

# POLITECNICO DI TORINO

Tesi Magistrale in Ingegneria Energetica e Nucleare



Tesi Magistrale

## Analisi e sviluppo di un sistema informativo per il miglioramento della prestazione energetica nei data center: il caso di studio del Politecnico di Torino

Relatore

Prof. Alfonso CAPOZZOLI

Co-relatori

Prof. Marco Savino PISCITELLI

Prof. Roberto CHIOSA

Candidato

Fabio AMARILLI

Marzo 2023



# Sommario

Da molti anni il crescente processo di digitalizzazione in vari settori come quello bancario, e-commerce, sanitario ma anche dell'intrattenimento hanno contribuito a un costante sviluppo delle cosiddette *Information and Communication Technologies* (ICT). Con il termine ICT si intendono tutti i processi e le pratiche connesse alla trasmissione, ricezione ed elaborazione dei dati e delle tecnologie che si occupano di processi di raccolta, elaborazione e conservazione degli stessi dati. Tali tecnologie possono essere ospitate in strutture fisiche centralizzate che prendono il nome di Data Center (DC). I DC sono delle strutture in cui computer e data storage sono connessi in rete e sono essenziali per aziende ed altri enti o organizzazioni per poter archiviare, organizzare, elaborare e diffondere grandi quantità di dati. D'altro canto, i DC, richiedono un elevato quantitativo di energia elettrica per poter funzionare rendendoli quindi di elevato interesse da un punto di vista del loro potenziale in termini di efficientamento energetico. Secondo il rapporto del *Global Enabling Sustainability Initiative* (GESI) [1], infatti, l'energia richiesta per il loro funzionamento è pari all'8% dell'energia elettrica consumata in Europa, equivalente al 4% delle emissioni di CO<sub>2</sub> su scala europea. In particolare, uno dei principali servizi energetici che consente il corretto funzionamento e previene l'occorrenza di guasti nei DC è legato al condizionamento di tali ambienti speciali, e rappresenta ad oggi una delle principali leve per il raggiungimento degli obiettivi legati al miglioramento delle loro prestazioni in esercizio. Si è quindi potuto notare come il consumo energetico, secondo scenari di proiezione, possa passare, dal 2016 al 2030, da 1.15% a 1.86% del consumo energetico globale [2]. Questa previsione, quindi, comporta l'importanza nella gestione energetica dei DC in ottica globale, vista la loro densità energetica elevata in relazione alle dimensioni della struttura. Diventa dunque importante implementare tecniche di *continuous commissioning*, che consentono di monitorare costantemente le prestazioni del DC, identificando eventuali inefficienze o malfunzionamenti ed intervenendo prontamente per migliorare le prestazioni e ridurre i consumi energetici. Il *continuous commissioning* può essere perseguito attraverso una serie di attività, tra cui l'analisi dei dati, la valutazione delle prestazioni, la gestione degli impianti e la manutenzione programmata. In tale contesto vi è la necessità di dover monitorare e gestire i consumi energetici

al fine di ottimizzare il consumo delle risorse e ridurre i costi di gestione. Inoltre, la definizione di metriche per la valutazione delle prestazioni dei DC consente di misurare l'efficacia delle attività di *continuous commissioning* e di identificare eventuali aree di miglioramento. In questo elaborato di tesi è stata condotta una panoramica sullo stato dell'arte dei DC, parti costituenti e tipologie di raffreddamento, per poi analizzare nel dettaglio un caso studio di un DC all'interno del Politecnico di Torino definendone consumi e metriche calcolabili ed ipotizzando eventuali strategie di efficientamento grazie ad una modellazione energetica. Inoltre, è stato sviluppato un sistema di *Energy Information System* (EIS) che attraverso uno strumento di *dashboard* consente di supervisionare in continuo i consumi di energia e delle principali metriche di prestazione del DC considerato, al fine di consentire il processo di identificazione di eventuali anomalie.

# Ringraziamenti

Desidero ringraziare la mia famiglia per avermi sostenuto in ogni momento della mia vita accademica, offrendomi il loro sostegno e la loro fiducia incondizionati.



# Indice

<b>Elenco delle tabelle</b>	IX
<b>Elenco delle figure</b>	X
<b>Acronimi</b>	XV
<b>1 Introduzione ai Data Center</b>	1
1.1 Premessa . . . . .	2
1.2 Caratterizzazione del flusso energetico in un DC . . . . .	7
1.2.1 <i>IT equipment</i> . . . . .	11
1.2.2 Ridondanza . . . . .	16
1.2.3 <i>Uninterruptible Power Supply (UPS) e Power Distribution Unit (PDU)</i> . . . . .	18
1.2.4 Impianto di illuminazione . . . . .	19
1.2.5 Impianto di climatizzazione . . . . .	19
<b>2 Standard di riferimento e metriche</b>	25
2.1 EN 50600 . . . . .	26
2.2 ASHRAE . . . . .	29
2.2.1 Prima e seconda versione . . . . .	29
2.2.2 Terza edizione . . . . .	31
2.2.3 Quarta edizione . . . . .	35
2.2.4 Quinta edizione . . . . .	35
2.3 <i>Green Grid</i> . . . . .	36
2.4 Metriche . . . . .	37
2.4.1 <i>Power/Energy metrics</i> . . . . .	38
2.4.2 <i>Thermal metrics</i> . . . . .	38
2.4.3 <i>Productivity metrics</i> . . . . .	39
<b>3 Caso studio</b>	40
3.1 Descrizione architettonica . . . . .	41

3.2	Descrizione dei collegamenti elettrici . . . . .	43
3.3	Descrizione dettagliata del sistema di raffreddamento . . . . .	46
3.4	Acquisizione dei dati . . . . .	51
3.4.1	Dati attualmente rilevati . . . . .	54
3.4.2	Aggregazione . . . . .	56
3.4.3	Gestione dei dati . . . . .	58
<b>4</b>	<b>Analisi dei dati e sviluppo EIS</b>	<b>59</b>
4.1	Analisi dei dati . . . . .	61
4.1.1	Data Center . . . . .	61
4.1.2	Modulo 1 . . . . .	72
4.1.3	Modulo 2 . . . . .	77
4.1.4	Modulo 3 . . . . .	84
4.2	Metriche . . . . .	89
4.2.1	PUE . . . . .	89
4.2.2	PUEr . . . . .	92
4.2.3	DCiE . . . . .	94
4.2.4	CLF e PLF . . . . .	96
4.2.5	OLF . . . . .	99
4.2.6	CUE . . . . .	101
4.3	EIS . . . . .	104
4.3.1	<i>Energy Consumption Analysis</i> . . . . .	104
4.3.2	<i>Efficiency Metrics</i> . . . . .	108
4.4	Valutazione delle inefficienze del DC . . . . .	111
4.4.1	Polvere . . . . .	111
4.4.2	CRAC mancante . . . . .	112
4.4.3	<i>Cable management</i> . . . . .	112
4.4.4	Umidità . . . . .	113
<b>5</b>	<b>Modello energetico</b>	<b>114</b>
5.1	Modellazione dell'involucro . . . . .	115
5.2	Modellazione degli impianti . . . . .	118
5.2.1	Modellazione dei tre <i>chiller</i> e dei CRAC . . . . .	118
5.2.2	Modellazione delle pompe di calore e delle unità interne . . . . .	120
5.2.3	Impostazioni delle condizioni ambientali . . . . .	122
5.3	Internal loads . . . . .	124
5.3.1	Assegnazione dei carichi ( <i>Equipment</i> ): <i>power model</i> . . . . .	124
5.3.2	<i>Schedule</i> . . . . .	127
5.4	Calibrazione del modello energetico . . . . .	130
5.4.1	<i>Internal loads</i> . . . . .	130
5.4.2	<i>Chiller</i> equivalente e torre di raffreddamento . . . . .	131

5.5 <i>Thermal management</i> e possibili scenari . . . . .	135
<b>Bibliografia</b>	142

# Elenco delle tabelle

1.1	Consumi all'interno di un tipico server [17] . . . . .	12
2.1	<i>ASHRAE 2008 Thermal guidelines</i> [56] . . . . .	29
2.2	Differenza dei parametri tra la prima e la seconda versione del <i>Thermal Guidelines for Data Processing Environments</i> di ASHRAE [56] . . . . .	30
2.3	<i>ASHRAE 2011 Thermal guidelines for Data Processing Environments</i> [56] . . . . .	30
2.4	Tabella 2.1 di <i>Thermal Guidelines for Data Processing Environments</i> del 2021 [55] . . . . .	33
2.5	Tabella 2.2 di <i>Thermal Guidelines for Data Processing Environments</i> del 2021 [55] . . . . .	34
3.1	Dati attualmente rilevati e ricavati dai quadri . . . . .	52
4.1	Classificazione del PUE [82] . . . . .	90
4.2	Classificazione dei livelli di misurazione del PUE [83] . . . . .	90
4.3	Classificazione del PUEr [82] . . . . .	93
4.4	Classificazione del PUEr [82] . . . . .	94
4.5	Classificazione del CLF creata a partire da un valore di PLF costante e pari a 0.025 . . . . .	98
5.1	Estratto scheda tecnica <i>Stulz</i> [71] . . . . .	119
5.2	Calcolo potenza frigorifera e coefficiente EER del <i>chiller</i> equivalente da inserire in <i>eQUEST</i> per la modellazione energetica . . . . .	119
5.3	Estratto scheda tecnica <i>BladeCooling</i> [69] . . . . .	121
5.4	Calcolo potenza frigorifera dei CRAC presenti nei tre moduli . . . . .	121
5.5	Calcolo potenza frigorifera del sistema monosplit in pompa di calore equivalente . . . . .	122
5.6	Calcolo potenza <i>equipment</i> di ogni modulo assegnata ad <i>eQUEST</i> .	128

# Elenco delle figure

1.1	Possibili scenari di sviluppo di richiesta energetica dei DC nell'UE-28 fino al 2030 [3] . . . . .	2
1.2	Possibili scenari di sviluppo di richiesta energetica in percentuale dei DC nell'UE-28 fino al 2030 [3] . . . . .	3
1.3	Spesa per l'infrastruttura IT [4] . . . . .	4
1.4	Numero di DC per regione [5] . . . . .	5
1.5	Layout del flusso di potenza all'interno di un DC [15] . . . . .	7
1.6	Layout del flusso di aria ed acqua all'interno di un DC [16] . . . . .	8
1.7	Distribuzione della domanda energetica all'interno di un DC [17] . . . . .	8
1.8	Distribuzione della domanda energetica all'interno di un DC - focus sugli <i>IT equipment</i> [18] . . . . .	9
1.9	Rack tradizione con schema di posizionamento di <i>rack-mount server</i> e <i>blade server</i> [21] . . . . .	12
1.10	Grafico potenza normalizzata-fattore di utilizzazione con curve di differenti tipologie di server [22] . . . . .	13
1.11	Potenza ed efficienza di un server al variare del fattore di utilizzazione, dallo stato inattivo al picco di performance. [23] . . . . .	14
1.12	Potenza ed efficienza di un server moderno al variare del fattore di utilizzazione, dallo stato inattivo al picco di performance. [23] . . . . .	15
1.13	Potenza ed efficienza di un server moderno al variare del fattore di utilizzazione, dallo stato inattivo al picco di performance. [23] . . . . .	16
1.14	Comparazione tra un server tradizionale ed un server virtualizzato [24] . . . . .	17
1.15	Flusso di potenza di un tipico DC [16] . . . . .	18
1.16	Struttura del sistema di raffreddamento di un DC [39] . . . . .	20
1.17	Ciclo di un <i>chiller</i> [40] . . . . .	21
1.18	Meccanismo tecnologico tipico di un condizionamento di tipo <i>room-level cooling</i> con insufflaggio a pavimento [41] . . . . .	22
1.19	Differenti approcci per la tecnologia di raffreddamento dell'aria [41] . . . . .	22
2.1	Suddivisione della norma EN 50600 nelle principali parti di cui è costituita: le parti in rosso sono oggetto di sviluppo in atto [49] . . . . .	26

2.2	Approcci rilevanti delle principali certificazioni [50]	27
2.3	Diagramma di Carrier rappresentante le classificazioni del 2011 [53, 57]	31
2.4	Diagramma di Carrier rappresentante le classificazioni 2021 [55]	32
2.5	Diagramma di Carrier rappresentante le classificazioni 2021 - tipologia H [55]	32
3.1	Spaccato 3D del DC presente al Politecnico di Torino	41
3.2	Pianta del DC presente al Politecnico di Torino	42
3.3	<i>Power flow</i> del DC presente al Politecnico di Torino	44
3.4	Sistema di raffreddamento <i>BladeCooling</i> presente al Politecnico di Torino	46
3.5	Moduli presenti al Politecnico di Torino	47
3.6	Particolare 3D del funzionamento dell' <i>inter-row cooling</i> (Immagine adattata da [70])	48
3.7	Chiller presenti al Politecnico di Torino	48
3.8	Schema di funzionamento del <i>free cooling</i> [71]	49
3.9	<i>Datalogger</i> presenti al Politecnico di Torino	51
3.10	Collegamenti elettrici e relativi <i>meter</i> installati all'interno dei quadri <i>Privileged electrical Panel</i> e <i>Continuity electrical Panel</i> per il modulo 2, <i>Normal electrical Panel</i> e <i>Continuity electrical Panel</i> per il modulo 3	52
3.11	Disposizione delle PDU all'interno dei moduli M1, M2 ed M3	53
4.1	Consumi energetici del DC	61
4.2	Andamento della potenza all'interno dei DC	62
4.3	<i>Carpet plot</i> - Potenza totale del DC	63
4.4	<i>Carpet plot</i> - Potenza <i>IT equipment</i> del DC	64
4.5	<i>Carpet plot</i> - Potenza assorbita dai 3 <i>chiller</i> del DC	65
4.6	<i>Carpet plot</i> - Potenza assorbita dai ventilatori nei CRAC del DC	66
4.7	<i>Carpet plot</i> - Potenza assorbita dai servizi ausiliari del DC	67
4.8	<i>Carpet plot</i> - Temperatura esterna	68
4.9	Andamento della temperatura esterna in confronto all'andamento del consumo dei <i>chiller</i>	69
4.10	Confronto tra consumo dei <i>chiller</i> e temperatura esterna	70
4.11	Confronto tra EER equivalente e consumo dei <i>chiller</i>	70
4.12	Confronto tra EER equivalente e temperatura esterna	71
4.13	Confronto tra consumo dei <i>chiller</i> e consumo totale del DC	71
4.14	Andamento della potenza all'interno del modulo 1	72
4.15	<i>Carpet plot</i> - Potenza totale del modulo 1	73
4.16	<i>Carpet plot</i> - Potenza <i>IT equipment</i> del modulo 1	74
4.17	<i>Carpet plot</i> - Potenza assorbita dai ventilatori nei CRAC del modulo 1	75

4.18	<i>Carpet plot</i> - Perdite dovute a UPS e batterie del modulo 1 . . . . .	76
4.19	Andamento della potenza all'interno del modulo 2 . . . . .	77
4.20	<i>Carpet plot</i> - Potenza totale del modulo 2 . . . . .	78
4.21	<i>Carpet plot</i> - Potenza <i>IT equipment</i> del modulo 2 . . . . .	79
4.22	<i>Carpet plot</i> - Potenza assorbita dai ventilatori nei CRAC del modulo 2	80
4.23	<i>Carpet plot</i> - Perdite dovute a UPS e batterie del modulo 2 . . . . .	81
4.24	Andamento delle temperature dell'aria di espulsione dei rack verso l'isola calda del modulo 2 . . . . .	82
4.25	Andamento della temperatura media all'interno dell'isola calda del modulo 2 . . . . .	82
4.26	<i>Carpet plot</i> - Temperatura media dell'aria all'interno dell'isola calda del modulo 2 . . . . .	83
4.27	Andamento della potenza all'interno del modulo 3 . . . . .	84
4.28	<i>Carpet plot</i> - Potenza totale del modulo 3 . . . . .	85
4.29	<i>Carpet plot</i> - Potenza <i>IT equipment</i> del modulo 3 . . . . .	86
4.30	<i>Carpet plot</i> - Potenza assorbita dai ventilatori nei CRAC del modulo 3	87
4.31	<i>Carpet plot</i> - Perdite dovute a UPS e batterie del modulo 3 . . . . .	88
4.32	Andamento del PUE . . . . .	91
4.33	Andamento del PUE in confronto a quello dei <i>chiller</i> . . . . .	92
4.34	Classificazione giornaliera del PUE . . . . .	92
4.35	Andamento del PUEr evidenziando la classe di appartenenza del PUE	93
4.36	Andamento del DCiE . . . . .	95
4.37	Classificazione giornaliera del DCiE . . . . .	95
4.38	Andamento del PLF . . . . .	97
4.39	Classificazione giornaliera del PLF . . . . .	97
4.40	Andamento del PLF . . . . .	99
4.41	Andamento del CLF confrontato con il consumo dei <i>chiller</i> e il PUE	100
4.42	Classificazione giornaliera del CLF . . . . .	100
4.43	Andamento del OLF . . . . .	101
4.44	Andamento giornaliero del OLF . . . . .	101
4.45	Trend del CEF in Italia [89] . . . . .	102
4.46	Andamento del CUE . . . . .	103
4.47	Andamento giornaliero del CUE . . . . .	103
4.48	TAB: <i>Energy Consumption Analysis - Energy consumption and Power Analysis of the Data Center</i> . . . . .	105
4.49	Selettore grandezze sull'asse sinistro della <i>time series</i> . . . . .	106
4.50	Selettore grandezze sull'asse destro della <i>time series</i> . . . . .	106
4.51	TAB: <i>Energy Consumption Analysis - In Depth Analysis</i> . . . . .	107
4.52	TAB: <i>Efficiency Metrics</i> . . . . .	109
4.53	Selettore grandezze sull'asse sinistro della <i>time series</i> . . . . .	110
4.54	Selettore grandezze sull'asse destro della <i>time series</i> . . . . .	110

4.55	<i>blade-server</i> ricoperti di polvere in un rack del modulo 1 . . . . .	111
4.56	CRAC mancante nel modulo 1 e problemi di <i>cable management</i> . .	113
5.1	Visualizzazione 3D in <i>eQUEST</i> . . . . .	115
5.2	Suddivisione in spazi . . . . .	116
5.3	Rappresentazione schematica dell'impianto di raffreddamento dei moduli simulato in <i>eQUEST</i> . . . . .	118
5.4	Rappresentazione schematica dell'impianto monosplit in pompa di calore simulato in <i>eQUEST</i> . . . . .	122
5.5	Aumento della potenza dei server dovuto all'aumento della temperatura ambiente per le classi A2 ed A3 [57] . . . . .	124
5.6	Aumento della portata delle ventole in funzione della temperatura ambiente [57] . . . . .	125
5.7	Schema di assegnazione delle <i>schedule</i> . . . . .	128
5.8	<i>Internal loads</i> simulati per ogni modulo . . . . .	130
5.9	<i>Internal loads</i> totali simulati a livello di DC . . . . .	131
5.10	Simulazione annuale della potenza dei <i>chiller</i> e della torre di raffreddamento, confrontato con la temperatura esterna . . . . .	132
5.11	Simulazione nel periodo di rilevamento del DC reale . . . . .	133
5.12	Consumi energetici a confronto . . . . .	134
5.13	Confronto dell'energia richiesta dal sistema di raffreddamento alle diverse temperature di ingresso ai server . . . . .	135
5.14	Confronto dell'energia richiesta dai server alle diverse temperature di ingresso ai server . . . . .	136
5.15	Confronto dell'energia richiesta dall'intero DC alle diverse temperature di ingresso ai server . . . . .	137
5.16	Risparmio energetico percentuale rispetto al caso reale di 22°C . . .	138



# Acronimi

## **ICT**

Information and Communication Technologies

## **DC**

Data Center

## **GESI**

Global Enabling Sustainability Initiative

## **EIS**

Energy Information System

## **IPCC**

Intergovernmental Panel on Climate Change

## **UE**

Unione Europea

## **CED**

Centro di Elaborazione Dati

## **IT**

Information Technologies

## **UPS**

Uninterruptible Power Supply

## **PDU**

Power Distribution Unit

**PSU**

Power Supply Unit

**CRAC**

Computer Room Air Conditioning

**CRAH**

Computer Room Air Handler

**PC**

Personal Computer

**CPU**

Central Processing Unit

**RAM**

Random Access Memory

**TIA**

Telecommunication Industry Association

**STS**

Static Transfer Switch

**LED**

Light Emission Diode

**HAR**

Hot Air Recirculation

**CAB**

Cold Air Bypass

**HACS**

Hot Aisle Containment System

**CACS**

Cold Air Containment System

**CEN**

Istituto Europeo per gli Standard Tecnici

**KPI**

Key Performance Indicator

**PUE**

Power Usage Effectiveness

**REF**

Renewable Energy Factor

**ERF**

Energy Reuse Factor

**CER**

Cooling Efficiency Ratio

**ASHRAE**

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers

**RH**

Relative Humidity

**DP**

Dew Point

**DCiE**

Data Center Infrastructure Efficiency

**WUE**

Water Usage Effectiveness

**CUE**

Carbon Usage Effectiveness

**DCsPcap**

Data Center Storage Productivity - Capacity

**CLF**

Cooling Load Factor

**PLF**

Power Load Factor

**SHI**

Supply Heat Index

**RHI**

Return Heat Index

**RTI**

Return Temperature Index

**DCeP**

Data Center Energy Productivity

**DCcE**

Data Center Compute Efficiency

**DCsP**

Data Center Storage Productivity - Capacity

**MT**

Media Tensione

**EER**

Energy Efficiency Ratio

**HPC**

High Performance Computing

**PUEr**

Power Usage Effectiveness Ratio

**OLF**

Other Load Factor

**DCE**

Data Center Efficiency

**HVAC**

Heating, Ventilation and Air Conditioning

**CEF**

Carbon Emission Factor

**VMC**

Ventilazione Meccanica Controllata

**LBL**

Lawrence Berkeley National Laboratory

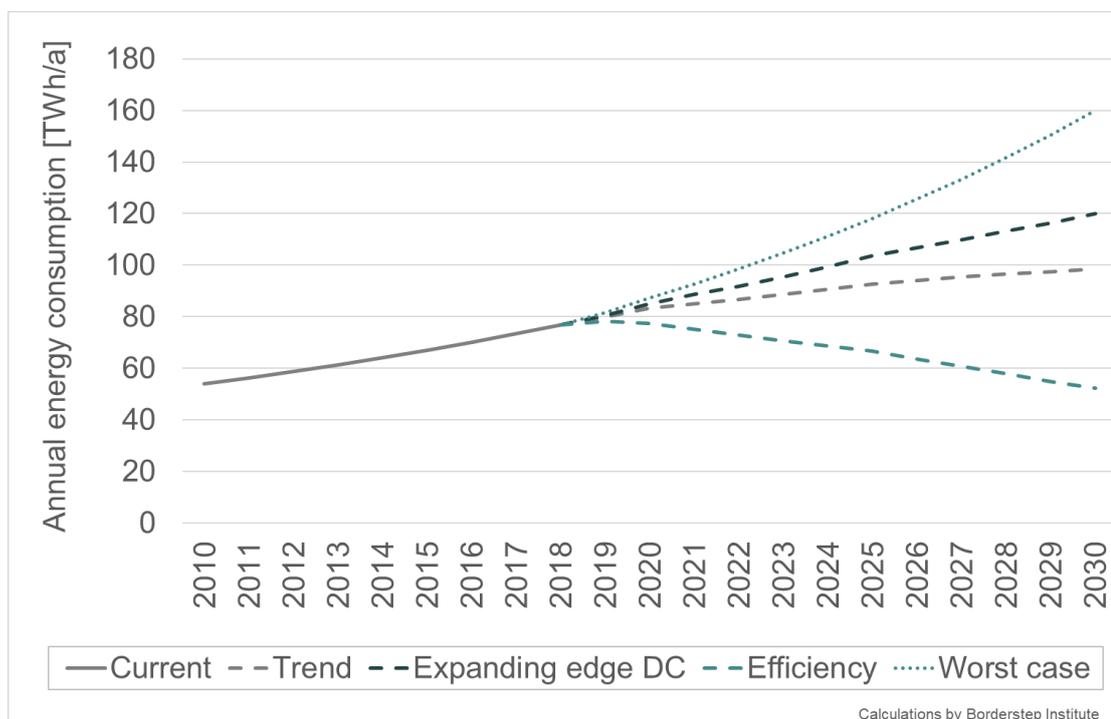
**USDOE**

US Department of Energy

# Capitolo 1

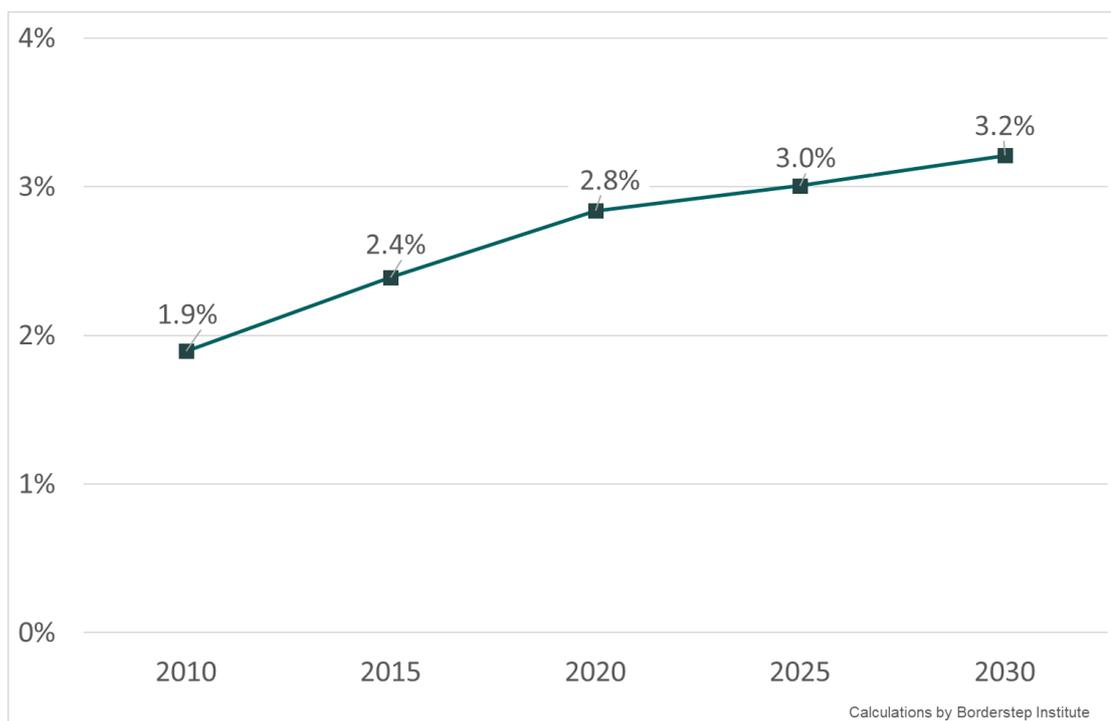
## Introduzione ai Data Center

## 1.1 Premessa



**Figura 1.1:** Possibili scenari di sviluppo di richiesta energetica dei DC nell'UE-28 fino al 2030 [3]

Durante gli ultimi anni, le politiche dei paesi europei si sono incentrate sul tema dell'efficienza energetica oltre che alla riduzione dell'inquinamento [6]. Queste politiche sono dovute prettamente al riscaldamento globale dettato dalle ingenti emissioni antropologiche ed a tal proposito numerosi studi e ricerche sono stati effettuati per comprendere al meglio le sue ripercussioni. Secondo il report AR6 [7], dell'*Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), si afferma che le emissioni di gas serra sono ancor più aumentate nell'ultima decade, ma che comunque una loro drastica riduzione del 43% entro il 2030 e del 84% entro il 2050 potrebbe limitare l'aumento della temperatura globale a meno di 1.5 °C in questo secolo. Una riduzione più graduale e veritiera del 27% entro il 2030 e del 67% entro il 2050 porterebbe ad un aumento di temperatura tra 1.5°C e 2°C. Al momento la temperatura media della superficie terrestre è superiore alla norma di circa 1.20 °C [7] con conseguenti ripercussioni sul clima globale: estati torride e prive di pioggia oltre che a violenti fenomeni naturali. Alla luce di ciò è nato il *Green Deal* europeo [8], ovvero, una serie di politiche e azioni proposte dalla Commissione europea per raggiungere la neutralità climatica entro il 2050. L'obiettivo di ridurre le emissioni



**Figura 1.2:** Possibili scenari di sviluppo di richiesta energetica in percentuale dei DC nell'UE-28 fino al 2030 [3]

di gas serra del 55% entro il 2030 rispetto ai livelli del 1990 [9], è uno dei principali obiettivi del *Green Deal*. Questo significa che l'Unione Europea (UE) si impegna a ridurre drasticamente le emissioni di gas serra entro il 2030 per contribuire a raggiungere gli obiettivi climatici a livello globale e per evitare gli impatti negativi del cambiamento climatico. Per raggiungere questo obiettivo, *Green Deal* prevede una serie di azioni tra cui la transizione a fonti energetiche rinnovabili, l'efficienza energetica, la riduzione dell'uso dei combustibili fossili, l'incremento della resilienza climatica e l'attuazione di politiche per la decarbonizzazione dell'economia. Da qui prende piede quindi la *European Green Digital Coalition* [10] un'iniziativa della Commissione europea per promuovere la digitalizzazione sostenibile e la transizione verso un'economia digitale più verde e resiliente. utilizzando le *Information and Communication Technologies* (ICT) come un alleato nella lotta contro il cambiamento climatico. Le ICT infatti giocano un ruolo molto importante dato che possono essere applicate ad ogni settore oltre che a dare grande impulso nell'economia di un paese. Esse possono contrastare l'inquinamento dovuto ad azioni che, prima dell'avvento di tali tecnologie, erano molto dispendiose energeticamente oltre che inquinanti. Un esempio lampante è il classico invio di email invece che di una lettera per posta: un'email emette circa 4 g di CO<sub>2</sub> mentre una lettera cartacea ben 26 g

## Worldwide information technology (IT) infrastructure spending breakdown (by value) from 2014 to 2024, by deployment type\*\*

Share of IT infrastructure spending worldwide 2014-2024, by deployment type

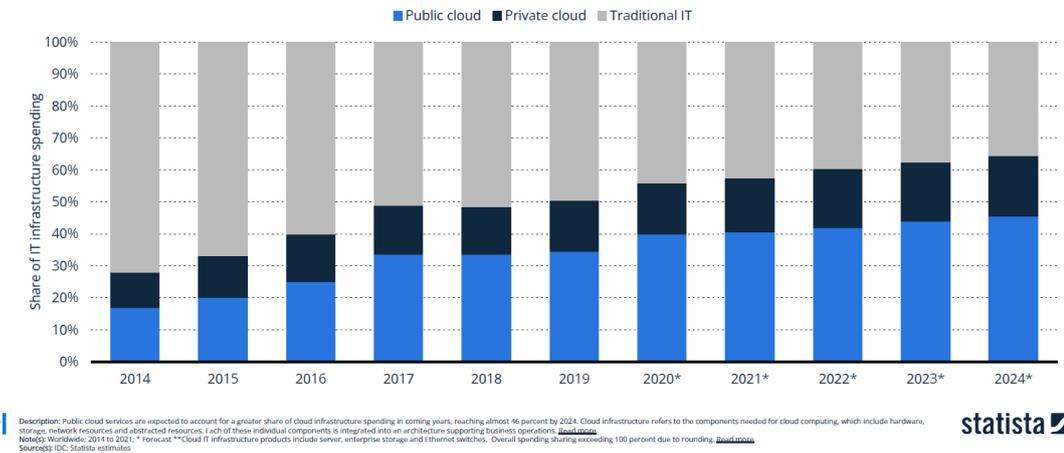
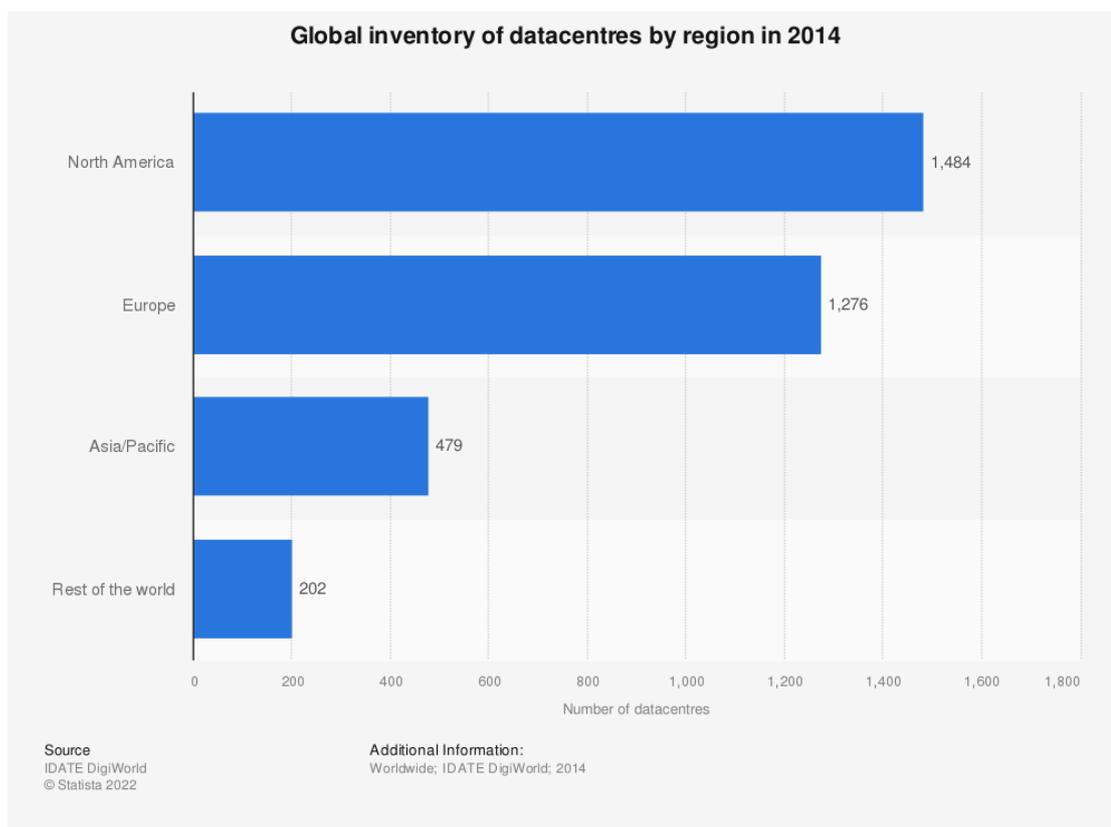


Figura 1.3: Spesa per l'infrastruttura IT [4]

di CO2 [11], senza contare l'immediatezza della prima, oltre che alla sua scalabilità. Da questo semplice esempio, quindi, si può intuire come le ICT siano fondamentali per la buona riuscita dell'abbattimento delle emissioni di CO2 oltre che al risparmio energetico. Di contro, tuttavia, bisogna tenere in considerazione il fatto che tali tecnologie richiedono energia per il loro esercizio: le ICT, infatti, consumano circa l'8% dell'energia elettrica in Europa e sono responsabili per il 4% delle emissioni di CO2 su scala europea [1]. Le tecnologie ICT sono utilizzate per creare, gestire e archiviare i dati che vengono elaborati all'interno dei Data Center (DC) i quali sono strutture fisiche dove vengono ospitati server, armadi di rete, sistemi di alimentazione, sistemi di climatizzazione e altre attrezzature per il funzionamento di applicazioni e servizi basati su cloud computing, big data, virtualizzazione, Iot, etc. Queste applicazioni e servizi generano ed utilizzano grandi volumi di dati che vengono elaborati, archiviati e trasmessi attraverso le tecnologie ICT. Ad esempio, quando un utente accede ad un sito web utilizzando il proprio laptop, tablet o smartphone, richiede informazioni dal server che ospita il sito web. Queste informazioni vengono elaborate dal server e quindi inviate all'utente attraverso la rete. Il sito web viene quindi gestito da un server collocato in un DC, che fornisce la potenza necessaria per elaborare le richieste dell'utente e fornire le informazioni richieste. Alla base del loro funzionamento, dunque, vi sono i DC, anche chiamati Centri di Elaborazione Dati (CED), nei quali risiedono tutte le apparecchiature di *Information Technology* (IT) che consentono il corretto funzionamento di tutto il sistema di comunicazione, di fatto, centralizzandolo. In questo ambito, quindi, sono



**Figura 1.4:** Numero di DC per regione [5]

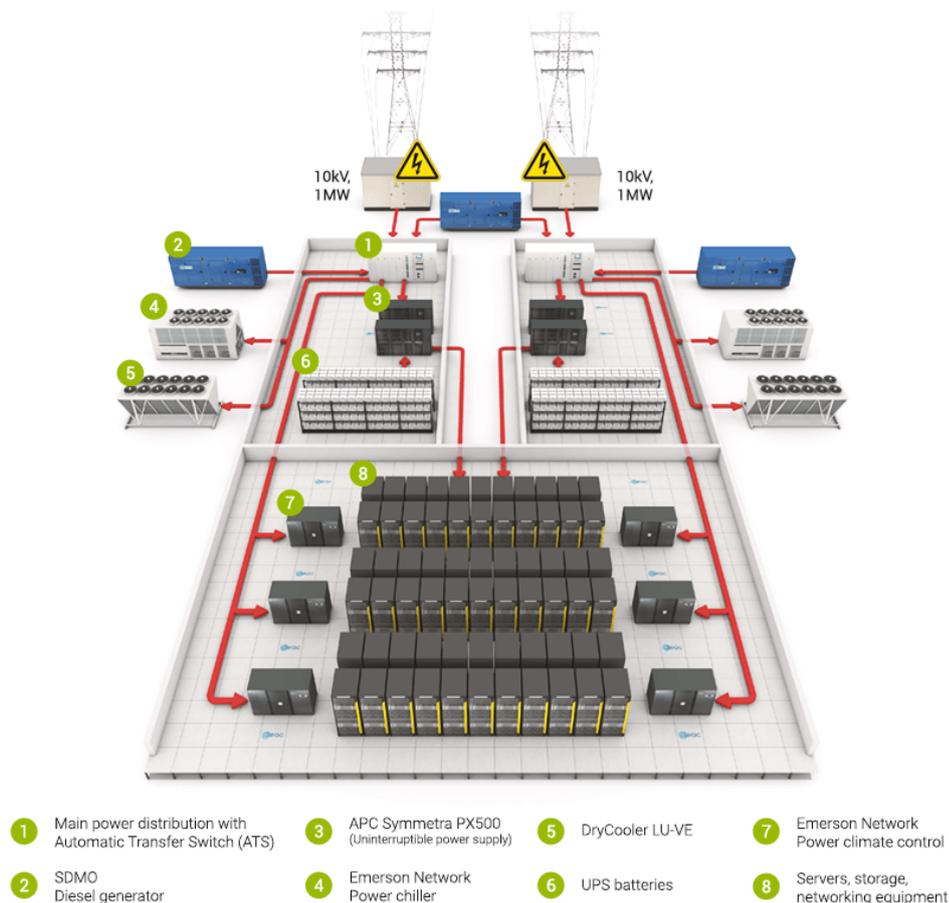
state adottate delle misure per il *greening* delle tecnologie atte a rendere *green* tutti i settori in cui operano, partendo per l'appunto dai DC. Secondo uno studio della Commissione europea [3] si è evidenziato come nel 2018 l'energia consumata dai DC in UE fosse di 76.8 TWh, e ci si aspetta che aumenti a 98.52 TWh nel 2030 (Figura 1.1), con un incremento pari al 28%. Secondo questa stima, quindi, si passerebbe da una domanda di energia elettrica europea di circa il 2.7% al 3.21% (Figura 1.2). Inoltre, è importante considerare che i servizi in *cloud*, ovvero quei servizi che richiedono una connessione ad Internet per funzionare, stanno continuando ad aumentare in modo significativo. Un esempio di servizi *cloud* in continua crescita è rappresentato da quelli offerti dalle banche e dai siti di e-commerce, ma anche da molte altre realtà del settore privato. Dalla Figura 1.3 emerge chiaramente come la spesa destinata alle piattaforme in *cloud* sia cresciuta notevolmente, in particolare per quanto riguarda i *cloud* pubblici, ovvero quelli accessibili a tutti per svolgere diverse attività. Tra i principali esempi in quest'ambito vi sono *Amazon Web Service* [12] e *Google Cloud* [13], i quali offrono servizi di *Cloud computing* a pagamento. Il *Cloud computing* consiste nella possibilità di accedere a DC a

molte persone, aziende o enti con lo scopo di utilizzare questi servizi per le proprie operazioni senza dover necessariamente acquistare o possedere server o addirittura interi DC. In pratica, si tratta di una sorta di affitto di spazio di archiviazione e capacità di elaborazione dei dati, che può essere adattato alle esigenze specifiche di ogni utente. Grazie a questa opzione, è possibile ridurre notevolmente i costi e l'investimento iniziale per gestire i propri dati e le proprie operazioni online. In sostanza, dunque, il *Cloud computing* permette di utilizzare risorse informatiche condivise in remoto, senza dover possedere o gestire infrastrutture informatiche locali. In Europa, così come nel resto del mondo, i DC che offrono servizi in *cloud* sono i maggiori responsabili degli aumenti energetici visti nelle Figure 1.1 e 1.2, di conseguenza la Commissione europea ha deciso di adottare degli strumenti per contrastare questo aumento energetico oltre che ad una revisione di determinate leggi e nuove iniziative [3]. Gli strumenti attualmente esistenti comprendono:

1. *Ecodesign Regulation on servers and data storage products*
2. *EU Code of Conduct on Data Centre Energy Efficiency*
3. *EU Green Public Procurement criteria* per i DC, sale server e servizi *cloud*

Particolare attenzione deve essere posta al *EU Code of Conduct on Data Centre Energy Efficiency*, il quale prevede dei criteri di buona progettazione per tutti i futuri DC ma anche per l'ammodernamento di quelli esistenti [14]. L'attenzione riguarda tutti i macro-sistemi del DC quali *IT equipment*, raffreddamento, apparecchiature per l'energia e monitoraggio.

## 1.2 Caratterizzazione del flusso energetico in un DC



**Figura 1.5:** Layout del flusso di potenza all'interno di un DC [15]

I DC ospitano tutte le apparecchiature IT, queste ultime, producendo calore durante il loro funzionamento, necessitano di essere costantemente raffreddate. Come intuibile, quindi, i DC sono complessi centri di raccolta ed elaborazione dati ospitanti vari dispositivi per la gestione del traffico di rete, di distribuzione dell'energia elettrica, dei sistemi di raffreddamento oltre che ai sistemi di monitoraggio. Essi sono quindi molto energivori, a tal proposito numerosi studi sono stati condotti per capire quali sono i servizi che presentano maggiori consumi e quali azioni possono essere effettuate per la loro riduzione di richiesta energetica. Ci sono diverse modalità di suddivisione di un DC, ma una prima distinzione importante

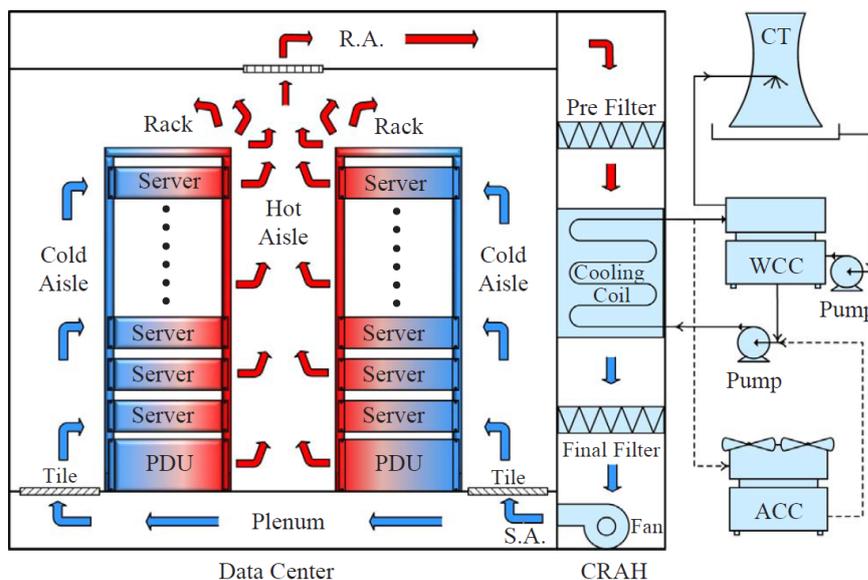


Figura 1.6: Layout del flusso di aria ed acqua all'interno di un DC [16]

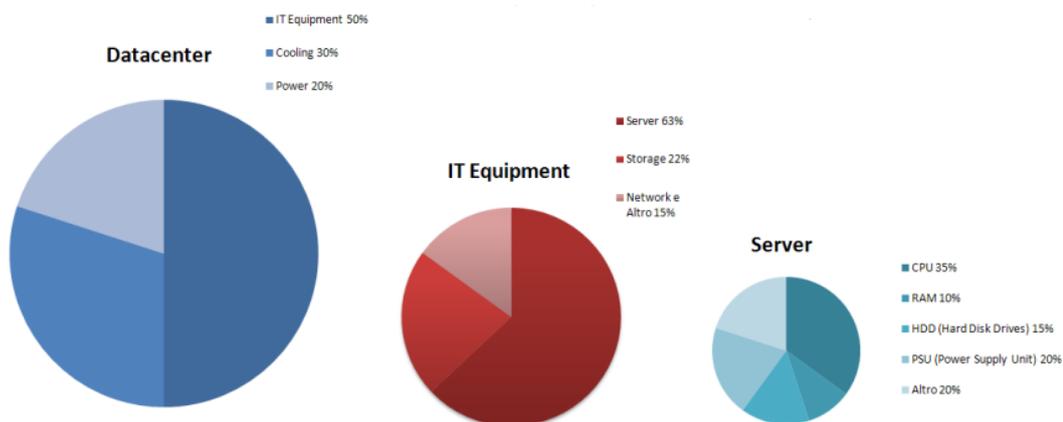
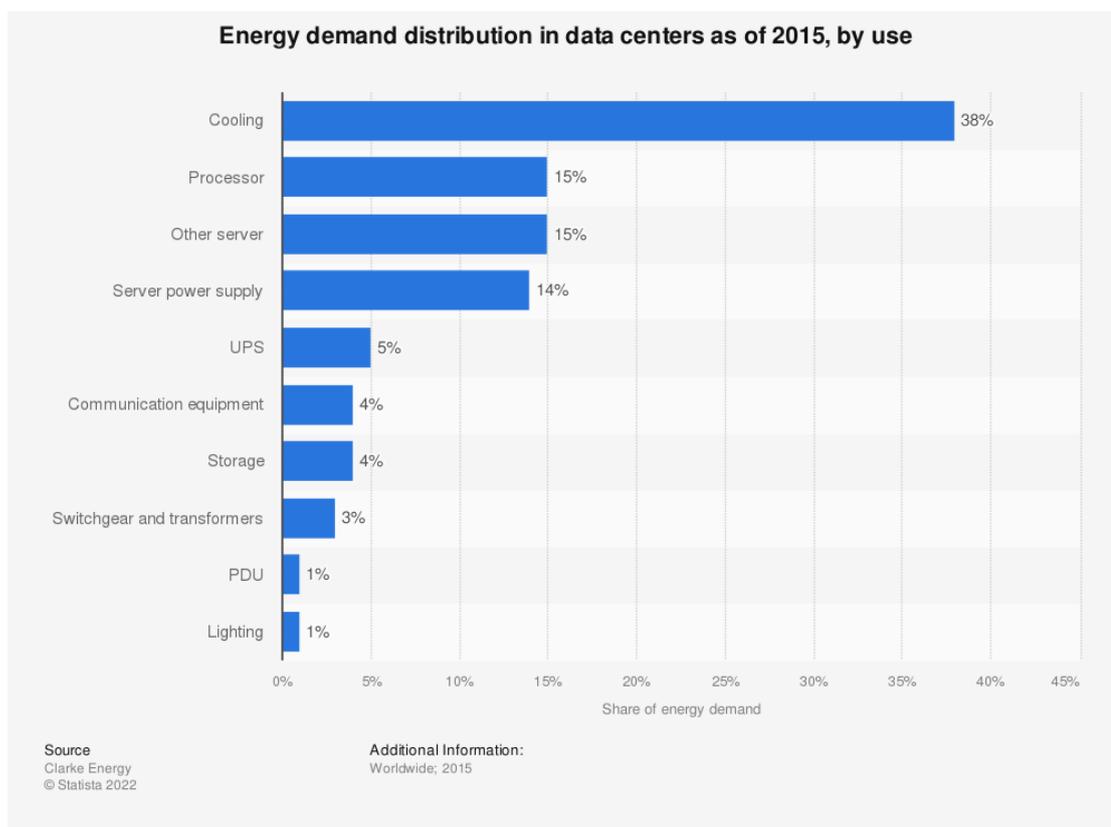


Figura 2: Percentuali tipiche di consumo in un datacenter

Figura 1.7: Distribuzione della domanda energetica all'interno di un DC [17]

può essere fatta in base alle parti che consumano maggiormente energia all'interno del DC [17]:

1. *IT equipment* (30÷60% del consumo energetico totale): server, monitor, desktop, stampanti e dispositivi di storage per l'elaborazione ed il trattamento dei dati.



**Figura 1.8:** Distribuzione della domanda energetica all'interno di un DC - focus sugli *IT equipment* [18]

2. Sistemi di alimentazione (5÷15% del consumo energetico totale): UPS (*Uninterruptible Power Supply*) PDU (*Power Distribution Unit*) e PSU (*Power Supply Unit*) che provvedono a garantire il corretto sostentamento energetico e continuità agli *IT equipment*
3. Sistemi ausiliari (25÷40% del consumo energetico totale): illuminazione, sistemi di sicurezza (antincendio) e di garanzia della continuità elettrica, oltre che agli impianti di climatizzazione

Il principale consumo viene dunque operato dagli *IT equipment*, seguiti dai sistemi ausiliari in cui spicca la climatizzazione, come visibile da una suddivisione più dettagliata delle parti in Figura 1.8. Il flusso energetico è un altro criterio di suddivisione per un DC e si compone di tre parti:

1. flusso di potenza
2. flusso di aria

### 3. flusso di acqua

Questi flussi sono strettamente interconnessi tra loro: una diminuzione della potenza elettrica attribuita ai componenti IT comporta una minore necessità di raffreddamento da parte dell'aria, che richiederà quindi meno apporto di acqua refrigerata prodotta da un *chiller*, a sua volta richiedente meno potenza elettrica. È bene quindi distinguere questi tre flussi e capire in che modo essi comunicano, secondo quali macchinari ma soprattutto il loro ruolo all'interno del DC. In Figura 1.5 viene visualizzato uno schema rappresentativo del flusso in potenza in un DC tradizionale. Si parte dai trasformatori [19], i quali portano energia ai distributori energetici principali (1) ai quali sono collegati in parallelo dei gruppi elettrogeni (2) che assicurano il normale funzionamento del DC anche in assenza di corrente elettrica dalla rete. Dai distributori principali di energia, si passa quindi agli UPS (3) che consentono al DC di continuare a funzionare. Essi vanno accompagnati da delle batterie di accumulo (6) dalle quali preleveranno energia nell'attesa che i gruppi elettrogeni entrino in funzione. Sempre dal distributore energetico principale vi parte una diramazione parallela che alimenta il *chiller* (4) ma anche la torre di raffreddamento (6) al fine di continuare a raffreddare il fluido termovettore. Il raffrescamento e la circolazione dell'aria all'interno della stanza è effettuata dal *Computer Room Air Conditioning* (CRAC) e dal *Computer Room Air Handler* (CRAH) (7), a seconda della tecnologia utilizzata, i quali gettano aria fredda sulle file di rack, cabine atte ad ospitare i server e tutto ciò che concorre al loro funzionamento (8). Per poter funzionare, anche questi due sistemi sono collegati in parallelo al distributore principale di energia, il quale ha ovviamente una ridondanza, necessaria per motivi di sicurezza, così come le alimentazioni da rete o i gruppi elettrogeni. In Figura 1.6 viene mostrato un tipico layout per il raffreddamento dei server all'interno dei rack. L'aria viene tipicamente fatta fluire dal basso verso l'alto, attraversando i server e scaldandosi, tornando poi nel CRAC o CRAH per poter essere di nuovo raffreddata e ricominciare il ciclo. L'acqua viene riscaldata dall'aria calda che ritorna dai rack, successivamente entra nel *chiller* che la raffredda, secondo un classico ciclo di Carnot inverso, nell'evaporatore. Infine, il fluido refrigerante viene raffreddato nella fase di condensazione, grazie alla torre di raffreddamento. Ogni flusso energetico attraversa, dunque, determinati componenti all'interno del DC, ed ognuno di essi è caratterizzato da una propria efficienza:

1. *IT equipment*
2. PDU e PSU
3. UPS e batterie
4. Impianto di climatizzazione, costituito da:
  - Unità CRAC e CRAH

- Pompe di circolazione
  - Macchina frigorifera
  - Torre di raffreddamento o *dry cooler*
5. Impianti di illuminazione
  6. Gruppo elettrogeno per la continuità elettrica

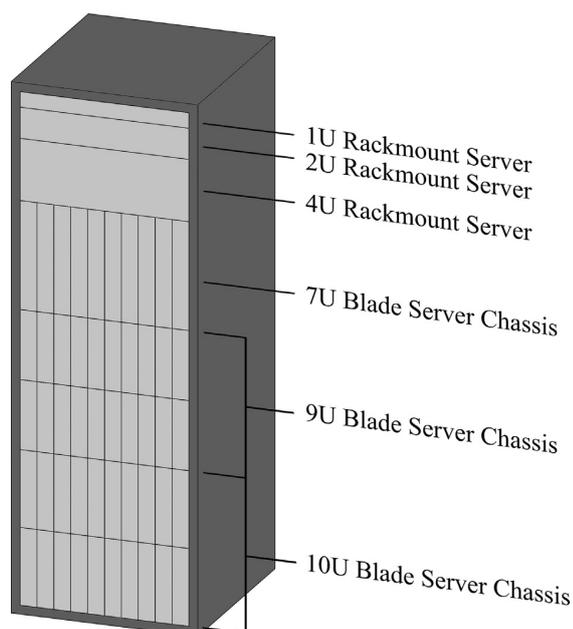
Per garantire il massimo dell'efficienza energetica, è buona norma adottare macchine ad alto rendimento, limitando quindi l'energia entrante oltre che ad operare una gestione ottimale del centro di calcolo. Dato che il 40% circa del consumo energetico totale del DC è attribuibile alla climatizzazione, l'adozione di una determinata tecnica di raffrescamento dell'aria, può comportare a notevoli miglioramenti energetici oltre che economici e di affidabilità di funzionamento [6]. Un'ulteriore classificazione dei DC avviene in base alla loro grandezza (intesa come superficie occupata in  $m^2$ ) oltre che al numero di server ospitati. Si possono così distinguere 5 tipologie di DC [20]:

1. *Server closet*: superficie minore di  $5 m^2$ , 1 o 2 server e una potenza totale minore di 1.9 kW
2. *Server room*: circa  $20 m^2$ , qualche decina di server e una potenza totale attorno agli 11 kW
3. Piccoli DC: circa  $150 m^2$ , da decine a centinaia di server e una potenza totale attorno ai 100 kW
4. Medi DC: circa  $600 m^2$ , circa 600 server e una potenza totale attorno ai 550 kW
5. Grandi DC: circa  $6000 m^2$ , circa 6000 server e una potenza totale di 5700 kW

Sono state dunque descritte le diverse opzioni di suddivisione e i principali componenti di un DC, insieme ai loro consumi energetici. In seguito, verranno esaminati in modo più approfondito questi componenti, fornendone una descrizione dettagliata.

### 1.2.1 *IT equipment*

Come accennato in precedenza, i componenti dell'*IT equipment* comprendono server, dispositivi di storage, dispositivi di rete, monitor, stampanti e desktop, oltre a tutte le altre apparecchiature utilizzate per l'elaborazione e il trattamento dei dati. Ognuna di queste apparecchiature richiede energia per funzionare, e nei DC di grandi dimensioni, i consumi energetici associati possono essere significativi, in particolare per i server, che costituiscono la componente più energetica di tutte. Un



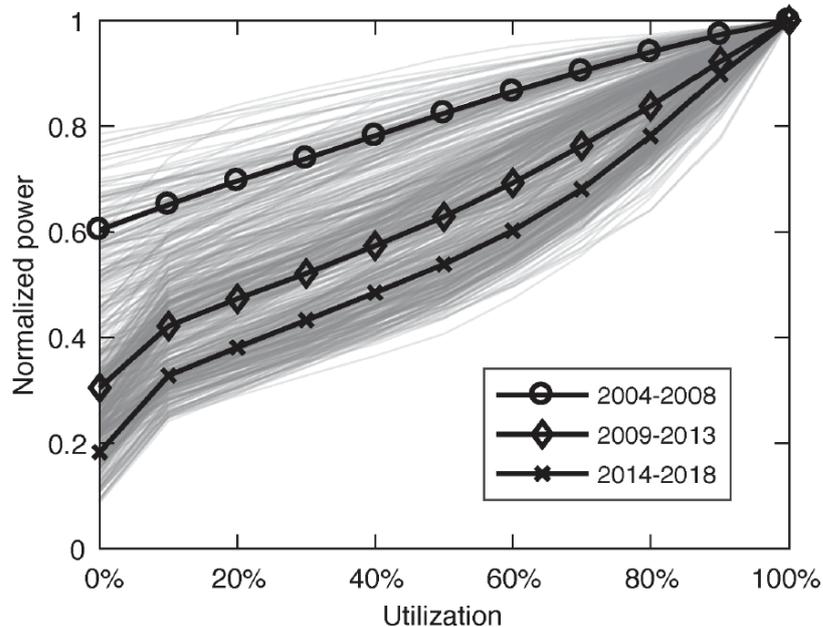
**Figura 1.9:** Rack tradizione con schema di posizionamento di *rack-mount server* e *blade server* [21]

server è assimilabile ad un normale PC; in esso sono infatti presenti CPU, RAM, Hard Disk, scheda madre e sistema di alimentazione (PSU). In Tabella 1.1 sono elencate le potenze tipiche assorbite da tali elementi.

