

# POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale  
in Ingegneria Energia e Nucleare

2023/2024

Tesi di Laurea Magistrale

Valutazione dei Risparmi Energetici Attraverso Strategie  
Avanzate di Regolazione delle UTA



**Politecnico  
di Torino**

Relatore

prof. Davide Papurello

Candidato  
Gaetano Porto



## ABSTRACT

Negli ultimi anni, la sostenibilità energetica ha acquisito sempre maggiore importanza, spinta da normative più severe e dalla crescente consapevolezza dei vantaggi economici e ambientali associati alla riduzione dei consumi energetici. Il settore edilizio, che secondo i dati Eurostat rappresenta circa il 27% del consumo energetico complessivo in Europa, è al centro di queste politiche di riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> e miglioramento dell'efficienza energetica.

In particolare, i sistemi HVAC (riscaldamento, ventilazione e climatizzazione) sono responsabili di circa il 35% dell'energia utilizzata negli edifici residenziali e commerciali, rendendo essenziali interventi su questi sistemi per raggiungere gli obiettivi di sostenibilità. Le Unità di Trattamento Aria (UTA), fondamentali per la gestione della qualità dell'aria e del comfort termico, diventano quindi un elemento cruciale per ottimizzare i consumi energetici degli edifici.

L'integrazione di strategie di controllo avanzate, supportate da tecnologie digitali come sensori intelligenti e sistemi di automazione, apre nuove possibilità per ottimizzare il funzionamento delle UTA. Queste tecnologie permettono di adattare il funzionamento degli impianti alle condizioni ambientali e alle esigenze operative stagionali, riducendo il consumo energetico senza compromettere il comfort interno. L'analisi dei dati raccolti in tempo reale da questi sistemi consente inoltre di monitorare e migliorare costantemente le performance energetiche, portando a una gestione più sostenibile degli edifici.

Questo lavoro, realizzato in collaborazione con Eurix, azienda specializzata nella gestione e ottimizzazione energetica, si è concentrato sull'Energy Center, un edificio che integra diverse aree funzionali. L'obiettivo principale è stato quantificare i risparmi energetici ottenibili attraverso l'implementazione di nuove strategie di regolazione per le UTA. L'analisi è stata condotta utilizzando dati storici sul funzionamento e sui consumi delle UTA, filtrati per eliminare valori anomali tramite il metodo del range interquartile. Successivamente, sono state calcolate la portata d'aria e la differenza di entalpia tra l'aria esterna e quella di mandata, variabili per ogni UTA in base ai dati di input disponibili. Una volta ottenuti questi valori, è stata stimata l'energia termica giornaliera, che infine è stata correlata con la temperatura media esterna per ottenere la firma energetica dell'impianto.

Le firme energetiche ottenute presentano un elevato coefficiente di determinazione, confermando la validità delle analisi. I risparmi sono stati analizzati individualmente per ogni UTA e in funzione delle strategie implementate, sottolineando l'importanza della gestione efficiente e della regolazione ottimizzata.

Infine, è stato sviluppato un codice Python in grado di calcolare i risparmi energetici per qualsiasi UTA, rendendo il modello flessibile e facilmente adattabile a diverse configurazioni operative modificando semplicemente i dati di input. Questo strumento rappresenta un'opportunità per ottimizzare ulteriormente i sistemi HVAC e migliorare la sostenibilità energetica degli edifici.



## Sommario

1.	Introduzione .....	1
1.1	Sistemi di Controllo .....	4
1.2	Controllo negli impianti HVAC .....	7
2.	Presentazione del Caso Studio .....	14
2.1	UTA Auditorium .....	15
2.1.1	Strategie di Regolazione UTA AUDITORIUM .....	18
2.2	UTA Uffici Nord-Ovest .....	19
2.2.1	Regolazione UTA Uffici Nord-Ovest .....	21
2.3	UTA Uffici Nord-Est .....	22
2.3.1	Regolazione UTA Uffici Nord-Est .....	24
3.	Metodologia per la caratterizzazione energetica delle UTA .....	26
3.1	Dati di Input .....	26
3.2	Data Pre-Processing .....	26
3.2.1	Uniformazione delle frequenze di rilevazione .....	27
3.2.2	Gestione dei Valori Mancanti (Not a Number-NaN) .....	28
3.2.3	Identificazione degli outliers: Metodo del Range Interquartile .....	28
3.3	Calcolo dei Consumi Termici delle UTA .....	30
3.3.1	Calcolo del Delta h .....	30
3.3.2	Calcolo della portata .....	32
3.4	Firma Energetica .....	34
3.4.1	Criteri di Valutazione della Firma Energetica .....	38
3.4.2	Confronto tra firme energetiche .....	38
3.5	Energy Performance Indicators .....	39
3.5.1	Definizione dei Gradi Giorno .....	40
4.	Analisi dei Risultati .....	42
4.1	Firma Energetica – Riscaldamento UTA Auditorium .....	42
4.1.1	Risparmio energetico .....	49
4.2	Firma Energetica – Raffrescamento UTA Auditorium .....	51
4.3	UTA Uffici Nord-Ovest .....	54
4.3.1	Risparmio energetico .....	62
4.4	Firma Energetica – Raffrescamento UTA Uffici Nord-Ovest .....	65
4.5	UTA Uffici Nord-Est .....	67

4.5.1	Risparmio energetico .....	72
4.6	Firma Energetica – Raffrescamento UTA Uffici Nord-Est.....	75
5.	Conclusioni e sviluppi futuri .....	78
6.	Riferimenti Bibliografici .....	80

## INDICE DELLE FIGURE

Figura 1 - Grafico produzione energia primaria in Europa.....	1
Figura 2 - Consumo finale di energia suddiviso in settori .....	2
Figura 3 - diagramma a blocchi anello aperto .....	5
Figura 4 - diagramma a blocchi anello chiuso .....	5
Figura 5 - Classificazione sistemi di controllo .....	6
Figura 6 - Architettura di un tipico sistema di controllo (SCADA).....	8
Figura 7 - Impianti gestiti da BMS .....	9
Figura 8 - Struttura BMS .....	10
Figura 9 - Diagramma di regolazione ON/OFF .....	11
Figura 10 - Diagramma di regolazione flottante.....	12
Figura 11 - Diagramma controllo modulante.....	13
Figura 12 - Energy Center Torino .....	14
Figura 13- Schema UTA Auditorium.....	16
Figura 14- Profilo di funzionamento tipico preregolazione, UTA AUDITORIUM .....	18
Figura 15 - Schema UTA Uffici Nord-Ovest .....	20
Figura 16- profilo nel tempo della Tsp, UTA Uffici Nord-Ovest. ....	22
Figura 17 - Schema UTA Uffici Nord-Est .....	23
Figura 18 - profilo nel tempo della Tsp, UTA Uffici Nord-Est.....	25
Figura 19 - Boxplot: metodo di rappresentazione degli outlier .....	29
Figura 20 - Diagramma di Mollier.....	31
Figura 21 - Andamento tipico firma energetica I.....	35
Figura 22 - Andamento tipico firma energetica II .....	35
Figura 23 - Andamento tipico firma energetica III .....	36
Figura 24 - Andamento tipico firma energetica IV .....	36
Figura 25 - Grandezze termodinamiche che influenzano la firma energetica .....	37
Figura 26 - Firma Energetica UTA Auditorium preregolazione I. [En Th-Te] .....	43
Figura 27 - Firma Energetica UTA Auditorium preregolazione II. [En Th-Te].....	44
Figura 28 - - Firma Energetica UTA Auditorium preregolazione .....	45
Figura 29 - Firma Energetica UTA Auditorium post-regolazione. [En Th-Te].....	46
Figura 30 - Confronto firme energetiche. [En th – Te] .....	46
Figura 31 - Firma Energetica UTA Auditorium preregolazione. [Consumo sp-Te] .....	47
Figura 32 - Firma Energetica UTA Auditorium post-regolazione. [Consumo sp-Te].....	48
Figura 33 - Confronto firme energetiche. [Consumo Sp – Te] .....	48
Figura 34 - Confronto dei consumi termici cumulati UTA Auditorium .....	49
Figura 35 - Confronto GG mensili.....	50
Figura 36 - Confronto KPI Auditorium .....	51
Figura 37 - Firma energetica UTA Auditorium comportamento estivo I.....	52
Figura 38 - Firma energetica UTA Auditorium comportamento estivo II .....	53
Figura 39 - Firma energetica Uta uffici Nord-Ovest preregolazione.....	54
Figura 40 - Firma energetica confronto preregolazione Stagione 2022/23 e 2023/24 .....	55
Figura 41 - Firma energetica classica UTA Nord-Ovest post-regolazione .....	57
Figura 42 - Confronto firme energetica UTA Uffici Nord-Ovest .....	58
Figura 43 - Firma energetica (consumo sp.-T ext )Uta Uffici Nord Ovest preregolazione..	59
Figura 44 - Firma energetica (consumo sp.-T ext )Uta Uffici Nord Ovest 2022/23.....	60
Figura 45 - Firma energetica (consumo sp.-T ext )Uta Uffici Nord Ovest 2023/24 preregolazione.....	60

Figura 46 - Firma energetica (consumo sp.-T ext )Uta Uffici Nord Ovest post regolazione .	61
Figura 47 - Confronto firme energetiche (consumo sp.-T ext) Uta Uffici Nord Ovest .....	61
Figura 48 - Confronto dei consumi termici cumulati UTA Nord-Ovest .....	62
Figura 49 - Confronto KPI UTA Nord-Ovest .....	63
Figura 50- Confronto Gradi Giorno .....	64
Figura 51 - Confronto dei consumi termici cumulati UTA Nord-Ovest .....	64
Figura 52 - Confronto KPI UTA Nord-Ovest .....	65
Figura 53 - Firma energetica UTA Uffici Nord-Ovest comportamento estivo I.....	66
Figura 54 - Firma energetica UTA Uffici Nord-Ovest comportamento estivo II .....	67
Figura 55 - Firma energetica Uta uffici Nord-Est preregolazione I.....	68
Figura 56 - Firma energetica Uta uffici Nord-Est preregolazione II .....	69
Figura 57 - Firma energetica Uta uffici Nord-Est postregolazione I .....	69
Figura 58 - Firma energetica Uta uffici Nord-Est postregolazione II.....	70
Figura 59 - Confronto Firme UTA Uffici Nord-Est .....	70
Figura 60 - Firma energetica (consumo sp.-T ext )Uta Uffici Nord Est preregolazione .....	71
Figura 61 - Firma energetica (consumo sp.-T ext )Uta Uffici Nord Est postregolazione.....	71
Figura 62 - Confronto Firme energetica (consumo sp.-T ext )Uta Uffici Nord Est .....	72
Figura 63 - Confronto dei consumi termici cumulati UTA Nord-Est .....	73
Figura 64 - Confronto KPI UTA Uffici Nord-Est .....	74
Figura 65 - Confronto KPI UTA Uffici Nord-Est II .....	74
Figura 66 - Confronto Consumi termici cumulati UTA Uffici Nord-Est II.....	75
Figura 67 - Firma energetica funzionamento estivo Uta Uffici Nord-Est .....	76
Figura 68 - Firma Energetica (cons. sp- Text) Comportamento estivo UTA Uffici Nord-Est	77



## INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1- Caratteristiche tecniche ventilatori UTA Auditorium .....	17
Tabella 2 - Confronto ore di funzionamento.....	19
Tabella 3 - Caratteristiche tecniche ventilatori UTA Uffici Nord-Ovest .....	21
Tabella 4 - Orari di funzionamento UTA Uffici Nord-Ovest.....	21
Tabella 5 - Caratteristiche tecniche ventilatori UTA Uffici Nord-Est.....	24
Tabella 6 - Orari di funzionamento UTA Uffici Nord-Est .....	24
Tabella 7 - Ripartizione percentuale della potenza nominale dell'UTA Auditorium .....	33
Tabella 8 - Valori di consumo termico UTA Auditorium.....	49
Tabella 9 - Confronto GG mensili .....	50
Tabella 10 - Confronto KPI.....	51
Tabella 11 - Valori di consumo termico UTA Uffici Nord-Ovest .....	63
Tabella 12 - Valori KPI UTA Uffici Nord-Ovest .....	63
Tabella 13 - Confronto risultati UTA Uffici Nord-Ovest.....	65
Tabella 14 - Confronto consumi termici mensili .....	73
Tabella 15 - Confronto GG mensili .....	73
Tabella 16 - Confronto KPI mensili.....	74
Tabella 17 - Confronto risultati UTA Uffici Nord-Est.....	75

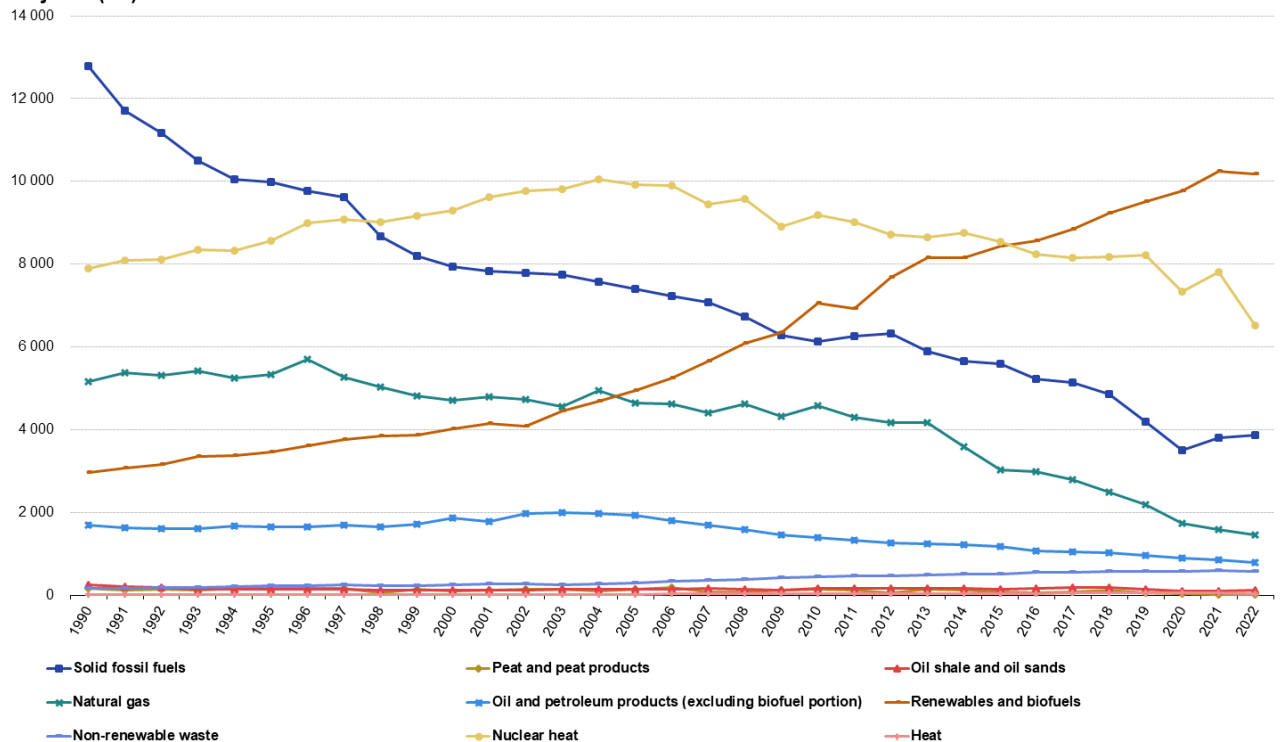


## 1. Introduzione

Il contesto energetico globale odierno sta attraversando una fase di profonda trasformazione, caratterizzata da sfide complesse e da opportunità significative. Da un lato, la domanda di energia continua a crescere rapidamente, spinta dall'urbanizzazione, dall'espansione economica e dal miglioramento del benessere nei paesi emergenti. Dall'altro, la necessità di ridurre le emissioni di gas serra e contrastare il cambiamento climatico sta spingendo governi e aziende a ripensare radicalmente il modo in cui l'energia viene prodotta, distribuita e consumata.

In questo contesto, nuove dinamiche stanno emergendo nel settore energetico. L'adozione crescente di fonti di energia rinnovabile, come il solare e l'eolico, e l'implementazione di soluzioni tecnologiche innovative stanno gradualmente cambiando il panorama energetico. L'infrastruttura energetica tradizionale, basata principalmente su combustibili fossili, sta lasciando il posto a un mix energetico più diversificato e sostenibile. Tuttavia, questa transizione comporta sfide notevoli, come l'integrazione delle energie rinnovabili nelle reti esistenti, la gestione della loro variabilità e la necessità di sviluppare infrastrutture di stoccaggio energetico avanzate.

Primary energy production by fuel, EU, in selected years, 1990-2022  
Petajoule (PJ)



Source: Eurostat (online data code: nrg\_bal\_c)

eurostat

Figura 1 - Grafico produzione energia primaria in Europa

L'efficienza energetica è emersa come un pilastro fondamentale per affrontare le sfide del contesto energetico moderno. La riduzione degli sprechi e l'ottimizzazione dell'uso delle risorse energetiche sono diventate priorità sia per motivi economici sia per il loro impatto ambientale positivo. Questo ha portato a una diffusione crescente di tecnologie di controllo automatico e di sistemi di gestione energetica avanzati, che permettono di monitorare e ottimizzare il consumo energetico in tempo reale, migliorando così l'efficienza complessiva delle operazioni.

Il fabbisogno energetico per il riscaldamento e il raffreddamento rappresenta oggi circa la metà del consumo energetico finale lordo totale dell'Unione Europea. La domanda di energia per il raffrescamento degli edifici è in costante aumento, influenzata anche dal cambiamento climatico e dall'aumento delle temperature. Secondo i dati del 2022 pubblicati da Eurostat, circa il 75% dell'energia per la climatizzazione è ancora generata da combustibili fossili, mentre solo il 24.8% proviene da fonti rinnovabili, segnando un aumento di 1.8 punti percentuali rispetto al 2021. Queste tendenze hanno spinto l'UE a fissare obiettivi climatici ed energetici volti a ridurre il consumo di energia e l'uso di combustibili fossili, focalizzando l'attenzione sull'innovazione tecnologica e sulla produzione di energia da fonti rinnovabili.

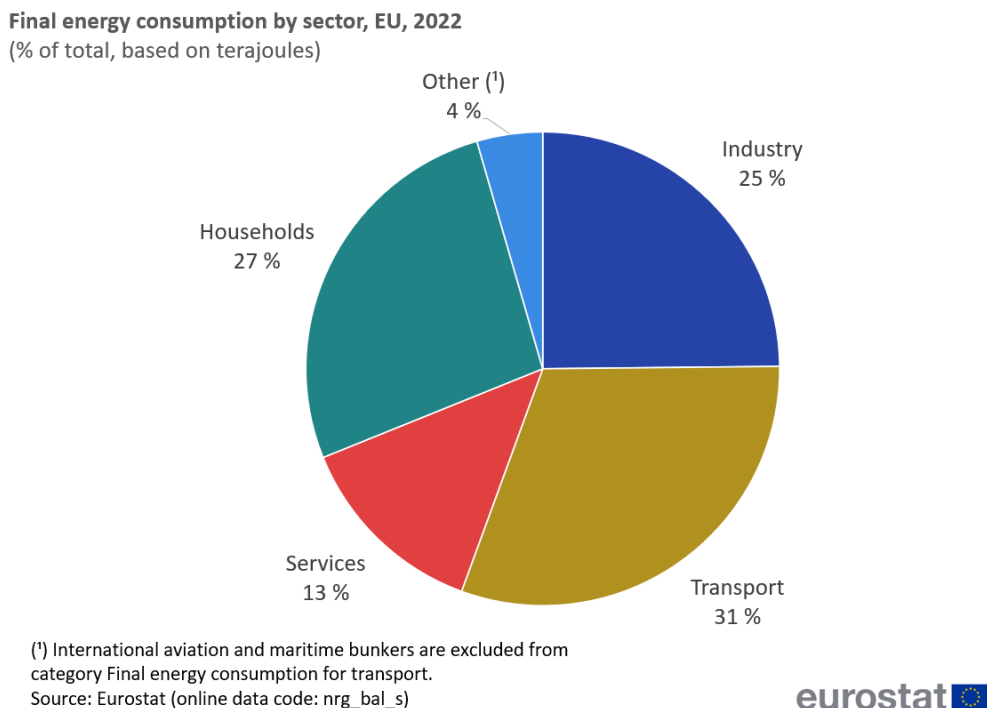


Figura 2 - Consumo finale di energia suddiviso in settori

L'Unione Europea ha infatti stabilito nuovi e ambiziosi obiettivi per il 2030 e il 2050, noti come "Pacchetto Energia e Clima 2030", che includono:

- **Riduzione delle Emissioni di Gas Serra:** Ridurre le emissioni di gas serra di almeno il 55% rispetto ai livelli del 1990.
- **Energie Rinnovabili:** Portare la quota di energie rinnovabili ad almeno il 32% del consumo energetico totale dell'UE.

- **Efficienza Energetica:** Migliorare l'efficienza energetica di almeno il 32,5%.

Oltre a ciò, iniziative come la Direttiva sull'Efficienza Energetica (EED) e la strategia "Renovation Wave" mirano a ridurre il consumo energetico e le emissioni di gas serra, riconoscendo il ruolo significativo degli edifici nel consumo energetico totale dell'UE e nelle emissioni.

La Direttiva sull'Efficienza Energetica (EED), adottata dall'Unione Europea nel 2012 e successivamente aggiornata, rappresenta una delle principali misure legislative dell'UE per promuovere il miglioramento dell'efficienza energetica e ridurre i consumi energetici complessivi. L'obiettivo della direttiva è di garantire che l'UE raggiunga i suoi ambiziosi target:

- **Obiettivo di Efficienza Energetica:** La direttiva stabilisce un obiettivo vincolante di riduzione dei consumi energetici. Per il periodo 2014-2020, l'UE ha fissato un obiettivo di miglioramento dell'efficienza energetica del 20%.
- **Piani Nazionali di Efficienza Energetica (NEEAPs):** Gli Stati membri sono tenuti a redigere e aggiornare regolarmente i loro Piani Nazionali di Efficienza Energetica (NEEAPs), che delineano le politiche e le misure per migliorare l'efficienza energetica a livello nazionale.
- **Obbligo di Ristrutturazione:** La direttiva prevede l'obbligo per le grandi imprese di effettuare audit energetici regolari (almeno ogni 4 anni) per identificare opportunità di risparmio energetico e migliorare l'efficienza.
- **Efficienza Energetica nei Settori Pubblico e Privato:** La direttiva promuove l'adozione di misure di efficienza energetica anche nel settore pubblico e prevede requisiti specifici per gli edifici pubblici, che devono essere ristrutturati e aggiornati per migliorare la loro efficienza energetica.

Nel 2021, la Direttiva sull'Efficienza Energetica è stata aggiornata come parte del pacchetto legislativo "Fit for 55", che prevede obiettivi più ambiziosi e misure più severe per il miglioramento dell'efficienza energetica al fine di raggiungere gli obiettivi climatici dell'UE.

La strategia "Renovation Wave" è un'iniziativa del Green Deal europeo lanciata nel 2020, mirata a migliorare l'efficienza energetica del patrimonio edilizio dell'UE. Questa strategia riconosce che gli edifici sono responsabili di una significativa parte del consumo energetico e delle emissioni di gas serra nell'UE, rendendo essenziale una ristrutturazione massiva per raggiungere gli obiettivi climatici.

- **Incremento della Ristrutturazione:** L'obiettivo della "Renovation Wave" è di raddoppiare il tasso di ristrutturazione energetica degli edifici entro il 2030. Questo implica un aumento sostanziale degli interventi di ristrutturazione per migliorare l'efficienza energetica e ridurre le emissioni di CO<sub>2</sub>.
- **Sostenibilità e Innovazione:** La strategia promuove l'uso di tecnologie e materiali sostenibili e innovativi nelle ristrutturazioni, con l'intento di trasformare gli edifici in asset energeticamente efficienti e a basse emissioni.
- **Accessibilità e Inclusività:** La "Renovation Wave" mira a garantire che le ristrutturazioni siano accessibili a tutti, compresi i gruppi vulnerabili e le famiglie a basso reddito. Questo include l'accesso a finanziamenti e incentivi per sostenere i lavori di ristrutturazione.

- **Benefici Economici e Sociali:** La strategia non solo punta a migliorare l'efficienza energetica, ma anche a creare posti di lavoro e stimolare la crescita economica nel settore delle costruzioni e dell'efficienza energetica.

L'analisi presentata durante questa trattazione si inserisce perfettamente in questo contesto di trasformazione energetica e sostenibilità. Realizzata in collaborazione con Eurix, un'azienda leader nella gestione e ottimizzazione energetica, la tesi si concentra sul caso dell'Energy Center, un edificio multifunzionale presentato nel capitolo successivo.

In particolare, l'analisi mira a:

1. **Valutare l'Impatto delle Nuove Strategie di Regolazione:** Misurare i risparmi energetici derivanti dall'adozione di tecniche avanzate di regolazione per le UTA, evidenziando come tali miglioramenti possano contribuire a una maggiore efficienza energetica e a una riduzione dei costi operativi.
2. **Sviluppare Strumenti di Analisi:** Creare un codice Python per la caratterizzazione energetica delle UTA, che permetta di adattare le analisi a diverse configurazioni e dati di input, offrendo uno strumento versatile per professionisti del settore.

