

Monitoraggio e gestione energetica dei data center: l'esperienza del Politecnico di Torino

Alfonso Capozzoli

Politecnico di Torino

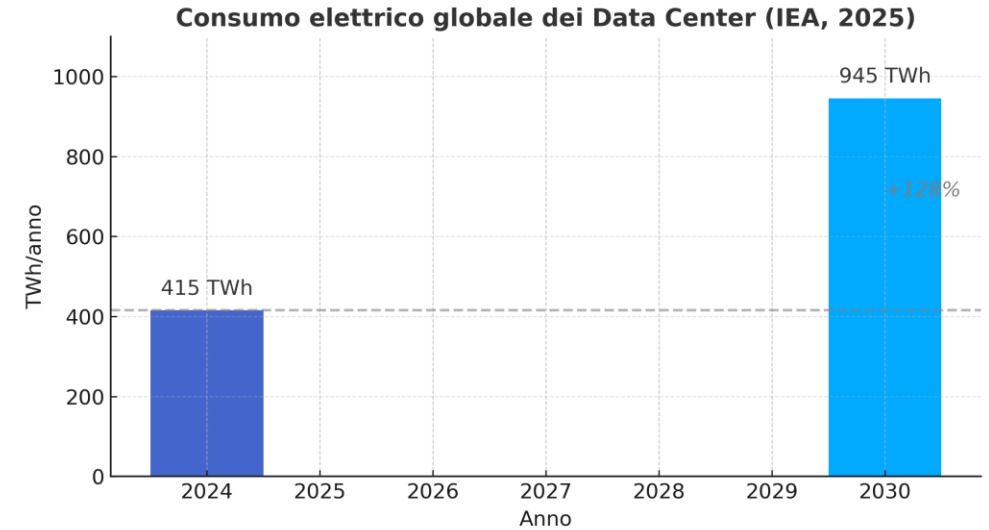
Evoluzione consumi energetici nei data center

Il consumo elettrico globale dei data center è destinato a più che raddoppiare tra il 2024 e il 2030, passando da circa 415 TWh a 945 TWh secondo l'IEA (2025).

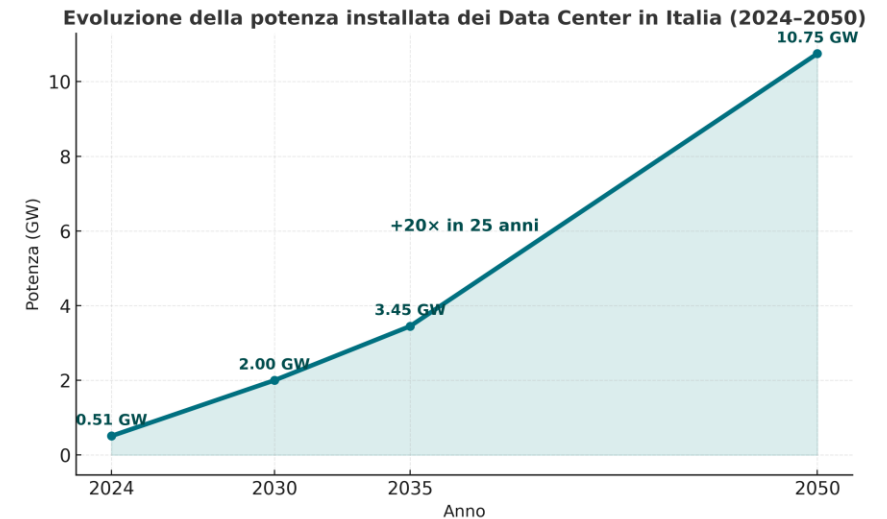
- diffusione dei servizi cloud
- espansione dei modelli di intelligenza artificiale generativa

La potenza installata dei data center in Italia è destinata a crescere in modo esponenziale.

La traiettoria, coerente con gli scenari delineati da *The European House – Ambrosetti & A2A* e *Terna–Snam*, riflette la **rapida espansione dei servizi digitali, cloud e AI**, con un aumento di circa **venti volte** in venticinque anni.

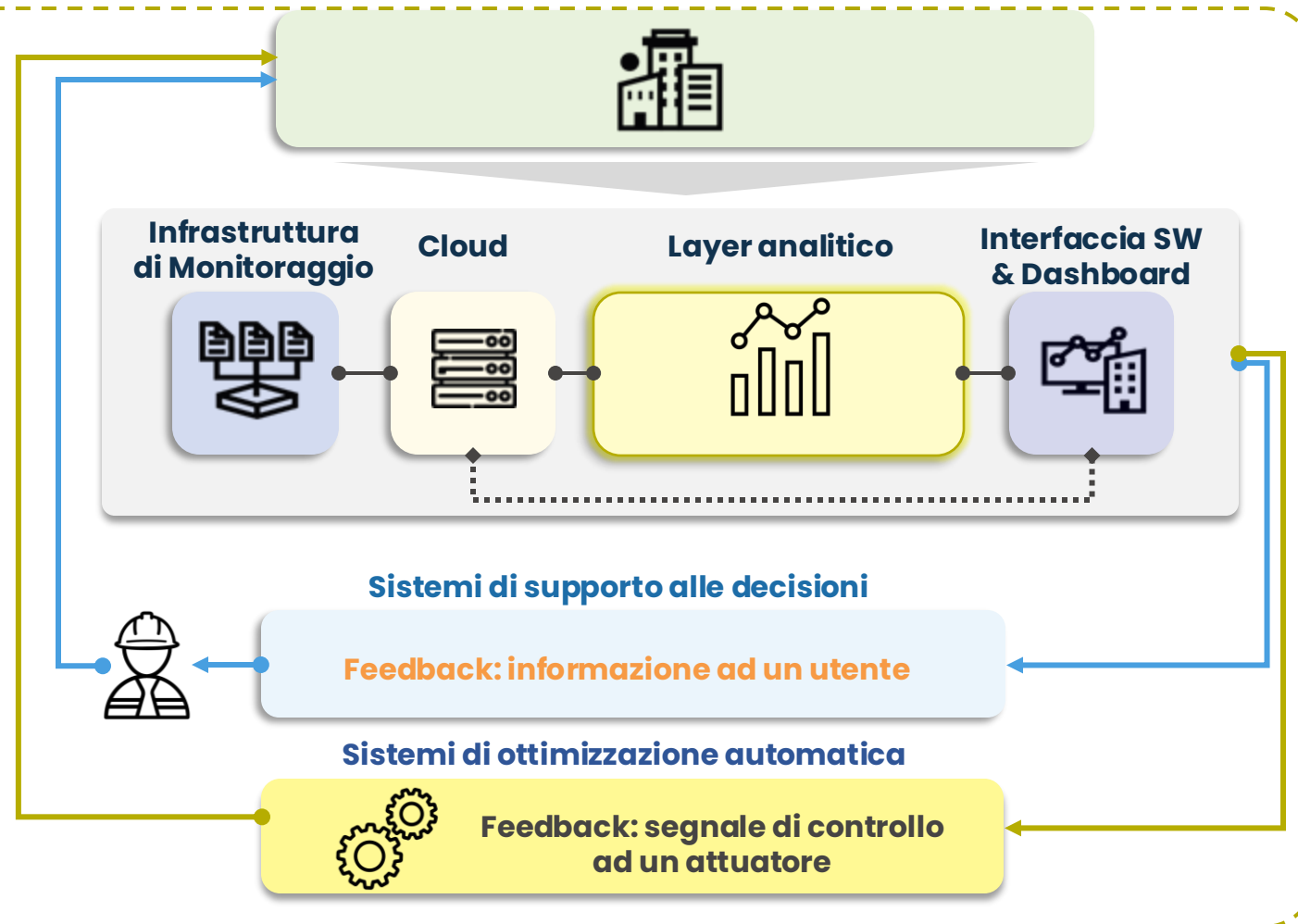
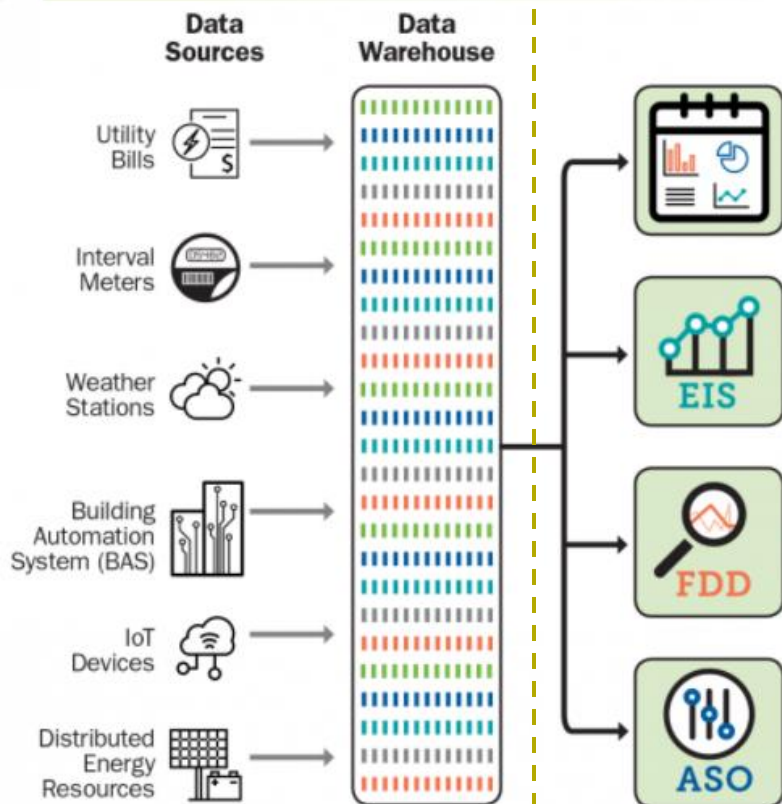
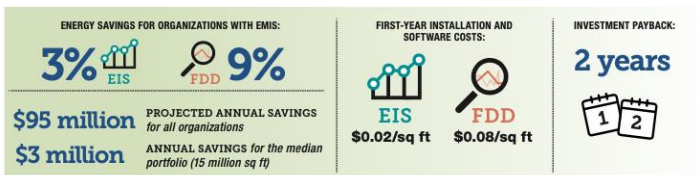


Fonte: International Energy Agency (IEA), Energy and AI (2025) - sezione 'Energy demand from data centres and AI'