Componenti di un server e relativi consumi	
Componente	Potenza massima assorbita [W]
CPU	82
RAM	36
Hard Disk	12
Prese periferiche	52
Scheda madre	25
Ventole	10
Perdite sistema di alimentazione	38
Totale	251

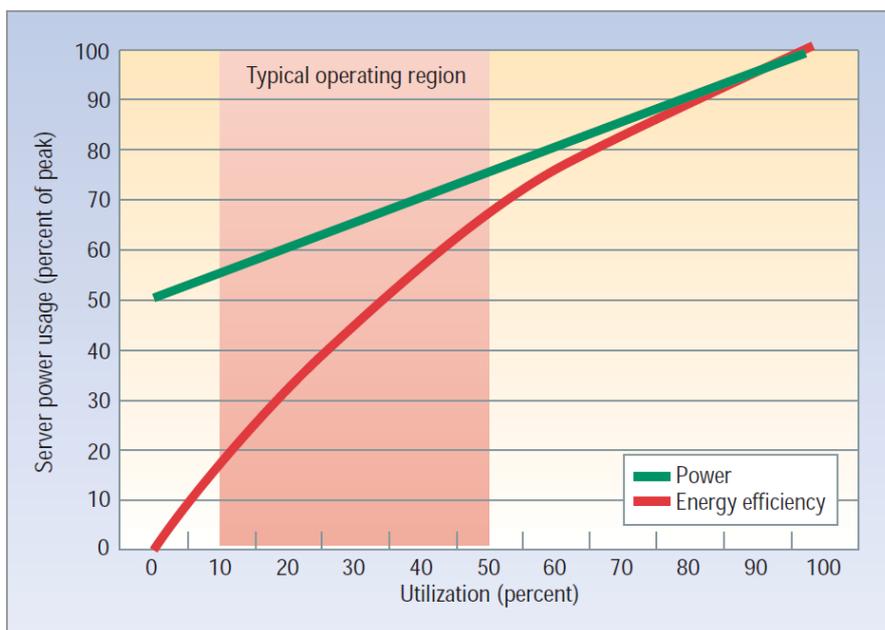
**Tabella 1.1:** Consumi all'interno di un tipico server [17]

I server possono essere di vario tipo, a seconda dell'applicazione o delle dimensioni. Per quanto riguarda un'applicazione in una piccola azienda, il server può essere rappresentato da una normale workstation, tuttavia se la richiesta di elaborazione dati aumenta, il numero di server aumenta e si richiede quindi il loro accorpamento



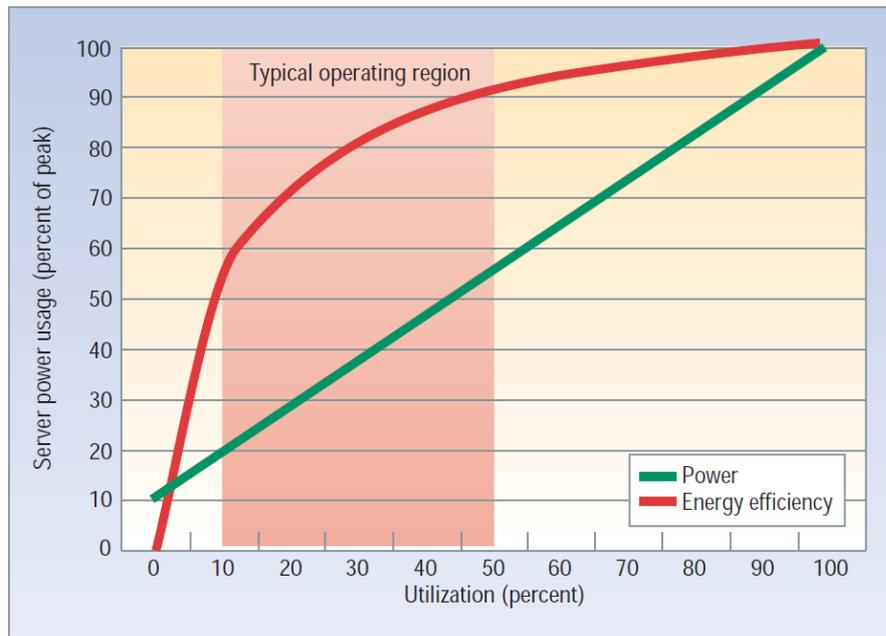
**Figura 1.10:** Grafico potenza normalizzata-fattore di utilizzazione con curve di differenti tipologie di server [22]

in armadi chiamati rack (Figura 1.9). I rack tipicamente sono suddivisi in altezza secondo un'unità di misura chiamata *rack unit*, abbreviata con "U" che misura 1.75 pollici o 44.45 mm. I server in commercio, tipicamente, hanno altezze che sono multipli di U, in modo tale da favorirne l'alloggiamento, e ce ne sono principalmente di due tipi [25]: i *rack-mount server* e i *blade server*. I primi sono server che seguono larghezza e profondità del rack, con una potenza che va dai 300 W ai 400 W mentre i secondi sono più piccoli e tipicamente montati di "taglio", con una potenza di circa 250 W (Figura 1.9) [26]. In un rack possono essere montati fino a 42 *rack-mount server* o più di 64 *blade server*, in base alla tipologia di rack, per una potenza complessiva fino a 20 kW e oltre [27], tuttavia esistono moltissime configurazioni che vedono l'accoppiamento di queste due tipologie di server in base all'applicazione. Durante la fase di selezione di un server bisogna prestare particolare attenzione all'uso che bisogna farne, infatti esistono server più o meno potenti. Tale potenza serve al fine di avere un una certa performance di calcolo, ma non sempre le due vanno di pari passo: scegliere adeguatamente un server con una *performance per Watt* elevata comporta ad una maggiore efficienza, infatti, tale parametro esprime la quantità di calcoli che il server riesce a svolgere con 1 Watt di potenza in entrata. La potenza entrante viene integralmente convertita in calore [28] che dovrà essere asportato dalle ventole all'interno del server stesso, le quali



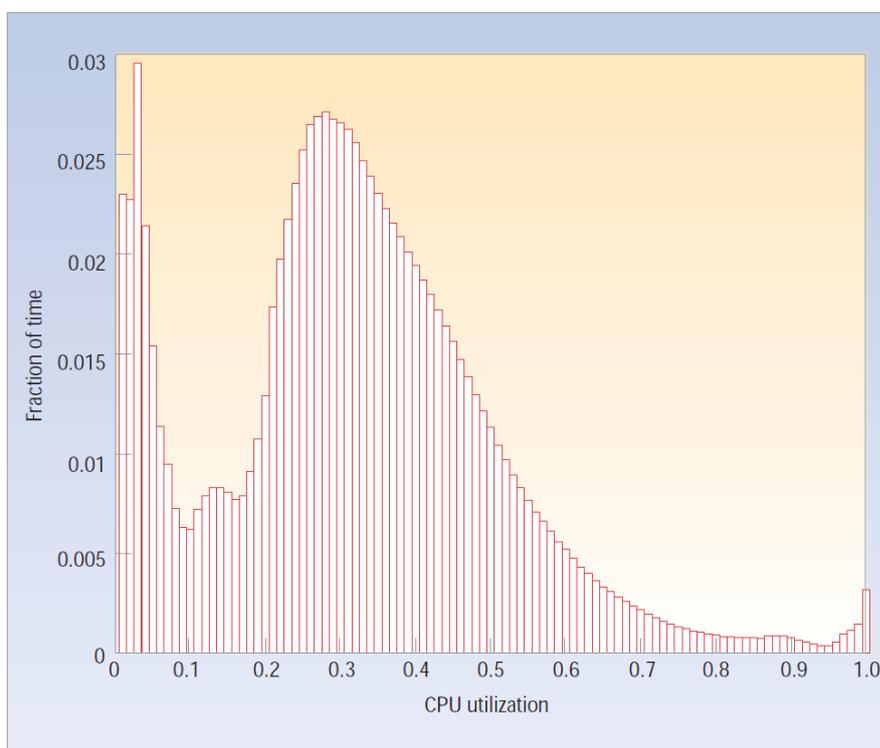
**Figura 1.11:** Potenza ed efficienza di un server al variare del fattore di utilizzazione, dallo stato inattivo al picco di performance. [23]

favoriscono la circolazione dell'aria attraverso i vari componenti, ma ancora di più dall'impianto di climatizzazione, che provvede a fornire dell'aria alle ventole del server ad un'adeguata temperatura per il corretto funzionamento del dispositivo, per cui, anche in quest'ambito la scelta deve essere consona in base alla tipologia di sistema di raffreddamento disponibile. La richiesta energetica di un server tuttavia non è sempre costante, essa infatti dipende dal carico attribuitogli; i parametri che esprimono questo comportamento sono: potenza media, potenza di picco (ovvero a pieno carico computazionale) e quella di inattività, chiamato anche "stato *idle*" [29]. Tale situazione comporta alla dipendenza del consumo energetico di un server dal tasso di utilizzo  $u_{srv}$ : esso indica qual è l'utilizzo effettivo del server rispetto al suo utilizzo massimo. In Figura 1.10 si può notare come, durante gli anni, le innovazioni tecnologiche hanno permesso un effettivo miglioramento della dipendenza tra la potenza effettivamente impiegata ed il fattore di utilizzazione dei server, anche se ultimamente questo trend di riduzione dei consumi è diminuito sensibilmente [22]. Anche se il tasso di utilizzazione di  $u_{srv}$  è zero, la potenza richiesta non è necessariamente uguale a zero; questo dipende da due principali fattori, che sono la potenza statica e la potenza dinamica. La potenza statica, in un server, è la potenza consumata dal dispositivo indipendentemente dal suo stato operativo, ed include la potenza dissipata dalla corrente dispersa nei semiconduttori dei componenti come CPU, memorie, ventilatori etc. [30], oltre che la potenza richiesta per i processi



**Figura 1.12:** Potenza ed efficienza di un server moderno al variare del fattore di utilizzazione, dallo stato inattivo al picco di performance. [23]

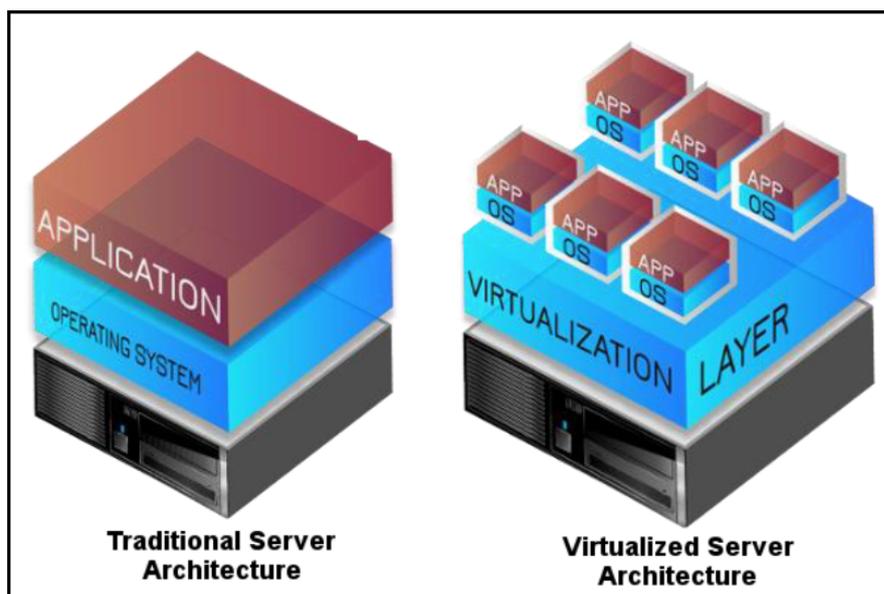
basici del sistema operativo oltre che a processi in stallo ma inattivi [31]. La potenza dinamica, invece, nell'ambito di un server, è la potenza richiesta per le attività computazionali, come le operazioni sui circuiti, l'accesso ai vari dischi di memoria, etc. Essa dipende prettamente dal tipo di carico assegnato e da che componenti sono interessati, infatti, del lavoro svolto sulla CPU ha una richiesta di potenza differente rispetto a una memoria di massa [30]. L'efficienza di un server è quindi dipendente dal fattore di utilizzazione e quindi della potenza: i primi server avevano un'efficienza molto bassa (Figura 1.11), infatti, la sola potenza statica era pari al 50% del loro potenziale massimo, portando quindi ad avere enormi consumi oltre che a bassissime efficienze. Con l'avvento, invece, di server più moderni (Figura 1.12), la richiesta in potenza anche per lo stato di inattività è diminuita molto, estendendo il campo di operatività della potenza dinamica al 90% circa del fattore di utilizzazione, aumentando notevolmente l'efficienza, specie nel campo di massima utilizzazione del server, ovvero quello che va dal 20% al 40% circa, come visibile in Figura 1.13. Da un punto di vista energetico, quindi, conviene cercare di sfruttare i server al loro pieno carico avendo massimo rendimento, per questo motivo è stata introdotta la virtualizzazione [32]: con questa tecnica è possibile avere diversi server virtuali all'interno della stessa macchina (Figura 1.14), per ognuno dei quali vi è un sistema operativo consono al compito da svolgere, permettendo di avere il massimo carico possibile all'interno del server fisico, portando quindi risparmio immediato.



**Figura 1.13:** Potenza ed efficienza di un server moderno al variare del fattore di utilizzazione, dallo stato inattivo al picco di performance. [23]

## 1.2.2 Ridondanza

Il funzionamento di un DC è continuo, 24 ore su 24, tutti i giorni dell'anno, il che richiede un alto livello di affidabilità per garantirne la continuità anche in caso di eventuali malfunzionamenti di uno o più componenti. Per affidabilità in un centro di elaborazione dati si intende la capacità di garantire il funzionamento continuo del sistema, anche in caso di guasti a uno o più componenti. Ciò è possibile grazie alla presenza di un sistema di apparecchiature poste in ridondanza tra di loro, che permette di mantenere la continuità di funzionamento anche in caso di malfunzionamenti. Solo in presenza di guasti simultanei a tutte le apparecchiature in ridondanza si avrebbe il completo collasso del sistema. Per garantire una buona progettazione e un funzionamento ottimale di un DC è, quindi, essenziale raggiungere un alto livello di affidabilità. L'*Uptime Institute* [33] ha recepito lo standard TIA (*Telecommunication Industry Association*) [34] in cui sono stati definiti 4 livelli di ridondanza applicabili anche ai centri di elaborazione dati, ed è stato recepito anche in Europa. Lo standard tiene in considerazione circa 20 sottosistemi all'interno di un DC, e per ognuno dei componenti vengono stabiliti



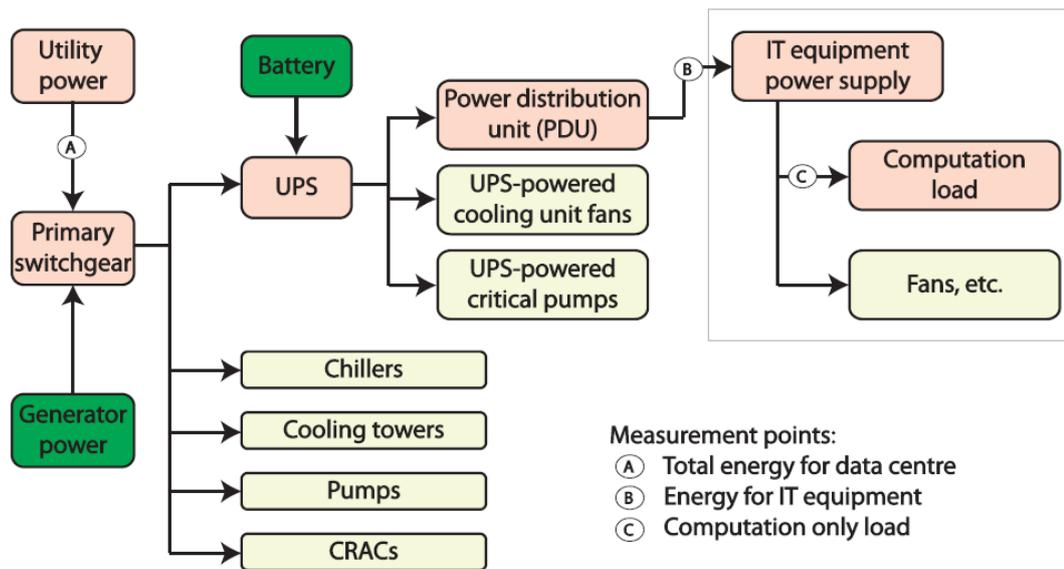
**Figura 1.14:** Comparazione tra un server tradizionale ed un server virtualizzato [24]

manutenibilità e disponibilità affinché gli *IT equipment* abbiano una certa tolleranza al guasto. Si tiene in considerazione inoltre la disposizione dell'alimentazione oltre che ai sistemi di condizionamento presenti. A seconda dell'affidabilità richiesta all'infrastruttura, sono stati definiti 4 livelli di criticità:

1. *Tier I*: un solo percorso di distribuzione elettrica e una sola climatizzazione, senza alcuna ridondanza, con un numero definito di componenti necessari al funzionamento. L'affidabilità totale deve essere del 99.671% e le ore massime di *downtime* pari a 28.8.
2. *Tier II*: un solo percorso di distribuzione elettrica e di climatizzazione, ma con componenti ridondanti. Affidabilità pari a 99.749% e ore massime di *downtime* pari a 22.7.
3. *Tier III*: differenti percorsi di distribuzione elettrica e di climatizzazione attivi, differenti componenti ridondanti e capacità di manutenibilità simultaneamente. Affidabilità pari a 99.982% e *downtime* pari a 1.6 ore.
4. *Tier IV*: differenti percorsi di distribuzione elettrica e di climatizzazione attivi, il doppio di componenti ridondanti ed elevata tolleranza al guasto oltre che a capacità di manutenibilità. Affidabilità pari a 99.995% e *downtime* pari a 25 minuti.

Per ogni livello di affidabilità vengono inoltre definiti costi minimi di realizzazione, caratteristiche geometriche, fisiche ed elettriche. In Italia sono ormai molti i DC di tipo *Tier III* o anche *Tier IV* [35]

### 1.2.3 *Uninterruptible Power Supply (UPS) e Power Distribution Unit (PDU)*



**Figura 1.15:** Flusso di potenza di un tipico DC [16]

L'alimentazione elettrica di un DC arriva dapprima al quadro primario detto anche *switchgear* (Figura 1.15) raggiungendo dapprima gli UPS i quali a loro volta distribuiscono l'energia elettrica alle PDU per alimentare gli *IT equipment*. Le unità UPS non operano durante il normale funzionamento del DC, ma sono essenziali per garantire il corretto funzionamento in caso di interruzione dell'alimentazione di rete. Grazie ad un commutatore, le unità UPS forniscono supporto elettrico in caso di black-out, utilizzando sistemi di accumulo come batterie o, in alcuni casi, anche sistemi fisici. Il tutto permette la messa in funzione dei gruppi elettrogeni, solitamente a ciclo Diesel alimentati a gasolio, che richiedono circa 15 minuti per poter essere operativi. Le unità UPS possiedono una loro efficienza che incide direttamente su quella globale del DC: queste perdite rappresentano le potenze spese ai fini del funzionamento di tali unità oltre che alle cariche delle batterie. Talvolta, in base alla configurazione del DC, le unità UPS possono essere accoppiate

a dei sistemi di *Static Transfer Switch* (STS) i quali provvedono a trasferire il carico tra due fonti di alimentazione in corrente alternata [36]. Le PDU sono distribuite sui rack per fornire energia agli *IT equipment* ivi presenti: uno stesso rack può essere alimentato da differenti circuiti la cui potenza nominale può variare da 1.5 kW a 15 kW circa. I circuiti, dapprima, erano distribuiti nel plenum sotto il pavimento, tuttavia, erano direttamente coinvolti con la climatizzazione, tipicamente operata mediante aperture dal fondo [37], per cui nei moderni DC si preferisce adottare una distribuzione a soffitto, mediante blindosbarre poste su di esso, rendendo anche più agevole le eventuali manutenzioni. Nella totalità del DC, PDU ed UPS e relative distribuzioni, incidono per circa il 10-12% del consumo elettrico [38].

#### 1.2.4 Impianto di illuminazione

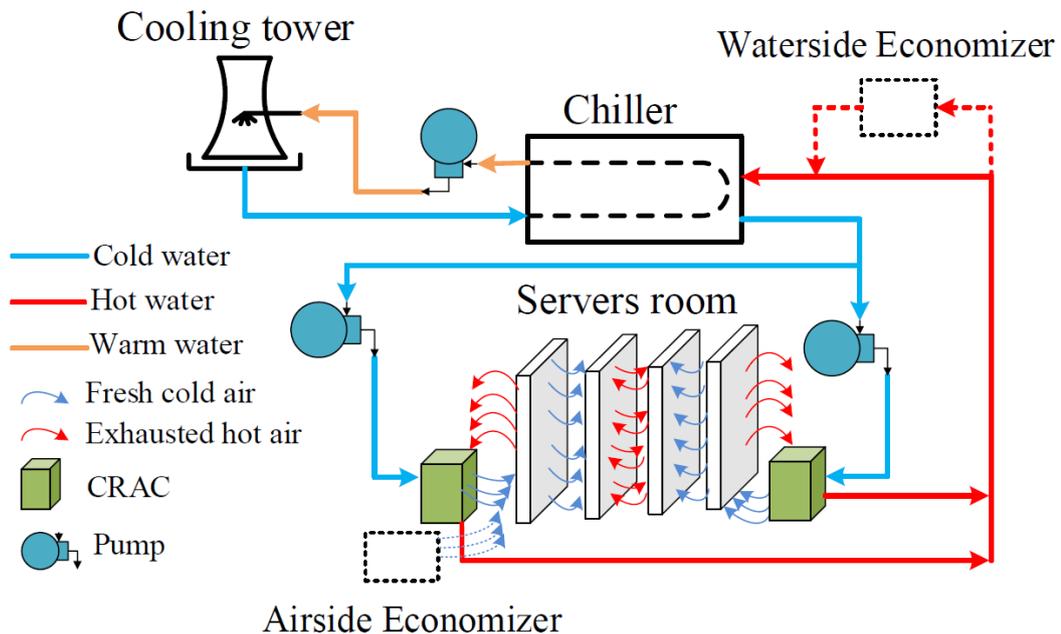
In un DC sono presenti anche sistemi per l'illuminazione: le lampade presenti contribuiscono al carico termico da dissipare, per cui è molto importante l'utilizzo di apparecchi illuminanti di ultima generazione, al fine di garantire un'alta efficienza, riducendo il carico termico nella sala. L'abbinamento a sistemi di controllo automatico garantisce, inoltre, un mancato spreco di energia quando non è richiesta, accendendolo solo quando è necessario ed in aree specifiche, soprattutto nei grandi DC [17]. Ad oggi la tecnologia più efficiente è quella a LED (*Light Emission Diode*) la quale garantisce consumi ridotti, un elevato rapporto tra lumen e Watt e di durata, garantendo oltre 50.000 ore di funzionamento, non riscontrando influenza sull'affidabilità in seguito a continue accensioni e spegnimenti [17].

#### 1.2.5 Impianto di climatizzazione

L'impianto di climatizzazione ha il compito di mantenere le adeguate condizioni termo-igrometriche all'interno del DC tali da garantire il corretto funzionamento degli *IT equipment*. I principali componenti dell'impianto di climatizzazione, come già visto, sono i seguenti (Figura 1.16):

1. Unità CRAC e CRAH
2. Pompe di circolazione
3. Macchina frigorifera o *chiller*
4. Torre di raffreddamento o *dry cooler*

Le unità CRAC e CRAH sono componenti di un DC che hanno la funzione di raffreddare l'aria calda prodotta dal funzionamento degli *IT equipment*. L'unità CRAC utilizza un fluido refrigerante o dell'acqua glicolata come mezzo di scambio termico, mentre il CRAH utilizza solo acqua refrigerata [27]. Entrambe le unità



**Figura 1.16:** Struttura del sistema di raffreddamento di un DC [39]

sono costituite da una serpentina attraverso cui scorre il fluido di scambio termico, la quale è dotata di componenti alettate per favorire lo scambio termico tra il fluido e l'aria calda prodotta dagli *IT equipment*. L'aria calda viene aspirata dal DC e spinta all'interno dello scambiatore di calore dal ventilatore, dove viene raffreddata. Successivamente, l'aria fredda viene convogliata in un plenum e ricomincia il ciclo di raffreddamento. La soluzione CRAC è quella più utilizzata in quanto più efficiente. La macchina frigorifera, denominata anche *chiller*, è responsabile della refrigerazione del fluido che attraversa lo scambiatore di calore all'interno dell'unità CRAC o CRAH, raffreddando l'aria ambiente. Per poter operare tale raffreddamento, il *chiller* contiene al suo interno un gas refrigerante, che mediante le quattro fasi di compressione, condensazione, espansione ed evaporazione, scambia il calore accumulato durante la fase di evaporazione e lo cede durante la fase di condensazione. Nella fase di evaporazione, il calore fornito è dato dal calore proveniente dal fluido refrigerante che circola nel CRAC o CRAH, mentre il calore viene ceduto nella fase di condensazione ad un fluido direttamente connesso ad una torre di raffreddamento. Tale fluido riceve quindi il calore durante la fase di condensazione, per poi essere raffreddato mediante l'aria esterna nella torre di raffreddamento. Questa serie di cicli consente all'impianto di mantenere delle adeguate condizioni termoigrometriche all'interno del DC, a spese, tuttavia, di una non indifferente richiesta energetica per far funzionare il compressore, i ventilatori e

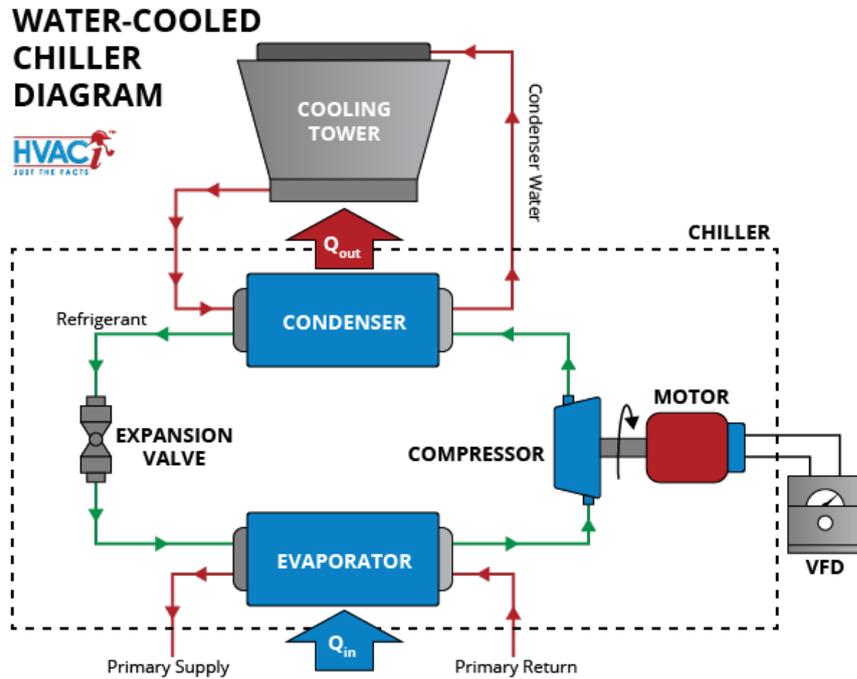


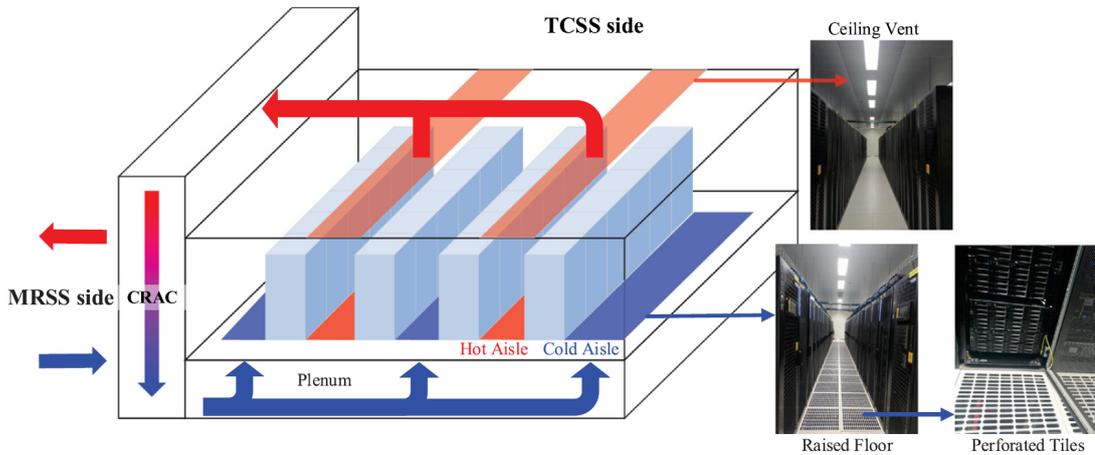
Figura 1.17: Ciclo di un *chiller* [40]

le pompe di circolazione. Il compressore, che garantisce il ciclo del gas refrigerante, è molto energivoro, di conseguenza è auspicabile installare macchine ad altissima efficienza, in modo da ridurre sensibilmente l'energia richiesta [17]. Basandosi sulla densità di *IT equipment* presenti all'interno del DC, si possono classificare tre principali tipi di impianto [41] atti a raffreddare l'aria ambiente, ognuno dei quali è studiato per migliorare il più possibile il consumo energetico all'interno di un DC [42]:

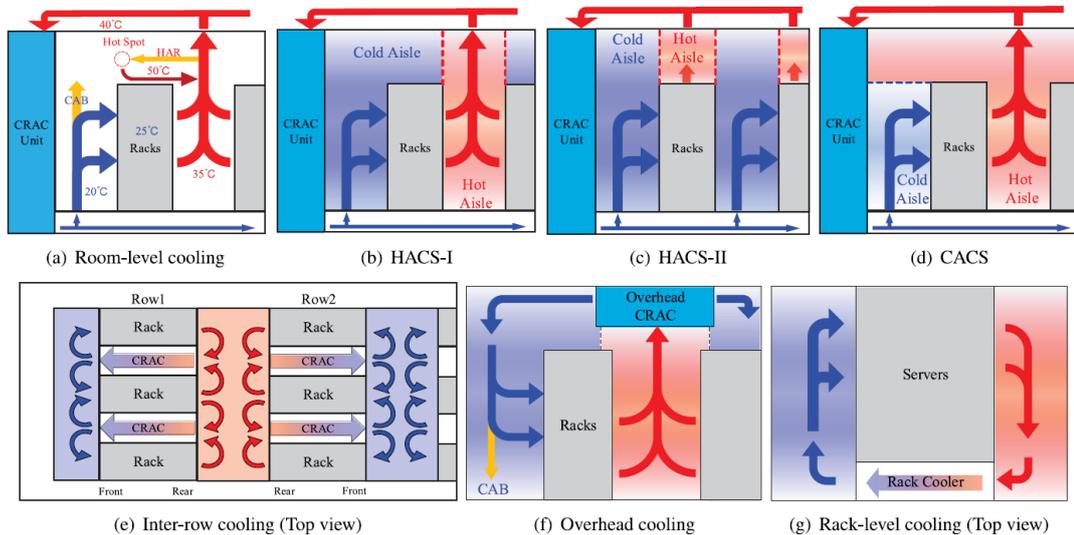
1. *Room-level cooling*
2. *Row-level cooling*
3. *Rack-level cooling*

### ***Room-level cooling***

Per *room-level cooling* si intende un raffrescamento eseguito a livello di sala: si provvede, infatti, a dissipare tutto il calore all'interno di essa, utilizzando solitamente un layout a piano rialzato [16, 43]. Generalmente, infatti, la sala computer viene rialzata mediante un plenum ed in quest'ultimo viene insufflata l'aria uscente dal CRAC, uscendo poi da delle griglie a pavimento; quest'ultima, quindi, viene



**Figura 1.18:** Meccanismo tecnologico tipico di un condizionamento di tipo *room-level cooling* con insufflaggio a pavimento [41]



**Figura 1.19:** Differenti approcci per la tecnologia di raffreddamento dell'aria [41]

aspirata nei rack grazie alle ventole presenti all'interno dei server, raffreddandone le componenti. Nella sala computer viene fatta una differenziazione tra le isole calde e fredde, in modo da evitare il più possibile la miscelazione tra aria refrigerata di immissione ed aria riscaldata in uscita dai server (Figura 1.18). Dall'isola calda, quindi, grazie alla differenza di pressione e alla diversa densità dovuta alla temperatura, l'aria riscaldata fluisce verso il soffitto, dalla quale viene aspirata per essere nuovamente raffreddata dentro l'unità CRAC e ricominciare quindi il ciclo. La principale problematica di questa tecnologia è la miscelazione tra l'aria riscaldata

di ritorno e l'aria refrigerata di immissione, che causa effetti indesiderati come l'*hot air recirculation* (HAR) e il *cold air bypass* (CAB) [42] (Figura 1.19a). Nel caso in cui si verificasse un HAR, l'aria riscaldata in uscita dall'isola calda, invece di essere aspirata migra verso l'aria refrigerata di immissione, causandone un innalzamento della temperatura impedendo così il corretto raffreddamento dei server. Il CAB, invece, si verifica ogni qualvolta si abbia un eccesso di aria refrigerata, la quale quindi non viene aspirata dai rack, bensì permea nello spazio superiore, causando una mal distribuzione dell'aria refrigerata e conseguente perdita del potere refrigerante. Per ovviare a tali problematiche si sono messe in opera varie tecniche di contenimento dell'aria [41]. Prima fra tutte vi è il contenimento dell'isola calda, *hot aisle containment system* (HACS), mediante componenti fisici studiati appositamente per evitare l'effetto HAR (Figura 1.19b) con particolare attenzione anche a DC in cui lo spazio non è generoso (Figura 1.19c). Per contrastare l'effetto CAB, invece, si sono studiati sistemi di contenimento dell'isola fredda, *cold aisle containment system* (CACS), i quali prevengono la miscelazione isolando l'aria refrigerata tra la griglia posta a pavimento e l'ingresso ai rack. La flessibilità della distribuzione del condizionamento oltre che al suo confinamento rappresenta un vantaggio non indifferente del *room-level cooling* [16], oltre che all'isolamento dell'unità CRAC al di fuori della sala contenente i rack, rendendo più agevole la manutenzione [44]. Di contro, tuttavia, la distribuzione dell'aria nel plenum sotto la pavimentazione è soggiogata ai rack sovrastanti, rendendo quindi una sua eventuale modifica molto complessa oltre che costosa [16]. Si è visto inoltre come le perdite dell'aria non sono indifferenti [45], anche quando tutte le opere di contenimento vengono svolte.

### ***Row-level cooling***

Rispetto al *room-level cooling*, il *row-level cooling* posiziona le unità CRAC molto vicine alle tecnologie ICT, riducendo lo spazio che deve percorrere il flusso d'aria [41]. Esistono due tipologie di *row-level cooling*: *inter-row cooling* (Figura 1.19e) e *over-head cooling* (Figura 1.19f). Nella prima configurazione, le unità CRAC sono installate tra i rack lungo tutta la loro altezza, in questo modo il flusso d'aria che esce dai CRAC viene aspirato nei rack con una temperatura uniforme lungo l'altezza, attraversa i server e fuoriesce in un'isola calda, dalla quale viene aspirata dai ventilatori del CRAC e raffreddata per ricominciare il ciclo. In questa configurazione il percorso dell'aria è più breve e diretto, riducendo le perdite di calore e migliorando l'efficienza del raffreddamento, isolando completamente le isole calde e fredde. Il contenimento mirato dell'isola calda e fredda sfavorisce la creazione di fenomeni di CAB e HAR, evitando dunque perdite indesiderate e massimizzando l'efficienza del raffreddamento. Inoltre, il raffreddamento *inter-row* offre una maggiore precisione e flessibilità nella scelta delle posizioni dei CRAC. Questo consente di installare unità di raffreddamento più potenti vicino

a rack particolarmente energivori, fornendo un raffreddamento efficace dove è più necessario. In questo modo, il raffreddamento *inter-row* è in grado di gestire meglio le esigenze di raffreddamento dei componenti IT più esposti al calore e di migliorare l'efficienza energetica complessiva del DC. Essa tuttavia richiede molto spazio, visto l'accostamento continuo di rack e CRAC, oltre che ad una progettazione accurata delle reti di raffreddamento, per questo in quei DC in cui lo spazio è limitato, si opta per la seconda configurazione, ovvero *over-head cooling* [46]. In quest'altra configurazione, una speciale unità CRAC viene posta sul soffitto in mezzera della fila di rack, aspirando l'aria dall'isola calda, raffreddandola, e immettendola ai lati per poi essere aspirata dai rack. Nonostante il pregio di essere flessibile oltre che di facile impiego, l'effetto di by-pass dell'aria fredda, CAB, è particolarmente sentito vista la propensione dell'aria fredda a raccogliersi verso il basso [41]. In generale, il *row-level cooling* può essere visto come un miglioramento del *room-level cooling*, avendo maggior efficienza e miglior impiego dell'energia [44], oltre al fatto che, essendo il percorso dell'aria particolarmente ridotto, vi si possono eseguire previsioni accurate sul suo andamento, con il fine di ottenere delle performance di raffreddamento migliori [47]. I costi di installazione, tuttavia, sono molto più alti rispetto al *room-level cooling* [42], inoltre essendo le unità CRAC installate di fianco agli dispositivi ICT, la loro manutenzione richiederebbe dei momenti di fermo.

### ***Rack-level cooling***

Nel *rack-level cooling*, l'unità CRAC è installata direttamente nel rack, riducendo ulteriormente la distanza percorsa dal flusso d'aria [16, 42]. In Figura 1.19g viene rappresentata la vista dall'alto del rack comprensivo di CRAC e di due isole, calda e fredda, ricavate da una piccola partizione del rack [44]. In questa configurazione, essendo gli spazi molto ristretti, le potenze dei ventilatori sono notevolmente ridotte, oltre al fatto che il sistema è estremamente flessibile, potendo controllare singolo rack per singolo rack [41], smaltendo il carico degli *IT equipment* anche più energivori. Il *rack-level cooling*, infatti, consente di avere un potere di raffreddamento estremamente elevato, anche grazie alle pochissime perdite dovute a HAR o CAB, che sono quasi trascurabili [48]. La sua flessibilità è anche particolarmente indicata in quei casi in cui certi dispositivi ICT sono spenti e non necessitano di raffreddamento, condizione inevitabile nei casi di *room-level cooling* e *row-level cooling* in quanto sono all'interno di un complesso più ampio e il controllo puntuale dei rack non è possibile [42]. Di contro, tuttavia, hanno dei costi di installazione estremamente elevati, oltre al fatto che la manutenzione puntuale richiede molto lavoro [44].

## Capitolo 2

# Standard di riferimento e metriche

Come già precedentemente citato, il corretto funzionamento dei DC è essenziale per garantire la disponibilità delle applicazioni e dei dati, il che rende importante proteggere tali strutture da eventuali guasti, problemi di sicurezza e problemi di efficienza. Per questo motivo, negli ultimi anni, ci sono stati diversi sforzi per stabilire standard e normative che regolamentino la progettazione e la gestione dei DC. Ci sono molte normative a livello nazionale ed internazionale che stabiliscono i requisiti di sicurezza e le pratiche consigliate per la gestione dei DC. Queste normative coprono una vasta gamma di argomenti, dai semplici cablaggi eseguiti a regola d'arte, alla gestione della privacy dei dati. Tuttavia, uno degli aspetti più importanti per il corretto funzionamento dei DC è la gestione del raffreddamento. Esistono diverse normative che coprono il raffreddamento dei DC, fornendo linee guida e raccomandazioni per garantire la massima efficienza e sicurezza nell'utilizzo di questi ambienti critici per le attività aziendali. In questa sezione, verranno esaminate alcune di queste normative e le loro implicazioni per la corretta gestione del raffreddamento dei DC, sfruttando l'utilizzo di metriche per valutare l'efficienza energetica e l'impatto ambientale.

## 2.1 EN 50600

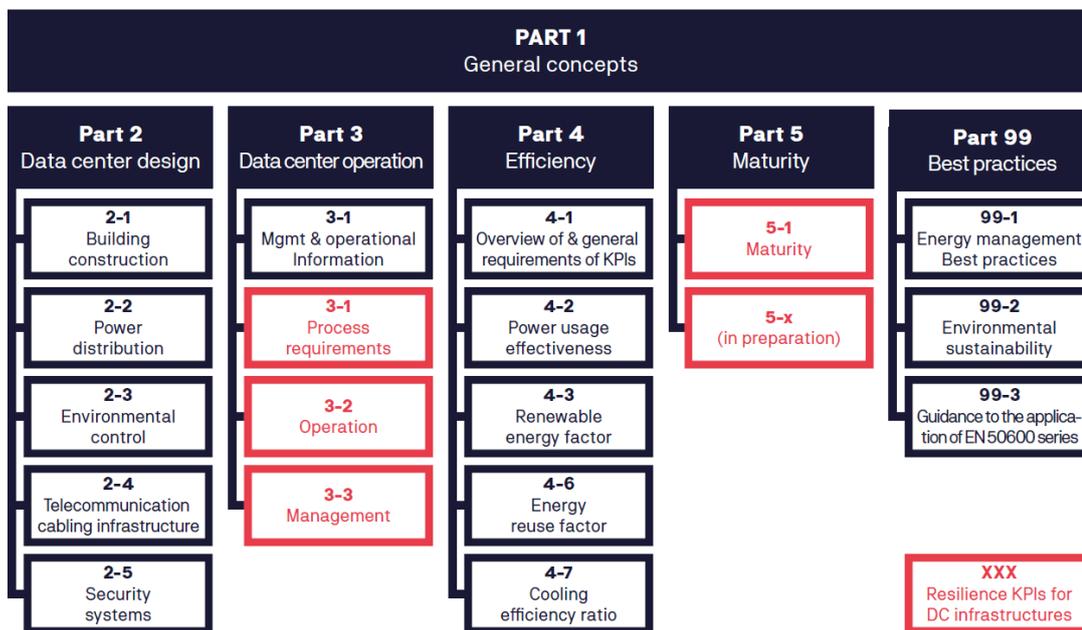


Figure 2: The expanded scope of EN 50600 today (red = ongoing development)

**Figura 2.1:** Suddivisione della norma EN 50600 nelle principali parti di cui è costituita: le parti in rosso sono oggetto di sviluppo in atto [49]

La EN 50600 è una norma europea che fornisce linee guida per la progettazione, l'installazione e la gestione dei DC. La norma copre diverse aree, tra cui la sicurezza, l'affidabilità, l'efficienza energetica e la gestione del ciclo di vita dei DC. La EN 50600 è stata sviluppata dall'*Istituto Europeo per gli Standard Tecnici* (CEN) e mira a fornire un quadro comune per la progettazione dei DC in tutta Europa [49]. Essa si suddivide in varie parti, schematizzate in Figura 2.1:

1. Concetti generali
2. Design del DC
3. Operatività del DC
4. Efficienza
5. Maturità
6. Buone pratiche

DIFFERENT DATA CENTER STANDARDS		
TSL STANDARD	EN 50600	Uptime Tier
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ TÜVIT's own developed criteria catalog</li> <li>▪ German engineering Approach</li> <li>▪ Takes into consideration best practices and standards</li> <li>▪ Clear differentiation through 4 different levels</li> <li>▪ Clearly defined criteria, which allow comparability</li> <li>▪ Criteria aspects: Environment, Construction, Fire Protection Systems, Security Systems, Power Supply, Air Conditioning Systems, Organization, Documentation and Dual Site Data Center</li> <li>▪ Provides assistance in every phase: idea, design, construction and operation</li> <li>▪ No prior design certification is required to receive a certificate of the constructed facility</li> <li>▪ Makes use of a criteria catalog, therefore the operator has transparency during the evaluation process</li> <li>▪ Clearly defined criteria in the levels</li> <li>▪ Full coverage of EN 50600 requirements</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Official European guideline                             <ul style="list-style-type: none"> <li>– Basis for the upcoming ISO 22237 (future global data center standard)</li> </ul> </li> <li>▪ Clear differentiation through 4 different availability classes</li> <li>▪ Criteria aspects: Environment, Construction, Fire Protection Systems, Security Systems, Power, Supply, Air Conditioning Systems, Organization and Documentation</li> <li>▪ Provides assistance in every phase: idea, design, construction and operation</li> <li>▪ No prior design certification is required to receive a certificate of the constructed facility</li> <li>▪ Originally meant as a guideline, however by applying the TSL-method it becomes certifiable by using the criteria catalog of TÜVIT TSL:EN50600</li> <li>▪ Fulfillment of part of the requirements are risk based</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Privately owned evaluation/certification method</li> <li>▪ Has its origin in the USA</li> <li>▪ Globally known</li> <li>▪ Differentiation into 4 Tiers</li> <li>▪ Focuses mainly requirements in the power supply, air conditioning systems and organization</li> <li>▪ Requires prior design certification before a constructed facility can be certified</li> <li>▪ Divides into design, constructed facility and operation certificates</li> </ul>

Figura 2.2: Approcci rilevanti delle principali certificazioni [50]

La EN 50600 è tutt'ora in fase di stesura, tuttavia ha già rilasciato degli standard riguardo l'efficienza, definendo varie parti, ma per ora le prime 4 sono le più complete. La EN 50600-2 descrive le attività e le considerazioni da effettuare in fase di progettazione del DC, tra cui la scelta del sito, l'architettura dell'edificio, la gestione dei sistemi meccanici ed elettrici, la sicurezza e la gestione dei dati. La parte 2 della EN 50600 definisce inoltre le specifiche tecniche per gli elementi hardware del DC, come i sistemi di raffreddamento, l'alimentazione elettrica e la cablatura. In generale, la norma mira a garantire che il DC sia progettato in modo tale da fornire il massimo livello di disponibilità, sicurezza e efficienza energetica. La EN 50600-3, invece, copre l'operatività dei DC, ovvero i processi e le procedure necessarie per gestire, monitorare e mantenere in modo affidabile e sicuro le infrastrutture dei DC. Questa parte definisce i requisiti per la gestione operativa dei DC, comprese le politiche, i processi, i controlli, i registri e le attività

di manutenzione. Infine, la EN 50600-4 pone molta attenzione riguardo l'efficienza energetica, analizzando 4 *Key Performance Indicator* (KPI) che sono:

1. *Power Usage Effectiveness* (PUE)
2. *Renewable Energy Factor* (REF)
3. *Energy Reuse Factor* (ERF)
4. *Cooling Efficiency Ration* (CER)

I KPI definiti dalla EN 50600-4 permettono di monitorare il consumo energetico del DC in modo efficiente e accurato, fornendo un quadro completo della sua efficienza energetica e identificando eventuali aree in cui è possibile apportare miglioramenti. Ciò consente di ridurre i costi energetici, di aumentare la sostenibilità ambientale e di garantire un'operatività ottimale del DC, migliorando la sua disponibilità e riducendo i rischi di interruzioni e guasti. Inoltre, l'adozione dei KPI consente di ottenere una maggiore trasparenza nella comunicazione dei risultati energetici del DC. Tale norma, inoltre, pone attenzione sull'eventuale certificazione (Figura 2.2) di un DC in base al grado di sicurezza raggiunto [50] proprio come ha fatto l'*Uptime institute* [35], ma anche *Tüvit* [49, 50], azienda tedesca leader del settore della sicurezza dell'IT.

## 2.2 ASHRAE

Tra tutti gli standard quello che ha riscontrato maggiori successi è senza dubbio il *Thermal Guidelines for Data Processing Environments* redatto dai membri del Technical Committee 9.9 di ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*), con l'intento, per l'appunto, di porre una linea guida per la realizzazione ed il mantenimento delle apparecchiature IT [51, 52, 53, 54, 55]. I *Thermal Guidelines for Data Processing Environments* di ASHRAE forniscono, quindi, linee guida per il progetto e l'utilizzo di ambienti di elaborazione dei dati in modo da garantire il corretto funzionamento delle apparecchiature elettroniche e ridurre il rischio di guasti dovuti al surriscaldamento. Le raccomandazioni di ASHRAE si basano sull'evidenza scientifica e tecnica disponibile al momento della loro pubblicazione, e sono progettate per garantire che gli ambienti di elaborazione dati siano efficienti dal punto di vista energetico e sicuri per gli operatori. Le linee guida di ASHRAE forniscono anche raccomandazioni per la progettazione e l'installazione di sistemi di raffreddamento, nonché per la gestione e la manutenzione di questi sistemi. Inoltre, offrono suggerimenti per il monitoraggio e il controllo delle condizioni termiche all'interno dell'ambiente di elaborazione dati e per la gestione dei problemi legati alle condizioni termiche.

### 2.2.1 Prima e seconda versione

Class	Equipment Environment Specifications									
	Product Operation <sup>a, b</sup>							Product Power Off <sup>b, c</sup>		
	Dry Bulb Temperature (°C)		Humidity Range, Non Condensing		Maximum Dew Point (°C)	Maximum Elevation (m)	Maximum Rate of Change (°C/h)	Dry-Bulb Temperature (°C)	Relative Humidity (%)	Maximum Dew Point (°C)
	Allowable	Recommended	Allowable (% RH)	Recommended						
1	15 to 32 <sup>d</sup>	18 to 27 <sup>e</sup>	20 to 80	5.5°C DP to 60% RH and 15°C DP	17	3050	5/20 <sup>f</sup>	5 to 45	8 to 80	27
2	10 to 35 <sup>d</sup>	18 to 27 <sup>e</sup>	20 to 80	5.5°C DP to 60% RH and 15°C DP	21	3050	5/20 <sup>f</sup>	5 to 45	8 to 80	27
3	5 to 35 <sup>d, g</sup>	NA	8 to 80	NA	28	3050	NA	5 to 45	8 to 80	29
4	5 to 40 <sup>d, g</sup>	NA	8 to 80	NA	28	3050	NA	5 to 45	8 to 80	29

Tabella 2.1: ASHRAE 2008 Thermal guidelines [56]

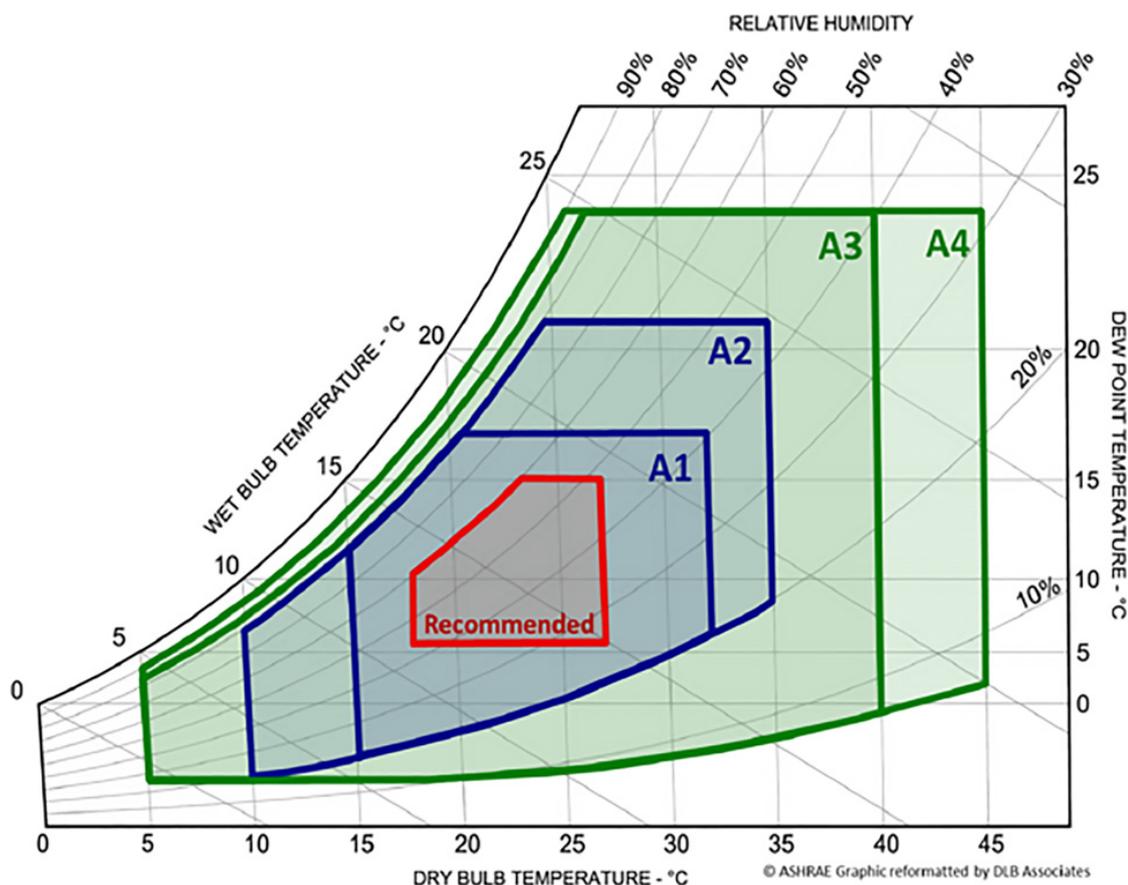
Parametro	2004	2008
Temperatura minima	20 °C	18 °C
Temperatura massima	25 °C	27 °C
Umidità relativa minima	40% RH	5.5°C DP
Umidità relativa massima	55%	60% e 15°C DP

**Tabella 2.2:** Differenza dei parametri tra la prima e la seconda versione del *Thermal Guidelines for Data Processing Environments* di ASHRAE [56]

Classes (a)	Equipment Environmental Specifications							
	Product Operations (b)(c)					Product Power Off (c) (d)		
	Dry-Bulb Temperature (°C) (e) (g)	Humidity Range, non-Condensing (h) (i)	Maximum Dew Point (°C)	Maximum Elevation (m)	Maximum Rate of Change(°C/hr) (f)	Dry-Bulb Temperature (°C)	Relative Humidity (%)	Maximum Dew Point (°C)
<b>Recommended</b> (Applies to all A classes; individual data centers can choose to expand this range based upon the analysis described in this document)								
A1 to A4	18 to 27	5.5°C DP to 60% RH and 15°C DP						
<b>Allowable</b>								
A1	15 to 32	20% to 80% RH	17	3050	5/20	5 to 45	8 to 80	27
A2	10 to 35	20% to 80% RH	21	3050	5/20	5 to 45	8 to 80	27
A3	5 to 40	-12°C DP & 8% RH to 85% RH	24	3050	5/20	5 to 45	8 to 85	27
A4	5 to 45	-12°C DP & 8% RH to 90% RH	24	3050	5/20	5 to 45	8 to 90	27
B	5 to 35	8% RH to 80% RH	28	3050	NA	5 to 45	8 to 80	29
C	5 to 40	8% RH to 80% RH	28	3050	NA	5 to 45	8 to 80	29

**Tabella 2.3:** ASHRAE 2011 *Thermal guidelines for Data Processing Environments* [56]

Venne stilato per la prima volta nel 2004 [51] con lo scopo di individuare i parametri ambientali, ovvero temperatura ed umidità, necessari al fine di garantire il corretto funzionamento, quindi affidabilità, e le massime performance degli *IT equipment*. Nella versione successiva [52], del 2008, ASHRAE si concentra maggiormente sull'efficienza pur cercando di coniugare le maggiori performance possibili assieme alla massima affidabilità come nell'edizione precedente, dividendo in classi di appartenenza degli *IT equipment*, due di queste appartenenti ai DC. È molto importante notare come le specifiche della seconda edizione siano meno rigorose rispetto a quelle del 2004, questo perchè si punta, come detto, all'efficienza, ma l'incremento del range delle temperature ammissibili è anche dovuto alla continua evoluzione delle apparecchiature elettroniche, che riescono a subire sbalzi



**Figura 2.3:** Diagramma di Carrier rappresentante le classificazioni del 2011 [53, 57]

termici considerevoli senza danneggiarsi e a sopportare meglio le alte temperature. Particolare attenzione deve essere posta alla definizione dei limiti massimi e minimi dell'umidità relativa, definita come un temperatura di *Dew Point* (DP), ovvero di rugiada. Un'umidità relativa troppo alta può causare condensa sui componenti elettronici e sull'isolamento dei cavi, il che può aumentare il rischio di cortocircuiti e danni alle apparecchiature, d'altra parte, invece, un'umidità relativa troppo bassa può causare l'essiccamento dei componenti elettronici oltre che all'accumulo di cariche elettrostatiche sui componenti, abbassandone l'affidabilità.

## 2.2.2 Terza edizione

Nella terza edizione del 2011, la modifica più importante riguarda la nuova classificazione degli *IT equipment*: come visibile in Tabella 2.3 le classi che definiscono le tipologie di DC sono quattro. Le nuove classi A3 ed A4 sono quelle meno restrittive,

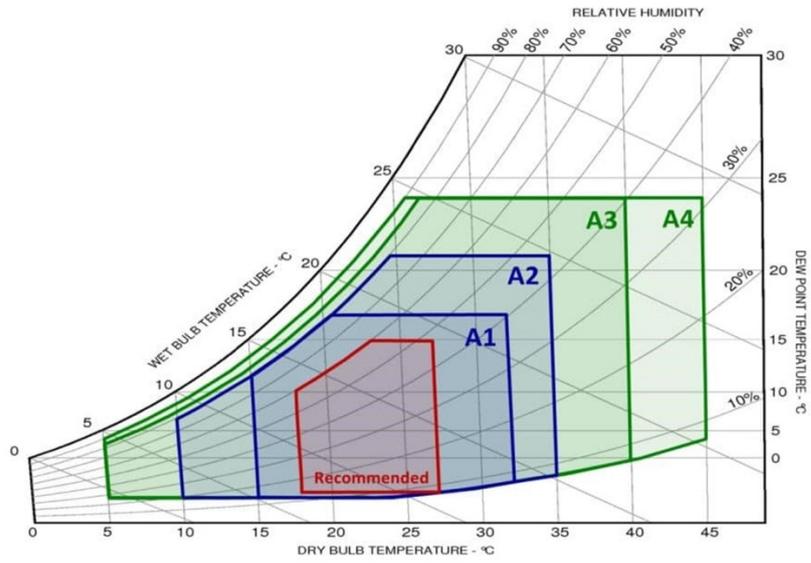


Figura 2.4: Diagramma di Carrier rappresentante le classificazioni 2021 [55]

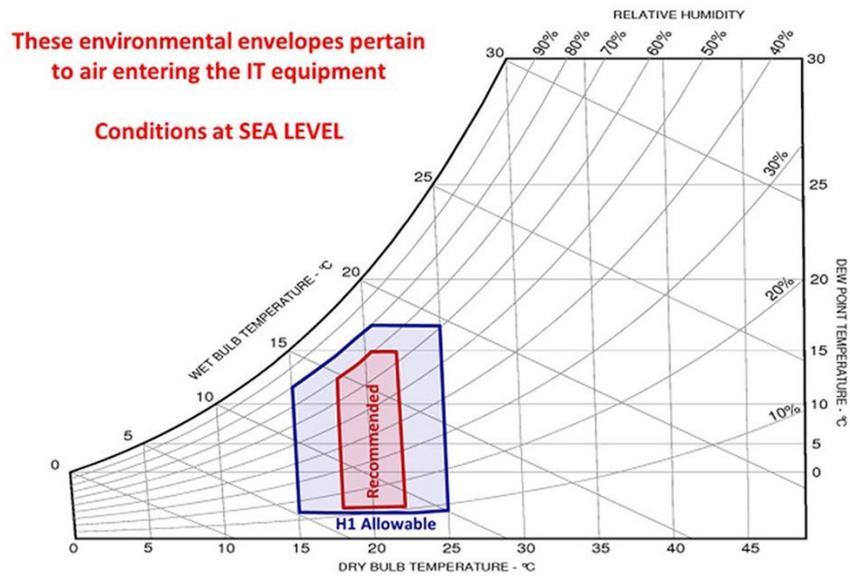


Figura 2.5: Diagramma di Carrier rappresentante le classificazioni 2021 - tipologia H [55]

Equipment Environment Specifications for Air Cooling							
Product Operation <sup>b,c</sup>							Product Power Off <sup>c,d</sup>
Class <sup>a</sup>	Dry-Bulb Temp. <sup>e,g</sup> , °C	Humidity Range, Noncond. <sup>h, i, k, l, n</sup>	Max. Dew Point <sup>k</sup> , °C	Max. Elev. <sup>e,j,m</sup> , m	Max. Rate of Change <sup>f</sup> , °C/h	Dry-Bulb Temp., °C	RH <sup>k</sup> , %
Recommended (suitable for Classes A1 to A4; explore data center metrics in this book for conditions outside this range.)							
A1 to A4	18 to 27	-9°C DP to 15°C DP and 70% rh <sup>n</sup> or 50% rh <sup>n</sup>					
Allowable							
A1	15 to 32	-12°C DP and 8% rh to 17°C DP and 80% rh <sup>k</sup>	17	3050	5/20	5 to 45	8 to 80 <sup>k</sup>
A2	10 to 35	-12°C DP and 8% rh to 21°C DP and 80% rh <sup>k</sup>	21	3050	5/20	5 to 45	8 to 80 <sup>k</sup>
A3	5 to 40	-12°C DP and 8% rh to 24°C DP and 85% rh <sup>k</sup>	24	3050	5/20	5 to 45	8 to 80 <sup>k</sup>
A4	5 to 45	-12°C DP and 8% rh to 24°C DP and 90% rh <sup>k</sup>	24	3050	5/20	5 to 45	8 to 80 <sup>k</sup>

**Tabella 2.4:** Tabella 2.1 di *Thermal Guidelines for Data Processing Environments* del 2021 [55]

in quanto fanno riferimento ad ambienti di lavoro con apparecchiature più semplici. Come visibile in Figura 2.3 sono riportati i limiti dati dalla Tabella 2.3 sul diagramma psicrometrico di Carrier, nel quale vengono evidenziate le 4 classi con i limiti

Equipment Environment Specifications for High-Density Air Cooling							
Class <sup>a</sup>	Product Operation <sup>b,c</sup>					Product Power Off <sup>c,d</sup>	
	Dry-Bulb Temp. <sup>e,g</sup> , °C	Humidity Range, Noncond. <sup>h,i,k,l,n</sup>	Max. Dew Point, °C	Max. Elev. <sup>e,j,m</sup> , m	Max. Rate of Change <sup>f</sup> , °C/h	Dry-Bulb Temp., °C	RH, %
<b>Recommended</b>							
<b>H1</b>	18 to 22	-9°C DP to 15°C DP and 70% rh <sup>n</sup> or 50% rh <sup>n</sup>					
<b>Allowable</b>							
<b>H1</b>	5 to 25	-12°C DP and 8% rh to 17°C DP and 80% rh <sup>k</sup>	17	3050	5/20	5 to 45	8 to 80 <sup>k</sup>

**Tabella 2.5:** Tabella 2.2 di *Thermal Guidelines for Data Processing Environments* del 2021 [55]

raccomandati oltre a quelli consigliati ma non obbligatori. Partendo quindi da tali presupposti, ASHRAE fornisce dei suggerimenti al fine di ottimizzare al meglio possibile il processo di raffreddamento dei DC, ponendo particolare attenzione ai flussi d'aria e sulla strategia di controllo del sistema di raffrescamento, individuando sei principali punti chiave:

1. Andamento della potenza del server in funzione della temperatura ambiente
2. Livello del rumore acustico rispetto alla temperatura ambiente
3. Andamento dell'affidabilità rispetto alla temperatura ambiente
4. Affidabilità dei server rispetto ad umidità, contaminazioni ed altri effetti di temperatura
5. Andamento delle performance del server rispetto alla temperatura ambiente
6. Andamento dei costi dei server rispetto alla temperatura ambiente

In ognuno di questi parametri, si tende a giustificare l'aumento della temperatura in ingresso ai rack, che ancora una volta si dimostra la condizione principale. Vengono riportati, inoltre, diversi esempi su come è possibile ottenere maggiori risparmi o efficienze variando di poco la temperatura, sempre nel rispetto dell'affidabilità o anche del comfort del personale nel caso dei livelli acustici.