Questa ricerca non solo fornisce dati e strumenti utili per le aziende e le istituzioni coinvolte nella gestione e ottimizzazione energetica, ma contribuisce anche agli obiettivi più ampi della Direttiva EED e della strategia "Renovation Wave", promuovendo una transizione verso edifici più sostenibili e efficienti a livello europeo.

Per comprendere a pieno la trattazione è utile introdurre in maniera chiara quelli che sono i sistemi di controllo, che permettono di attuare in maniera automatica le strategie di regolazione analizzate.

## 1.1 Sistemi di Controllo

Un sistema di controllo è definito come un insieme di componenti interconnessi che lavorano insieme per raggiungere un obiettivo specifico, reagendo a variabili in ingresso e mantenendo determinate condizioni all'interno del sistema [19]. Questi sistemi trovano applicazione in svariati settori, dai sistemi HVAC agli impianti industriali.

Il processo di controllo si compone in una serie di fasi [36]:

- **Sensing:** misurazione dei parametri del processo e dell'ambiente circostante;
- **Decision making:** prendere decisioni sulla base delle misurazioni effettuate e degli obiettivi da raggiungere, determinando quale comando inviare;
- **Disposition:** trasmettere il comando agli attuatori;
- **Intervention/Acting:** i parametri del sistema vengono modificati secondo i comandi impartiti.

Un aspetto cruciale nello studio dei sistemi di controllo è la loro rappresentazione mediante schemi a blocchi. Questi schemi consentono di evidenziare in modo chiaro le parti del sistema e le loro interconnessioni, oltre a definire le relazioni tra variabili d'ingresso e uscita e quindi come la variazione degli input influenzi gli output.

Una delle prime distinzioni che emerge dagli schemi a blocchi è quella tra sistemi a controllo in anello aperto e chiuso:

- [1] Nei sistemi a **anello aperto**, la variabile di processo non viene misurata, per cui gli output dipendono esclusivamente dagli input.

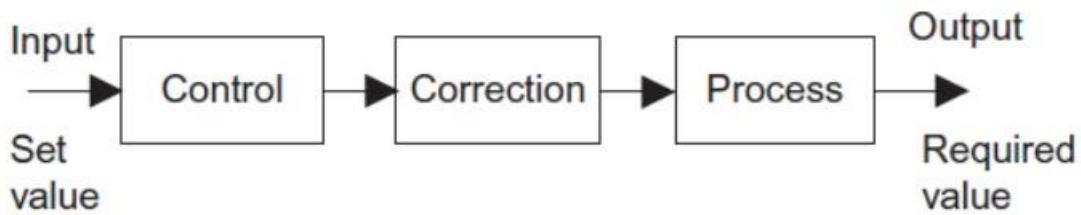


Figura 3 - diagramma a blocchi ad anello aperto

- [2] Nei sistemi a **anello chiuso**, invece, la variabile di processo è misurata e il feedback viene utilizzato nel processo decisionale, che si basa non solo sugli ingressi, ma anche sulla retroazione.

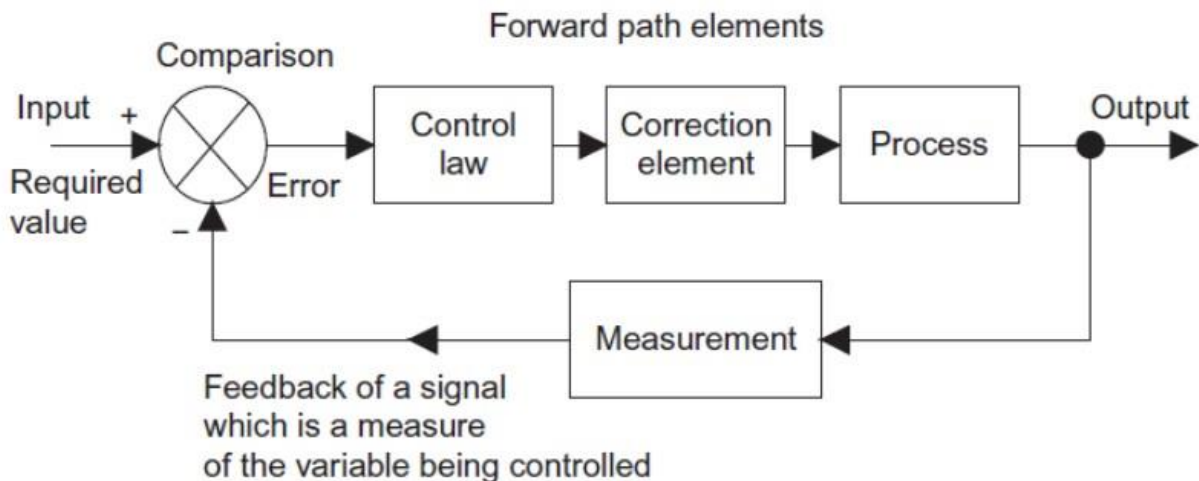


Figura 4 - diagramma a blocchi anello chiuso

La differenza tra i due sistemi è evidente in situazioni in cui si verificano disturbi che alterano le variabili misurate o quando il sistema è complesso e il suo comportamento non è completamente noto. In alcuni casi, si preferisce un sistema a anello aperto, poiché è più economico e meno suscettibile all'instabilità rispetto all'anello chiuso [23]. Un esempio pratico di controllo a anello aperto è la regolazione della temperatura di una stanza basata sulla temperatura esterna, mentre il controllo a anello chiuso considererebbe anche la temperatura interna.

I sistemi di controllo possono essere classificati in diverse macro-categorie come presentato in figura

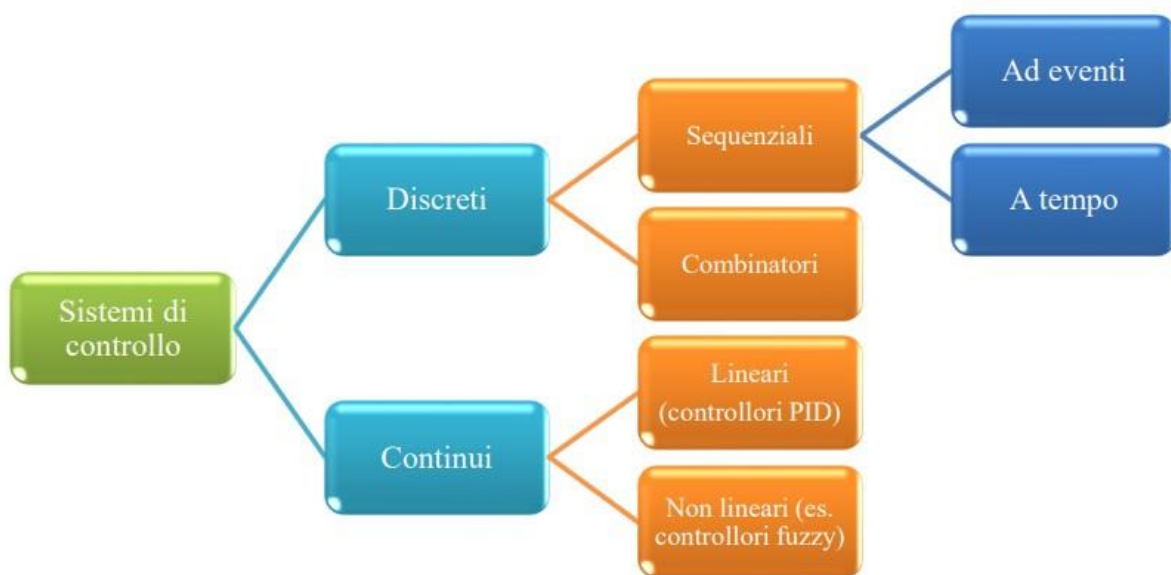


Figura 5 - Classificazione sistemi di controllo

Una prima classificazione dei sistemi di controllo è:

- I. **discreto** funziona con due sole configurazioni, ON/OFF,
- II. **continuo** può assumere una gamma di valori intermedi all'interno di un intervallo.

I sistemi discreti si possono suddividere in:

- I. **sequenziali** sono caratterizzati da un processo suddiviso in fasi successive, in cui l'attivazione di una fase dipende dal verificarsi di una condizione (un evento o un intervallo di tempo).
- II. I sistemi **combinatori**, invece, dipendono esclusivamente dagli input.

I sistemi continui si suddividono in **lineari** e **non lineari**. La distinzione tra sistemi riguarda non solo il loro comportamento fisico, ma anche la loro modellazione: un sistema non lineare può essere linearizzato in alcuni punti specifici [23].



Infine, un'ulteriore distinzione rilevante riguarda il tipo di mezzo fisico utilizzato nei sistemi. Alcuni sistemi impiegano diversi vettori fisici, come un PLC (mezzo elettrico) combinato con un attuatore oleodinamico, soluzione tipica per applicazioni che richiedono grandi forze. Altri sistemi utilizzano un unico vettore fisico, come quelli puramente elettrici o ad aria compressa, ad esempio nei sistemi fluidici, dove sia gli attuatori che gli elementi di controllo funzionano ad aria compressa.

## 1.2 Controllo negli impianti HVAC

In ambito industriale e civile, i sistemi di automazione svolgono un ruolo chiave nella gestione e controllo di impianti complessi, come quelli meccanici presenti in un edificio. Questi impianti comprendono una vasta gamma di componenti, dal sistema di generazione dell'energia ai terminali di distribuzione, il che implica la necessità di gestire un elevato numero di variabili per modificare il comportamento del sistema. A causa della loro complessità e dimensione, è fondamentale che i diversi dispositivi in campo siano in grado di scambiarsi informazioni, gestire priorità e allarmi in modo coerente e integrato.

I sistemi di automazione necessitano di trasmettere segnali da e verso i vari livelli del sistema, soprattutto quando questo è distribuito attraverso l'edificio sia spazialmente che funzionalmente. Pertanto, la comunicazione e l'interconnessione tra i dispositivi diventano aspetti cruciali.

Esistono tre principali tipologie di sistemi di automazione:

- **DCS (Distributed Control System),**
- **SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition)**
- **BMS (Building Management System).**

I primi due sono orientati maggiormente all'ambito industriale, mentre il BMS è tipico del settore civile.

Un sistema di controllo automatizzato si struttura in cinque livelli principali, dove il supervisore non controlla direttamente i vari processi, che sono affidati ai singoli controllori, ma gestisce i parametri fondamentali per il loro funzionamento, ad esempio setpoint, accensioni e spegnimenti. I controllori ai livelli più bassi funzionano in maniera indipendente dal sistema centrale, ma periodicamente comunicano, tramite delle interfacce col supervisore, sia per trasmettere i dati dal campo sia per recepire i comandi; in questo modo il supervisore funziona da intermediario tra i diversi loop di controllo fornendo una panoramica globale sul monitoraggio e sulla gestione del sistema:

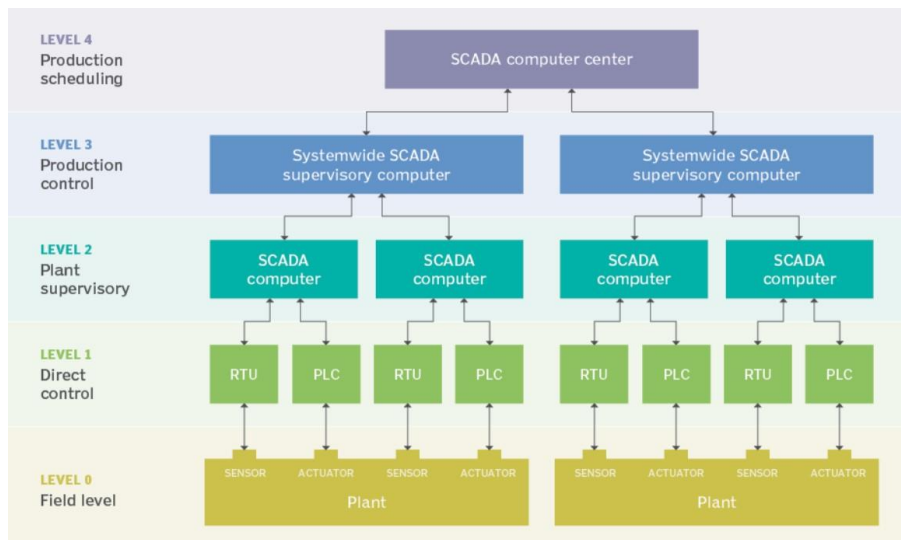


Figura 6 - Architettura di un tipico sistema di controllo (SCADA)

- **Livello 0 (Campo):** include tutti i dispositivi di monitoraggio e controllo dell'impianto, come sensori e attuatori.
- **Livello 1 (Controllo diretto):** composto da controllori o PLC, che acquisiscono i dati dal campo, li elaborano e restituiscono un output al sistema.
- **Livello 2 (Supervisione di impianto):** qui avviene la supervisione attraverso un'interfaccia HMI (Human-Machine Interface), che consente agli operatori di impostare i parametri di controllo.
- **Livello 3 (Controllo di produzione):** si analizzano i dati storici e operativi per verificare il raggiungimento degli obiettivi prefissati.
- **Livello 4 (Production scheduling):** vengono pianificate le strategie produttive sulla base delle informazioni raccolte.

I DCS sono progettati per gestire processi industriali continui, con la capacità di controllare migliaia di punti all'interno di una rete locale (LAN). Grazie a questa struttura, le comunicazioni sono più rapide e affidabili rispetto ai sistemi che operano su lunghe distanze, come nel caso di SCADA. I DCS sono utilizzati in contesti industriali complessi dove è essenziale una gestione sofisticata e continua del processo. Questi sistemi sono caratterizzati da una struttura gerarchica che distribuisce l'intelligenza su vari livelli, non centralizzata su un unico sistema di supervisione, garantendo maggiore sicurezza e affidabilità. I DCS si basano su sistemi operativi deterministici, ovvero in grado di rispondere in un tempo prefissato. La loro flessibilità e capacità di adattamento li rendono particolarmente efficaci in impianti complessi, dove è necessario gestire molte interfacce e componenti.

Il sistema **SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition)** è utilizzato per il controllo di processi distribuiti su ampie aree geografiche, dove è fondamentale un'acquisizione centralizzata dei dati. A differenza dei sistemi DCS, che operano in un'unica località geografica, lo SCADA può gestire impianti distribuiti, sfruttando reti di comunicazione a lunga distanza, come le WAN (Wide Area Network). Grazie alla sua elevata scalabilità, il sistema SCADA è adatto a impianti di diverse dimensioni.

Una delle sue caratteristiche principali è la capacità di raccogliere, elaborare e archiviare grandi quantità di dati, permettendo un monitoraggio continuo e accurato delle prestazioni dell'impianto. Questo avviene tramite dispositivi in campo noti come RTU (Remote Terminal

Unit), che, grazie alle loro capacità di calcolo, interfacciando gli I/O fisici con il sistema SCADA, trasmettono i dati rilevati, come i segnali di un trasduttore di pressione, alla supervisione centrale. In molti casi, gli RTU sono stati progressivamente sostituiti dai PLC (Programmable Logic Controller), poiché questi ultimi risultano più economici e flessibili.

Inizialmente, i sistemi SCADA erano caratterizzati da un'architettura fortemente centralizzata, in cui un unico computer eseguiva tutte le operazioni. Tuttavia, con lo sviluppo delle tecnologie hardware e delle reti di comunicazione, si è passati a un'architettura distribuita, dove alcune funzioni sono delegate ai dispositivi in campo, mentre la supervisione e la gestione dei setpoint rimangono centralizzate.

Le versioni più recenti dei sistemi SCADA sono progettate per essere completamente aperte e non più proprietarie, consentendo l'interfacciamento tra dispositivi di diversi produttori. L'integrazione delle tecnologie IT e delle reti di comunicazione come il protocollo TCP/IP ha reso questi sistemi molto più affidabili e scalabili rispetto ai precedenti sistemi isolati. Inoltre, l'avvento del **cloud computing** e l'integrazione con l'**Internet of Things (IoT)** hanno rivoluzionato la gestione di questi sistemi, permettendo un accesso remoto da qualsiasi dispositivo e la visualizzazione in tempo reale dei processi. L'uso del cloud ha portato notevoli vantaggi, come la semplificazione del sistema, la riduzione dei costi operativi e l'aumento della potenza di calcolo, migliorando ulteriormente l'efficienza complessiva dei sistemi SCADA.

Il termine **BMS (Building Management System)** è spesso usato in modo intercambiabile con altri termini come BAS (Building Automation System), BCS (Building Control System), DDC (Direct Digital Controls), IB (Intelligent Building) o Smart Building. Queste distinzioni sono principalmente legate alla tecnologia utilizzata, che è in continua evoluzione nel contesto della Building Automation, ma in generale fanno riferimento a un'unica macrocategoria di sistemi, ovvero i BMS. Un edificio può integrare diversi tipi di impianti, che possono essere gestiti da un unico sistema centralizzato, il BMS, che consente ai vari dispositivi tecnici di comunicare tra loro e operare in modo integrato, in modo da raccogliere e gestire grandi quantità di dati utili per ottimizzare il funzionamento dell'edificio e ridurre i consumi energetici.

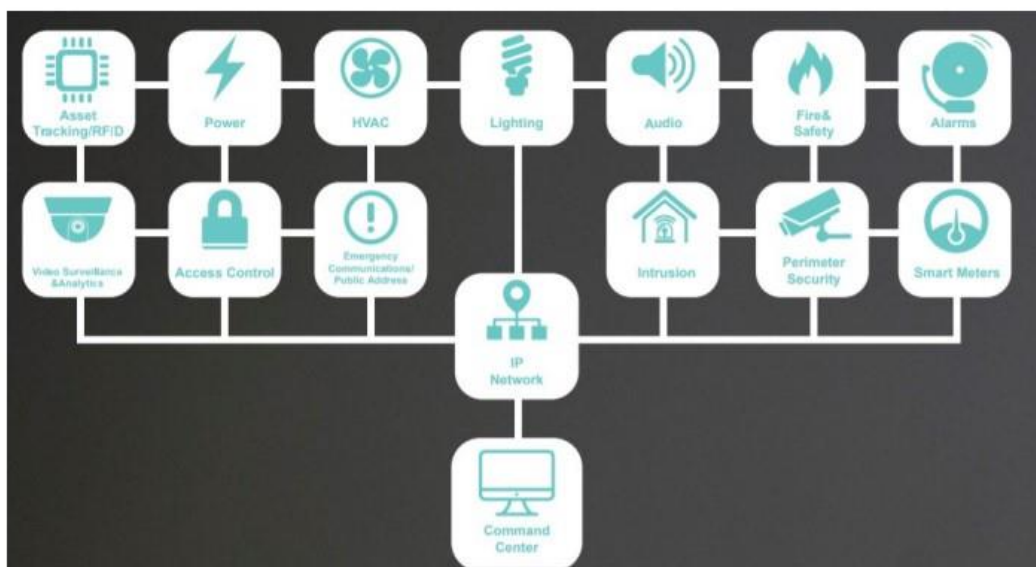


Figura 7 - Impianti gestiti da BMS

Il BMS è organizzato in una struttura distribuita che copre l'intero edificio, con dispositivi dislocati che comunicano tramite una rete, scambiando informazioni in lettura (ad esempio, per

misurare i dati dai sensori) e in scrittura (ad esempio, per attuare comandi come la regolazione della temperatura). Lo scopo principale di un BMS è ottimizzare la gestione dell'edificio, riducendo i costi operativi ed energetici, facilitando la diagnosi dei guasti e migliorando l'efficienza generale dell'impianto.

Un BMS segue una struttura suddivisa in tre livelli principali:

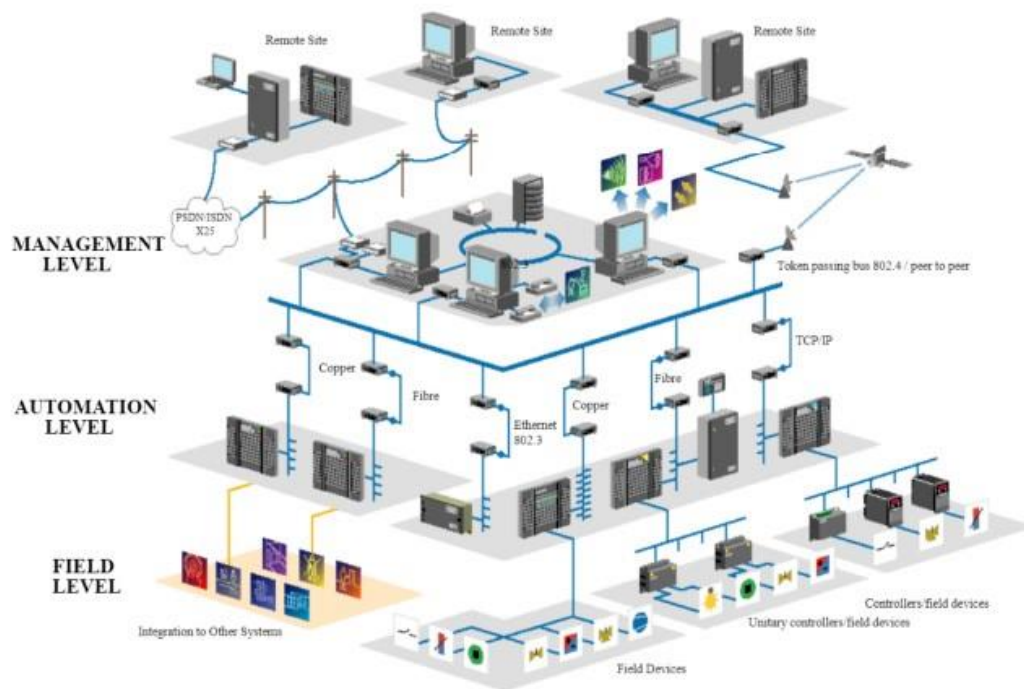


Figura 8 - Struttura BMS

1. **Field Level:** include dispositivi come attuatori, sensori e termostati che collegano il sistema BMS con il campo.
2. **Automation Level:** contiene controllori di livello superiore, gateway o router che permettono la comunicazione tra i diversi dispositivi, garantendo la connettività e il controllo automatico.
3. **Management Level:** comprende l'interfaccia tra il sistema e il gestore, che può essere una workstation locale o una piattaforma accessibile via browser da remoto in tempo reale.

Un BMS non è costituito solo da componenti hardware, ma richiede anche un software e protocolli di comunicazione per funzionare correttamente. Tra i più comuni vi sono: **BACnet**, **KNX**, **M-bus**, **Modbus**, **EnOcean**, **OPC**, **DALI**, **ZigBee**. Solitamente, l'architettura di un BMS sfrutta diversi protocolli a seconda del livello in cui si opera.

Uno dei punti di forza dei BMS è la loro **scalabilità**: permettono di espandere facilmente il sistema integrando nuovi componenti o funzionalità. Tuttavia, l'integrazione di dispositivi diversi può complicare l'architettura e richiede spesso l'intervento di un **System Integrator**, il cui compito è garantire la corretta interazione tra i vari sottosistemi. Anche se lo sviluppo di componenti IoT ha semplificato alcune di queste operazioni, molti edifici utilizzano ancora hardware e software obsoleti, rendendo l'integrazione una sfida complessa.

I vantaggi dei BMS sono numerosi: consentono una gestione più efficiente degli impianti, con la possibilità di programmare accensioni e spegnimenti per garantire condizioni di comfort ottimali, monitorare i consumi in tempo reale e prolungare la vita utile degli impianti grazie a una manutenzione semplificata e a una rete di allarmi per la rilevazione delle anomalie. Grazie alla gestione centralizzata e remota, il sistema permette un controllo più semplice e sicuro degli impianti, aumentando al contempo la loro performance.

Infine, l'adozione di un BMS migliora non solo il benessere ambientale all'interno dell'edificio, ma anche il suo valore economico, riducendo i costi operativi e accelerando i tempi di ritorno sugli investimenti. Il BMS può essere configurato per produrre report automatici e personalizzati, ottimizzando ulteriormente la gestione e la pianificazione della manutenzione.

Tra i sistemi BMS più utilizzati sul mercato troviamo:

- **Siemens Desigo;**
- **Johnson Control;**
- **Progea Movicon;**
- **Eliwell;**
- **Automated Logic WebControl;**
- **LG AC SMART IV.**

Questi sistemi sono scelti per la loro flessibilità, efficienza e capacità di integrazione in edifici di diverse tipologie e dimensioni.

Nel contesto dei *Building Management Systems* (BMS), i **controllori** sono fondamentali per la gestione e l'automazione degli impianti. Esistono diverse tipologie di controlli che vengono utilizzate per gestire i parametri di funzionamento delle apparecchiature, ognuna con caratteristiche diverse in termini di complessità e applicazioni. Ecco una panoramica delle principali categorie:

- **Controllo ON/OFF**

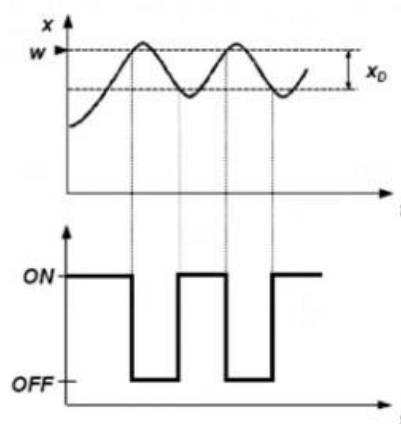


Figura 9 - Diagramma di regolazione ON/OFF

Il controllo ON/OFF, chiamato anche a due posizioni, è il sistema di regolazione più semplice. Consiste nel mantenere un dispositivo acceso (ON), quando la temperatura ambiente misurata è al di sotto di un valore minimo di set-point, oppure in stato di spegnimento (OFF) quando viene raggiunta la temperatura desiderata. Questo sistema è comune in applicazioni come termostati

domestici. Il valore della temperatura ambiente oscilla continuamente nel tempo con un'ampiezza che dipende dal cosiddetto “differenziale”, cioè lo scostamento tra i valori di temperatura massimo e minimo che determinano gli stati ON e OFF. Il valore del differenziale solitamente può essere impostato ma occorre trovare il giusto compromesso: un differenziale troppo basso determina una temperatura ambiente mediamente vicina a quella desiderata ma accensioni e spegnimenti molto frequenti. Viceversa, un differenziale troppo alto limita il numero di accensioni a discapito del comfort, poiché la temperatura ambiente sarà controllata con oscillazioni molto ampie.