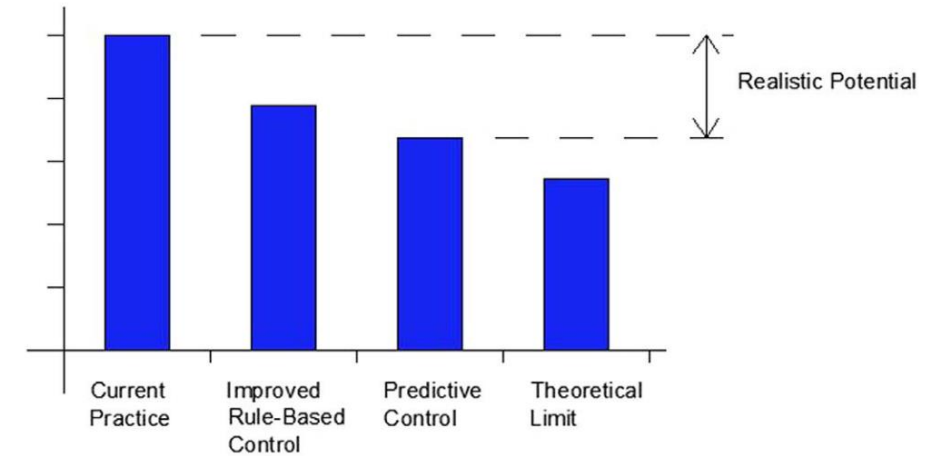
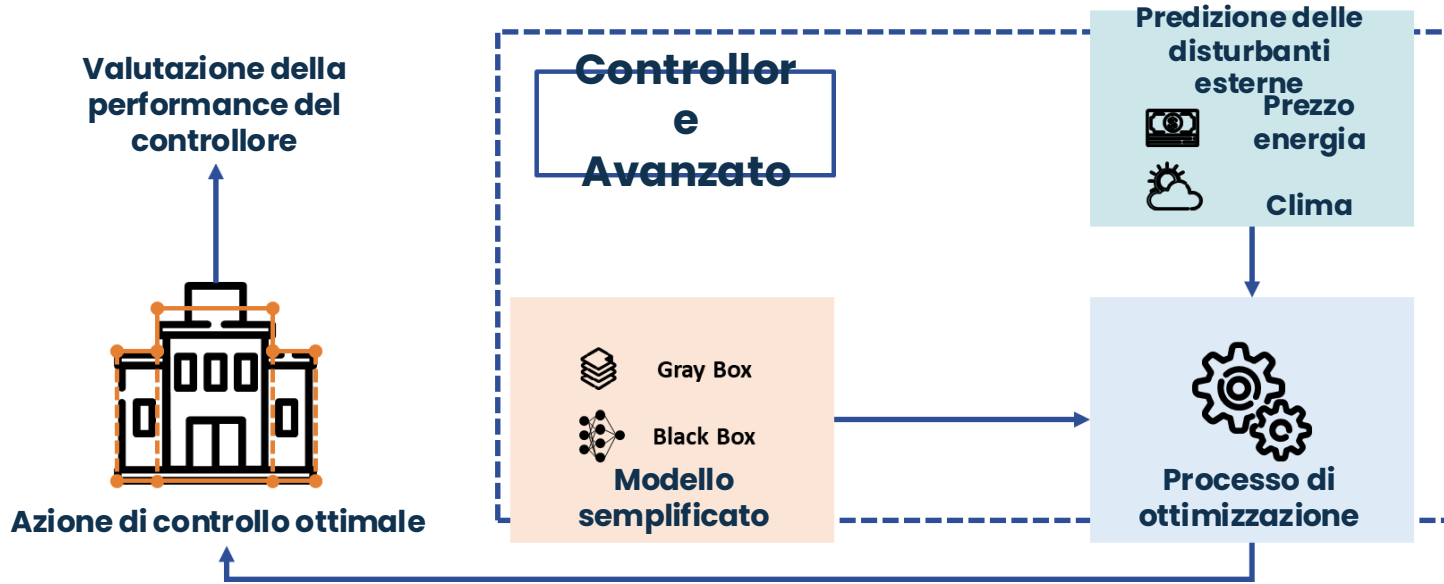
Fonti: The European House – Ambrosetti & A2A (2024); Terna & Snam (2025); AGICI (2025)

Un nuova generazione di sistemi di gestione energetica basati su IA



Fonte
<https://betterbuildingsolutioncenter.energy.gov/beat-blog/smart-energy-analytics-are-key-building-energy-and-cost-savings>

Un nuovo paradigma per il controllo avanzato dei sistemi energetici



Potenziale teorico e realistico di risparmio dei controllori avanzati rispetto a quelli tradizionali.
Fonte: Aste et al., 2016



Multi-obiettivo

Ottimizzare contemporaneamente più obiettivi (ad es. consumo energetico, costi operativi e condizioni ambientali, picchi di domanda).



Flessibile

Essere flessibili rispetto alle condizioni in evoluzione delle variabili forzanti e dei requisiti della rete.



Predittivo

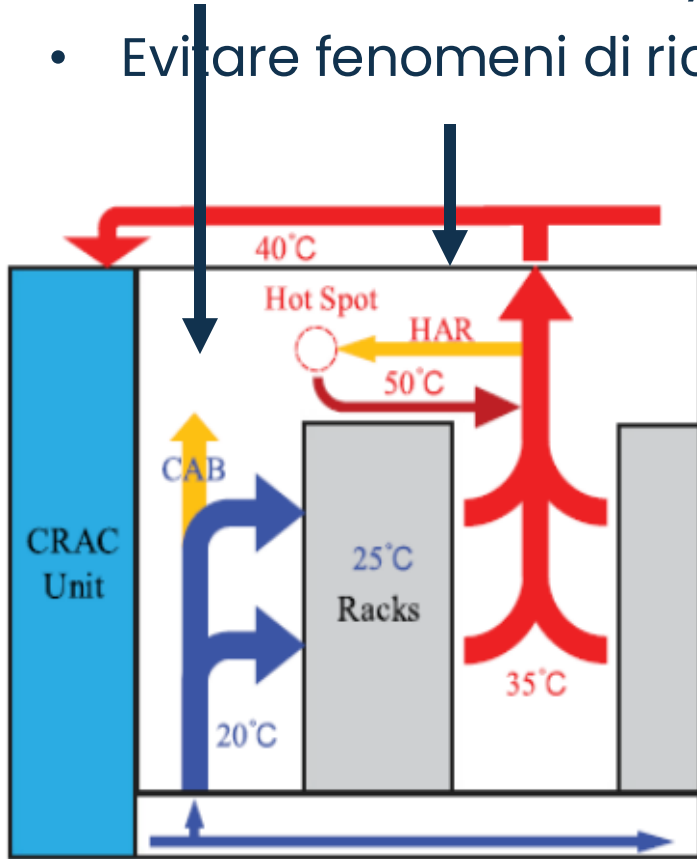
Sfruttare i modelli di previsione per prevedere l'evoluzione delle perturbanti e della dinamica del sistema, consentendo l'identificazione della politica di controllo ottimale.

Strategie di raffreddamento nei data center

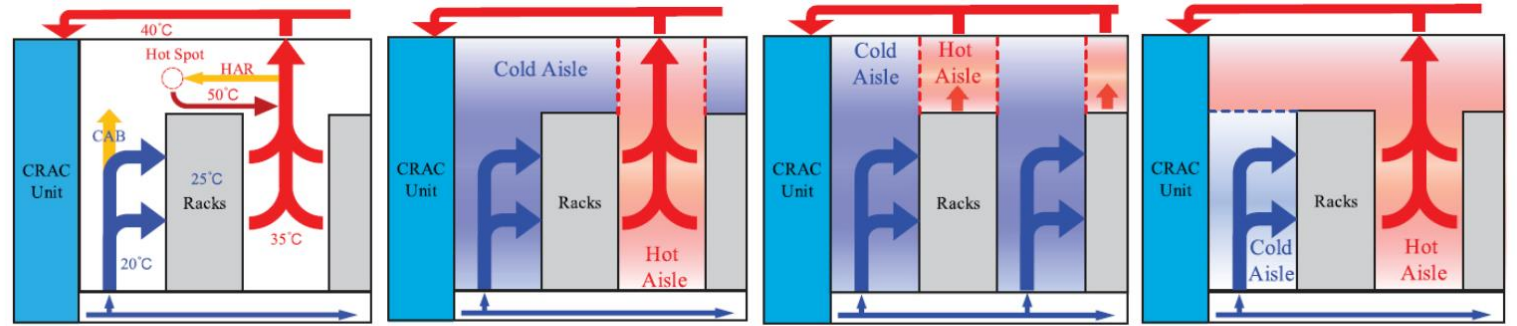
Categoria (denominazione ASHRAE / EU)	Descrizione sintetica	Fluido a contatto con i server	Esempi / Configurazioni tipiche	Densità termica [kW/rack]	PUE tipico / intervallo	Fonti principali
Air-Cooled Room-Based Cooling	Distribuzione d'aria fredda in sala tramite pavimento flottante o canalizzazioni; espansione diretta o circuito idronico.	Aria	CRAC (DX), CRAH + chiller, hot/cold aisle containment	5-10	1.6 - 1.9	ASHRAE TC 9.9 (2023); Uptime Institute (2024)
Row-Based Air Cooling	Unità di raffreddamento localizzate tra i rack; ridotto percorso dell'aria e minor miscelamento.	Aria	In-row cooling systems	10-25	1.5 - 1.8	ASHRAE TC 9.9 (2024); EU JRC CoC v15 (2023)
Rack-Based Liquid-Assisted Air Cooling	Scambio aria-acqua sul retro del rack; l'acqua asporta il calore residuo (liquid-assisted).	Aria + acqua	Rear-Door Heat Exchanger (RDHx)	20-45	1.3 - 1.6	ASHRAE Liquid Cooling Update (2024); IEA (2025)
Direct-to-Chip Liquid Cooling	Circuito liquido che scambia direttamente su CPU/GPU mediante cold plate; richiede loop secondario.	Acqua / miscela	Direct-to-chip cold plate systems	30-70	1.10 - 1.25	ASHRAE Liquid Cooling Guidelines (2024); Uptime Institute (2024)
Immersion Liquid Cooling	Immersione totale dei componenti IT in fluido dielettrico; il calore è rimosso da un circuito idronico.	Fluido dielettrico	Single-phase o Two-phase immersion systems	60-120	1.05 - 1.15	ASHRAE (2024); IEA (2025)