### 2.2.3 Quarta edizione

Si passa così alla quarta edizione, stilata nel 2016, la cui differenza principale rispetto alla terza versione del 2011 è che le raccomandazioni del 2016 sono state aggiornate per tenere conto dei progressi tecnologici e dei cambiamenti nei requisiti energetici e di sicurezza degli ambienti di elaborazione dati. Ad esempio, le linee guida del 2016 includono raccomandazioni specifiche per il raffreddamento degli ambienti di elaborazione dati che utilizzano sistemi di alimentazione di emergenza (UPS), che non erano presenti nelle linee guida del 2011. Inoltre, le linee guida del 2016 forniscono maggiori dettagli sulle tecnologie di raffreddamento disponibili e sui modi per ottenere il massimo rendimento dai sistemi di raffreddamento esistenti. In sintesi, la differenza principale tra le *Thermal Guidelines for Data Processing Environments* di ASHRAE del 2011 e del 2016 è che le linee guida del 2016 sono state aggiornate per tenere conto dei progressi tecnologici e dei cambiamenti nei requisiti energetici e di sicurezza degli ambienti di elaborazione dati.

### 2.2.4 Quinta edizione

Nella quinta edizione oltre a delle correzioni rispetto alla precedente versione del 2016 (Figura 2.4), sono state apportate sostanziali modifiche riguardo i server raffreddati a liquido, tuttavia si è anche considerata la continua presenza di apparecchiature ad alta potenza raffrescate ad aria, creando quindi un'ulteriore categoria oltre alle classiche A1, A2, A3 ed A4 (Tabella 2.4): la classe H1 (Tabella 2.5). La nuova classe H1 include sistemi che integrano strettamente una serie di componenti ad alta potenza come processori per server, acceleratori, chip di memoria e controller di rete. Sulla base delle raccomandazioni della quinta edizione, ASHRAE indica che questi sistemi H1 necessitano di range di temperatura più ristretti quando vengono utilizzate strategie raffreddate ad aria, raccomandate 64,4°F – 71,6°F (18°C - 22°C), rispetto a 64,4°F – 80,6°F (18°C - 27°C) per la classe A1 (Figura 2.5, Tabelle 2.4 e 2.5).

## 2.3 *Green Grid*

Il *Green Grid* [58] è un'organizzazione internazionale senza scopo di lucro che si occupa di sviluppare tecnologie, standard e *best practice* per l'efficienza energetica dei DC e dei sistemi IT. Fondata nel 2007, l'obiettivo principale del *Green Grid* è quello di promuovere l'adozione di pratiche e tecnologie sostenibili nei DC al fine di ridurre il consumo di energia e l'impatto ambientale di questi sistemi, avvalendosi di metriche per il controllo energetico di un DC oltre che a pratiche di *benchmarking* di efficienza energetica. L'organizzazione offre una vasta gamma di risorse informative, tra cui pubblicazioni, eventi e iniziative di sensibilizzazione per aiutare le aziende a sviluppare strategie di efficienza energetica nei loro DC. Il *Green Grid* ha sviluppato una serie di metriche per valutare l'efficienza energetica dei DC. Queste metriche includono:

1. *Power Usage Effectiveness* (PUE): un indicatore di efficienza energetica utilizzato per misurare il consumo di energia di un DC, calcolato dividendo il totale dei consumi energetici del DC per quelli utilizzati per l'elaborazione dei dati.
2. *Data Center Infrastructure Efficiency* (DCiE): una metrica che misura l'efficienza delle infrastrutture di un DC, compresi i sistemi di alimentazione, raffreddamento e cablaggio.
3. *Water Usage Effectiveness* (WUE): una metrica che misura l'efficienza dell'utilizzo dell'acqua in un DC.
4. *Carbon Usage Effectiveness* (CUE): una metrica che misura l'impatto del carbonio di un DC sull'ambiente.
5. *Data Center Storage Productivity - Capacity* (DCsPcap): una metrica che misura l'efficienza energetica dei componenti hardware per lo storage [59].

Molte altre metriche sono tuttavia state elaborate o sono in fase di elaborazione, spaziando dall'efficienza di raffreddamento all'efficienza dei server in termini di capacità di calcolo.

## 2.4 Metriche

Come visto nel primo capitolo, i DC sono sistemi complessi che presentano diverse variabili da considerare quando si cerca di ottimizzare l'efficienza energetica. Questa complessità rende difficile individuare una metodologia precisa per misurare la loro efficienza energetica [60]. Per molto tempo il concetto di efficienza energetica all'interno dei DC è stata messa in secondo piano [61], riducendola alla semplice minimizzazione di consumo energetico utilizzando nuovi componenti più efficienti e *best practices* [62]. Con l'incremento della domanda energetica da parte dei DC, molte compagnie operanti nel settore si sono mobilitate per migliorarne l'efficienza energetica [63], sono così nate differenti iniziative internazionali, come il *Green Grid* [58] o *Energy Star Program* [64], al fine di rilasciare criteri per poter misurare l'efficienza, oltre che a *best practices*, parametri di *benchmark* ma anche di tecnologie per aumentare il rendimento sia dal punto di vista infrastrutturale che hardware [65]. Inoltre, il *thermal management* sta assumendo sempre più un ruolo chiave all'interno dei DC. Come precedentemente citato, ci sono determinate condizioni termoigrometriche da rispettare all'interno di una sala server affinché le componenti IT operino alle migliori condizioni. Dunque, un controllo accurato di tali parametri garantisce la loro affidabilità oltre che a fornire un potenziale mezzo di risparmio energetico: si è dimostrato infatti come il *thermal management* possa portare a risparmio energetico attraverso un approccio di controllo energetico [60]. Infine, per valutare l'effettivo risparmio energetico in un DC, e quindi l'aumento dell'efficienza energetica, è fondamentale disporre di misurazioni accurate. Tuttavia, all'interno di un DC, la raccolta di queste misurazioni può essere limitata da diverse variabili, tra cui l'architettura del DC, i profili di carico e le condizioni ambientali [63]. Le metriche, dunque, sono nate con lo scopo di ridurre ad un parametro la valutazione dell'efficienza energetica, ponendo dei range o dei valori ottimali da perseverare, valutando in maniera qualitativa e/o quantitativa gli effetti energetici e/o ambientali sull'operatività del DC, consentendo inoltre di effettuare un *benchmarking* con altri DC. Oltre a ciò, le metriche consentono di identificare le aree all'interno del DC che richiedono un miglioramento; di fatto esistono metriche più generiche, ma anche puntuali [63]. Alcuni standard, come la EN 50600, hanno imposto il calcolo di alcune metriche, come il PUE, per cui la sensibilizzazione verso l'utilizzo di coefficienti standardizzati per quantificare l'efficienza di un DC viene ormai recepita a livello globale. Esistono dunque varie tipologie di metriche, tuttavia esse possono essere classificate in tre macrocategorie [63]:

1. *Power/Energy metrics*
2. *Thermal metrics*
3. *Productivity metrics*

### 2.4.1 *Power/Energy metrics*

Questo insieme di metriche fornisce informazioni sull'efficienza di un DC in termini di consumo energetico globale, che è direttamente correlato al consumo dei suoi singoli sottosistemi. Infatti, il consumo energetico totale di un DC è legato alla domanda di energia associata a ciascuna unità. In generale, il consumo energetico in un DC è causato principalmente da tre fattori: l'*IT equipment* utilizzato, l'impianto di raffreddamento necessario per mantenere i componenti elettronici a temperatura adeguata e i sistemi di supporto, tra cui UPS, batterie, illuminazione e altri servizi ausiliari [63]. Tra le principali metriche in questa categoria vi sono:

1. *Power Usage Effectiveness* (PUE)
2. *Data Center infrastructure Efficiency* (DCiE)
3. *Cooling Load Factor* (CLF)
4. *Power Load Factor* (PLF)

### 2.4.2 *Thermal metrics*

Al primo capitolo si è parlato dei problemi derivanti le condizioni HAR, con rischio di *hot spot* e il CAB, per il quale parte dell'aria raffreddata viene miscelata con aria calda in uscita dai server. Gli *hot spot* nei DC possono essere compensati tramite l'impostazione delle unità CRAC per fornire aria a una temperatura di mandata inferiore, ma ciò comporta un maggiore consumo energetico e richiede una progettazione sovradimensionata del sistema di raffreddamento per far fronte alle richieste di sovraraffreddamento istantaneo. Tuttavia, i problemi di gestione dell'aria possono ridurre l'efficienza di raffreddamento e portare ad un aumento della temperatura locale, creando un circolo vizioso. Pertanto, è importante valutare l'efficienza del flusso d'aria di alimentazione e il campo termico all'interno del DC. Mentre le metriche di potenza/energia introdotte in precedenza potrebbero non essere in grado di rilevare anomalie termiche come gli *hot spot*, che sono fenomeni locali il cui impatto sul consumo energetico globale potrebbe essere trascurabile, le metriche termiche sono utilizzate per valutare le prestazioni del flusso d'aria e la gestione termica sia nella fase di progettazione che in quella operativa del DC. Inoltre, poiché i problemi di gestione termica possono verificarsi solo in alcuni rack del DC, gli indicatori energetici globali potrebbero non essere significativamente influenzati. Per monitorare ed ottimizzare la gestione termica di un DC, sono state sviluppate diverse metriche termiche, che possono essere calcolate attraverso dati sperimentali o numerici. Queste metriche vengono utilizzate sia nella fase di progettazione che in quella operativa del DC per valutare le prestazioni del flusso d'aria e la gestione termica, sia a livello locale che globale [63]. Le principali metriche di questa macrocategoria sono:

1. *Supply Heat Index* (SHI)
2. *Return Heat Index* (RHI)
3. *Return Temperature Index* (RTI)

### 2.4.3 *Productivity metrics*

Nelle sezioni precedenti sono state esaminate le metriche esistenti per valutare l'efficienza energetica nei DC, compresa la proposta di un quadro unificato per tali metriche. Tuttavia, l'attenzione per le metriche di efficienza energetica dei DC è limitata per quanto riguarda lo sviluppo di metriche che definiscono chiaramente il lavoro utile, ovvero metriche che misurano il calcolo effettivo eseguito da un DC, come ad esempio quelle relative al carico di lavoro; quindi, con il termine "lavoro utile", si intende il numero di attività eseguite da un DC. Di solito, il lavoro utile di un DC è rappresentato dall'attività di elaborazione, archiviazione e trasferimento di dati (servizi IT), mentre le altre attività sono solo ausiliarie. Recentemente, è emerso un crescente interesse per le metriche di produttività nel *Cloud computing*, poiché quest'ultimo supporta un gran numero di utenti provenienti da diverse organizzazioni e per questo è necessaria una caratterizzazione dei carichi di lavoro in termini di energia [63]. Al momento, nessuna delle metriche esistenti fornisce una misura pratica del lavoro utile in un DC, infatti, l'efficienza energetica viene valutata solo indirettamente. Sono stati fatti diversi tentativi per definire le metriche di produttività per il *Cloud computing*. La più significativa delle quali è la metrica *Data Center Energy Productivity* (DCEP) introdotta dal *Green Grid* nel 2009 [66], seguita da *Data Center Compute Efficiency* (DCCeE) nel 2010 [67] e la già citata *Data Center Storage Productivity - Capacity* (DCsP) [66].

# Capitolo 3

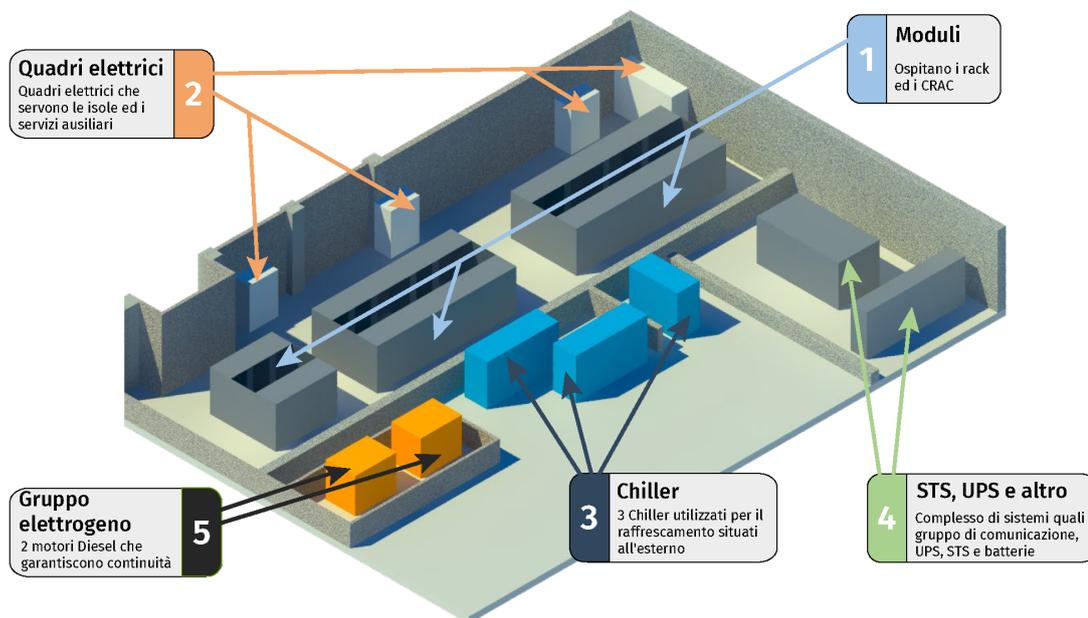
## Caso studio

Il caso studio oggetto di questa tesi è il DC presente all'interno del Politecnico di Torino. L'Ateneo sfrutta moltissimi servizi online per studenti e per il personale scolastico, quali per esempio le prenotazioni online degli esami, procedure burocratiche online ed altri servizi più complessi, di conseguenza la necessità di poter gestire il tutto attraverso un DC è fondamentale. In seguito alla pandemia da Covid-19 tali servizi si sono intensificati, portando i docenti ad erogare lezioni in remoto oltre che agli esami, gravando sul sistema di gestione di tali flussi di dati, richiedendo quindi un ampliamento oltre che all'installazione di nuovi sistemi di raffreddamento. Come discusso nei capitoli precedenti, una gestione efficiente di un DC può portare a risparmi significativi in termini di energia e costi. Pertanto, durante il rifacimento del DC, è importante prendere le precauzioni necessarie, esaminare attentamente il caso e valutare se ci sono settori in cui il funzionamento può essere migliorato. Per effettuare uno studio accurato del caso, è essenziale disporre di dati acquisiti tramite *datalogger*. Spesso, tuttavia, non è facile reperire questi dati e in alcuni casi la strumentazione è così vecchia da non essere dotata di *datalogger*. In questo capitolo verrà, quindi, descritto il DC presente al Politecnico di Torino nei suoi dettagli, quali:

1. Descrizione architettonica
2. Descrizione dei collegamenti elettrici
3. Descrizione dettagliata del sistema di raffreddamento
4. Acquisizione dei dati

Per ogni descrizione si accompagnerà il tutto con grafici o immagini esplicative, in modo da rendere il più chiaro possibile la situazione attuale all'interno del DC e le misure rilevate tramite *datalogger* e *meter*.

### 3.1 Descrizione architettonica



**Figura 3.1:** Spaccato 3D del DC presente al Politecnico di Torino

In Figura 3.1 vi è rappresentato uno spaccato in 3D del DC oggetto di studio. Il DC è composto da due parti interne, dove nella prima sono presenti i moduli ed i quadri elettrici, nella seconda gli UPS, STS, batterie e gruppo di comunicazione, mentre nella parte esterna si hanno i *chiller*, utilizzati per il raffreddamento. In Figura 3.2 è rappresentata una pianta del DC con una legenda sulle terminologie utilizzate. I moduli sono tre ed ospitano i rack contenenti server e PDU, oltre che i CRAC e sono prodotti dall'azienda *Technosteel* [68], la quale rilascia i *BladeShelter* [69], ovvero dei moduli contenenti più armadi rack accostati tra di loro con interposte delle unità CRAC chiamate *BladeCooling* [69]. Si può notare che non sono tutti uguali in lunghezza, infatti, essi sono stati assemblati man mano che le esigenze del Politecnico di Torino crescevano, inoltre sono indicati i rack presenti con annessi i CRAC, abbreviati rispettivamente con "R" e "C" seguiti da una numerazione unica per modulo. I CRAC di tali moduli vengono alimentati dai tre *chiller* posti esternamente. Il Chiller 3 è il risultato di un'installazione avvenuta in tempi recenti, per soddisfare il crescente fabbisogno di raffreddamento del DC. I quadri di alimentazione sono in totale quattro: i quadri Q1, Q2 e Q3 servono i rispettivi moduli numerati, mentre il quadro chiamato "QS" è il quadro che comprende tutti quei servizi ausiliari, come l'illuminazione ma anche la climatizzazione dell'aria esterna ai moduli, eseguita con tre sistemi di climatizzazione dell'aria, abbreviati

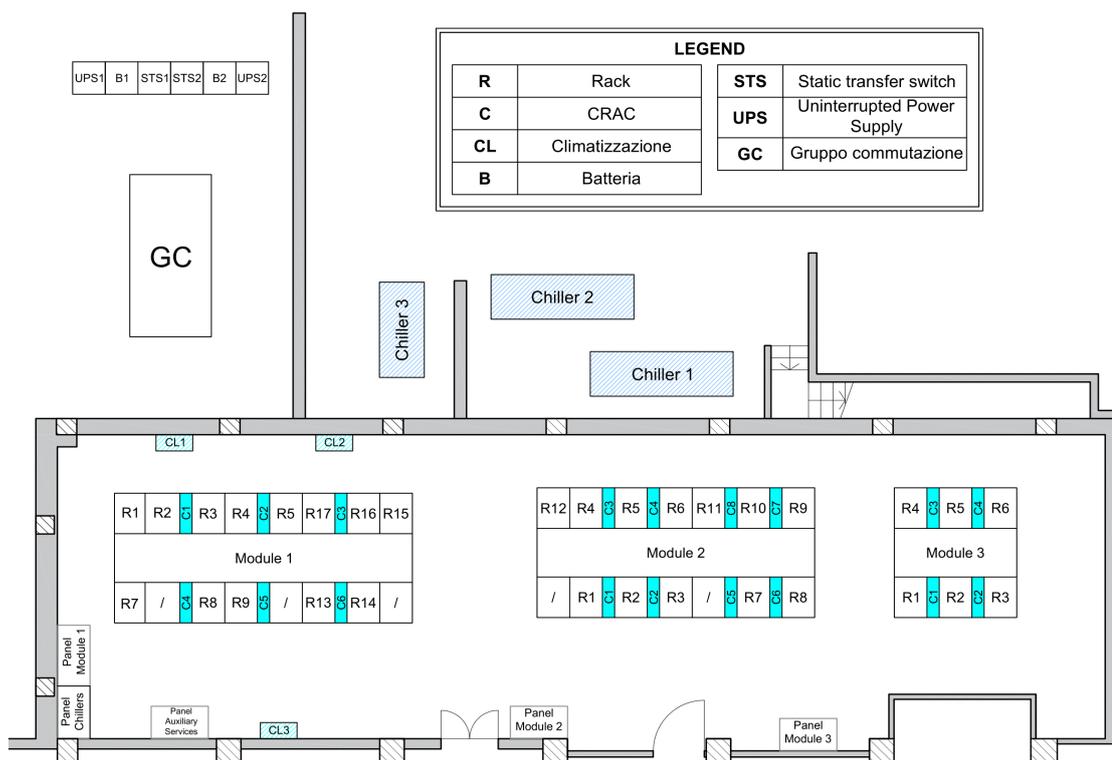


Figura 3.2: Pianta del DC presente al Politecnico di Torino

con la sigla "CL", mediante classici sistemi ad espansione diretta, composti da un'unità esterna in pompa di calore ed un'unità interna. Sono anche presenti due gruppi elettrogeni, composti da due motori Diesel con un tempo di attivazione di circa 15 minuti, abbreviati con la sigla "GE" in Figura 3.2. In una stanza separata sono presenti il gruppo di commutazione assieme agli STS, UPS e batterie connessi al modulo 1. Per quanto riguarda invece gli UPS dei moduli 2 e 3 non sono rappresentati nella pianta in Figura 3.2 in quanto allocati in altre stanze non presenti al piano in cui alloggia il DC. Tale DC è posto al piano interrato del Politecnico di Torino, scelta strategica in quanto l'ambiente ospitante i moduli non subisce sbalzi termici ingenti tra estate ed inverno, data anche l'assenza di componenti finestrati.

## 3.2 Descrizione dei collegamenti elettrici

I collegamenti elettrici del DC presente al Politecnico di Torino sono assimilabili ad un classico DC (Figura 3.3): il tutto, infatti, parte dalla fornitura di energia elettrica in media tensione (MT), per poi passare da una prima cabina, attraversare due trasformatori in parallelo, per poi riunirsi in un'unica cabina; da quest'ultima si diramano tre vie lungo tre quadri. Il primo dei quadri è denominato *Switching group 1*, a monte del quale è allacciato il dispositivo di commutazione che si occupa, per l'appunto, della commutazione tra gruppo elettrogeno e cabina. Da questo quadro, quindi, vi sono allacciati tutti gli altri quadri dei gruppi frigoriferi (*Chillers panel*), del quadro dei servizi QS (*Auxiliary Services*), sottoquadri A e B (*Subpanel A* e *Subpanel B*) del modulo 1; questi ultimi due formano, insieme, il quadro Q1 (Figura 3.2) che alimenta il modulo 1. Il secondo quadro è chiamato *Switching group 2*, al quale, come per il *Switching group 1*, è allacciato il dispositivo di commutazione e che si dirama in due vie, andando ad alimentare il "Quadro elettrico privilegiata" (*Privileged electrical panel*) ed il "Quadro elettrico continuità" (*Continuity electrical panel*) del modulo 2. A quest'ultimo, è collegato a monte un UPS che provvede a fornire continuità alle sole PDU in caso di guasto. I due quadri *Privileged electrical panel* e *Continuity electrical panel* formano, assieme, il quadro Q2 che alimenta il modulo 2 (Figura 3.2). Stesso principio per quanto concerne il quadro *Sorting board*, il quale è un semplice quadro senza dispositivo di commutazione, che si dirama in due vie su due quadri: uno denominato "normale" (*Normal electrical panel*) ed uno di "continuità" (*Continuity electrical panel*). Sempre a quest'ultimo è collegato a monte un dispositivo UPS il quale provvede da solo al sostentamento del carico del modulo 3 fin tanto che le batterie sono cariche. I due quadri *Normal electrical panel* e *Continuity electrical panel* formano assieme il quadro Q3 che alimenta il modulo 3. I gruppi elettrogeni sono formati da motori Diesel e servono solamente i moduli 1 e 2, tuttavia nessuno serve il terzo quadro *Sorting board* relativo al modulo 3 in caso di guasto, ed è per tale motivo che l'unica autonomia è data dall'UPS. Come visto, quindi, solo il modulo 1 è provvisto dell'accoppiata STS-UPS, al contrario degli altri due moduli 2 e 3, garantendo quindi continuità nel caso di black-out, in attesa dell'accensione del rispettivo gruppo elettrogeno, tipicamente nell'ordine della decina di secondi stando alle informazioni ricevute da parte del personale del Politecnico di Torino. Gli UPS-A ed UPS-B sono a loro volta collegati a dalle batterie di riserva. I *Subpanel A* e *Subpanel B* del modulo 1, sopperiscono, come detto, al carico di quest'ultimo, comprendendo le PDU all'interno dei rack ma anche il sistema di ventilazione presente nei CRAC; quest'ultimo, tuttavia, è collegato al solo *Subpanel B*. Il *Privileged electrical panel* e il *Continuity electrical panel* derivanti dallo *Switching group 2* servono in parallelo il modulo 2. Per ognuno di essi, infatti, vi sono dei collegamenti sia ai ventilatori all'interno dei *BladeCooling* che alle PDU. In genere il carico del modulo 2 viene ripartito a circa metà per

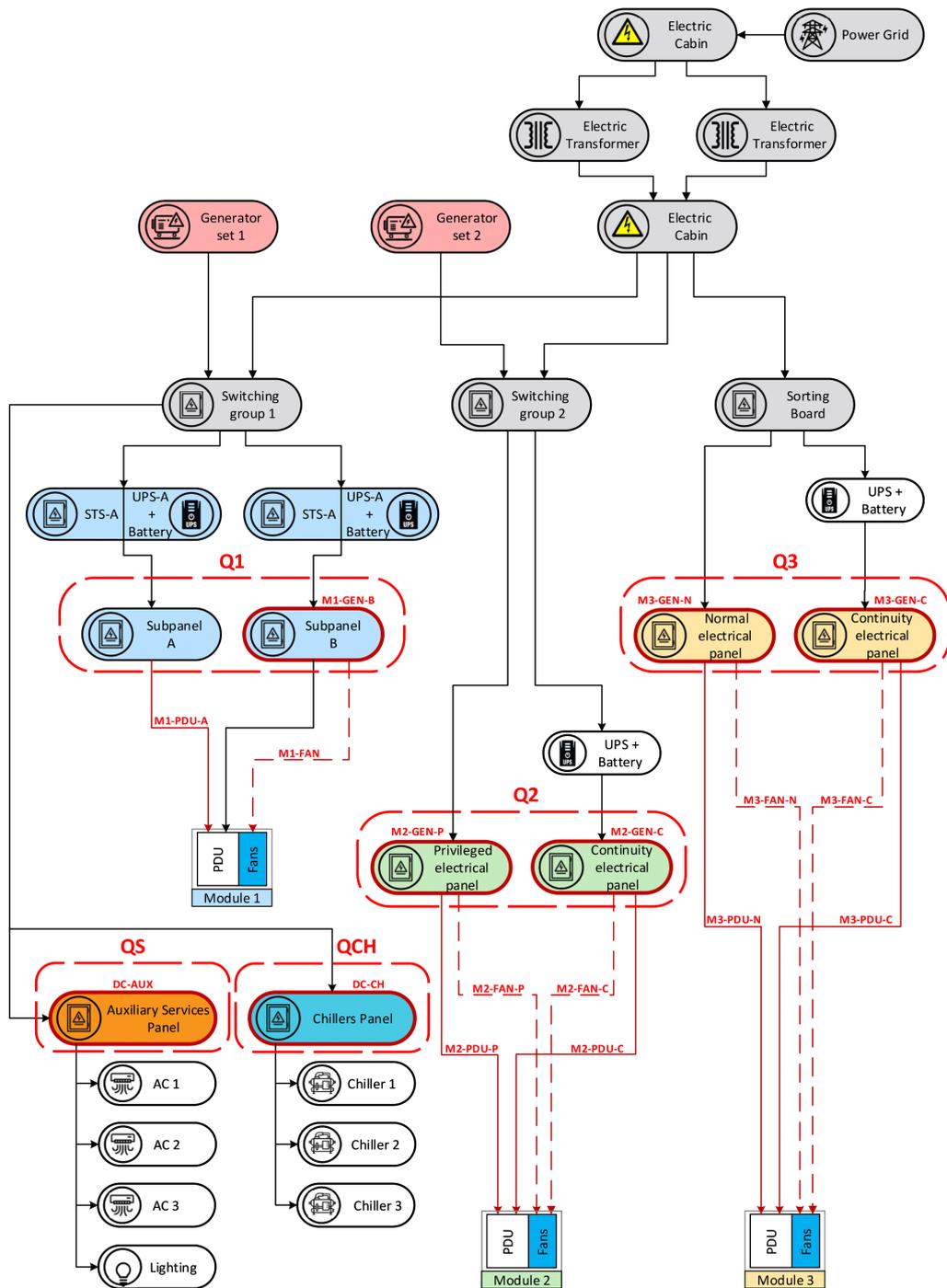
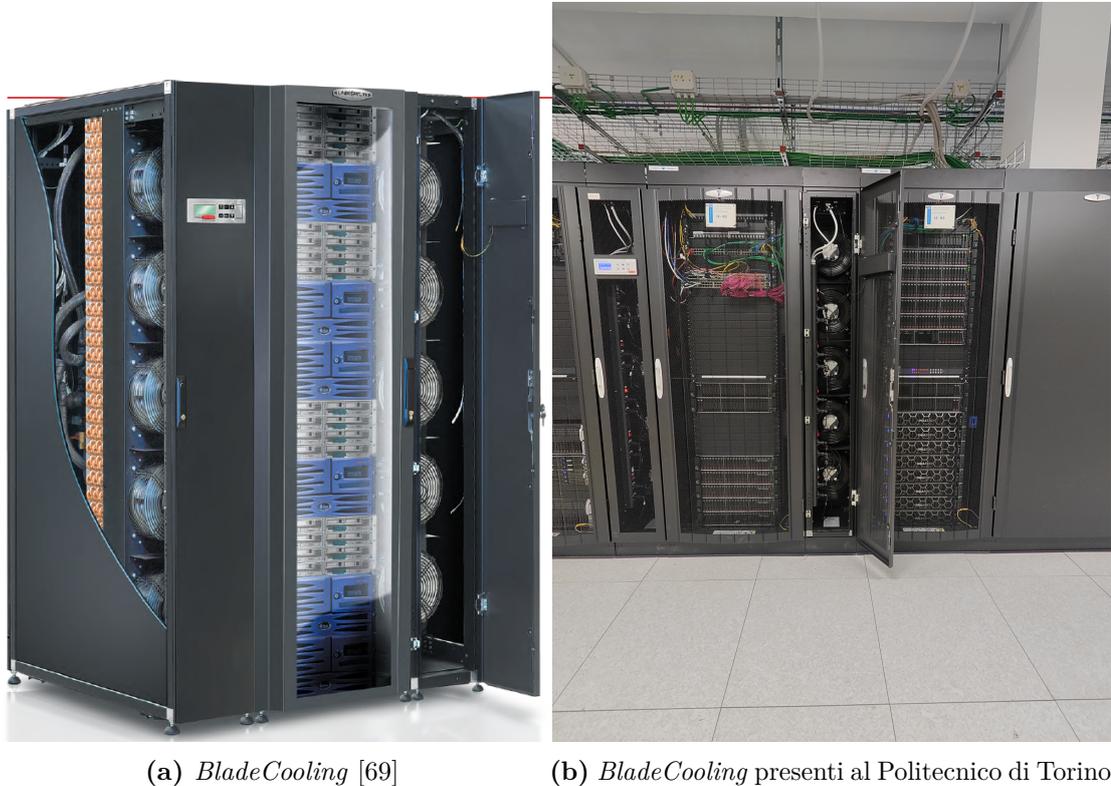


Figura 3.3: Power flow del DC presente al Politecnico di Torino

ogni quadro, in modo da limitare le perdite, tuttavia in caso di black-out il quadro *Continuity electrical panel* riesce da solo a sopperire l'intero carico grazie al sistema UPS a monte. Stesso principio è applicabile al modulo 3, con il *Normal electrical panel* e il *Continuity electrical panel* che servono in parallelo il modulo 3 ripartendo il carico, sia dei ventilatori, sia delle PDU. In caso di guasto, il *Continuity electrical panel* riesce da solo a fornire il fabbisogno del modulo 3, grazie all'UPS a monte. La suddivisione in due quadri, consente, quindi, di avere la possibilità di installare due PDU all'interno dei rack, permettendo, quindi, l'allacciamento dei server a due sistemi di alimentazione. In questo modo, anche se la PDU alimentata dal quadro elettrico non in serie all'UPS non dovesse fornire energia in seguito ad un black-out, i server hanno l'opportunità di rimanere accesi grazie alla seconda PDU collegata, invece, agli UPS dei quadri di continuità.

### 3.3 Descrizione dettagliata del sistema di raffreddamento

(a) *BladeCooling* [69](b) *BladeCooling* presenti al Politecnico di Torino

**Figura 3.4:** Sistema di raffreddamento *BladeCooling* presente al Politecnico di Torino

Come citato precedentemente, il DC è composto da tre moduli forniti dall'azienda *Tecnosteel* [68] (Figura 3.5). I moduli in questione sono di tipo *BladeShelter* [69] visibili in Figura 3.4.a, i quali sono composti dall'alternanza di rack e CRAC (Figura 3.4). Quest'accoppiamento forma il cosiddetto *inter-row cooling*, trattato in precedenza. In Figura 3.6 si possono notare nel dettaglio i flussi in vista tridimensionale che attraversano l'intero modulo, caratterizzandolo. Al contrario della rappresentazione fornita in Figura 1.19e, non vi è alcun contenimento dell'isola fredda, ma soltanto dell'isola calda. L'aria fredda in uscita dai CRAC viene emessa in ambiente ad una velocità tale da favorire il ripescaggio da parte delle ventole dei server, cercando di minimizzare il più possibile il mix con l'aria ambiente, più calda. L'aria viene quindi prelevata grazie all'aspirazione fornita dalle ventole presenti nei server, dalla parte opposta all'isola calda, ed è il risultato di un mix, anche se limitato, dell'aria in uscita dal CRAC assieme all'aria ambiente, per attraversare il



(a) Modulo 1 (M1)

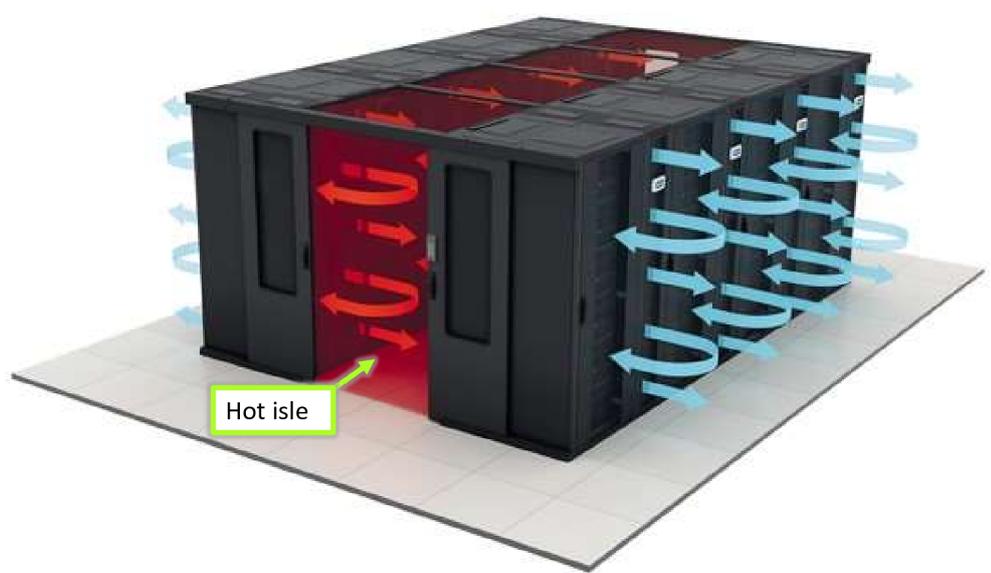
(b) Modulo 2 (M2)



(c) Modulo 3 (M3)

**Figura 3.5:** Moduli presenti al Politecnico di Torino

rack, raffreddandone le componenti. Una volta uscita dal rack l'aria viene raccolta all'interno dell'isola calda (*hot isle*), per poi essere aspirata dai CRAC e quindi raffreddata. L'isola calda viene delimitata grazie a delle porte scorrevoli in plexiglass, le quali consentono il contenimento dell'aria calda, evitando il più possibile fenomeni come l'HAR, di fatto impedendo all'aria calda di uscire per poi rientrare dai rack. I CRAC sono dei sistemi chiamati *BladeCooling* [69], i quali montano al loro interno delle ventole in aspirazione poste verso l'ambiente. Essi prelevano l'aria dall'isola calda, la quale, durante l'attraversamento del CRAC, si raffredda mediante delle batterie di scambio termico alte quanto il rack (Figura 3.4.b). In tali CRAC sono presenti anche quattro termocoppie per una misura puntuale della temperatura dell'aria in ingresso al rack ed in uscita. Le termocoppie sono due in ingresso e due in uscita poste ad  $1/4$  e  $3/4$  di altezza del rack, permettendo quindi di tenere anche in considerazione l'eventuale stratigrafia dell'aria, specie in fase di aspirazione, ovvero



**Figura 3.6:** Particolare 3D del funzionamento dell'*inter-row cooling* (Immagine adattata da [70])

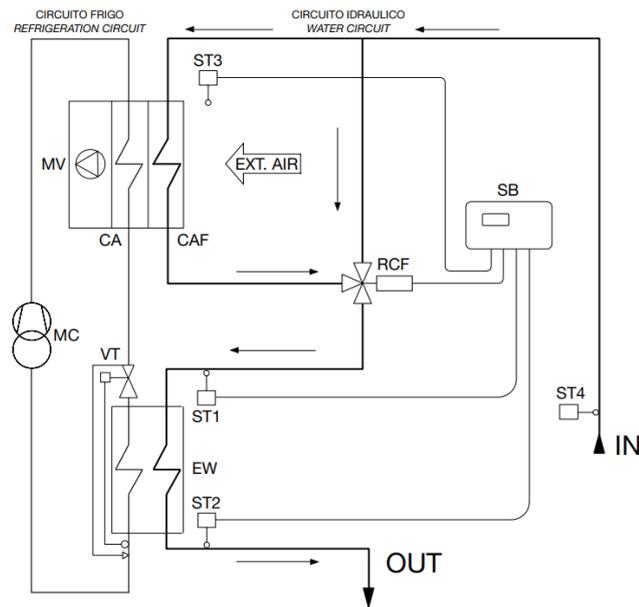


(a) Chiller 1 (sinistra) e 2 (destra)



(b) Chiller 3

**Figura 3.7:** Chiller presenti al Politecnico di Torino

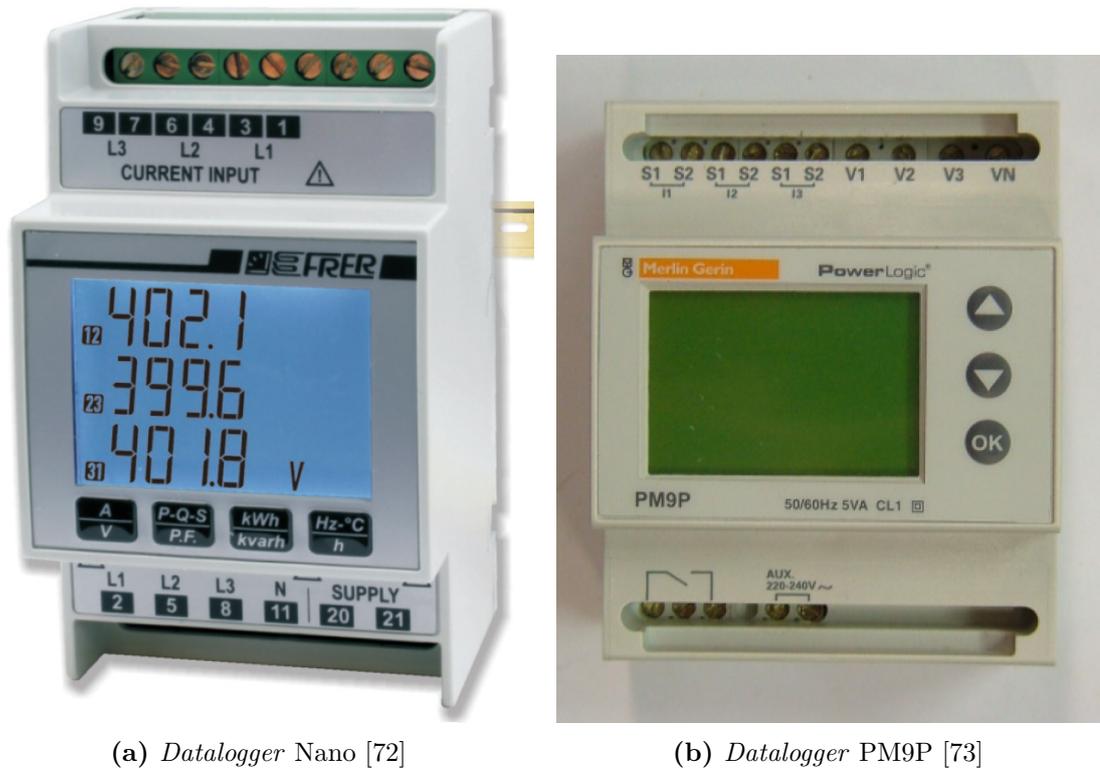


**Figura 3.8:** Schema di funzionamento del *free cooling* [71]

all'interno dell'isola calda. Le alette di ripresa sono state studiate appositamente per favorire l'ingresso dell'aria in maniera ordinata e stratificata all'interno della batteria di scambio termico. L'azienda *Tecnosteel* consente, inoltre, di poter monitorare puntualmente tali CRAC: si possono rilevare infatti grandezze come il numero di giri dei ventilatori, oltre che alle temperature date dalle termocoppie, ma anche le temperature dell'acqua refrigerata che attraversa la batteria di scambio termico. Questa opzione, tuttavia, non è applicabile al caso in esame in quanto non si riesce ad accedere a tali dati. I ventilatori del CRAC sono azionati, come detto in precedenza, grazie all'energia fornita dai rispettivi quadri di alimentazione. Le batterie di scambio termico sono collegate ai *chiller* posti esteriormente (figura 3.7), i quali sono di due marche: *Stulz* per quanto concerne i *chiller* più datati (Chiller 1 e Chiller 2) (figura 3.7.a) ed *Hiref* per il terzo (Chiller 3) (figura 3.7.b). Tali *chiller* sono tutti di tipo *scroll*, in cui il compressore a spirale è un tipo di compressore dinamico in cui un'orbita fissa si muove in modo orbitale intorno a un'altra orbita fissa. Questo movimento crea una serie di camere d'aria a varie dimensioni, che comprimono il refrigerante per produrre il freddo. Vengono utilizzati per lo più in sistemi di media necessità di refrigerazione. Questa tipologia di *chiller* è raffreddata ad aria, inglobando delle torri di raffreddamento, poste superiormente. Entrambi i marchi impiegano un fluido refrigerante R410A e sfruttano il *free cooling* indiretto: essi infatti sfruttano la possibilità di avere temperature esterne basse, sotto i 0°C in condizioni nominali, per convogliare l'aria fredda sullo scambiatore di calore, dentro

il quale scorre la miscela di acqua glicolata che serve i CRAC, secondo lo schema riportato in Figura 3.8. Infine, tale tipologia di modulo consente di effettuare un *cable management* adeguato, evitando quindi la possibile formazione di punti caldi (*hot spot*) dovuti al loro mal posizionamento: l'azienda, infatti, fornisce molti accessori affinché si possa effettuare un *cable management* adeguato e puntuale [69]. Il *cable management* viene eseguito a livello generale, ma anche di singolo rack, facendo correre i fili elettrici in canaline poste alle estremità superiori del modulo, lasciando libero lo spazio all'interno dell'isola calda, evitando, come citato precedentemente, gli *hot spot* puntuali. Tali cavi sono collegati ad una serie di cavi calati dal soffitto, sempre grazie a delle canaline in metallo per reggerne il peso, liberando spazio all'interno del DC, oltre che ad evitare che l'aria in uscita dai CRAC incontri ostacoli puntuali, non consentendo la normale circolazione all'interno dei rack.

### 3.4 Acquisizione dei dati

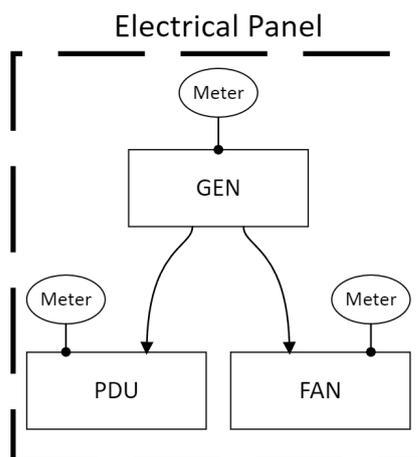


(a) Datalogger Nano [72]

(b) Datalogger PM9P [73]

**Figura 3.9:** Datalogger presenti al Politecnico di Torino

Nei capitoli precedenti si è discusso dell'acquisizione di dati, i quali vengono forniti attraverso l'uso di *datalogger* (Figura 3.9). Un *datalogger* è un dispositivo elettronico che viene utilizzato per registrare e memorizzare dati provenienti da sensori o altre fonti di informazioni. Questi dati possono essere poi analizzati per monitorare l'andamento di un processo o per raccogliere informazioni su un determinato sistema. La loro capacità di memorizzare grandi quantità di dati per periodi di tempo prolungati li rende uno strumento molto utile per la raccolta di informazioni su sistemi complessi. Un *datalogger* può essere equipaggiato con molti tipi di sensori, digitali o analogici, e può essere configurato per misurare diverse grandezze fisiche, come la temperatura, l'umidità, la potenza ed altro ancora. Tali sensori, vengono chiamati *meter* e consentono la misura di una ben specifica grandezza fisica. Nel caso del Politecnico di Torino, un *meter* potrebbe fare riferimento a un sensore che misura la potenza in ingresso ad una determinata macchina, come potrebbe essere un *chiller*. Questi dispositivi sono fondamentali per qualsiasi tipo di analisi da effettuare all'interno del DC in quanto consentono

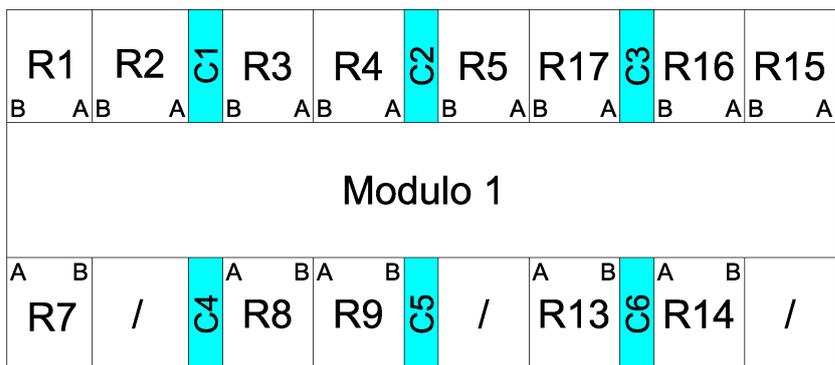


**Figura 3.10:** Collegamenti elettrici e relativi *meter* installati all'interno dei quadri *Privileged electrical Panel* e *Continuity electrical Panel* per il modulo 2, *Normal electrical Panel* e *Continuity electrical Panel* per il modulo 3

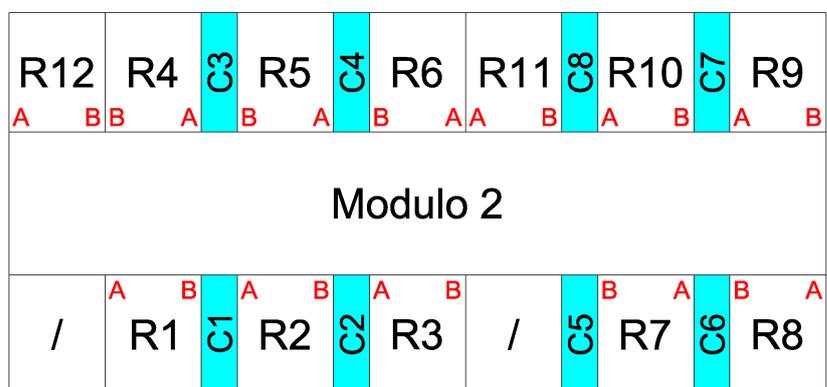
Misure aggregate	Formula di aggregazione
M1-GEN	$M1-PDU-A + M1-GEN-B$
M1-ITEq	$M1-PDU-A + M1-GEN-B - M1-FAN$
M2-GEN	$M2-GEN-P + M2-GEN-C$
M2-ITEq	$M2-PDU-P + M2-PDU-C$
M2-FAN	$M2-FAN-P + M2-FAN-C$
M3-GEN	$M3-GEN-N + M3-GEN-C$
M3-ITEq	$M3-PDU-N + M3-PDU-C$
M3-FAN	$M3-FAN-N + M3-FAN-C$
DC-ITEq	$M1-ITEq + M2-ITEq + M3-ITEq$
DC-FAN	$M1-FAN + M2-FAN + M3-FAN$

**Tabella 3.1:** Dati attualmente rilevati e ricavati dai quadri

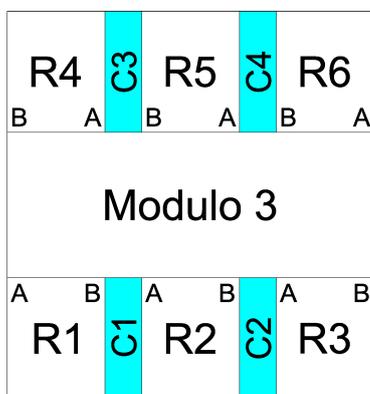
di monitorare i dati di potenza e temperatura.



(a) M1-PDU



(b) M2-PDU



(c) M3-PDU

**Figura 3.11:** Disposizione delle PDU all'interno dei moduli M1, M2 ed M3

### 3.4.1 Dati attualmente rilevati

Grazie alla collaborazione da parte del personale del Politecnico di Torino, è stato possibile organizzare i dati attualmente rilevati dai *datalogger* attraverso i *meter*, di seguito elencati ed identificati da una sigla (vedasi Figura 3.3):

- **DC-AUX**: potenza di tutti i servizi ausiliari (prese di corrente, luci e sistemi di climatizzazione)
- **DC-CH**: potenza complessiva di tutti e tre i *chiller*
- **M1-PDU-A**: potenza erogata da *Subpanel A* per il modulo 1, attribuita ad un certo numero di PDU
- **M1-GEN-B**: potenza erogata da *Subpanel B* per il modulo 1, attribuita alle restanti PDU ed ai ventilatori operanti all'interno dei CRAC del modulo 1 (vedasi Figura 3.3)
- **M1-FAN**: potenza erogata da *Subpanel B* per il modulo 1 attribuita ai soli ventilatori all'interno dei CRAC
- **M2-GEN-P**: potenza erogata da *Privileged electrical panel* del modulo 2, comprensiva della potenza erogata sia alle PDU che ai ventilatori all'interno dei CRAC
- **M2-PDU-P**: potenza erogata da *Privileged electrical panel* del modulo 2, attribuita ad un certo numero di PDU
- **M2-FAN-P**: potenza erogata da *Privileged electrical panel* del modulo 2, attribuita ai ventilatori all'interno dei CRAC
- **M2-GEN-C**: potenza erogata da *Continuity electrical panel* del modulo 2, comprensiva della potenza erogata sia alle PDU che ai ventilatori all'interno dei CRAC
- **M2-PDU-C**: potenza erogata da *Continuity electrical panel* del modulo 2, attribuita alle restanti PDU
- **M2-FAN-C**: potenza erogata da *Continuity electrical panel* del modulo 2, attribuita ai ventilatori all'interno dei CRAC. In regime di normale funzionamento, questo dato è pari a 0 W, infatti subentra soltanto quando si ha un black-out ed è il quadro *Continuity electrical panel* a farsi carico dell'intero sostentamento del modulo 2 grazie all'UPS collegato a monte
- **M3-GEN-N**: potenza erogata da *Normal electrical panel* del modulo 3, comprensiva della potenza erogata sia alle PDU che ai ventilatori all'interno dei CRAC

- **M3-PDU-N**: potenza erogata da *Normal electrical panel* del modulo 3, attribuita ad un certo numero di PDU
- **M3-FAN-N**: potenza erogata da *Normal electrical panel* del modulo 3, attribuita ad un certo numero di ventilatori all'interno dei CRAC
- **M3-GEN-C**: potenza erogata da *Continuity electrical panel* del modulo 3, comprensiva della potenza erogata sia alle PDU che ai ventilatori all'interno dei CRAC
- **M3-PDU-C**: potenza erogata da *Continuity electrical panel* del modulo 3, attribuita alle restanti PDU
- **M3-FAN-C**: potenza erogata da *Continuity electrical panel* del modulo 3, attribuita ai restanti ventilatori.

In Figura 3.3 sono segnati con una scritta rossa i *meter* con le sigle appena definite, oltre ad evidenziare il collegamento elettrico ai quali essi fanno riferimento. È importante precisare la relazione tra le misure dei quadri generali, identificati con la sigla GEN, e le letture alle PDU e ventilatori (FAN) per i moduli 2 e 3. All'interno dei quadri *Privileged electrical panel* e *Continuity electrical panel* del modulo 2 e *Normal electrical panel* e *Continuity electrical panel* del modulo 3, sono installati tre *meter*: due di questi sono adibiti al rilevamento dei consumi alle PDU ed ai ventilatori che servono i CRAC, il terzo, invece, viene montato a monte, in una sezione più generica prima della divisione nei due circuiti (Figura 3.10). Tale *meter* serve ad avere una misura complessiva che comprenda le altre due, più eventuali perdite dovute alla trasmissione. Tuttavia, in seguito a degli accertamenti, si è potuto notare come tale *meter* non sia tarato nella maniera più corretta, portando ad un rilevamento a livello generale più basso rispetto alla sommatoria tra i due rilevamenti a valle di PDU e ventilatori, con un errore di circa 0.3% nel peggiore dei casi. Si ipotizza dunque un piccolo problema di taratura e, dunque, tale rilevamento verrà scartato al fine delle analisi sui consumi, per non creare incoerenze, seppur minime, all'interno della trattazione. Tuttavia, oltre a tali misure più generali, ve ne sono anche di più specifiche. Ogni rack di ogni modulo è servito da due PDU, chiamate A e B (Figura 3.11); le uniche misure specifiche rilevabili, tuttavia, sono le potenze puntuali delle PDU A e B che servono i rack del modulo 2, segnate in rosso in Figura 3.11.b. Le misurazioni, tuttavia, non corrispondono a quelle rilevate dai due *meter* nei quadri *Privileged electrical panel* e *Continuity Electrical Panel* riferiti alle PDU a monte. In seguito ad un'analisi con il personale che si occupa della gestione dei sensori, si è ipotizzato, anche in questo caso, che i sensori a valle abbiano un problema di taratura, di conseguenza tali misurazioni verranno escluse nella trattazione, al fine di non avere incongruenze nei dati analizzati. Per ogni rack del modulo 2, inoltre è presente un sensore di temperatura, il quale fornisce

delle informazioni circa la temperatura all'interno dell'isola calda. I sensori, infatti, sono posizionati nella parte alta dei rack, ad un'altezza di circa 2 m dal piano di calpestio, verso l'isola calda, fornendo dunque delle misure puntuali sull'aria calda in uscita dai rack, riscaldata dagli *IT equipment*.

