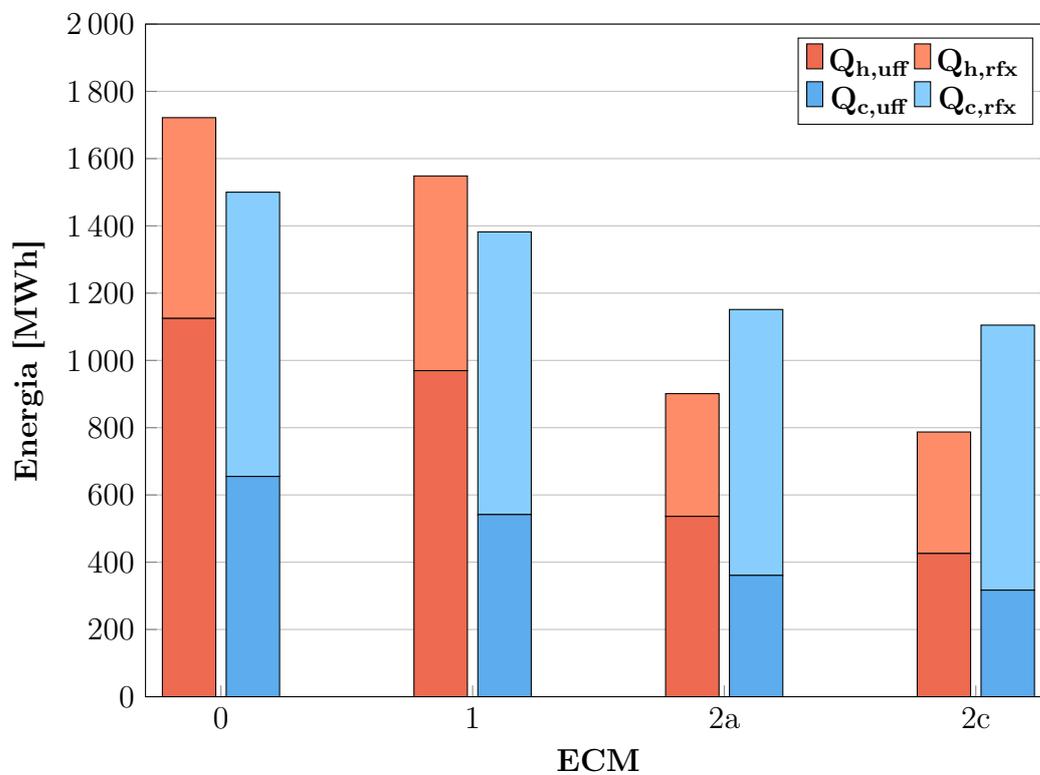
**Tabella 11:** Fabbisogni annuali simulati post interventi di riqualificazione.

Caso	Anno	$Q_{h,uff}$	$Q_{h,rfx}$	$Q_{h,tot}$	$Q_{c,uff}$	$Q_{c,rfx}$	$Q_{c,tot}$
[MWh]							
0	2012	1116,5	602,0	1718,5	694,0	871,7	1565,7
	2013	1124,9	550,6	1675,5	655,0	845,2	1500,2
	2014	1001,9	504,2	1506,1	645,5	892,1	1537,6
	2015	1175,2	610,6	1785,8	618,7	845,3	1464,0
1	2012	930,3	551,8	1482,1	579,2	867,5	1446,7
	2013	969,6	578,9	1548,5	541,7	840,4	1382,1
	2014	841,5	467,8	1309,3	528,3	888,0	1416,3
	2015	992,2	558,7	1550,9	501,2	839,9	1341,1
2a	2012	508,0	365,7	873,7	391,2	819,2	1210,4
	2013	536,4	364,8	901,2	360,9	790,5	1151,4
	2014	465,2	308,8	774,0	349,4	841,6	1191,0
	2015	561,6	365,9	927,5	324,7	787,8	1112,5
2c	2012	407,9	362,4	770,3	345,3	816,6	1161,9
	2013	426,0	361,2	787,2	317,0	787,9	1104,9
	2014	358,2	304,5	662,7	305,5	837,8	1143,3
	2015	446,3	362,0	808,3	285,0	785,4	1070,4

Si riportano gli output completi annuali (Tabella 11, Figure 4-5) e orari della simulazione dinamica: in rosso si segnala la potenza termica oraria ( $Q_{h,tot}$ ) e in blu quella frigorifera ( $Q_{c,tot}$ ), prese entrambe in valore assoluto; per ogni simulazione vengono indicati anche i punti di massimo del carico termico e frigorifero. Si allega anche il breve codice sorgente in linguaggio MATLAB necessario per la lettura automatica dei file di output delle simulazioni e per la compilazione dei presenti grafici.

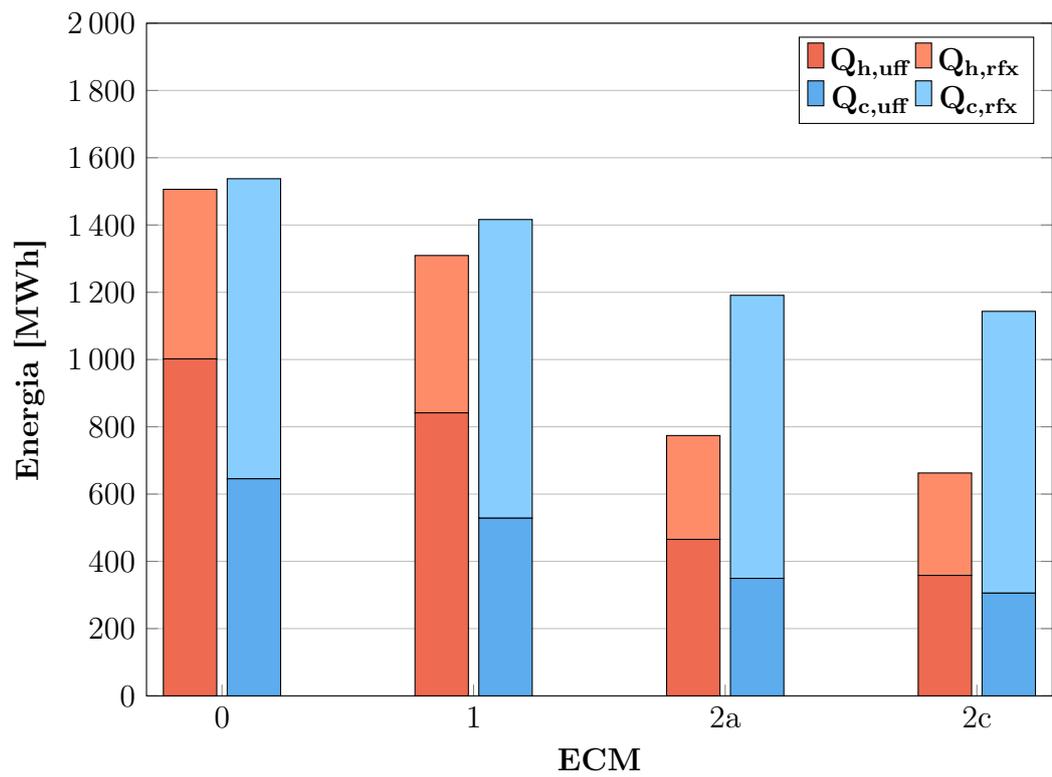


(a) 2012.