Climatizzazione nei data center

- Evitare fenomeni di by-pass dell'aria fredda (CAB)
- Evitare fenomeni di ricircolo dell'aria calda (HAR)



(a) Room-level cooling

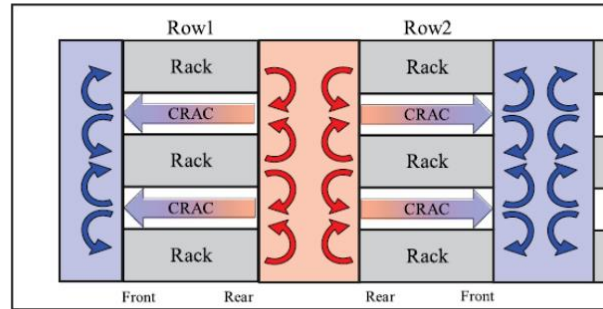


(a) Room-level cooling

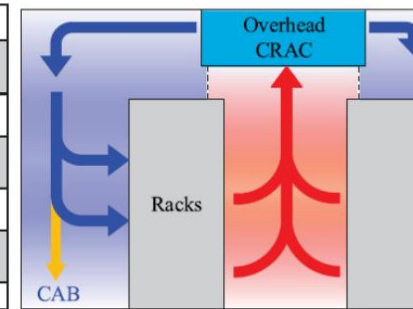
(b) HACS-I

(c) HACS-II

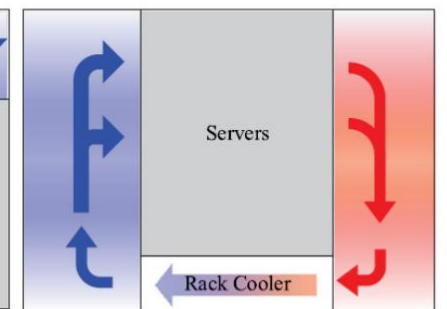
(d) CACS



(e) Inter-row cooling (Top view)



(f) Overhead cooling



(g) Rack-level cooling (Top view)

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»

Strategie di gestione energetica avanzata nei data center

- **Ottimizzazione dinamica dei set-point termici e igrometrici**

→ adattamento continuo delle condizioni operative in base al carico IT e alle condizioni ambientali.

- **Controllo predittivo dei sistemi di raffreddamento (HVAC)**

→ utilizzo di modelli fisico-data driven o AI per anticipare le variazioni di temperatura e regolare valvole, pompe e ventilatori.

- **Gestione adattiva dei flussi d'aria e dei percorsi termici**

→ riconfigurazione automatica dei corridoi caldo/freddo e riduzione dei ricircoli d'aria.

- **Ottimizzazione energetica integrata IT-Facility**

→ coordinamento tra carichi IT, alimentazione e raffreddamento per minimizzare il PUE in tempo reale.

- **Analisi predittiva e manutenzione intelligente**

→ rilevazione precoce di anomalie e degradi di efficienza mediante algoritmi di diagnostica automatica.

- **Schedulazione ottimizzata dei carichi IT**

→ distribuzione intelligente dei workload in base a efficienza termica, disponibilità energetica e priorità operativa.

Strategie di gestione energetica avanzata nei data center

- **Integrazione con sistemi di energy management e rete elettrica**

→ partecipazione a strategie di demand response, free cooling e uso di energia rinnovabile.

- **Autoapprendimento e miglioramento continuo**

→ aggiornamento dei modelli di controllo e previsione mediante tecniche di reinforcement learning.

- **Uso del Digital Twin per l'ottimizzazione in esercizio**

→ simulazione termo-energetica in tempo reale, supporto al controllo predittivo e alla manutenzione basata su modelli.

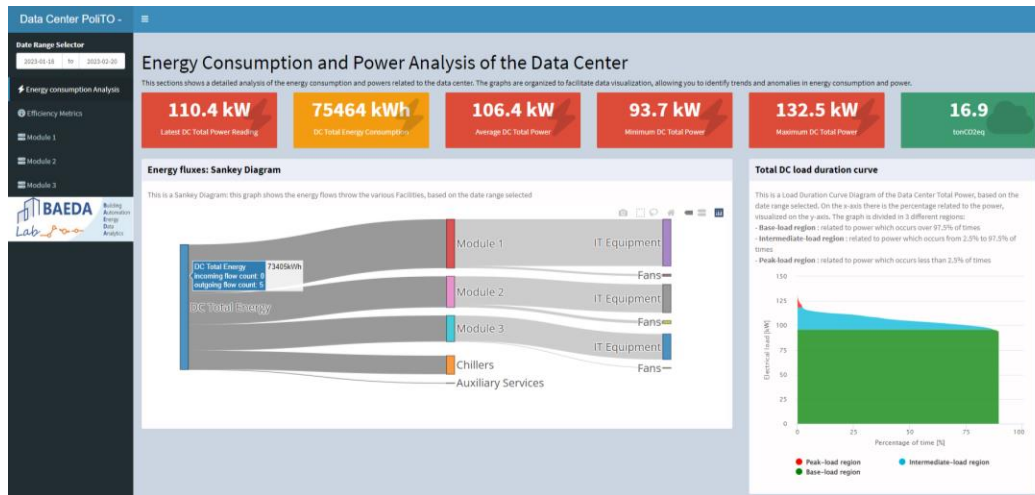
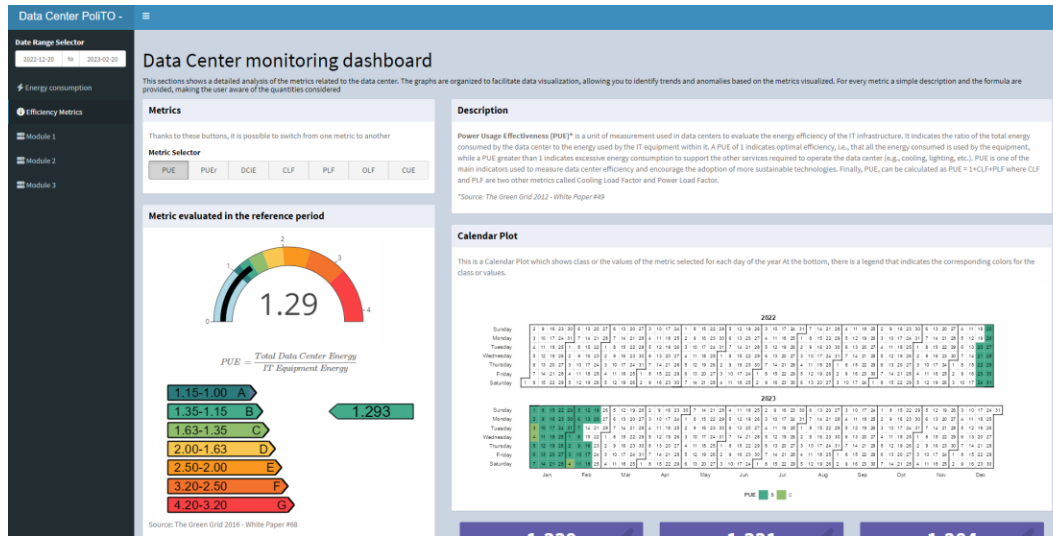
- **Reporting automatico e tracciabilità delle prestazioni**

→ calcolo continuo di indicatori (PUE, DCIE, WUE, CUE) e generazione di report per la conformità a standard.

Potenziale della gestione energetica avanzata

Tecnica / Approccio	Effetto osservato / potenziale	Fonte
AI-based cooling control (Reinforcement Learning)	Riduzione del consumo di raffreddamento di 14-21 % senza degradare le prestazioni operative.	"Data Center Cooling System Optimization Using Offline Reinforcement Learning", arXiv 2501.15085 (2025).
Model Predictive Control (MPC)	Risparmio energetico nei sistemi di raffreddamento di 15-25 % grazie al controllo predittivo integrato di chiller, CRAH e ventilatori.	ASHRAE TC 9.9 – Data Center Energy Efficiency Guidelines (2023); Energy and Buildings, Vol. 273 (2023).
Digital Twin operativo	Miglioramento dell'efficienza energetica fino a ≈ 30 % e riduzione dei guasti fino a 25 %.	Cadence Design Systems – "Cadence Reality Digital Twin Platform" (2024).
Metaheuristic optimization for IT + cooling management	Incremento dell'efficienza combinata IT-Facility del ≈ 22 % mediante algoritmi genetici e swarm-based control.	"Heuristics and Metaheuristics for Dynamic Management of Computing and Cooling Energy in Cloud Data Centers", arXiv 2312.10663 (2023).
Integrated IT-Facility analytics optimization	Miglioramento del PUE da 1.6 \rightarrow 1.3 (≈ 15 -20 % di riduzione energetica complessiva).	Uptime Institute – Data Center Efficiency Report (2024); EU JRC – Code of Conduct v15 (2023).