### 3.4.2 Aggregazione

Per poter rendere più comprensibili le misurazioni derivate dai *meter*, si è proceduto ad accorparle in base al sistema di appartenenza ed alla tipologia di misurazione effettuata, secondo la Tabella 3.1. Si è inoltre proceduto a ricavare le misure che non vengono direttamente rilevate come l'intero consumo dovuto alle PDU e ai ventilatori all'interno del DC. Un'altra importante considerazione è che le potenze erogate dalle PDU nei moduli 1, 2 e 3, rappresentano il carico dell'*IT equipment* all'interno del DC del Politecnico di Torino. Per cui si è definita una nuova sigla, denominata "ITEq", stante a rappresentare tale associazione. Verranno inoltre calcolate le aggregazioni anche per le rilevazioni dei quadri generali (GEN) dei moduli 2 e 3, anche se non verranno utilizzate nelle formulazioni future. Di seguito, vengono dunque descritte le nuove variabili calcolate dalle rilevazioni descritte precedentemente:

- **M1-GEN**: potenza totale generale attribuita al modulo 1, calcolata come sommatoria tra il consumo dei ventilatori all'interno dei CRAC e le potenze erogate alle PDU dei *Subpanel A* e *Subpanel B*
- **M1-ITEq**: potenza totale attribuita alle PDU del modulo 1, le quali a loro volta le forniscono agli *IT equipment*, calcolata come sommatoria tra le potenze erogate alle PDU dei *Subpanel A* e *Subpanel B*
- **M2-GEN**: potenza totale generale attribuita al modulo 2, calcolata come sommatoria tra la potenza totale erogata da *Privileged electrical panel* e *Continuity electrical panel*
- **M2-ITEq**: potenza totale attribuita alle PDU del modulo 2, le quali a loro volta le forniscono agli *IT equipment*, calcolata come sommatoria tra le potenze erogate alle PDU da *Privileged electrical panel* e *Continuity electrical panel*
- **M2-FAN**: potenza totale attribuita ai ventilatori all'interno dei CRAC del modulo 2, calcolata come sommatoria tra la potenza erogata ai ventilatori da *Privileged electrical panel* e *Continuity electrical panel*
- **M3-GEN**: potenza totale generale attribuita al modulo 3, calcolata come sommatoria tra la potenza totale erogata da *Normal electrical panel* e *Continuity electrical panel*

- **M3-ITEq**: potenza totale attribuita alle PDU del modulo 3, le quali a loro volta le forniscono agli *IT equipment*, calcolata come sommatoria tra le potenze erogate alle PDU da *Normal electrical panel* e *Continuity electrical panel*
- **M3-FAN**: potenza totale attribuita ai ventilatori all'interno dei CRAC del modulo 3, calcolata come sommatoria tra la potenza erogata ai ventilatori da *Normal electrical panel* e *Continuity electrical panel*
- **DC-ITEq**: potenza totale attribuita agli *IT equipment* riferita all'intero DC, calcolata come sommatoria tra le potenze attribuite alle PDU dei 3 moduli presenti
- **DC-FAN**: potenza totale attribuita ai ventilatori che servono i CRAC riferita all'intero DC, calcolata come sommatoria tra le potenze attribuite ai ventilatori dei 3 moduli presenti

Un'ulteriore grandezza calcolabile è il consumo totale derivante dal DC: esso sarà l'aggregazione dei consumi totali riferiti ai tre moduli, dei *chiller* (DC-CH) e dei servizi ausiliari (DC-AUX). Vi è però un parametro non trascurabile, ovvero le perdite derivanti dagli UPS, oltre che dalle batterie e, nel caso del modulo 1, anche degli STS. Esse, infatti, incidono in maniera non irrilevante poiché le potenze in gioco sono dell'ordine delle centinaia di kW. Si sono dunque riuscite a reperire le schede tecniche degli UPS del modulo 1 [74], modulo 2 e modulo 3 [75] (uguali per questi due moduli) e si è trovata un'efficienza pari al 99% per tutti e tre gli UPS. Anche per gli STS del modulo 1 si sono reperite le schede tecniche di interesse, trovando un'efficienza pari a quella degli UPS, del 99% [76]. Per quanto concerne invece le batterie, l'unico rendimento trovato è sempre del 99% riguardo alle batterie che servono il modulo 1 [77], tuttavia, si ipotizza che lo stesso valore di efficienza si applichi anche alle batterie dei moduli 2 e 3. Si sono dunque definite 3 ulteriori grandezze, rappresentanti le perdite dovute alla presenza degli UPS, batterie e, nel caso del modulo 1, STS:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{M1-LOSSES} &= \\
 M1-GEN \cdot (1 - \eta_{UPS-M1} \cdot \eta_{Battery-M1} \cdot \eta_{STS-M1}) &= \\
 M1-GEN \cdot (1 - 0.97) &
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

$$\begin{aligned}
 \mathbf{M2-LOSSES} &= \\
 (M2-PDU-C + M2-FAN-C) \cdot (1 - \eta_{UPS-M2} \cdot \eta_{Battery-M2}) &= \\
 (M2-PDU-C + M2-FAN-C) \cdot (1 - 0.98) &
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{M3-LOSSES} = & \\ & (M3-PDU-C + M3-FAN-C) \cdot (1 - \eta_{UPS-M3} \cdot \eta_{Battery-M3}) = \\ & (M3-PDU-C + M3-FAN-C) \cdot (1 - 0.98) \end{aligned} \quad (3.3)$$

Da cui si sono dunque ricavate le tre grandezze di seguito, rappresentanti i consumi totali all'interno dei moduli, comprensivi delle perdite:

$$\mathbf{M1-TOT} = M1-GEN + M1-LOSSES \quad (3.4)$$

$$\mathbf{M2-TOT} = M2-ITEq + M2-FAN + M2-LOSSES \quad (3.5)$$

$$\mathbf{M3-TOT} = M3-ITEq + M3-FAN + M3-LOSSES \quad (3.6)$$

Il calcolo effettuato tiene in considerazione solo i rilevamenti a livello di PDU e di ventilatori per quanto concerne i moduli 2 e 3, al fine di non creare incoerenze, come citato precedentemente. Svolgendo dunque gli opportuni calcoli, si ottiene il consumo dell'intero DC, comprensivo di perdite:

$$\mathbf{DC-TOT} = M1-TOT + M2-TOT + M3-TOT + DC-AUX + DC-CH \quad (3.7)$$

Infine, si possono ricavare anche le perdite complessive del DC, calcolate come sommatoria tra quelle dei moduli:

$$\mathbf{DC-LOSSES} = M1-LOSSES + M2-LOSSES + M3-LOSSES \quad (3.8)$$

### 3.4.3 Gestione dei dati

Per poter adoperare al meglio tali dati sotto forma di serie temporali, si è ricorso ad una loro gestione grazie ad *InfluxDB* [78]. Esso è un database open source progettato per gestire grandi quantità di dati di tipo time series, il che significa che i dati vengono archiviati in base al momento in cui sono stati raccolti. Ciò lo rende particolarmente adatto per il monitoraggio dei dati che variano nel tempo, come ad esempio le metriche delle prestazioni di un sistema o i dati di sensoristica, come nell'applicazione oggetto di questa tesi. *InfluxDB* è spesso utilizzato insieme ad altre tecnologie come *Grafana* [79] per visualizzare i dati in modo intuitivo attraverso *dashboard* e diagrammi. È anche possibile utilizzare *InfluxDB* con altri strumenti di analisi dei dati, come ad esempio *Python* o *R*, per eseguire *query* ed analizzare i dati in modo più approfondito.

## Capitolo 4

# Analisi dei dati e sviluppo EIS

Nel contesto attuale, il monitoraggio dei consumi energetici nei DC rappresenta un aspetto cruciale per garantire l'efficienza energetica e ridurre i costi. Come evidenziato nei capitoli precedenti, la raccolta e l'analisi dei dati sui consumi energetici consentono di individuare criticità e potenzialità delle infrastrutture e degli apparati, al fine di ottimizzare le prestazioni del DC. In questo capitolo, si analizzeranno i risultati delle misurazioni effettuate sul DC, focalizzandosi sull'identificazione di eventuali relazioni tra le grandezze rilevate. In particolare, saranno calcolate alcune metriche utili per avere una visione d'insieme del consumo energetico, come già illustrato nei capitoli precedenti. Inoltre, sarà dedicata una sezione alla descrizione dei problemi rilevati durante i sopralluoghi e delle *best practices* per correggerli, al fine di garantire un'efficienza energetica sempre maggiore. Infine, verrà presentata una *dashboard* sviluppata appositamente per gestire e visualizzare i dati raccolti, al fine di monitorare costantemente le prestazioni del DC e garantire una gestione efficiente dei consumi energetici. Per poter rappresentare al meglio i consumi energetici e le potenze oltre ad altre variabili, si proporranno vari grafici che mostrano il consumo all'interno del DC. Tra questi grafici vi sono:

- *Time series*: sono una collezione di dati raccolti in intervalli regolari di tempo. Vengono utilizzate per analizzare e descrivere il comportamento di una o più variabili nel tempo. La rappresentazione grafica delle *time series* può essere utilizzata per identificare tendenze, stagionalità e pattern ricorrenti e per effettuare previsioni future.
- *Carpet plot*: è un tipo di grafico utilizzato per visualizzare *time series* multidimensionali. Esso è composto da una griglia di piccole immagini che rappresentano l'andamento della variabile in ogni istante di tempo, permettendo di

individuare rapidamente eventuali pattern e trend

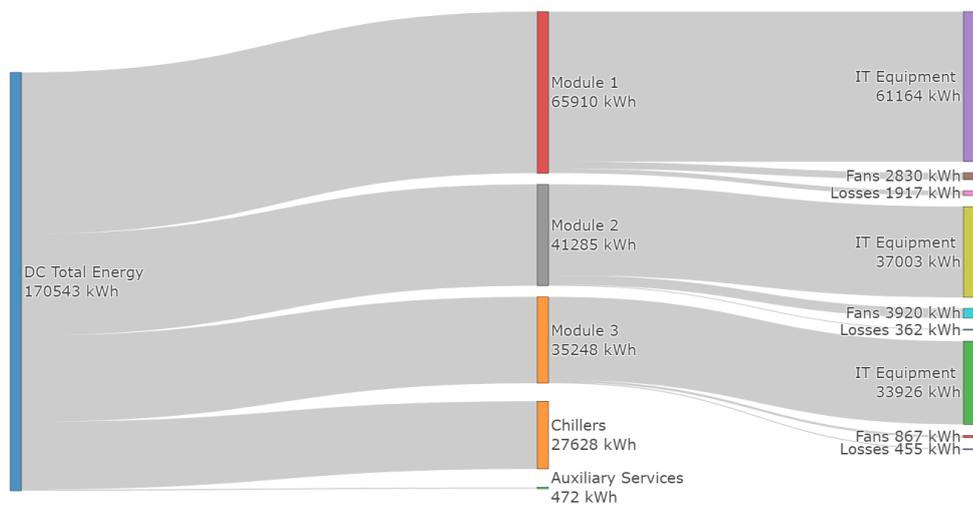
- *Calendar plot*: è un tipo di grafico utilizzato per visualizzare i dati nel corso del tempo utilizzando un calendario come base. In questo tipo di grafico, ogni giorno dell'anno viene rappresentato da un quadrato o un rettangolo, in cui la dimensione e/o il colore del quadrato rappresentano la quantità di dati rilevati in quel giorno. Questo tipo di grafico è particolarmente utile per visualizzare l'andamento di dati che seguono pattern stagionali o ciclici.
- *Sankey diagram*: è un tipo di grafico utilizzato per visualizzare flussi o transizioni tra diverse categorie. Il grafico è composto da una serie di blocchi rettangolari collegati da frecce, in cui la dimensione dei blocchi e la larghezza delle frecce rappresentano la quantità di dati o il valore delle categorie in gioco.
- *Scatter plot*: è un tipo di grafico utilizzato per visualizzare la relazione tra due variabili quantitative. Ciascuna coppia di valori delle due variabili viene rappresentata come un punto in un sistema di coordinate cartesiane, dove l'asse orizzontale rappresenta una variabile e l'asse verticale rappresenta l'altra variabile.

I dati analizzati fanno riferimento ad un range temporale limitato vista la recente installazione di *meter* e *datalogger* per il loro monitoraggio. Nello specifico, per questa analisi, i dati faranno riferimento ad un periodo compreso tra il 20 dicembre 2022 e il 28 febbraio 2023, quindi, poco più di due mesi. La misurazione dei dati viene effettuata ad intervalli di 15 minuti l'una dall'altra.

## 4.1 Analisi dei dati

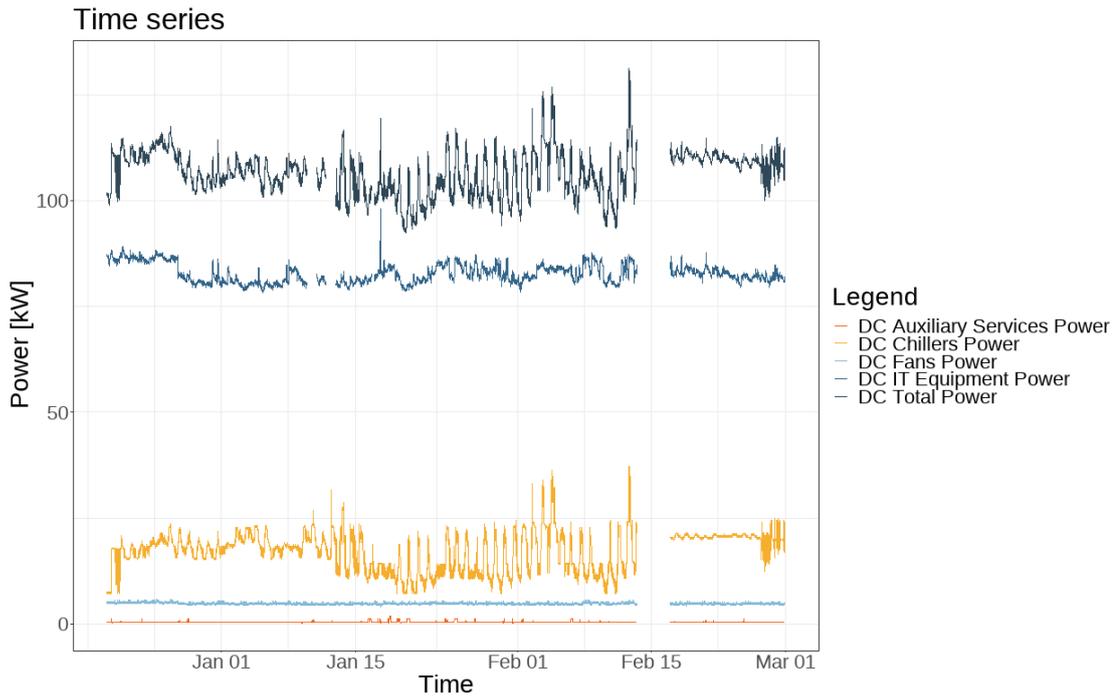
Si possono distinguere varie analisi all'interno del DC, in base al livello a cui si fa riferimento. Nel caso del Politecnico di Torino c'è la possibilità di effettuare un'analisi a livello di DC, mostrando quindi i carichi degli *IT equipment* oltre che dei *chiller* per esempio, ma anche a livello di singolo modulo. Di seguito dunque, verrà fatta quest'ulteriore distinzione in modo da avere un quadro completo sui consumi all'interno del DC e dei rispettivi moduli.

### 4.1.1 Data Center



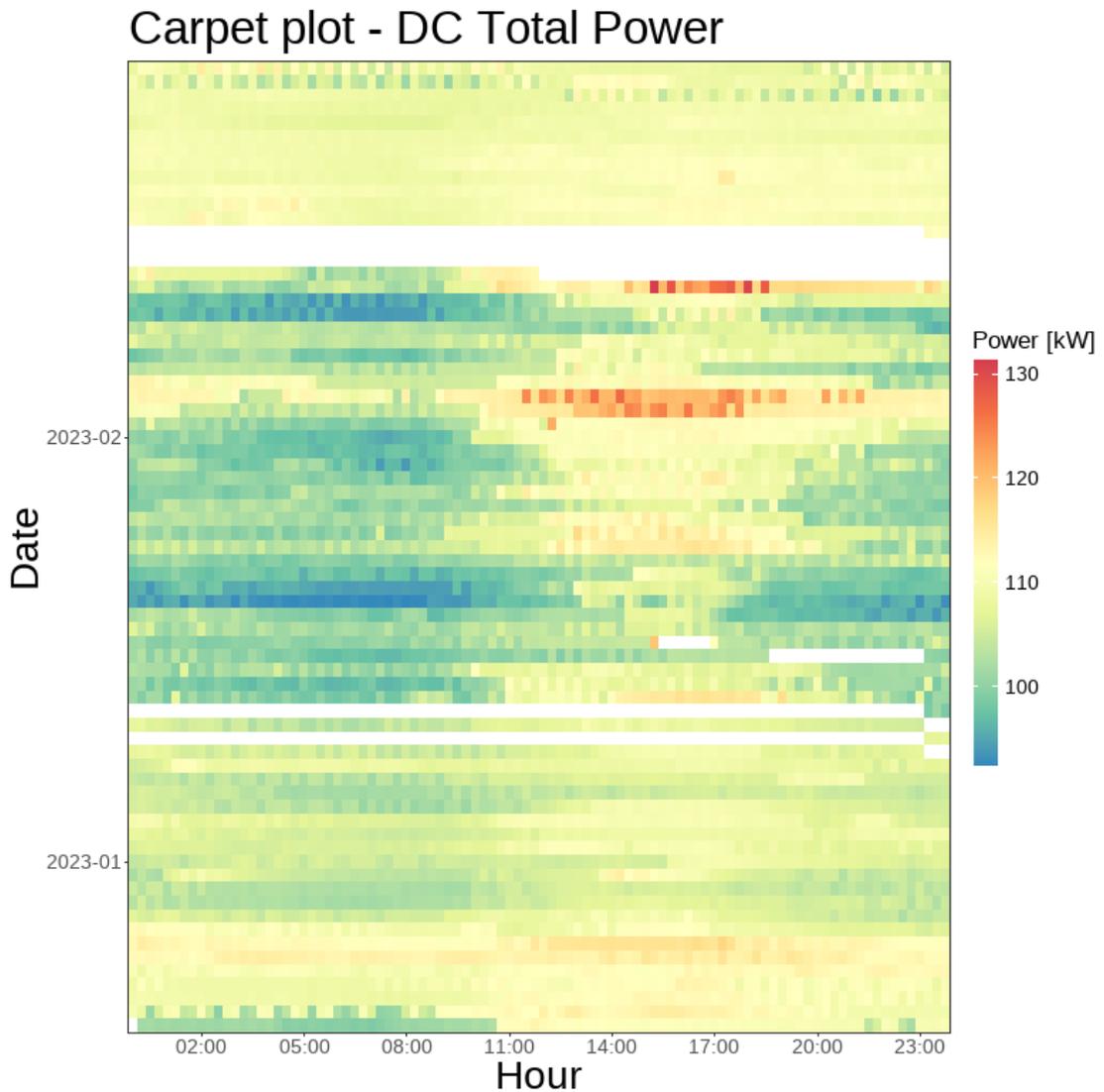
**Figura 4.1:** Consumi energetici del DC

A livello di DC una prima analisi da effettuare è a livello di consumi energetici, analizzandone i flussi; si è quindi prodotto un *sankey diagram* in Figura 4.1. L'andamento dei flussi è consono con quello che ci si potrebbe aspettare: l'incidenza maggiore è data dagli *IT equipment* dei moduli, seguita dal consumo dei 3 *chiller*. In piccola parte concorrono al consumo anche i ventilatori dei CRAC, mentre una quota quasi irrisoria è attribuita ai servizi ausiliari. Sono presenti anche le perdite dovute ad UPS e batterie per quanto riguarda i moduli 1 e 2, con l'aggiunta degli STS per il modulo 1. Si può, infatti, notare come siano maggiori le perdite per queste ultime in quanto incidono su entrambe le alimentazioni, oltre ad avere un dispositivo aggiuntivo, gli STS, che ne abbassano l'efficienza complessiva. Nel calcolo delle perdite si sono omesse le perdite per trasmissione, in quanto, seppur calcolabili teoricamente, avevano dei dati inconsistenti, di conseguenza vi era l'impossibilità



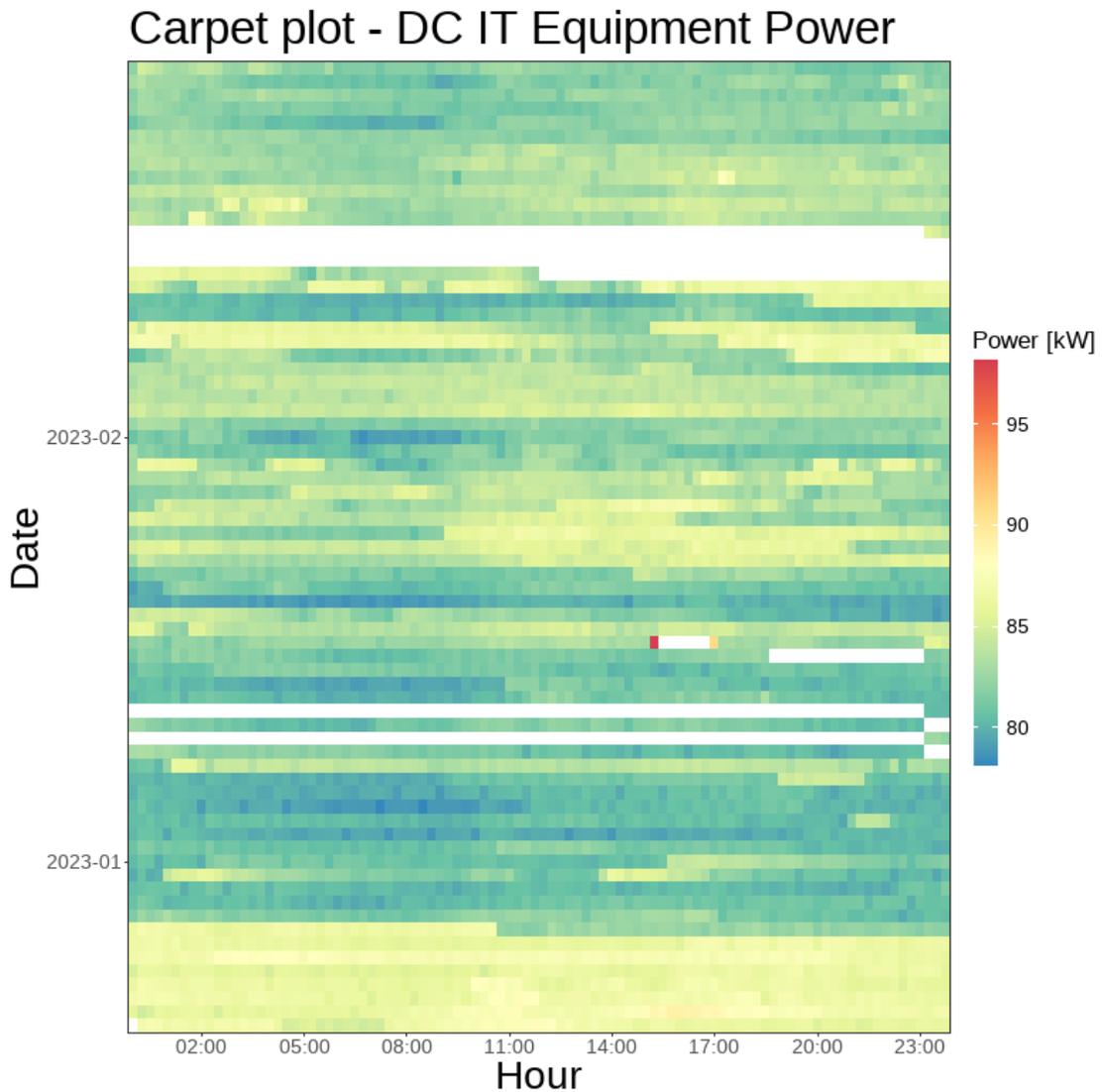
**Figura 4.2:** Andamento della potenza all'interno dei DC

di quantificarle. Le perdite di dati, come si vedrà in seguito, occorrono spesso, a volte per serie di giorni interi, segno che l'infrastruttura di monitoraggio è ancora acerba e sta subendo ulteriori modifiche e/o collaudi, infatti è ipotizzabile che vi siano delle manutenzioni in atto nei giorni in cui il dato non è stato trasmesso. In Figura 4.2 si sono condensate in un unico grafico le *time series* relative al DC; tali *time series* sono anche riportate in dei *carpet plot*, visualizzati nelle Figure 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7. Partendo dai dispositivi meno incisivi sul carico totale, in Figura 4.7 è osservabile come il carico dei servizi ausiliari sia praticamente sempre costante, tranne in alcune occasioni, in orari lavorativi, in cui è decisamente più alto: ciò è dato dai climatizzatori installati che provvedono a raffreddare l'ambiente esterno ai CRAC per mantenere delle condizioni termoigrometriche ideali per i manutentori. In merito ai ventilatori dei CRAC, il cui trend è visibile in Figura 4.6, sembra non sia ben definito, tuttavia tale situazione è data dalla tipologia di dato ricevuto dai ventilatori del modulo 1 come si vedrà in seguito. Si può notare come l'andamento degli *IT equipment* in Figura 4.4 sia molto omogeneo, a parte il periodo iniziale che va dal 20 al 27 febbraio, dovuto alle feste natalizie. In questo periodo, infatti, l'Ateneo è chiuso e pochi studenti utilizzano i servizi disponibili online, tuttavia il consumo energetico è maggiore rispetto al normale trend del DC. È dunque doveroso dover entrare nel dettaglio e capire qual è la variabile che ha



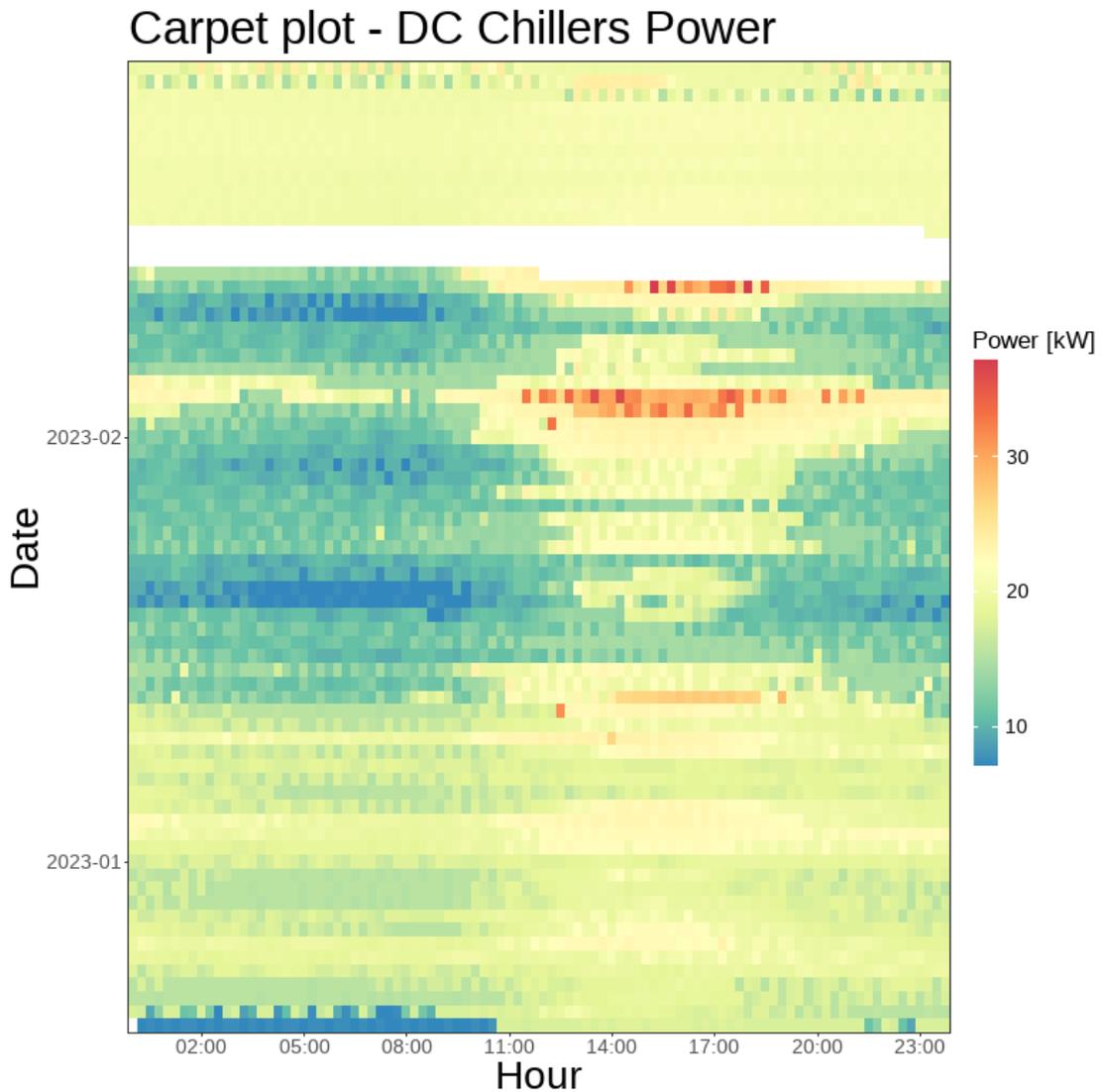
**Figura 4.3:** *Carpet plot* - Potenza totale del DC

comportato questo consumo anomalo per il DC. In Figura 4.5 il trend relativo ai *chiller* potrebbe sembrare disomogeneo rispetto al carico degli *IT equipment* che sono tenuti a raffreddare, tuttavia c'è da ricordare che la loro potenza impiegata dipende fortemente dalla temperatura esterna. A tal scopo, si è prodotto un *carpet plot* anche per la temperatura, visibile in Figura 4.8, in cui si può vedere come l'andamento rispecchi quello del consumo dei tre *chiller*. C'è inoltre da ricordare che essi funzionano con una tecnologia di *free cooling* indiretto, per cui sotto i 0°C, l'assorbimento dei *chiller* è molto basso. Al fine di rafforzare la correlazione tra



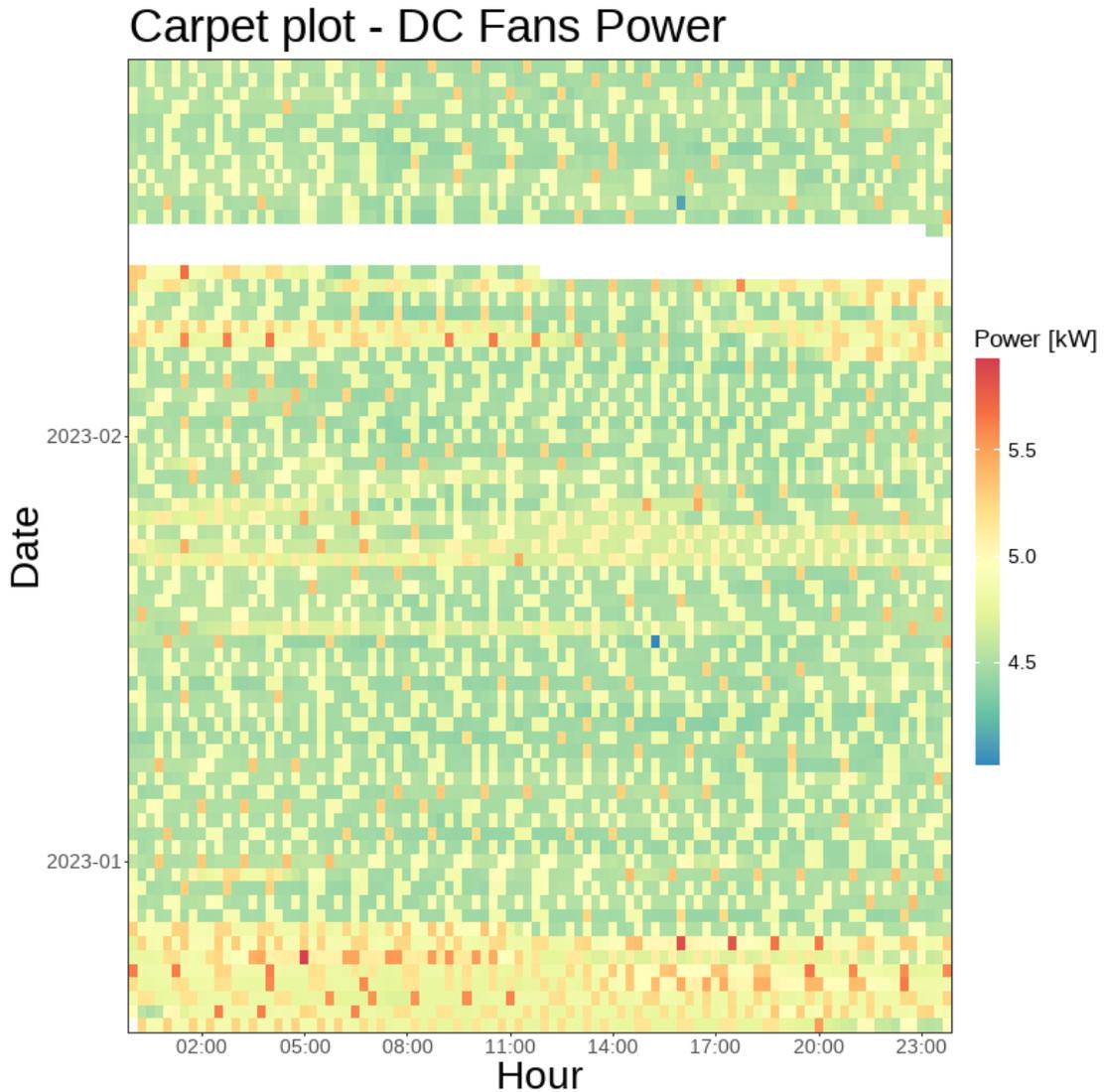
**Figura 4.4:** *Carpet plot* - Potenza *IT equipment* del DC

*chiller* e temperatura esterna si è prodotta anche la *time series* in Figura 4.9, in cui è chiaramente visibile la correlazione tra le due, oltre ad avere un riscontro sul *free cooling* indiretto. È infatti visibile che, quando la temperatura esterna scende sotto i  $0^{\circ}\text{C}$ , la potenza assorbita dai *chiller* si assesta attorno ai 15 kW in quei pochi range di tempo in cui questa condizione è avvenuta. Mettendo a confronto i due parametri in Figura 4.10, si può notare come, all'aumentare della temperatura, crescono anche i consumi dei *chiller*. Si può notare come la crescita sia regolare, questo perchè il ciclo di *free cooling* entra in funzione man mano che la temperatura



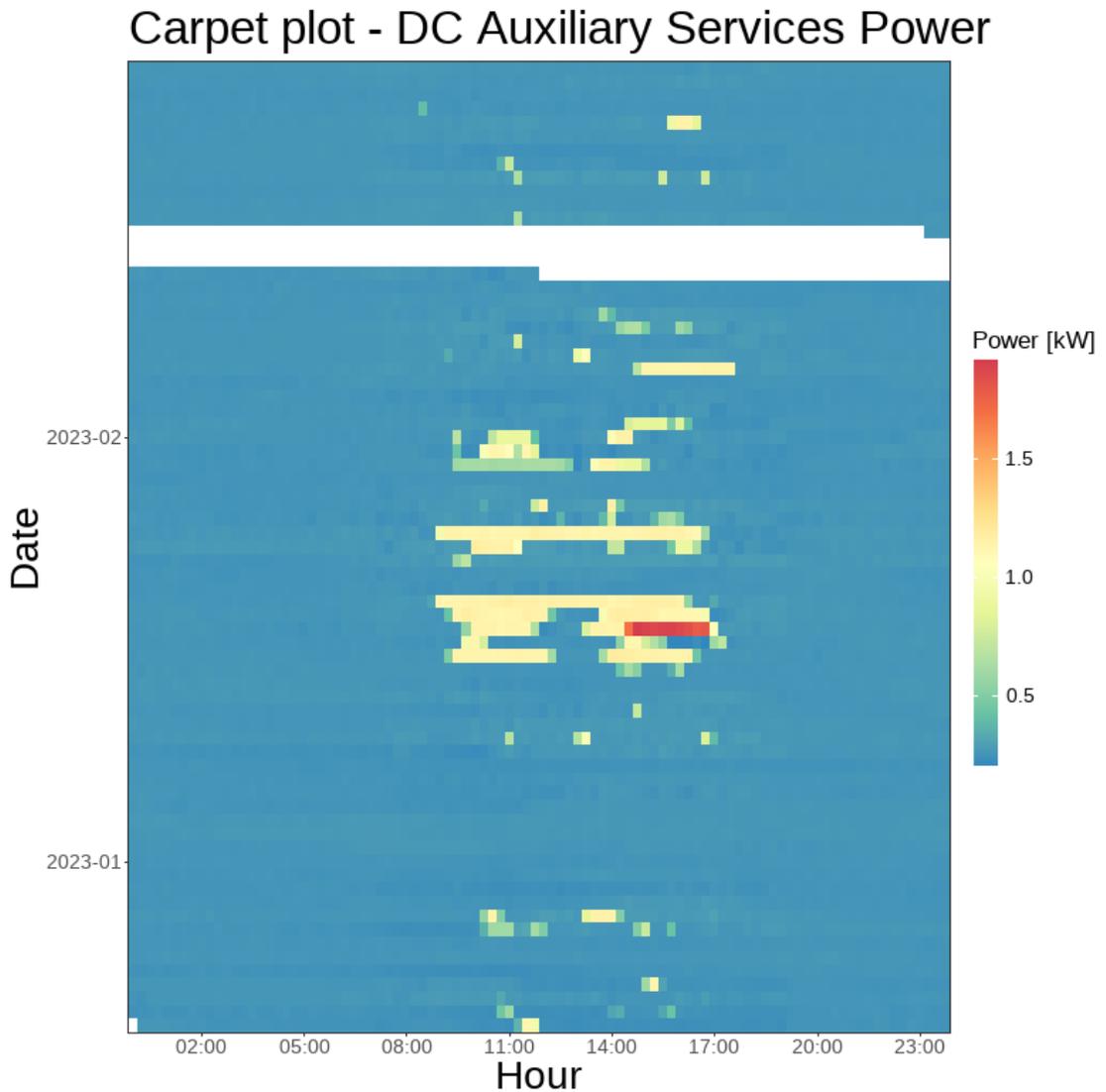
**Figura 4.5:** *Carpet plot* - Potenza assorbita dai 3 *chiller* del DC

diminuisce. Tale condizione è visibile con il grafico in Figura 4.11, in cui si può notare come il coefficiente EER aumenti di molto al diminuire del consumo dei *chiller*; infatti la potenza richiesta dai *chiller* diminuisce sempre più finché non rimane da alimentare soltanto i ventilatori, grazie ai quali si può arrivare ad operare un *free cooling* completo. Il valore più alto di EER è attorno a 12: questa condizione è ammissibile in quanto si sta operando con un *free cooling* indiretto [80]. Per il calcolo del coefficiente EER si è assunto che il carico assorbito dagli *IT equipment* sia il carico evaso dai *chiller*, ovvero la potenza termica in uscita



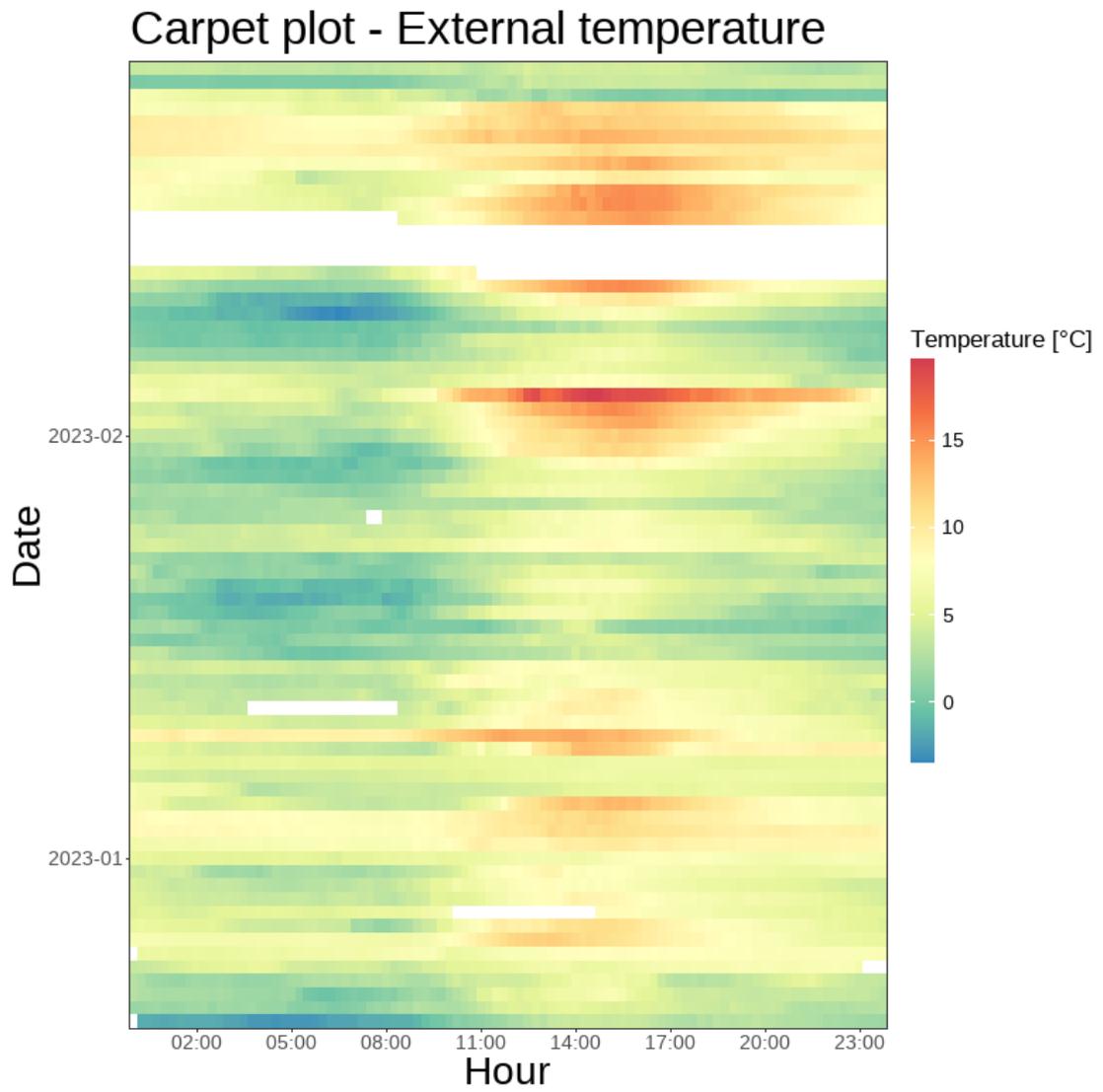
**Figura 4.6:** *Carpet plot* - Potenza assorbita dai ventilatori nei CRAC del DC

[28]. Sfruttando quindi la relazione del coefficiente EER si è trovato un coefficiente denominato "equivalente" questo perchè tiene in considerazione l'assunzione del carico IT come energia termica da dissipare. Un'ulteriore grafico mostrandone la correlazione tra EER e temperatura esterna è visibile in Figura 4.12 in cui si può notare come tale coefficiente tenda a scendere all'aumentare della temperatura. Ci sono casi tuttavia in cui ad una determinata temperatura, quest'ultimo tenda ad avere più valori, anche molto distanti tra di loro, come per esempio a 0°C. Altri casi in cui al variare della temperatura esso non cambia di molto: tipico è il caso alle

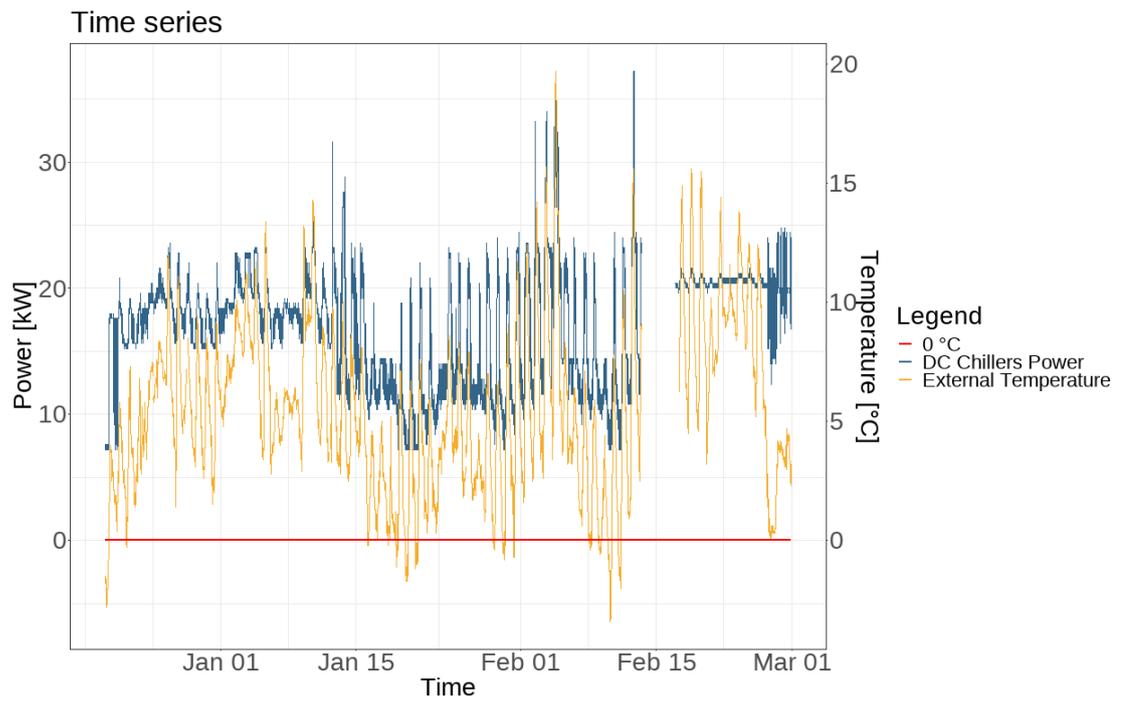


**Figura 4.7:** *Carpet plot* - Potenza assorbita dai servizi ausiliari del DC

condizioni nominali, in cui l'EER medio è attorno a 3, mantenuto fisso anche per molteplici valori di temperatura. Essendo dunque che i *chiller* hanno un carico che si ripartisce direttamente sul consumo totale del DC, si è prodotto il grafico in Figura 4.13 dove si può notare che all'aumentare del carico dei *chiller*, aumenta anche quello del DC. È importante notare come in tutti i grafici di correlazione finora analizzati, il carico dei *chiller* sembri parzializzato. Tale condizione è dovuta al dato ricevuto dal *meter*, il quale lo fornisce in kW con un arrotondamento alla prima cifra decimale, comportando una parziale perdita di informazione.



**Figura 4.8:** *Carpet plot* - Temperatura esterna



**Figura 4.9:** Andamento della temperatura esterna in confronto all'andamento del consumo dei *chiller*

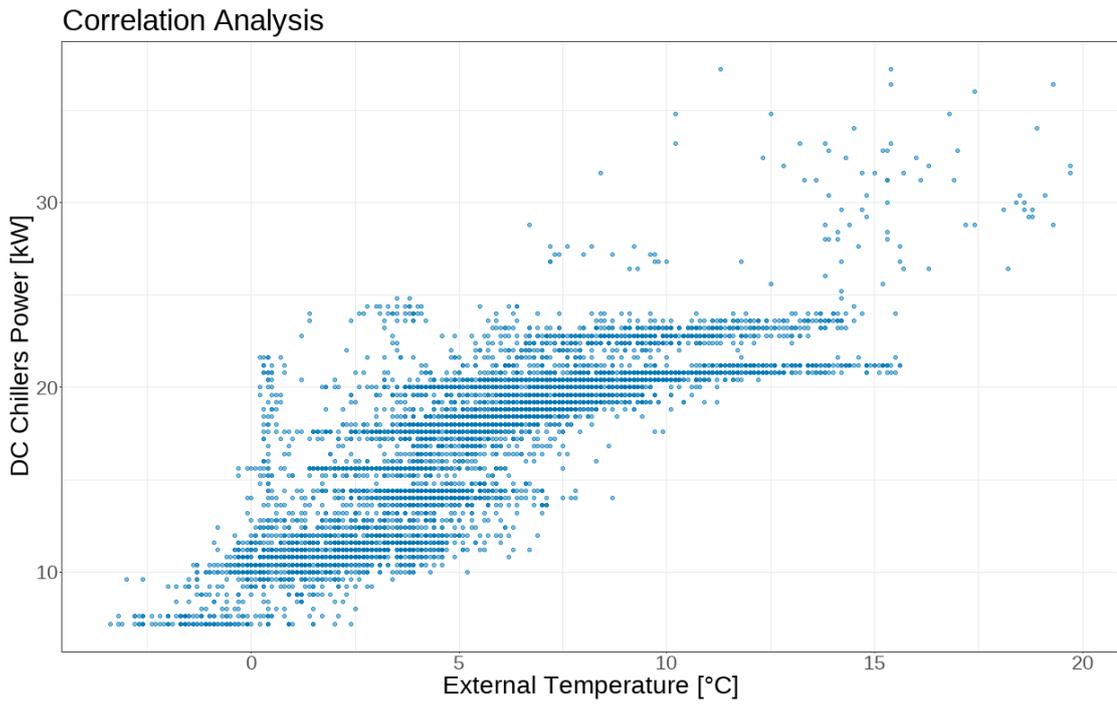


Figura 4.10: Confronto tra consumo dei *chiller* e temperatura esterna

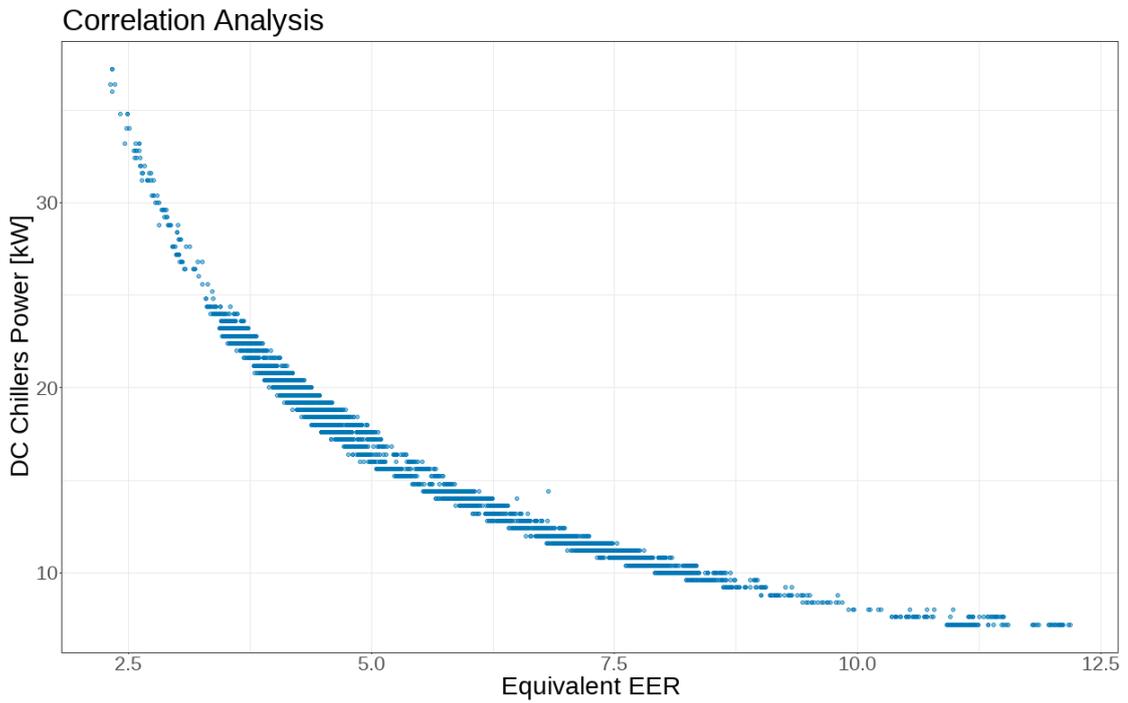


Figura 4.11: Confronto tra EER equivalente e consumo dei *chiller*

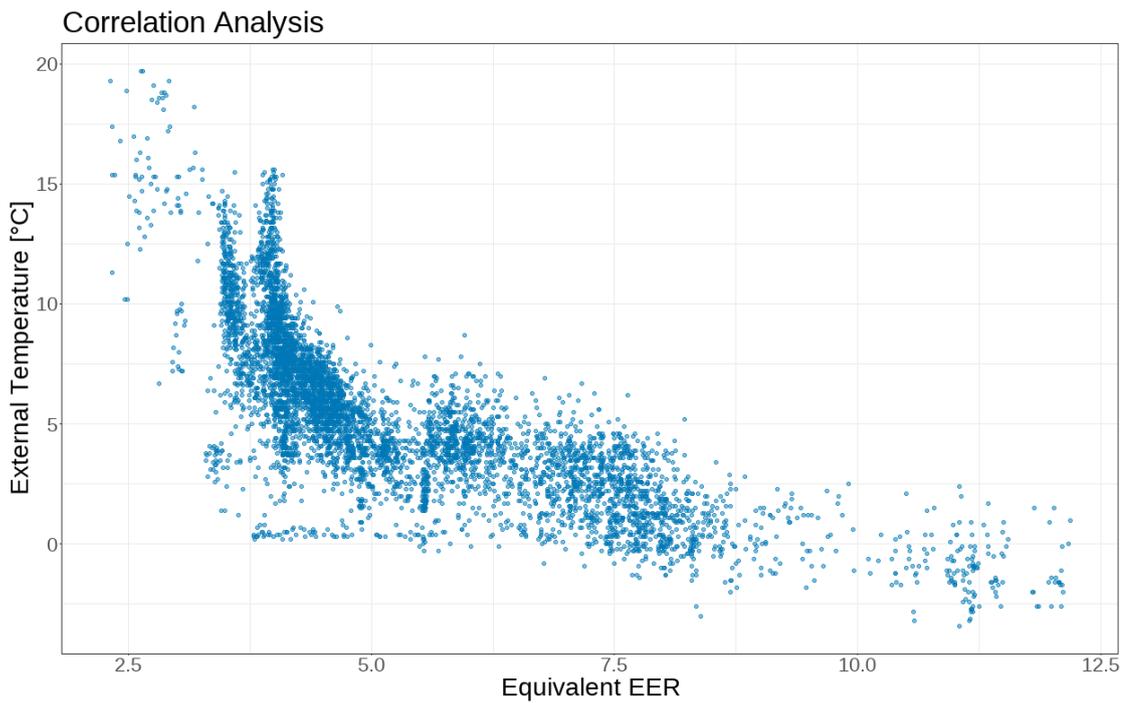


Figura 4.12: Confronto tra EER equivalente e temperatura esterna

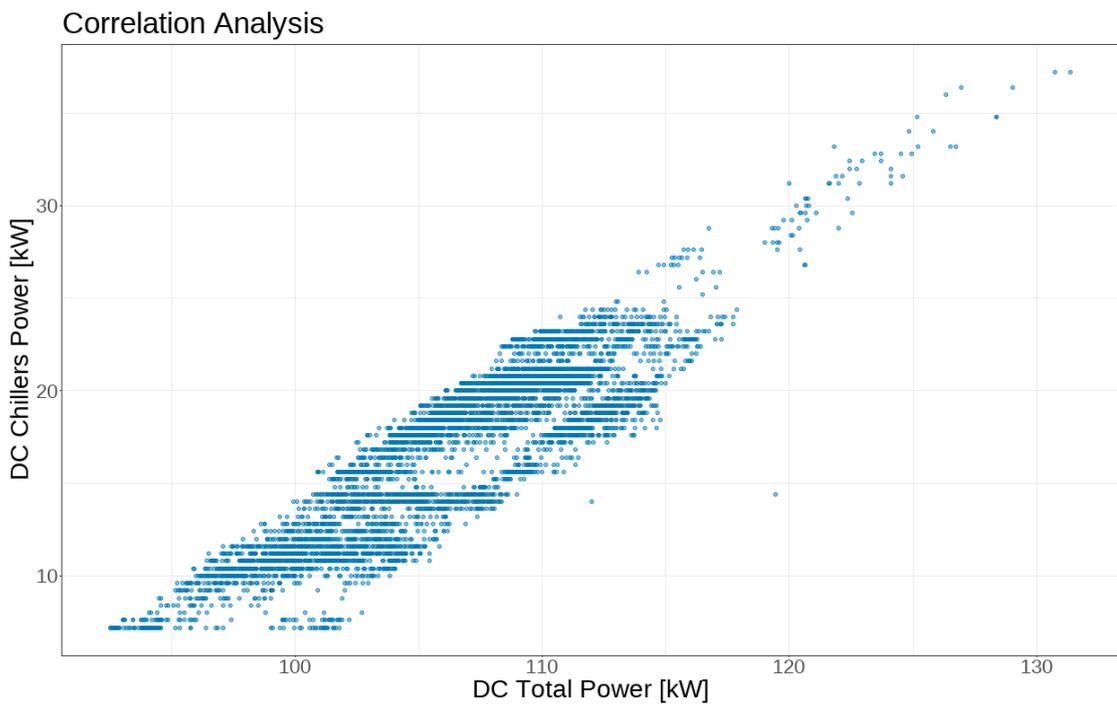
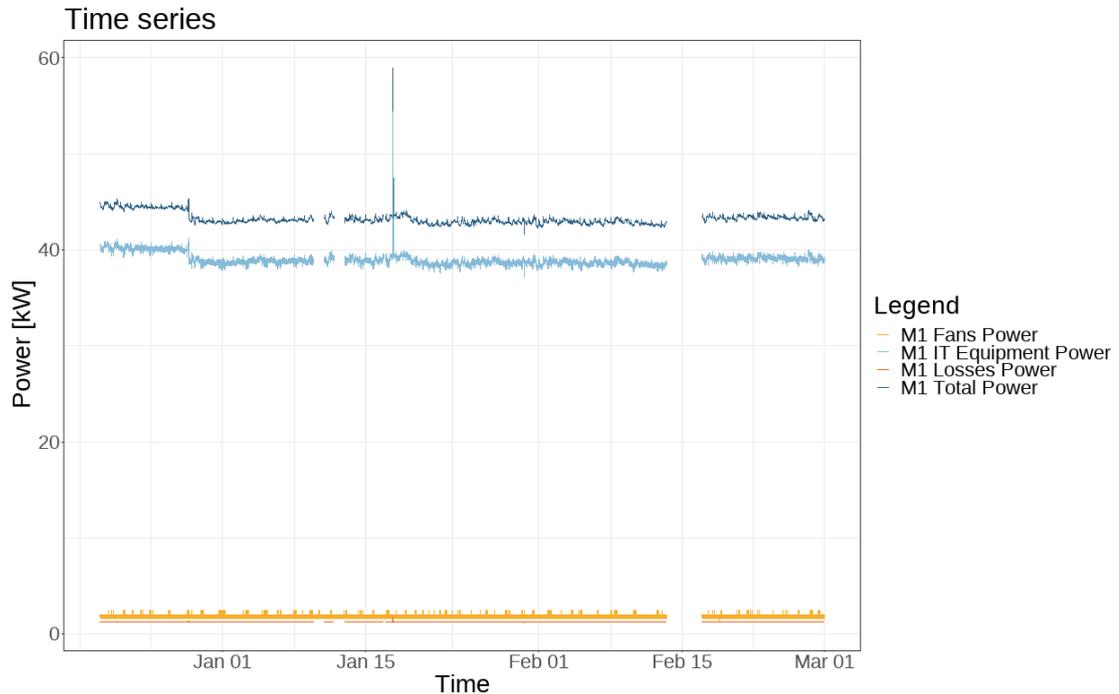


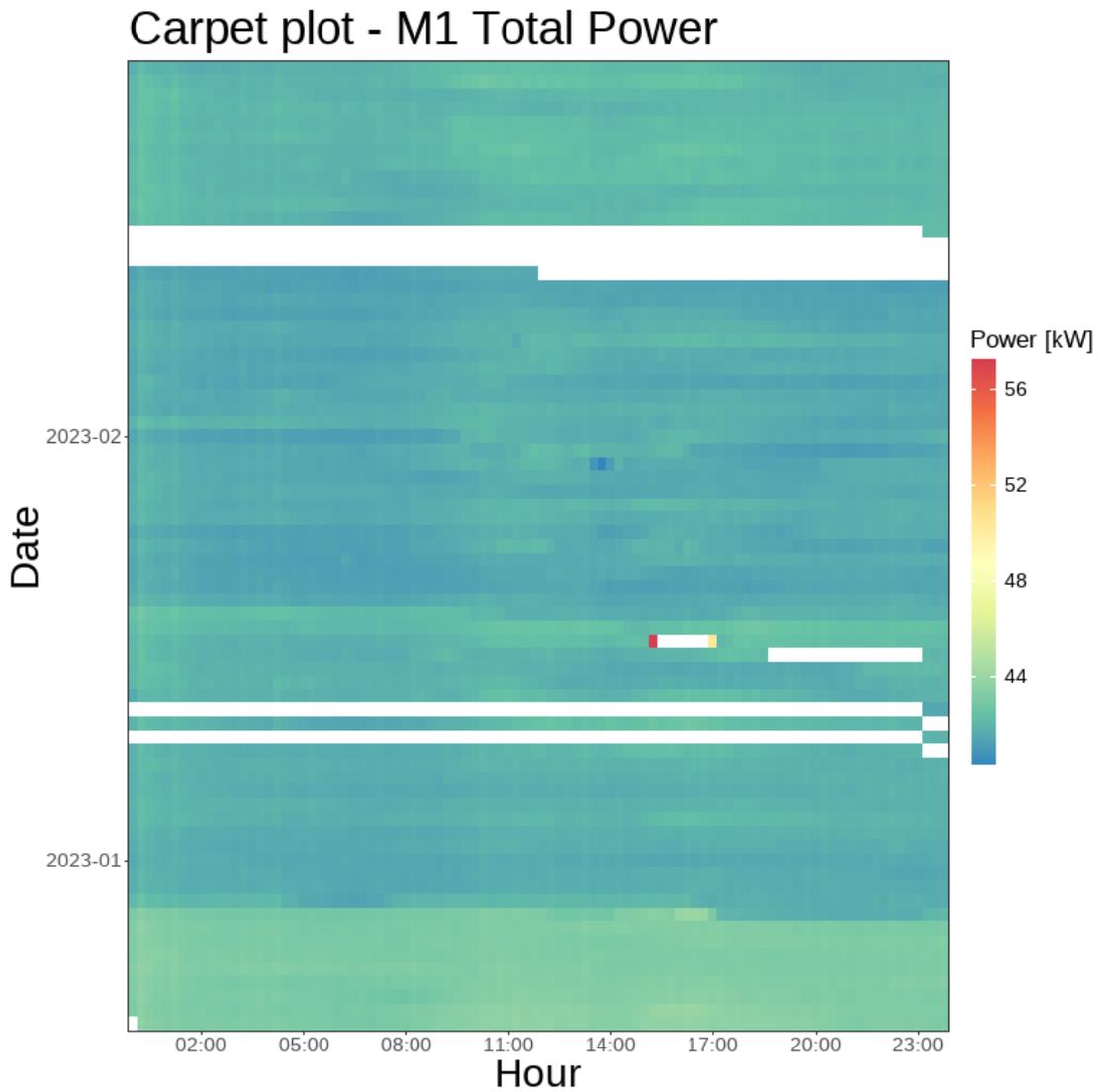
Figura 4.13: Confronto tra consumo dei *chiller* e consumo totale del DC