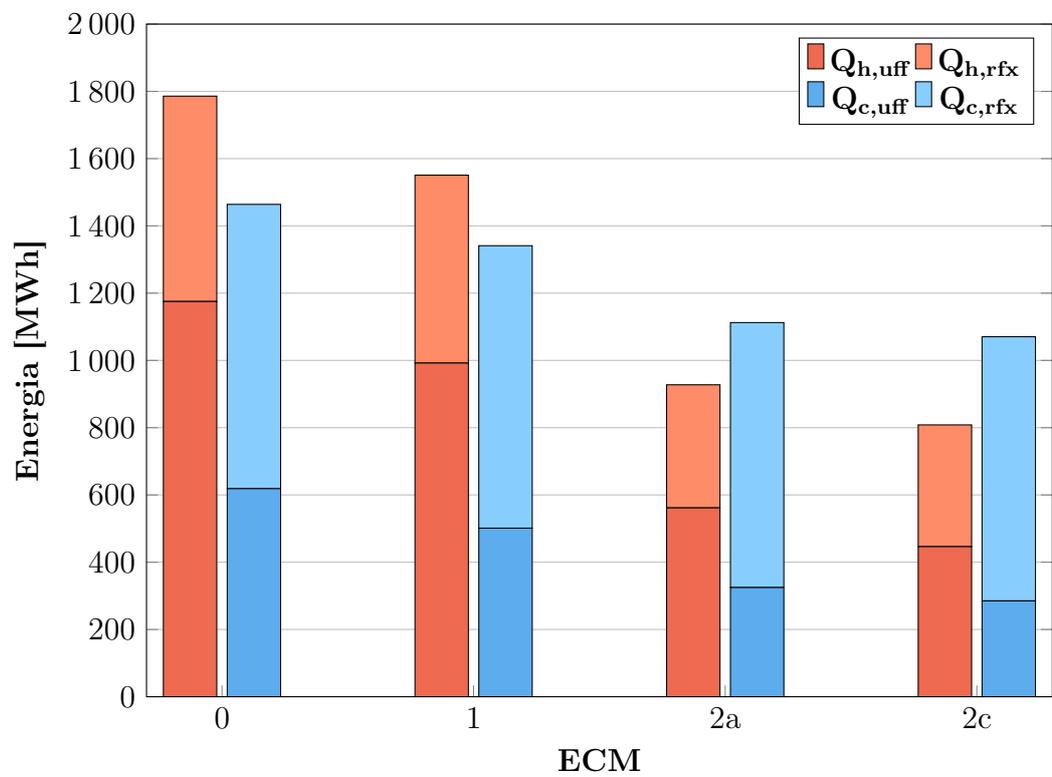


(b) 2013.

**Figura 4:** Grafico dei fabbisogni annuali simulati di IGI-RFX post interventi di qualificazione divisi per aggregato (2012-2013).



(a) 2014.



(b) 2015.