Sperimentazione su Data center @POLITO : monitoraggio e dashboard



- **Sviluppo di dashboard** per supportare la supervisione della domanda energia del data center 1
- Verifica e misura della prestazioni energetiche attraverso il **calcolo automatico e in esercizio di metriche standard (e.g., PUE)** e l'analisi di benchmark
- Rilevamento automatico **di anomalie energetiche** e di basse prestazioni dei sistemi di climatizzazione a servizio del data center
- Verifica delle **prestazioni ambientali (qualità dei campi termici)** attraverso il calcolo di metriche termiche

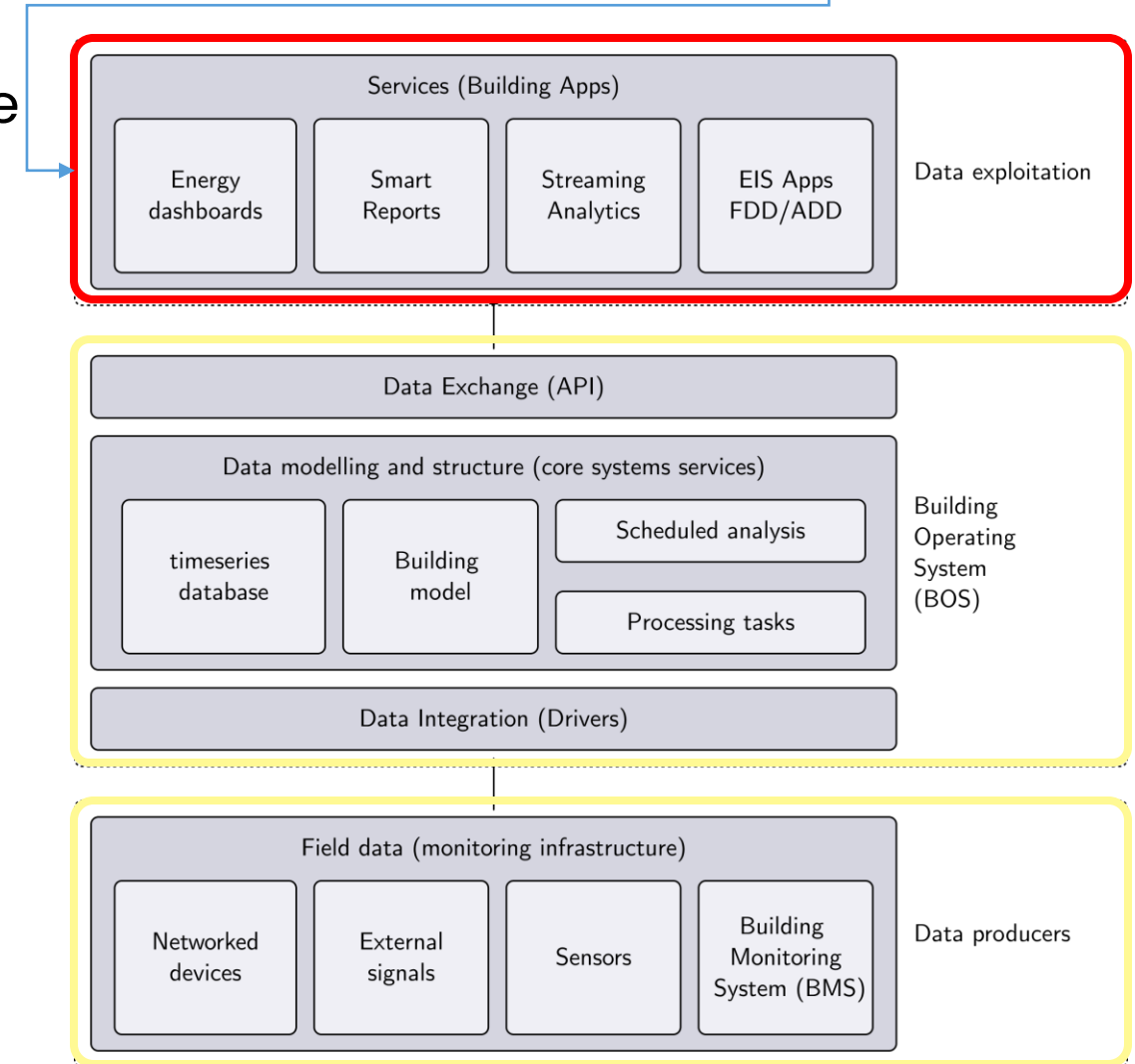


POLITO Campus energy dashboard



È stata sviluppata e implementata un'infrastruttura basata su container contenente tutti i componenti fondamentali del Building Operating System (BOS):

- Integrazione dei dati
- Database temporali (TimescaleDB / InfluxDB) per la gestione delle serie storiche
- Database a grafo per la memorizzazione del modello semantico dell'edificio
- Servizi e applicazioni analitiche avanzate (ADD) eseguite in modo pianificato su container Docker
- Applicazioni, workflow, API e interfacce di visualizzazione personalizzate in base alle esigenze degli stakeholder



Servizi disponibili e funzionalità principali



La dashboard energetica del Politecnico di Torino

- È stata sviluppata con l'obiettivo di fornire una piattaforma di base solida e scalabile, su cui poter sviluppare e distribuire applicazioni in modalità "plug and play".
- Ogni applicazione è progettata per un utente finale specifico, in funzione delle sue esigenze operative o di analisi.
- La piattaforma è aperta a sviluppatori terzi, in particolare ricercatori del Politecnico di Torino, per favorire l'estendibilità e la collaborazione.



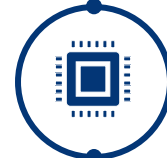
Monitoring infrastructure
Stakeholder: Energy manager



PV alert
Stakeholder: O&M team



Campus energy
Energy manager



Datacenter monitoring
Stakeholder: IT area

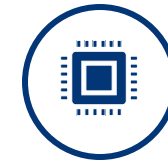


Open Data API Service
Researchers

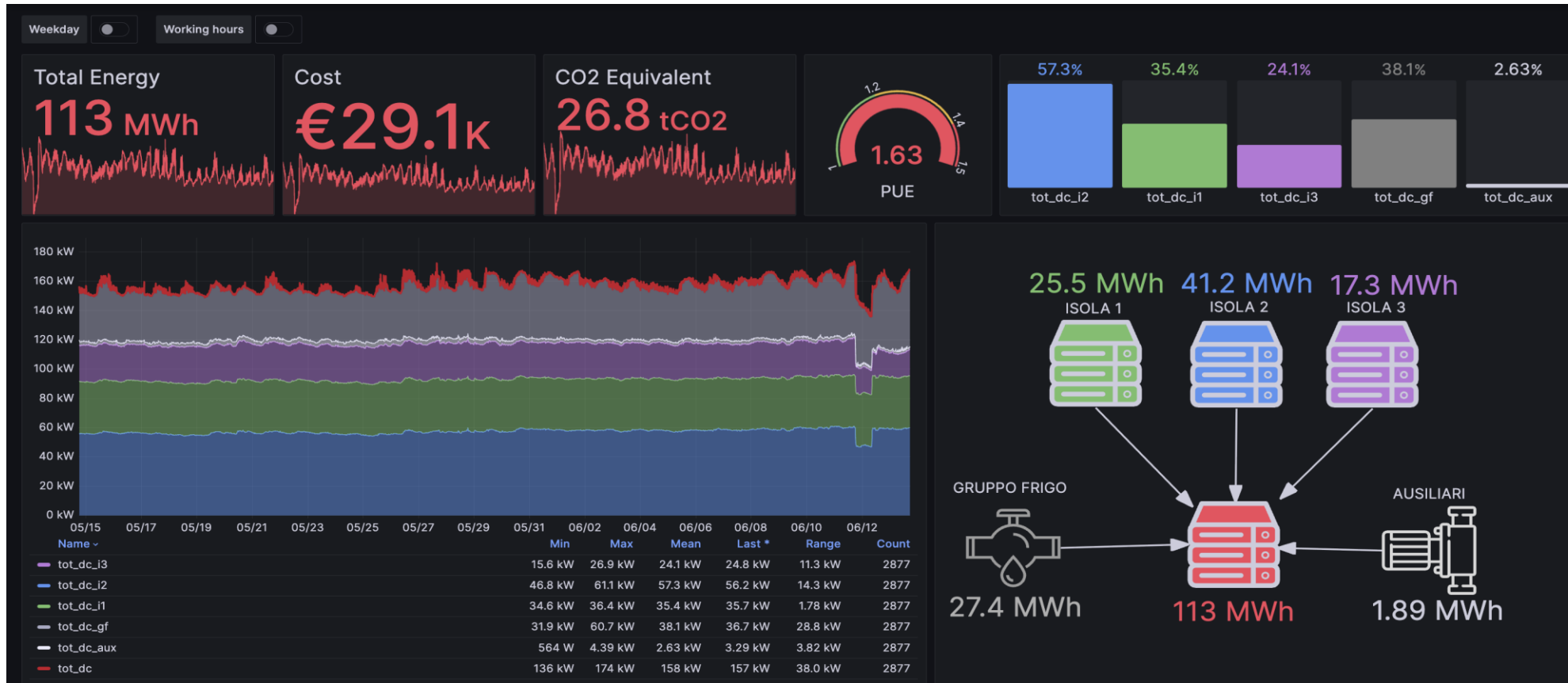
Datacenter monitoring dashboard

Metriche di efficienza dei componenti

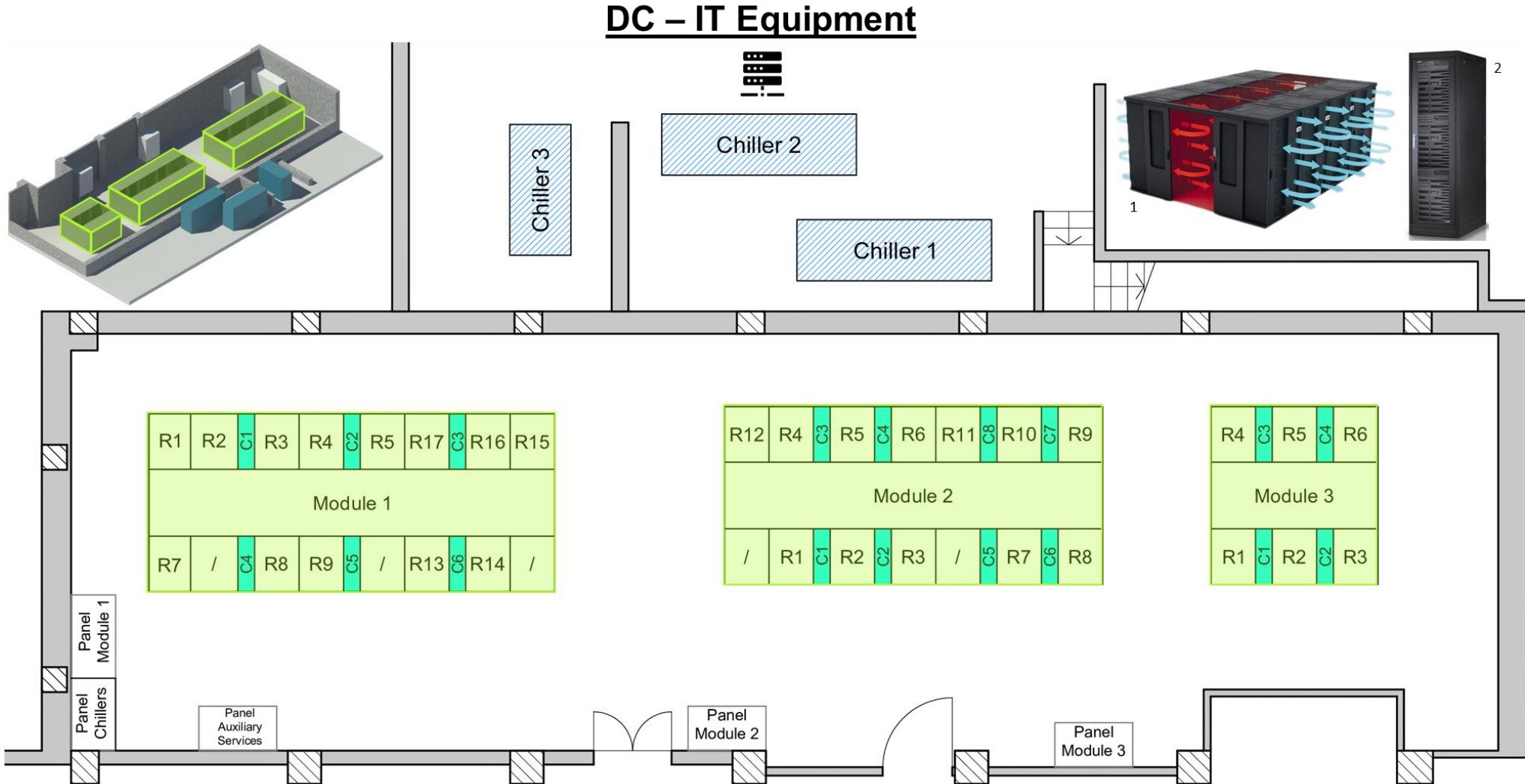
Misurano la **capacità operativa e il consumo energetico** dei diversi componenti o sottosistemi, fornendo un'indicazione puntuale delle prestazioni.