### 4.1.2 Modulo 1



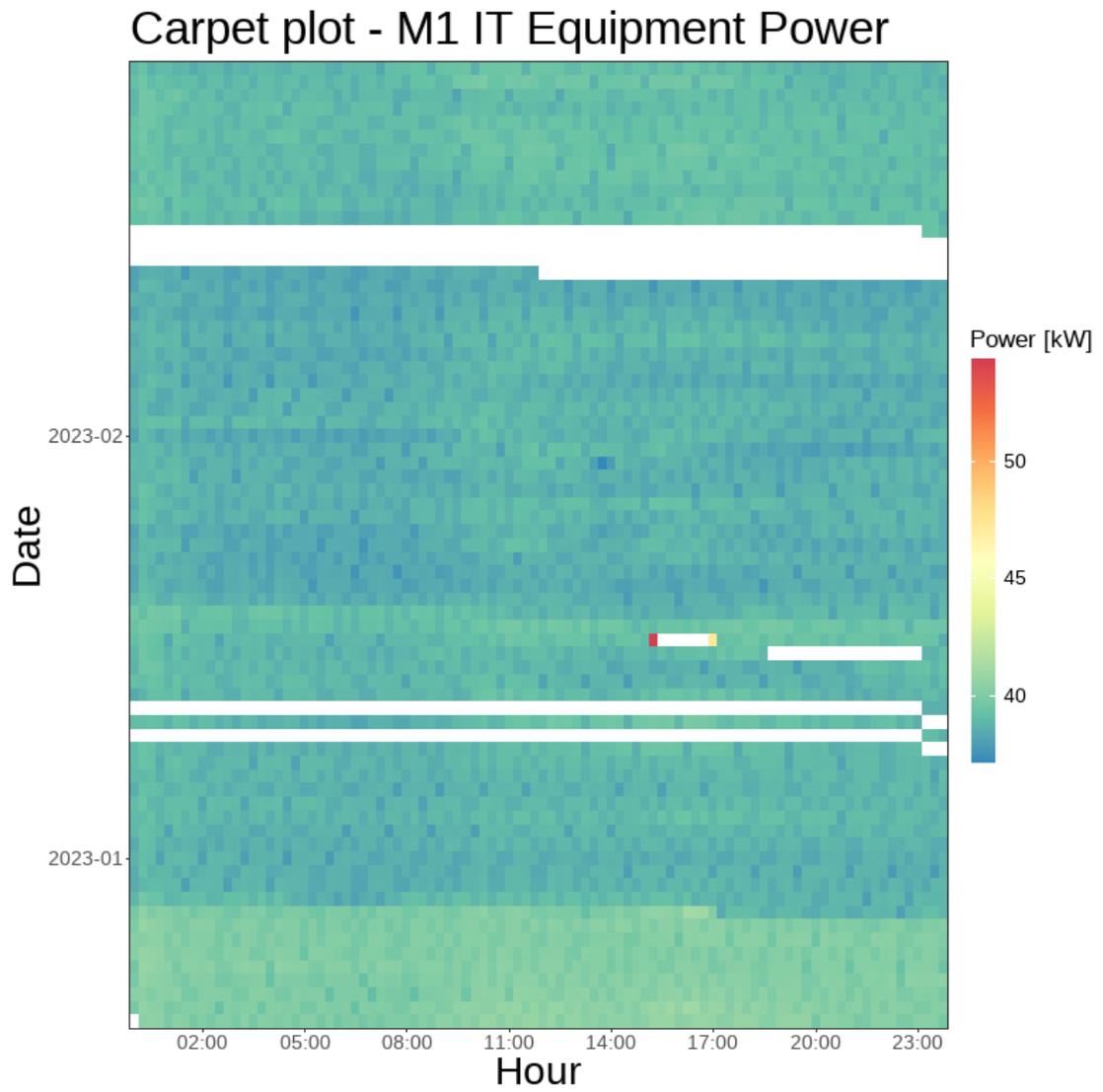
**Figura 4.14:** Andamento della potenza all'interno del modulo 1

Il modulo 1 è caratterizzato da 3 consumi: quello degli *IT equipment*, dei ventilatori che servono i CRAC e le perdite. In Figura 4.14 è visibile il trend delle potenze all'interno del modulo 1. L'andamento è molto omogeneo per quanto concerne gli *IT equipment*, così come le perdite, a parte un incremento attorno al 17 gennaio ma che è riconducibile ad un errore dello strumento e catalogabile come outlier. Per rendere ancora più visibile l'omogeneità dell'andamento sono stati prodotti i *carpet plot* visibili alle Figure 4.15, 4.16, 4.17 e 4.18. Il trend degli *IT equipment* (Figura 4.16) è pressochè costante, determinando anche l'andamento della potenza totale assorbita (Figura 4.15), tuttavia particolare attenzione deve essere posta per quanto concerne i ventilatori che servono i CRAC in Figura 4.17. La variazione non è lineare, bensì sembra più a "macchie" con degli sbalzi ingenti. Tale trend è visibile anche nella *time series* di Figura 4.14. La motivazione è un semplice problema di taratura dei *meter*, i quali rilevano il dato con 2 cifre decimali, tuttavia quest'ultimo è ridotto di un fattore pari a 10. Ciò comporta che, seppur correggendo in post processing il dato moltiplicandolo per 10, si ha comunque una perdita di informazioni, che in questo caso corrisponde ai centesimi. Tale situazione, comporta ad avere un dato approssimato al decimo, motivazione per la quale il trend è così scaglionato. Questa problematica, tuttavia, non comporta un errore

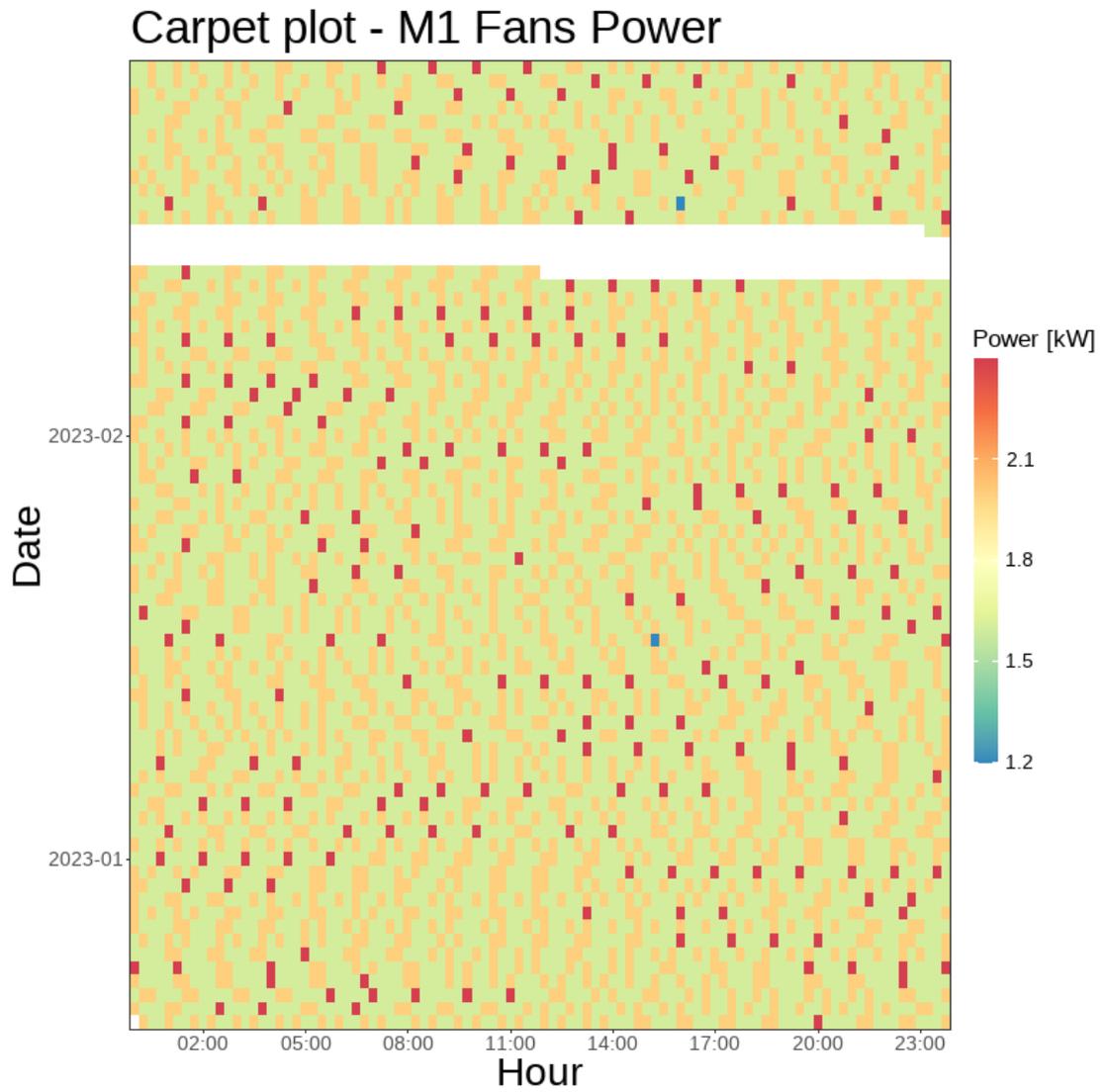


**Figura 4.15:** *Carpet plot* - Potenza totale del modulo 1

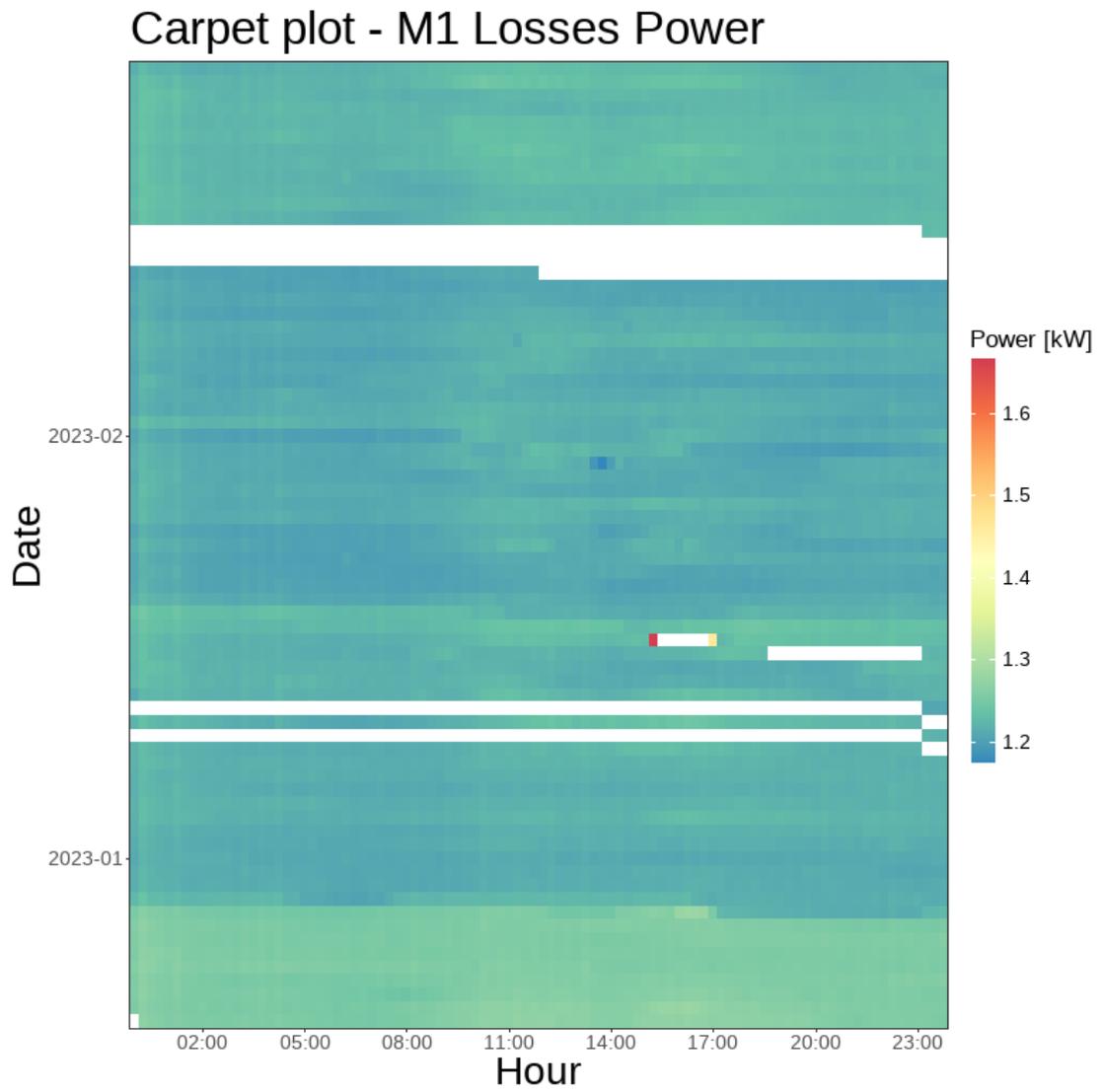
rilevante, dato che i ventilatori del modulo 1 sono una piccola parte del consumo energetico del DC. Le perdite invece, rappresentate in Figura 4.18, essendo ricavate da calcoli matematici, come spiegato nel capitolo precedente, di conseguenza sono direttamente proporzionali al carico totale, ed hanno un andamento omogeneo.



**Figura 4.16:** *Carpet plot* - Potenza *IT equipment* del modulo 1

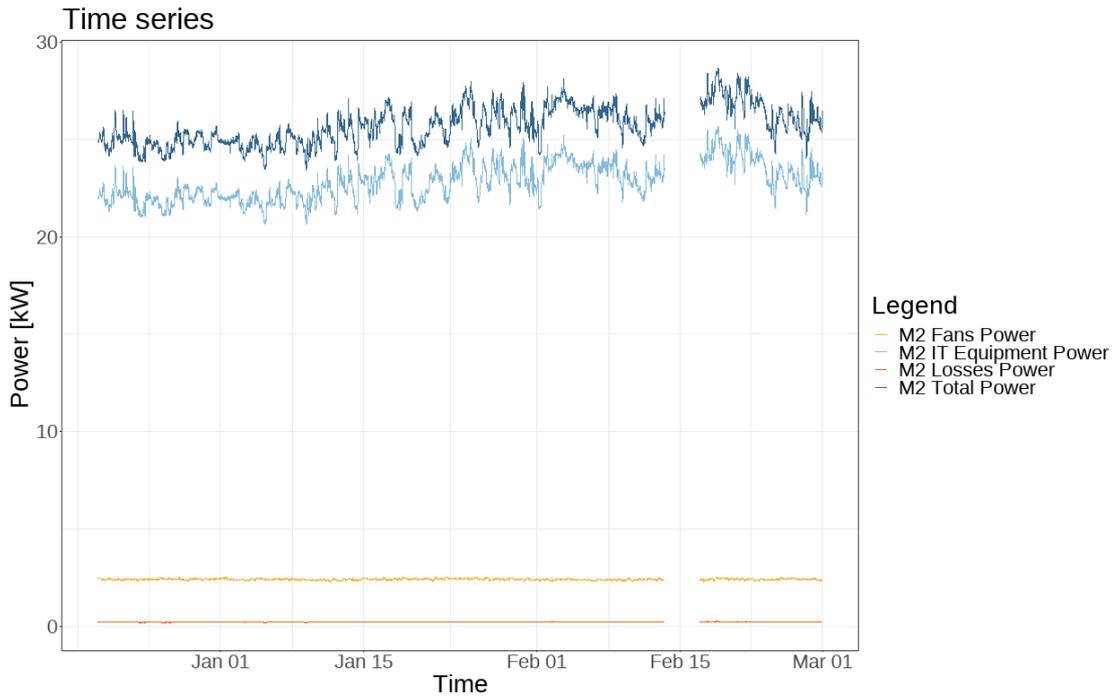


**Figura 4.17:** *Carpet plot* - Potenza assorbita dai ventilatori nei CRAC del modulo 1



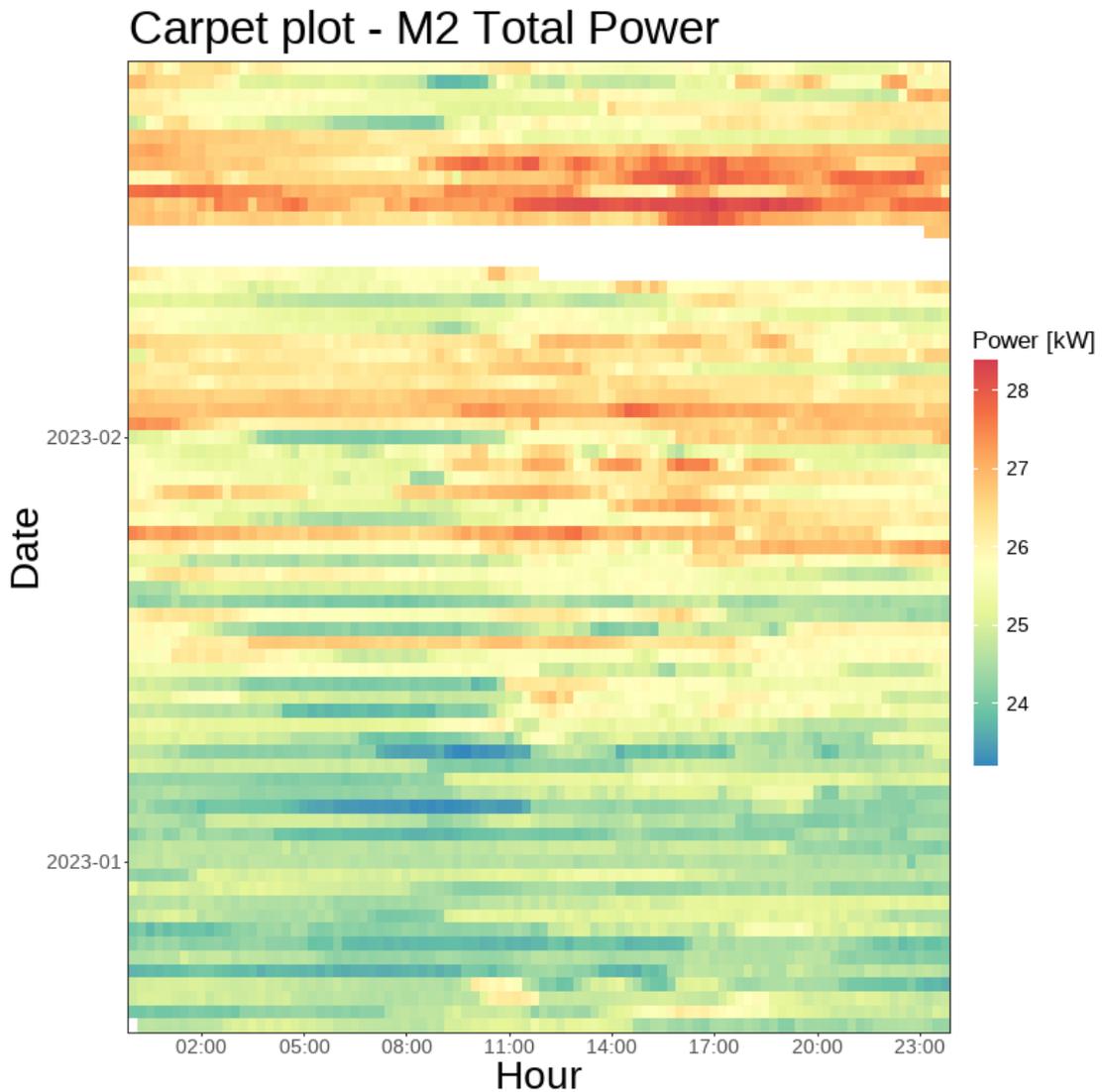
**Figura 4.18:** *Carpet plot* - Perdite dovute a UPS e batterie del modulo 1

### 4.1.3 Modulo 2



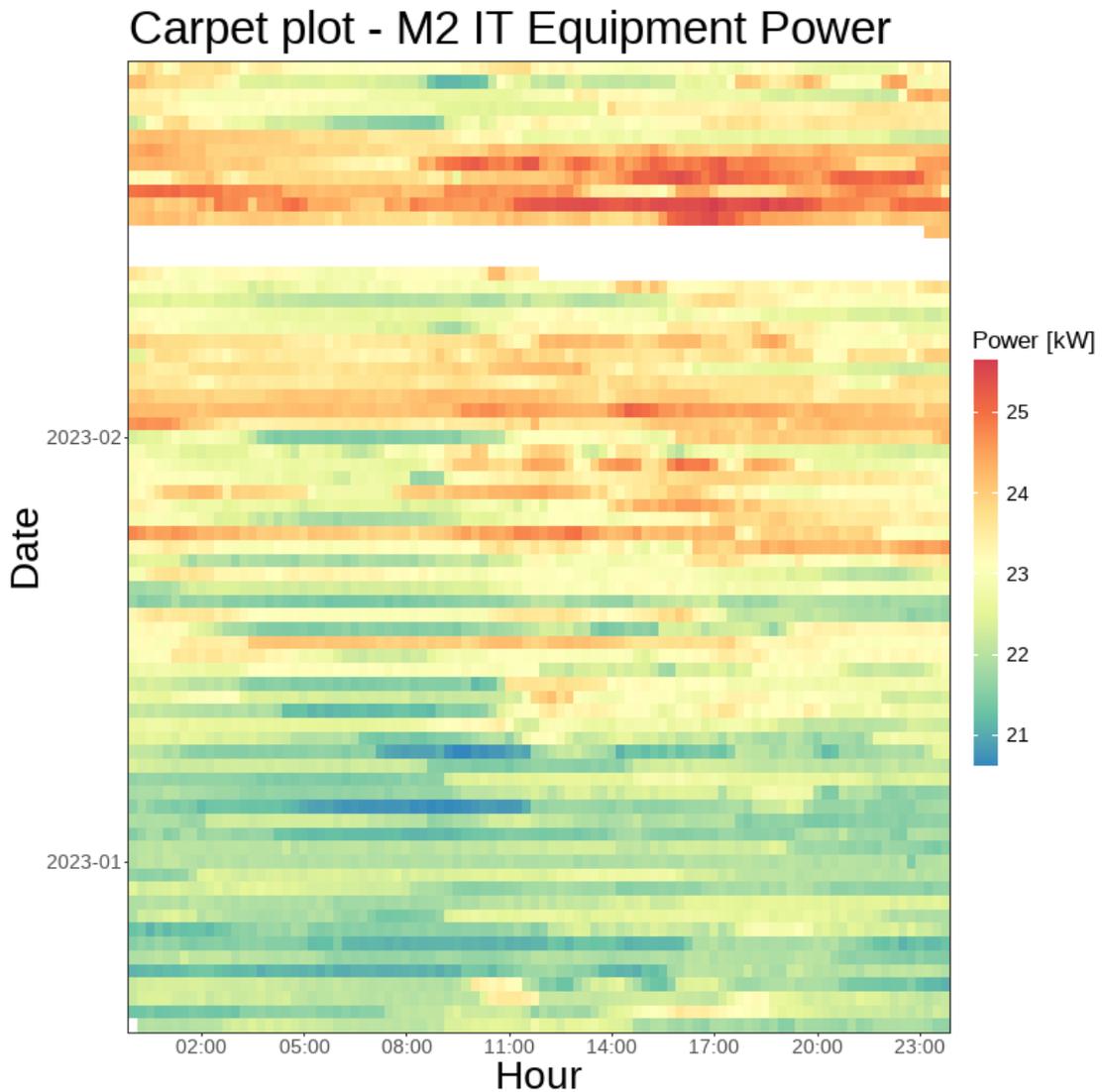
**Figura 4.19:** Andamento della potenza all'interno del modulo 2

Anche il modulo 2 è caratterizzato da tre consumi: *IT equipment*, ventilatori che servono i CRAC e perdite. In Figura 4.19 sono mostrati gli andamenti in potenza di questi ultimi, con l'aggiunta del carico totale. Come visibile, sono ovviamente gli *IT equipment* ad avere maggior carico, con un andamento abbastanza altalenante durante il periodo di riferimento. A tal fine, si sono prodotti dei *carpet plot* visibili nelle Figure 4.20, 4.21, 4.22 e 4.23. È evidente che il trend degli *IT equipment* e della potenza totale siano molto simili (Figure 4.20 e 4.21) assieme a quelli delle perdite, anch'esse direttamente proporzionali in quanto calcolate (Figura 4.23). In merito ai ventilatori che servono i CRAC (Figura 4.22), invece, l'andamento non è ben definito, complice anche l'analisi limitata a poco più di due mesi, tuttavia sembra che la richiesta di potenza maggiore sia durante i periodi notturni. A differenza degli altri moduli, nel modulo 2 sono installati dei sensori di temperatura come spiegato nel capitolo precedente. Si riportano dunque gli andamenti di temperatura dell'aria di espulsione, verso l'isola calda, per ogni rack in Figura 4.24, dove è evidente la problematica delle perdite di dati durante il periodo visualizzato. È chiaro come le temperature siano più o meno tutte attorno ai 30°C, con dei picchi di 35°C circa, oltre che a dei valori bassi di circa 25°C per quanto riguarda il rack 8 (R8). Questa differenza di anche 10°C tra un rack e l'altro è dovuta alla presenza o meno di



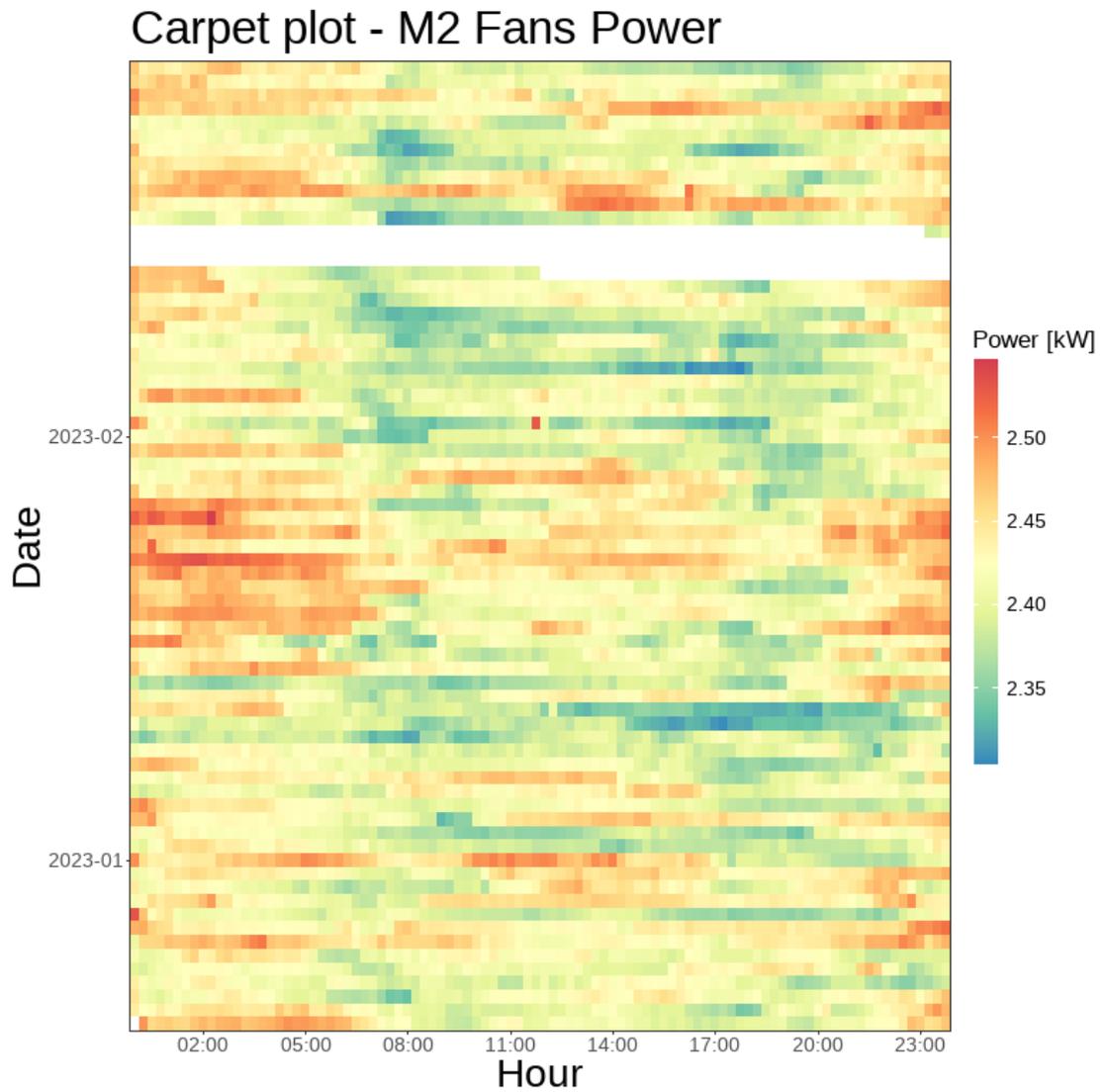
**Figura 4.20:** *Carpet plot* - Potenza totale del modulo 2

server all'interno di questi ultimi; il rack 8, infatti, è privo di apparecchi IT. Un altro parametro da tenere in considerazione è la disposizione dei server all'interno dei rack. Ci sono rack i cui server sono allocati in basso, di fatto sfalsando la lettura di temperatura, in quanto il sensore è posto in alto. Nonostante queste condizioni, è possibile avere una visione circa la temperatura media all'interno dell'isola calda, semplicemente eseguendo una media tra le temperature. Si riportano dunque i grafici in Figura 4.25 e 4.26 in cui si può notare come l'andamento medio sia attorno ai 31.5°C, come confermato dai calcoli effettuati. Inoltre è visibile come la



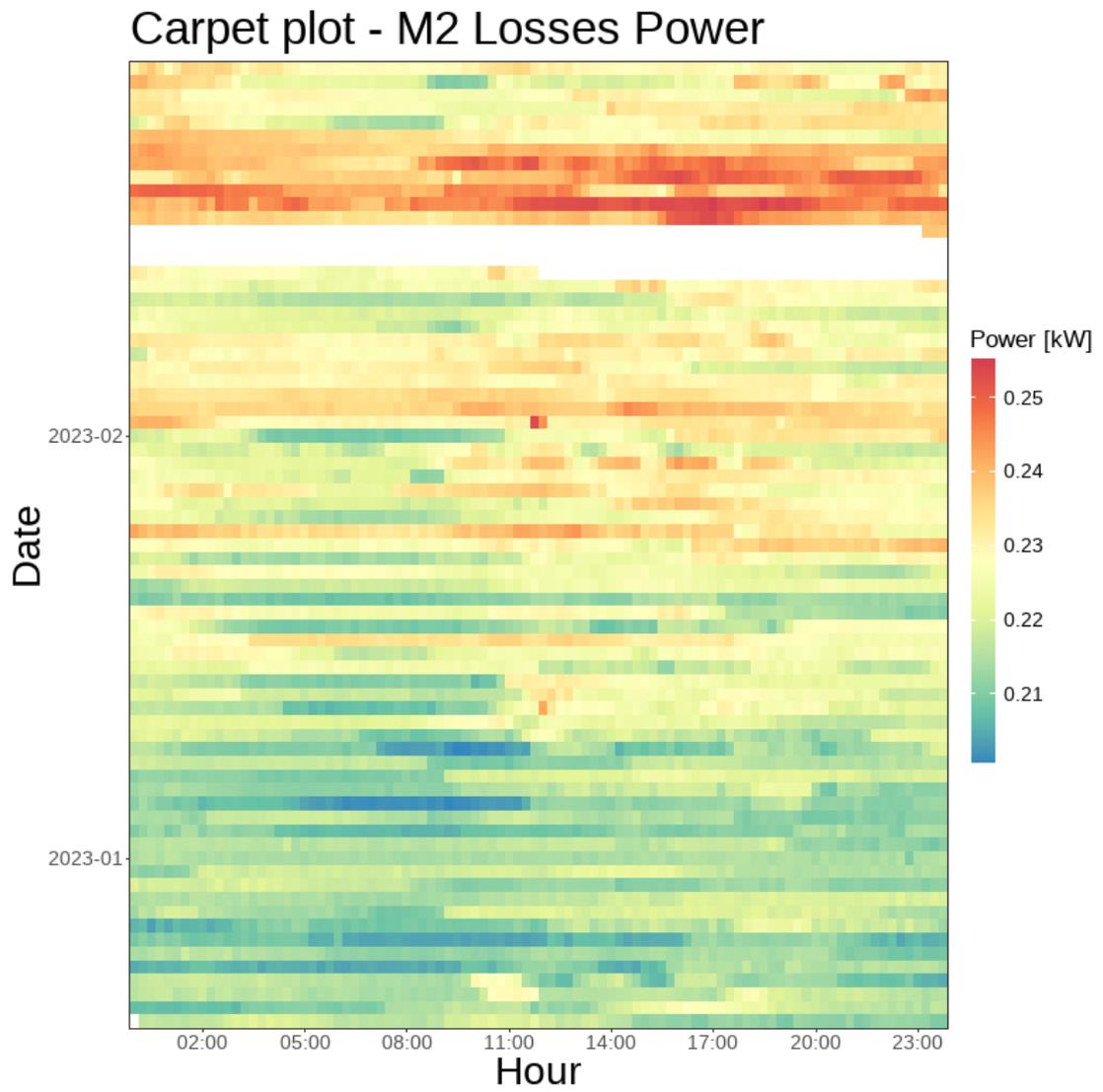
**Figura 4.21:** *Carpet plot* - Potenza *IT equipment* del modulo 2

temperatura sia aumentata di circa  $1^{\circ}\text{C}$  rispetto alla media nel periodo successivo al 15 febbraio. Questa analisi sulle temperature conferma che, ipotizzando un salto termico di  $10^{\circ}\text{C}$  tra la temperatura in uscita e in ingresso ai rack [81], porta quest'ultima ad avere un valore tra i  $21$  e  $22^{\circ}\text{C}$ , come da guida ASHRAE [55]. Tale temperatura è il risultato della limitata miscelazione tra la quantità di aria raffrescata in uscita dal CRAC e una parte di aria ambiente, più calda. Non avendo tuttavia a disposizione dati sufficienti, non è possibile la loro effettiva valutazione. La miscelazione avviene in seguito al fatto che la parte di aria fredda in uscita dal

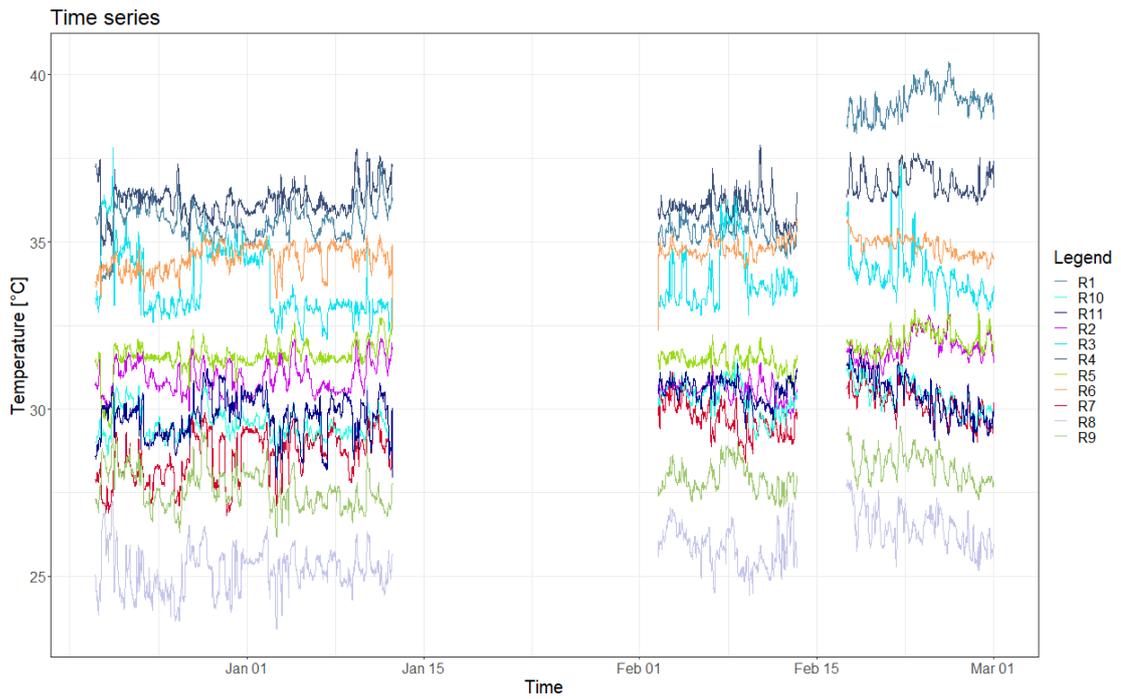


**Figura 4.22:** *Carpet plot* - Potenza assorbita dai ventilatori nei CRAC del modulo 2

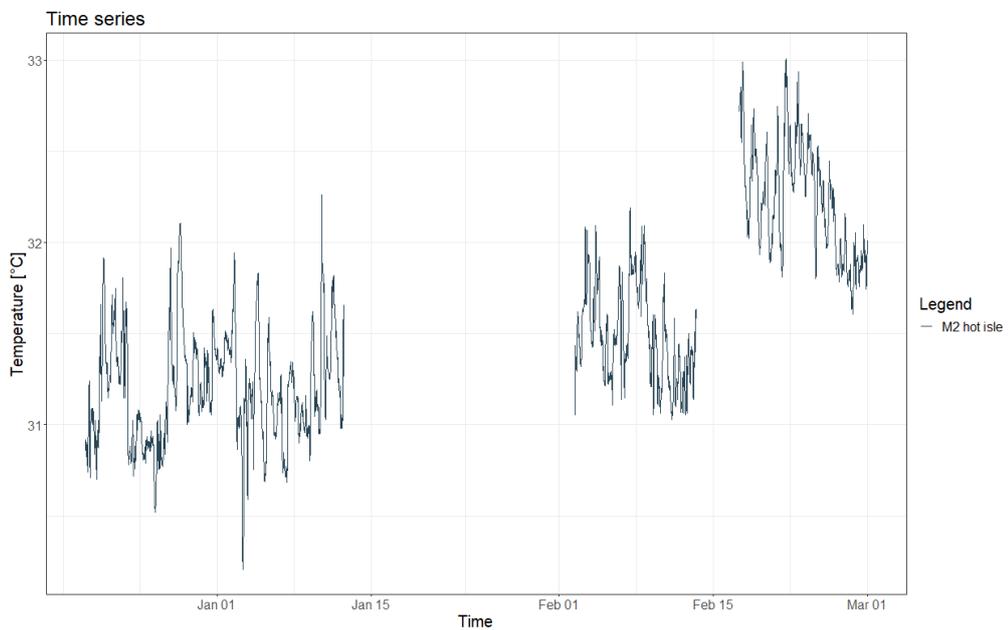
rack non viene isolata rispetto al resto dell'ambiente.



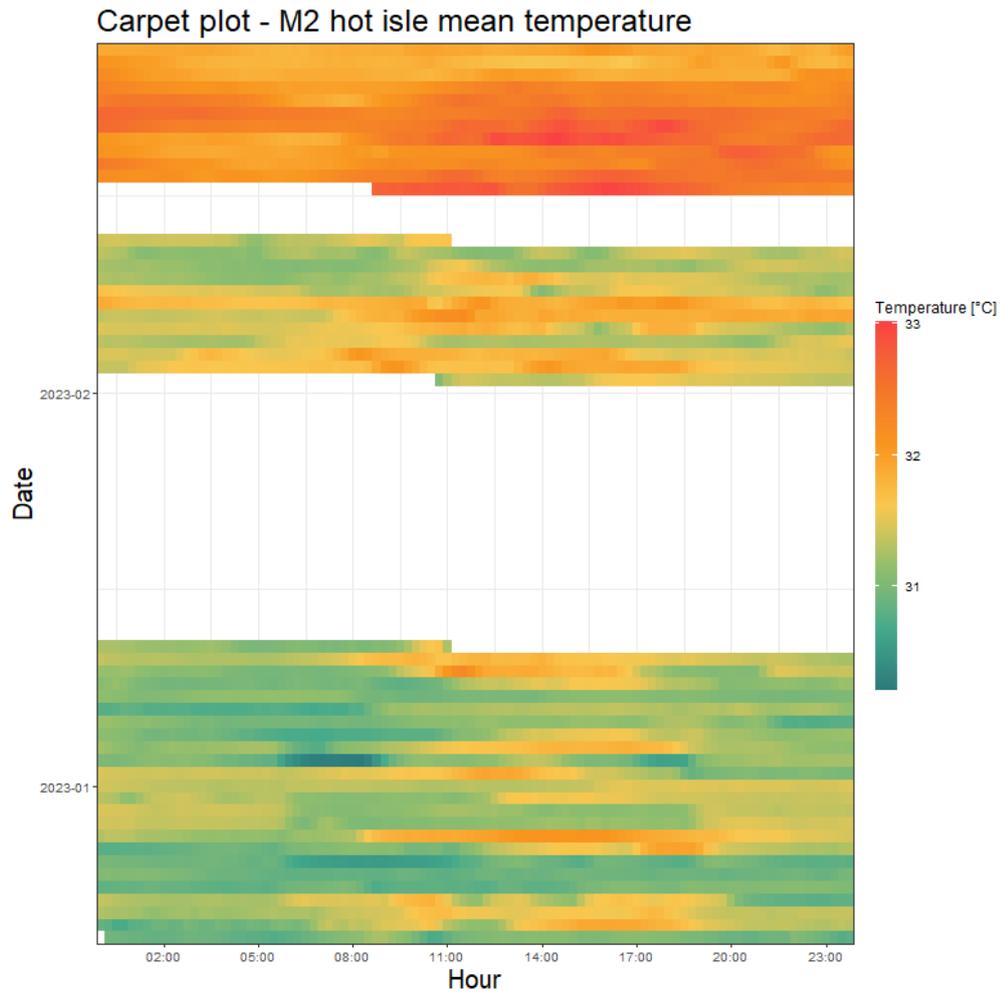
**Figura 4.23:** *Carpet plot* - Perdite dovute a UPS e batterie del modulo 2



**Figura 4.24:** Andamento delle temperature dell'aria di espulsione dei rack verso l'isola calda del modulo 2

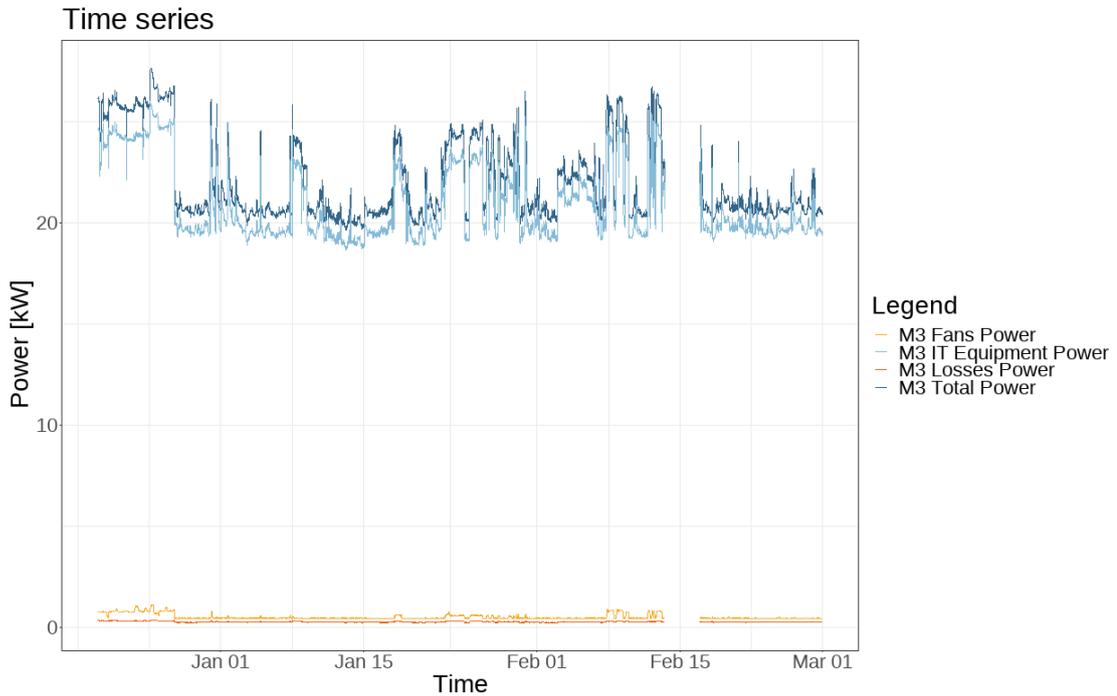


**Figura 4.25:** Andamento della temperatura media all'interno dell'isola calda del modulo 2



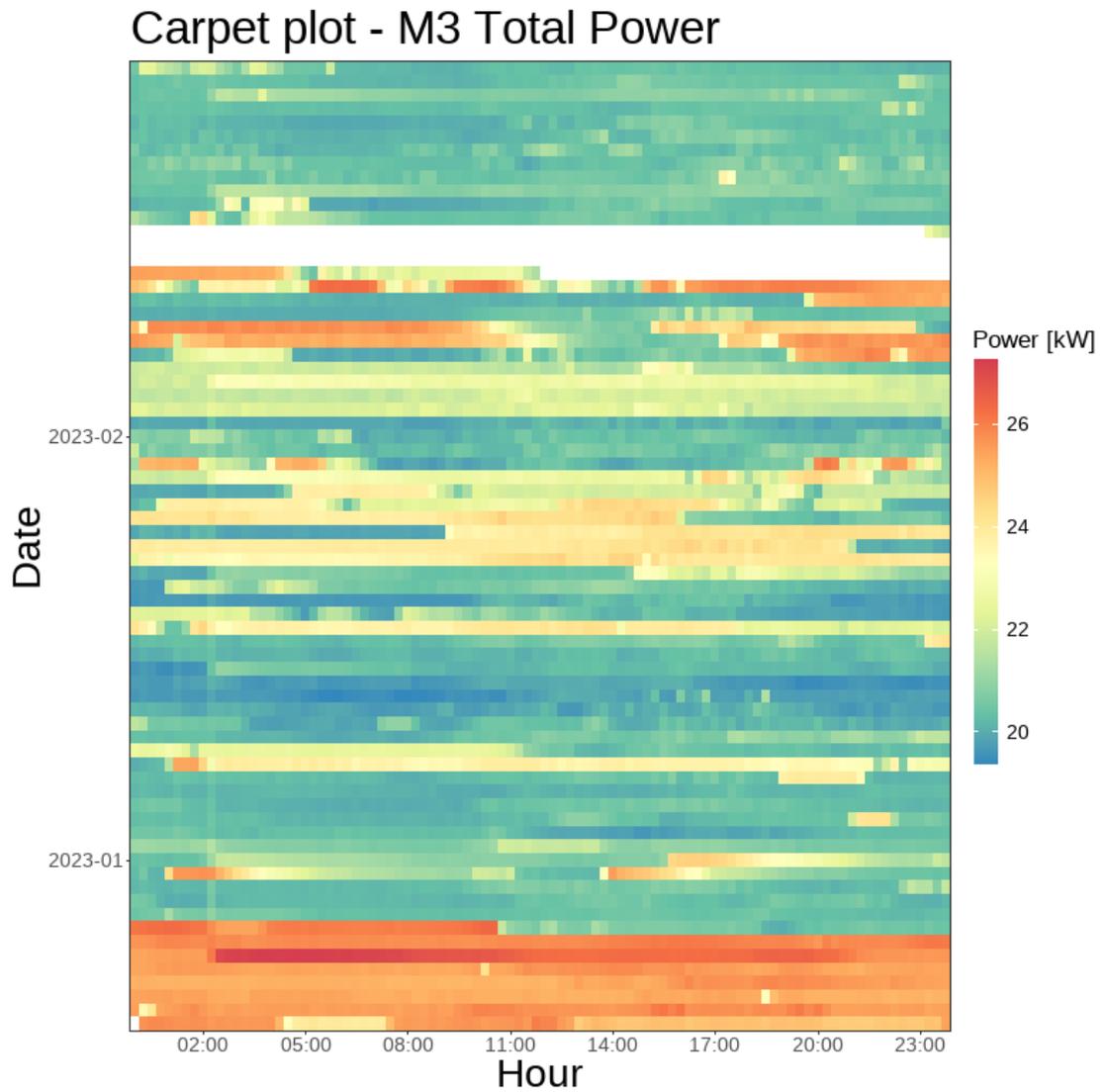
**Figura 4.26:** *Carpet plot* - Temperatura media dell'aria all'interno dell'isola calda del modulo 2

#### 4.1.4 Modulo 3



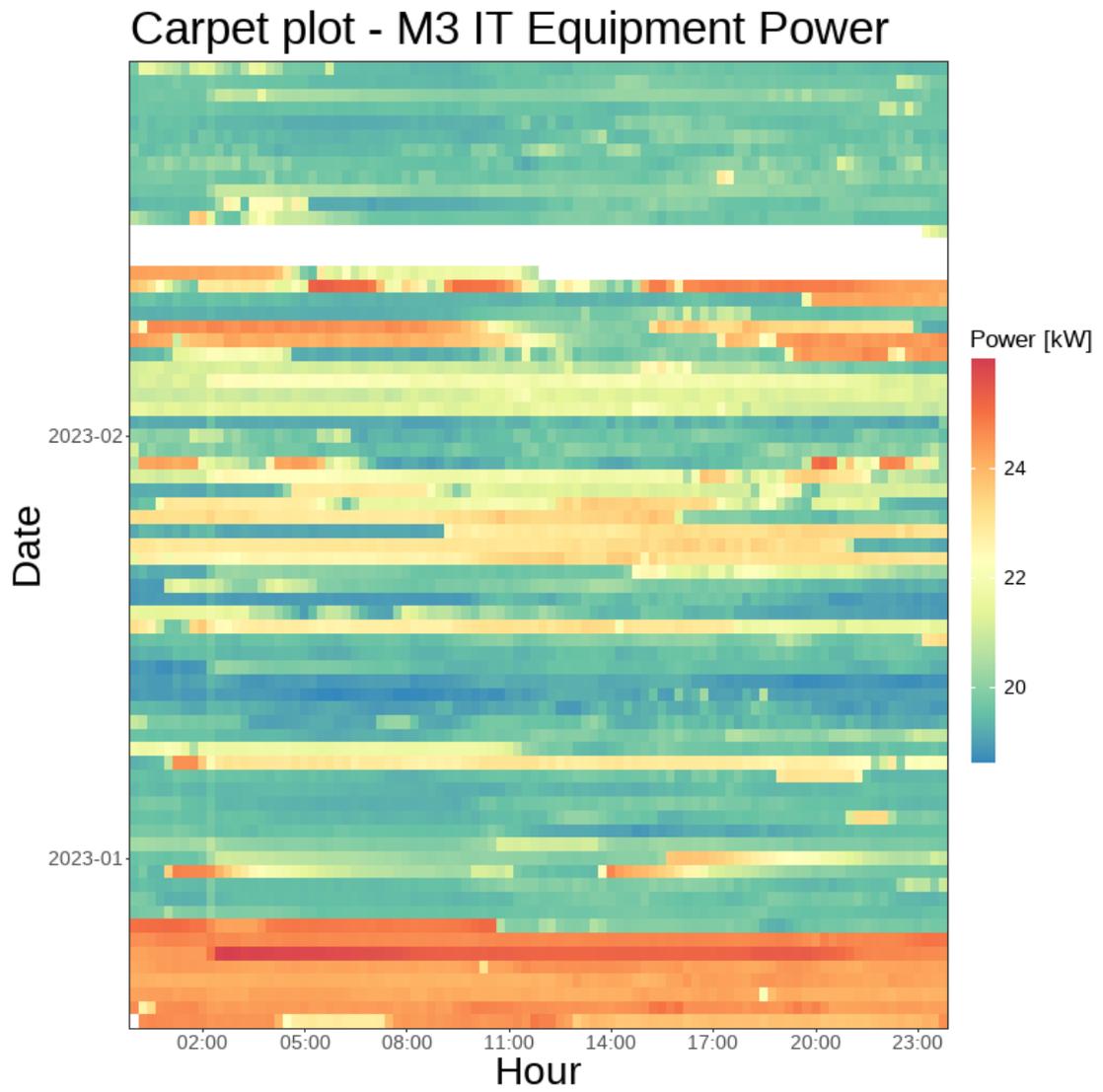
**Figura 4.27:** Andamento della potenza all'interno del modulo 3

Infine, anche per il modulo 3 ci sono le stesse tipologie di andamento da analizzare dei moduli 1 e 2. In Figura 4.27 si può notare come l'andamento preponderante degli *IT equipment* sia comunque molto altalenante. Nello specifico, il primo periodo, fino al 27 dicembre circa, mostra un carico parecchio superiore al resto dei giorni, trend confermato dal *carpet plot* di Figura 4.28 e 4.29; questo carico viene eguagliato puntualmente in brevi periodi durante il periodo di rilevazione, segno che vi è la possibilità di una richiesta di potenza molto alta. Questa è la principale motivazione per la quale anche la potenza attribuita ai ventilatori e le perdite sono molto più alte in quel range temporale (Figure 4.30 e 4.31). Una considerazione da effettuare è che nel modulo 3 sono installati dei sistemi di *High Performance Computing* (HPC) i quali sono progettati per fornire una potenza di calcolo estremamente elevata. Un DC che implementa sistemi HPC può essere in grado di elaborare enormi quantità di dati in tempi molto brevi, consentendo di eseguire complesse analisi di dati e modelli di simulazione, situazione che avviene all'interno del Politecnico di Torino. È plausibile quindi che durante il periodo di fermo dovuto alle vacanze natalizie, si siano effettuate delle analisi che richiedessero l'utilizzo del sistema HPC, portando a dei consumi più elevati. Tuttavia, senza poter sapere quali server fossero puntualmente attivi, è difficile chiarire con certezza

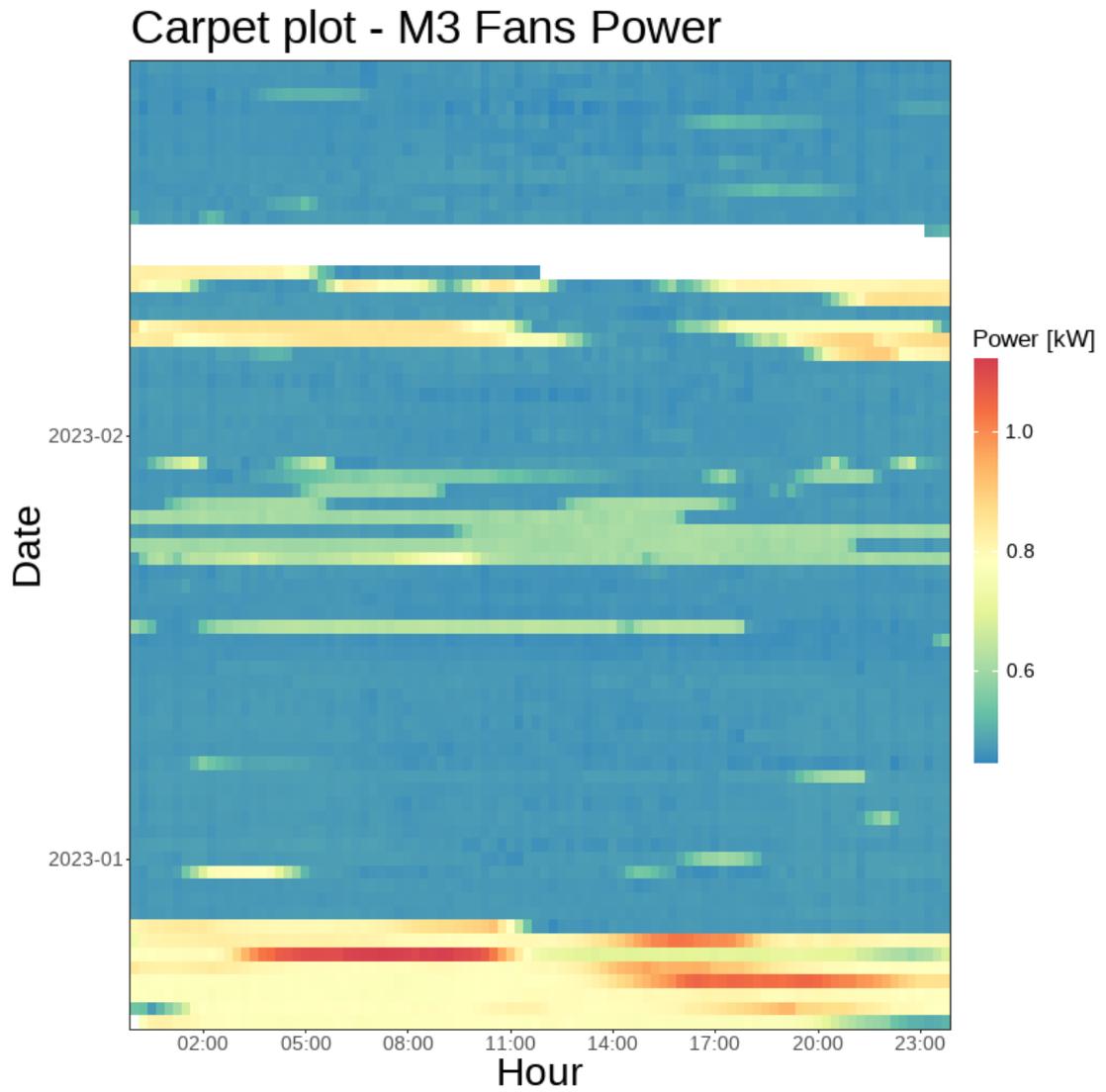


**Figura 4.28:** *Carpet plot* - Potenza totale del modulo 3

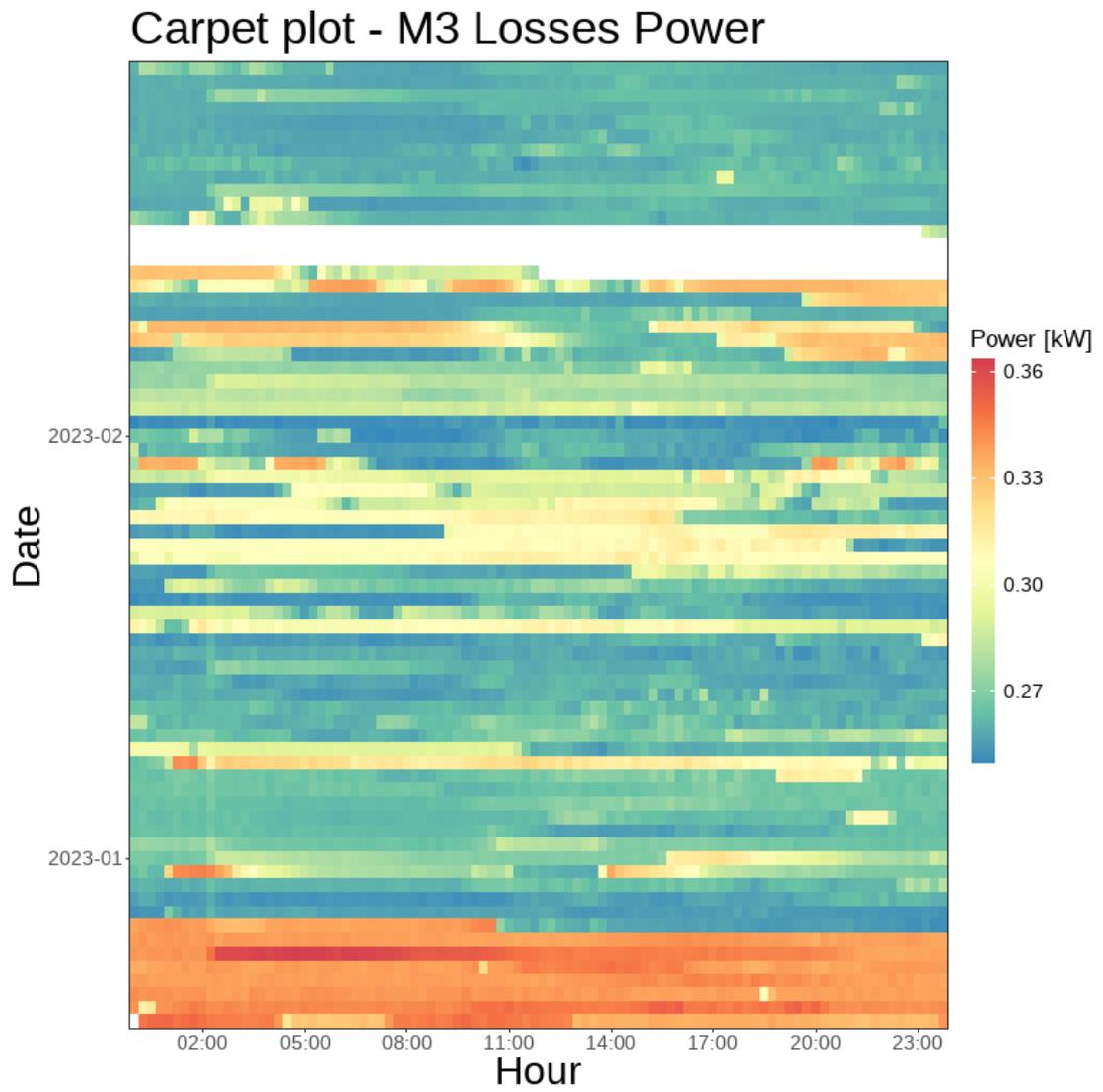
la causa di questa maggior richiesta di potenza. Questa è la principale motivazione per la quale l'andamento dei carichi a livello di DC fosse più alto in questo periodo.