- **Controllo flottante**

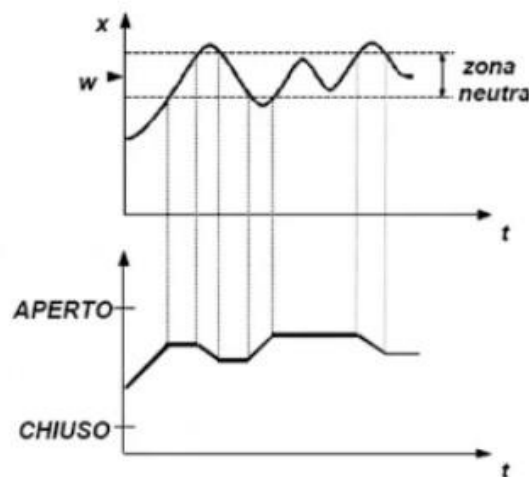


Figura 10 - Diagramma di regolazione flottante

Questo tipo di regolazione offre tre opzioni: apertura, chiusura o mantenimento della posizione attuale. Quando il parametro regolato si trova in una “zona neutra”, il servocomando si ferma e riprende a muoversi solo quando la variabile esce da questa zona. Questo sistema è più efficiente del controllo ON/OFF e trova ampia applicazione nei sistemi di riscaldamento, ventilazione e condizionamento (HVAC).

- **Controllo modulante**

La regolazione modulante è un sistema progettato per mantenere la temperatura ambiente al valore desiderato in modo continuo e preciso. Questo tipo di regolazione può essere implementata meccanicamente, ad esempio, tramite valvole termostatiche per radiatori o con l'ausilio di centraline di controllo più avanzate. A differenza di un semplice termostato a due stati (ON/OFF), il regolatore modulante consente un'azione più dinamica, adattandosi rapidamente alle variazioni di carico e inseguendo il set-point con maggiore accuratezza.

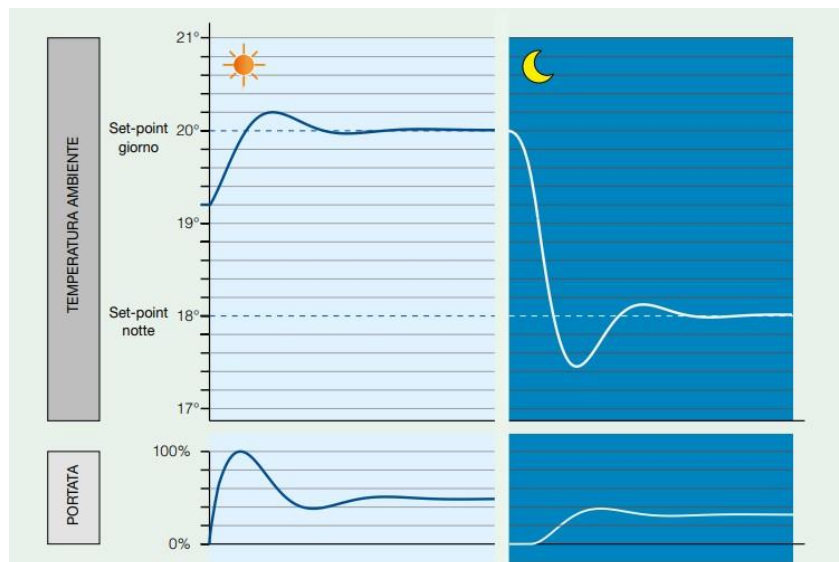


Figura 11 - Diagramma controllo modulante

La forma più basilare di regolazione modulante è quella proporzionale, in cui l'intensità dell'azione di regolazione aumenta all'aumentare della distanza dalla temperatura desiderata. Questo comportamento è descritto dalla “banda proporzionale”, che determina come la portata regolata dalla valvola varia in relazione alla differenza dalla temperatura ideale.

La banda proporzionale può essere regolata, ma è necessario trovare un compromesso: una banda troppo ampia può causare una risposta lenta e ampie oscillazioni rispetto al set-point, mentre una banda troppo ristretta può ridurre l'efficacia della regolazione, comportandosi similmente a un sistema ON/OFF e generando instabilità termica.

Per affrontare le limitazioni della regolazione proporzionale, le moderne centraline elettroniche integrano spesso strategie aggiuntive, come l'azione integrale, che corregge gli scostamenti nel lungo termine, e l'azione derivativa, che aumenta la reattività del sistema. Questi sistemi di controllo sono comunemente noti come controlli PI (proporzionale-integrale) o PID (proporzionale-integrale-derivativo).

I controllori PID offrono una regolazione più sofisticata e precisa, basata su tre modalità di azione:

- **Proporzionale (P):** regola la variabile in proporzione all'errore rispetto al set point. È efficace, ma non elimina completamente l'offset, ossia la differenza tra il valore reale e quello desiderato.
- **Integrale (I):** riduce progressivamente l'offset accumulando l'errore nel tempo fino a raggiungere il set point.
- **Derivativo (D):** attenua le oscillazioni del sistema reagendo ai cambiamenti rapidi della variabile controllata, migliorando la stabilità.

Grazie alla combinazione di queste tre azioni, i controllori PID permettono di ottenere un controllo accurato e stabile, molto usato in ambito industriale e BMS.

## 2. Presentazione del Caso Studio

Il presente lavoro di tesi è stato svolto in collaborazione con Eurix, un'azienda operante nel settore energetico, con l'obiettivo di ottimizzare il consumo termico e calcolare i risparmi energetici dovuti ad implementazioni di strategie di controllo applicate alle Unità di Trattamento Aria (UTA) che trattano l'aria da immettere di un'importante infrastruttura di uno dei loro clienti, in particolare l'Energy Center, edificio situato in via Paolo Borsellino 38/16, Torino.



*Figura 12 - Energy Center Torino*

L'Energy Center (EC) è stato ideato per soddisfare requisiti elevati in termini di ambiente, prestazioni energetiche e di comfort termico, ottenendo la certificazione del Protocollo Itaca con il punteggio globale a progetto 3. L'EC ha l'obiettivo di costruire network nazionali ed Europei, come incentivo per lo sviluppo di nuove iniziative imprenditoriali nel settore energetico attraverso le opportunità fornite dalla ricerca accademica, innovazione e partnership, ospitando aziende, start-up e pubbliche amministrazioni ed altri soggetti attivi nel campo energetico, oltre che riservando ampi spazi per la ricerca accademica.

Ad oggi, in EC sono attive una quindicina di iniziative diverse, tra insediamenti di aziende e laboratori congiunti con il Politecnico, cui vanno ad aggiungersi 1000 m<sup>2</sup> di laboratori, sale riunioni e ampi spazi destinati ad uso comune, oltre ad un auditorium che può ospitare fino a 150 persone.

Il focus principale del progetto è stato l'analisi delle Unità di Trattamento Aria (UTA) che garantiscono la climatizzazione dell'EC, e in particolare quantificare i risparmi energetici ottenibili attraverso l'implementazione di nuove strategie di regolazione per le UTA, proposte dall'azienda. L'analisi è stata condotta utilizzando dati storici di funzionamento e consumi, permettendo di modellare l'impatto di queste modifiche sul consumo energetico complessivo.



Un ulteriore obiettivo è stato lo sviluppo di un codice Python, in grado di calcolare i risparmi energetici su qualsiasi UTA, consentendo così l'adattamento a differenti configurazioni operative, modificando i dati di input da inserire.

Da un punto di vista impiantistico, il trattamento dell'aria esterna da immettere in ambiente, è gestita da 5 UTA, tutte predisposte per funzionare sia in inverno che in estate, che si suddivideranno l'intero stabile in funzione delle varie zone termiche:

- **UTA Auditorium**, prevista per il locale Auditorium al piano terreno e ubicata in locale apposito sulla copertura lato scala B.
- **UTA Atrio**, prevista per la zona Atrio per tutta la sua altezza dal piano terreno al piano terzo e ubicata in locale apposito al piano interrato.
- **UTA Ristorante**, prevista per il piano interrato e ubicata in locale apposito al piano interrato.
- **UTA Uffici Nord-Est**, prevista per gli uffici al primo, secondo e terzo piano che si affacciano a nord-est e ubicata in locale apposito sulla copertura lato Scala B.
- **UTA Uffici Nord-Ovest**, prevista per gli uffici al primo, secondo e terzo piano che si affacciano a nord-ovest, ubicata in locale apposito sulla copertura lato scala A.

Tra queste elencate sono state prese in considerazione durante la trattazione solo quelle gestite da Eurix e quindi le UTA che gestiscono l'Auditorium ed entrambe le zone degli uffici.

## 2.1 UTA Auditorium

L'Unità di Trattamento Aria (UTA) in questione gestisce un impianto di climatizzazione a tutt'aria previsto per l'Auditorium dell'Energy Center ubicato al pian terreno. L'UTA si trova in un locale apposito sulla copertura lato scala B, ed è previsto che essa funzioni sia per la stagione invernale che estiva. Per garantire un controllo ottimale delle condizioni di temperatura ambiente e una distribuzione uniforme dell'aria vengono utilizzati diffusori a pavimento posizionati sotto le poltrone, capaci di indurre efficacemente l'aria ambiente e favorire la miscelazione dell'aria immessa. La ripresa dall'ambiente avviene per mezzo di diffusori quadrati o rettangolari posti nel controsoffitto. Il controllo delle condizioni ambiente avviene mediante valvole di regolazione a due vie per le batterie e termosonde installate a bordo dell'unità di trattamento aria. Un controllore raccoglie i segnali di comando e regolazione, mentre regolatori a microprocessore con logica programmabile (posti sul quadro elettrico di zona) provvederanno al completo controllo delle unità ed invierà il tutto al sistema di supervisione.

L'UTA, come si può vedere dalla figura sottostante, è costituita da vari componenti che devono costituire un complesso rigido in grado di resistere, senza essere sede di deformazioni od oscillazioni dovuti a fenomeni di risonanza, a tutte le forze che entrano in gioco durante il funzionamento e che devono essere accessibili per le normali operazioni di pulizia e ripristino di isolamenti e verniciature.

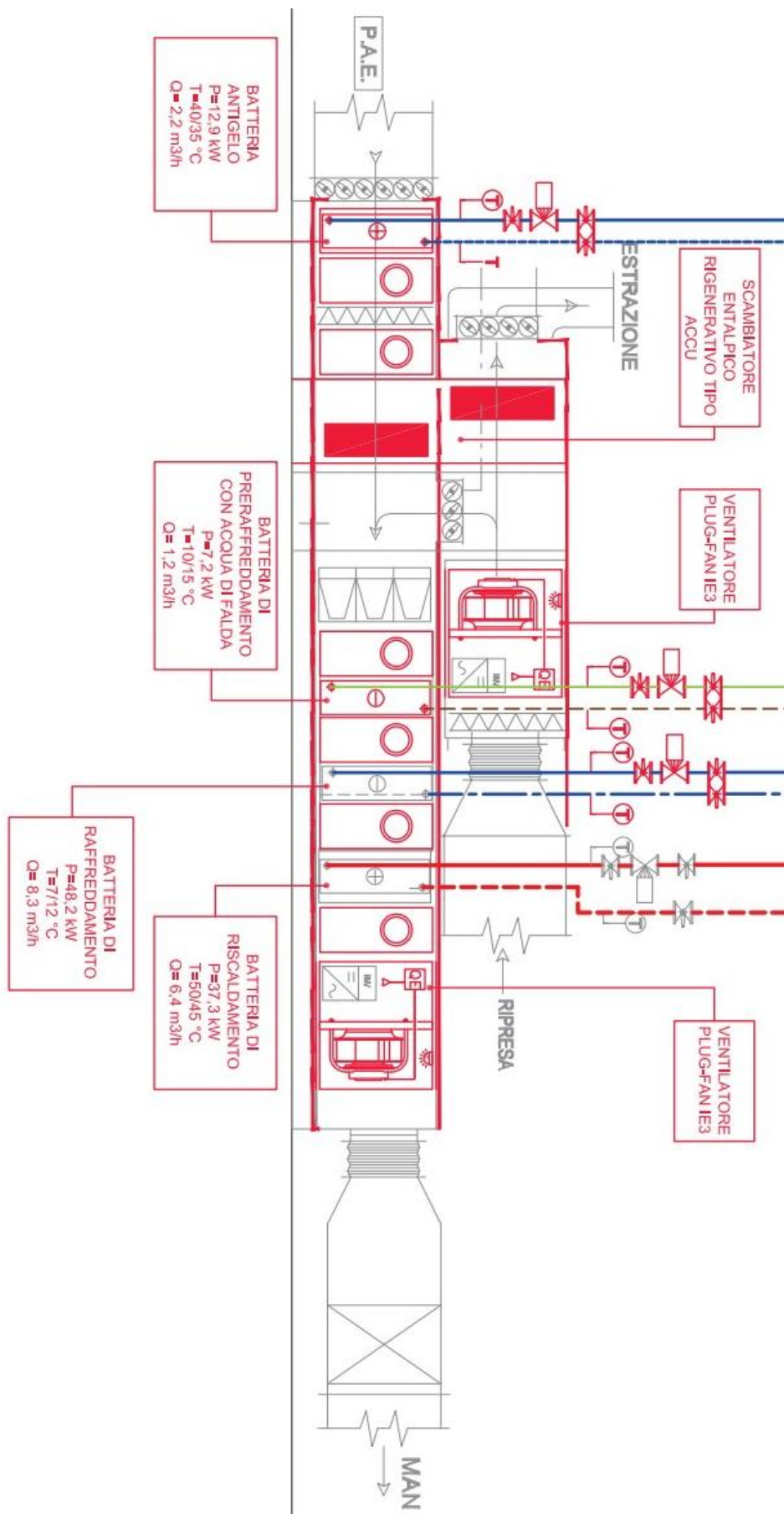


Figura 13- Schema UTA Auditorium

A partire dalla sezione di mandata l'UTA è caratterizzata da:

- Sezione di filtrazione costituita da filtri a celle estraibili, con una superficie totale di passaggio aria tale che la velocità di attraversamento non risulti superiore a 2,5 m/sec.
- Serrande di regolazione: utilizzate per controllare il flusso d'aria attraverso l'UTA. Sono realizzate in peralluman con guarnizioni su tutti i lati per garantire la tenuta d'aria.
- Batteria Antigelo, fondamentale nella stagione invernale quando l'aria immessa dall'esterno si trova a temperature basse.
- Recuperatore di calore, costituito da un doppio accumulatore di calore ad alta sensibilità. La commutazione tra i flussi d'aria avviene tramite serrande azionate da un motoriduttore centralizzato. In inverno preriscalda l'aria fredda esterna, mentre in estate la preraffredda con un'efficienza di recupero superiore al 90% per il calore sensibile e oltre il 75% per l'umidità.
- Batteria di riscaldamento: Realizzata con tubi in rame e alette in alluminio, serve per riscaldare l'aria in inverno.
- Batteria di preraffreddamento e raffreddamento: Utilizzate per raffreddare l'aria in estate. Sono costruite con tubi in rame e alette in rame stagnate, con una bacinella per la condensa in acciaio inox.
- Sezione di umidificazione: Include una stazione di pompaggio, un separatore di gocce e un rack con collettori e ugelli alimentati da acqua demineralizzata ad alta pressione. Mantiene l'umidità dell'aria entro i livelli desiderati. Utilizza un sistema di pompe e ugelli che atomizzano l'acqua per aumentare l'umidità.
- Ventilatore di Mandata: ventilatore plug-fan senza coclea, ad alta efficienza, con motori IE3 dotati di inverter per la regolazione della velocità.
- Ventilatore di Ripresa: Recupera l'aria dall'ambiente e la reimmette nell'UTA per recuperarla e ritrararla o espellerla. Dotato di caratteristiche uguali al ventilatore di mandata.

In tabella sono riportate le caratteristiche tecniche di interesse per la trattazione.

<b>Ventilatore di Mandata</b>	Portata di progetto	7200 $m^3/h$
	Potenza nominale motore	5.50 kW
<b>Ventilatore di Ritorno</b>	Portata di progetto	6900 $m^3/h$
	Potenza nominale motore	2.73 kW

*Tabella 1- Caratteristiche tecniche ventilatori UTA Auditorium*

- Sezione di espulsione: Gestisce l'espulsione dell'aria esausta all'esterno dell'edificio, utilizzando ventilatori e filtri simili a quelli della sezione di mandata. Include silenziatori per ridurre il rumore e giunti antivibranti per evitare la propagazione delle vibrazioni.

L'UTA è progettata per consentire un facile accesso a tutte le sue parti per la pulizia e la manutenzione, attraverso portine a doppia fodera con isolamento interno.

Ciò che in particolare interessa per la trattazione della tesi sono le modifiche proposte da Eurix del metodo di controllo, in particolare per l'UTA Auditorium comprendono l'accensione e lo spegnimento dell'UTA.

### 2.1.1 Strategie di Regolazione UTA AUDITORIUM

La regolazione proposta e realizzata da Eurix comprende la modifica delle ore di funzionamento, in particolare modificare la programmazione giornaliera di accensione della macchina.

- Funzionamento prerogolazione di Eurix: i dati analizzati comprendono il periodo che va dal 1° gennaio 2023 al 30 Novembre 2023, e mostrano il seguente funzionamento sia per la stagione di riscaldamento che per quella di raffrescamento:
  - Lunedì: dalle ore 5:45 alle ore 21:00.
  - Dal Martedì al Sabato: dalle ore 6:45 alle ore 20:00.
  - Domenica l'impianto risulta spento.

Il profilo di funzionamento, mostrato nella figura sottostante, è stato ricavato utilizzando i dati di consumo elettrico quartorario dell'UTA.

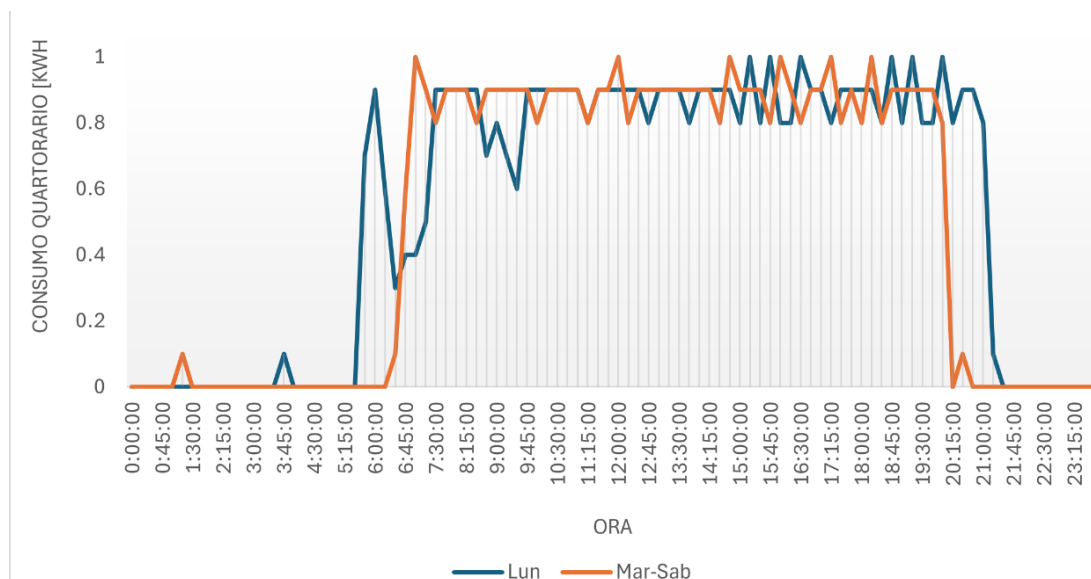


Figura 14- Profilo di funzionamento tipico periodo prerogolazione, UTA AUDITORIUM

- Funzionamento post regolazione attuata da Eurix: i dati analizzati comprendono il periodo che va dal 1° gennaio 2024 al 30 Aprile 2024.  
L'accensione e lo spegnimento dell'UTA viene programmata in base alle prenotazioni della stanza e quindi in base all'effettivo utilizzo dell'Auditorium, in modo da far funzionare l'impianto solo quando ce n'è effettivamente bisogno.  
In questo modo si evince un'importante riduzione delle ore di funzionamento, come mostrato nella tabella seguente.

Mese	Gennaio		Febbraio		Marzo	
Anno	2023*	2024	2023	2024	2023	2024
<b>Ore di funz totali [h]</b>	274.5	76.5	327	43.75	333	82.5

*Tabella 2 - Confronto ore di funzionamento*

\*le ore di funzionamento di Gennaio 2023 risultano inferiori rispetto agli altri mesi dello stesso anno, in quanto l'impianto risulta spento i primi giorni del mese, fino al 09/01/2023 a causa delle vacanze Natalizie.

## 2.2 UTA Uffici Nord-Ovest

L'impianto è realizzato per gestire la zona termica degli uffici nell'area Nord-Ovest dell'Energy Center, disposti su 3 diversi piani del fabbricato, ubicata in locale apposito sulla copertura lato scala A. L'UTA sarà equipaggiata di 2 ventilatori (mandata e ripresa) plug-fan e con motori IE3 dotati di inverter, di filtri a celle ed a tasche, di recupero di calore entalpico rigenerativo, di batteria calda (preriscaldamento) e di batterie calde (post-riscaldamento) per ognuna delle tre partenze previste per i tre piani, di sezione antigelo, di batteria fredda, di batteria di preraffreddamento alimentata direttamente ad acqua di falda, di una camera di miscela con aria di ripresa ed aria esterna, della sezione umidificazione ad atomizzazione e delle serrande regolabili della presa aria esterna e dell'aria di ricircolo. Il funzionamento dell'UTA è previsto sia per la stagione invernale che estiva.

Da un punto di vista impiantistico esso è un impianto ad aria primaria, misto aria-acqua. In questo sistema, sia l'aria che l'acqua vengono utilizzate per climatizzare l'ambiente. L'aria primaria viene utilizzata per il ricambio e il controllo dell'umidità, mentre l'acqua (riscaldata o raffreddata) viene utilizzata per il controllo della temperatura tramite pannelli radianti.

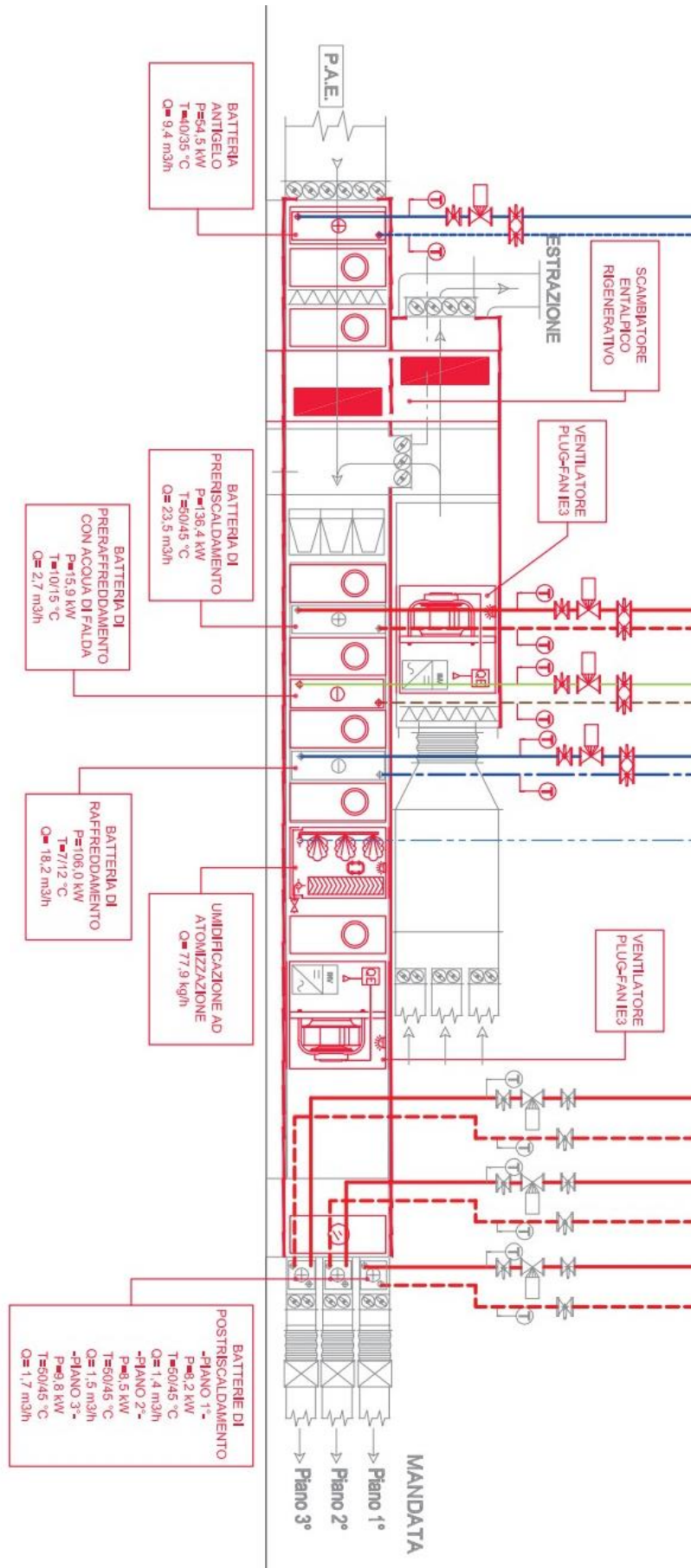


Figura 15 - Schema UTA Uffici Nord-Ovest

Le principali differenze costitutive con l'UTA analizzata precedentemente stanno nel:

- Presenza della batteria di preriscaldamento.
- Ventilatori, dello stesso modello, ma con caratteristiche di progetto differenti. In tabella sono riportate le caratteristiche tecniche di interesse per la trattazione.