Datacenter monitoring dashboard
Stakeholder: IT area



Datacenter 1 @ Polito

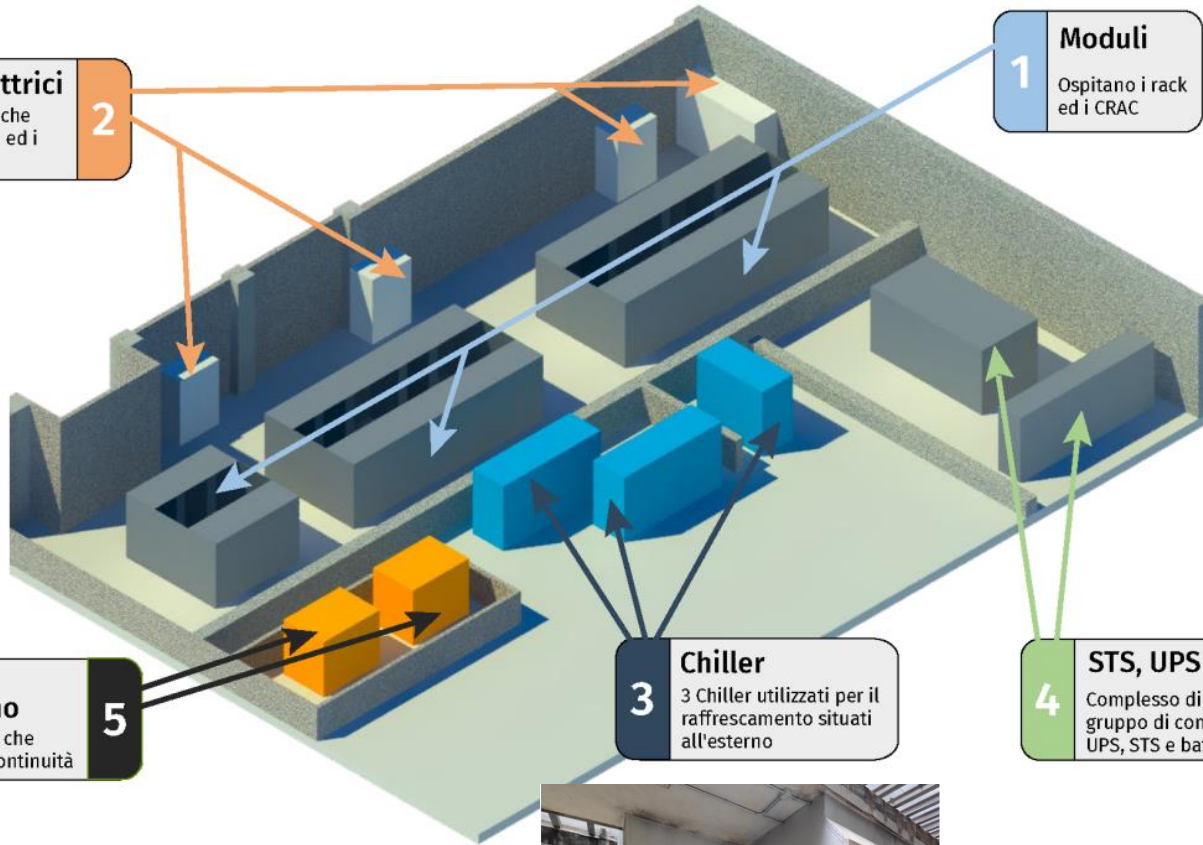


¹<https://www.energystar.gov/>
²Tecno SuperServer. Tecnosteel. 2008

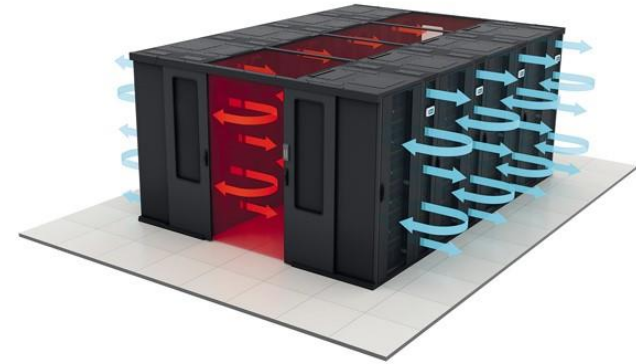
Datacenter 1 @ Polito



2 **Quadri elettrici**
Quadri elettrici che servono le isole ed i servizi ausiliari



1 **Moduli**
Ospitano i rack ed i CRAC



<https://www.energystar.gov/products/containmentenclosures>

5 **Gruppo elettrogeno**
2 motori Diesel che garantiscono continuità



3 **Chiller**
3 Chiller utilizzati per il raffreddamento situati all'esterno



4 **STS, UPS e altro**
Complesso di sistemi quali gruppo di comunicazione, UPS, STS e batterie



Sistema di raffreddamento

- Inter-row cooling con contenimento dell'aria calda
- Chiller operano in free cooling indiretto, anche parziale

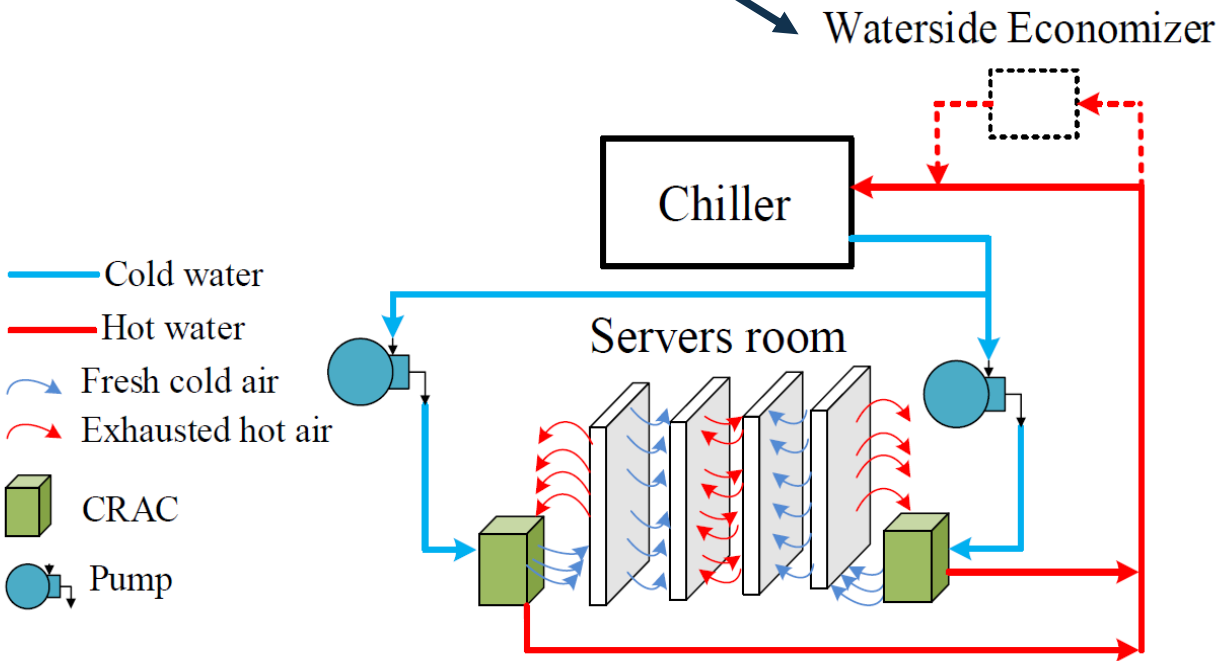
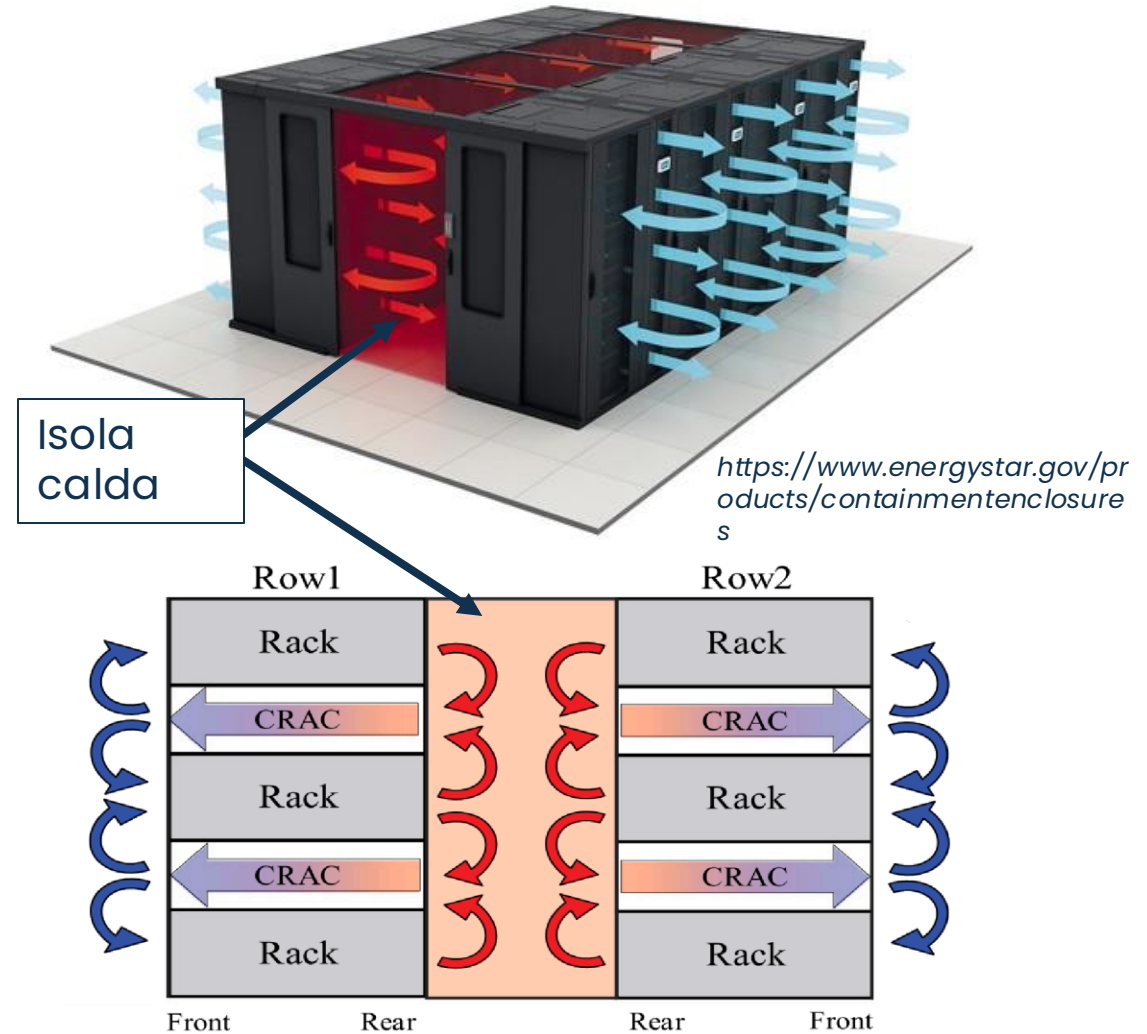