**Figura 4.29:** *Carpet plot - Potenza IT equipment del modulo 3*



**Figura 4.30:** *Carpet plot* - Potenza assorbita dai ventilatori nei CRAC del modulo 3



**Figura 4.31:** *Carpet plot* - Perdite dovute a UPS e batterie del modulo 3

## 4.2 Metriche

Come spiegato nei precedenti capitoli, il calcolo delle metriche nei DC è molto importante in quanto, oltre che a racchiudere in un unico dato molteplici informazioni, consente di eseguirne un monitoraggio, rilevare eventuali anomalie, carpirne i trend di consumo e poter eseguire un *benchmarking* per comprendere se le strategie adottate siano efficienti. Dal momento che nel DC del Politecnico di Torino si effettuano soltanto rilevamenti elettrici, le metriche disponibili riguardano unicamente la potenza elettrica in ingresso alle varie parti costituenti il DC. Le uniche metriche calcolabili, dunque, sono le *Power/Energy metrics*; si sono scelte le metriche da calcolare [63], in base ai dati disponibili oltre che alla loro affidabilità di lettura del dato. Le metriche che si andranno ad analizzare sono le seguenti:

- *Power Usage Effectiveness* (PUE)
- *Power Usage Effectiveness Ratio* (PUEr)
- *Data Center Infrastructure Efficiency* (DCiE)
- *Cooling Load Factor* (CLF)
- *Power Load Factor* (PLF)
- *Other Load Factor* (OLF)
- *Carbon Usage Effectiveness* (CUE)

### 4.2.1 PUE

Il PUE è una metrica introdotta nel 2007 [84] e ben recepita a livello industriale, perchè è di semplice implementazione e rappresenta un parametro di grande valore per comprendere l'efficienza energetica di un DC ed il suo impatto sull'*IT equipment*. Il suo utilizzo è particolarmente indicato per analizzare l'andamento di un impianto nel tempo e valutare gli effetti di scelte progettuali e operative specifiche all'interno del medesimo. A discapito di ciò, non fornisce alcuna guida o conoscenza sull'operatività o la produttività dell'*IT equipment* [83]. Il PUE è calcolato secondo la formula:

$$PUE = \frac{\textit{Total Facility Energy}}{\textit{IT Equipment Energy}} \quad (4.1)$$

dove *Total Facility Energy* è definito come l'energia dedicata complessivamente al DC e per *IT equipment Energy* la quota consumata dagli *IT equipment* utilizzata per gestire, processare, immagazzinare, inviare o ricevere dati. Il *Green Grid* ha anche rilasciato una classificazione in base all'efficienza del PUE [82], riassunta in Tabella

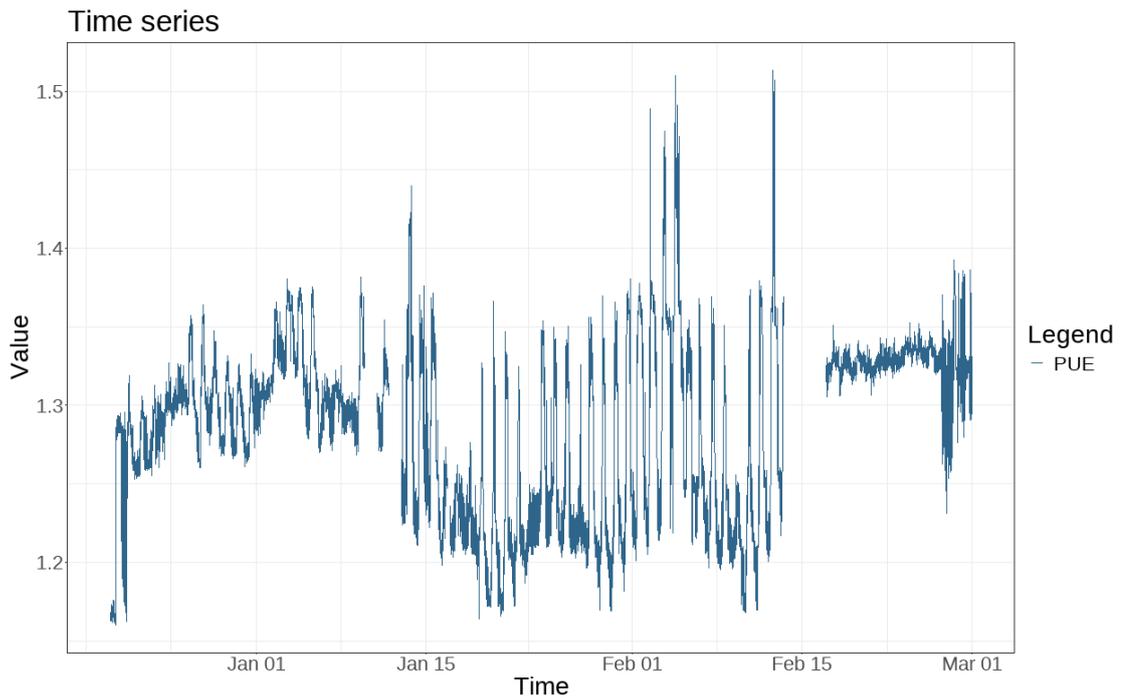
Classe	Range
A	1.15-1.00
B	1.35-1.15
C	1.63-1.35
D	2.00-1.63
E	2.50-2.00
F	3.20-2.50
G	4.20-3.20

**Tabella 4.1:** Classificazione del PUE [82]

	Level 1 (L1) Basic	Level 2 (L2) Intermediate	Level 3 (L3) Advanced
<b>IT Equipment Energy</b>	UPS Outputs	PDU Outputs	IT Equipment Input
<b>Total Facility Energy</b>	Utility Inputs	Utility Inputs	Utility Inputs
<b>Measurement Interval</b>	Monthly/Weekly	Daily/Hourly	Continuous (15 minutes or less)

**Tabella 4.2:** Classificazione dei livelli di misurazione del PUE [83]

4.1, secondo una classificazione in classi che vanno dalla A alla G, in virtù del range di PUE. Il *Green Grid* fornisce inoltre dei livelli di misura del PUE: nel caso del DC del Politecnico di Torino, in base alla classificazione visualizzata in Tabella 4.2, risiede ad un livello intermedio per via della misurazione del consumo degli *IT equipment* alla sola PDU. Una piccola precisazione deve essere fatta riguardo il rapporto scritto nell'Eq. 4.1, in quanto il *Green Grid* in alcuni testi fa riferimento al rapporto tra potenze [84] mentre in altri all'energia [83]: in sostanza le due diciture sono equivalenti, in quanto il PUE, come spiegato da *Green Grid*, può essere una misura puntuale ma anche riferita ad un range temporale. Sostituendo all'Eq. 4.1 i termini utilizzati per esplicitare le grandezze rilevate e ricavate dal



**Figura 4.32:** Andamento del PUE

DC del Politecnico di Torino, si ottiene la formula:

$$PUE = \frac{DC-TOT}{DC-ITEq} \quad (4.2)$$

Eseguendo il rapporto, dunque, si può ottenere un andamento con un intervallo di 15 minuti del PUE (Eq. 4.2); andando poi a mediare questo dato si ha la possibilità di visualizzarlo come una classificazione giornaliera con un *calendar plot*. Il primo grafico è visibile in Figura 4.32: in questa particolare *time series* si può notare come il PUE vari molto durante l'arco delle ore, andamento probabilmente influenzato dai *chiller*, infatti producendo un grafico complementare, visibile in Figura 4.33 si può notare come il PUE segua in maniera quasi fedele quella delle macchine frigorifere. In Figura 4.34 è possibile visualizzare un *calendar plot* con la classificazione giornaliera del PUE. Il PUE, essendo basso, porta ad avere una classe di efficienza tra la B e la C. Bisogna, tuttavia, considerare che l'analisi viene svolta in un periodo invernale in cui i *chiller* operano in *free cooling* indiretto, riducendo molto il carico assorbito e quindi diminuendo il PUE. Il PUE medio calcolato sul periodo di riferimento è infatti di 1.29, un ottimo risultato dato che, come termine paragone, la media globale si attesta a 1.55 [85], tuttavia, bisogna continuare a monitorarne l'andamento poiché nei periodi più caldi tale risultato potrebbe variare ed anche sensibilmente.

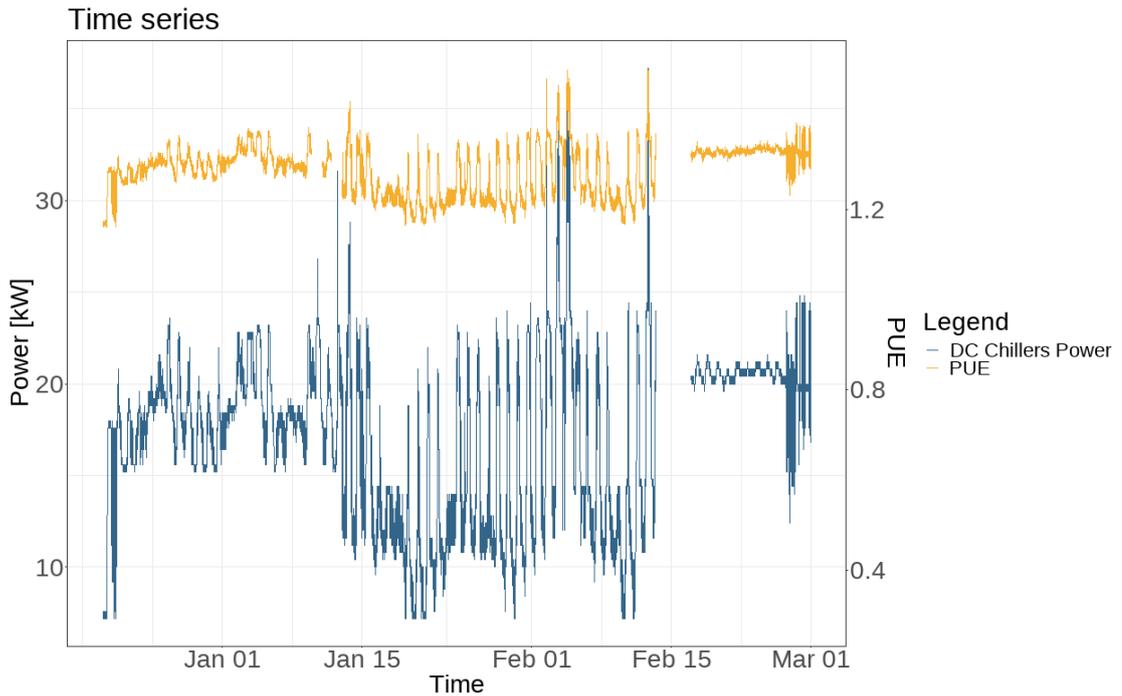


Figura 4.33: Andamento del PUE in confronto a quello dei *chiller*

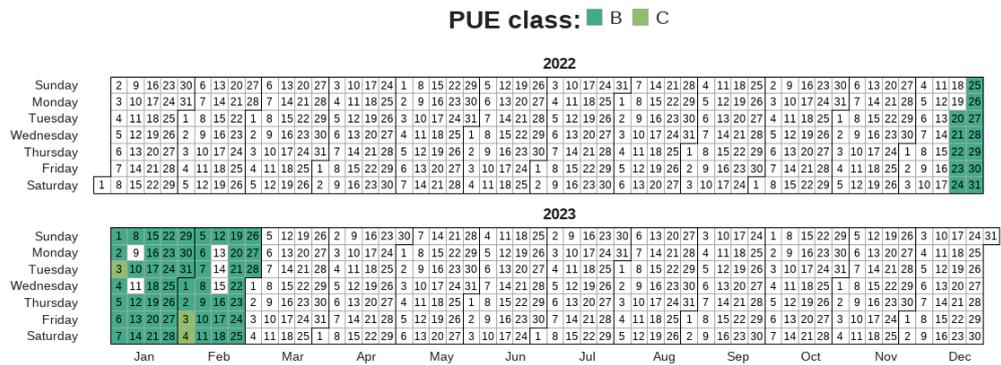


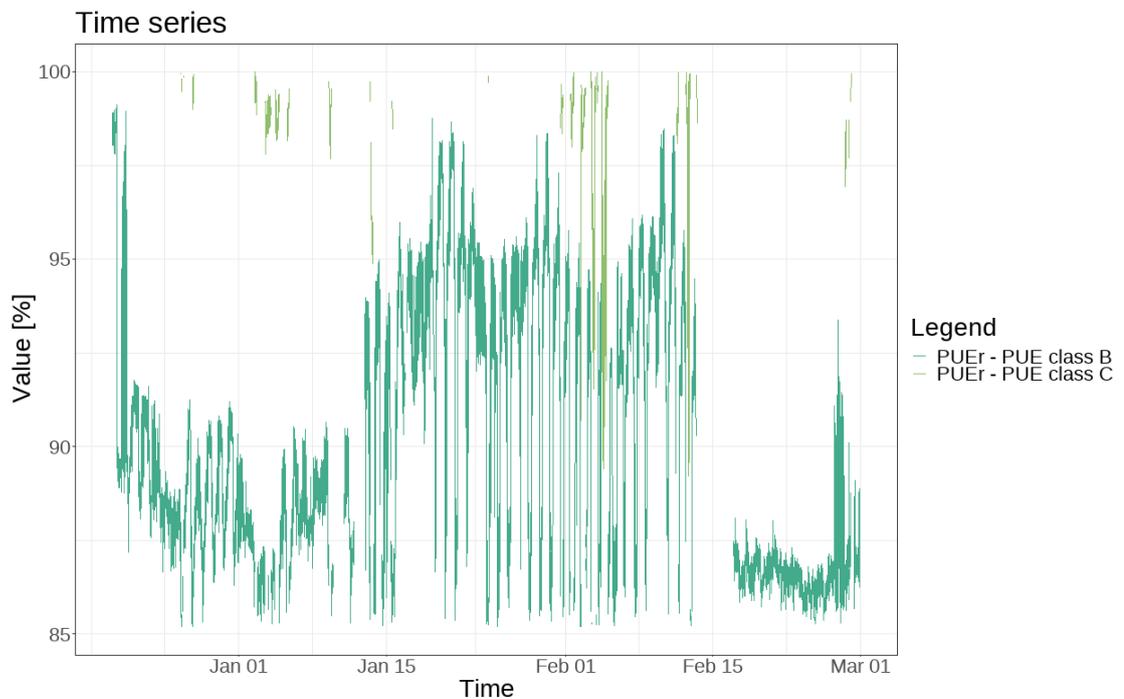
Figura 4.34: Classificazione giornaliera del PUE

## 4.2.2 PUEr

Il PUEr è una metrica di efficienza energetica che utilizza la misura del PUE come punto di riferimento per valutare le prestazioni energetiche previste o attese del DC.

Classe PUE	Range PUE	Range PUEr
A	1.15-1.00	87-100%
B	1.35-1.15	85-100%
C	1.63-1.35	83-100%
D	2.00-1.68	81.5-100%
E	2.50-2.00	80-100%
F	3.20-2.50	78-100%
G	4.20-3.20	76-100%

**Tabella 4.3:** Classificazione del PUEr [82]



**Figura 4.35:** Andamento del PUEr evidenziando la classe di appartenenza del PUE

In sostanza, il PUEr consente di confrontare le prestazioni effettive del DC con le prestazioni ideali o attese, al fine di individuare eventuali margini di miglioramento

dell'efficienza energetica [82]. Esso è dunque definito come:

$$PUEr(X) = \frac{PUE_{ref}(X)}{PUE_{actual}} * 100 \quad (4.3)$$

dove il  $PUE_{ref}(X)$  di riferimento è il PUE più basso nella classe di efficienza energetica X. L'espressione di questo rapporto rappresenta le deviazioni dal progetto previsto e, insieme alla classe, le inefficienze di funzionamento. In sostanza, il PUEr dice quanto si è efficienti in una determinata classe di PUE. Esso è espresso in percentuale ed in Tabella 4.3 vi è la sua classificazione con i relativi range di valori, per ogni classe di PUE. Anche in questo caso è possibile visualizzare il PUEr con un andamento ad intervalli di 15 minuti, ma, andando a mediare i valori, è anche possibile ottenere un andamento giornaliero. Come da definizione, la sua efficienza dipende dalla classe in cui risiede, per cui bisogna accostarlo al PUE per rendere più chiaro il suo valore. Per questo motivo in Figura 4.35 si sono distinti con due colori le classificazioni del PUE. Si può notare come il PUEr abbia dei valori medi in classe B dove il PUE risiede per la maggior parte del tempo. Solo per poco tempo il PUE rimane in classe C, tuttavia il PUEr in quei range temporali ha un valore molto alto, tendente al 100%. Questo implica che in determinate condizioni il DC può scendere in classe C per quanto riguarda il PUE, ma in tale classe esso ha un'efficienza molto alta.

### 4.2.3 DCiE

Classe PUE	Range PUE	Range DCiE
A	1.15-1.00	87-100%
B	1.35-1.15	74-87%
C	1.63-1.35	61-74%
D	2.00-1.63	50-61%
E	2.50-2.00	40-50%
F	3.20-2.50	31-40%
G	4.20-3.20	24-31%

**Tabella 4.4:** Classificazione del PUEr [82]

Nel 2007 è stata introdotta la metrica di efficienza DCiE insieme al PUE, la quale ha sostituito la precedente metrica chiamata *Data Center Efficiency* (DCE).

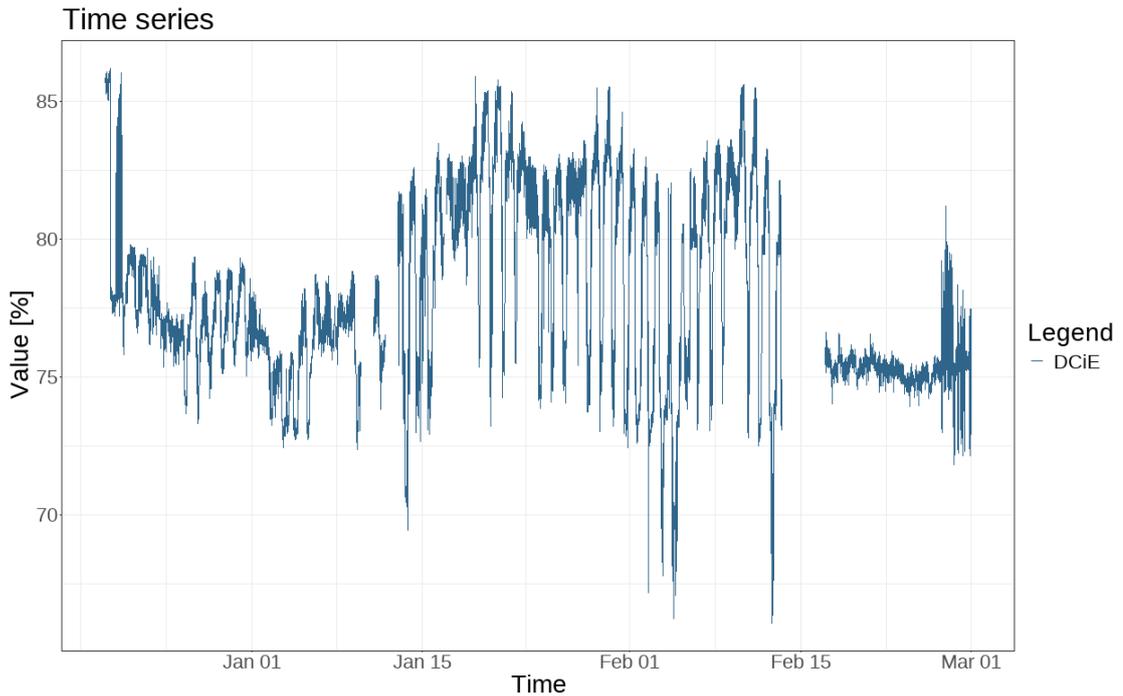


Figura 4.36: Andamento del DCiE

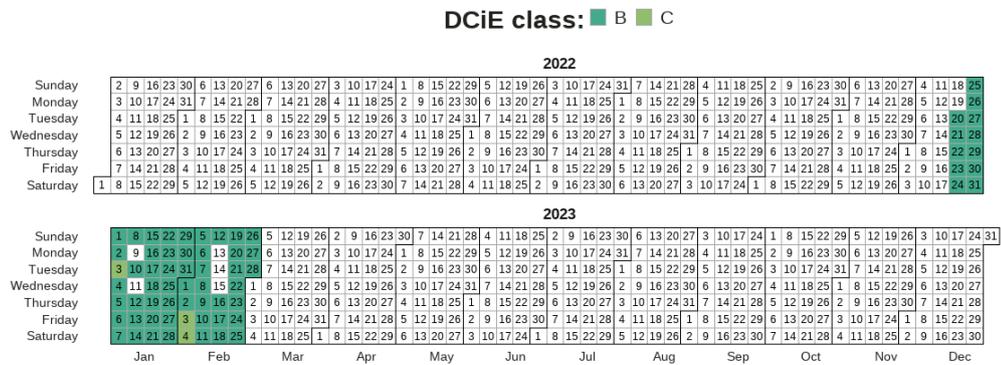


Figura 4.37: Classificazione giornaliera del DCiE

Sebbene il DCE e il DCiE vengano calcolati allo stesso modo, il *Green Grid* ha deciso di apportare questa modifica poiché la definizione di efficienza all'interno di un DC risultava poco chiara e di conseguenza la metrica precedente aveva avuto scarso successo [84]. Nonostante ciò, la metrica viene comunque poco utilizzata,

lasciando spazio al PUE, di più facile intuizione. La metrica DCiE è calcolata nel seguente modo:

$$DCiE = \frac{IT\ Equipment\ Energy}{Total\ Facility\ Energy} * 100 = \frac{1}{PUE} * 100 \quad (4.4)$$

rendendola di fatto il reciproco del PUE. Essa è espressa in percentuale, e, in seguito alla classificazione eseguita per il PUE, è possibile ricavare una classificazione anche per questa metrica in 7 classi, dalla A alla G, come riportato in Tabella 4.4. Si riporta dunque in Figura 4.36 la *time series* del DCiE, il cui grafico ha un andamento uguale a quello del PUE ma specchiato secondo un'orizzontale essendo uno l'inverso dell'altro. Vi è anche un *carpet plot* in Figura 4.37, del tutto analogo a quello del PUE in Figura 4.34.

#### 4.2.4 CLF e PLF

La formula del PUE può essere scorporata secondo tre termini [84, 86]:

$$PUE = \frac{Total\ Facility\ Energy}{IT\ Equipment\ Energy} = 1 + CLF + PLF \quad (4.5)$$

dove

$$1 = \frac{IT\ Equipment\ Energy}{IT\ Equipment\ Energy} \quad (4.6)$$

rappresenta il carico degli IT normalizzato per sé stesso, di fatto producendo il valore 1. Mentre

$$CLF = \frac{Cooling\ Energy}{IT\ Equipment\ Energy} \quad (4.7)$$

ed infine

$$PLF = \frac{Dissipated\ Energy}{IT\ Equipment\ Energy} \quad (4.8)$$

andando a definire 2 nuove metriche, il *Cooling Load Factor* (CLF) e il *Power Load Factor* (PLF), che verranno trattate specificatamente di seguito.

#### PLF

La metrica del PLF viene definita come l'energia totale dissipata dagli *switchgear*, dagli UPS, dai sistemi di distribuzione dell'energia elettrica (PDU), ecc., divisa per l'energia richiesta dagli *IT equipment* [84, 86] (Eq. 4.8). Per questa metrica il *Green Grid* non ha rilasciato molte altre informazioni a riguardo, tuttavia in letteratura un valore tipico è attorno a 0.04 e 0.05 per DC di grandi dimensioni [87]. Il DC del Politecnico di Torino è classificabile come piccolo DC, di conseguenza il PLF sarà necessariamente minore. Per poter effettivamente quantificare il PLF

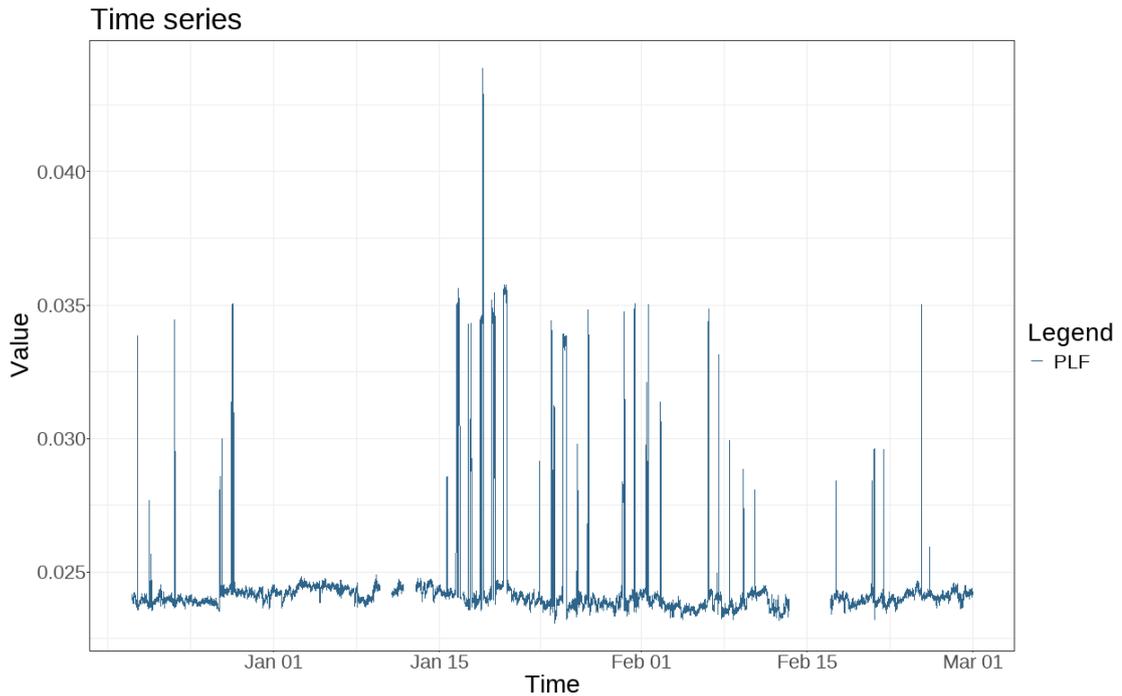


Figura 4.38: Andamento del PLF

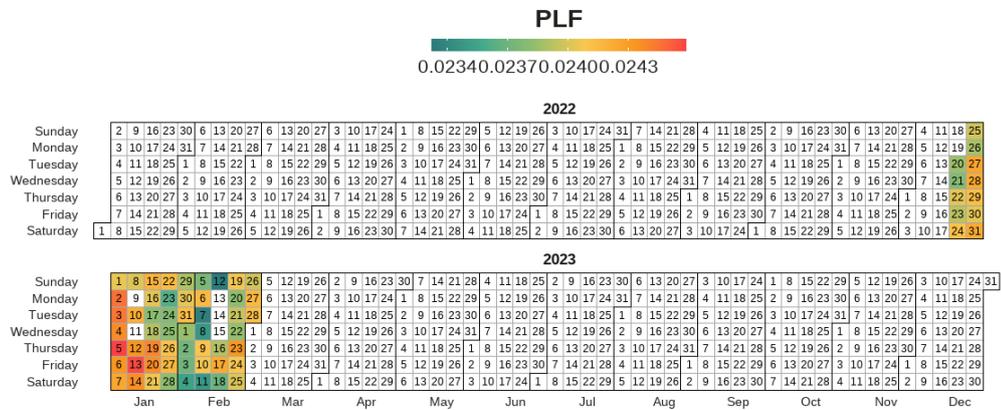


Figura 4.39: Classificazione giornaliera del PLF

nel caso in esame, si necessita di sfruttare la relazione  $PUE = 1 + CLF + PLF$ , dato che il termine CLF può essere calcolato agevolmente secondo l'Eq. 4.9. Si riporta dunque la *time series* in Figura 4.38, in cui è possibile notare che, a parte qualche valore sporadicamente superiore, la media si attesta attorno a 0.025, come

confermato dai calcoli effettuati. Quel che è più importante è che come valore è abbastanza costante, di fondamentale importanza per le considerazioni a seguire sul CLF. In Figura 4.39 vi è una rappresentazione del valore medio giornaliero assunto dal PLF.

### CLF

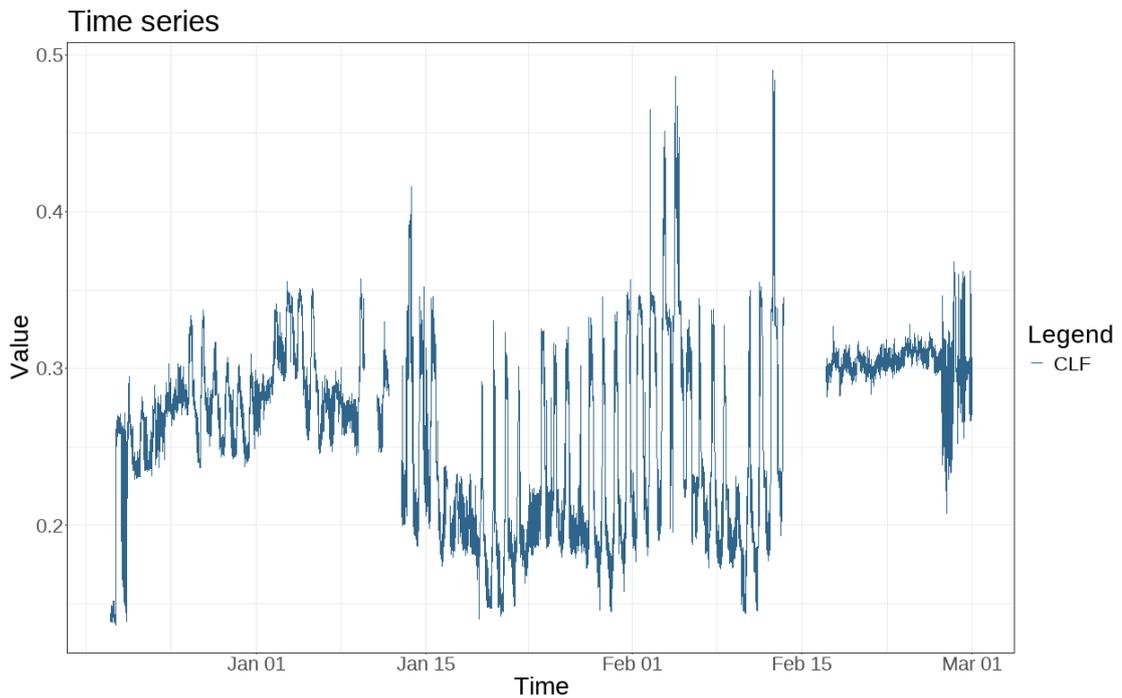
Classe PUE e CLF	Range PUE	Range CLF
A	1.15-1.00	0.125-0.00%
B	1.35-1.15	0.325-0.125%
C	1.63-1.35	0.605-0.325%
D	2.00-1.63	0.975-0.605%
E	2.50-2.00	1.475-0.975%
F	3.20-2.50	2.175-1.475%
G	4.20-3.20	3.175-2.175%

**Tabella 4.5:** Classificazione del CLF creata a partire da un valore di PLF costante e pari a 0.025

La metrica del CLF viene definita come l'energia totale consumata dai *chiller*, dalle torri di raffreddamento, dai condizionatori d'aria della sala computer (CRAC), dalle pompe, ecc., normalizzata per l'energia degli *IT equipment* [84],[86] (Eq. 4.7). Nonostante il *Green Grid* non abbia fornito molte altre informazioni su questa specifica metrica, è possibile calcolarla nel caso in esame, poiché il termine *Cooling Energy* è riconducibile alla sommatoria tra il consumo dei *chiller* oltre che dei ventilatori che servono i CRAC dell'intero DC.

$$CLF = \frac{Cooling\ Energy}{IT\ Equipment\ Energy} = \frac{DC-CH + DC-FAN}{DC-ITEq} \quad (4.9)$$

Una sua eventuale classificazione non è disponibile in letteratura, tuttavia, essendo che il PLF può essere assunto come costante e pari a 0.025 visti i risultati ottenuti e anche dalla letteratura di riferimento [87], opportunamente adattata al nostro caso, è possibile ricavare una classificazione del CLF visualizzato in Tabella 4.5, sfruttando la relazione  $PUE = 1 + CLF + PLF$ , tranne nella situazione in cui il PUE sia pari a 1. In quest'ultimo caso infatti, necessariamente il PLF dovrà essere pari a 0 per definizione. Si produce quindi la *time series* in Figura 4.7 la quale



**Figura 4.40:** Andamento del PLF

ha un andamento molto simile al PUE e di conseguenza ai *chiller* (Figura 4.41). Infine in Figura 4.42 è presente un *calendar plot* con la classificazione giornaliera del CLF.

#### 4.2.5 OLF

La metrica OLF [88] viene impiegata per considerare i costi energetici di un sistema di DC che non appartengono al sistema HVAC (*Heating, Ventilation and Air Conditioning*) o che vengono dissipati durante le trasformazioni di energia elettrica (perdite del sistema energetico), come ad esempio l'energia consumata dalle luci [63]. Nel caso in esame è possibile calcolare molto agevolmente tale metrica, dato che si hanno i dati di rilevamento puntuali dei servizi ausiliari, quali luci, prese di corrente e sistemi di condizionamento. Questi ultimi vengono etichettati come servizi ausiliari dato che concorrono solamente al raffrescamento della stanza ma non a quello degli *IT equipment*. La metrica viene quindi definita come:

$$OLF = \frac{\text{Other Uses Energy}}{\text{IT Equipment Energy}} = \frac{DC-AUX}{DC-ITEq} \quad (4.10)$$

Vengono quindi raffigurati in Figura 4.43 la *time series* del OLF e invece in Figura 4.44 l'andamento giornaliero. In questo caso i valori della *time series* hanno dei

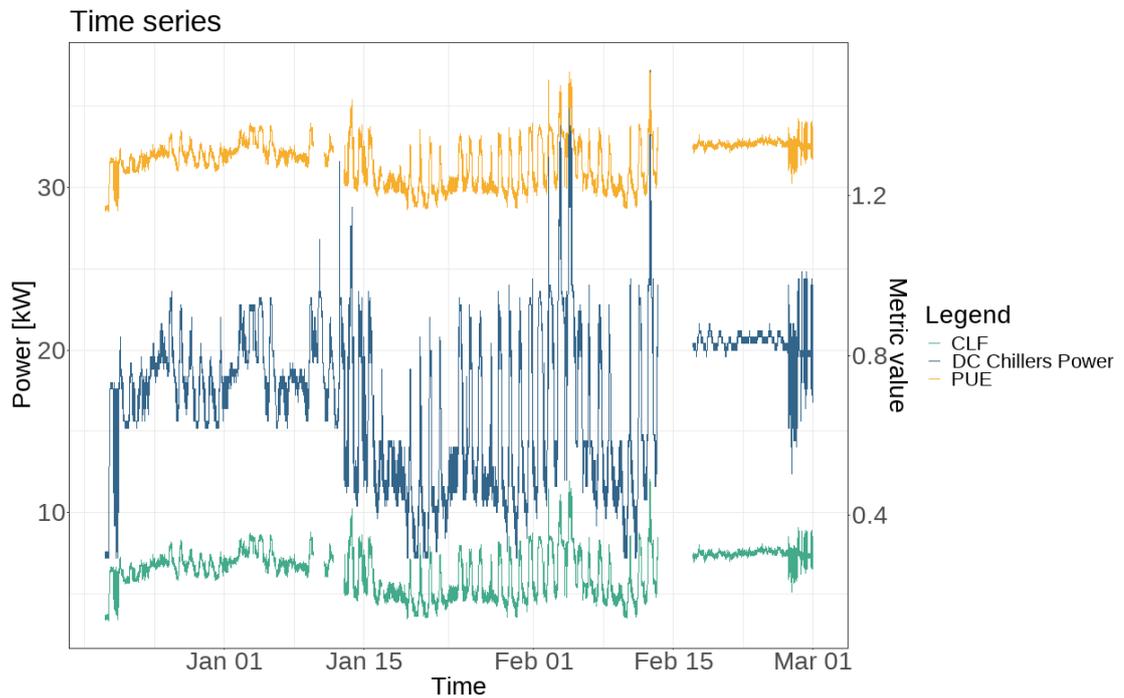


Figura 4.41: Andamento del CLF confrontato con il consumo dei *chiller* e il PUE

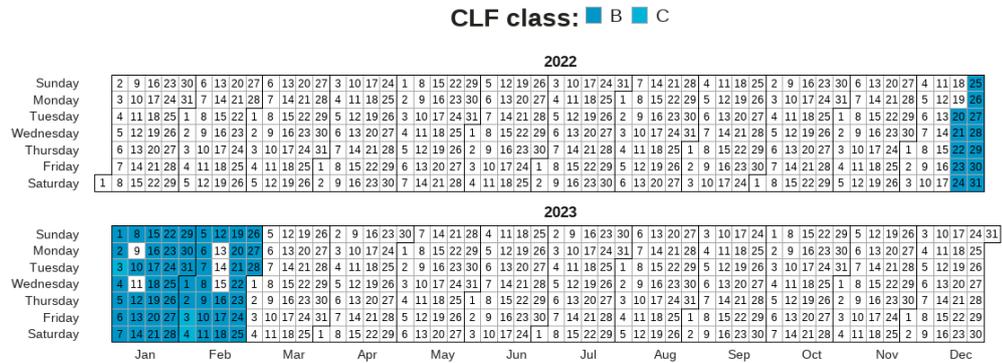


Figura 4.42: Classificazione giornaliera del CLF

piccoli picchi riconducibili all'azionamento momentaneo dei condizionatori interni. In media, dunque, il valore di tale metrica è attorno al 0.2%, quindi decisamente poco incisiva, almeno in questo periodo dell'anno, rispetto agli *IT equipment*.

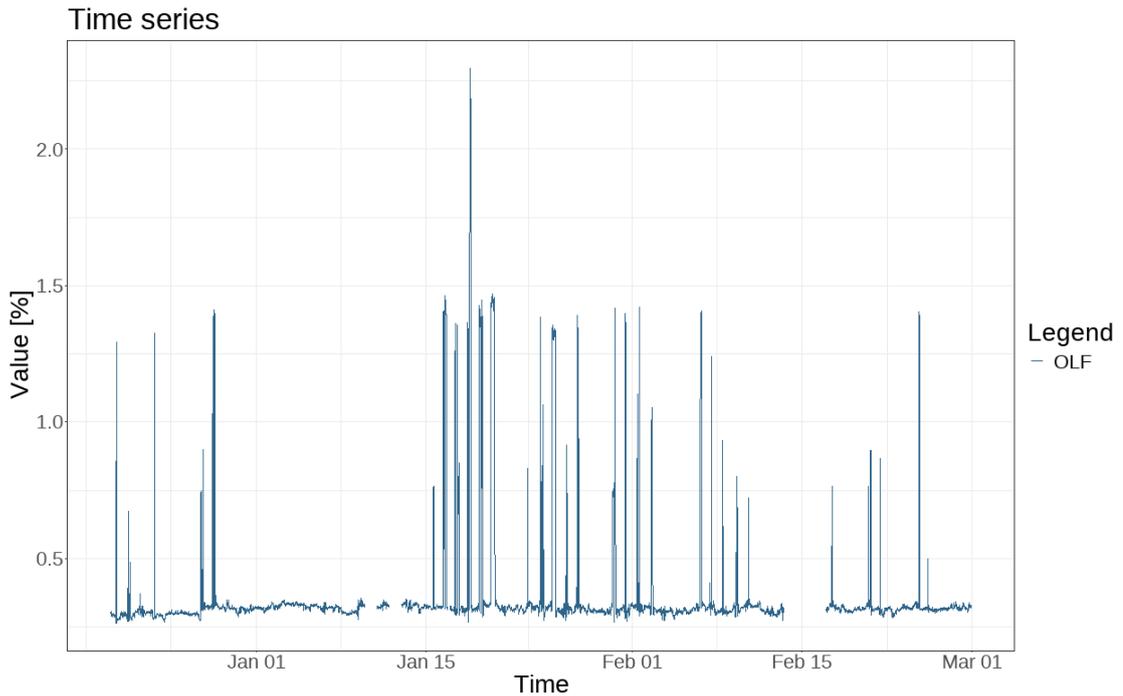


Figura 4.43: Andamento del OLF

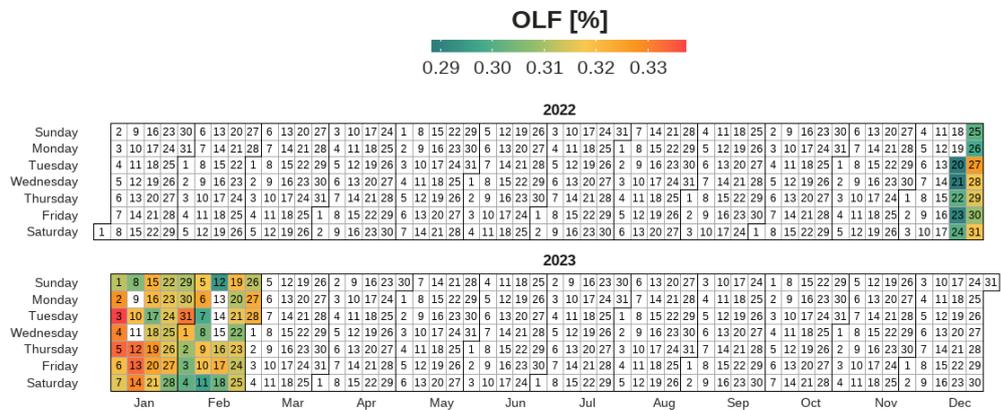
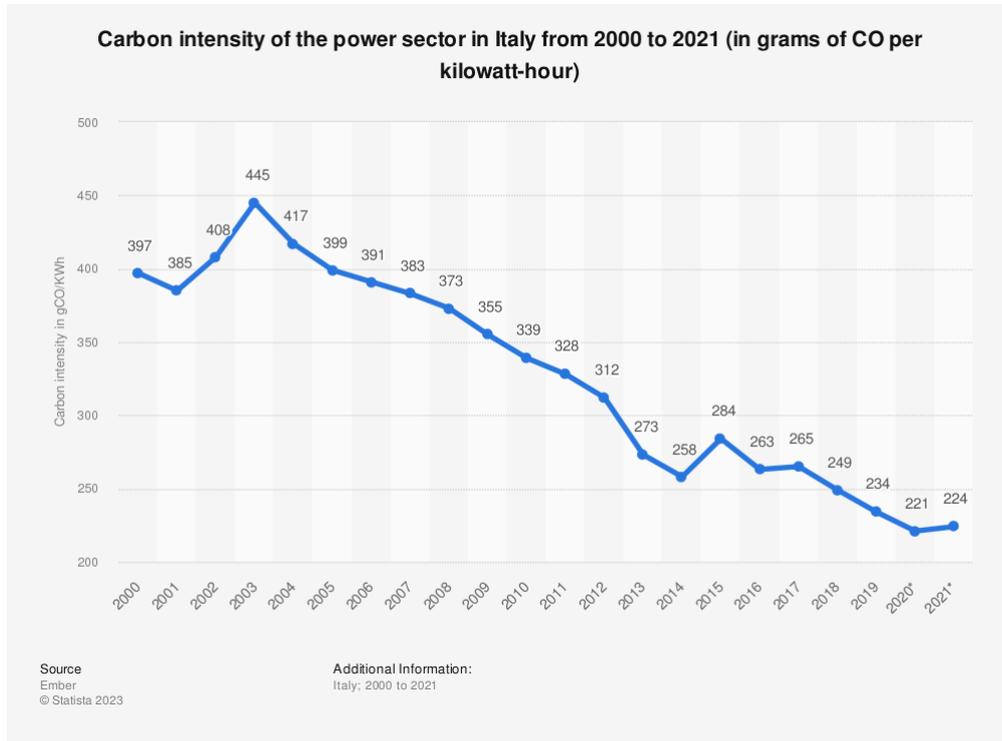


Figura 4.44: Andamento giornaliero del OLF

### 4.2.6 CUE

Per affrontare le problematiche legate alle emissioni di carbonio associate ai DC, il *Green Grid* ha introdotto una nuova metrica chiamata *Carbon Usage Effectiveness*



**Figura 4.45:** Trend del CEF in Italia [89]

(CUE) [90]. Questa metrica è calcolata come:

$$CUE = \frac{\text{Total CO}_2 \text{ emission caused by the Total Data Center Energy}}{\text{IT Equipment Energy}} \quad (4.11)$$

la quale viene ricondotta a:

$$CUE = \frac{\text{CO}_2 \text{ emitted (kgCO}_2\text{eq)}}{\text{unit of energy (kWh)}} \cdot \frac{\text{Total Data Center Energy}}{\text{IT Equipment Energy}} = CEF \cdot PUE \quad (4.12)$$

dove CEF è il *Carbon Emission Factor* del sito cui è costruito il DC, ricavabile dai dati pubblicati dalle autorità governative. Nel caso del Politecnico di Torino, l'energia elettrica per poter far operare il DC è interamente prelevata dalla rete, per cui il CEF vale 224 gCO<sub>2</sub>eq/kWh [89] visibile in Figura 4.45. Nonostante non ci siano range o valori tipici definiti per questa metrica, si comprende implicitamente che un valore tendente a 0 è preferibile. Applicando la formula si otterranno dunque dei valori del tutto proporzionali con il PUE, visibili in Figura 4.46 con la *time series* ed in Figura 4.47 con il *calendar plot*. Tale dato con un valore medio attorno a 0.30 kgCO<sub>2</sub>eq/kWh, seppur basso di valore, dato che il valore minimo possibile è 0.0 kgCO<sub>2</sub>eq/kWh, porta comunque l'attenzione al fatto che il Politecnico di Torino

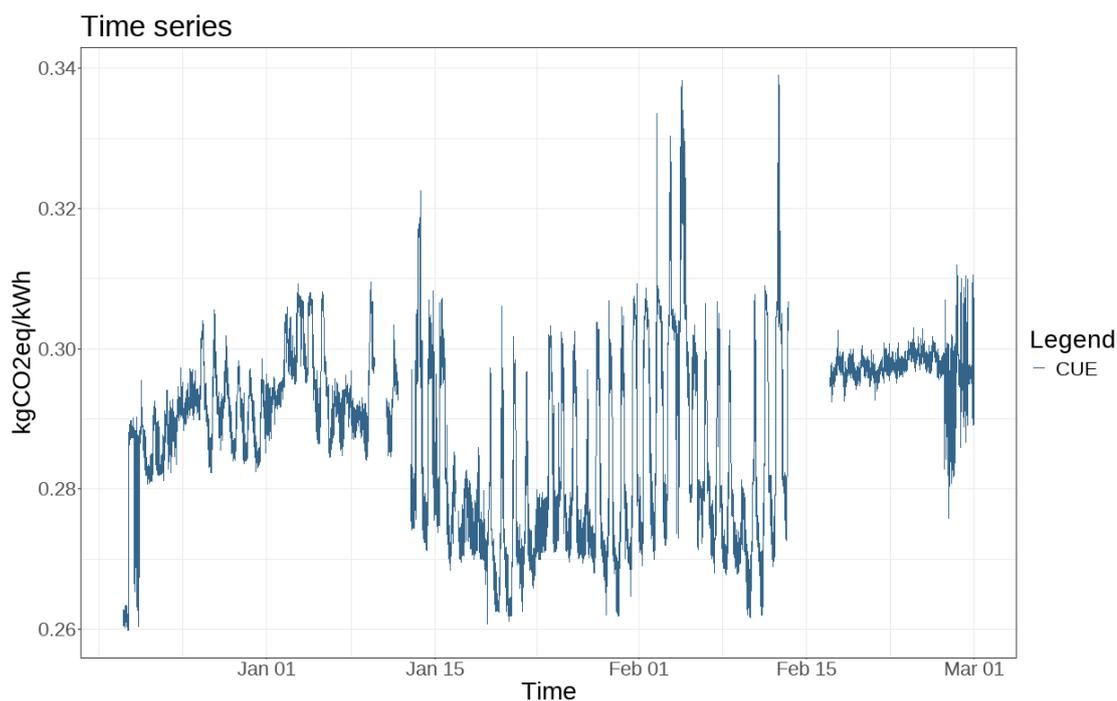


Figura 4.46: Andamento del CUE

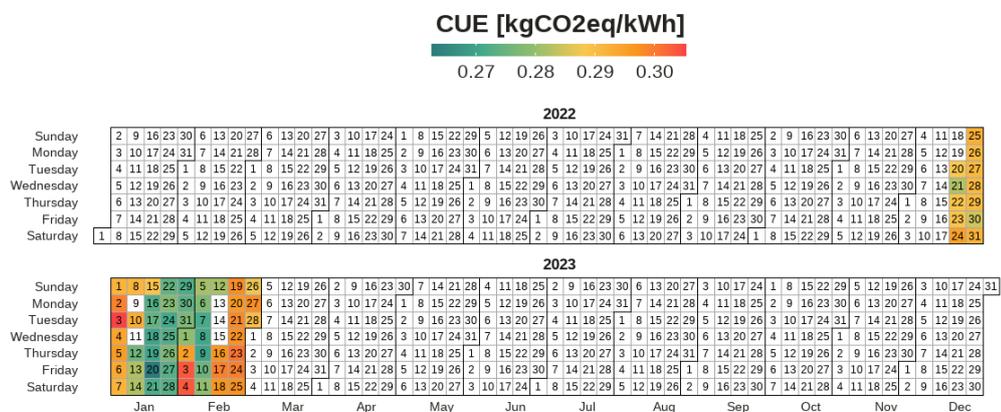


Figura 4.47: Andamento giornaliero del CUE

non sfrutta la possibile installazione di eventuali pannelli fotovoltaici per abbassare l'impatto ambientale del DC. In seguito all'installazione di pannelli fotovoltaici sarebbe anche possibile calcolare l'efficienza di utilizzo di questa energia rinnovabile e paragonarla all'energia che invece deriva da fonti fossili.

## 4.3 EIS

In seguito ad un'analisi approfondita dei consumi all'interno del DC, si è proceduto allo sviluppo di un sistema di *Energy Information System* (EIS). Un EIS rappresenta un insieme di software basati su web, hardware per l'acquisizione dei dati e sistemi di comunicazione utilizzati per archiviare, analizzare e visualizzare i dati energetici relativi agli edifici, compresi metodi di analisi quali il *baselining*, il *benchmarking*, il *load profiling* e la rilevazione di eventuali anomalie energetiche [91]. Nel caso di un DC lo sviluppo di una *dashboard* per poter monitorare al meglio i consumi ed eventuali anomalie è molto importante, in quanto le rilevazioni in gioco sono molteplici e senza uno strumento facile ed intuitivo è molto difficile gestire il quantitativo ingente di informazioni. A tal fine, dunque, si è utilizzato il pacchetto *Shiny* nel linguaggio *R* per lo sviluppo della *dashboard*, in quanto consente l'opportunità di condividere tale *dashboard* in web, dando eventualmente l'accesso agli addetti anche da remoto per il continuo monitoraggio. Sfruttando il pacchetto di *R* chiamato *shinydashboard* si è impostata la *dashboard* suddivisa in vari TAB per organizzare il contenuto in diverse sezioni. Quando si clicca su uno di questi pulsanti, si accede alla corrispondente sezione di contenuti. In questo modo, l'interfaccia può fornire accesso rapido e intuitivo a diverse sezioni o funzionalità, rendendo più facile la navigazione e l'organizzazione dei dati. Momentaneamente i TAB sviluppati l'analisi energetica e la visualizzazione delle metriche calcolate, secondo i TAB chiamati:

- *Energy Consumption Analysis*
- *Efficiency Metrics*

Al di sopra di questi ultimi, è stato inserito un selettore temporale, dando la possibilità di visionare vari periodi semplicemente impostando le date di inizio e fine. Di seguito verrà descritta la *dashboard* prodotta riportando degli screenshot di quest'ultima, suddividendola nei vari TAB.