<b>Ventilatore di Mandata</b>	Portata di progetto	12000 $m^3/h$
	Potenza nominale motore	11 kW
<b>Ventilatore di Ritorno</b>	Portata di progetto	11000 $m^3/h$
	Potenza nominale motore	7.86 kW

*Tabella 3 - Caratteristiche tecniche ventilatori UTA Uffici Nord-Ovest*

- Presenza di 3 batterie di post-riscaldamento, una per ogni piano gestito dall'UTA, in modo da ottenere una regolazione più fine per ogni piano.

In questo caso la regolazione proposta da Eurix consiste nella modifica della temperatura di setpoint.

### 2.2.1 Regolazione UTA Uffici Nord-Ovest

La regolazione proposta e realizzata da Eurix comprende la modifica della temperatura di set point della zona termica presa in considerazione. Per completezza di dati sono state prese in considerazione 2 stagioni di riscaldamento (2022/2023 e 2023/2024) ricordando che per quanto riguarda la stagione 23/24 è stata suddivisa in 2 parti in funzione dell'inizio della regolazione, considerando dicembre come periodo di test.

	<b>h funzionamento Periodo Preregolazione 2022/23</b>	<b>h funzionamento Periodo Preregolazione 2023/24</b>	<b>Orari funzionamento Periodo Post regolazione</b>
<b>Lunedì</b>	3:15 – 19:00	7:15 – 19:00	7:15 – 19:00
<b>Da Martedì a Venerdì</b>	5:15 – 19:00	8:15 – 19:00	8:15 – 19:00
<b>Sabato</b>	5:15 – 14:00	8:15 – 11:00	8:15 – 11:00

*Tabella 4 - Orari di funzionamento UTA Uffici Nord-Ovest*

La Domenica l'impianto risulta spento.

Per quanto riguarda la Temperatura di Set point è stata modificata come segue:

- Stagione 22/23, Tsp fissa a 25.5 °C.
- Stagione 23/24 preregolazione: Tsp, durante le ore di funzionamento, fissata a 20.5 °C.
- Stagione 23/24 post regolazione: si effettua una regolazione più fine della temperatura di set point con l'obiettivo di ridurre ulteriormente i consumi, come mostrato in seguito.

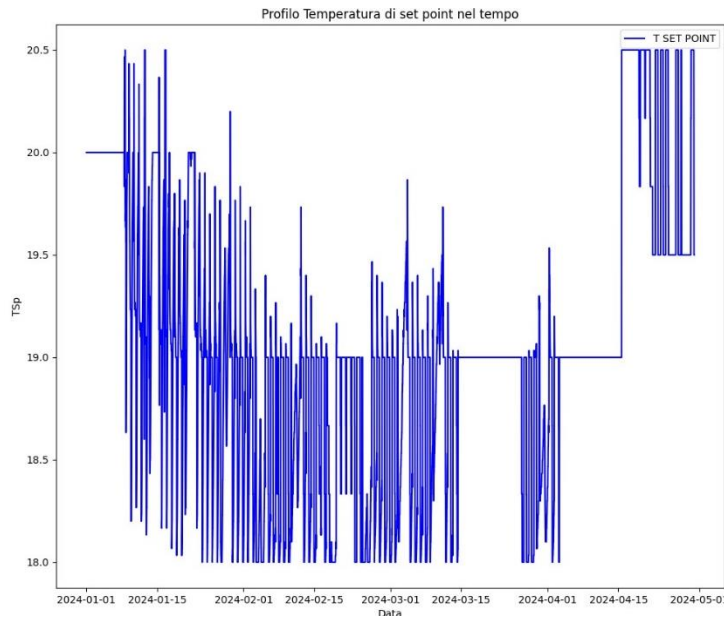


Figura 16- profilo nel tempo della Tsp, UTA Uffici Nord-Ovest.

Come dimostra il grafico, a parte un primo periodo a inizio Gennaio in cui la temperatura di Set point è rimasta settata sopra i 20 °C, la regolazione comporta un'importante riduzione di quest'ultima.

### 2.3 UTA Uffici Nord-Est

L'UTA in questione gestisce la zona termica degli uffici Nord-Est dell'Energy Center, disposti su 3 diversi piani del fabbricato, ubicata in locale apposito sulla copertura lato Scala B. Anche il funzionamento di questa UTA è previsto per la stagione invernale che estiva. Essa è costituita in maniera simile rispetto alle UTA analizzate precedentemente, in particolare quella degli uffici Nord-Ovest.

Da un punto di vista impiantistico esso è un impianto ad aria primaria, misto aria-acqua. In questo sistema, sia l'aria che l'acqua vengono utilizzate per climatizzare l'ambiente. L'aria primaria viene utilizzata per il ricambio e il controllo dell'umidità, mentre l'acqua (riscaldata o raffreddata) viene utilizzata per il controllo della temperatura tramite pannelli radianti.



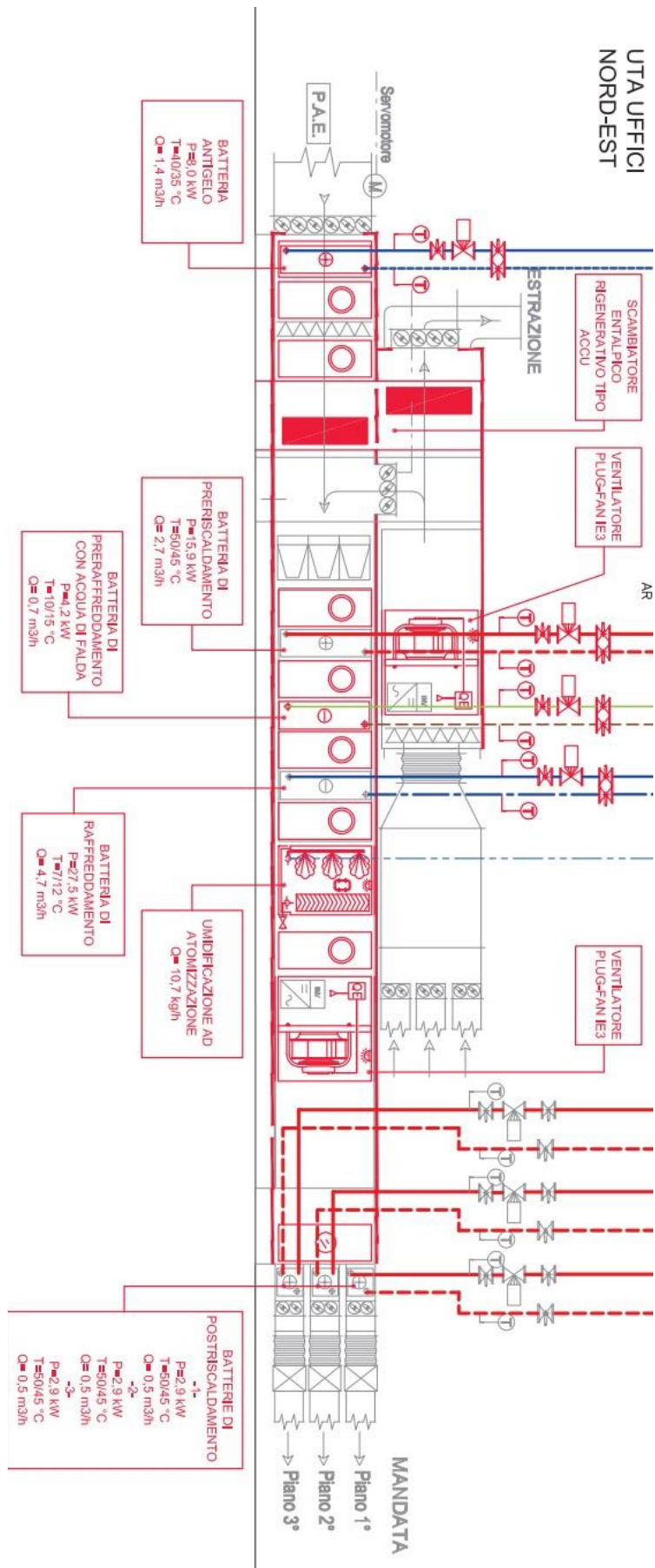


Figura 17 - Schema UTA Uffici Nord-Est

La costituzione dei componenti è la stessa, ciò che varia sono le caratteristiche tecniche dei ventilatori, riportate in tabella.

<b>Ventilatore di Mandata</b>	Portata di progetto	12000 $m^3/h$
	Potenza nominale motore	11 kW
<b>Ventilatore di Ritorno</b>	Portata di progetto	11000 $m^3/h$
	Potenza nominale motore	7.86 kW

*Tabella 5 - Caratteristiche tecniche ventilatori UTA Uffici Nord-Est*

### 2.3.1 Regolazione UTA Uffici Nord-Est

La metodologia proposta per la regolazione di quest'UTA è la stessa riguardante quella che si occupa della gestione degli Uffici Nord-Ovest. Anche questa volta è semplicemente stata regolata la Temperatura di Set Point:

	<b>Orari funzionamento Periodo Preregolazione</b>	<b>h funzionamento Periodo Preregolazione 2023/24</b>	<b>Orari funzionamento Periodo Post regolazione</b>
<b>Lunedì</b>	3:15 – 19:00	7:15 – 19:00	7:15 – 19:00
<b>Da Martedì a Venerdì</b>	5:15 – 19:00	8:15 – 19:00	8:15 – 19:00
<b>Sabato</b>	5:15 – 19:00	8:15 – 11:00	8:15 – 11:00

*Tabella 6 - Orari di funzionamento UTA Uffici Nord-Est*

Per quanto riguarda la Temperatura di Set point è stata modificata come segue:

- Stagione 22/23, Tsp fissa a 21.5 °C.
- Stagione 23/24 preregolazione: Tsp, durante le ore di funzionamento, fissata a 20.5 °C.
- Stagione 23/24 post regolazione: si effettua una regolazione più fine della temperatura di set point con l'obiettivo di ridurre ulteriormente i consumi, come mostrato in seguito.

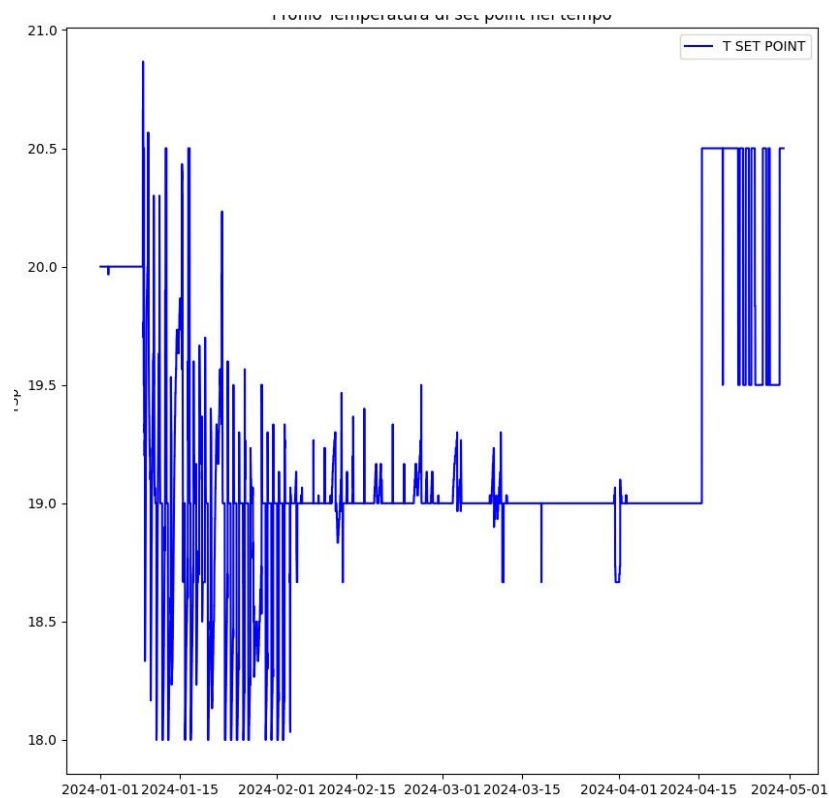


Figura 18 - profilo nel tempo della Tsp, UTA Uffici Nord-Est.

Come dimostra il grafico, a parte un primo periodo a inizio Gennaio in cui la temperatura di Set point è rimasta settata sopra i 20 °C, la regolazione comporta un'importante riduzione di quest'ultima.

### 3. Metodologia per la caratterizzazione energetica delle UTA

Per la caratterizzazione energetica delle varie UTA, realizzata completamente su Python, sono stati seguiti vari passaggi comuni per tutte le UTA, altri invece che si differenziano in base alla strategia di regolazione utilizzata.

Le fasi iniziali di ricezione e pulizia dei dati di monitoraggio, entrambi essenziali per garantire che i dati siano accurati, rilevanti e utilizzabili per l'analisi, sono uguali per tutte le UTA; quelle successive di caratterizzazione energetica, invece, si differenziano in funzione dei dati che si hanno a disposizione, come vedremo in questo capitolo.

#### 3.1 Dati di Input

Il primo passaggio consiste nel prendere in esame tutti i dati di input fondamentali per la caratterizzazione delle UTA. I dati di monitoraggio vengono raccolti da vari sensori e strumenti di misurazione installati nell'impianto, come sonde di temperatura, sensori di CO<sub>2</sub>, contatori di energia, e altri dispositivi.

I dati sono raccolti in tempo reale, a intervalli regolari con frequenza quart'oraria grazie sistema di gestione dei dati chiamata Grafana che, attraverso dei sensori presenti nelle UTA stesse, permette di controllare la variazione delle variabili termodinamiche con frequenza quart'oraria e di scaricarle tramite csv.

Le variabili prese in considerazione per le analisi svolte sono:

- Temperatura e umidità relativa dell'aria di mandata e dell'aria esterna.
- Temperatura di setpoint della zona termica considerata.
- Temperatura di ripresa.
- Consumo elettrico dei ventilatori di mandata.
- % Modulazione dell'inverter del ventilatore di mandata (solo per le UTA in cui è presente questo dato, ossia per quelle che gestiscono gli uffici).

Inoltre devono essere noti la potenza elettrica nominale dei motori dei ventilatori di mandata, e la portata d'aria nominale sempre riguardante la mandata, dati di targa dei ventilatori reperibili nella Relazione Tecnica impianti, riportati nel capitolo precedente.

Il periodo di rilevazione va dal 01/01/2023 al 30/04/2024, con l'esclusione di Dicembre 2023, considerato un mese di test. Per l'UTA uffici Nord-ovest sono stati presi in considerazione anche i mesi invernali del 2022 (Ottobre, Novembre e Dicembre) per ottenere un'analisi migliore.

#### 3.2 Data Pre-Processing

Dopo la raccolta, i dati di monitoraggio grezzi subiscono un pre-processamento fondamentale per le analisi successive, ossia vengono ricontrollati e ripuliti per rimuovere errori, outliers e valori mancanti.

In particolare, il data pre-processing è stato strutturato in 3 fasi:

- **Uniformazione Temporale:** Questa fase riguarda la verifica e l'adeguamento della frequenza temporale dei dati, assicurando che tutte le serie temporali siano allineate e consistenti, facilitando così l'analisi successiva.
- **Gestione dei Valori Mancanti (Not a Number - NaN):** In questa fase, i valori mancanti o segnalati come NaN vengono identificati e gestiti. Ciò può includere la rimozione di questi valori o l'utilizzo di tecniche di interpolazione per riempire le lacune nei dati.
- **Rilevamento e Gestione degli Outliers:** Questa fase si concentra sull'identificazione di valori anomali o outliers che possono distorcere l'analisi dei dati.

### 3.2.1 Uniformazione delle frequenze di rilevazione

Una prima analisi svolta riguarda la frequenza temporale dei dati di input, in particolare rendere uniforme la frequenza di rilevazione di tutti i dati di monitoraggio di interesse, per assicurarsi che tutte le serie temporali dei diversi sensori siano allineate a un intervallo di tempo comune.

L'analisi è stata svolta nelle seguenti fasi:

- **Conversione delle Colonne Temporali in Tipo datetime con Fuso Orario UTC:** Prima di tutto, sono state convertite le colonne che rappresentano i timestamp in oggetti di tipo datetime specificando il fuso orario come UTC. Questo passaggio è cruciale perché i dati provenienti da sensori diversi potrebbero avere formati di data/ora diversi e potrebbero essere registrati in fusi orari differenti. La conversione a un formato datetime standard con fuso orario UTC garantisce la coerenza temporale.
- **Impostazione delle Colonne Temporali come Indici:** Dopo la conversione, sono state impostate le colonne temporali come indice dei DataFrame. Questo è importante per operazioni successive, come il resampling, che richiedono un indice temporale coerente.
- **Combinazione dei DataFrame con Frequenza Temporale Comune:** infine sono stati uniti i diversi DataFrame dei sensori in un unico DataFrame basato sul tempo comune, prendendo in considerazione solo le variabili di interesse. Questo è stato fatto grazie alla funzione merge di Pandas che viene utilizzata per allineare i dati sullo stesso indice temporale.

Il risultato di queste operazioni è un unico DataFrame che contiene le colonne selezionate (ognuna inerente ad una variabile di interesse), tutte con un indice temporale coerente. Questo DataFrame consolidato rende possibile l'analisi e il confronto dei dati da diversi sensori su una base temporale uniforme.

### 3.2.2 Gestione dei Valori Mancanti (Not a Number-NaN)

Per quanto riguarda la gestione dei valori mancanti vengono individuati e rimossi le misurazioni che contengono valori NaN (Not a Number) attraverso varie fasi che permettono di eliminare i gruppi consecutivi di NaN di almeno 16 elementi (4 ore), seguendo questo procedimento:

- Creazione di una nuova variabile TF che è un DataFrame di valori booleani (True o False). Ogni cella in TF sarà True se il corrispondente valore in df è NaN, altrimenti sarà False.
- Calcolo della differenza tra una riga e la precedente, in maniera tale da restituire True quando c'è una variazione rispetto alla riga precedente (cioè, quando un NaN inizia o termina). Successivamente si calcola la somma cumulativa, che permette di assegnare un numero univoco a ciascun gruppo consecutivo di valori True o False. Questo numero servirà per raggruppare le righe consecutive di NaN.
- Verifica se la lunghezza del gruppo è di almeno 16 (4 ore) e se il gruppo è costituito da NaN. Se entrambe le condizioni sono soddisfatte allora il gruppo sarà eliminato dal Dataframe originale.

I gruppi di NaN più piccoli vengono riempiti tramite interpolazione lineare, il che è utile per mantenere la continuità nei dati senza introdurre grandi distorsioni.

### 3.2.3 Identificazione degli outliers: Metodo del Range Interquartile

L'individuazione degli outlier è un passaggio cruciale nell'analisi dei dati, specialmente quando si tratta di dati di monitoraggio in contesti come la gestione energetica. Gli outlier, o valori anomali, sono dati che si discostano significativamente dalla maggior parte degli altri valori nel dataset. La loro presenza può avere un impatto considerevole sull'analisi e sulla modellazione dei dati per diverse ragioni, possono influenzare negativamente le misure statistiche come la media e la deviazione standard, rendendo meno rappresentativi i risultati o nel caso in esame l'inclusione di outlier può portare a stime inaccurate dell'energia consumata o risparmiata, compromettendo l'efficacia delle strategie di regolazione proposte.

Rimuovendo o correggendo gli outlier, si può ottenere un dataset più pulito e rappresentativo, che riflette meglio le condizioni normali di funzionamento del sistema. Questo è particolarmente importante quando si cerca di modellare il comportamento energetico di un sistema, poiché un dataset più accurato porterà a una migliore comprensione delle dinamiche energetiche e a previsioni più precise dei consumi.[1]

Per il rilevamento dei valori anomali è stato utilizzato il metodo del **Range Interquartile (IQR)**, una tecnica statistica utilizzata per identificare e gestire gli outlier.

Il Range Interquartile è la differenza tra il terzo quartile (Q3) e il primo quartile (Q1) di un dataset. I quartili sono valori che dividono il dataset in quattro parti uguali:

- **Q1 (Primo Quartile):** è il valore sotto il quale cade il 25% dei dati. Questo rappresenta il 25° percentile.
- **Q3 (Terzo Quartile):** è il valore sotto il quale cade il 75% dei dati. Questo rappresenta il 75° percentile.

Il IQR viene calcolato come:

$$IQR = Q_3 - Q_1 \quad (1)$$

Una volta calcolato il IQR, si possono identificare gli outlier utilizzando una semplice formula. I valori al di fuori dell'intervallo che va dal limite inferiore al limite superiore sono considerati outlier:

- **Limite inferiore:**  $Q_1 - 1.5 \cdot IQR$  (2)

- **Limite superiore:**  $Q_3 + 1.5 \cdot IQR$  (3)

Per visualizzare gli outlier trovati nel dataframe è stata utilizzata la metodologia dei boxplot. L'uso di boxplot per visualizzare gli outlier è una pratica comune ed efficace in quanto forniscono una rappresentazione grafica del range interquartile e dei valori al di fuori di questo range, rendendo facile l'identificazione visiva degli outlier.

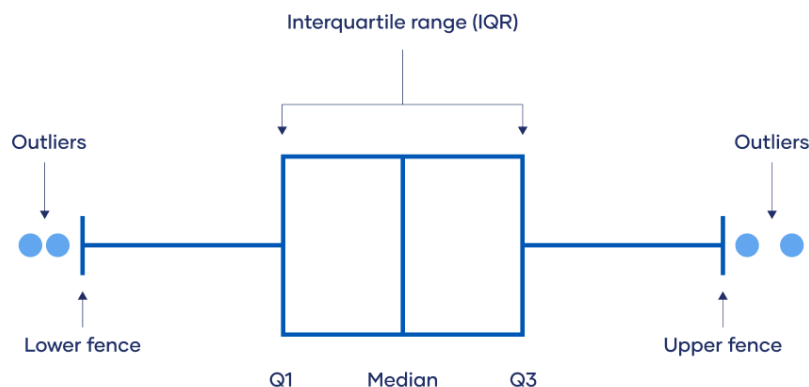


Figura 19 - Boxplot: metodo di rappresentazione degli outlier

Un boxplot è costituito da diverse componenti chiave che rappresentano specifiche caratteristiche della distribuzione dei dati:

1. **Scatola (Box):** La parte centrale del boxplot, che rappresenta il range interquartile (IQR) del dataset. La parte inferiore della scatola corrisponde al primo quartile (Q1), mentre la parte superiore corrisponde al terzo quartile (Q3). Il IQR è quindi la differenza tra Q3 e Q1.

2. **Linea Mediana (Mediana o Median Line):** All'interno della scatola, una linea orizzontale indica la mediana (Q2), ovvero il valore centrale del dataset, che divide il dataset in due parti uguali.
3. **Baffi (Whiskers):** I baffi si estendono dalle estremità della scatola fino al valore più piccolo e più grande del dataset che non sono considerati outlier, rappresentano quindi i limiti citati precedentemente.

I punti che si trovano al di fuori dei baffi sono considerati outlier e sono solitamente rappresentati come punti o cerchi isolati. Questi valori sono considerati anomali rispetto al resto del dataset e sostituiti tramite interpolazione lineare tra il valore recedente e quello successivo.

### 3.3 Calcolo dei Consumi Termici delle UTA

Dopo la pulizia dei dati di input, essi vengono uniti in dataframe in modo da avere tutte le variabili termodinamiche di interesse insieme e poter lavorare sullo stesso df, per questa motivazione ne sono stati creati 2, uno per il periodo prerogolazione, e uno per il periodo post.

L'obiettivo successivo è stato calcolare la potenza termica per ogni quarto d'ora di funzionamento:

$$P_{Th} = \dot{m}_{reale} \cdot \Delta h \quad (4)$$

con:

- $P_{Th}$  potenza termica quart'oraria
- $\dot{m}_{reale}$  portata in massa [kg/s]
- $\Delta h$  differenza di entalpia,  $h_{out} - h_{in}$  [kJ/kg]

Una volta calcolata la potenza termica quart'oraria, è stata ricavata l'energia termica giornaliera consumata:

$$En_{Th,Giorn} = \sum_i \frac{P_{Th}}{4} \quad (5)$$

- $i$  = giorno da considerare

La potenza termica calcolata è stata divisa per 4 per ottenere l'energia termica in kWh, in quanto essa è una potenza quart'oraria.