**Figura 5:** Grafico dei fabbisogni annuali simulati di IGI-RFX post interventi di riqualificazione divisi per aggregato (2014-2015).

```
% file input: 201i.csv con i=2:5
% file output: 20i-j.pdf con j=1:4

clc
clear all

for i=2:5

    for j=1:4

        % read input
        M=csvread(strcat('.\csv\201',num2str(i),'-',...
            num2str(j),'.csv'));
        t=M(:,1);
        Qhsim=M(:,5);
        Qcsim=M(:,6);

        % plot graphs
        plot(t,Qcsim,'b',t,Qhsim,'r','Linewidth',0.1);
        xlabel('[h]');
        ylabel('[kW]');
        axis([0 8760 0 800])
        legend('Q_{c,sim}','Q_{h,sim}')

        % max heat/cool load
        indexmax_h = find(max(Qhsim) == Qhsim);
        t_max_h = t(indexmax_h);
        Qhsim_max = round(Qhsim(indexmax_h));
        ind_h = '\leftarrow max_h = ';
```

```

strmax_h = [ind_h,num2str(Qhsim_max)];
text(t_max_h,Qhsim_max,strmax_h,...
     'HorizontalAlignment','Left',...
     'VerticalAlignment','Baseline');
indexmax_c = find(max(Qcsim) == Qcsim);
t_max_c = t(indexmax_c);
Qcsim_max = round(Qcsim(indexmax_c));
ind_c = '\leftarrow max_c = ';
strmax_c = [ind_c,num2str(Qcsim_max)];
text(t_max_c,Qcsim_max,strmax_c,...
     'HorizontalAlignment',...
     'Left','VerticalAlignment','Baseline');

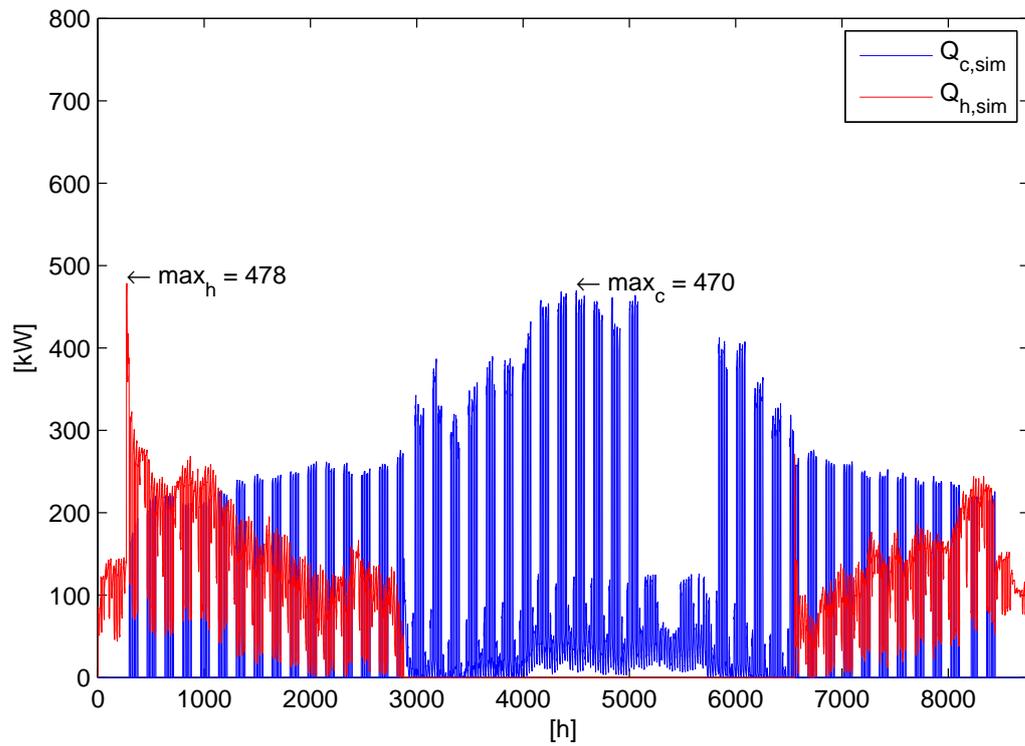
% print output
set(gca,'LooseInset',get(gca,'TightInset'));
set(gcf,'PaperUnits','centimeters');
set(gcf,'PaperPosition',[0 0 14.5 10.5]);
set(gcf,'PaperSize',[14.5 10.5]);
print(strcat('201',num2str(i),'-',...
            num2str(j)),'-dpdf');

% archive output
m_name_ind = strcat('201',num2str(i),'-',...
                    num2str(j)),'.pdf');
m_name_dir = strcat('\pdf');
movefile(m_name_ind,m_name_dir);

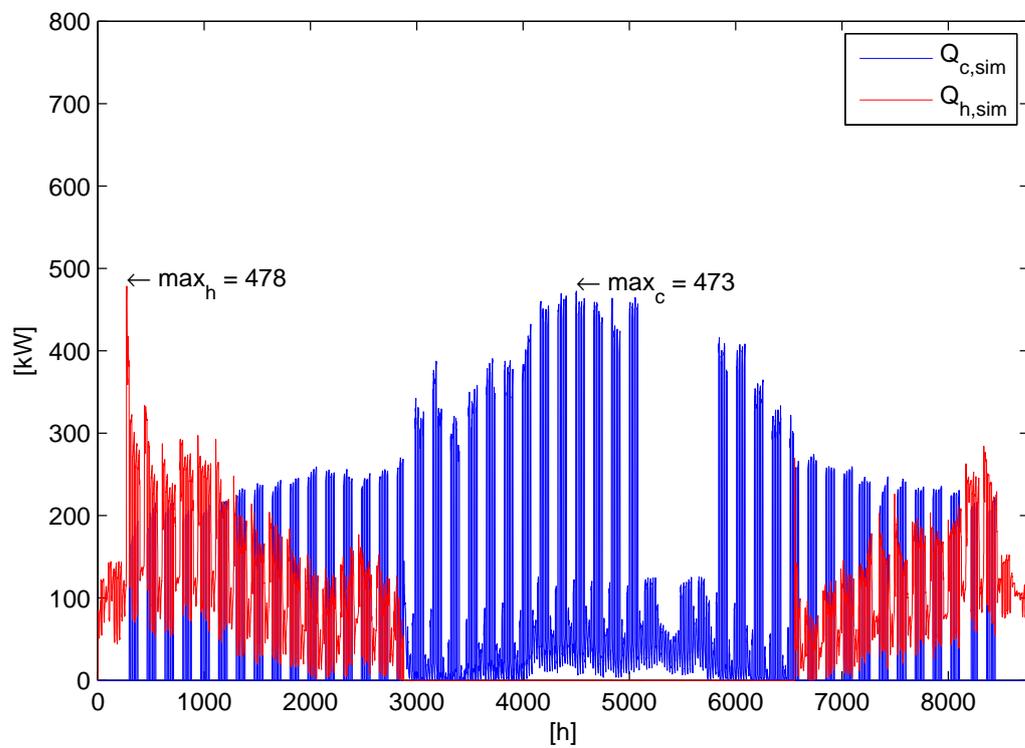
end

end