### 4.3.1 *Energy Consumption Analysis*

Il TAB riguardante l'*Energy Consumption Analysis* è stato suddiviso in due sezioni. La prima tratta l'*Energy consumption and Power Analysis of the Data Center*, in cui è possibile visionare vari grafici e valori per poter effettuare delle analisi a livello di DC. Come visibile in Figura 4.48 nella parte alta si ritrovano 6 grandezze riguardanti:

- L'ultima lettura di potenza rilevata del range temporale scelto
- L'energia totale del DC consumata

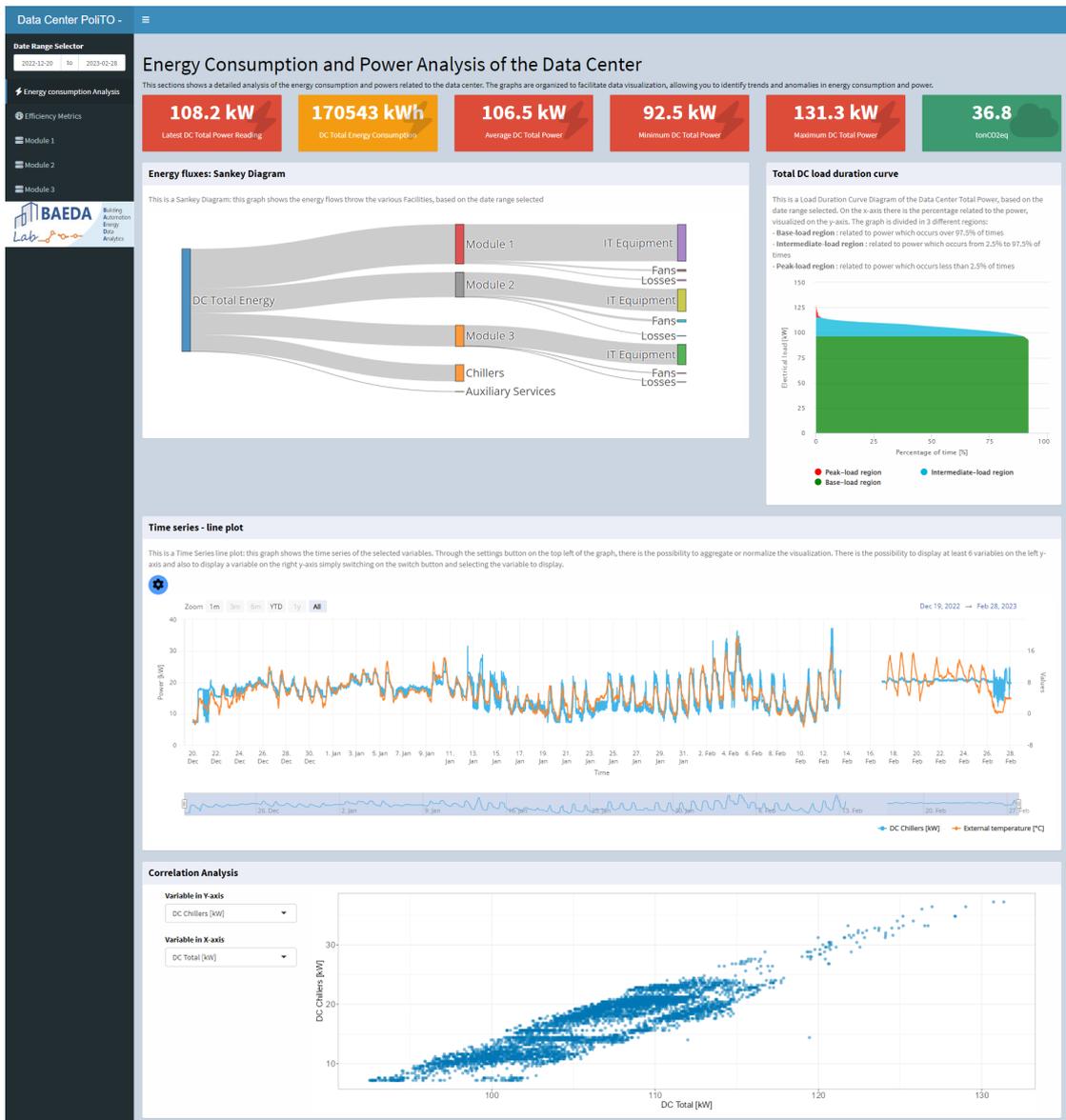


Figura 4.48: TAB: Energy Consumption Analysis - Energy consumption and Power Analysis of the Data Center

- La potenza media del DC
- La potenza minima del DC
- La potenza massima del DC
- Le tonnellate di CO2 equivalente prodotte nel periodo di tempo selezionato



Figura 4.49: Selettore grandezze sull'asse sinistro della *time series*



Figura 4.50: Selettore grandezze sull'asse destro della *time series*

Appena sotto sono visibili due grafici. Il primo è il *sankey diagram*, in cui è possibile visionare i flussi energetici del DC e, semplicemente posizionando il cursore del mouse sopra una variabile, appare una finestra pop-up, che ne mostra il valore. Questo grafico, come precedentemente citato, è molto importante per avere un riscontro visibile dei flussi energetici all'interno del DC. Sulla sua destra è visibile una curva di durata, la quale distingue tre regioni:

1. Regione di *base-load*, la quale racchiude al suo interno tutti i valori che avvengono oltre il 97.5% delle letture
2. Regione di *intermediate-load*, che mostra i valori di potenza che occorrono tra il 2.5% e il 97.5% delle letture
3. Regione di *peak-load*, la quale è riferita alle potenze che occorrono meno del 2.5% delle letture



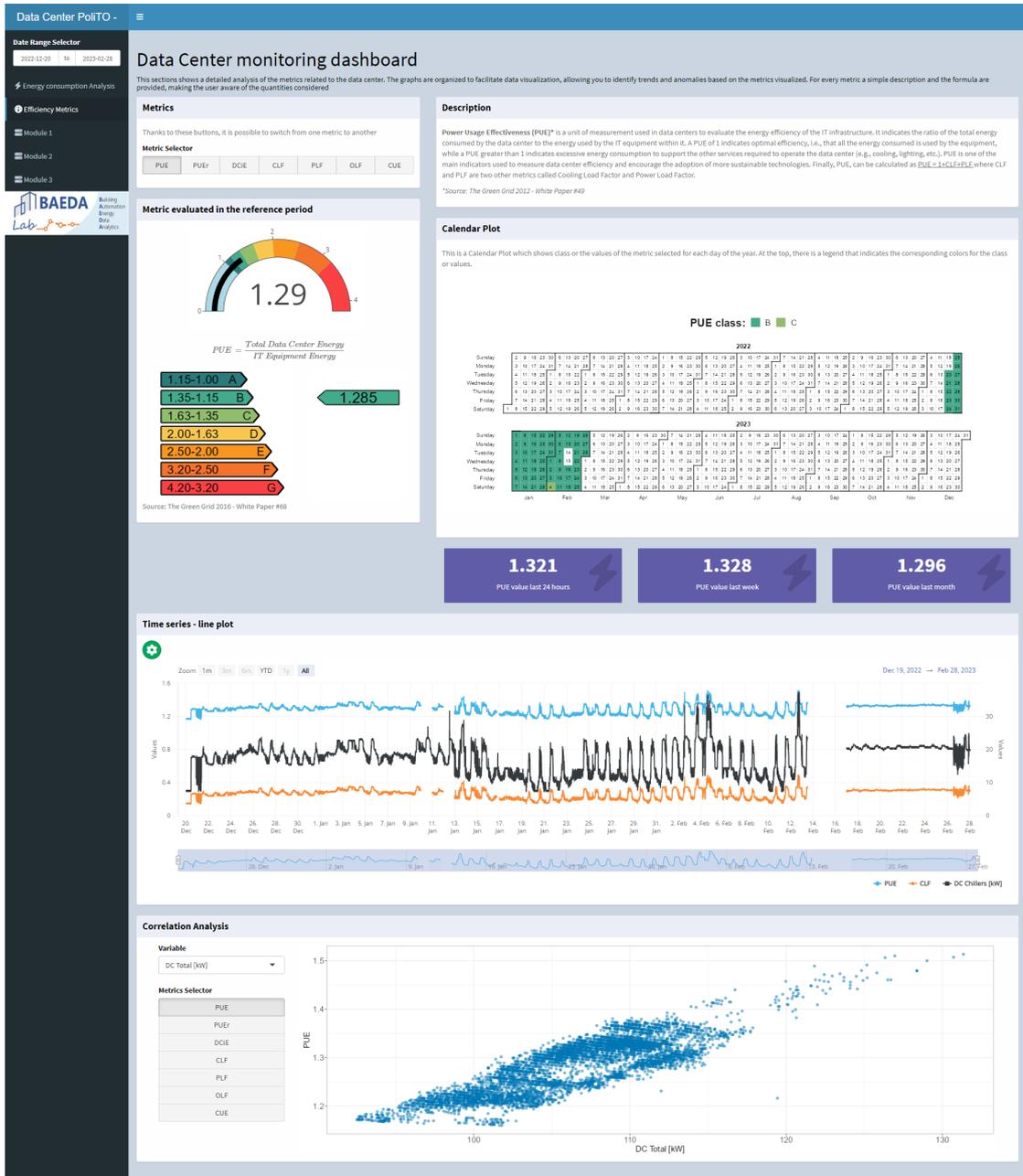
Figura 4.51: TAB: Energy Consumption Analysis - In Depth Analysis

Questo grafico è molto importante in quanto consente di effettuare delle considerazioni su eventuali tecniche di risparmio, avendo chiare le potenze in gioco. In particolare, avendo una certa sensibilità sul carico di *base-load*, è possibile adottare tecniche di risparmio mirato, andando a soddisfarlo con tecnologie rinnovabili, come lo sfruttamento di pompe di calore geotermiche. Scorrendo verso il basso si ha invece la possibilità di interazione con una *time series*: in questo grafico, infatti, è stata predisposta la massima flessibilità possibile per quanto concerne eventuali studi o considerazioni. Tramite l'apposito pulsante a forma di ingranaggio, è possibile selezionare una lista di variabili sull'asse sinistro (Figura 4.49), fino a 6, oltre che ad effettuare delle aggregazioni temporali con possibilità di scelta tra 15 minuti, dato di default, un'ora o un giorno. Vi è anche la possibilità di effettuare una normalizzazione sulla media o sul massimo: questa impostazione è particolarmente utile al fine di confrontare grandezze che hanno intensità o unità di misura differenti, rendendo di fatto i dati comparabili oltre a migliorare la stabilità statica, riducendo l'influenza di eventuali valori estremi. Sempre tramite il pulsante di impostazione

del grafico, è possibile scegliere se inserire o meno un secondo asse sulla destra (Figura 4.50) tramite l'apposito switch, per il quale si è deciso di inserire tutte quelle grandezze all'interno del DC che non sono potenze. Il grafico è interattivo, infatti, posizionando il cursore su una *time series*, vengono visualizzati i valori puntuali ad una determinata data e ora, mostrate tramite l'apposito *tooltip*. Un ulteriore grafico di tipo *scatter plot*, è stato posto per effettuare delle comparazioni tra due variabili, una posta sull'asse X e l'altra posta sull'asse Y: questo studio è particolarmente utile in quanto permette di effettuare delle comparazioni tra variabili ed eventualmente scoprirne delle dipendenze. In Figura 4.48 è possibile notare come il grafico prodotto sia del tutto consono con i dati inseriti, infatti, aumentando il carico dei *chiller*, aumenta implicitamente anche il carico del DC. L'altra sezione riguarda una *In Depth Analysis*, per la quale si è deciso di dare flessibilità all'utente nel scegliere in quale parte del DC effettuare degli studi. È infatti possibile selezionare la sezione avendo come alternative un'analisi verso l'intero DC o verso ciascun modulo. Per ognuna di queste voci, si può selezionare la voce di consumo oggetto di studio le quali cambiano dinamicamente in base alla selezione della sezione in cui effettuare l'analisi. In base, dunque, alle voci scelte, cambierà dinamicamente la selezione a livello di pianta e di spaccato 3D del DC, oltre che al *carpet plot* ed al *calendar plot*. Questa parte accoppiata con la prima, dà la possibilità di effettuare delle analisi sempre più dettagliate oltre che complete.

### 4.3.2 *Efficiency Metrics*

L'altra TAB sviluppata riguarda le metriche calcolate per l'intero DC (Figura 4.52). Si è scelto di porre l'attenzione evidenziando con dei colori oltre che con dei grafici a *gauge*. Il grafico *gauge* è un'ottima rappresentazione visiva per mostrare in modo intuitivo e immediato l'andamento di una singola misura rispetto a un valore di riferimento, rendendo facile la comprensione dell'effettiva performance. Accoppiato ad esso si ha, per alcune metriche quali PUE e CLF, anche la classificazione in base al loro valore ed ai range dettati dalla letteratura. Proprio per questo, si è anche posta l'attenzione sulla metrica dandone oltre che ad una breve descrizione, anche la formula di calcolo, con i riferimenti in letteratura per la quale si è basato il calcolo e le informazioni visualizzate. Il tutto è accompagnato da un *calendar plot* alla cui base sono riportati i valori specifici per la metrica visualizzata per tre differenti range temporali: le ultime 24 ore, ultima settimana ed ultimo mese. Anche in questa sezione, è stata inserita una *time series*, ma con la possibilità di visualizzare fino a 3 variabili selezionabili sull'asse di sinistra, che rappresentano esclusivamente le metriche (Figura 4.53). Analogamente, il principio vale anche per l'asse di destra, in cui è possibile visualizzare tutte le variabili che non sono metriche (Figura 4.54).



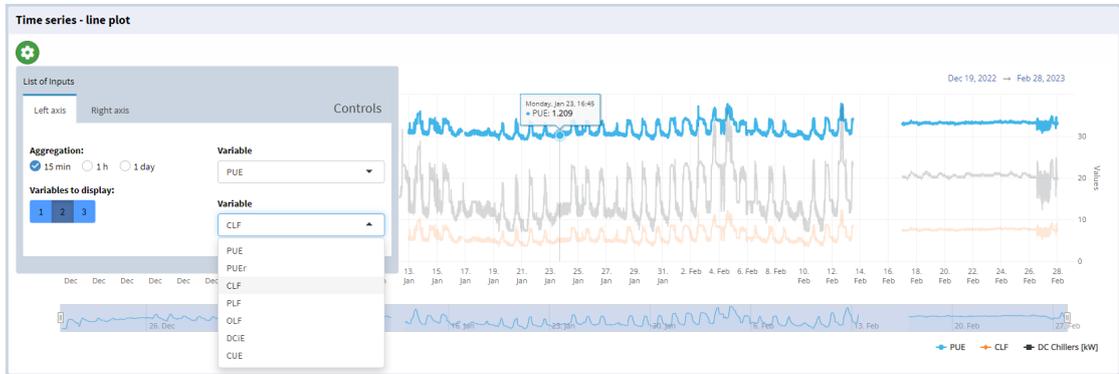


Figura 4.53: Selettore grandezze sull'asse sinistro della *time series*

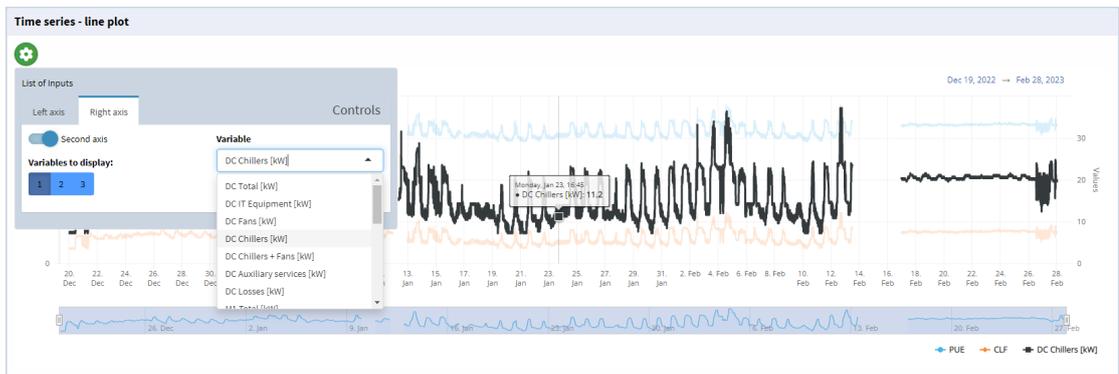


Figura 4.54: Selettore grandezze sull'asse destro della *time series*

## 4.4 Valutazione delle inefficienze del DC

Durante i sopralluoghi si sono riscontrate delle anomalie, sia dal punto di vista manutentivo che di impostazione del DC. In questa sezione, dunque, si andranno ad analizzare gli aspetti critici riscontrati all'interno del DC, portando l'attenzione sulle possibili conseguenze ed introducendo possibili soluzioni.

### 4.4.1 Polvere



**Figura 4.55:** *blade-server* ricoperti di polvere in un rack del modulo 1

Come visibile in Figura 4.55 ci sono punti del DC in cui la polvere è molto ingente. Questa condizione porta ad avere una perdita di affidabilità dei server con conseguenze non irrilevanti. Nei DC si tende ad avere un ambiente estremamente controllato, di conseguenza si attuano delle tecniche di contenimento e di filtraggio dell'aria esterna molto accurate, per evitare appunto che dei contaminanti possano incidere sul funzionamento dei server [27, 16]. Nel caso del Politecnico di Torino, il DC è all'interno di una stanza senza alcuna apertura verso l'esterno, a parte delle

porte che danno verso un corridoio accessorio. L'impianto, inoltre, non consente l'entrata di aria dall'esterno dato che i CRAC sono serviti da un impianto di acqua mista a glicole e i sistemi di condizionamento dell'aria sono ad espansione diretta. L'unica aria che può provenire dall'esterno è quella data da ventilazione naturale attraverso le perdite per ventilazione nelle porte o le bocchette per la ventilazione naturale poste sul muro verso il corridoio accessorio. Questa condizione implica che non vi sia un adeguato controllo dei contaminanti all'interno della sala, di conseguenza sarebbe opportuno inserire degli strumenti, come dei semplici filtri, che operino una pulizia dell'aria proveniente dall'esterno prima di essere immessa all'interno del DC. Questa condizione è raggiungibile con l'installazione di una macchina a ventilazione meccanica controllata (VMC), di facile montaggio oltre che di basso costo. La VMC è un sistema di ventilazione che utilizza ventilatori meccanici per far circolare l'aria all'interno di un edificio. Essa è in grado di filtrare l'aria mediante l'utilizzo di filtri che possono rimuovere polvere, polline, allergeni, inquinanti e altri agenti nocivi. In questo modo, la VMC può contribuire a mantenere un'aria pulita e salubre all'interno di un ambiente chiuso come un DC, migliorando la qualità dell'aria e prevenendo eventuali problemi di efficienza dei sistemi IT, oltre che alla salute degli operatori.

#### 4.4.2 CRAC mancante

Una condizione molto anomala è la totale assenza di un CRAC all'interno del modulo 1. Come mostrato in Figura 4.56 l'alloggio nel quale dovrebbe risiedere il CRAC è completamente chiuso e privo del medesimo. Tale condizione può portare a degli squilibri interni dell'aria, potenzialmente creando degli *hot spot*, a discapito dell'integrità degli *IT equipment* [27]. È dunque opportuno inserire il CRAC mancante, potendo dunque operare un condizionamento ottimale dell'aria all'interno dell'isola calda.

#### 4.4.3 Cable management

Sempre in riferimento alla Figura 4.56, si può notare come vi siano dei cavi non opportunamente posizionati. Questa condizione, così come per il CRAC mancante, può portare alla formazione di *hot spot* [16], che influisce direttamente con il flusso dell'aria che attraversa i rack, impedendo potenzialmente a delle componenti IT di raffreddarsi adeguatamente intaccando la loro affidabilità. È dunque appropriato investire nella risoluzione di tale problematica, al fine di evitare possibili complicazioni future



**Figura 4.56:** CRAC mancante nel modulo 1 e problemi di *cable management*

#### 4.4.4 Umidità

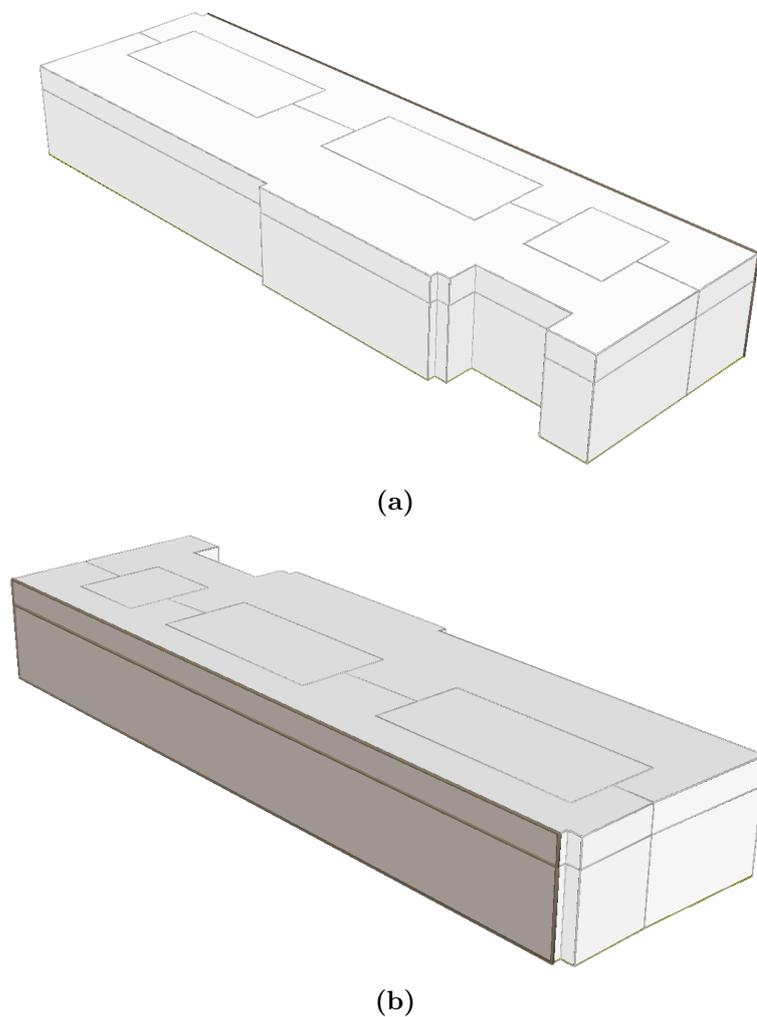
Durante la visita per il sopralluogo all'interno del DC, è stato rilevato un problema di umidità; i sistemi di monitoraggio dei *BladeCooling*, infatti, davano in continuazione l'errore segnante un'umidità non adeguata. Tale condizione è ovviamente da correggere in quanto l'ASHRAE [55] impone dei limiti di temperature ed umidità al fine di non avere problemi di essiccamento dei cavi o delle componenti o, in alternativa, di condensa sui medesimi. Tale problematica può essere risolta installando un sistema di controllo dell'umidità dell'aria; si ritorna dunque all'ipotesi dell'installazione di una classica VMC. Alcune VMC, infatti, possono controllare anche l'umidità dell'aria all'interno di un edificio. Queste VMC sono dotate di sensori di umidità e possono regolare la ventilazione per mantenere l'umidità dell'aria entro determinati parametri. In questo modo, la VMC può contribuire a mantenere un clima confortevole e salubre all'interno di un ambiente chiuso come il DC del Politecnico di Torino.

## Capitolo 5

# Modello energetico

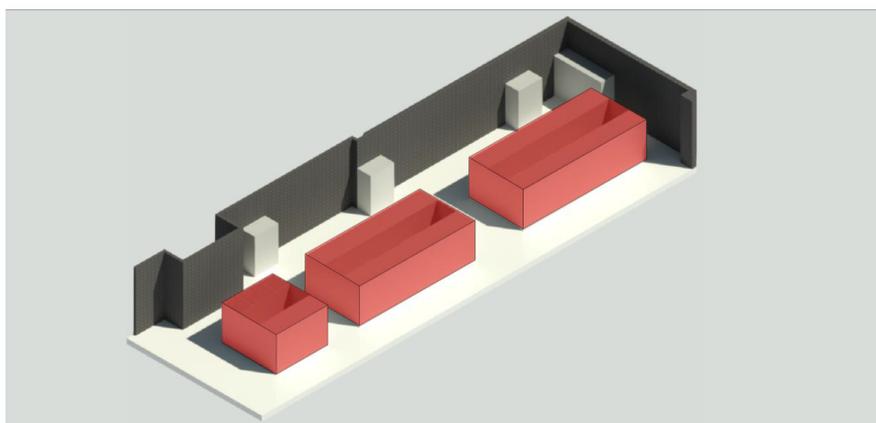
Data la quantità di dati a disposizione e la collaborazione degli operatori del Politecnico di Torino sui parametri mantenuti all'interno del DC, si è potuto sviluppare un modello energetico del medesimo utilizzando il programma di modellazione energetica statunitense chiamato *eQUEST* [92]. Il software *eQUEST* (*the QUick Energy Simulation Tool*) è un software di modellazione energetica per la progettazione di edifici e sistemi di illuminazione sviluppato da *Lawrence Berkeley National Laboratory* (LBNL) [93] in collaborazione con *US Department of Energy* (USDOE) [94] e distribuito gratuitamente da quest'ultima. Esso sfrutta il software di simulazione energetica DOE-2 [94], uno strumento molto diffuso per la progettazione energetica degli edifici, che viene utilizzato per determinare il consumo di energia di un edificio in base alle sue caratteristiche di progettazione e all'ambiente in cui si trova. Il programma può essere utilizzato per valutare l'impatto di diverse opzioni di progettazione sull'efficienza energetica di un edificio e per aiutare a sviluppare strategie per il risparmio energetico. Dunque, *eQUEST*, è un pacchetto formato da un tool per la modellazione dell'edificio ed il software DOE-2 per la simulazione energetica vera e propria. Avvalendosi dunque di questo programma, si è potuto modellare energeticamente il DC al Politecnico di Torino, facendo opportune assunzioni semplificative che verranno esplicitate nei capitoli a seguire.

## 5.1 Modellazione dell'involucro

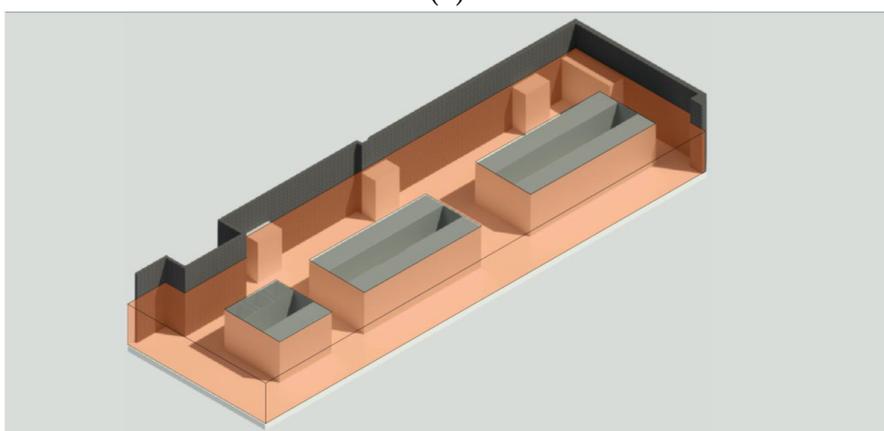


**Figura 5.1:** Visualizzazione 3D in *eQUEST*

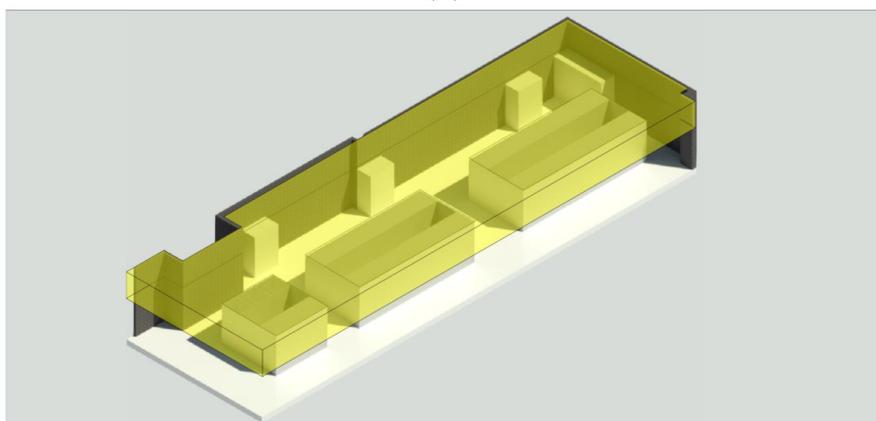
In *eQUEST* è possibile inserire nel dettaglio tutti i componenti costitutivi dell'involucro dell'edificio, quali muri, finestre, porte etc. Nel caso studio, il DC è posto in una sala completamente interrata, con muri e solette orizzontali prevalentemente in calcestruzzo leggero, interrotti solamente da pilastri in calcestruzzo armato, struttura portante del Politecnico di Torino. Una visualizzazione 3D dell'elaborato completo su *eQUEST* è visibile in Figura 5.1: importante notare come vi sia una certa distinzione dei componenti dell'involucro in bianco e grigio. I primi stanno a rappresentare dei componenti confinanti con altri ambienti interni, mentre i grigi con l'ambiente esterno. Ciò è dovuto al fatto che il DC è al piano interrato, quindi



(a)



(b)



(c)

**Figura 5.2:** Suddivisione in spazi

superiormente è delimitato dal piano terra del Politecnico di Torino, mentre ai tre lati dal corridoio interrato, non riscaldato. Ovviamente questa tipologia di configurazione ha delle ripercussioni anche nel carico termico, dovute alle perdite per trasmissione. In inverno la condizione per cui vi sia superiormente un ambiente ad una temperatura maggiore, implica che vi sia un certo apporto termico o comunque un limitato scambio termico nel caso in cui la temperatura della sala server sia superiore a quella del piano terra. In estate, invece, gli apporti dovuti alla temperatura esterna più alta rispetto alla temperatura interna più bassa fanno sì che la condizione, per cui il contatto con altri ambienti per 5 lati su 6, sia vantaggiosa dal punto di vista termico. La modellazione dei moduli interni richiede qualche accorgimento ulteriore: in *eQUEST* è possibile inserire un solo piano ad un'altezza fissa, ma i moduli sono alti circa 2.10 m contro i 3.50 m a cui arriva il soffitto. Sfruttando quindi un'impostazione intrinseca di *eQUEST*, si è modellata la parte sovrastante i moduli come un plenum, nel quale solitamente risiedono le tubazioni e le condotte, ma che nel caso in esame serve solo ed esclusivamente a far combaciare il volume della sala reale con quello del modello energetico. La sala del DC è stata divisa, quindi, in tre tipologie di spazi:

1. Moduli: evidenziati in Figura 5.2.a. Questi ultimi sono gli spazi nei quali verranno imputati gli *internal loads*, ovvero i carichi termici dati dagli *IT equipment* presenti
2. Ambiente: evidenziato in Figura 5.2.b. Quest'ultimo rappresenta l'aria circostante i moduli dalla quale ne viene prelevata una piccola parte assieme all'aria uscente dai CRAC.
3. Plenum: evidenziato in Figura 5.2.c. Quest'ultimo, come citato precedentemente, ha il solo scopo di simulare al meglio gli spazi presenti nel DC

Ovviamente i carichi presenti in ambiente e nel plenum vengono gestiti dal sistema ad espansione diretta mentre il raffrescamento dei moduli dai CRAC alimentati dai *chiller* esterni. Si sono infine modellate quattro zone termine:

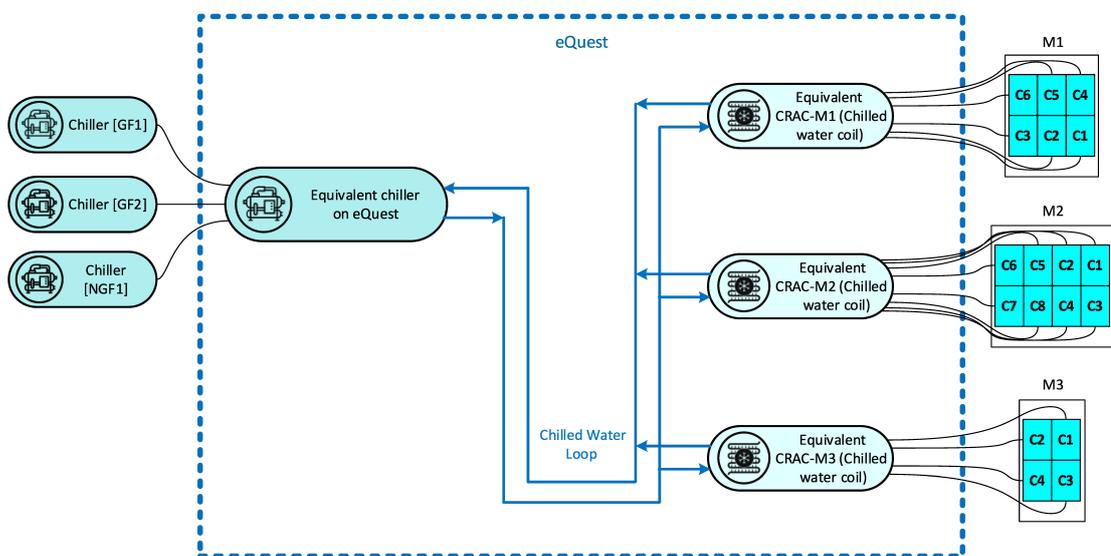
1. M1: rappresentante il modulo 1
2. M2: rappresentante il modulo 2
3. M3: rappresentante il modulo 3
4. DC: rappresentante l'ambiente circostante ai modulo

Questa condizione fa sì che sia possibile impostare parametri diversi per ogni modulo ma anche per l'ambiente circostante.

## 5.2 Modellazione degli impianti

La parte impiantistica riguarda soltanto il raffreddamento del DC tramite i CRAC posti nei moduli, oltre che ai tre sistemi monosplit a pompa di calore. Come verrà descritto nei seguenti capitoli, si sono dovute fare delle assunzioni in seguito alla mancanza di dati ed alla loro impossibilità di reperimento.

### 5.2.1 Modellazione dei tre *chiller* e dei CRAC



**Figura 5.3:** Rappresentazione schematica dell'impianto di raffreddamento dei moduli simulato in *eQUEST*

Dei tre *chiller* è nota a priori solo la potenza frigorifera ed il coefficiente EER del *chiller Hiref* (Chiller 3), grazie alla targhetta posta sull'involucro metallico. Per quanto concerne gli altri due *chiller* (Chiller 1 e Chiller 2) marchiati *Stulz*, in seguito alla collaborazione con l'assistenza tecnica dell'azienda, si è riusciti a reperire le schede tecniche, in cui sono riportate le potenze frigorifere e le potenze elettriche assorbite per le varie configurazioni. In Tabella 5.1 vi è un estratto dei dati tecnici forniti dall'azienda *Stulz*, in cui è evidenziato il modello presente al Politecnico di Torino ed oggetto di modellazione energetica; tale informazione è data dalla targhetta riportata sull'involucro metallico del *chiller*. La potenza frigorifera è, dunque, pari a 68.1 kW, mentre la potenza elettrica assorbita è pari a 23.3 kW, in condizioni nominali. Da tali dati, dunque, è possibile estrapolare il



## DATI TECNICI

## TECHNICAL DATA

MODELLO	182-P	202-P	242-P	262-P	302-P	363-P	393-P	453-P	524-P	604-P	MODEL	
Ciclo frigorifero:											Refrigerant cycle:	
Potenza frigorifera (1)	kW	52,7	59,5	68,1	76,7	85,7	99,1	114	130	151	174	Cooling capacity (1)
Potenza assorbita (1)	kW	18,1	20,3	23,3	26,1	29,3	36,8	42,2	48,4	54,4	64,9	Absorbed power (1)

Tabella 5.1: Estratto scheda tecnica *Stulz* [71]

coefficiente EER, pari a:

$$EER = \frac{68.1 \text{ kW}}{23.3 \text{ kW}} = 2.92 \quad (5.1)$$

Per quanto concerne, invece, il terzo *chiller* (Chiller 3) marchiato *Hiref* non vi è bisogno di alcuna scheda tecnica in quanto i dati di interesse sono riportati direttamente sulla targhetta affissa al corpo metallico, al contrario degli altri due marchiati *Stulz*. La sua potenza frigorifera è quindi di 63.5 kW ed un coefficiente EER pari a 3.15. Una problematica rilevante, tuttavia, riguarda la mancata conoscenza di quali CRAC serve ogni *chiller*, in quanto essi comunicano con un collettore il quale distribuisce l'acqua glicolata ai CRAC che la necessitano. Da qui la decisione di inserire un *chiller* in *eQUEST* che fosse l'equivalente di tutti e tre quelli presenti nella realtà, sommandone le potenze e mediandone gli EER sulla potenza.

Calcolo del <i>chiller</i> equivalente		
	Potenza frigorifera [kW]	EER
<i>Stulz</i> (Chiller 1)	68.1	2.92
<i>Stulz</i> (Chiller 2)	68.1	2.92
<i>Hiref</i> (Chiller 3)	63.5	3.15
Chiller equivalente	199.7	2.99

Tabella 5.2: Calcolo potenza frigorifera e coefficiente EER del *chiller* equivalente da inserire in *eQUEST* per la modellazione energetica

Si è quindi ottenuto un *chiller* equivalente di 199.7 5 kW ed EER pari a 2.99 (Tabella 5.2). Tuttavia, *eQUEST* richiede i dati di input secondo le unità di misura

americane, per cui 199.7 kW equivalgono a circa 0.68 MBth/h, approssimato a 0.7 MBth/h, dato di inserimento effettivo nel programma di simulazione energetica. La modellazione delle tubazioni di acqua refrigerata provenienti dai *chiller* e diretti verso i CRAC dei tre moduli è stata assunta di default da *eQUEST* in quanto non si hanno dati puntuali su lunghezze, tipologie di tubi, diramazioni o potenza delle pompe in gioco. I *chiller* presenti al Politecnico di Torino, tuttavia, possono effettuare anche un raffreddamento con un *free cooling* di tipo indiretto, come già citato precedentemente. Per poter simulare tale condizione, in *eQUEST* si è dovuto modellare un secondo circuito collegato ad una torre di raffreddamento. Tale circuito, successivamente, è stato assegnato al sistema di recupero termico sul circuito dell'acqua di raffreddamento dei CRAC. Infine si è impostata una condizione per la quale la torre di raffreddamento gestisca parte del carico termico dei moduli, solamente nel caso in cui la temperatura esterna fosse stata inferiore ai 0°C. La condizione ideale prevederebbe l'assegnazione di curve di performance ai *chiller* tenendo in considerazione la presenza della torre di raffreddamento, al fine di assegnare correttamente il carico. Purtroppo questa condizione non è attuabile in quanto mancano tali dati e sarà oggetto della calibrazione del modello che avverrà in seguito. I CRAC ricevono quindi l'acqua glicolata refrigerata e raffrescano i tre moduli dai quali è composto il DC. Visualizzando il catalogo *Technocooling* [69] e confrontando i codici dei vari CRAC con i rilievi effettuati in loco, si è scoperto che ogni CRAC ha una capacità di raffreddamento pari a circa 22 kW (Tabella 5.3). Nella realtà, ogni modulo, è composto da più unità CRAC, tuttavia in *eQUEST* è possibile simularne soltanto uno per ognuno. Da qui la necessità di raggruppare i vari CRAC singoli presenti nei tre moduli in tre CRAC equivalenti. In *eQUEST* questi ultimi sono stati simulati come delle classiche batterie di scambio termico (*Chilled water coil*), la cui temperatura di uscita dell'aria è di 22°C come da caso reale e la potenza quella totale per ogni modulo. Si è, quindi, moltiplicata la capacità di raffreddamento del singolo CRAC (22 kW) per il numero di CRAC presenti nel modulo (vedasi Figura 3.11), trovando così la potenza del CRAC equivalente. I risultati sono visibili in Tabella 5.4.

I ventilatori presenti nei CRAC sono stati dimensionati seguendo le impostazioni di default date da *eQUEST*, non avendo schede tecniche specifiche o altri dati per un loro più accurato inserimento.

### 5.2.2 Modellazione delle pompe di calore e delle unità interne

I tre sistemi split in pompa di calore che si occupano della refrigerazione dell'aria ambiente, sono tutti marchiati *Daikin* e grazie ad un'analisi del modello si è potuto risalire alle eventuali pompe di calore associate, tuttavia, ce ne sono molte che vi possono essere accoppiate. Da un'analisi preliminare delle potenze, si sono esclusi

### Sistemi aperti ad acqua

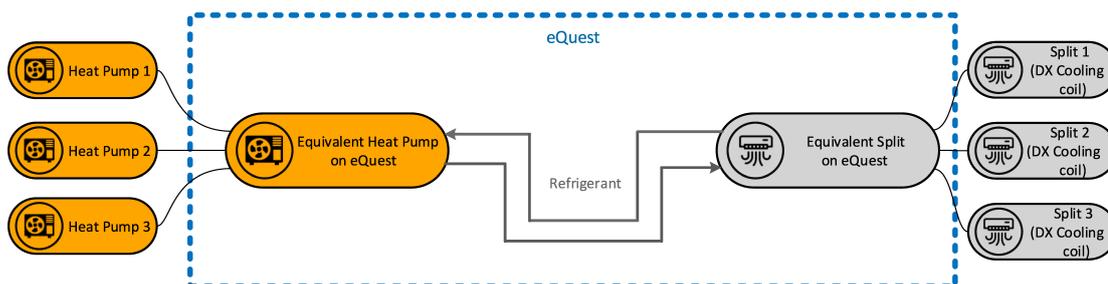
Codice	Potenza refrigerante	L	P	U
TC3142NOLW12	12 kW	300	1030	42
TC3142NOLW22	22 kW	300	1030	42
TC3142NOLW30	30 kW	300	1030	42
TC6142NOLW42	42 kW	600	1030	42
TC3148NOLW12	12 kW	300	1030	48
TC3148NOLW22	22 kW	300	1030	48
TC3148NOLW30	30 kW	300	1030	48
TC6148NOLW42	42 kW	600	1030	48
TC3242NOLW12	12 kW	300	1200	42
TC3242NOLW22	22 kW	300	1200	42
TC3242NOLW30	30 kW	300	1200	42
TC6242NOLW42	42 kW	600	1200	42
TC3248NOLW22	22 kW	300	1200	48
TC3248NOLW30	30 kW	300	1200	48
TC6248NOLW42	42 kW	600	1200	48

Tabella 5.3: Estratto scheda tecnica *BladeCooling* [69]

Dati dei CRAC			
Modulo	Numero di CRAC presenti	Potenza frigorifera totale [kW]	Potenza frigorifera totale [Btu/h]
M1	6	132	450400
M2	8	172	587000
M3	4	88	300300

Tabella 5.4: Calcolo potenza frigorifera dei CRAC presenti nei tre moduli

vari modelli, ipotizzandone uno specifico per l'applicazione in esame. Grazie al supporto tecnico *Daikin* si è quindi potuto quindi ottenere una scheda tecnica completa [95], correlata di potenze e coefficienti EER in varie condizioni ambientali. La pompa di calore in esame è il modello *RZAG100NV1* che sfrutta un fluido refrigerante R32: essa ha una potenza nominale di 9.5 kW, quindi una taglia commerciale da 32000 Btu, che si trova molto facilmente in commercio, con un EER nominale di 6.47. Ipotizzando questi dati, dunque, si è assunto che i tre



**Figura 5.4:** Rappresentazione schematica dell’impianto monosplit in pompa di calore simulato in *eQUEST*

sistemi fossero di tipo monosplit, quindi ogni unità interna è accoppiata ad una rispettiva pompa di calore. In *eQUEST*, dunque, si è modellato tale sistema come un’unica pompa di calore di potenza pari alla somma delle potenze delle tre pompe di calore e con coefficiente EER pari a 6.47 essendo tutte e tre le pompe di calore ipotizzate uguali. I risultati sono visibili in Tabella 5.5.

Dati dei sistemi monosplit in pompa di calore			
Climatizzatore	Potenza frigorifera [kW]	Potenza frigorifera [Btu/h]	EER
CL1	9.5	32400	6.47
CL2	9.5	32400	6.47
CL3	9.5	32400	6.47
Climatizzatore equivalente	28.5	97200	6.47

**Tabella 5.5:** Calcolo potenza frigorifera del sistema monosplit in pompa di calore equivalente

### 5.2.3 Impostazioni delle condizioni ambientali

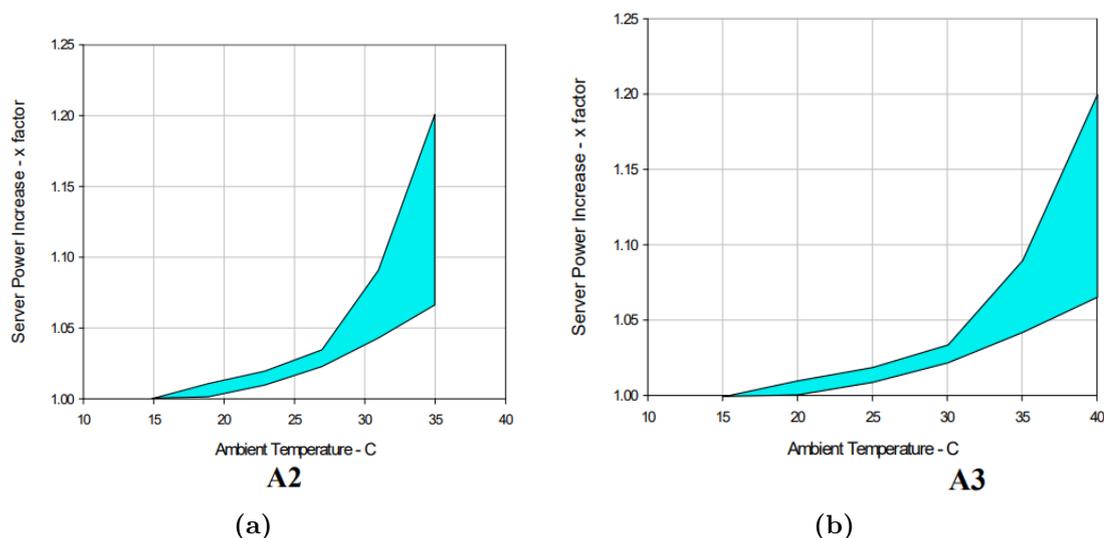
*eQUEST* richiede l’impostazione della temperatura di set-point da tenere in ambiente e nei moduli per poter operare una simulazione dinamica dell’edificio e degli impianti. Come prima impostazione si sono mantenute le temperature effettivamente presenti all’interno del DC: la temperatura interna della sala del

DC dove alloggiavano i tre moduli viene assegnata a 22°C in condizioni nominali. Questa temperatura viene mantenuta tale dal sistema monosplit in pompa di calore equivalente, ed è molto importante la sua continua rilevazione in modo tale da capire se vi sono innalzamenti superiori durante l'anno, dovuti ipoteticamente ad una mancanza di sufficiente potenza frigorifera, per poter operare in condizioni di sicurezza ed ottimali all'interno del DC. Si ricorda, infatti, che l'aria ambiente, viene aspirata, anche se solo in parte, dai rack per il raffreddamento delle componenti, di conseguenza il suo continuo monitoraggio è fondamentale. La temperatura di setpoint, invece, all'interno dei tre moduli, viene impostata a 31.5°C, corrispondente alla temperatura dell'isola calda. Dato assunto in tutti i tre i moduli e desunto dai rilevamenti effettuati dai sensori di temperatura all'interno del modulo 2. Questa temperatura verrà mantenuta tale dal sistema di CRAC equivalente creato, il quale rileverà un suo eventuale innalzamento e provvederà a raffreddare con una potenza consona alle condizioni di carico dei server durante l'anno.

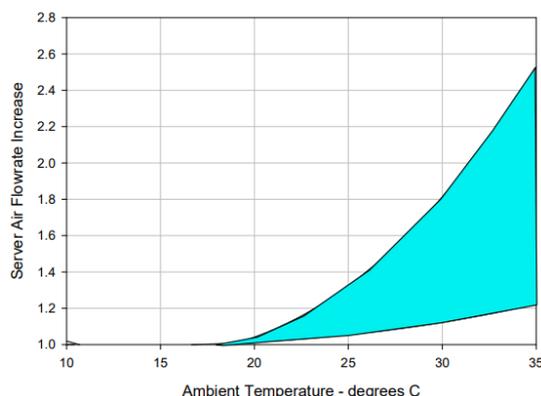
## 5.3 Internal loads

Una volta completato il modello dal punto di vista impiantistico e strutturale, si sono assegnati a quest'ultimo i carichi termici in ambiente. I carichi termici sono forniti dai server che alloggiato nei rack dei moduli 1, 2 e 3. In *eQUEST* è possibile assegnare ad ogni spazio relativo al modulo fino a 5 tipologie di *equipment* i cui dati principali da dover inserire riguardano la potenza (totale o parzializzata al  $m^2$ ) oltre che ad una *schedule*. Una *schedule* in *eQUEST* è una tabella di dati che definisce il funzionamento di un elemento nel modello di simulazione. Le *schedules* possono essere create utilizzando valori di default forniti con *eQUEST* o possono essere personalizzate dall'utente per riflettere le specifiche condizioni di funzionamento dell'edificio. Ad esempio, una *schedule* può essere utilizzata per definire il funzionamento di un sistema di riscaldamento, di illuminazione o di controllo dell'aria. In sostanza, dunque, una *schedule* rappresenta l'andamento di una specifica grandezza nel tempo. In *eQUEST* le *schedules* partono da tipiche *schedule* giornaliere, le quali andranno poi a formare *schedules* annuali. Una volta creata la *schedule* annuale, quest'ultima viene associata alla rispettiva grandezza. Di seguito, dunque, verranno esplicitate tutte le assunzioni, ipotesi e calcoli effettuati per inserire correttamente i dati di input in *eQUEST* per quanto concerne gli *equipment* e le rispettive *schedules* associate.

### 5.3.1 Assegnazione dei carichi (*Equipment*): *power model*



**Figura 5.5:** Aumento della potenza dei server dovuto all'aumento della temperatura ambiente per le classi A2 ed A3 [57]



**Figura 5.6:** Aumento della portata delle ventole in funzione della temperatura ambiente [57]

Gli *internal loads* comprendono tutte quei carichi ambiente per i quali è richiesto l'intervento di un impianto di climatizzazione. Nel caso in esame, la componente preponderante per quanto riguarda gli *internal loads* sono i server: essi infatti sono gli unici presenti all'interno della sala oggetto di modellazione energetica, assieme ai CRAC, da qui la scelta di inserire solo i carichi termici prodotti da questi ultimi, tralasciando eventuali perdite nelle connessioni elettriche, oltre che alle PDU. In un server, la potenza elettrica in ingresso, si converte quasi interamente in calore per effetto delle perdite Joule [28], per tale motivo nel calcolo degli *internal loads* di questo modello energetico ci si limiterà a capire la potenza in ingresso ai server, la quale sarà l'equivalente della potenza termica da smaltire da parte dell'impianto. Come citato nel primo capitolo, la potenza di un server dipende dal suo fattore di utilizzazione, tuttavia dipende anche dalla temperatura dell'aria in ingresso [57]; quest'ultima ha anche importanti implicazioni dal punto di vista dell'affidabilità. L'andamento dei consumi dei server al variare della temperatura dell'aria aspirata, risulta essere crescente come mostrato in Figura 5.5 per le classi A2 ed A3. Tale aumento è dovuto principalmente a due fattori: le perdite di corrente attraverso i componenti in silicio della CPU e la potenza assorbita dalle ventole. Il primo contributo presenta una linearità con l'incremento della temperatura, tuttavia la potenza delle ventole aumenta in maniera quasi esponenziale per mantenere costante la temperatura della CPU ed evitare il surriscaldamento, come mostrato in Figura 5.6. Lo studio condotto da Patterson [96], sulla base di quanto proposto da ASHRAE [57], ha validato l'effettiva influenza della temperatura dell'aria aspirata dalle ventole sulla potenza dei server stessi. Nello specifico, considerando che lo scambio termico è convettivo ed avviene fra la CPU e l'aria ambiente, la potenza termica  $Q_{CPU}$  risulta funzione del coefficiente di scambio termico per convezione  $h$ , dell'area effettiva di scambio termico  $A_{eff}$ , della temperatura dell'aria  $T_{air}$  e di

quella dei dissipatori del server  $T_{heatsink}$ .

$$Q_{CPU} = h * A_{eff} * (T_{heatsink} - T_{air}) \quad (5.2)$$

Tramite l'ipotesi di convezione forzata con moto turbolento, il coefficiente di scambio termico per convezione  $h$  è proporzionale alla velocità dell'aria:

$$h \propto v_{air}^{4/5} \quad (5.3)$$

La relazione precedente, quindi, evidenzia che all'aumentare dell'aria in ingresso ai server è necessario aumentarne la velocità, in modo che il coefficiente  $h$  aumenti. L'incremento di potenza, invece, subisce un aumento alla terza [97]:

$$\frac{flow_1}{flow_2} = \frac{rpm_1}{rpm_2} = \left( \frac{Power_1}{Power_2} \right)^3 \quad (5.4)$$

per tenere dunque in considerazione anche tali contributi, è stato elaborato un *power model* sulla base di uno studio condotto da Ham et. al [98]: tale modello calcola la potenza del server tenendo in considerazione la temperatura dell'aria in ingresso ed al carico di lavoro della CPU. Come precedentemente affermato, la potenza di un server dipende sia dalla potenza della CPU che da quella delle ventole utilizzate per raffredarlo, quindi si può scrivere la relazione:

$$P_{server} = P_{CPU} + P_{Fan} \quad (5.5)$$

Sulla base, dunque, di rilevamenti effettuati su server reali [99, 100] e riportati nello studio di Ham [98], è stato possibile ricavare le relazioni parametriche che collegassero tra loro i risultati. Partendo dalla potenza della CPU, come già affermato, essa dipende la temperatura dell'unità interna,  $T_{DIE}$ , oltre che dal fattore di utilizzazione  $u_{CPU}$ :

$$P_{CPU} = 1.566 * 10^{-5} + 42.29 * u_{CPU} + 0.379 * T_{DIE} + 0.03002 * T_{DIE}^2 \quad (5.6)$$

La potenza delle ventole, invece, dipende dalla portata di aria elaborata, quindi dalla velocità di rotazione delle ventole:

$$P_{FAN} = 0.0012 * RPM - 12 * 10^{-8} * RPM^2 + 28 * 10^{-12} * RPM^3 \quad (5.7)$$

Per poter, tuttavia, ricavare la relazione che legghi direttamente la potenza delle ventole alla potenza della CPU ed alla temperatura dell'aria aspirata, è necessario introdurre il concetto di resistenza termica del dissipatore del server  $R_{TOT}$ , che per definizione risulta:

$$R_{TOT} = \frac{T_{DIE} - T_{air}}{P_{CPU}} \quad (5.8)$$

Secondo numerose misurazioni effettuate su server reali [96, 101, 102],  $R_{TOT}$  dipende dalla velocità di rotazione delle ventole del server, secondo la seguente relazione parametrica:

$$R_{TOT} = 0.1352 + \frac{17440}{RPM^{1.56}} \quad (5.9)$$

Eguagliando quindi le due equazioni precedenti si trova:

$$RPM = \left( \frac{17440}{\frac{T_{DIE} - T_{AIR}}{P_{CPU}} - 0.1352} \right)^{1/1.56} \quad (5.10)$$

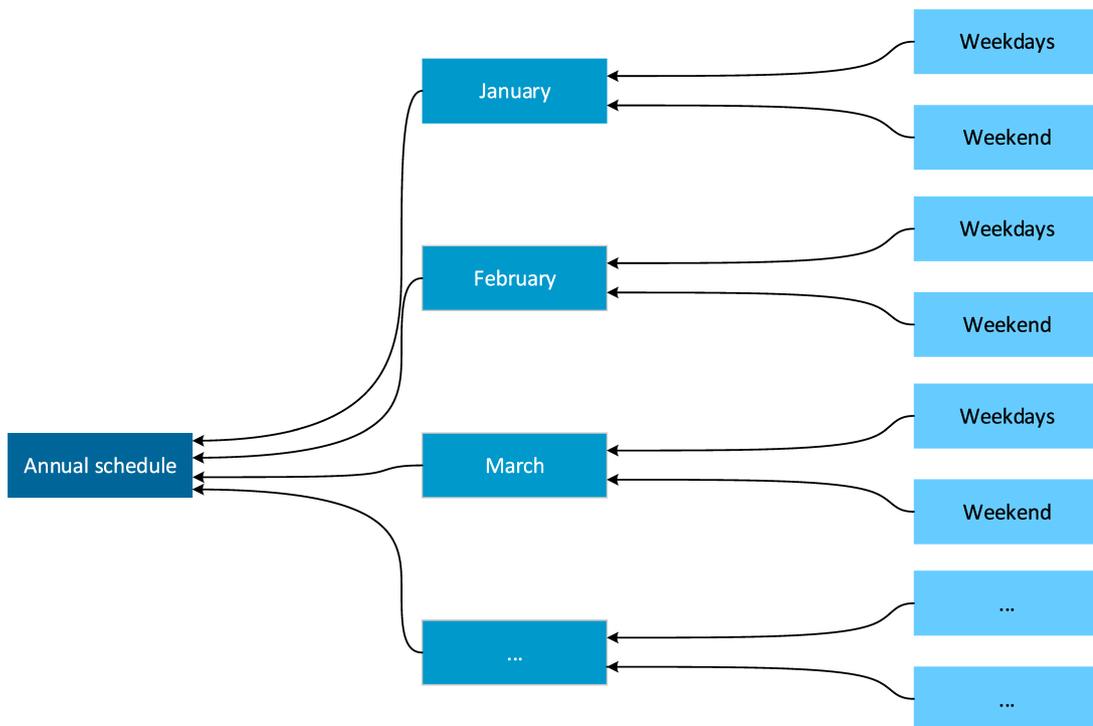
Tramite quindi le equazioni che definiscono  $P_{CPU}$ ,  $P_{FAN}$  e  $RPM$  è stato possibile ricavare la potenza assorbita da un server, e, con l'assunzione che tutta la potenza venga convertita in potenza termica, il carico termico presente in ambiente, semplicemente moltiplicando tale valore di potenza per il numero di server. Importante notare che tale *power model* fa riferimento a dei blade server, in accordo con [98]. Dato che nel modello energetico in esame si tiene in considerazione l'ipotesi che tutti i rack presenti siano colmi di server, per una questione di praticità di assegnazione del dato oltre che di completezza per eventuali scenari di applicazione futura, il numero di blade server che possono essere inseriti all'interno di un rack sono 64 [27], moltiplicando dunque tale dato per il numero di rack presenti in ogni modulo, oltre che per la potenza ricavata dal *power model* è possibile calcolare il carico termico dovuto ai server. Per il calcolo della potenza è quindi doveroso assegnare dei valori di  $u_{CPU}$ ,  $T_{AIR}$  e  $T_{DIE}$ . Essendo che gli *equipment* sono da assegnare secondo il loro valore massimo il quale poi verrà fatto variare assegnandogli una *schedule*, il fattore di utilizzazione  $u_{CPU}$  è pari a 1, mentre per la temperatura in ingresso  $T_{AIR}$  si terrà una temperatura di 22°C, come da assunzioni precedenti. La temperatura interna del server, invece, in accordo con lo studio condotto da Zapater [103], per un range di temperatura ambiente come quello previsto da ASHRAE [55], la variazione della  $T_{DIE}$  si può considerare trascurabile, per cui essa verrà assunta costante e pari a 68°C. Fatti i dovuti calcoli, dunque, la potenza del singolo server è pari a 209.6 W, che moltiplicata per le 64 unità presenti nel rack, produce una potenza totale di 13.40 kW per ogni rack. Si riportano, quindi, in tabella 5.6 il numero di rack presenti ed valori di potenza assegnata agli *equipment* per ogni modulo.

### 5.3.2 *Schedule*

Come precedentemente accennato una *schedule* è una tabella di dati che definisce il funzionamento di un elemento nel modello di simulazione. Nello specifico, in *eQUEST* è possibile inserire varie tipologie di *schedule*: frazionaria, temperatura, moltiplicativa, on/off etc. Nel caso in esame, la *schedule* andrà moltiplicata per il carico termico dovuto agli *equipment*, in quanto quest'ultimo è il carico massimo,

Equipment		
Modulo	Numero di rack	Potenza totale [kW]
M1	17	227.72
M2	12	160.75
M3	6	80.37

**Tabella 5.6:** Calcolo potenza *equipment* di ogni modulo assegnata ad *eQUEST*



**Figura 5.7:** Schema di assegnazione delle *schedule*

di conseguenza la *schedule* scelta è di tipo frazionario. Assumendo quindi tale *schedule*, quest'ultima sarà il risultato del rapporto tra la potenza utile e la potenza massima, ora per ora:

$$Fraction_j = \frac{P_{u,j}}{P_{max,j}} \quad (5.11)$$

La potenza utile è la potenza sviluppata dal server in considerazione del fatto che il suo fattore di utilizzazione non è sempre pari a 1, ma attorno a 0.9 in seguito a processi di virtualizzazione. Nel caso in esame, tuttavia, la *schedule* andrà applicata ad ogni modulo, ed avendo ipotizzato che tutti i rack siano colmi di server, bisogna tenere in considerazione la quantità di server effettivamente attivi in seguito alla virtualizzazione, oltre al fatto che, realmente, non tutti i rack ospitano la totalità dei server per i quali sono predisposti. La precedente equazione, quindi, si modifica come segue:

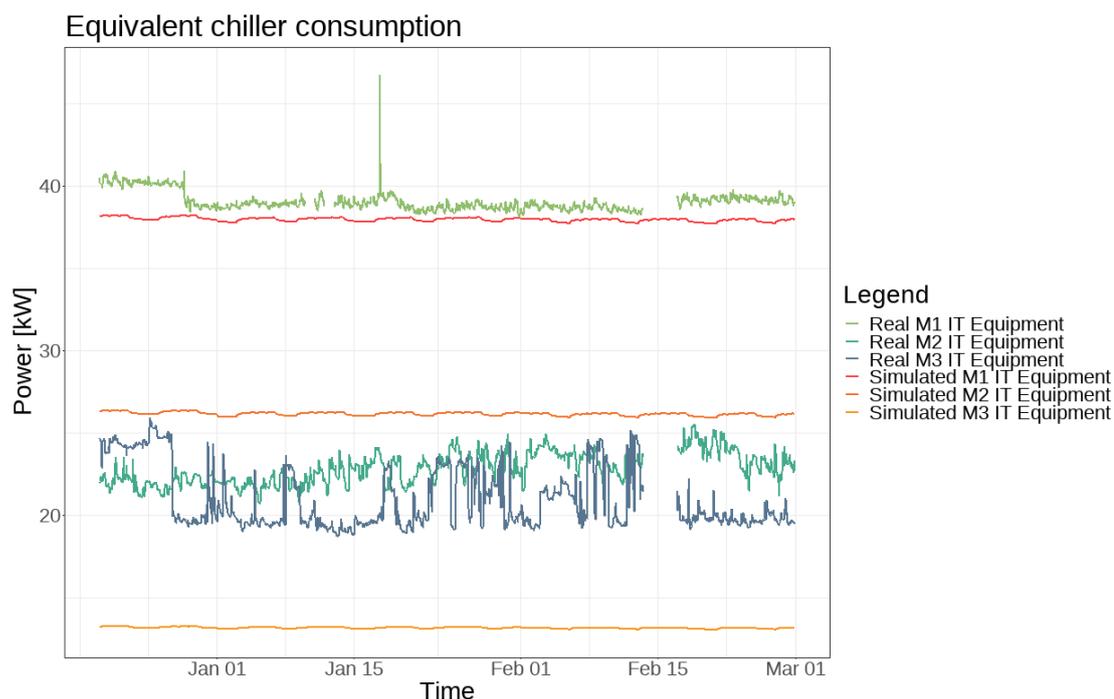
$$Fraction_j = \frac{P_{u,j} * n_{active\ server}}{P_{max,j} * n_{total\ server}} \quad (5.12)$$

Ovviamente il parametro  $P_{max,j} * n_{total\ server}$  equivale alla somma delle potenze dei moduli M1, M2 ed M3. Così facendo quindi si ottiene una *schedule* di tipo frazionario da assegnare agli *equipment* di ogni modulo M1, M2 ed M3 che tiene in considerazione in numero di server attivi, anche se come dato di input negli *equipment* si è tenuto conto della massima potenza possibile da parte dei server, con un fattore di utilizzazione pari a 1, considerando tutti e 64 i server presenti all'interno del rack. Le *schedule*, in *eQUEST*, vengono suddivise in *schedule* di tipo giornaliero, settimanale ed, infine, annuale. La *schedule* giornaliera è composta dai valori frazionari calcolati con l'equazione precedente, mentre la *schedule* settimanale è un agglomerato delle *schedule* giornaliere, ed, infine, la *schedule* annuale comprende tutte le *schedule* settimanali. Si può quindi intuire la grande flessibilità di simulazione, si conseguenza si è scelto di ipotizzare diversi carichi in vari mesi dell'anno, nei quali si distingue ulteriormente il carico nei giorni festivi e feriali. Si sono quindi create 24 *schedule*, due per ogni mese, di cui una che riguardasse i giorni feriali e l'altra che riguardasse i giorni festivi (Figura 5.7). Tale scelta è motivata dal fatto che i carichi dei server variano di mese in mese durante l'anno accademico, infatti basti pensare ai mesi di ottobre e marzo dove ricominciano le lezioni in cui il carico sarà maggiore, rispetto al mese di agosto, nel quale il Politecnico di Torino sospende tutte le attività per le vacanze estive. Vi è inoltre una certa differenza rispetto ai giorni festivi e feriali, infatti, durante le attività accademiche dal lunedì al venerdì, il carico dei server sarà maggiore rispetto al week-end. Per ipotesi semplificativa, tuttavia, si ipotizza che il carico sia sempre costante, impostando il fattore di utilizzazione a 0.9 in tutte le ore per tutti i mesi. Tale decisione è dovuta a causa della mancanza di dati riguardo la virtualizzazione operata.