#### 3.3.1 Calcolo del Delta h

La differenza di entalpia è stata calcolata utilizzando la libreria Python "CoolProp.HumidAirProp". Grazie alla funzione "HAPropsSI", fornendo in input due variabili termodinamiche note, come la temperatura e l'umidità relativa, si ottiene in output l'entalpia desiderata. Questa metodologia è stata applicata per tutte le Unità di Trattamento Aria (UTA).

Il calcolo dell'entalpia è stato effettuato solo per le misurazioni in cui è presente un valore di consumo elettrico, quindi solo quando l'UTA è in funzione. Una volta ottenuto il valore di



entalpia, prima di calcolare la differenza di entalpia ( $\Delta h$ ) è stato analizzato il Diagramma di Mollier come segue:

- Il diagramma è stato diviso in due zone, prendendo come riferimento il punto termodinamico dell'aria esterna (AE), come mostrato dalla linea rossa tratteggiata nella figura sottostante. Se il punto che rappresenta l'aria di mandata si trova al di sopra di questa linea (cioè ha una temperatura maggiore), viene classificato come riscaldamento. Se si trova al di sotto, si tratta di raffreddamento.
- A partire dal punto AE, è stata tracciata una linea verticale che identifica il titolo del punto stesso.

Questa modalità è stata pensata non tanto per il comportamento invernale, in quanto il delta h è stato calcolato sempre come differenza tra entalpia dell'aria di mandata e aria esterna, quanto per il comportamento estivo per distinguere i casi di semplice raffreddamento, in cui entra in funzione solo la batteria di raffreddamento, e raffreddamento+postriscaldamento, in cui nella trasformazione entrano in gioco sia la batteria di raffreddamento che quella di post riscaldamento.

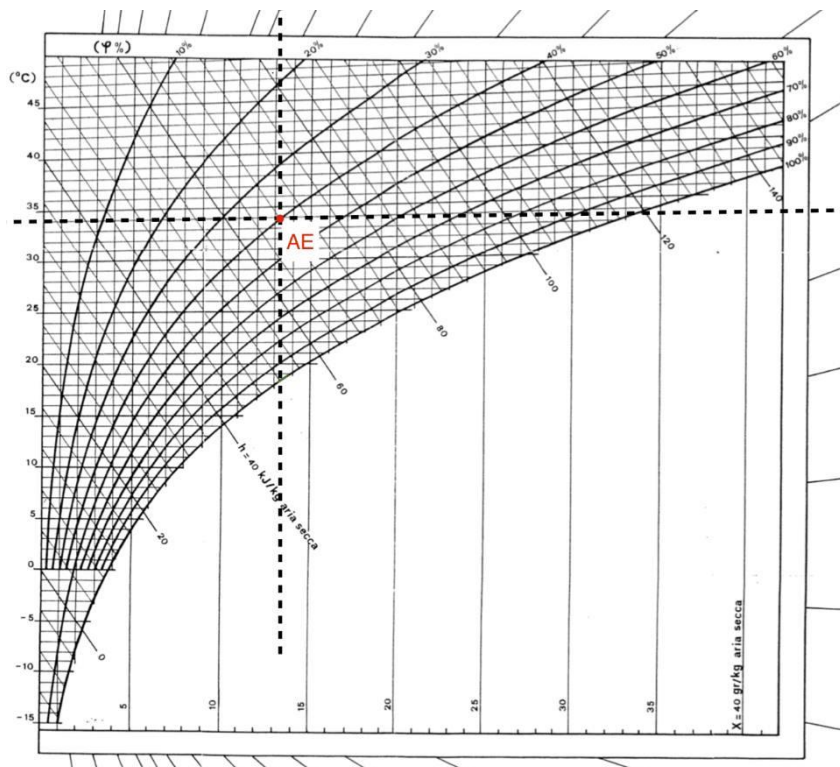


Figura 20 - Diagramma di Mollier

Con questa suddivisione, si identificano quattro quadranti che indicano diverse trasformazioni in base alla posizione del punto che rappresenta l'aria di mandata:

- **Primi due quadranti (1-2):** Qui si verifica un riscaldamento. Le condizioni necessarie affinché un punto che si trova in questo quadrante venga classificato come riscaldamento sono:
  - $T_{AE} < T_{SP}$ , altrimenti il riscaldamento sarebbe inutile;
  - $h_{MAN} - h_{AE} > 0$ , differenza di entalpia sia maggiore di 0.
- **Terzo quadrante:** Se la temperatura di mandata è inferiore a quella dell'aria esterna e il titolo dell'aria di mandata è maggiore di quello dell'aria esterna, si considerano trasformazioni ideali di raffrescamento con post-riscaldamento. La differenza di entalpia per il calcolo dei consumi termici di raffrescamento è  $h_R - h_{AE}$ , dove R è il punto che ha lo stesso titolo di AE e un'umidità relativa  $\varphi = 95\%$ .  
Le condizioni necessarie affinché un punto che si trova in questo quadrante venga classificato come raffrescamento sono:
  - $T_{AE} > T_{SP}$ , altrimenti il raffrescamento sarebbe inutile;
  - $h_{MAN} - h_{AE} < 0$ , differenza di entalpia sia minore di 0.
- **Quarto quadrante:** Questo rappresenta una semplice trasformazione di raffrescamento, con condizioni necessarie uguali a quelle del terzo quadrante.

Dopo aver calcolato le differenze di entalpia, sono stati creati due DataFrame distinti in base al comportamento invernale o estivo identificato con il metodo descritto. Ciò permette di condurre analisi individuali e specifiche per ogni scenario.

### 3.3.2 Calcolo della portata

Il calcolo della portata d'aria differisce tra le varie UTA a causa della disponibilità di alcuni dati di monitoraggio del ventilatore di mandata, disponibili solo per le UTA dedicate agli uffici. Pertanto, distinguiamo due casi:

- UTA Uffici Nord-Est e UTA Uffici Nord-Ovest: Per queste UTA, è disponibile la percentuale di modulazione dell'inverter del ventilatore di mandata. La portata d'aria reale si ottiene moltiplicando questa percentuale per la portata nominale:

$$\dot{m}_{REALE} = \dot{m}_{NOMINALE} \cdot \%_{MODULAZIONE} \quad (6)$$

- UTA Auditorium: Per l'UTA dell'Auditorium, la portata d'aria è stata calcolata a partire dalla potenza elettrica assorbita dal ventilatore di mandata. La relazione utilizzata per il calcolo è basata sull'equazione che lega potenza, portata e pressione statica:

$$P = \frac{Q \cdot p}{\eta} \quad (7)$$

Con:

- P potenza assorbita del ventilatore (in kW),
- Q è la portata (in m<sup>3</sup>/s),

- $p$  è la pressione statica (in Pa),
- $\eta$  elettrico è il rendimento.

Per semplificare il calcolo e tenendo conto dell'obiettivo del modello, è stato considerato il valore di potenza nominale indicato sui dati di targa, senza includere la curva caratteristica del ventilatore.

Conoscendo il modello in condizioni di progetto, per il quale sono noti sia la potenza che la portata, e assumendo una similitudine fluidodinamica con il modello reale, è stata utilizzata la seguente relazione:

$$\frac{P^*}{P} = \left(\frac{Q^*}{Q}\right)^3 \quad (8)$$

Dove:

- $P^*$  è la potenza nominale di mandata,
- $P$  è la potenza effettiva, di mandata,
- $Q^*$  è la portata nominale di mandata,
- $Q$  è la portata effettiva di mandata.

La potenza reale ( $P$ ) è stata calcolata a partire dal consumo giornaliero in kWh e dalle ore di funzionamento:

$$P_{REALE} = \frac{\text{Consumo giornaliero [kWh]}}{h \text{ funzionamento}} \quad (9)$$

La variabile appena calcolata rappresenta la potenza complessiva dei ventilatori, sia di mandata che di ripresa. Ipotizzando che il rapporto tra le potenze rimanga costante, è possibile determinare la potenza reale del ventilatore di mandata:

	Ventilatore di mandata	Ventilatore di ripresa	Totale
<b>Potenza nominale [kW]</b>	5.5	2.73	8.23
<b>Valore Percentuale</b>	66.8 %	33.2 %	100%

*Tabella 7 - Ripartizione percentuale della potenza nominale dell'UTA Auditorium*

La potenza elettrica reale assorbita dal ventilatore di mandata viene quindi calcolata come segue:

$$P = P_{REALE,TOT} \cdot 0.668 \quad (10)$$

Conoscendo tutte le altre variabili, è possibile ricavare la portata d'aria di mandata reale:

$$Q = Q^* \cdot \sqrt[3]{\frac{P}{P^*}} \quad (11)$$

La portata è stata calcolata a partire dai consumi giornalieri, utilizzando una portata media, senza considerare le variazioni quartorali, in quanto i sistemi di controllo spesso si basano su medie temporali per valutare l'efficienza energetica, senza necessariamente prendere in considerazione le variazioni a breve termine.[11]

Inoltre, un altro studio ha analizzato l'influenza della portata d'aria sul rendimento dei sistemi di condizionamento, evidenziando l'importanza di individuare una portata ottimale. Lo studio sottolinea che, pur essendo importante la regolazione della portata, le valutazioni sono spesso fatte a livello medio piuttosto che in intervalli di tempo molto brevi.

Queste ricerche supportano la semplificazione adottata, giustificando l'utilizzo di una portata media giornaliera come rappresentazione adeguata per le analisi del sistema, senza focalizzarsi sulle variazioni di breve termine.[12]

### 3.4 Firma Energetica

L'analisi dei consumi energetici è stata approfondita tramite la costruzione della firma energetica, un metodo grafico che rappresenta la relazione tra il consumo di energia termica giornaliera e la temperatura esterna media giornaliera. Questo approccio, noto anche come curva di firma energetica, è utilizzato per monitorare e analizzare i consumi energetici di edifici o sistemi, identificando le variabili principali che influenzano tali consumi, denominate energy drivers. Tra i principali energy drivers esistenti, oltre alla temperatura esterna, si annoverano la produzione, i giorni lavorativi e le ore di luce o di buio.

Il diagramma della firma energetica include tre componenti principali:

- **Intercetta:** rappresenta l'energia necessaria quando il sistema opera in una situazione in cui l'energy driver considerato è nullo. Questo valore indica un consumo fisso di energia. Include, perciò, consumi non legati ai gradi giorno, come acqua calda sanitaria o calore di processo
- **Pendenza:** indica la quantità di energia necessaria per sopperire ad un aumento dell'energy driver considerato, può essere utilizzata dunque per stimare l'efficienza del sistema.
- **Dispersione dei punti:** mostra la variabilità della quantità di energia necessaria per un certo valore dell'energy driver, influenzata da fattori operativi[33]

La retta di interpolazione della firma energetica può essere descritta dall'equazione:

$$C = C_0 + c_1 \cdot X \quad (12)$$

Dove:

- $C_0$  è l'intercetta,
- $c_1$  è la pendenza
- $X$  rappresenta la variabile indipendente, come la temperatura esterna media giornaliera.

Tipicamente, i consumi di energia termica in relazione a una variabile climatica mostrano quattro andamenti caratteristici.

1)

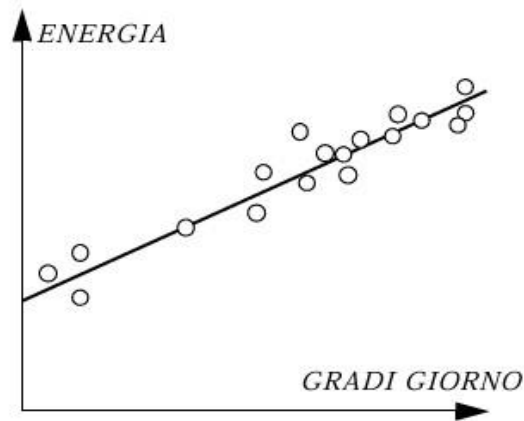


Figura 21 - Andamento tipico firma energetica I

In questo caso l'intercetta mette in evidenza un consumo non legato alla variabile indipendente considerata, nel caso della temperatura esterna i consumi possono essere legati ad acqua sanitaria, calore di processo, guasti, ecc.

L'equazione (12) descrive l'andamento della retta di interpolazione

2)

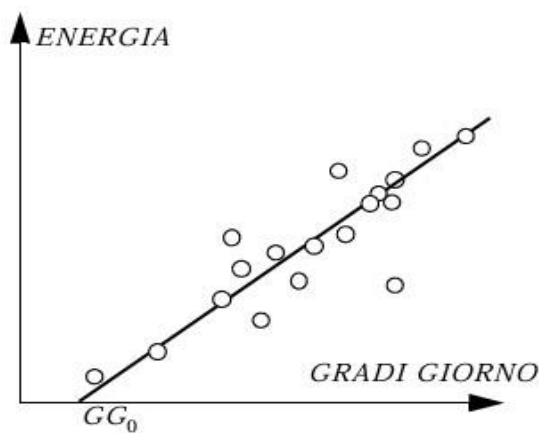


Figura 22 - Andamento tipico firma energetica II

Ciò può essere interpretato come indicazione che l'energia non è richiesta finché la temperatura esterna scende al di sotto di un certo livello di gradi giorno.

Una situazione del genere può indicare che l'edificio è mantenuto a una temperatura interna inferiore a quella di riferimento per il calcolo dei gradi giorno, oppure che riceve calore da altre fonti, come il calore di processo. Entrambi i casi sono molto comuni e sono rappresentati dalle seguenti espressioni:

$$\begin{cases} C = 0 & \text{se } GG < GG_0 \\ C = C_0 + c_1 \cdot GG & \text{se } GG > GG_0 \end{cases} \quad (13)$$

3)

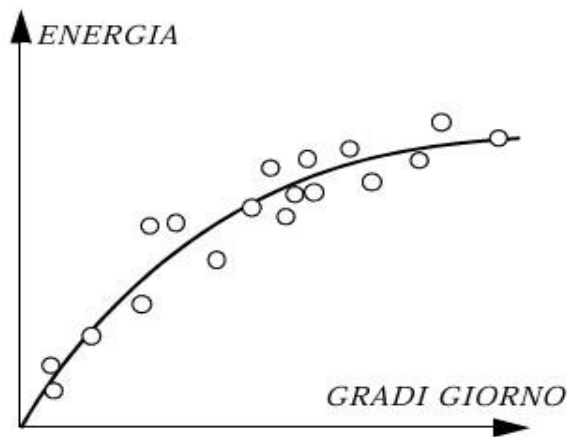


Figura 23 - Andamento tipico firma energetica III

In questo caso, la relazione tra energia e gradi giorno è curva e si appiattisce ai valori più elevati dei gradi giorno. Nel punto in cui la linea diventa orizzontale il sistema di riscaldamento ha raggiunto il suo limite di capacità e non può accettare ulteriore combustibile nonostante la diminuzione della temperatura esterna.

4)

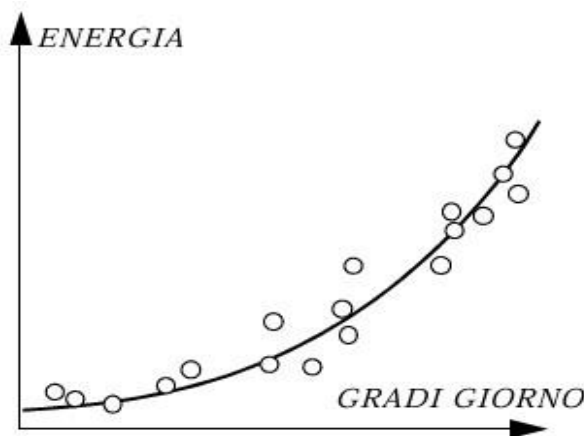


Figura 24 - Andamento tipico firma energetica IV

In questo caso l'energia è bene interpolata dalla equazione:

$$C = C_0 + c_1 \cdot X^2 \quad (14)$$

In questi casi la relazione è rappresentata da una parabola, con un andamento che si appiattisce a temperature più elevate.

Questo andamento è caratteristico di edifici con elevata stratificazione termica, ovvero che presentano un gradiente termico tra soffitto e pavimento elevato (alcuni gradi).

La pendenza della curva di firma energetica è influenzata dalle perdite di calore dell'edificio, incluse dispersioni attraverso le pareti e ricambi d'aria, sia naturali che forzati. La posizione dell'intercetta, a parità di pendenza, può variare a seconda di due fattori principali:

- La presenza di fonti di calore interne, come macchine e impianti, può ridurre la necessità di energia termica esterna. Un maggiore apporto di calore interno abbassa il valore dell'intercetta, traducendosi in una traslazione verso il basso della retta di interpolazione.
- Se il sistema di riscaldamento non è ottimizzato per mantenere le temperature interne ai livelli desiderati (generalmente 18 °C durante i turni lavorativi e 15 °C durante i turni non lavorativi), il coefficiente fisso può variare. Una gestione meno efficiente delle temperature interne può aumentare il valore dell'intercetta, mentre una gestione mirata può ridurlo.

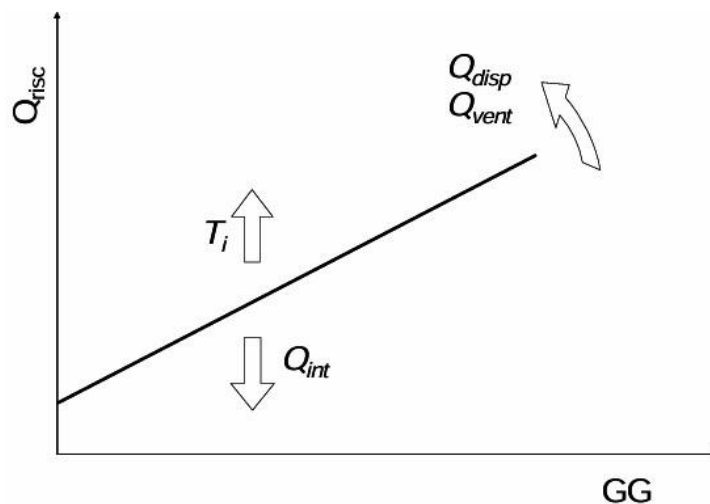


Figura 25 - Grandezze termodinamiche che influenzano la firma energetica

In conclusione, l'analisi della firma energetica fornisce una panoramica dettagliata e preziosa per la gestione e l'ottimizzazione dei consumi energetici di un edificio. Comprendere questi elementi permette di sviluppare strategie più efficaci per il risparmio energetico e l'efficienza, contribuendo così alla sostenibilità e alla riduzione dei costi operativi.[33]

### 3.4.1 Criteri di Valutazione della Firma Energetica

La valutazione della bontà di una firma energetica individuata si basa su diversi parametri statistici e metodologici che permettono di quantificare quanto accuratamente la firma rappresenta la relazione tra il consumo energetico e le variabili indipendenti, come la temperatura esterna. Questi parametri sono fondamentali per garantire che la firma energetica sia un modello affidabile per il monitoraggio dei consumi, la diagnosi energetica, e l'identificazione di potenziali risparmi energetici. Ecco i principali parametri utilizzati:

- **Coefficiente di Determinazione ( $R^2$ ):** misura la proporzione della varianza nel consumo energetico che è spiegata dalla variabile indipendente, come la temperatura esterna. Un valore di  $R^2$  vicino a 1 indica che una grande parte della variazione dei consumi energetici è spiegata dal modello di firma energetica, suggerendo una buona aderenza del modello ai dati. Un valore vicino a 0 indica invece una scarsa correlazione. Esso è uno dei parametri più comunemente usati per valutare la bontà di una firma energetica, inoltre è fondamentale per confermare la validità del modello utilizzato nella stima dei consumi energetici.[33]
- **Errore Quadratico Medio (Mean Squared Error - MSE):** misura la media dei quadrati delle differenze tra i valori osservati e quelli previsti dal modello. Un MSE basso indica che i valori previsti dalla firma energetica sono vicini ai valori effettivi, suggerendo un modello accurato, esso è utile in particolare per identificare l'accuratezza del modello nel predire i consumi energetici.
- **Errore Assoluto Medio (Mean Absolute Error - MAE):** è la media delle differenze assolute tra i valori osservati e quelli previsti. Come l'MSE, un MAE più basso indica una maggiore accuratezza del modello. Tuttavia, a differenza dell'MSE, il MAE non enfatizza gli errori maggiori, fornendo una misura più intuitiva delle discrepanze tra valori osservati e previsti.
- **Coefficiente di Correlazione ( $r$ ):** misura la forza e la direzione della relazione lineare tra due variabili. Un valore di  $r$  vicino a 1 o -1 indica una forte relazione lineare, positiva o negativa, tra il consumo energetico e la variabile indipendente (come la temperatura esterna). Un valore vicino a 0 indica una relazione debole o inesistente.

### 3.4.2 Confronto tra firme energetiche

Utile per la trattazione e per comprendere le analisi effettuate, comprendere quali sono i parametri fondamentali sui quali basare il confronto delle firme energetiche.

Quando si confrontano le firme energetiche di più edifici, o dello stesso edificio in periodi diversi si possono osservare vari parametri per capire le differenze in termini di efficienza energetica:

1. **Pendio della curva:** Indica quanto rapidamente aumenta il consumo energetico con il cambiamento della temperatura esterna. Un pendio più ripido indica una maggiore



sensibilità al clima, segno di inefficienza, mentre un pendio più dolce suggerisce un sistema più efficiente.

2. **Consumo di base:** Un consumo di base elevato può indicare un eccessivo utilizzo di energia per sistemi non legati alla climatizzazione, come illuminazione o apparecchiature elettriche.
3. **Spostamento della curva:** Il confronto delle curve in periodi diversi o tra edifici permette di verificare se ci sono stati miglioramenti nella gestione dell'energia o se ci sono edifici che funzionano in modo più efficiente rispetto ad altri.
4. **Area sotto la curva:** L'area rappresenta il consumo energetico totale. Minore è quest'area, maggiore sarà l'efficienza energetica del sistema.

### 3.5 Energy Performance Indicators

L'**Energy Performance Indicator (EPI)** è un componente fondamentale del programma ENERGY STAR, un'iniziativa che, iniziata come un programma di riconoscimento per prodotti ad alta efficienza energetica, si è evoluta in un sistema complesso di gestione dell'energia per le aziende. L'EPI gioca un ruolo cruciale nell'ambito della gestione energetica, fornendo alle aziende industriali uno strumento statistico avanzato per la valutazione e il miglioramento dell'efficienza energetica. L'EPI è progettato per fungere da benchmark statistico che valuta l'efficienza energetica di un impianto industriale. La sua funzione principale è quella di fornire una panoramica dettagliata delle prestazioni energetiche dell'impianto confrontandole con quelle di impianti simili all'interno del settore. L'indicatore è basato su una relazione funzionale tra l'uso di energia e una serie di variabili, quali le attività produttive, la qualità dei materiali in ingresso, e fattori esterni come le condizioni climatiche.[13]

Questa metodologia consente di:

1. **Confrontare le Prestazioni Energetiche:** L'EPI permette alle aziende di confrontare le proprie performance energetiche con quelle di impianti analoghi, facilitando una comprensione approfondita di dove si collocano nel panorama del settore.
2. **Identificare Opportunità di Miglioramento:** Attraverso il confronto con i migliori livelli di efficienza del settore, le aziende possono identificare aree specifiche dove è possibile migliorare e ottimizzare l'uso dell'energia.
3. **Valutare la Distanza dal Miglior Livello di Efficienza:** L'EPI aiuta a determinare quanto un impianto si discosti dal livello ottimale di efficienza energetica, fornendo indicazioni chiare su quanto è necessario per raggiungere le migliori prestazioni possibili.

Nel contesto del caso studio considerato, l'EPI è espresso come kWh/Giorni-Giorno (kWh/GG), un indicatore che permette di effettuare un benchmarking interno tra diverse stagioni di riscaldamento, normalizzate rispetto alla temperatura esterna. Questa specifica formulazione dell'EPI consente di:

- **Normalizzare i Dati:** Utilizzando i gradi giorno per normalizzare i dati, è possibile ottenere una misura più accurata del consumo energetico in relazione alle condizioni climatiche, eliminando l'impatto delle variazioni stagionali sulla comparazione.
- **Effettuare Confronti Stagionali:** La normalizzazione rispetto alla temperatura esterna permette di confrontare le prestazioni energetiche tra stagioni di riscaldamento diverse, offrendo un'analisi più equa e rappresentativa delle variazioni nella gestione dell'energia.

### 3.5.1 Definizione dei Gradi Giorno

I **gradi giorno** (abbreviati come **GG**) sono un'unità di misura fondamentale utilizzata per stimare la domanda energetica di un edificio per riscaldamento o raffreddamento, sulla base della differenza tra la temperatura interna desiderata e la temperatura esterna effettiva. Essi rappresentano la somma delle differenze giornaliere tra la temperatura media esterna e una temperatura di riferimento o base, sopra o sotto la quale è necessario riscaldare o raffreddare.[8]

I gradi giorno sono suddivisi in due categorie principali:

1. **Gradi Giorno di Riscaldamento (Heating Degree Days - HDD):** Si calcolano quando la temperatura esterna è inferiore alla temperatura di riferimento.

Per ogni giorno in cui la temperatura media giornaliera è inferiore alla temperatura base, la formula utilizzata è la seguente:

$$HDD_{GIORN} = \max(T_B - T_{MEDIAGIORN}; 0) \quad (15)$$

2. **Gradi Giorno di Raffreddamento (Cooling Degree Days - CDD):** Si calcolano quando la temperatura esterna supera la temperatura di riferimento.