```

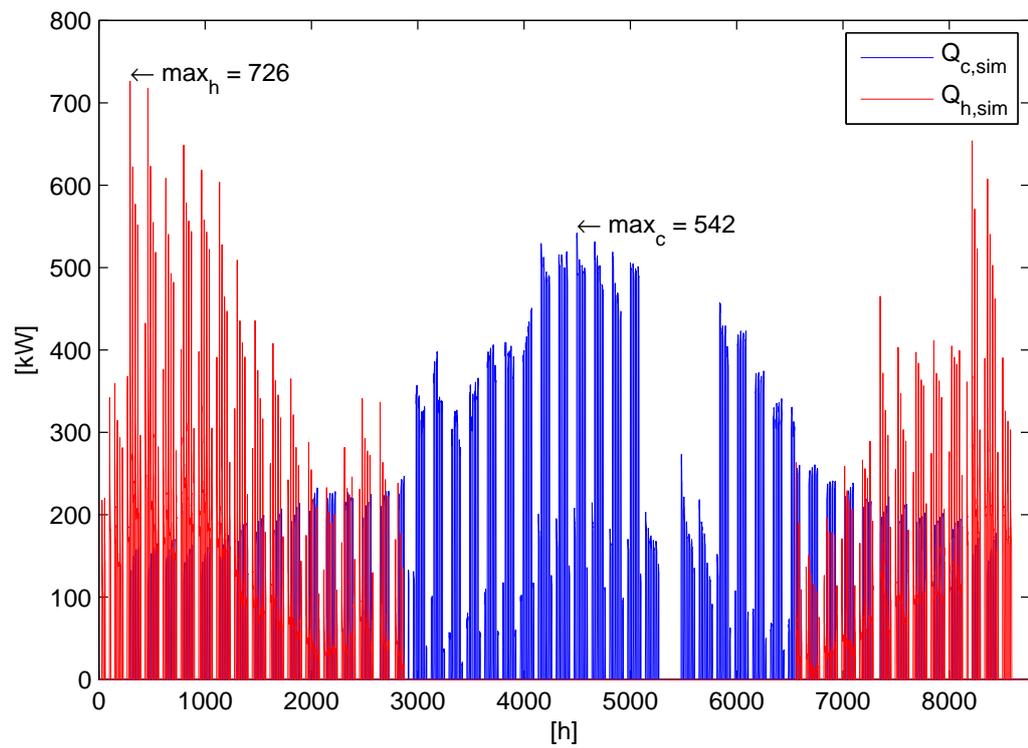


(a) 2012 - 1\_continuo

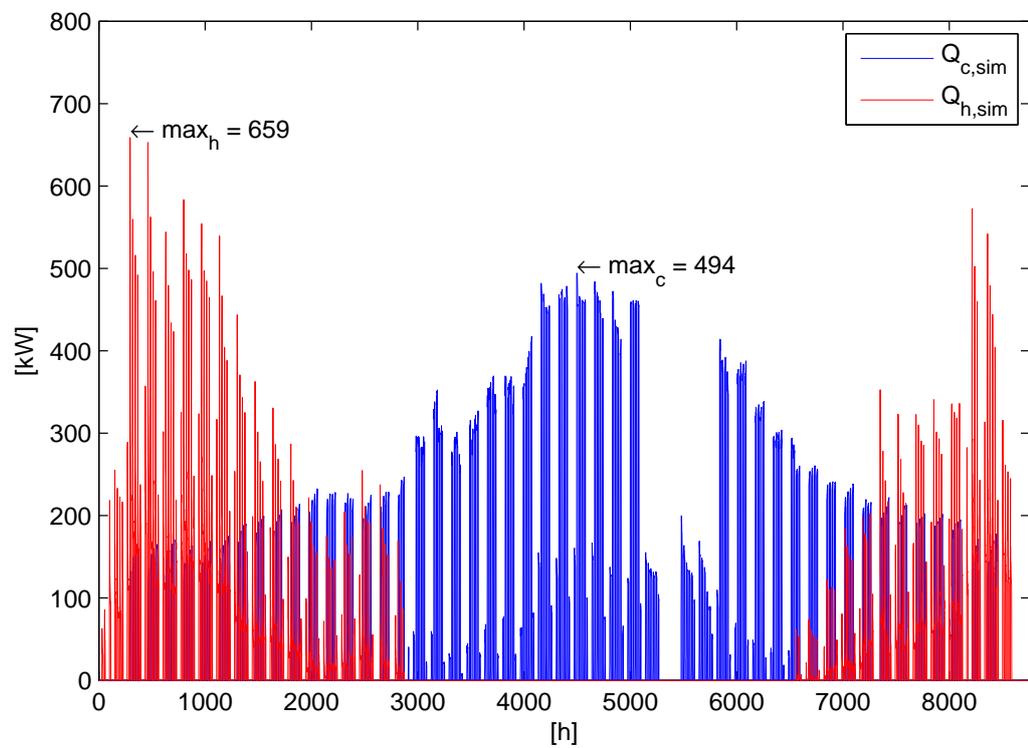


(b) 2012 - 2\_weekendoff

Output della simulazione: 2012 (0 - 1).

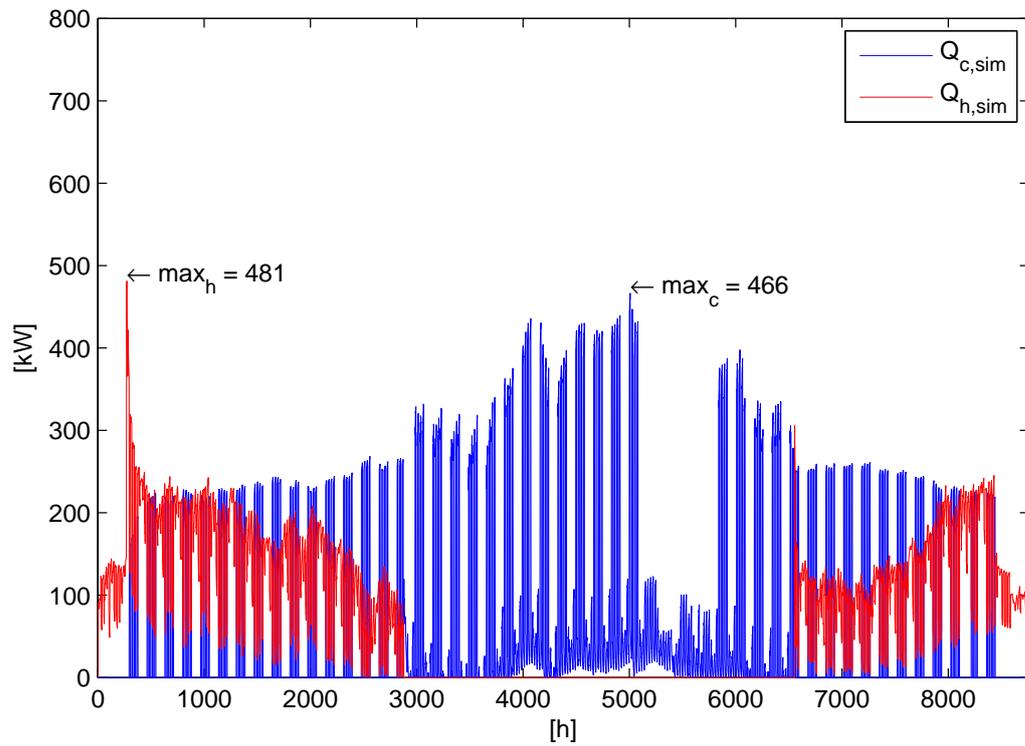


(a) 2012 - 4\_nightoff

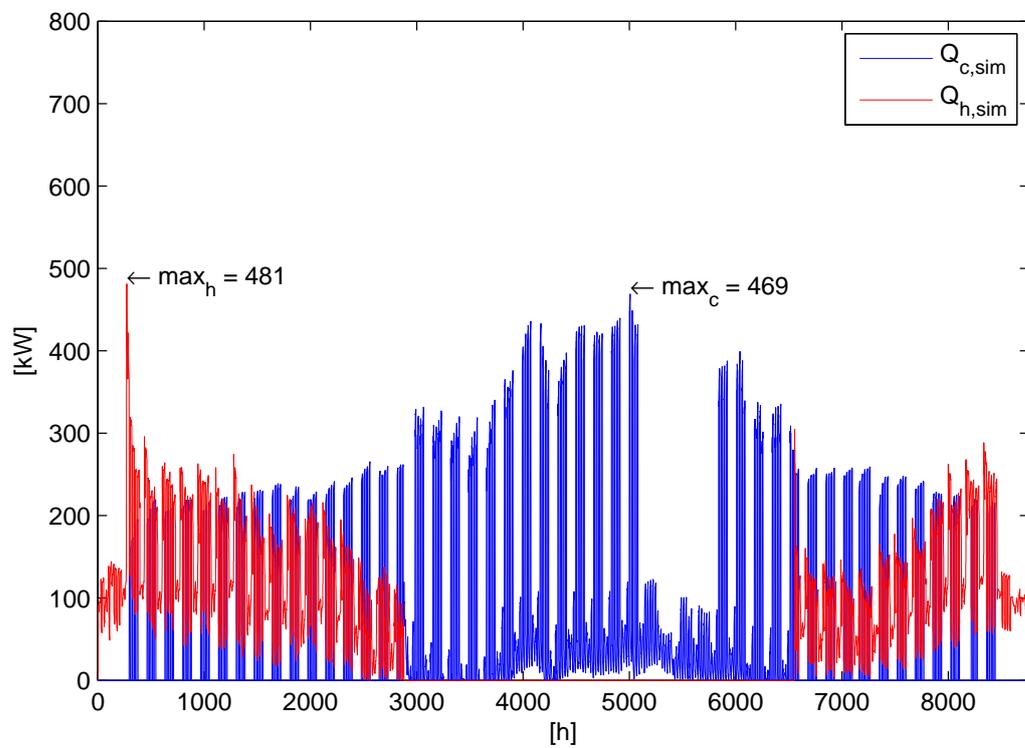


(b) 2012 - 5\_nightoff\_temp

Output della simulazione: 2012 (2a - 2c).