## 5.4 Calibrazione del modello energetico

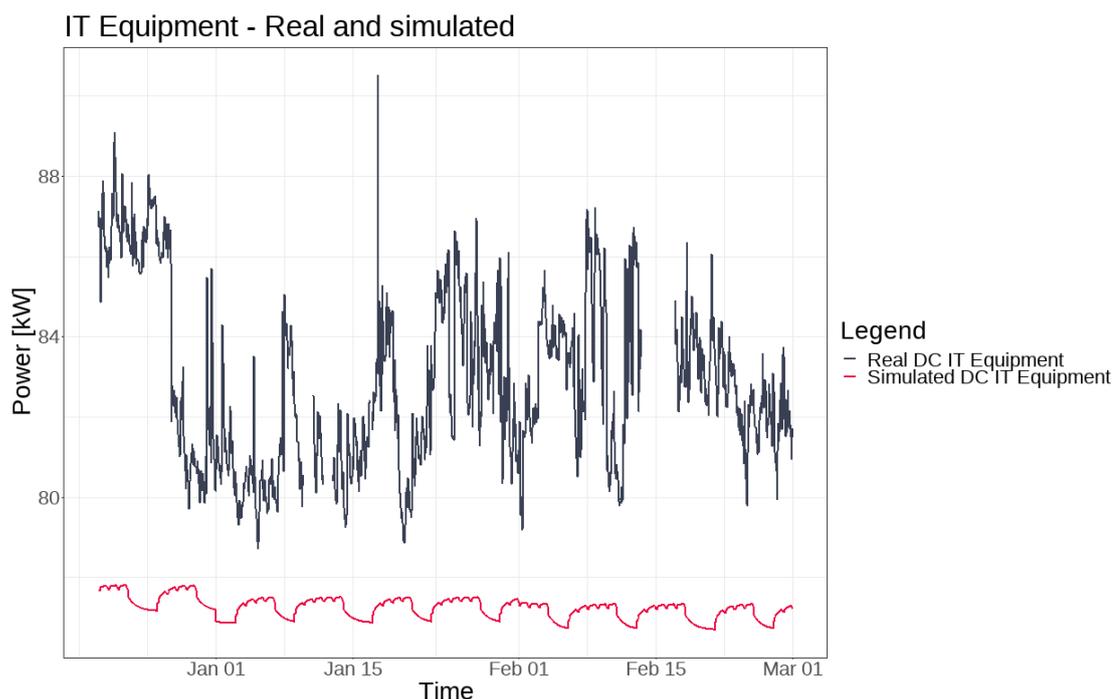
Una volta completata la fase di inserimento dei dati disponibili da schede tecniche oltre che dalle misurazioni rilevate all'interno del modello energetico, è possibile eseguire una simulazione al fine di analizzare i consumi e confrontarli, anche se solamente in parte, con i consumi effettivi. Di seguito, dunque, verranno analizzati tali risultati, confrontandoli con il caso reale.

### 5.4.1 *Internal loads*



**Figura 5.8:** *Internal loads* simulati per ogni modulo

L'analisi degli *internal loads* viene svolta per avere una misura dei carichi termici in input al modello energetico e confrontarli con i dati reali, in modo da avere un confronto diretto e capire se i carichi assegnati corrispondano a realtà, oltre che a poterne caratterizzare l'andamento. Un'importante considerazione da svolgere è che il carico termico simulato, è comprensivo anche delle condizioni al contorno. In *eQUEST*, infatti, è possibile estrapolare il dato di carico termico come carico termico totale riferito alla zona termica. In questo caso, quindi, esso sarà comprensivo del carico dovuto agli apporti inseriti come *equipment* più gli eventuali apporti esterni, sia positivi che negativi. In Figura 5.8 sono rappresentati i carichi termici

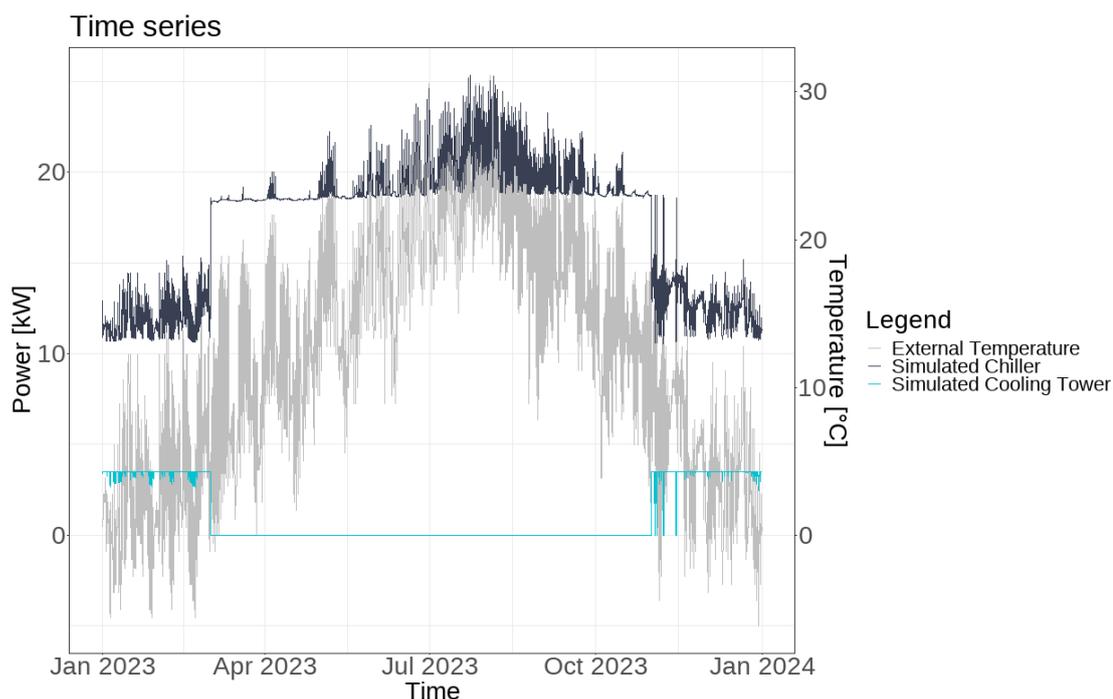


**Figura 5.9:** *Internal loads* totali simulati a livello di DC

reali confrontati con quelli simulati. Si può notare come vi siano delle differenze rispetto agli andamenti, e per quanto riguarda i moduli 2 e 3 anche la differenza di intensità è più marcata. Tale situazione è dovuta all'approssimazione svolta rispetto all'andamento delle *schedule*, le quali non sono state suddivise per ogni modulo, ma a livello di DC. D'altronde, in Figura 5.9 è rappresentato l'andamento degli IT equipment a livello di DC: in questo caso l'intensità è molto simile, ed anche, con una buona approssimazione, il trend. La differenza di intensità è attribuibile alle perdite per trasmissione, dato che si sta analizzando un periodo invernale.

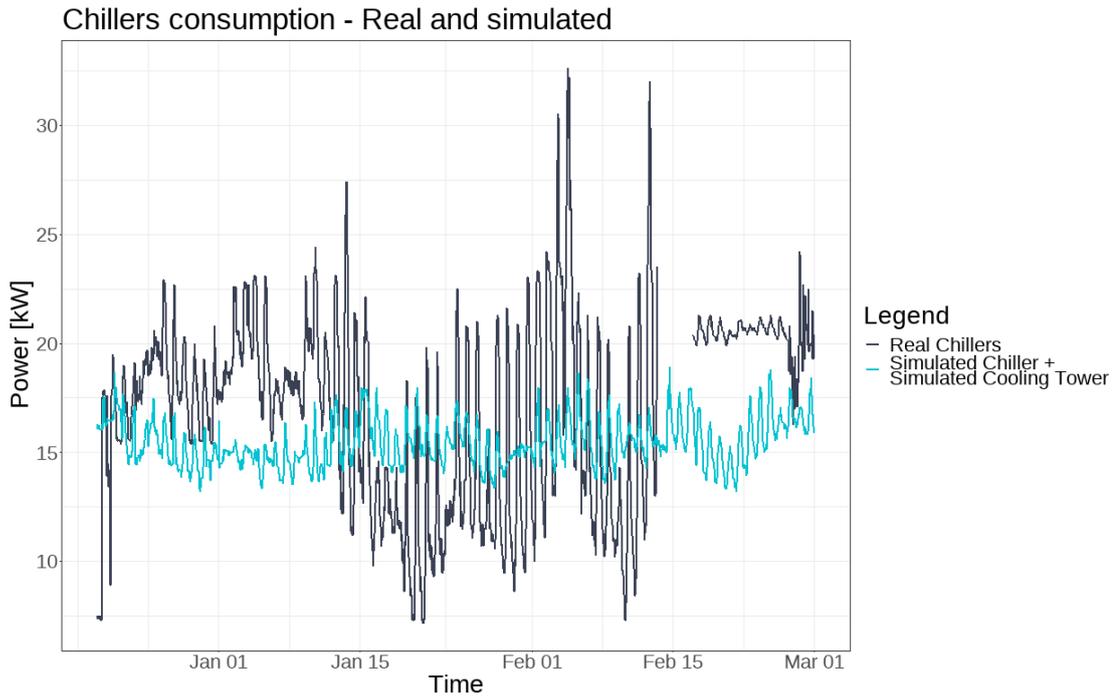
#### 5.4.2 *Chiller* equivalente e torre di raffreddamento

Il modello creato consente di poter simulare l'effettivo utilizzo del DC e di conseguenza anche la potenza richiesta dal *chiller* equivalente e della torre di raffreddamento oltre che a quello del sistema mono-split in pompa di calore. Quest'ultimo, tuttavia, è difficile da poter confrontare con il caso reale dato che non si hanno i suoi dati puntuali ma sono un'aggregazione con altri sistemi ausiliari. Si riporta dunque in Figura 5.10 la simulazione circa l'andamento annuale dei consumi separati tra *chiller* e torre di raffreddamento equivalenti. Per poter ottenere questo risultato, tuttavia, in assenza di curve di performance da parte del produttore, si è ipotizzato



**Figura 5.10:** Simulazione annuale della potenza dei *chiller* e della torre di raffreddamento, confrontato con la temperatura esterna

che il *chiller* sia sempre in funzione, tuttavia quando la temperatura scende al di sotto degli  $0^{\circ}\text{C}$ , subentra la torre di raffreddamento che smaltisce una parte di carico, fino ad un massimo di 30 kW termici. Questo è l'unico modo trovato per poter simulare in maniera abbastanza fedele sia l'andamento, sia l'intensità delle potenze in gioco, in assenza di specifiche curve di performance da parte del produttore. Tali curve, infatti, andrebbero a modellare adeguatamente il *free cooling* indiretto all'interno del *chiller*, che in molti casi è semplicemente parziale e non totale. Si può quindi notare come durante i periodi in cui la temperatura è prossima agli  $0^{\circ}\text{C}$ , la torre di raffreddamento entra in funzione. In Figura 5.11 si riporta l'andamento della potenza elettrica attribuita ai *chiller* reali confrontata con la potenza elettrica totale, comprensiva della torre di raffreddamento e dei *chiller*, derivanti dalla simulazione. L'andamento è abbastanza fedele ed anche l'intensità trovata. Si è inoltre eseguito un confronto energetico. Come riportato in Figura 5.12 i risultati sono molto simili al caso reale, ottenendo un errore di

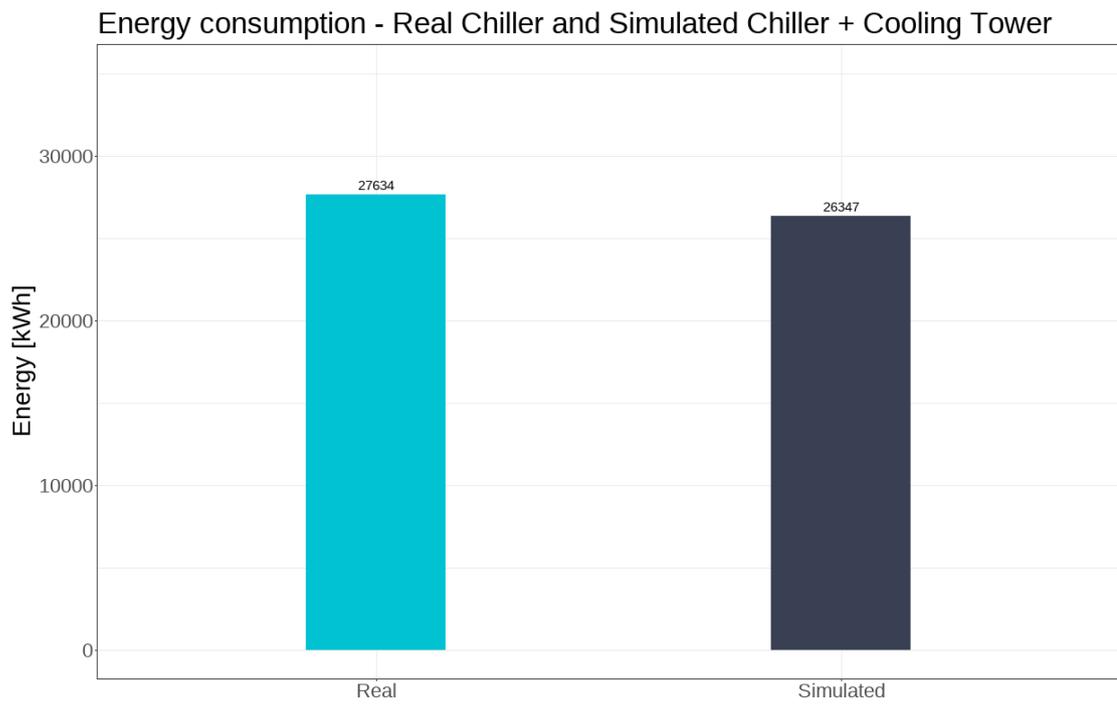


**Figura 5.11:** Simulazione nel periodo di rilevamento del DC reale

sottostima dei consumi pari al 3.75% come riportato dall'Eq. 5.13.

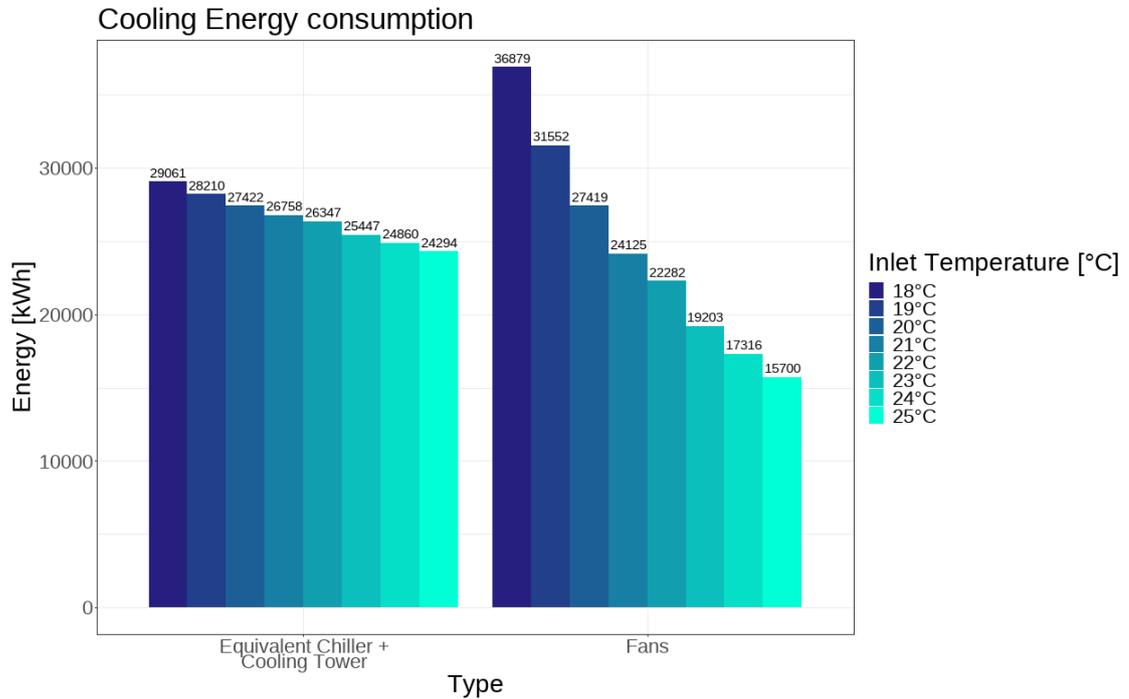
$$\begin{aligned}
 \text{Errore}[\%] &= \\
 &\left( 1 - \frac{\text{Energia chiller reali}}{\text{Energia chiller} + \text{torre di raffreddamento simulati}} \right) * 100 = \\
 &\left( 1 - \frac{26597}{27634} \right) * 100 = 3.75\%
 \end{aligned} \tag{5.13}$$

Un errore di questo tipo è più che accettabile se rapportato ai dati disponibili. È importante notare che la simulazione effettuata rappresenta solamente bozza del modello, inoltre, la simulazione può essere utilizzata come base per ulteriori miglioramenti e ottimizzazioni del modello. Ci si aspetta, inoltre, che con ulteriori dati raccolti e con l'utilizzo di tecniche di ottimizzazione avanzate, vi può essere un certo grado di miglioramento ulteriore della precisione del modello e fornire una rappresentazione ancora più fedele della realtà.



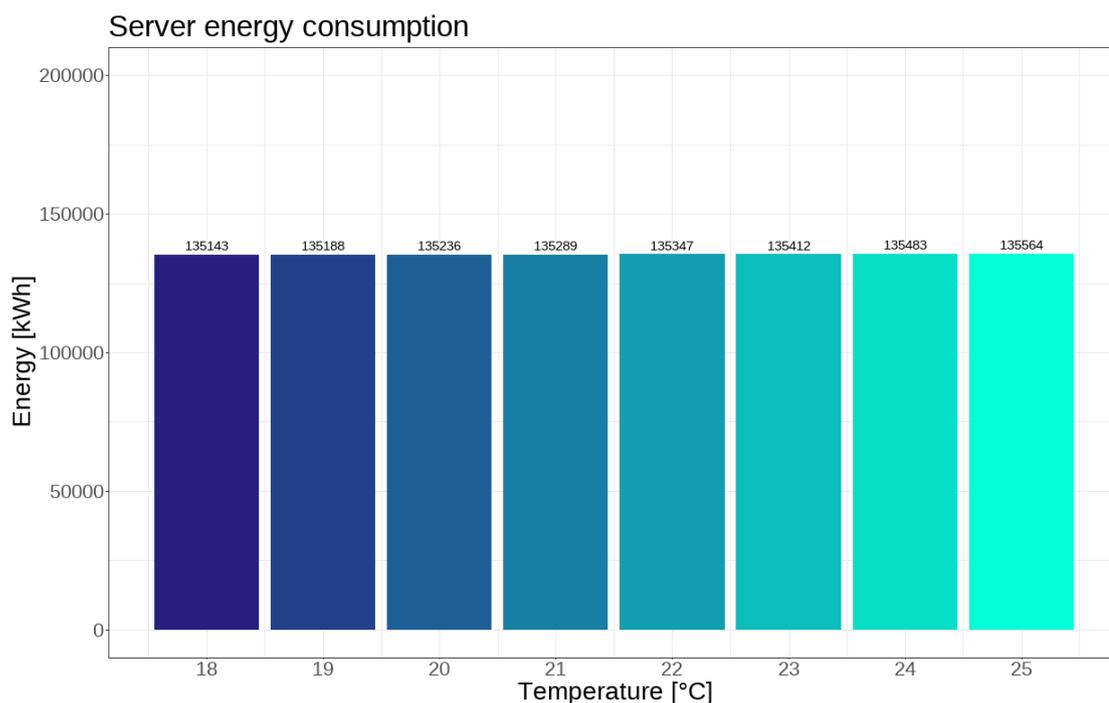
**Figura 5.12:** Consumi energetici a confronto

## 5.5 Thermal management e possibili scenari



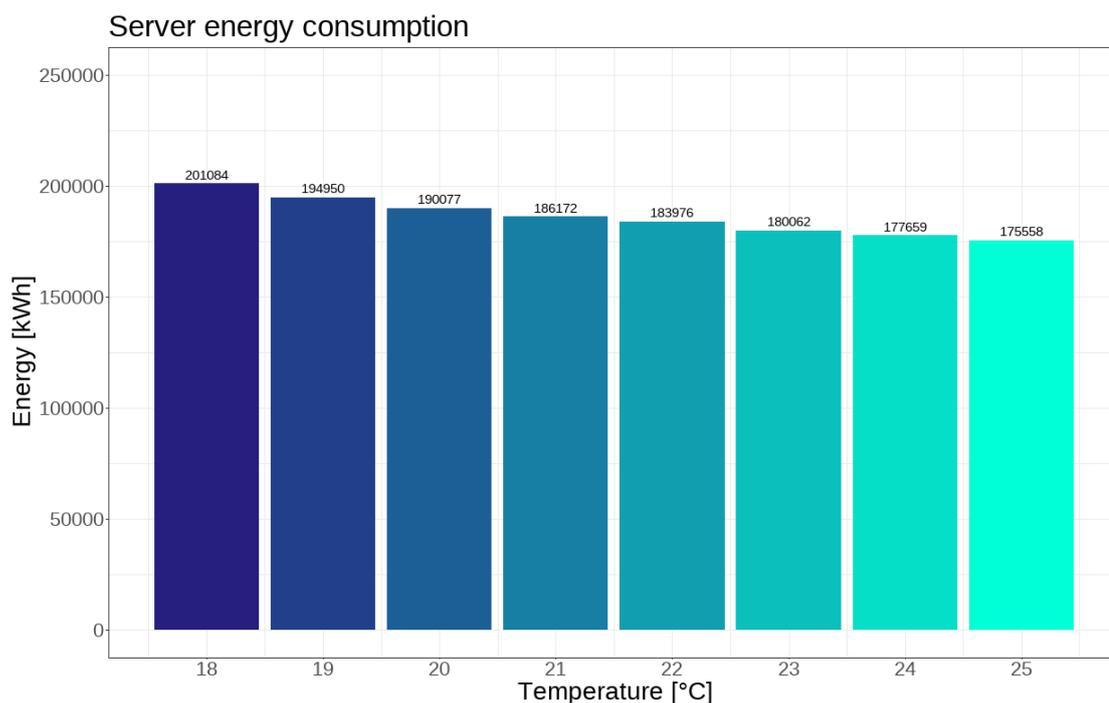
**Figura 5.13:** Confronto dell'energia richiesta dal sistema di raffreddamento alle diverse temperature di ingresso ai server

Una volta ottenuta una calibrazione abbastanza fedele del caso reale, si possono effettuare delle simulazioni di scenari, sempre riferiti al periodo di cui si ha conoscenza reale. In assenza di dati fedeli, infatti, è possibile un errore non indifferente in quanto la calibrazione dovrebbe avvenire su almeno un intero anno. Visto che le principali metodologie di risparmio sono già state adottate con l'implementazione di *chiller* che operano anche parzialmente in *free cooling* oltre che al contenimento dell'isola calda, è possibile operare delle tecniche di *thermal management*. L'efficienza del sistema di raffreddamento aumenta all'aumentare delle temperature di ingresso ai CRAC [104], riducendo dunque l'energia richiesta per il raffreddamento degli IT equipment. D'altro canto, l'aumento delle temperature non è sempre consigliato per ottenere un risparmio energetico in quanto può provocare dei malfunzionamenti nei server [60], infatti un aumento delle temperature in ingresso ai CRAC è dovuto ad un aumento della temperatura in ingresso ai server. Tenendo tuttavia in considerazioni le disposizioni di ASHRAE [55], è possibile ipotizzare degli scenari in cui si vada ad aumentare gradualmente la temperatura di ingresso ai server, pur restando nei limiti imposti dallo standard. All'interno del modello



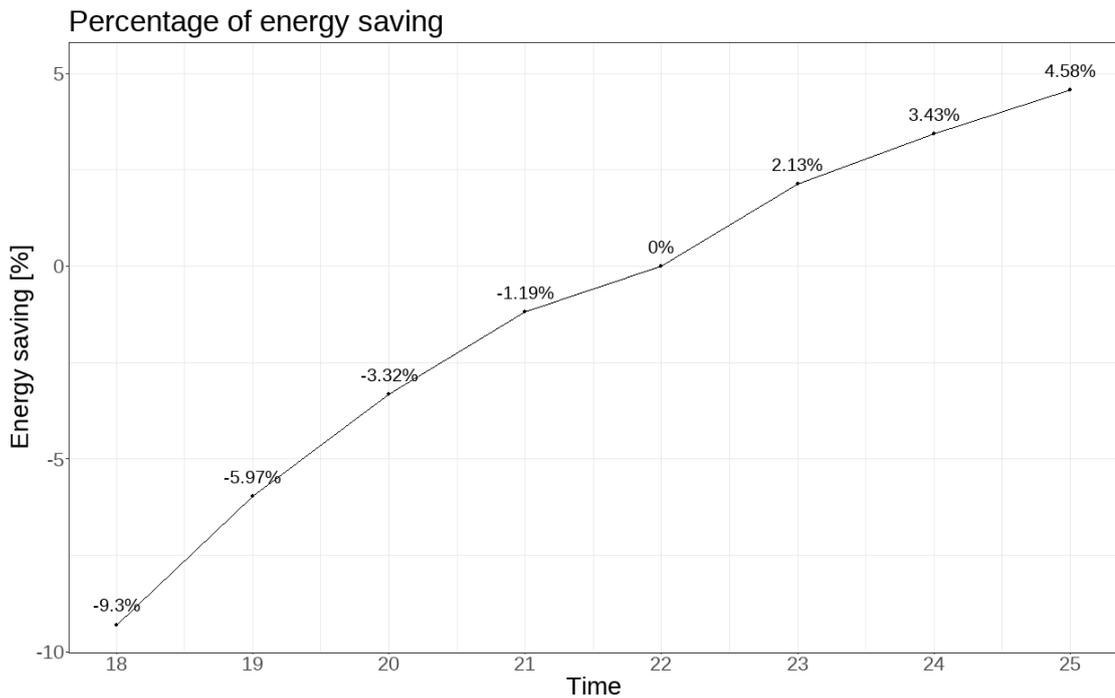
**Figura 5.14:** Confronto dell'energia richiesta dai server alle diverse temperature di ingresso ai server

energetico non si ha la possibilità di assegnare una temperatura di ingresso ai server, tuttavia, si può procedere aumentando la temperatura all'interno della zona termica riferita al modulo. Come citato precedentemente, attualmente in tutte le zone la temperatura assegnata è di  $31.5^{\circ}\text{C}$ , oltre la quale il sistema di raffreddamento composto dai CRAC provvede a riportarla al limite impostato. Andando ad aumentare tale temperatura si ha quindi la possibilità di simulare l'aumento di efficienza del CRAC, riducendo l'energia spesa da parte del *chiller* e della torre di raffreddamento modellati. Tenendo in considerazione che variando la temperatura di mantenimento all'interno della zona termica, bisognerà variare anche la temperatura di ingresso ai server nel *power model* e riassegnare sia le *schedule* che gli *equipment load* all'interno del modello. Si ipotizza che il salto termico sia costante e pari a circa  $10^{\circ}\text{C}$  [81] tra la temperatura di ingresso ai server nel *power model* e l'isola calda. Si procede dunque ad effettuare delle simulazioni, partendo dal caso reale, ovvero con temperatura di ingresso ai server pari a  $22^{\circ}\text{C}$  e temperatura nell'isola calda di  $31.5^{\circ}\text{C}$ , e spaziare tra i limiti imposti da ASHRAE [55]. Il limite massimo, per limiti del modello energetico, sono di  $25^{\circ}\text{C}$  in ingresso ai server e quindi di  $35^{\circ}\text{C}$  di temperatura nei moduli. Si riporta dunque in Figura 5.13 come l'energia richiesta dal sistema di raffreddamento diminuisce con l'aumentare



**Figura 5.15:** Confronto dell'energia richiesta dall'intero DC alle diverse temperature di ingresso ai server

della temperatura in ingresso ai server. Si può notare come gli andamenti siano diversi tra il consumo complessivo del *chiller* e la torre evaporativa, in confronto a quello dei ventilatori: più lineare nel primo, mentre tendente all'esponenziale decrescente nel secondo. Importante precisare come, all'aumentare della temperatura in ingresso ai server, diminuisce il consumo del sistema di raffreddamento, ma aumenta il carico dei server, dovuto alle assunzioni fatte nel *power model* con gli opportuni riferimenti bibliografici. Tale situazione, infatti, potrebbe comportare ad un risparmio energetico del sistema di raffreddamento, ma interamente consumato dalla richiesta energetica dei server. È dunque opportuno confrontare il consumo di questi ultimi al variare della temperatura in ingresso. In Figura 5.14 sono rappresentate tali variazioni: si può notare come l'energia richiesta aumenta all'aumentare della temperatura, come previsto. Visto che l'ordine di grandezza dei consumi è diverso, è opportuno sommarli tra di loro, in modo da ottenere un consumo totale riferito al DC simulato. In Figura 5.15 viene sommato l'effetto delle due variabili; si può notare come vi sia comunque un risparmio, nonostante il consumo aumentato dei server. Questo è dovuto al fatto che, l'energia risparmiata dal gruppo di raffreddamento, è maggiore rispetto all'energia richiesta in più dai server per potersi raffreddare. In questa situazione dunque, vengono calcolati gli



**Figura 5.16:** Risparmio energetico percentuale rispetto al caso reale di 22°C

ipotetici risparmi percentuali, prendendo come riferimento il caso reale, ovvero di 22°C di temperatura in ingresso ai server. In Figura 5.16 si può notare come il risparmio sia, ovviamente, positivo per quanto riguarda temperature più alte rispetto al caso reale. È chiaro come si abbia un risparmio sensibile aumentando di semplicemente 1°C la temperatura di ingresso ai server, pari al 2.13%. Ipotizzando che nel caso reale si sia assunta tale temperatura in ingresso ai server, conoscendo l'energia totale spesa per il DC, il risparmio sarebbe stato di circa 3600 kWh, nel periodo che intercorre dal 20 dicembre al 28 febbraio.

# Conclusioni

In questo elaborato di tesi si sono analizzati in primo luogo gli impatti energetici ed ambientali prodotti dai Data Center (DC), a seguito della crescente digitalizzazione delle informazioni e degli obiettivi del *Green Deal*. Per far sì che queste informazioni siano utilizzabili in modo efficace, è necessario che vengano elaborate, gestite, condivise e conservate costantemente. Nei DC, dove la quantità di informazioni è ingente, è fondamentale avere a disposizione apparecchiature IT altamente efficienti. Ciò consente di garantire una gestione efficiente dei dati e di migliorare le prestazioni del sistema, riducendo al contempo i tempi di inattività e ottimizzando la sicurezza dei dati. Inoltre, mantenere costantemente aggiornata l'infrastruttura IT dei DC è essenziale per garantire la capacità di gestire il volume crescente di dati generati dalle applicazioni e dai servizi online. Si è quindi descritto lo stato dell'arte attuale di un tipico DC, analizzandone i principali componenti, con particolare enfasi rispetto ai sistemi di raffreddamento volti a sopperire il carico termico prodotto dalle apparecchiature IT. Esse, infatti, sono particolarmente soggette a degrado e, quindi, perdita di affidabilità, dovuto a condizioni termiche non adeguate, di conseguenza è estremamente importante tenerle a temperature consone. In tale ambito, dunque, i componenti relativi al raffreddamento delle apparecchiature IT assumono un ruolo chiave all'interno dei DC, ed i loro consumi possono concorrere al consumo energetico di un DC anche fino al 40%. Ciò ha portato ad una particolare attenzione rivolta verso questi sistemi, cercando di ottimizzare sempre più la loro efficienza, studiando ed implementando diverse tecnologie di raffreddamento. Nella situazione attuale, la crescente diffusione dei DC ha portato ad un aumento dell'impatto ambientale a livello globale, il quale è stato oggetto di crescente preoccupazione. Per questo motivo, gli stati membri dell'UE hanno adottato delle linee guida riguardanti la progettazione, la costruzione e il funzionamento dei DC, al fine di minimizzare il loro impatto ambientale e massimizzare l'efficienza energetica. Tali linee guida comprendono indicazioni sulla scelta dei materiali, sull'utilizzo di tecnologie a basso impatto ambientale, sulla riduzione dei consumi energetici e sull'adozione di sistemi di monitoraggio per l'ottimizzazione delle prestazioni e la riduzione dei costi energetici. Inoltre, la corretta progettazione e la gestione dei DC in linea con queste indicazioni possono contribuire alla conformità con

le normative e le regolamentazioni inerenti l'efficienza energetica e la protezione ambientale. Si è quindi analizzato l'approccio normativo adottato rispetto alle *best practices* nei DC fornendo una panoramica degli standard vigenti e degli strumenti messi a disposizione per la loro corretta valutazione e monitoraggio. Questi ultimi possono essere adoperati attraverso l'utilizzo di metriche, più o meno puntuali, tra cui spicca il *Power Usage Effectiveness* (PUE), largamente utilizzato per la valutazione dell'efficienza nei DC. Esso esprime il rapporto tra i consumi totali e quelli degli apparecchiature IT, il cui valore ideale è pari a 1, in cui tutta l'energia impiegata nel DC viene attribuita ai soli servizi IT. Dopo aver discusso di quanto detto in precedenza, ci si è concentrati sull'analisi del caso di studio, riguardante il DC all'interno del Politecnico di Torino. Dapprima si è descritta l'infrastruttura all'interno del DC, focalizzandosi sull'alimentazione e sulla logica di funzionamento in caso di guasto. Successivamente è stata prestata particolare attenzione alla descrizione del sistema di raffreddamento installato di tipo *inter-row cooling* per il quale in letteratura si è constatata la sua maggior efficienza rispetto ai più classici sistemi di smaltimento del calore. Esso è composto dall'alternanza di rack, per il contenimento delle apparecchiature IT, e CRAC, sistemi utilizzati per il raffrescamento dell'aria, accorpati tra di loro, formando tre moduli tra di loro separati. Tale tecnologia sfrutta il contenimento dell'aria calda, portando quindi ad una bassissima probabilità di formazione di ricircoli dell'aria calda (HAR), dannosi per le componenti IT, oltre che di by-pass dell'aria fredda (CAB), migliorando l'efficienza di raffreddamento. Una volta descritto nel dettaglio il caso di studio, ci si è concentrati sulla valutazione inerente i dati disponibili rilevati. In tale ambito, la collaborazione del personale del Politecnico di Torino è stata fondamentale, in quanto hanno permesso l'installazione di *datalogger* in punti strategici del DC, in modo da poter operare un'analisi quanto più completa possibile. Durante le analisi effettuate, per mezzo di opportuni grafici, si sono dunque rilevate delle anomalie di consumo, nel periodo che intercorre tra il 20 dicembre, data di inizio dei rilevamenti, fino al 27 dicembre 2022, in cui il DC ha consumato maggiormente rispetto all'andamento medio dei giorni successivi fino al 28 febbraio 2023. Tale consumo anomalo è attribuibile al sistema di *High Performance Computing* (HPC) all'interno del modulo 3. Alla luce degli standard analizzati, si è dunque provveduto al calcolo delle metriche del DC, tra cui il PUE, trovando un valore medio di 1.29. Tale esito può essere considerato soddisfacente, anche in base alla classificazione operata dal *Green Grid* riguardo tale metrica, il cui valore medio globale è di 1.55. Per migliorare il monitoraggio del DC ed intervenire tempestivamente qualora si rilevassero delle problematiche, si è prodotto un sistema di *Energy Information System* (EIS), consistente in una *dashboard*. Essa riporta i consumi oltre che alle metriche calcolabili del DC, portando l'attenzione su eventuali dati anomali oltre che alla possibilità di effettuare studi approfonditi per rilevare le possibili cause e poter intervenire tempestivamente in caso di anomalie. In conclusione

alla parte di analisi del DC del Politecnico di Torino, si sono messe in risalto le criticità riscontrate durante i rilievi in loco, ponendo l'attenzione su eventuali rischi e suggerendo delle possibili strategie di rimedio. Infine, grazie alle informazioni ricevute riguardo le macchine e tecnologie impiegate, è stato possibile elaborare un modello energetico del DC, effettuato grazie al software di simulazione energetica statunitense *eQUEST*. Esso è stato dunque calibrato sul periodo di riferimento, per poi effettuare delle simulazioni di scenari di risparmio energetico grazie a tecniche di *thermal management*. Si è constatato, quindi, come l'aumento della temperatura dell'aria fredda in ingresso alle apparecchiature IT, finalizzata al loro raffreddamento, possa portare ad un risparmio energetico fino ad una percentuale pari a circa il 4.5% rispetto alla situazione attuale, pur mantenendosi entro i limiti imposti dallo standard ASHRAE. In conclusione, dato l'obiettivo di ridurre l'impatto ambientale, le analisi effettuate sui consumi, e possibili anche grazie all'utilizzo della *dashboard* prodotta, hanno evidenziato un'eventuale consumo anomalo in un periodo in cui non era previsto, rendendo consapevoli i gestori del DC i quali possono prendere provvedimenti al fine di evitare nuovamente situazioni simili di emissioni di CO<sub>2</sub> prodotte potenzialmente evitabili. L'utilizzo di metriche fornisce, inoltre, la possibilità, con poche informazioni, di avere un quadro generale delle prestazioni del DC, sensibilizzando i supervisori, i quali potranno così perseverare gli obiettivi di massima efficienza, come previsto dagli standard vigenti. Lo sviluppo del modello energetico, inoltre, fornisce la possibilità di effettuare degli scenari di simulazioni con il fine di aumentare l'efficienza del DC reale. Si è dimostrato, infatti, come con un semplice cambio di temperature, il risparmio potenziale è comunque rilevante. Ovviamente tali risultati sono migliorabili con il tempo, installando altri *datalogger* più specifici, aumentando il livello di monitoraggio del DC, oltre che a raffinare il modello energetico sviluppato, potendo effettuare simulazioni sempre più accurate.

# Bibliografia

- [1] Marta Chinnici, Davide De Chiara, Agostino Funel, Giovanni Ponti e Andrea Quintiliani. «Energia rinnovabili per i Data Center nelle Smart Cities». In: *Energia, ambiente e innovazione* (feb. 2016). DOI: 10.12910/EAI2016-028 (cit. alle pp. ii, 4).
- [2] Martijn Koot e Fons Wijnhoven. «Usage impact on data center electricity needs: A system dynamic forecasting model». In: *Applied Energy* 291 (2021), p. 116798. ISSN: 0306-2619. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116798>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261921003019> (cit. a p. ii).
- [3] Acton M., Bertoldi P. e Booth J. «Best Practice Guidelines for the EU Code of Conduct on Data Centre Energy Efficiency». In: (2020) (cit. alle pp. 2, 3, 5, 6).
- [4] 2021) Statista. (January 12. «Worldwide information technology (IT) infrastructure spending breakdown (by value) from 2014 to 2024, by deployment type\*\* [Graph]»). In: *In Statista* (Retrieved November 29, 2022). URL: <https://www.statista.com/statistics/486586/it-infrastructure-spending-forecast-by-type/> (cit. a p. 4).
- [5] 2015) IDATE DigiWorld. (May 15. «Global inventory of datacentres by region in 2014 [Graph]»). In: *In Statista* (Retrieved November 29, 2022). URL: <https://www.statista.com/statistics/461580/inventory-of-datacentres-by-region-worldwide/> (cit. a p. 5).
- [6] Alberto Moro. «Le tecnologie dell'Informazione e della Comunicazione per l'efficienza energetica». In: *Energia, Ambiente e Innovazione* (dic. 2012) (cit. alle pp. 2, 11).
- [7] S. Lwasa et al. «Urban systems and other settlements Supplementary Material». In: *IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. A cura di P.R. Shukla et al. Cambridge, UK e New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2022. Cap. 8 (cit. a p. 2).

- [8] European Commission. *European Green Deal*. 2019 or 2020. URL: [https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_en](https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en) (cit. a p. 2).
- [9] European Commission. *A Clean Planet for all*. Accessed on: 2021-09. 2018 (cit. a p. 3).
- [10] European Commission. *European Green Digital Coalition*. 2020. URL: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/european-green-digital-coalition> (cit. a p. 3).
- [11] Atilla Wohllebe. «Dialogue Marketing: Ecological Sustainability of Letter and E-Mail in Comparison in Germany». In: *Journal of Environmental Sustainability* 7 (gen. 2019), pp. 52–64 (cit. a p. 4).
- [12] [https://aws.amazon.com/it/what-is-aws/?nc1=f\\_cc](https://aws.amazon.com/it/what-is-aws/?nc1=f_cc) (cit. a p. 5).
- [13] <https://cloud.google.com/> (cit. a p. 5).
- [14] Montecvecchi F., Sticler T., Hintemann R. e Hinterholzer S. «Energy-efficient Cloud Computing Technologies and Policies for an Eco-friendly Cloud Market. Final Study Report». In: *JRC128184* (2020) (cit. a p. 6).
- [15] <https://www.deac.eu/data-centers/power-supply/power-supply-2/en/> (cit. a p. 7).
- [16] Ali Habibi Khalaj e Saman K. Halgamuge. «A Review on efficient thermal management of air- and liquid-cooled data centers: From chip to the cooling system». In: *Applied Energy* 205 (2017), pp. 1165–1188. ISSN: 0306-2619. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.037>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261917310541> (cit. alle pp. 8, 18, 21, 23, 24, 111, 112).
- [17] D. Forni M. Bramucci D. Di Santo. «Uso razionale dell'energia nei centri di calcolo». In: *ENEA* (set. 2010) (cit. alle pp. 8, 12, 19, 21).
- [18] 2015) Clarke Energy. (April 25. «Energy demand distribution in data centers as of 2015, by use [Graph]». In: *In Statista* (). URL: <https://www-statista-com.ezproxy.biblio.polito.it/statistics/602629/worldwide-data-centers-energy-demand-distribution/> (cit. a p. 9).
- [19] M. Seyedmahmoudian R. Rahmani I. Moser. «A Complete Model for Modular Simulation of Data Centre Power Load». In: *JOURNAL OF IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATION SCIENCE AND ENGINEERING* 14 (ago. 2017), pp. 1–2 (cit. a p. 10).
- [20] Richard Brown et al. «Report to Congress on Server and Data Center Energy Efficiency: Public Law 109-431». In: (gen. 2007). DOI: 10.2172/929723 (cit. a p. 11).

- [21] Ali C. Kheirabadi e Dominic Groulx. «Cooling of server electronics: A design review of existing technology». In: *Applied Thermal Engineering* 105 (2016), pp. 622–638. ISSN: 1359-4311. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.03.056>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431116303490> (cit. a p. 12).
- [22] Sulav Malla e Ken Christensen. «The effect of server energy proportionality on data center power oversubscription». In: *Future Generation Computer Systems* 104 (2020), pp. 119–130. ISSN: 0167-739X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.future.2019.10.021>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167739X19304145> (cit. alle pp. 13, 14).
- [23] Luiz André Barroso e Urs Hölzle. «The Case for Energy-Proportional Computing». In: *Computer* 40.12 (2007), pp. 33–37. DOI: 10.1109/MC.2007.443 (cit. alle pp. 14–16).
- [24] Vishva Patel, Dhara Patel e Sunit Parmar. «Arcus Cloud: A Private Cloud Establishment». In: *INTERNATIONAL JOURNAL OF COMPUTER SCIENCES AND ENGINEERING* 6 (mar. 2018). DOI: 10.26438/ijcse/v6i3.283291 (cit. a p. 17).
- [25] Jay Dietrich Roger Schmidt Don Beaty. «Increasing energy efficiency in data centers». In: *ASHRAE* (2008-2009) (cit. a p. 13).
- [26] Khosrow Ebrahimi, Gerard Jones e Amy Fleischer. «A review of data center cooling technology, operating conditions and the corresponding low-grade waste heat recovery opportunities». In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 31 (mar. 2014). DOI: 10.1016/j.rser.2013.12.007 (cit. a p. 13).
- [27] Alfonso Capozzoli e Giulio Primiceri. «Cooling Systems in Data Centers: State of Art and Emerging Technologies». In: *Energy Procedia* 83 (2015). Sustainability in Energy and Buildings: Proceedings of the 7th International Conference SEB-15, pp. 484–493. ISSN: 1876-6102. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.12.168>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610215028337> (cit. alle pp. 13, 19, 111, 112, 127).
- [28] *Site Planning Guide for Sun™ Servers, 819-5730-10*. Sun Microsystems, Inc (cit. alle pp. 13, 66, 125).
- [29] Marta Chinnici e Andrea Quintiliani. «Definizione di algoritmi e indicatori per l’efficientamento dei centri di elaborazione dati (CED)». In: (set 2011) (cit. a p. 14).
- [30] Gaurav Dhiman, Kresimir Mihic e Tajana Rosing. «A system for online power prediction in virtualized environments using gaussian mixture models». In: (2010), pp. 807–812. DOI: 10.1145/1837274.1837478 (cit. alle pp. 14, 15).

- [31] Ricardo Lent. «A model for network server performance and power consumption». In: *Sustainable Computing: Informatics and Systems* 3.2 (2013), pp. 80–93. ISSN: 2210-5379. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2012.03.004>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210537912000212> (cit. a p. 15).
- [32] Durairaj M. e P. Kannan. «A Study On Virtualization Techniques And Challenges In Cloud Computing». In: *INTERNATIONAL JOURNAL OF SCIENTIFIC TECHNOLOGY RESEARCH* 2277-8616 3 (nov. 2014), pp. 147–151 (cit. a p. 15).
- [33] <https://uptimeinstitute.com/about-ui/press-releases/uptime-tia> (cit. a p. 16).
- [34] ANSI/TIA-2942-2005 Telecommunications Industry Association (TIA). «Telecommunications Infrastructure Standard for Data Centers». In: () (cit. a p. 16).
- [35] <https://uptimeinstitute.com/uptime-institute-awards/achievements> (cit. alle pp. 18, 28).
- [36] *Qualitative Analysis of Power Distribution Configurations for Data Centers*. White Paper 4. The Green Grid (cit. a p. 19).
- [37] N. Rasmussen. «A Scalable, Reconfigurable, and Efficient High Density Data Center Power Distribution Architecture». In: *Scheiner Electric* (2009) (cit. a p. 19).
- [38] AK. Kutsmeda. «Evaluating UPS System Efficiency». In: *Consulting-Specifying Engineer* 205 (giu. 2015), pp. 1165–1188. URL: <http://www.csemag.com/single-article/evaluating-ups-system-efficiency/73497ade33f9a66ead63a77f33e94d4e.html> (cit. a p. 19).
- [39] Ali Vafamehr. «Energy-aware cloud computing». In: *The Electricity Journal* 31 (mar. 2018). DOI: 10.1016/j.tej.2018.01.009 (cit. a p. 20).
- [40] <https://www.hvacinvestigators.com/webinars/the-basics-of-chillers-how-they-work-where-theyre-used-and-common-problems/> (cit. a p. 21).
- [41] Qingxia Zhang, Zihao Meng, Xianwen Hong, Yuhao Zhan, Jia Liu, Jiabao Dong, Tian Bai, Junyu Niu e M. Jamal Deen. «A survey on data center cooling systems: Technology, power consumption modeling and control strategy optimization». In: *Journal of Systems Architecture* 119 (2021), p. 102253. ISSN: 1383-7621. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sysarc.2021.102253>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383762121001739> (cit. alle pp. 21–24).

- [42] Jianxiong Wan, Xiang Gui, Shoji Kasahara, Yuanyu Zhang e Ran Zhang. «Air Flow Measurement and Management for Improving Cooling and Energy Efficiency in Raised-Floor Data Centers: A Survey». In: *IEEE Access* 6 (2018), pp. 48867–48901. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2866840 (cit. alle pp. 21, 23, 24).
- [43] Yoshiaki Taniguchi et al. «Tandem Equipment Arranged Architecture with Exhaust Heat Reuse System for Software-Defined Data Center Infrastructure». In: *IEEE Transactions on Cloud Computing* 5.2 (2017), pp. 182–192. DOI: 10.1109/TCC.2015.2440245 (cit. a p. 21).
- [44] N. Rasmussen K. Dunlap. «Choosing between room, row and rack-based cooling for data centers». In: *Scheiner Electric* (2012) (cit. alle pp. 23, 24).
- [45] Robert Bob Sullivan, Guoqiang Li e Xiaofei Zhang. «Cold Aisle or Hot Aisle Containment - Is one better than the other?». In: (2018), pp. 1–4. DOI: 10.1109/INTLEC.2018.8612444 (cit. a p. 23).
- [46] Cheng-Hao Wang, Yeng-Yung Tsui e Chi-Chuan Wang. «Airflow Management on the Efficiency Index of a Container Data Center Having Overhead Air Supply». In: *Journal of Electronic Packaging* 139.4 (ott. 2017). ISSN: 1043-7398. DOI: 10.1115/1.4038114. URL: <https://doi.org/10.1115/1.4038114> (cit. a p. 24).
- [47] V. Avelar P. Lin. «How Row-based Data Center Cooling Works». In: *Scheiner Electric* (2014) (cit. a p. 24).
- [48] Rajarshi Das, Jeffrey Kephart, Jonathan Lenchner e Hendrik Hamann. «Utility-function-driven energy-efficient cooling in data centers». In: gen. 2010, pp. 61–70. DOI: 10.1145/1809049.1809058 (cit. a p. 24).
- [49] *EN 50600 Data Center Standard*. White Paper. Tüvit (cit. alle pp. 26, 28).
- [50] *Data Center Certification*. White Paper. Tüvit (cit. alle pp. 27, 28).
- [51] *Thermal Guidelines for Data Processing Environments*. ASHRAE, 2004 (cit. alle pp. 29, 30).
- [52] *Thermal Guidelines for Data Processing Environments*. ASHRAE, 2008 (cit. alle pp. 29, 30).
- [53] *Thermal Guidelines for Data Processing Environments*. ASHRAE, 2011 (cit. alle pp. 29, 31).
- [54] *Thermal Guidelines for Data Processing Environments*. ASHRAE, 2016 (cit. a p. 29).
- [55] *Thermal Guidelines for Data Processing Environments*. ASHRAE, 2021 (cit. alle pp. 29, 32–34, 79, 113, 127, 135, 136).

- [56] *2011 Thermal Guidelines for Data Processing Environments – Expanded Data Center Classes and Usage Guidance*. White Paper. ASHRAE TC 9.9 (cit. alle pp. 29, 30).
- [57] *2011 Thermal Guidelines for Data Processing Environments - Expanded Data Center Classes and Usage Guidance*. ASHRAE, 2011 (cit. alle pp. 31, 124, 125).
- [58] <https://www.thegreengrid.org/> (cit. alle pp. 36, 37).
- [59] J. Espy, C. Pratt e H. Tanzer. *The Green Grid Data Center Storage Productivity Metrics (DCsP): Application of Storage System Productivity Operational Metrics*. White Paper #58. The Green Grid (cit. a p. 36).
- [60] Alfonso Capozzoli, Marta Chinnici, Marco Perino e Gianluca Serale. «Review on Performance Metrics for Energy Efficiency in Data Center: The Role of Thermal Management». In: vol. 8945. Feb. 2015, pp. 135–151. ISBN: 978-3-319-15785-6. DOI: 10.1007/978-3-319-15786-3\_9 (cit. alle pp. 37, 135).
- [61] S. Helal, W. Mann, H. El-Zabadani, J. King, Y. Kaddoura e E. Jansen. «The Gator Tech Smart House: a programmable pervasive space». In: *Computer* 38.3 (2005), pp. 50–60. DOI: 10.1109/MC.2005.107 (cit. a p. 37).
- [62] Mueen Uddin, Asadullah Shah e Amjad Rehman. «Metrics for Computing Performance of Data Center for Instigating Energy Efficient Data Centers». In: *Journal of scientific and industrial research* 73 (gen. 2014), pp. 11–15 (cit. a p. 37).
- [63] M. Chinnici, A. Capozzoli e G. Serale. «Measuring energy efficiency in data centers». English. In: *Pervasive Computing: Next Generation Platforms for Intelligent Data Collection*. Cited By :16. 2016, pp. 299–351. URL: [www.scopus.com](http://www.scopus.com) (cit. alle pp. 37–39, 89, 99).
- [64] <https://www.energystar.gov/> (cit. a p. 37).
- [65] Bernd Schaeppi, Thomas Bogner, Alexander Schloesser, Lutz Stobbe e Marcos Dias de Asuncao. «Metrics for energy efficiency assessment in data centers and server rooms». In: *2012 Electronics Goes Green 2012+*. 2012, pp. 1–6 (cit. a p. 37).
- [66] D. Anderson et al. *A framework for data center energy productivity*. White Paper #13. The Green Grid (cit. a p. 39).
- [67] M. Blackburn. *The Green Grid Data Center Compute Efficiency Metric: DCcE*. White Paper #34. The Green Grid (cit. a p. 39).
- [68] <http://www.technosteel.it/> (cit. alle pp. 41, 46).

- [69] *Catalogo generale 2018*. TecnoSteel. 2018 (cit. alle pp. 41, 46, 47, 50, 120, 121).
- [70] <https://www.energystar.gov/products/containmentenclosures> (cit. a p. 48).
- [71] *Stulz WCA/K/FC 182-P÷604-P*. Stulz (cit. alle pp. 49, 119).
- [72] *Scheda tecnica Frer - Nano*. Frer (cit. a p. 51).
- [73] *Scheda tecnica KEMA - PM9P*. Schneider (cit. a p. 51).
- [74] *Multi Sentry - MST 80*. Riello UPS (cit. a p. 57).
- [75] *Easy UPS 3M 3:3 80 kVA, 400 V, per batterie esterne, avviamento 5×8 - E3MUPS80KHS*. Schneider Electric (cit. a p. 57).
- [76] *Master Switch STS Trifase - 100-800 A Static Transfer Switch*. Riello UPS (cit. a p. 57).
- [77] *Multi Sentry 10-20 kVA*. Riello UPS (cit. a p. 57).
- [78] <https://www.influxdata.com/> (cit. a p. 58).
- [79] <https://grafana.com/> (cit. a p. 58).
- [80] Potts Z. *Free cooling technologies in data centre applications*. White Paper. Manchester: SUDLOWS, 2011 (cit. a p. 65).
- [81] Vertiv. *Enhanced Efficiency in Data Center with Elevated Return Air Temperature*. Application note V-TM/124. Vertiv (cit. alle pp. 79, 136).
- [82] M. Symour, M. Bana, D. Wang, D. Cummins e V. Para. *The performance indicator: assessing and visualizing data center cooling performance*. White Paper #68. The Green Grid (cit. alle pp. 89, 90, 93, 94).
- [83] V. Avelar, D. Azevedo e A. French. *PUE: a comprehensive examination of the metric*. White Paper #49. The Green Grid (cit. alle pp. 89, 90).
- [84] Christian Belady, ANDY RAWSON, AMD PFLEUGER e DELL CADER. «Green grid data center power efficiency metric: PUE and DCIE». In: (gen. 2008) (cit. alle pp. 89, 90, 95, 96, 98).
- [85] 2022) Uptime Institute. (September 14. «What is the average annual power usage effectiveness (PUE) for your largest data center? [Graph]». In: *Statista* (Retrieved March 13, 2023). URL: <https://www-statista-com/statistics/1229367/data-center-average-annual-pue-worldwide/?locale=en> (cit. a p. 91).
- [86] *Green Grid metrics: describing datacenter power efficiency*. The Green Grid, feb. 2007 (cit. alle pp. 96, 98).

- [87] Zhi Hu Xue, Bang Cheng Ai e Wei Qu. «Data center energy conservation study utilizing loop heat pipes as a chip-level cooling technique and its industrial application». In: *Applied Thermal Engineering* 220 (2023), p. 119715. ISSN: 1359-4311. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119715>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431122016453> (cit. alle pp. 96, 98).
- [88] Björn Schödwell, Koray Ereğ e Ruediger Zarnekow. «Data center green performance measurement: State of the art and open research challenges». In: *19th Americas Conference on Information Systems, AMCIS 2013 - Hyperconnected World: Anything, Anywhere, Anytime 2* (gen. 2013), pp. 1003–1017 (cit. a p. 99).
- [89] 2022) Statista Ember. (February 1. «Carbon intensity of the power sector in Italy from 2000 to 2021 (in grams of CO per kilowatt-hour) [Graph]». In: *Statista* (Retrieved March 09, 2023). URL: <https://www.statista.com/statistics/1290244/carbon-intensity-power-sector-italy/> (cit. a p. 102).
- [90] C. Belady, D. Azevedo, M. Patterson, M. Pouchet e Tipley.R. *Carbon Usage Effectiveness (CUE): A Green Grid Data Center Sustainability Metric*. White Paper #32. The Green Grid, 2010 (cit. a p. 102).
- [91] J. Granderson, G. Lin e MA. Piette. *Energy information systems (EIS): Technology costs, benefits, and best practice uses*. Lawrence Berkeley National Laboratory. LBNL-xxxx., nov. 2013 (cit. a p. 104).
- [92] <https://doe2.com/equest/index.html> (cit. a p. 114).
- [93] <https://www.lbl.gov/> (cit. a p. 114).
- [94] <https://www.doe2.com/> (cit. a p. 114).
- [95] *Sky Air Alpha-series - Climatizzazione - Dati tecnici - RZAG-NV1*. Daikin (cit. a p. 121).
- [96] Michael K. Patterson. «The effect of data center temperature on energy efficiency». In: (2008), pp. 1167–1174. DOI: 10.1109/ITHERM.2008.4544393 (cit. alle pp. 125, 127).
- [97] Buffalo Forge Company. *Fan Engineering*. A cura di Robert Jorgensen. Eight. Buffalo, 1983 (cit. a p. 126).
- [98] Sang-Woo Ham, Min-Hwi Kim, Byung-Nam Choi e Jae-Weon Jeong. «Simplified server model to simulate data center cooling energy consumption». In: *Energy and Buildings* 86 (2015), pp. 328–339. ISSN: 0378-7788. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.10.058>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778814009049> (cit. alle pp. 126, 127).

- [99] S. Sampath. «Thermal Analysis of High End Servers Based on Development of Detail Model and Experiments». Tesi di laurea mag. Arlington: The University of Texas at Arlington, 2012 (cit. a p. 126).
- [100] H. Patelh. «Immersion Cooling of High End Data Center Server and Validation Through Experiments». Tesi di laurea mag. Arlington: The University of Texas at Arlington, 2013 (cit. a p. 126).
- [101] Zhikui Wang, Cullen E. Bash, Niraj H. Tolia, Manish Marwah, Xiaoyun Zhu e Parthasarathy Ranganathan. «Optimal Fan Speed Control for Thermal Management of Servers». In: 2009 (cit. a p. 127).
- [102] Kim Jungsoo, Aly Mohamed Mostafa Sabry, Atienza Alonso David, Vaidyanathan Kalyan e Gross Kenny. «Global Fan Speed Control Considering Non-Ideal Temperature Measurements in Enterprise Servers». In: 2013 (cit. a p. 127).
- [103] Marina Zapater, Patricia Arroba, José Ayala, José Moya e Katalin Olcoz. «A novel energy-driven computing paradigm for e-health scenarios». In: *Future Generation Computer Systems* 34 (mag. 2014), pp. 138–154. DOI: 10.1016/j.future.2013.12.012 (cit. a p. 127).
- [104] Qinghui Tang, Sandeep K. S. Gupta e Georgios Varsamopoulos. «Thermal-aware task scheduling for data centers through minimizing heat recirculation». In: *2007 IEEE International Conference on Cluster Computing*. 2007, pp. 129–138. DOI: 10.1109/CLUSTER.2007.4629225 (cit. a p. 135).