Quando la temperatura media giornaliera è superiore alla temperatura base:

$$CDD_{GIORN} = \max(T_{MEDIAGIORN} - T_B; 0) \quad (16)$$

Nell'EPI proposto si è interessati ai Gradi Giorno giornalieri, il cui calcolo si basa sulla differenza tra la temperatura media giornaliera e una temperatura base predefinita,  $T_B = 20^\circ C$ .

Il calcolo dei gradi giorno è essenziale per una serie di applicazioni pratiche nella gestione dell'energia:

- **Stima della Domanda Energetica:** I gradi giorno forniscono una stima utile della domanda energetica per riscaldamento e raffreddamento, facilitando la pianificazione e il dimensionamento dei sistemi HVAC (Heating, Ventilation, and Air Conditioning)[16]
- **Benchmarking Energetico:** L'uso dei gradi giorno permette di normalizzare i consumi energetici rispetto alle condizioni climatiche, migliorando la precisione delle analisi di benchmarking e delle comparazioni tra edifici.[17]

- **Analisi Stagionale:** La contabilizzazione dei gradi giorno consente di confrontare le performance energetiche tra diverse stagioni e di identificare tendenze e opportunità di risparmio energetico.[18]

## 4. Analisi dei Risultati

In questo capitolo sono state analizzate le firme energetiche ricavate per le varie Unità di Trattamento Aria (UTA). Per ciascuna UTA, è stata sviluppata una firma energetica classica che mette in relazione l'energia termica consumata con la temperatura esterna media giornaliera. Questo approccio permette di individuare graficamente la baseline di consumo nei differenti periodi considerati, fornendo un riferimento essenziale per il monitoraggio e la gestione del consumo energetico degli edifici.

Per valutare l'effettivo miglioramento dell'efficienza della regolazione, oltre alla firma energetica tradizionale, è stata introdotta una nuova firma che mette in relazione la temperatura esterna media giornaliera con il consumo specifico. Quest'ultimo è stato calcolato come:

$$\text{Consumo Specifico} = \frac{\text{En Termica [kWh]}}{h \text{ funzionamento}} \quad (17)$$

Questo approccio permette di isolare il consumo energetico dalle differenti condizioni al contorno, offrendo una visione più chiara dell'efficienza effettiva del sistema di regolazione. La scelta di analizzare il consumo specifico trova riscontro nella letteratura, in cui viene evidenziata la necessità di metriche normalizzate che permettano di confrontare periodi con condizioni operative differenti.

Infine, per valutare i risparmi ottenuti grazie alle regolazioni implementate, è stato effettuato un confronto tra il consumo energetico totale nei medesimi mesi di due anni differenti. Inoltre, sono stati confrontati i Key Performance Indicators (KPI) ricavati per i due periodi, che rappresentano strumenti cruciali per misurare l'efficacia degli interventi di efficientamento energetico. L'uso di KPI energetici consente di quantificare l'impatto delle strategie di ottimizzazione, fornendo dati comparativi che sono indipendenti dalle variazioni climatiche esterne[15], offrendo una valutazione più precisa dell'efficienza delle regolazioni effettuate ed evidenziando i risparmi energetici effettivi ottenuti.

Le firme energetiche sono state ricavate per tutte le Unità di Trattamento Aria analizzate, sia per il comportamento invernale che estivo, il confronto invece è stato effettuato solo per il periodo di riscaldamento in quanto durante il periodo di collaborazione con Eurix, non erano disponibili i dati della stagione di raffrescamento post regolazione.

### 4.1 Firma Energetica – Riscaldamento UTA Auditorium

Per il comportamento invernale dell'UTA Auditorium, sono state elaborate due firme energetiche in funzione del periodo preso in considerazione:

- **Periodo 1:** dal 1° gennaio 2023 al 30 novembre 2023, che rappresenta la fase precedente alla regolazione implementata da Eurix.
- **Periodo 2:** dal 1° gennaio 2024 al 30 aprile 2024, durante il quale l'UTA è gestita da Eurix.

Si deve notare che il confronto diretto tra i due periodi non è possibile per il mese di aprile, a causa di una mancanza di dati nel 2023 dal 29 marzo al 14 aprile. Questa lacuna nei dati impedisce un'analisi completa del comportamento dell'impianto in quei giorni. In ogni firma energetica, ogni punto rappresenta il consumo energetico giornaliero, con la scala cromatica che indica le ore di funzionamento dell'UTA. I punti in giallo corrispondono ai giorni in cui l'UTA ha funzionato per 16 ore. Man mano che il colore vira verso il blu, il numero di ore di funzionamento diminuisce, fornendo un'ulteriore dimensione di analisi legata al consumo energetico.

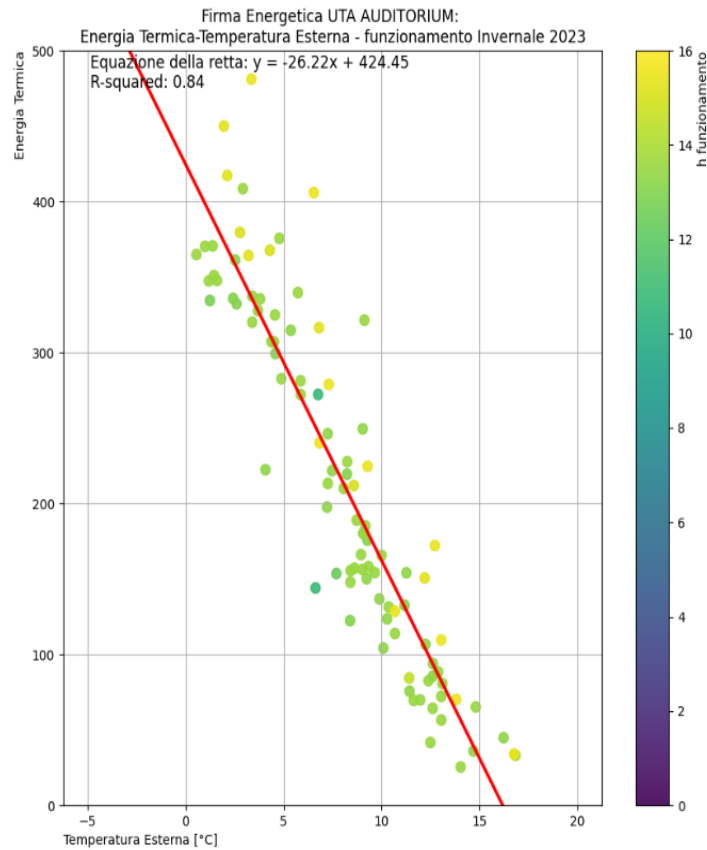


Figura 26 - Firma Energetica UTA Auditorium preregolazione I. [En Th-Te]

La firma energetica relativa al periodo preregolazione è rappresentata dalla seguente equazione di regressione lineare:

$$En_{th} = -26.22 \cdot T_{EXT,media\ giorn} + 424.45 \quad (18)$$

Il coefficiente di determinazione (**R<sup>2</sup>**): associato a questa firma è pari a 0.84. Questo valore indica che l'84% della variabilità del consumo energetico giornaliero può essere spiegata dalla

temperatura esterna media giornaliera. Sebbene un  $R^2$  di 0.84 sia generalmente considerato elevato, indicando un buon adattamento del modello ai dati, un'analisi più dettagliata dei punti che si discostano maggiormente dalla linea di tendenza offre ulteriori spunti di riflessione.

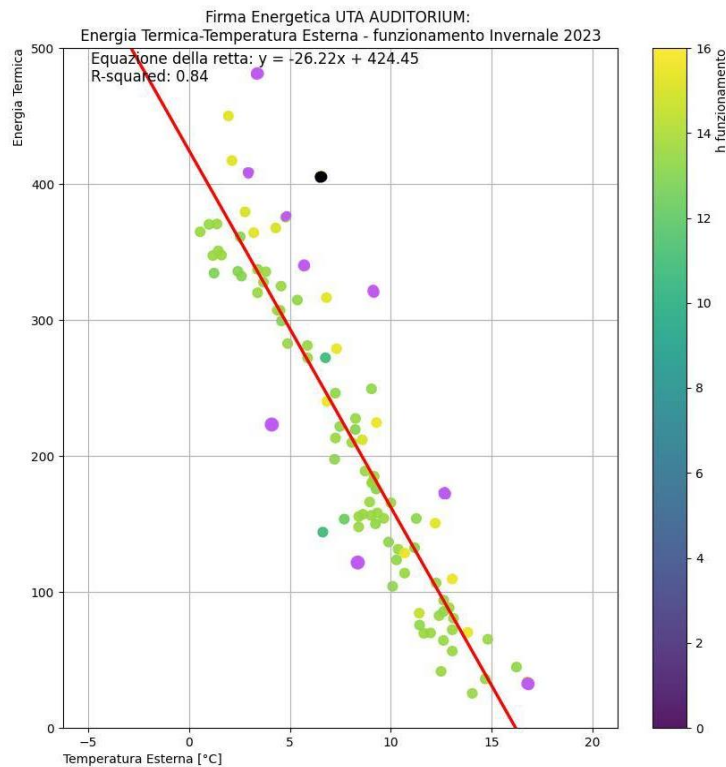


Figura 27 - Firma Energetica UTA Auditorium prerregolazione II. [En Th-Te]

- **Punti in Viola:** Questi punti evidenziano giorni in cui si è verificato una variazione della temperatura di setpoint rispetto alla media stagionale. Tale variazione può aver modificato il consumo energetico, influenzando la firma energetica.
- **Punto in Nero:** Questo punto corrisponde al primo giorno di riapertura dell'impianto di riscaldamento dopo le vacanze natalizie. In questi casi, il consumo energetico può essere influenzato da un insieme di fattori, tra cui il riscaldamento iniziale dell'edificio dopo un periodo di inattività e le condizioni climatiche particolari di quel giorno.

Escludendo i giorni evidenziati in Figura 16, la nuova firma energetica è rappresentata dall'equazione:

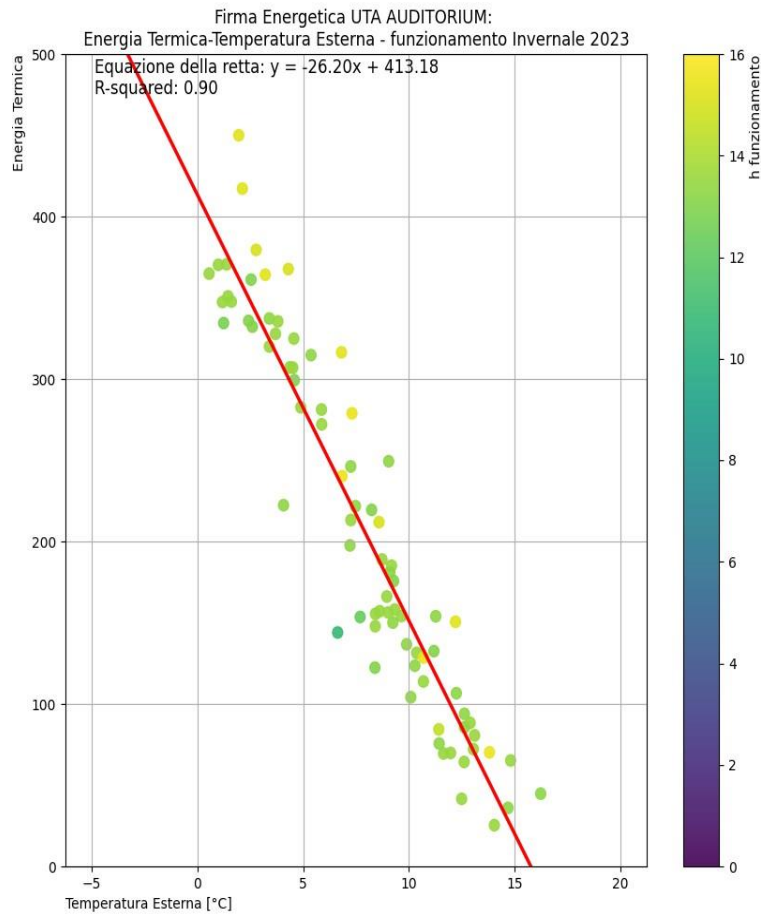


Figura 28 - - Firma Energetica UTA Auditorium prerogolazione

Successivamente, si è proceduto all'elaborazione della firma energetica per il periodo successivo all'implementazione della strategia di controllo attuata da Eurix. La firma energetica risultante mostra una maggiore dispersione rispetto a quella del periodo precedente. Questa variabilità più ampia può essere attribuita principalmente al fatto che l'analisi è stata condotta su un arco temporale più breve, limitato a pochi mesi di rilevazioni, ma anche alle differenti condizioni operative che riducono il funzionamento dell'UTA solo nei periodi in cui è effettuata una prenotazione.

La ridotta quantità di dati disponibili per questo periodo rende più difficile stabilire una relazione chiara e stabile tra il consumo energetico e la temperatura esterna media giornaliera. In particolare, in un contesto come quello energetico, dove le condizioni operative e climatiche possono variare sensibilmente di giorno in giorno, un dataset più esteso contribuisce a una rappresentazione più accurata e affidabile del comportamento energetico del sistema.

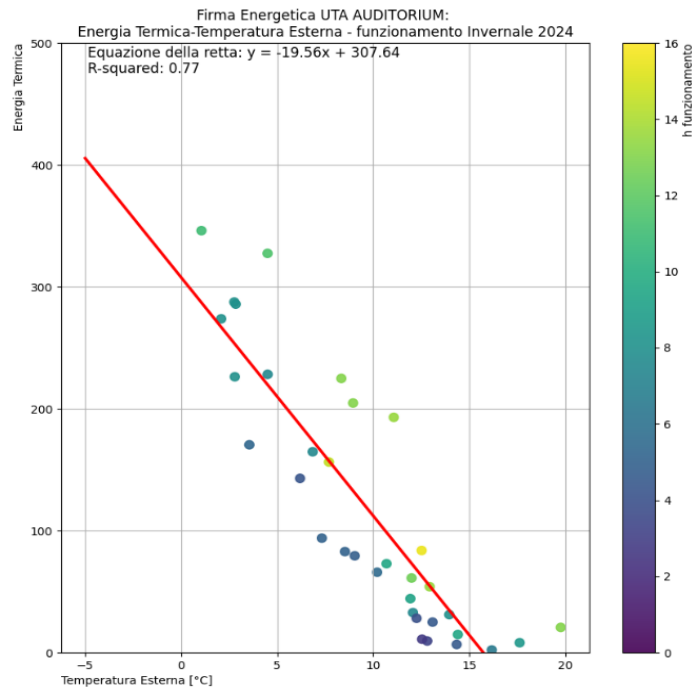


Figura 29 - Firma Energetica UTA Auditorium post-regolazione. [En Th-Te]

Dal confronto tra le due firme energetiche emerge chiaramente il risparmio energetico ottenuto grazie alla nuova strategia di regolazione attuata da Eurix. La variazione tra le firme energetiche dei due periodi indica una diminuzione del consumo energetico.

### Confronto tra i 2 periodi

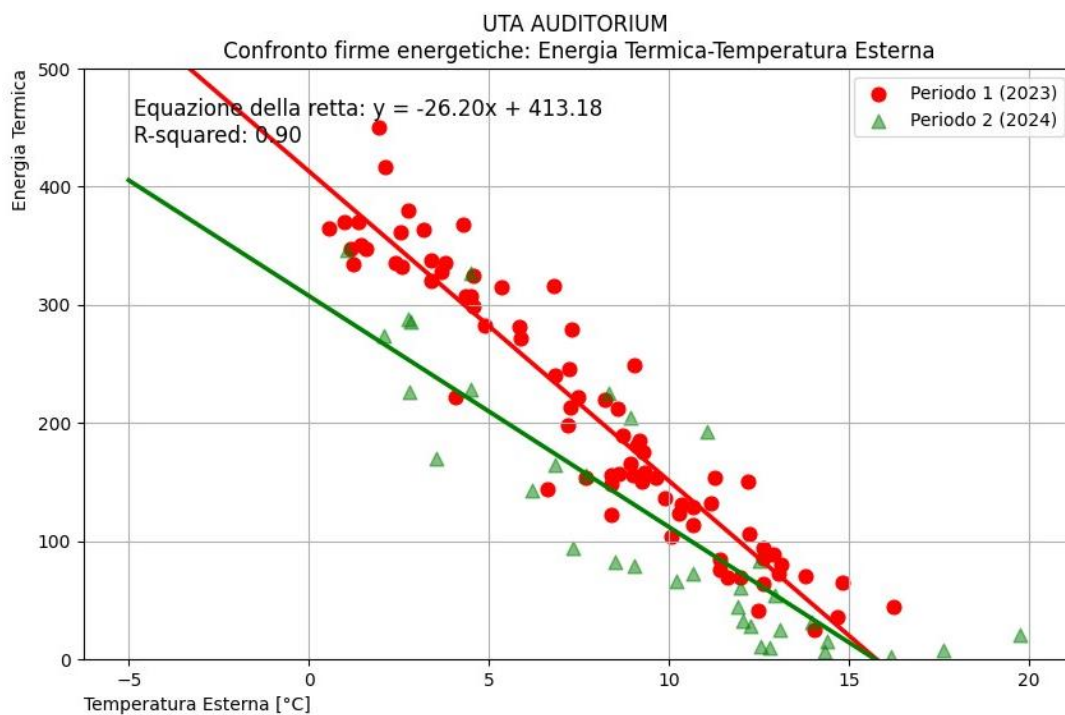


Figura 30 - Confronto firme energetiche. [En th - Te]



È importante notare che il consumo energetico rappresentato nelle firme è influenzato dalle ore di funzionamento dell'UTA in un giorno. Nella fase prerogolazione, l'UTA funzionava spesso per periodi più prolungati, aumentando il consumo complessivo. Dopo l'intervento di regolazione, una gestione più ottimizzata delle ore di funzionamento ha contribuito al risparmio energetico. La riduzione delle ore operative, laddove possibile senza compromettere il comfort o le esigenze funzionali dell'edificio, è un fattore chiave nel migliorare l'efficienza energetica.

Per effettuare un confronto dei consumi che non tenga conto delle ore di funzionamento giornaliero, è stato introdotto il concetto di consumo specifico. Questa variabile consente una valutazione più equa e precisa dell'efficienza energetica dell'impianto, poiché normalizza il consumo energetico rispetto alle ore di funzionamento. In altre parole, il consumo specifico rappresenta l'energia consumata per unità di tempo di funzionamento, offrendo una misura dell'efficienza dell'impianto indipendentemente dalle variazioni nell'orario operativo. Le firme energetiche ottenute con il consumo specifico offrono quindi un quadro più dettagliato delle prestazioni dell'UTA. Attraverso queste nuove firme, è possibile analizzare come l'efficienza dell'impianto vari in funzione della temperatura esterna media giornaliera, senza l'interferenza delle ore di funzionamento.

Di seguito sono riportate le firme energetiche per i due periodi di funzionamento:

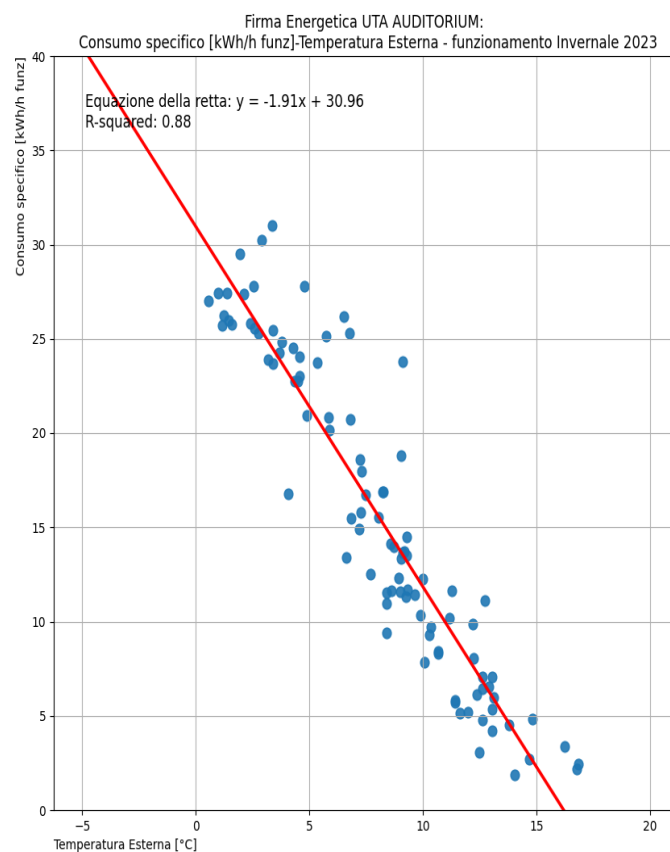


Figura 31 - Firma Energetica UTA Auditorium prerogolazione. [Consumo sp-Te]

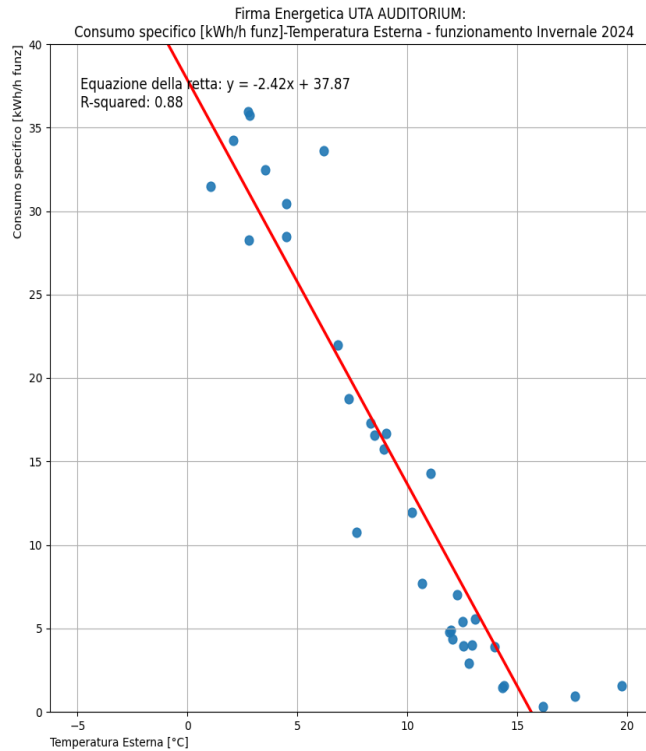


Figura 32 - Firma Energetica UTA Auditorium post-regolazione. [Consumo sp- $T_e$ ]

Dal confronto delle firme energetiche si evince che l'efficienza non dipende tanto da una regolazione efficiente dell'UTA, quanto piuttosto da una gestione efficiente e automatizzata del sistema. Infatti, la firma del periodo successivo alla regolazione mostra una pendenza maggiore rispetto a quella del periodo precedente, probabilmente a causa della mancanza di un controllo continuo che costringe l'impianto a compiere uno sforzo più elevato per riportare la temperatura interna al setpoint desiderato.

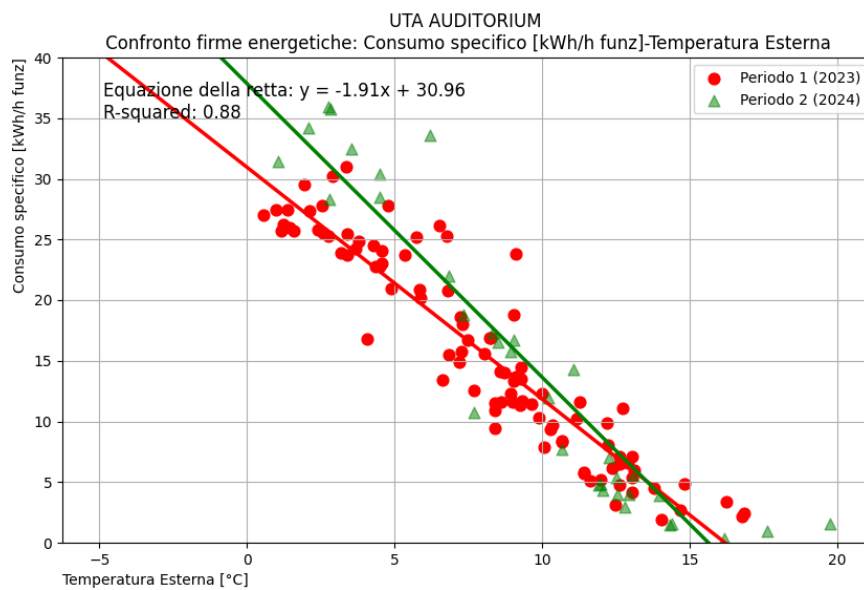


Figura 33 - Confronto firme energetiche. [Consumo Sp -  $T_e$ ]

### 4.1.1 Risparmio energetico

Per quantificare in modo accurato il risparmio energetico ottenuto, è stato scelto di confrontare i consumi termici cumulati degli stessi mesi in due anni differenti: l'anno precedente e quello immediatamente successivo all'implementazione dell'ottimizzazione proposta. Questo metodo di confronto permette di isolare l'effetto delle modifiche apportate al sistema, offrendo una chiara visione dell'impatto dell'ottimizzazione sulla riduzione dei consumi energetici.

L'analisi dei consumi cumulati consente di considerare l'andamento dei consumi nel corso dei mesi, eliminando le possibili variazioni giornaliere o settimanali che potrebbero distorcere la valutazione.

Di seguito è presentato un diagramma a barre che permette di confrontare i consumi termici cumulati negli stessi mesi nei due differenti periodi.