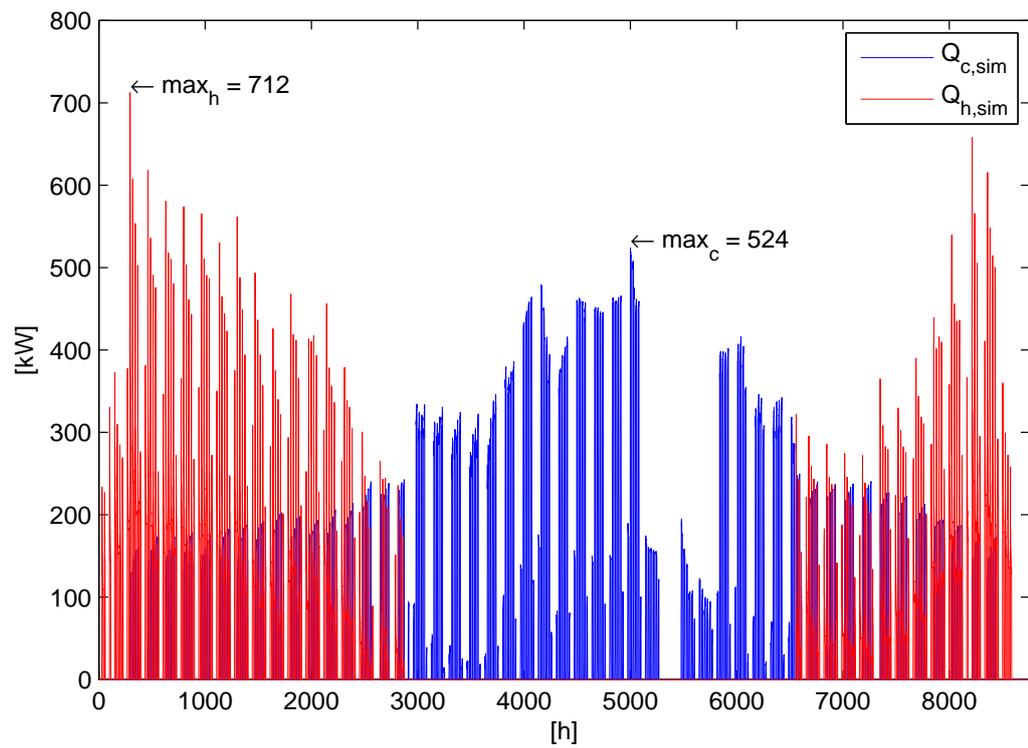


(a) 2013 - 1\_continuo

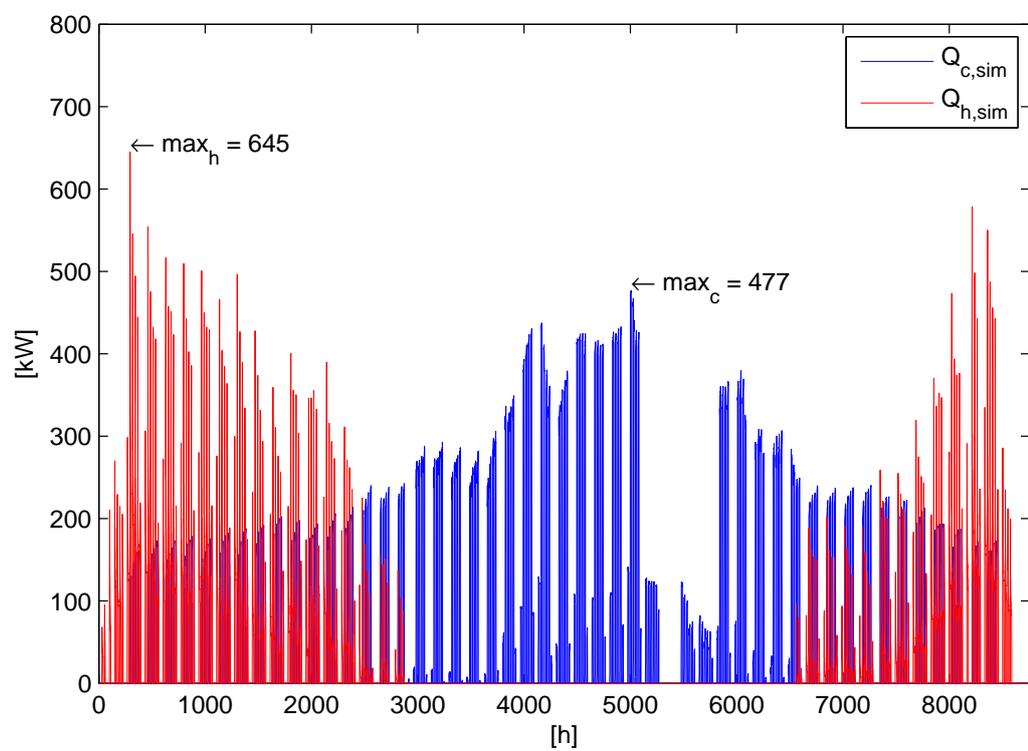


(b) 2013 - 2\_weekendoff

Output della simulazione: 2013 (0 - 1).