Immagine adattata da: Ali Vafamehr. «Energy-aware cloud computing»



Zhang et. al, A survey on data center cooling systems: Technology, power consumption modeling and control strategy optimization». In: Journal of Systems Architecture 119

Sistema di monitoraggio

Modulo 1:

- Potenza IT Equipment
- Potenza ventilatori all'interno dei CRAC

Modulo 2:

- Potenza IT Equipment
- Potenza ventilatori all'interno dei CRAC

Modulo 3:

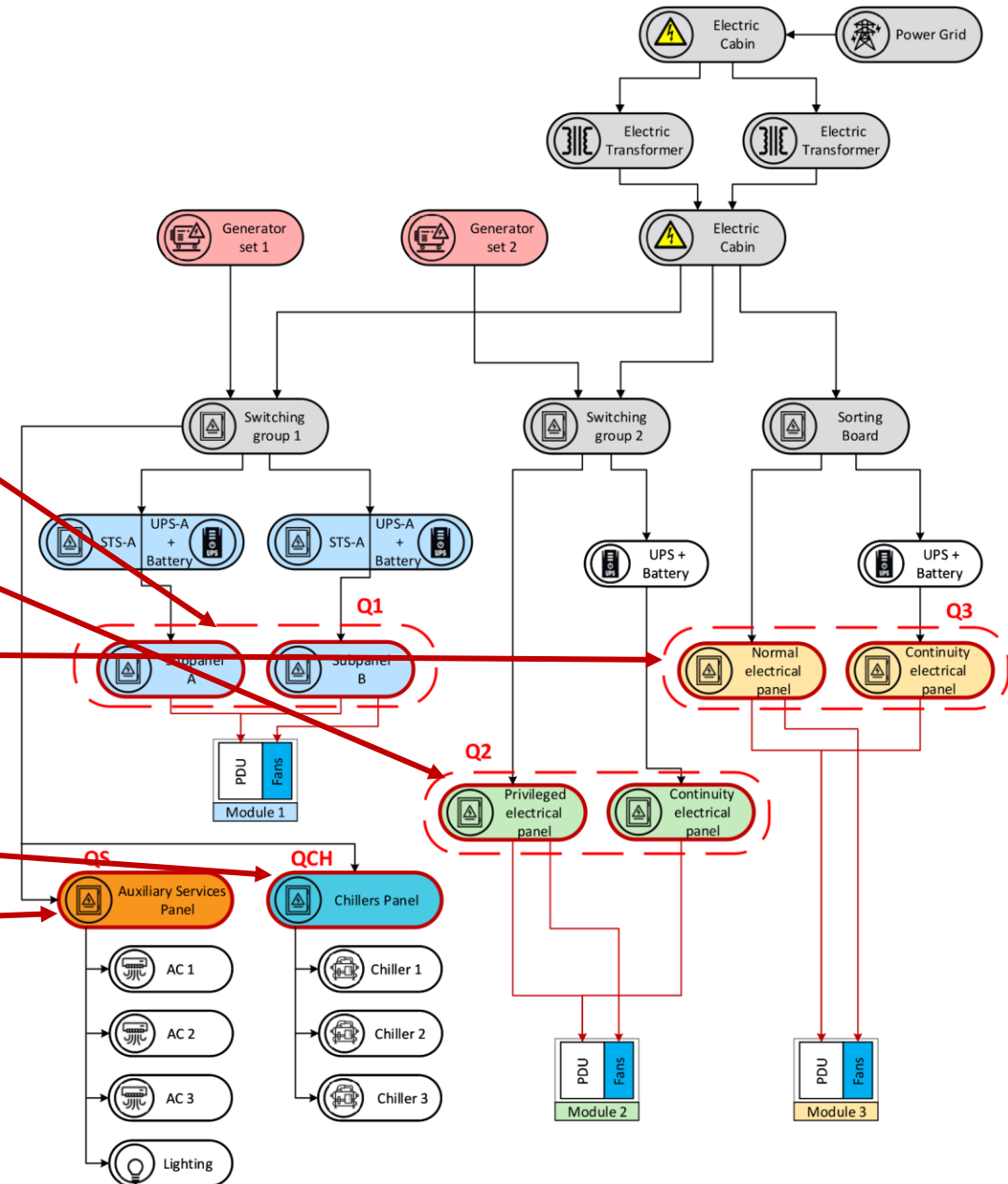
- Potenza IT Equipment
- Potenza ventilatori all'interno dei CRAC

Chiller:

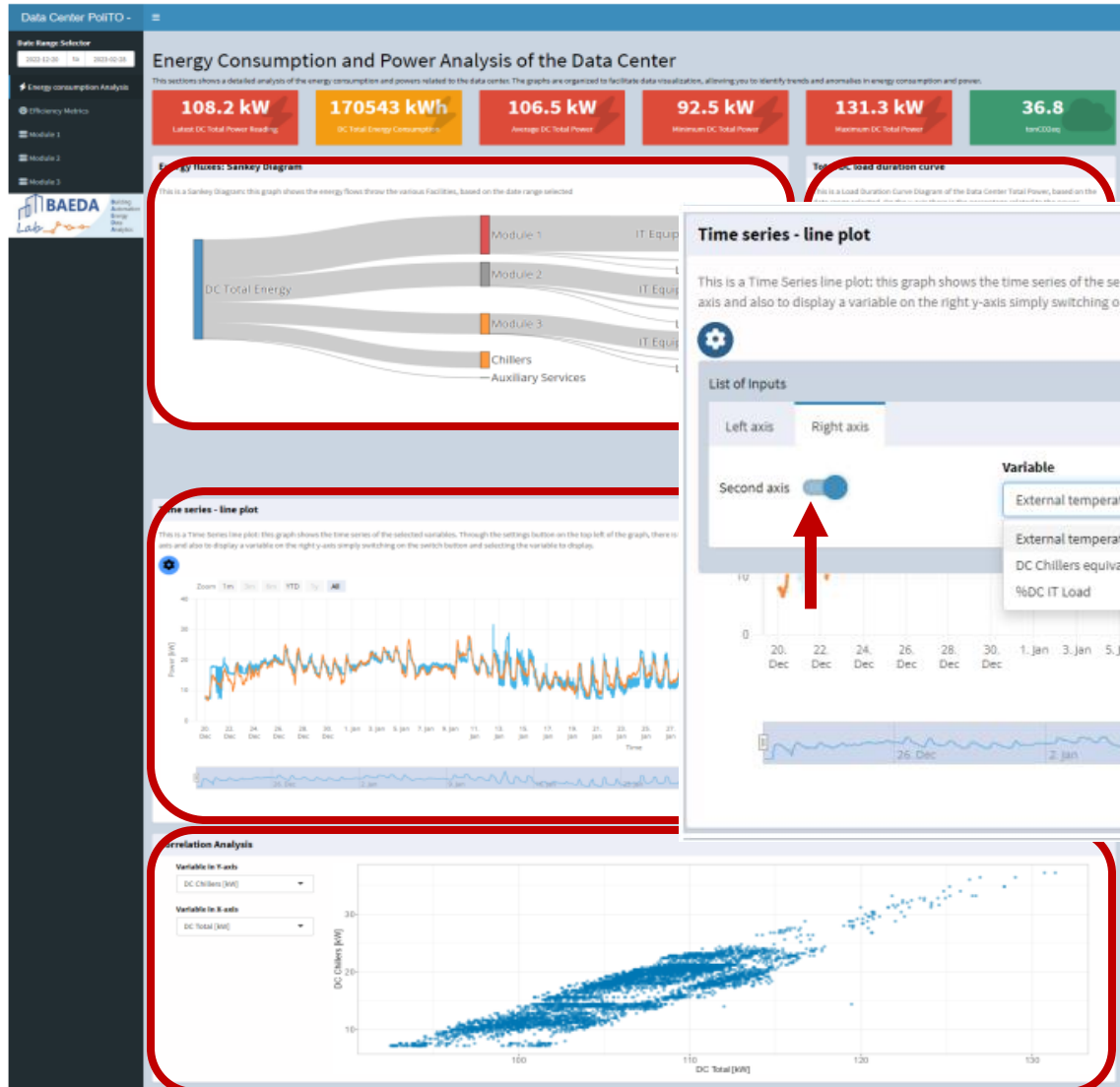
- Potenza complessiva di tutti e tre i chiller