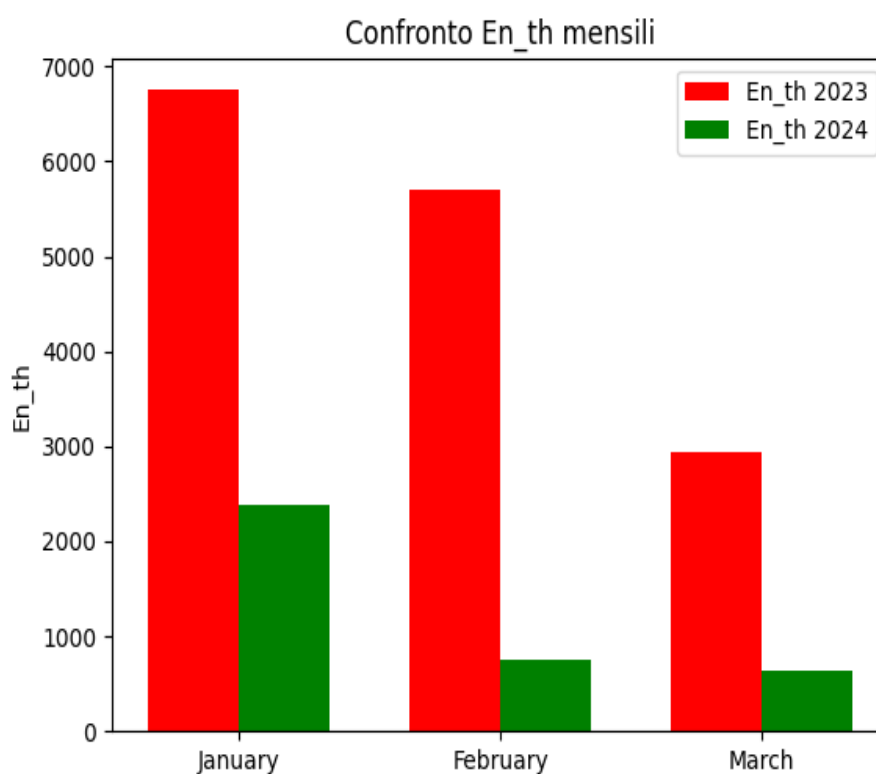


Figura 34 - Confronto dei consumi termici cumulati UTA Auditorium

I valori di consumo sono presentati nella seguente tabella:

	<b>Gennaio</b>	<b>Febbraio</b>	<b>Marzo</b>
<b>Consumi 2023</b>	6753.5	5699	2932
<b>Consumi 2024</b>	2381.8	744.5	636.9
<b>RISPARMIO %</b>	<b>64.6</b>	<b>86.9</b>	<b>78.3</b>

Tabella 8 - Valori di consumo termico UTA Auditorium

Tuttavia, questa metodologia non tiene conto delle condizioni al contorno variabili, in particolare delle differenze di temperatura esterna nei vari periodi confrontati. Per ottenere un confronto più preciso e rigoroso, che consideri le diverse condizioni climatiche, sono stati calcolati i Gradi Giorno (GG) per ciascun periodo analizzato. Questo parametro permette di normalizzare i dati energetici, rendendo i confronti più equi e rappresentativi.

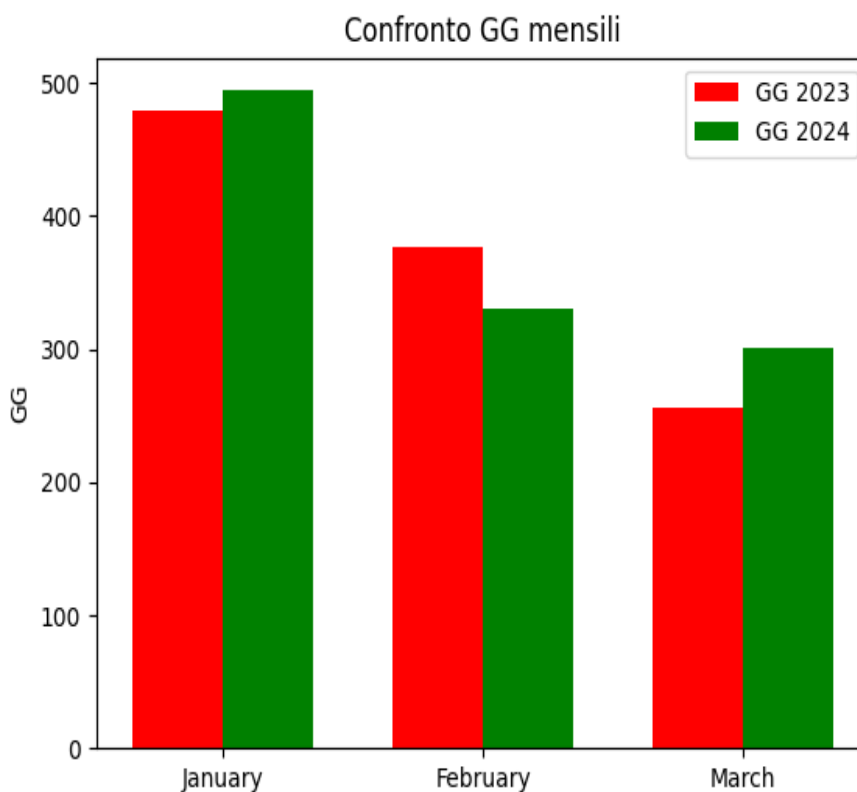


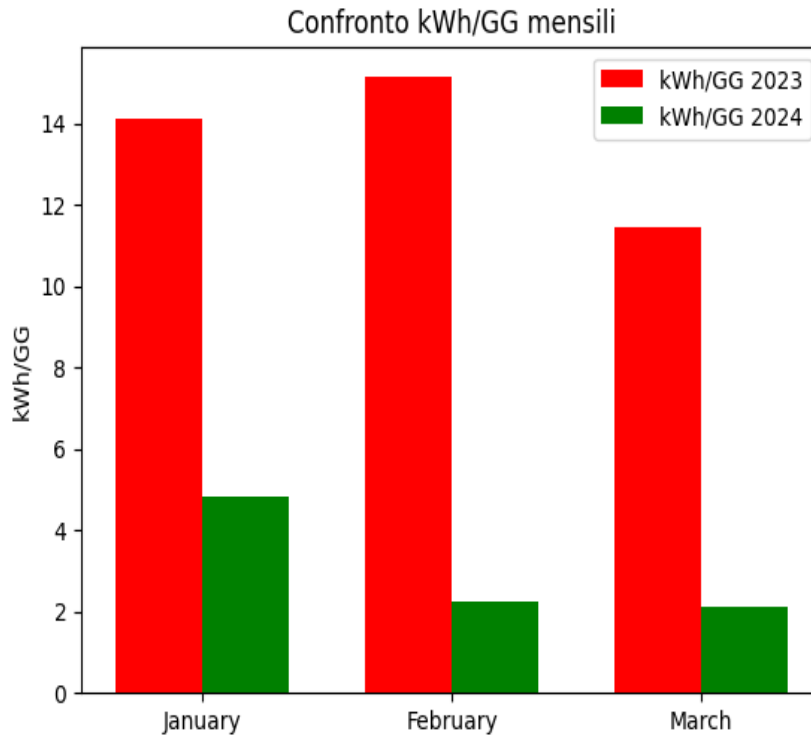
Figura 35 - Confronto GG mensili

In tabella sono riportati i GG mensili calcolati per i mesi invernali precedenti e successivi alla regolazione apportata da Eurix:

	<b>Gennaio</b>	<b>Febbraio</b>	<b>Marzo</b>
<b>GG 2023</b>	478.75	376.7	256
<b>GG 2024</b>	494.5	330.75	300.57

Tabella 9 - Confronto GG mensili

Per poi confrontare il KPI scelto, che permette di confrontare i 2 diversi periodi, e calcolare i risparmi ottenuti.



*Figura 36 - Confronto KPI Auditorium*

In tabella sono riportati i KPI mensili calcolati per i mesi invernali precedenti e successivi alla regolazione apportata da Eurix:

	<b>Gennaio</b>	<b>Febbraio</b>	<b>Marzo</b>
<b>KPI 2023</b>	14.1	15.1	11.4
<b>KPI 2024</b>	4.8	2.25	2.12
<b>RISPARMIO %</b>	<b>65.9</b>	<b>85.1</b>	<b>81.4</b>

*Tabella 10 - Confronto KPI*

I valori ottenuti saranno commentati nel prossimo capitolo.

## 4.2 Firma Energetica – Raffrescamento UTA Auditorium

Per l'UTA Auditorium è stata elaborata la firma energetica relativa al periodo estivo, seguendo la stessa metodologia descritta nel capitolo precedente. L'obiettivo era analizzare l'efficienza energetica dell'UTA durante la stagione di raffrescamento, osservando come il consumo energetico vari in funzione della temperatura esterna media giornaliera.

Tuttavia, non è stato possibile effettuare un confronto tra due diversi periodi di regolazione, poiché la trattazione attuale non include la stagione di raffrescamento successiva

all'ottimizzazione proposta. In altre parole, i dati disponibili coprono solo la fase estiva precedente all'intervento di regolazione. Pertanto, qualsiasi confronto diretto sull'efficacia delle modifiche implementate è rimandato a future analisi, una volta che saranno disponibili dati relativi al periodo post-regolazione.

Nonostante l'impossibilità di confronto, la firma energetica ricavata per il periodo estivo offre comunque utili informazioni di base sul comportamento dell'UTA Auditorium in condizioni di raffrescamento. Questa analisi preliminare potrà essere utilizzata come riferimento per valutare l'efficacia delle ottimizzazioni future, una volta che saranno raccolti dati sufficienti a coprire interamente la stagione estiva post-regolazione.

Di seguito è rappresentata la firma energetica classica elaborata per il periodo estivo:

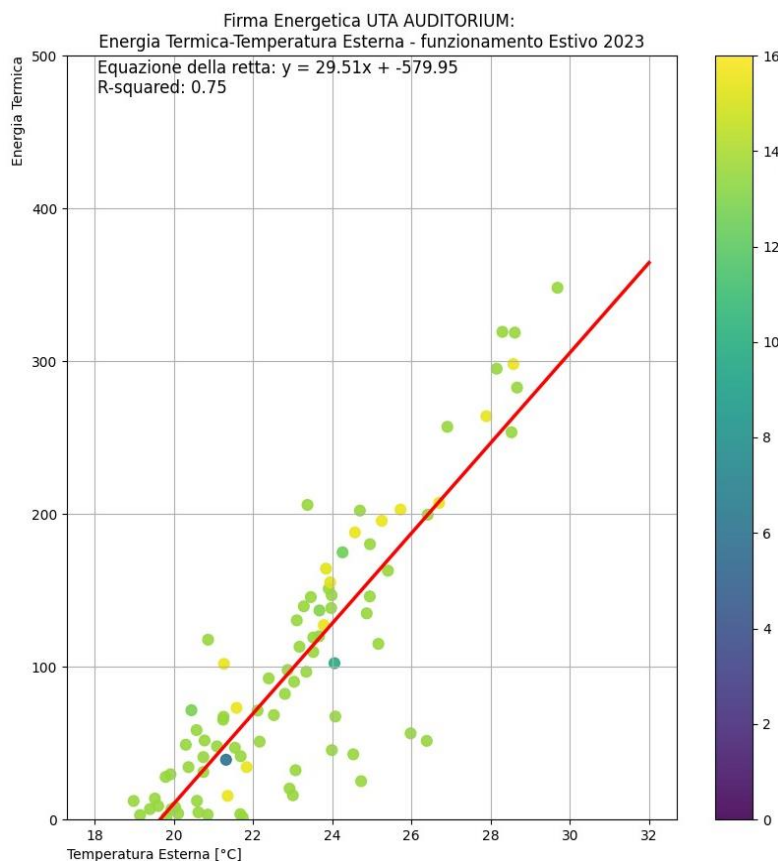


Figura 37 - Firma energetica UTA Auditorium comportamento estivo I

Come si può osservare, la firma energetica ricavata per il periodo estivo dell'UTA Auditorium non rappresenta in modo accurato il comportamento reale dell'impianto, poiché il coefficiente di determinazione ( $R^2$ ) non è sufficientemente elevato. Questo valore di  $R^2$  indica che la relazione tra il consumo energetico e la temperatura esterna non è ben definita, suggerendo una significativa dispersione dei dati intorno alla linea di regressione.

Un'analisi più approfondita rivela le ragioni di questo comportamento. In particolare, sebbene le ore di funzionamento elettrico dell'UTA Auditorium siano relativamente costanti durante la settimana, il comportamento termico dell'impianto varia notevolmente tra i giorni infrasettimanali e il sabato. Durante i giorni infrasettimanali, l'UTA segue un profilo di

raffrescamento più regolare. Tuttavia, il sabato, pur risultando l'UTA operativa da un punto di vista elettrico, essa fornisce effettivamente raffrescamento solo nella mattinata, fino alle 12:30. Dopo questo orario, l'UTA sembra passare a una modalità di sola ventilazione, senza raffrescamento attivo.

Questo cambiamento nel comportamento dell'UTA spiega la scarsa correlazione osservata nella firma energetica. Poiché il sistema non opera in modo coerente nei diversi giorni della settimana, la relazione tra la temperatura esterna e il consumo energetico risulta meno prevedibile. Inoltre, il passaggio a sola ventilazione nel pomeriggio del sabato influisce significativamente sul consumo termico, introducendo variazioni che non sono direttamente correlate alla temperatura esterna ma piuttosto a una modalità operativa specifica del sistema.

Escludendo i sabati dalla firma energetica si ottiene un coefficiente di Determinazione accettabile come mostrato nella figura seguente.

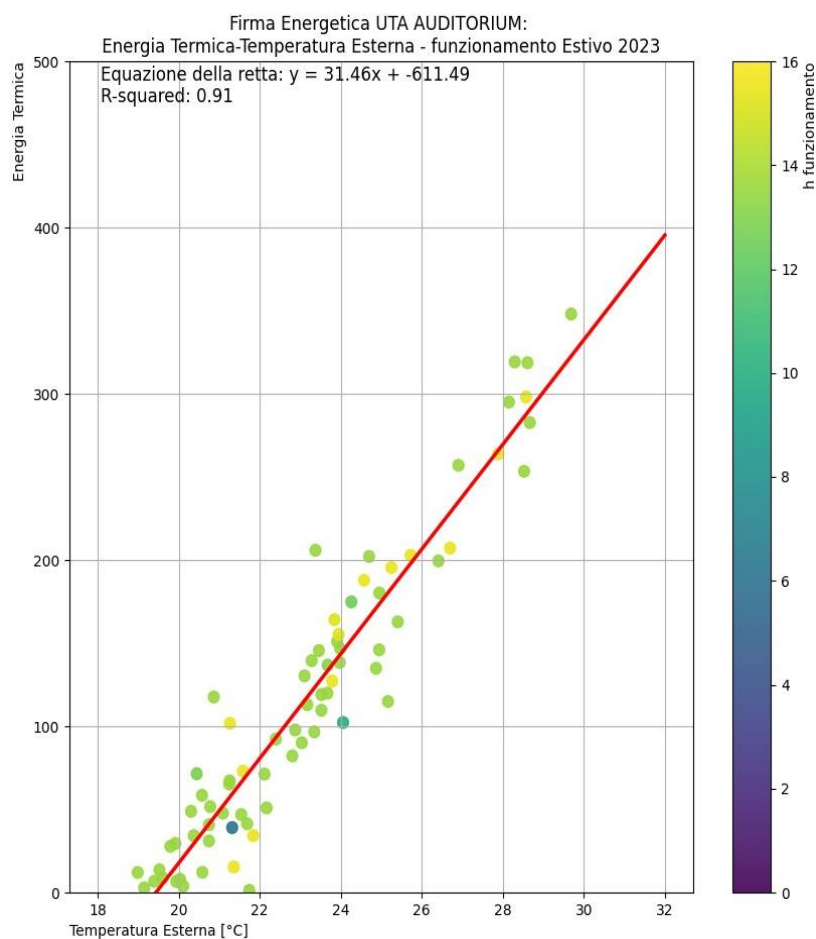


Figura 38 - Firma energetica UTA Auditorium comportamento estivo II

### 4.3 UTA Uffici Nord-Ovest

Nel contesto dell'analisi delle prestazioni energetiche dell'UTA (Unità di Trattamento Aria) per gli Uffici Nord-Ovest, sono state sviluppate due firme energetiche rappresentative di due periodi distinti. Questi periodi forniscono un confronto utile tra le condizioni operative precedenti e successive alla regolazione implementata da Eurix.

Il Periodo 1, che va dal 1° ottobre 2022 al 30 novembre 2023, rappresenta la fase antecedente all'intervento di regolazione di Eurix. Durante questo periodo, l'UTA era gestita con parametri predefiniti, non influenzati dalle nuove ottimizzazioni introdotte successivamente. Al contrario, il Periodo 2, che copre l'arco temporale dal 1° gennaio 2024 al 30 aprile 2024, si riferisce a una fase in cui l'UTA è sotto il controllo diretto della regolazione implementata da Eurix.

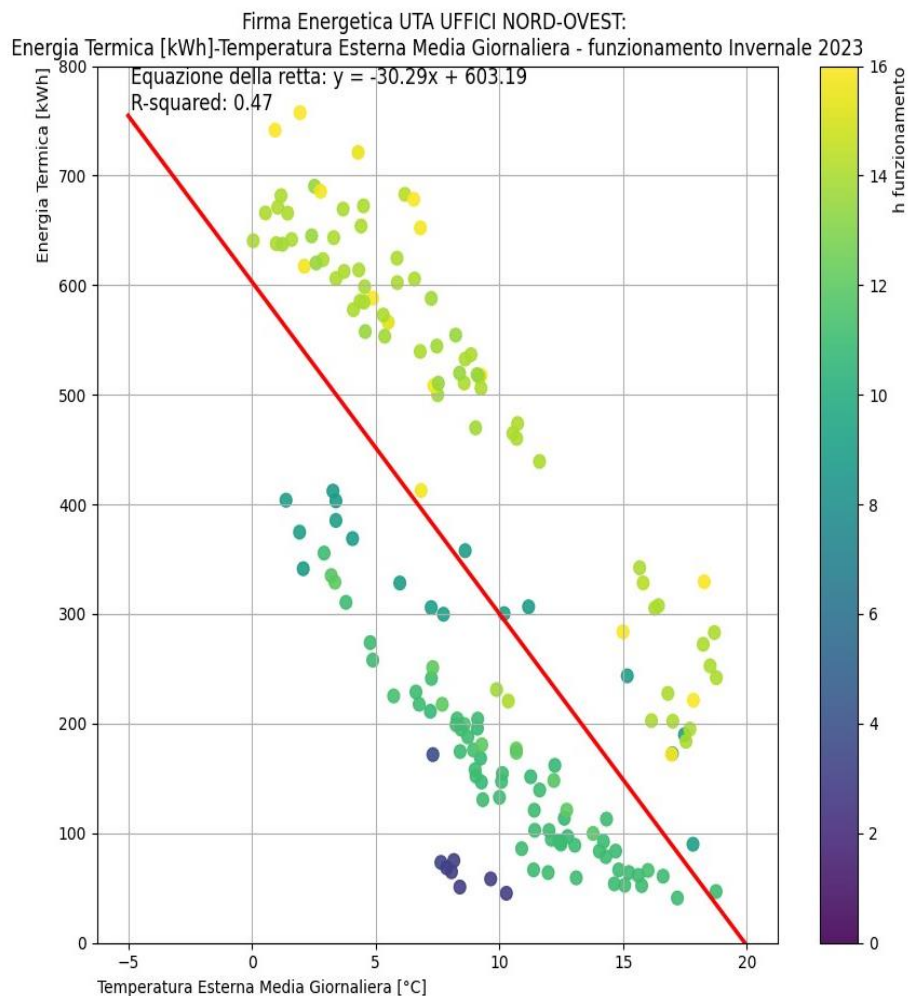


Figura 39 - Firma energetica Uta uffici Nord-Ovest preregolazione

Esaminando la firma energetica del periodo precedente alla regolazione, si evidenzia un comportamento interessante che emerge chiaramente dall'analisi dei dati. In particolare, è possibile notare una significativa variazione di pendenza nelle curve rappresentative del consumo energetico quando si passa dalla stagione invernale 2022 (che copre i mesi da ottobre 2022 a febbraio 2023) alla stagione invernale 2023 (limitata ai mesi di ottobre e novembre 2023). Questa variazione è attribuibile alla differenza nella temperatura di setpoint impostata durante



le rispettive stagioni di riscaldamento e ai differenti orari di funzionamento come specificato nel paragrafo 2.2.1:

- Stagione 2022/2023 Tsp = 25.5
- Stagione 2023/2024 preregolazione Tsp = 20

In aggiunta, è importante notare che anche i sabati mostrano un consumo energetico che si discosta dalle firme energetiche elaborate per le due stagioni di riscaldamento considerate. Questa discrepanza è principalmente attribuibile ai differenti orari di funzionamento dell'UTA durante il fine settimana, come specificato nel paragrafo 2.2.1.

Nella figura successiva, che accompagna questa analisi, è chiaramente visibile una differenza di pendenza tra le due stagioni di riscaldamento considerate. In particolare, la **curva rossa** rappresenta la firma energetica relativa alla stagione di riscaldamento **2022/2023**, ovvero quella in cui la temperatura di setpoint era impostata a 25.5°C. Questo valore più alto di temperatura di setpoint è evidente nella maggiore pendenza della curva, che indica un consumo energetico più elevato per mantenere tale livello di comfort termico. Al contrario, la **curva gialla** raffigura la firma energetica della stagione di riscaldamento **2023/2024**, precedente all'implementazione della regolazione Eurix. In questa fase, la temperatura di setpoint era stata abbassata a 20°C, con l'intento di migliorare l'efficienza energetica. La riduzione della temperatura di setpoint si riflette nella minore pendenza della curva gialla, suggerendo un minor consumo energetico rispetto alla stagione precedente.

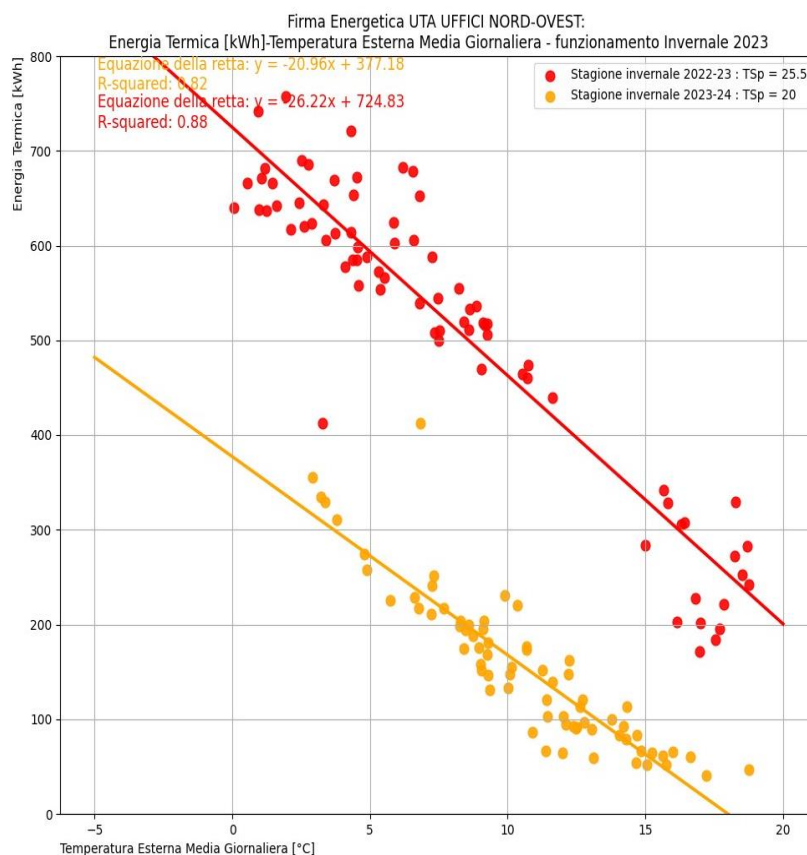


Figura 40 - Firma energetica confronto preregolazione Stagione 2022/23 e 2023/24

Un'analisi interessante può essere condotta esaminando i punti che si trovano nella zona centrale del grafico, i quali risultano posizionati tra le due firme energetiche proposte. Questi punti rappresentano situazioni particolari, distinte dalle tendenze generali delle stagioni di riscaldamento analizzate.

In particolare, si osserva un punto giallo, situato esattamente tra le due firme energetiche, che corrisponde al 20 febbraio 2023. Questo giorno è significativo poiché, durante le ore di funzionamento dell'UTA, la temperatura di setpoint (Tsp) è stata modificata, passando da 25.5°C a 20°C. Tale cambiamento di setpoint riflette un momento di transizione nel controllo della temperatura dell'impianto, e il posizionamento di questo punto nella zona intermedia del grafico è coerente con la variazione dei parametri energetici che si osserva in corrispondenza di un abbassamento della temperatura di funzionamento. Il punto giallo indica quindi il passaggio da un regime energetico caratterizzato da un consumo maggiore (25.5°C) a uno più efficiente (20°C), evidenziando un'importante modifica nelle impostazioni operative dell'UTA.

D'altro canto, il punto rosso, anch'esso situato nella zona intermedia, rappresenta il 21 dicembre 2022, un giorno in cui il funzionamento dell'UTA ha subito una variazione significativa rispetto alla consueta routine operativa. In particolare, l'orario di accensione del sistema è stato posticipato dalle solite 5:15 alle 10:30, comportando una riduzione del periodo di funzionamento complessivo. Questo ritardo nell'accensione ha influito direttamente sui consumi energetici della giornata, provocando un comportamento anomalo rispetto alle tendenze tipiche osservate nella stagione invernale 2022/2023. Tale anomalia è indicata dalla posizione del punto rosso nel grafico, che si discosta dalla firma energetica principale della stagione.