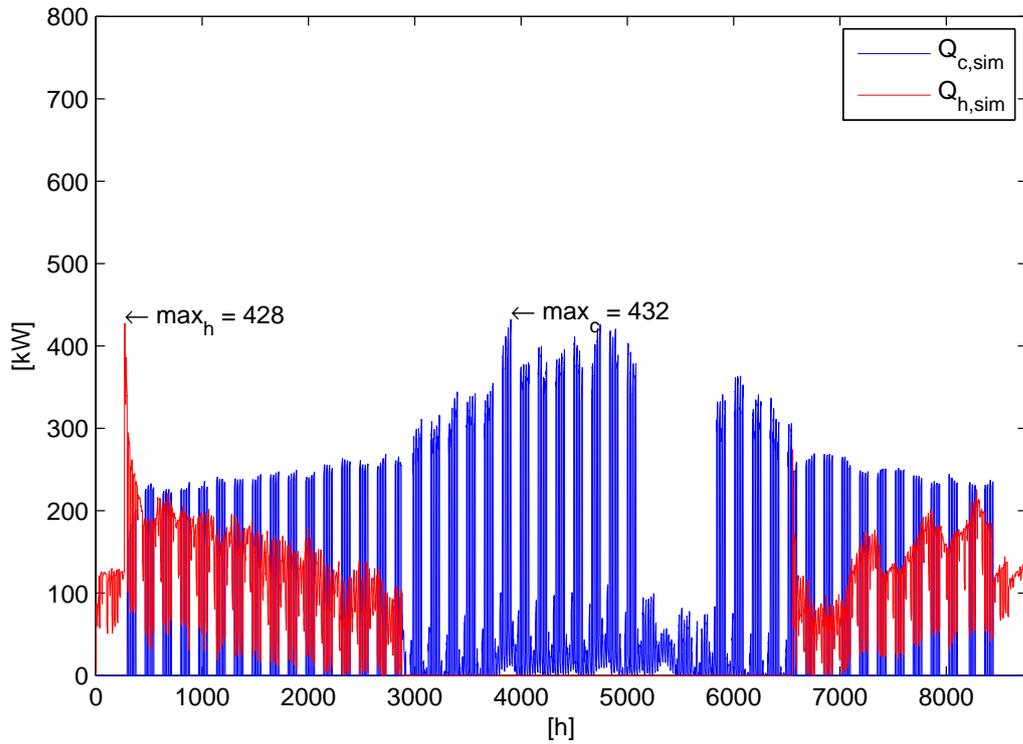


(a) 2013 - 4\_nightoff

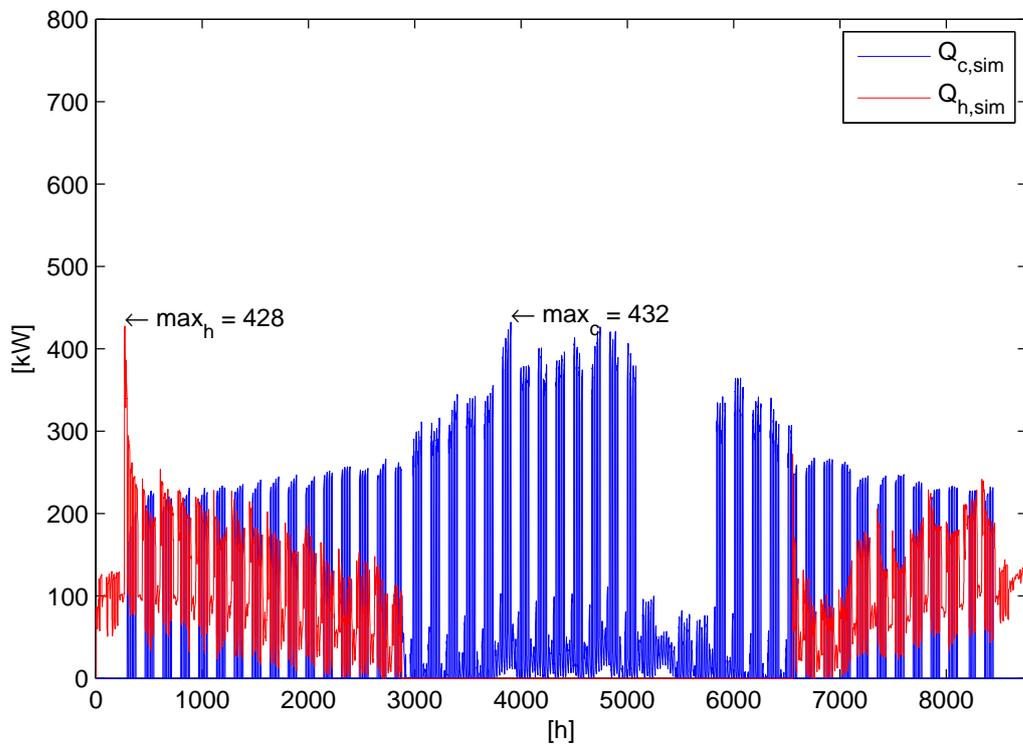


(b) 2013 - 5\_nightoff\_temp

Output della simulazione: 2013 (2a - 2c).