Sistemi ausiliari:

- Potenza del quadro dei servizi
(Climatizzazione, prese di corrente, luci etc)

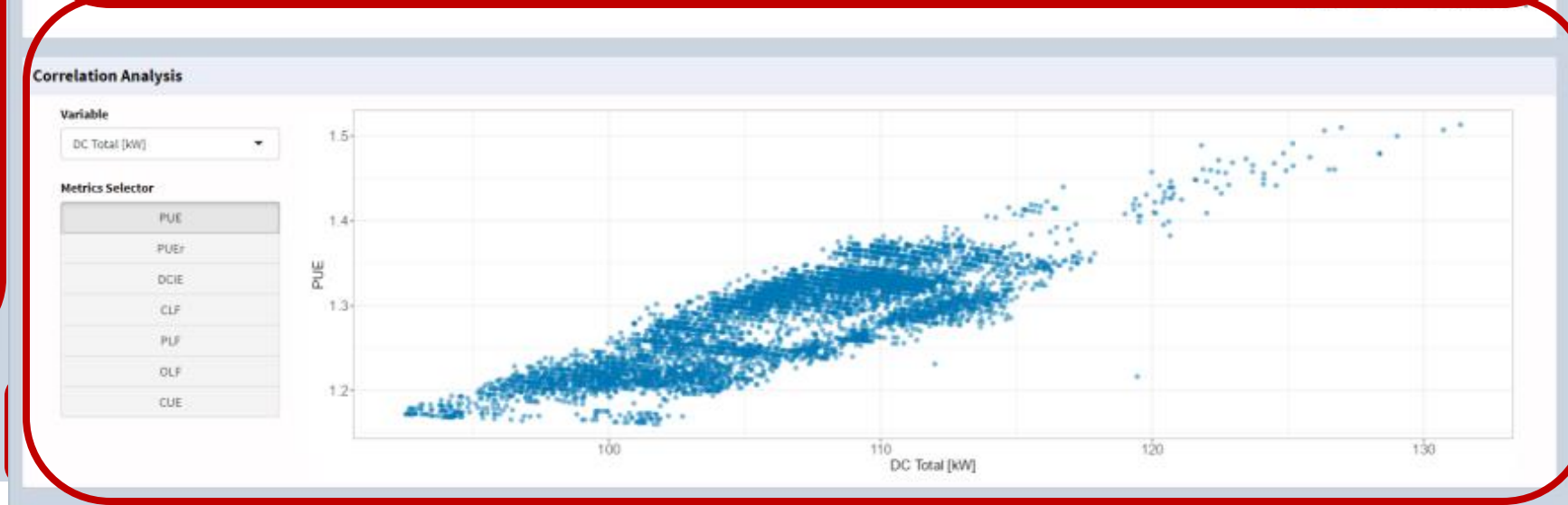
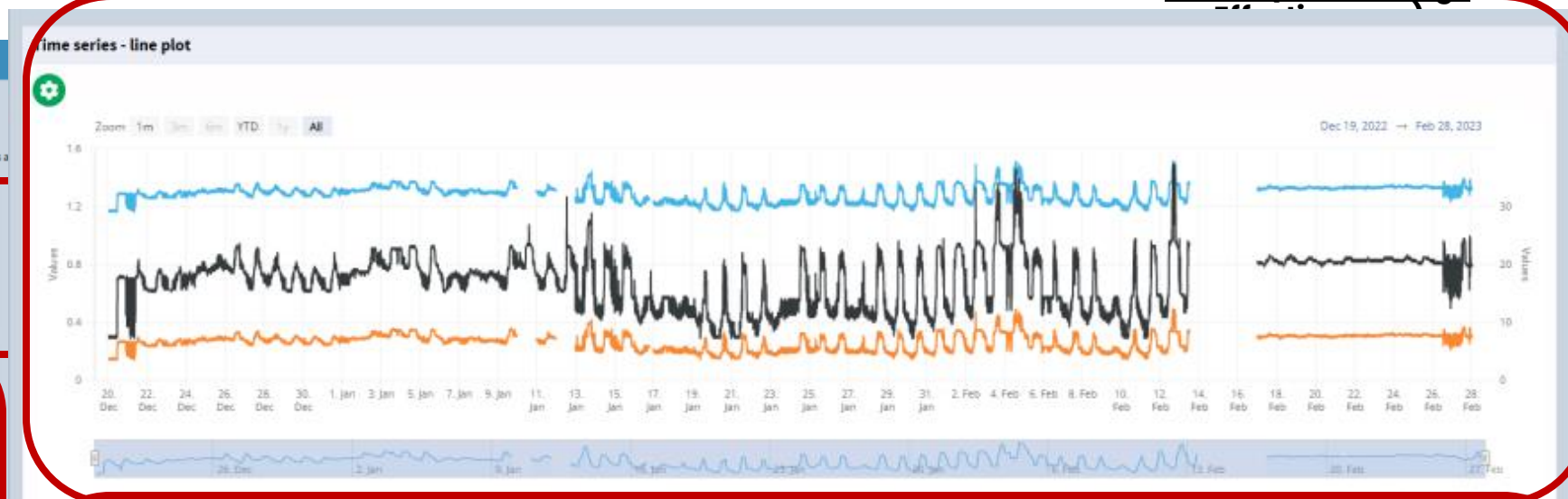


DASHBOARD – Energy Consumption Analysis



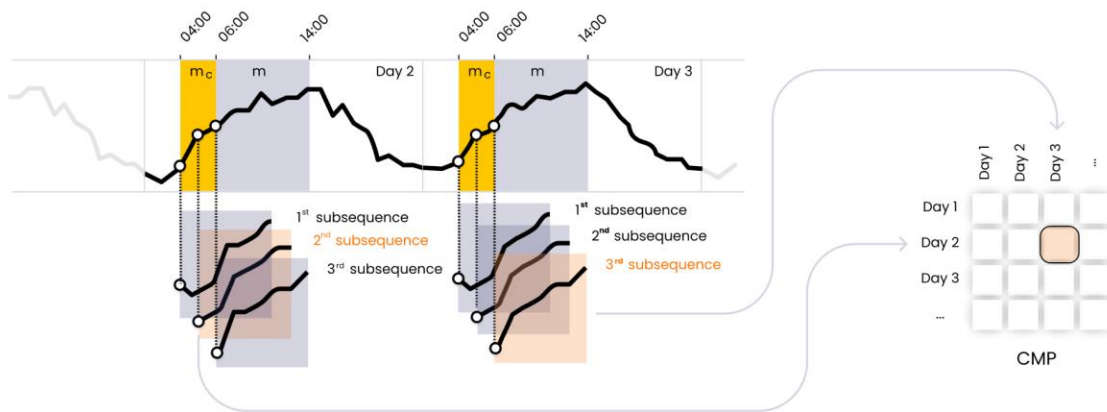
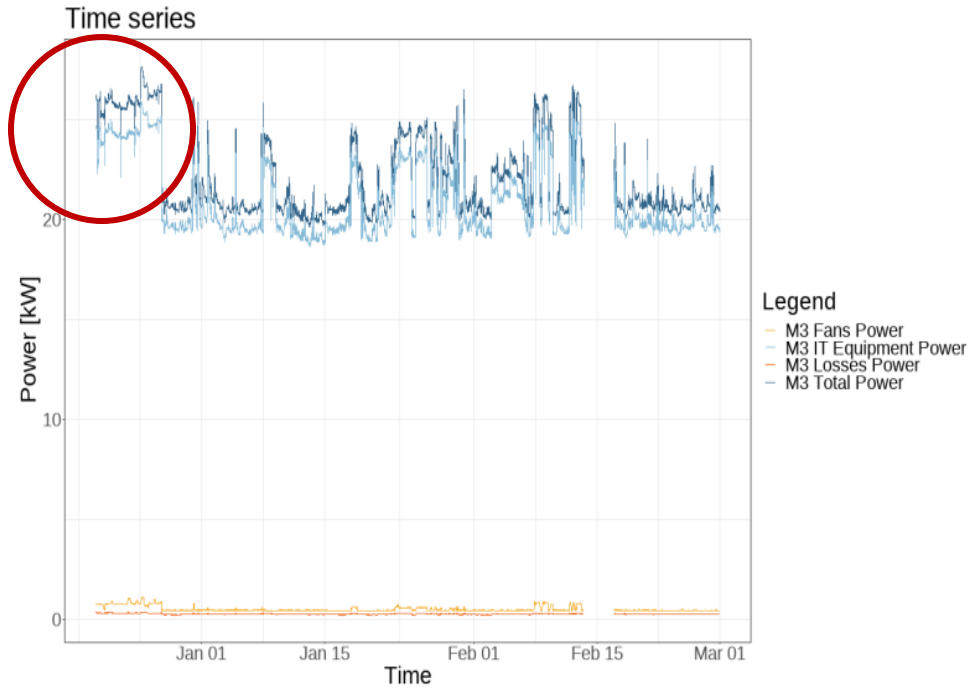
DASHBOARD – Efficiency Metrics

1 - PUE (Power Usage Effectiveness)