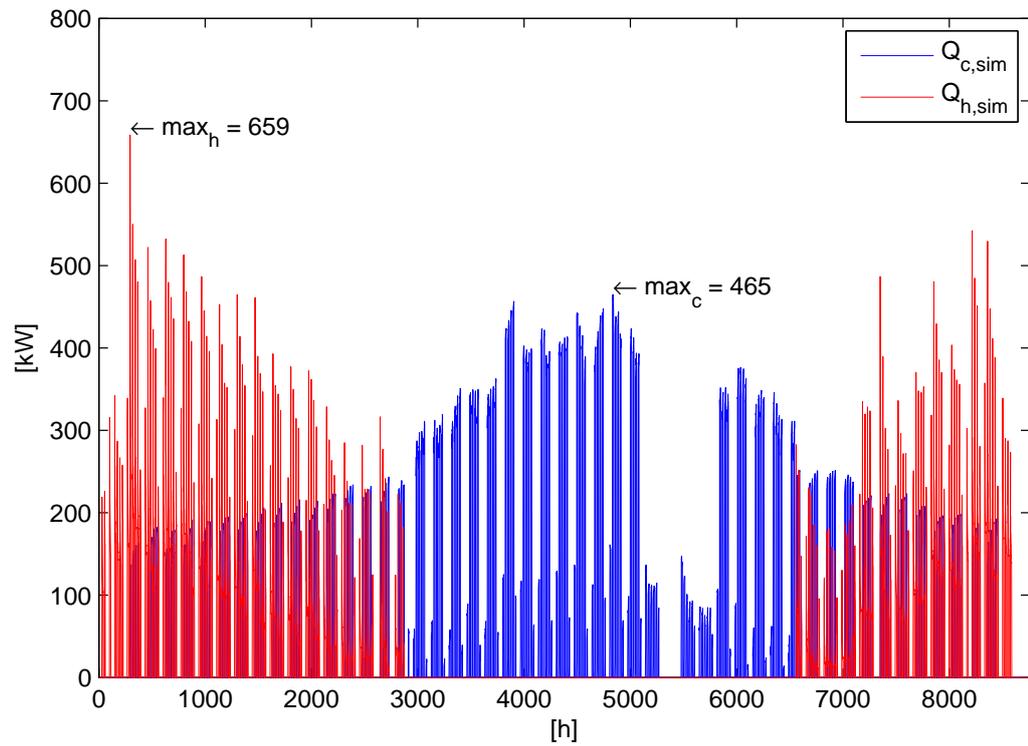


(a) 2014 - 1\_continuo

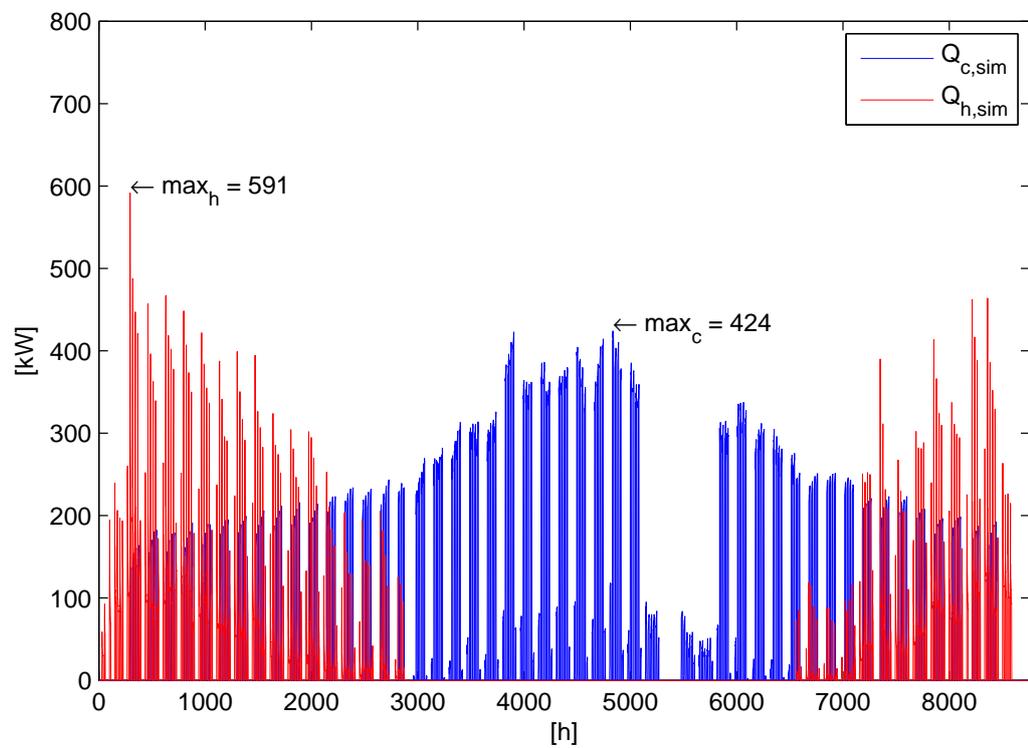


(b) 2014 - 2\_weekendoff

Output della simulazione: 2014 (0 - 1).