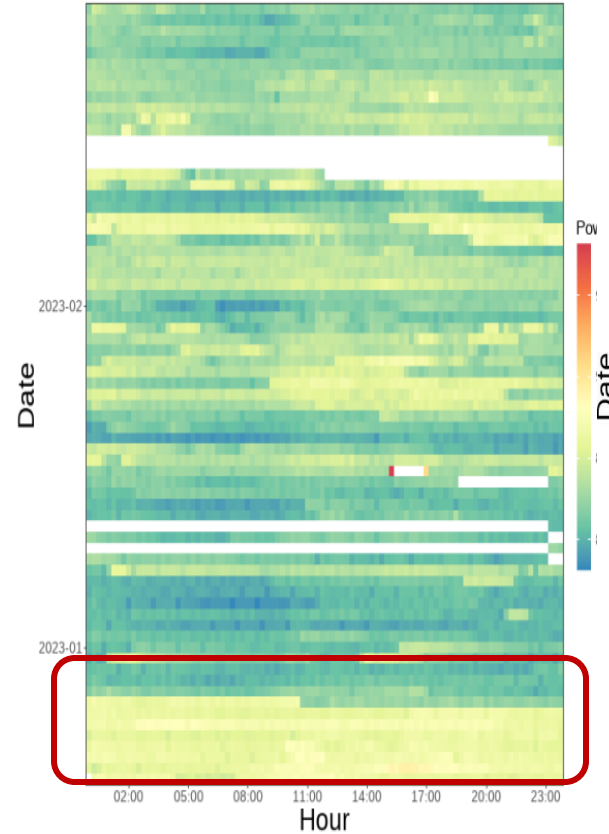


$$OLF = \frac{\text{Auxiliary Services Energy}}{\text{IT Equipment Energy}}$$

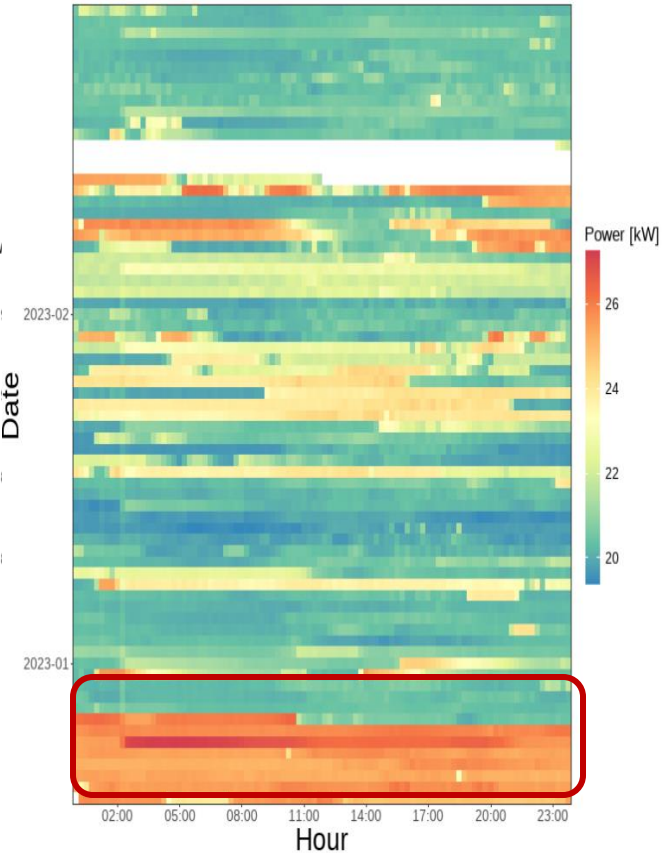
Identificazione di pattern di interesse



Carpet plot - DC IT Equipment Power

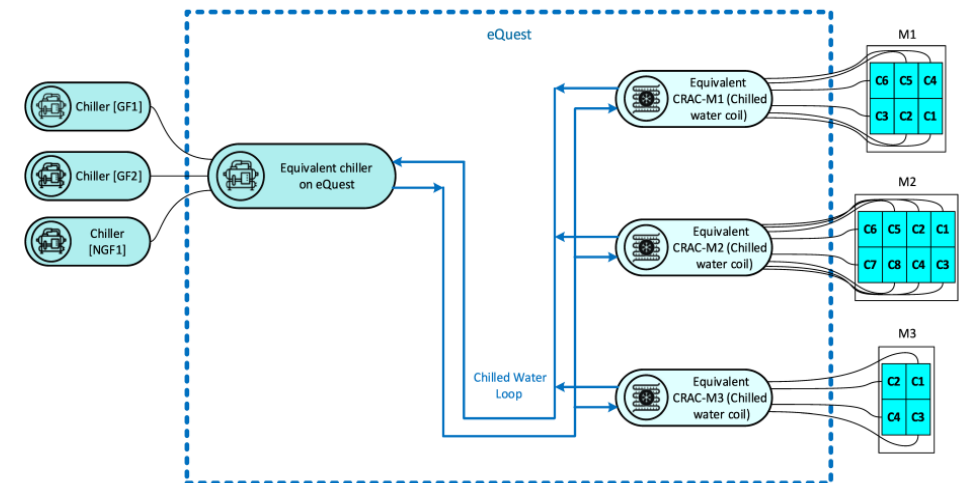
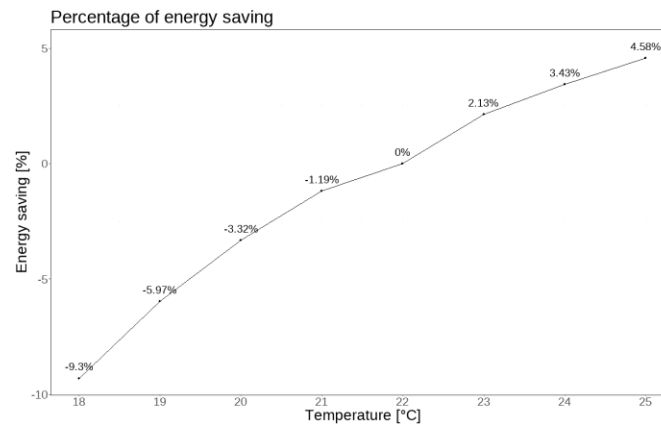
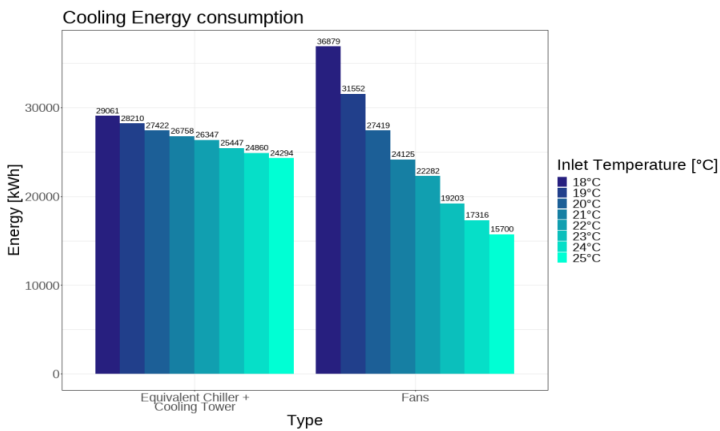
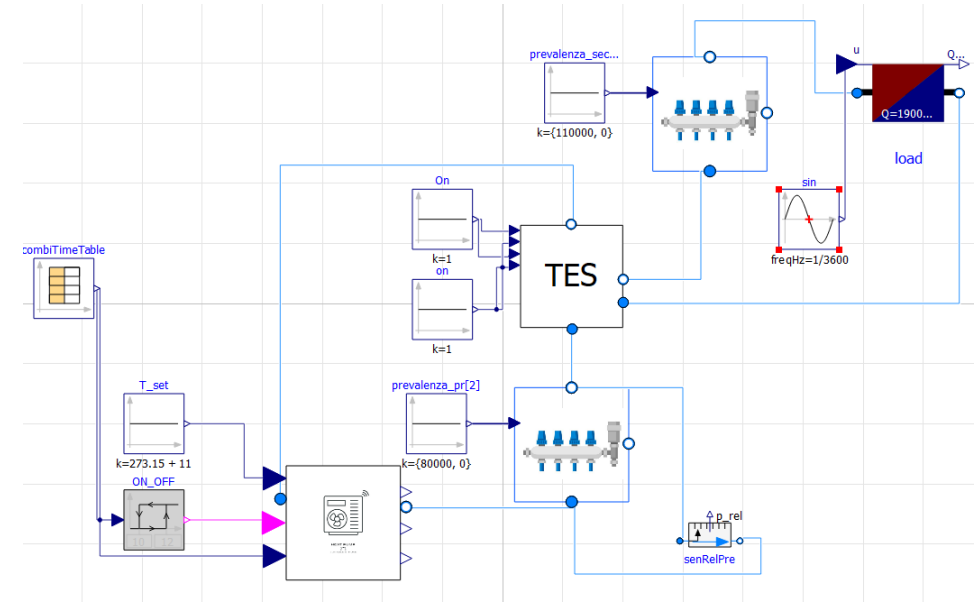
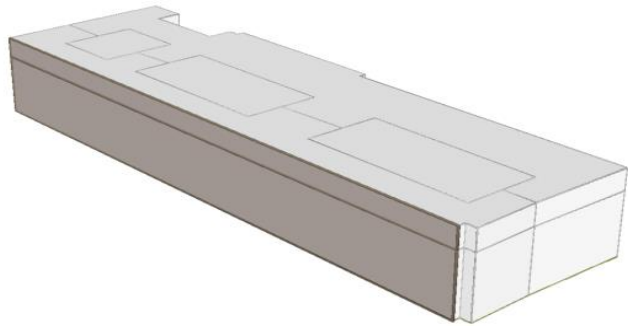


Carpet plot - M3 Total Power



Modellazione energetica e scenari di ottimizzazione

- **Calibrazione** del modello energetico
- Consumo energetico dei **server** desunto da **equazioni empiriche on funzione del carico**
- Scenari di ottimizzazione (thermal management e funzionamento chiller)



Conclusion

- Il monitoraggio continuo e la raccolta di dati in tempo reale hanno consentito di **analizzare in modo oggettivo le prestazioni del data center**, fornendo strumenti utili per una gestione più consapevole.
- L'attività di analisi ha permesso di **identificare margini di miglioramento energetico**, evidenziando il potenziale di ottimizzazione attraverso strategie di controllo e gestione termica.
- I risultati ottenuti confermano **buoni livelli di efficienza complessiva**
- Le simulazioni e i modelli energetici hanno mostrato la possibilità di **ulteriori riduzioni dei consumi** grazie all'impiego di approcci di gestione intelligente.

Sviluppi futuri

- Approfondimento del monitoraggio con raccolta dati più estesa e frequente per migliorare la rappresentatività dei risultati.
- Aggiornamento del modello energetico per affinare la valutazione delle prestazioni e supportare scenari previsionali.
- Integrazione di strumenti avanzati di data analytics e ottimizzazione per favorire un controllo sempre più automatizzato ed efficiente.

Alfonso Capozzoli
Politecnico di Torino

alfonso.capozzoli@polito.it

<http://www.baeda.polito.it>

WORKSHOP GARR 2025

NET MAKERS