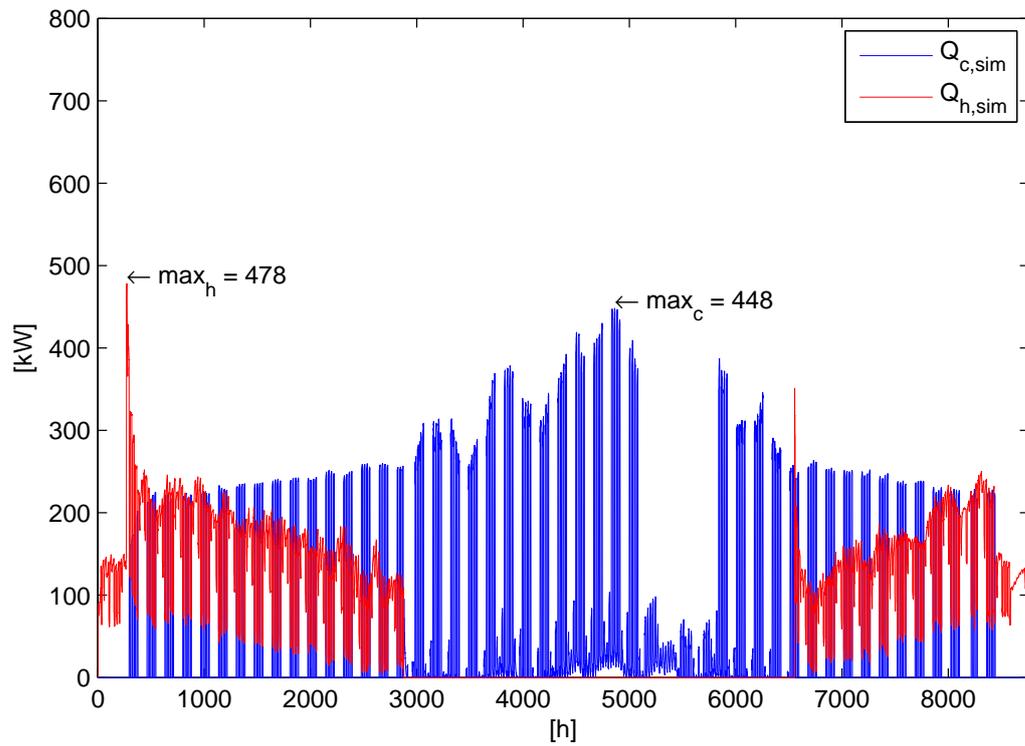


(a) 2014 - 4\_nightoff

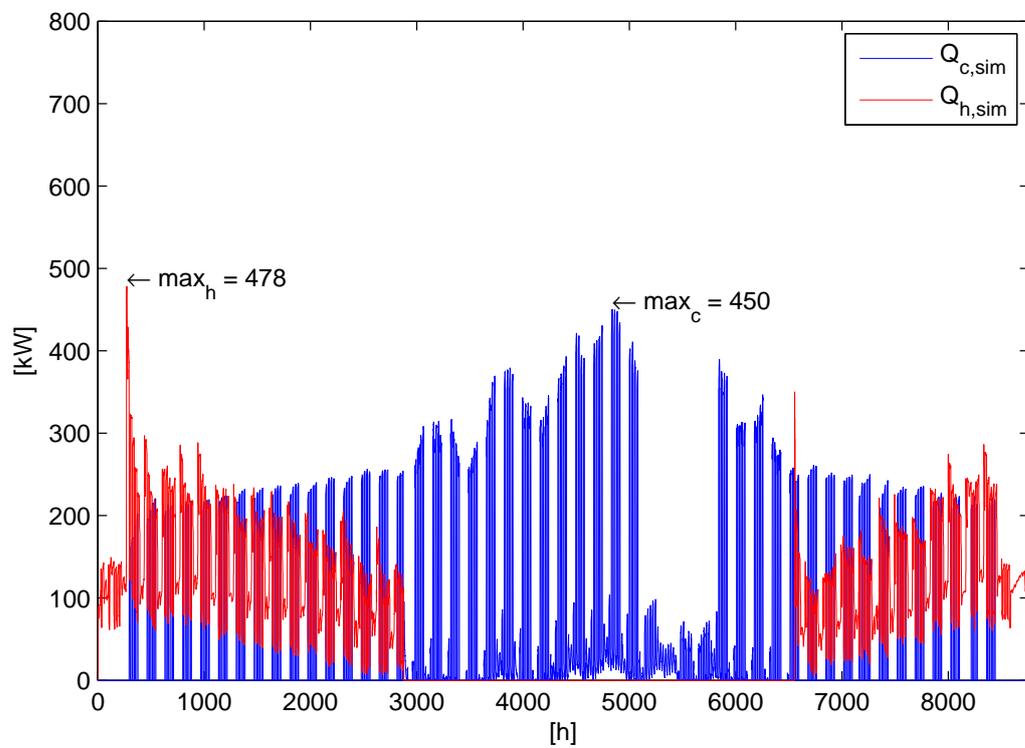


(b) 2012 - 5\_nightoff\_temp

Output della simulazione: 2014 (2a - 2c).

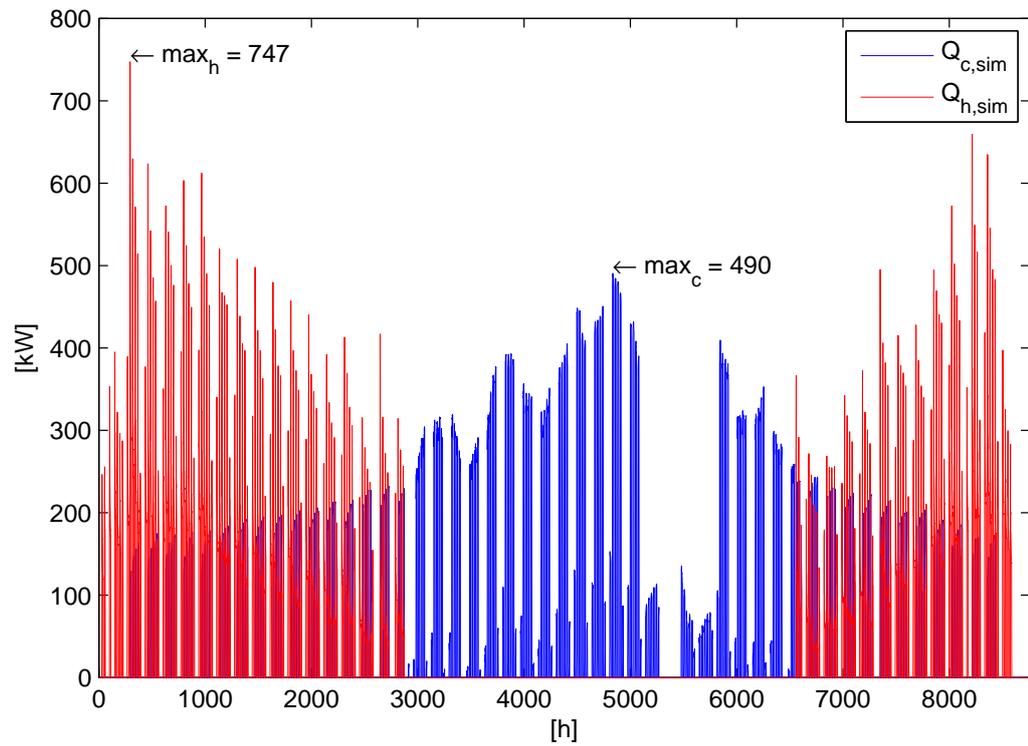


(a) 2015 - 1\_continuo

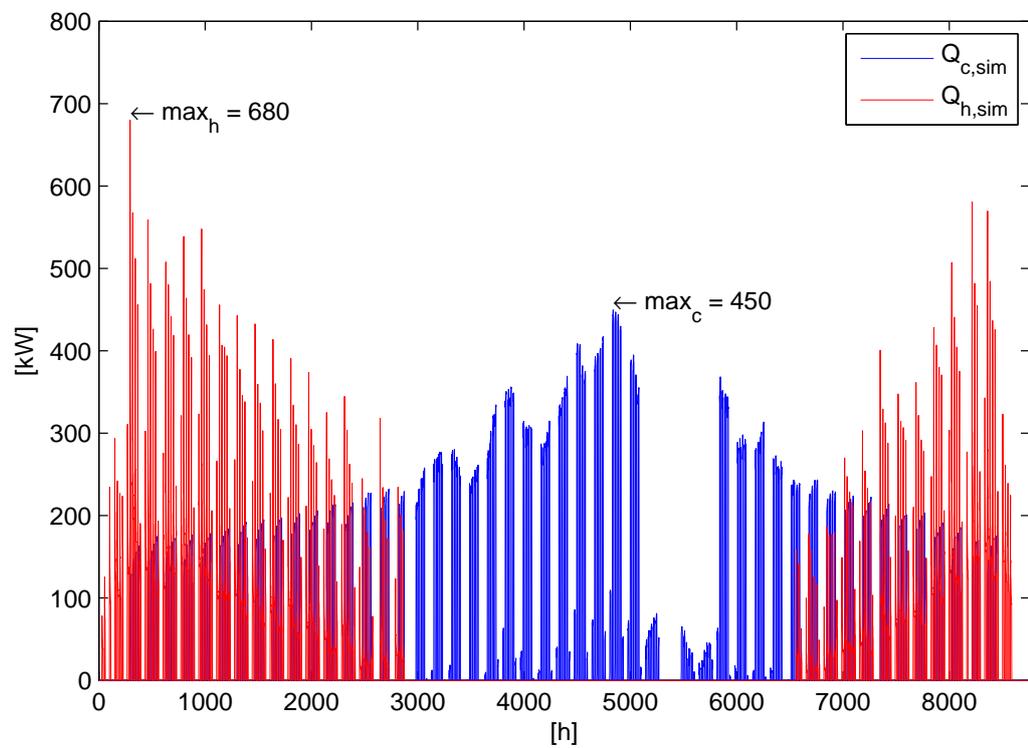


(b) 2015 - 2\_weekendoff

Output della simulazione: 2015 (0 - 1).



(a) 2015 - 4\_nightoff



(b) 2015 - 5\_nightoff\_temp

Output della simulazione: 2015 (2a - 2c).