Questi due punti, rispettivamente giallo e rosso, forniscono informazioni preziose sulle variazioni operative dell'UTA e contribuiscono a comprendere meglio come cambiamenti nella gestione del sistema, come la modifica della temperatura di setpoint o la variazione degli orari di accensione, possano influire sul comportamento energetico dell'impianto. Analizzarli nel contesto del grafico consente di cogliere le dinamiche che si verificano in situazioni eccezionali o di transizione, arricchendo l'interpretazione complessiva delle prestazioni energetiche.

Questo confronto tra le due firme energetiche, evidenziato dai colori rosso e giallo, consente di visualizzare chiaramente l'impatto delle diverse impostazioni di temperatura sul comportamento energetico del sistema UTA. Risulta evidente che la modifica della temperatura di setpoint ha avuto un effetto diretto sulle prestazioni energetiche, con una riduzione dei consumi associata alla stagione più recente.

Di seguito è presentata la firma energetica elaborata per il periodo successivo alla regolazione implementata da Eurix:

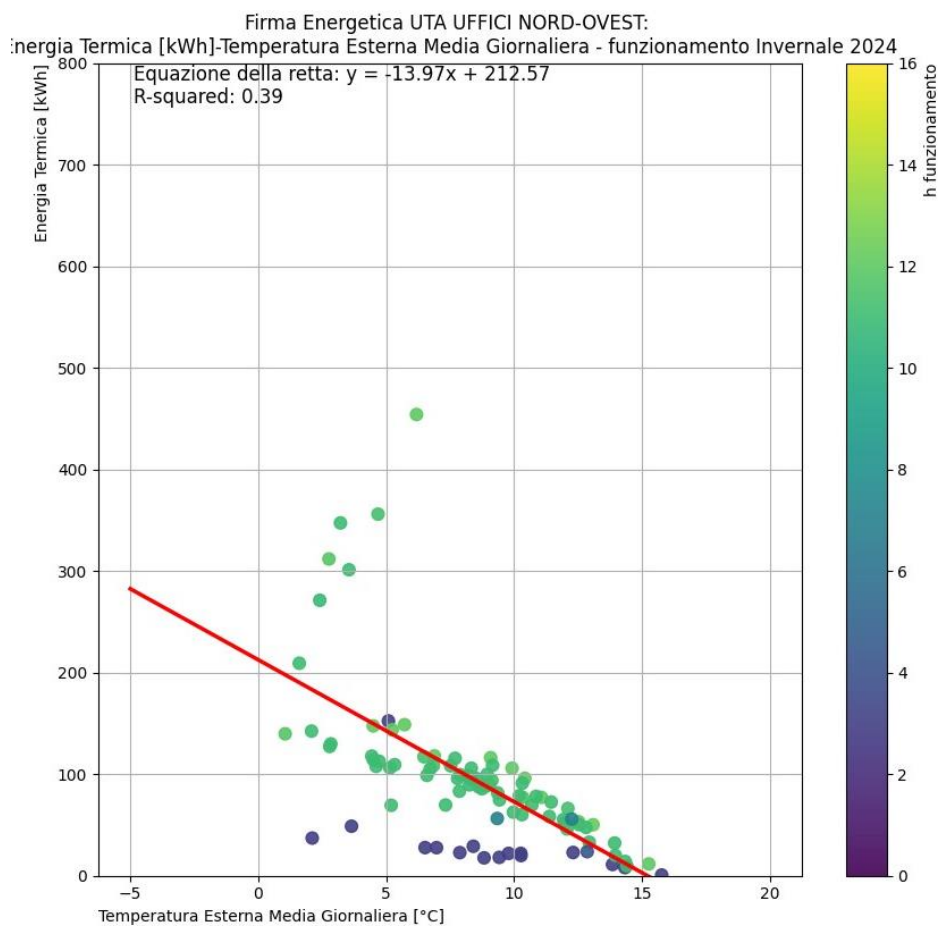


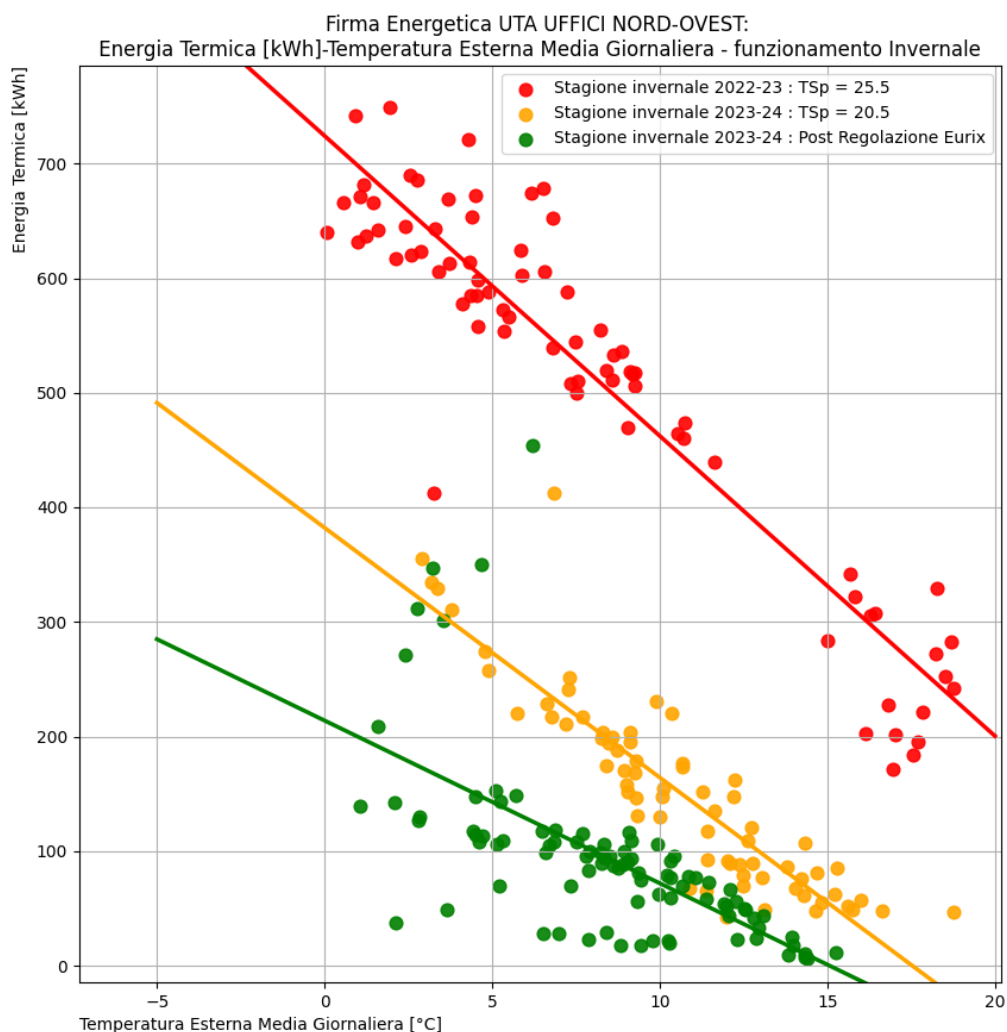
Figura 41 - Firma energetica classica UTA Nord-Ovest post-regolazione

Anche in questa firma energetica si possono osservare alcuni punti che si discostano dalla linea di regressione identificata. Questi punti anomali corrispondono ai giorni iniziali di gennaio e sono legati a un particolare evento: la riapertura dell'impianto dopo un periodo di chiusura, dovuto alle vacanze natalizie. Durante questo periodo, l'impianto UTA è rimasto inattivo, e il riavvio del sistema al termine delle festività ha comportato un comportamento energetico diverso rispetto alla normale operatività osservata nei giorni successivi.

Il temporaneo incremento o variazione dei consumi registrati in questi giorni può essere attribuito alla necessità di riportare l'edificio alle condizioni ottimali di temperatura e comfort dopo un periodo prolungato di inattività. Questo fenomeno è tipico degli impianti che, dopo una pausa, devono ripristinare l'equilibrio termico e può comportare un aumento temporaneo dei consumi, dovuto sia all'inerzia termica degli ambienti sia al ricalibrarsi dei parametri di regolazione.

La presenza di questi punti fuori dalla linea di regressione offre dunque spunti interessanti per comprendere l'impatto delle chiusure programmate sull'efficienza energetica complessiva, evidenziando la necessità di tener conto di questi eventi particolari nell'analisi delle prestazioni dell'impianto. Risulta chiaro come il comportamento dell'UTA in questi giorni di riapertura si differenzi significativamente dalla routine quotidiana, influenzando temporaneamente il profilo di consumo.

Di seguito è presentato il confronto tra le varie firme energetiche elaborate.



*Figura 42 - Confronto firme energetica UTA Uffici Nord-Ovest*

Dal confronto tra le diverse firme energetiche analizzate emerge chiaramente il risparmio energetico ottenuto nel tempo. In particolare, si osserva che tra le due stagioni di riscaldamento esaminate, il risparmio più significativo è stato ottenuto grazie a due fattori principali: la riduzione delle ore di funzionamento dell'UTA e la modifica della temperatura di setpoint, che è stata abbassata da 25.5°C a 20°C.

Inoltre, successivamente, l'implementazione della regolazione avanzata da parte di Eurix ha contribuito a un ulteriore risparmio energetico. Questa regolazione ha introdotto ottimizzazioni più mirate nella gestione del sistema, consolidando i risultati già ottenuti con la variazione dei parametri operativi e migliorando ulteriormente le prestazioni complessive. Il confronto tra le firme energetiche fornisce quindi una rappresentazione chiara dell'impatto positivo di queste azioni correttive, dimostrando come interventi strategici possano portare a un significativo miglioramento dell'efficienza energetica nel lungo termine.

Le stesse considerazioni possono essere estese anche alle firme energetiche che correlano il consumo specifico con la temperatura esterna media giornaliera. Anche in questo caso, il comportamento riscontrato rispecchia quello descritto in precedenza.

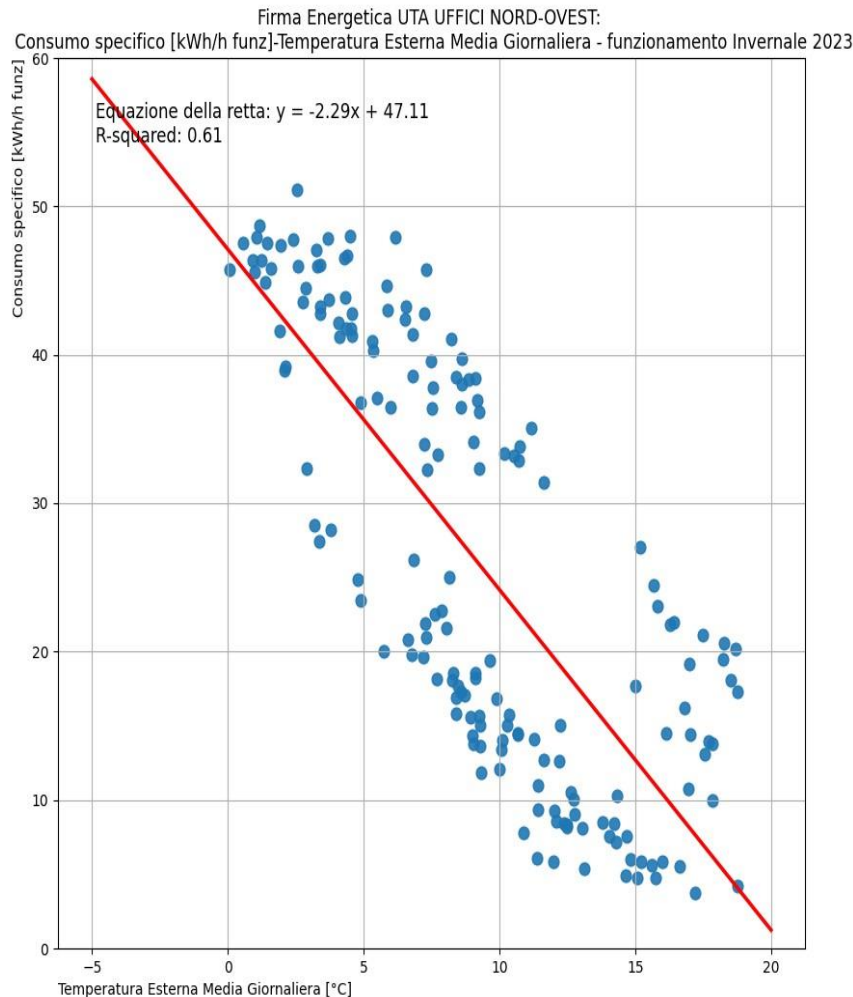


Figura 43 - Firma energetica (consumo sp.-T ext )Uta Uffici Nord Ovest preregolazione

Suddividendo le firme energetiche in base alle due differenti stagioni di riscaldamento, emerge chiaramente una distinzione tra i consumi delle diverse fasi operative.

La firma energetica relativa alla prima stagione, con temperature di setpoint più alte, presenta un consumo specifico maggiore rispetto alla stagione successiva, in cui la regolazione della temperatura è stata abbassata. Questo conferma l'importanza della gestione del setpoint e delle ore di funzionamento nel determinare l'efficienza del sistema.

Prendendo in considerazione singolarmente le firme energetiche delle due stagioni invernali differenti, come mostrano le due figure successive, si ottengono R2 alti.

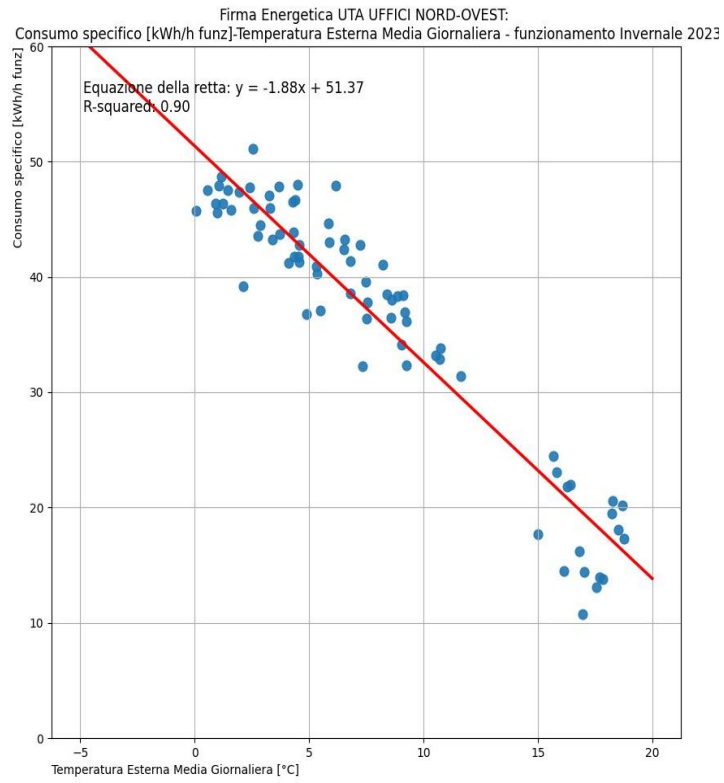


Figura 44 - Firma energetica (consumo sp.-T ext )Uta Uffici Nord Ovest 2022/23

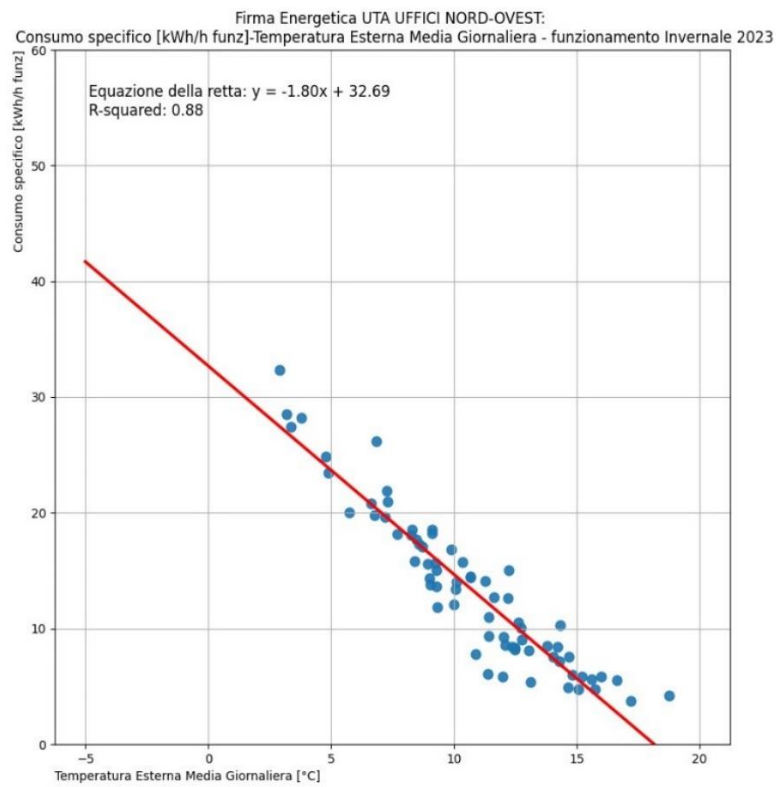


Figura 45 - Firma energetica (consumo sp.-T ext )Uta Uffici Nord Ovest 2023/24 preregolazione

È stata elaborata anche la firma (consumo specifico/temperatura esterna media giornaliera) per il periodo successivo alla regolazione implementata da Eurix che presenta le stesse caratteristiche della firma classica descritta precedentemente.

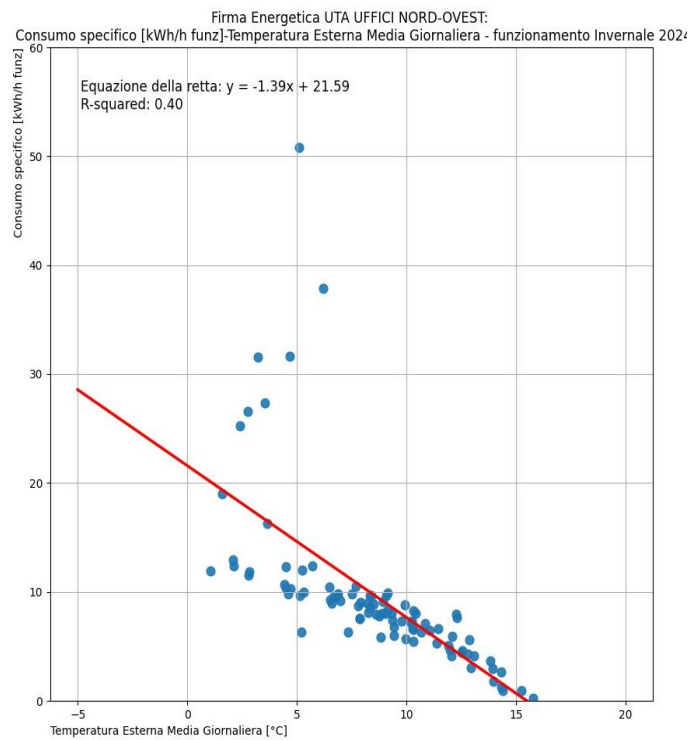


Figura 46 - Firma energetica (consumo sp.-T ext )Uta Uffici Nord Ovest post regolazione

Per poi effettuare il confronto tra i tre periodi analizzati:

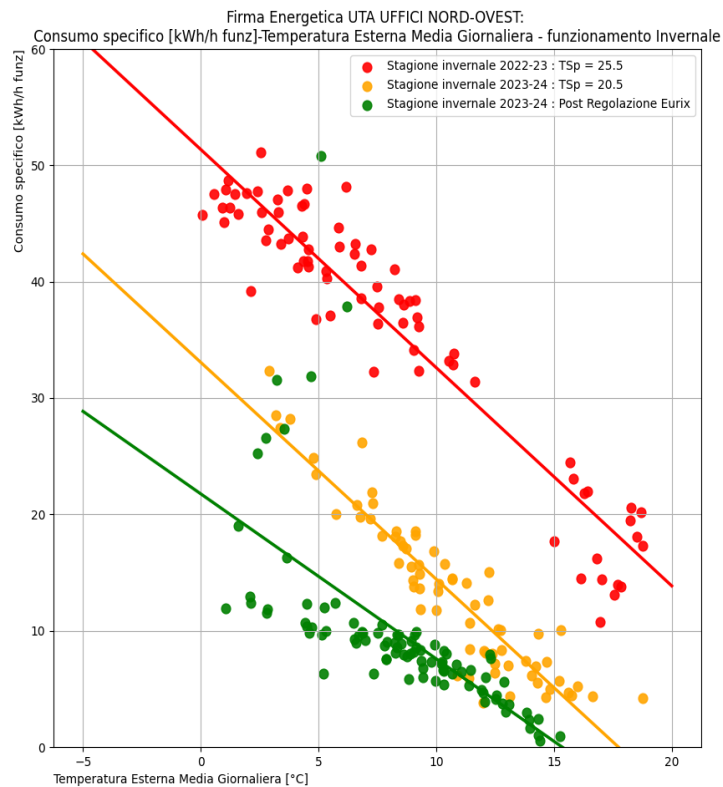


Figura 47 - Confronto firme energetiche (consumo sp.-T ext ) Uta Uffici Nord Ovest

Dall'analisi comparativa delle firme energetiche, emerge in modo evidente il significativo miglioramento in termini di efficienza energetica ottenuto grazie all'implementazione delle nuove regolazioni. Non solo si riscontra una riduzione complessiva del consumo energetico, ma l'ultima firma mette in luce come l'intervento abbia contribuito in modo sostanziale all'ottimizzazione del sistema nel suo complesso. Questo miglioramento non si limita a un semplice risparmio energetico diretto: è chiaro che la gestione dell'Unità di Trattamento dell'Aria (UTA) è stata affinata, consentendo un utilizzo più razionale ed efficiente delle risorse disponibili.

#### 4.3.1 Risparmio energetico

Anche per quanto riguarda i risparmi energetici dell'UTA Uffici Nord-Ovest, è stato effettuato un confronto tra i consumi termici cumulati degli stessi mesi in due anni distinti: l'anno precedente e quello immediatamente successivo all'implementazione dell'ottimizzazione proposta. Questo confronto consente di evidenziare eventuali differenze nei consumi energetici dovute all'ottimizzazione.

Nella figura seguente è riportato un diagramma a barre che permette di visualizzare chiaramente il confronto dei consumi termici cumulati tra gli stessi mesi nei due diversi periodi analizzati.

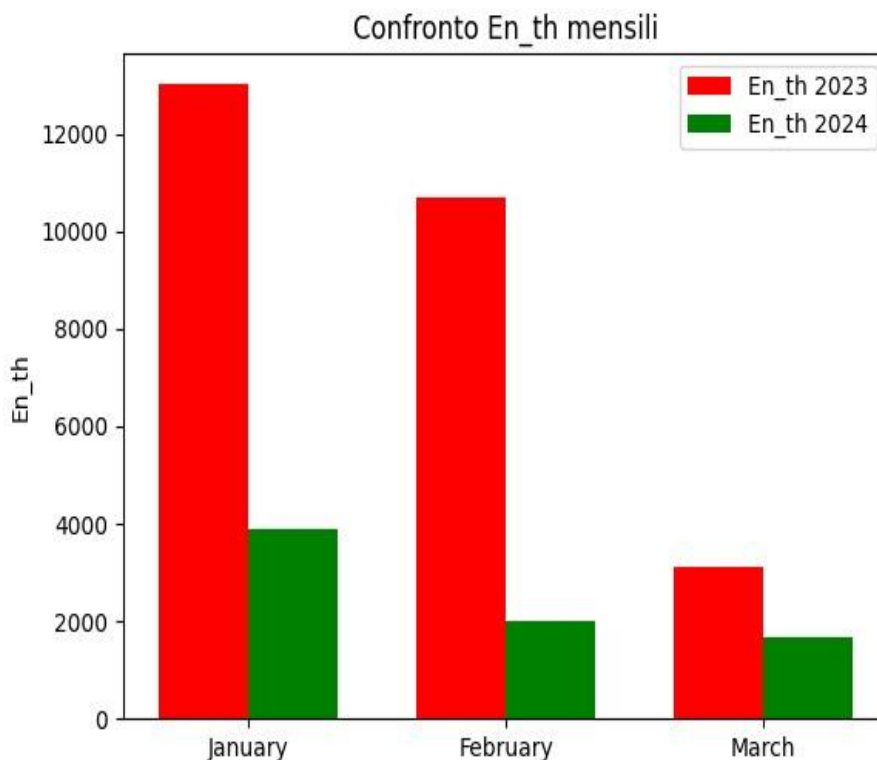


Figura 48 - Confronto dei consumi termici cumulati UTA Nord-Ovest



	<b>Gennaio</b>	<b>Febbraio</b>	<b>Marzo</b>
<b>Consumi 2023 [kWh]</b>	13015.1	10687.8	3109.3
<b>Consumi 2024 [kWh]</b>	3893.8	2013.6	1673.9
<b>RISPARMIO %</b>	70	81.1	46.2

Tabella 11 - Valori di consumo termico UTA Uffici Nord-Ovest

Lo stesso ragionamento è stato utilizzato per il KPI proposto:

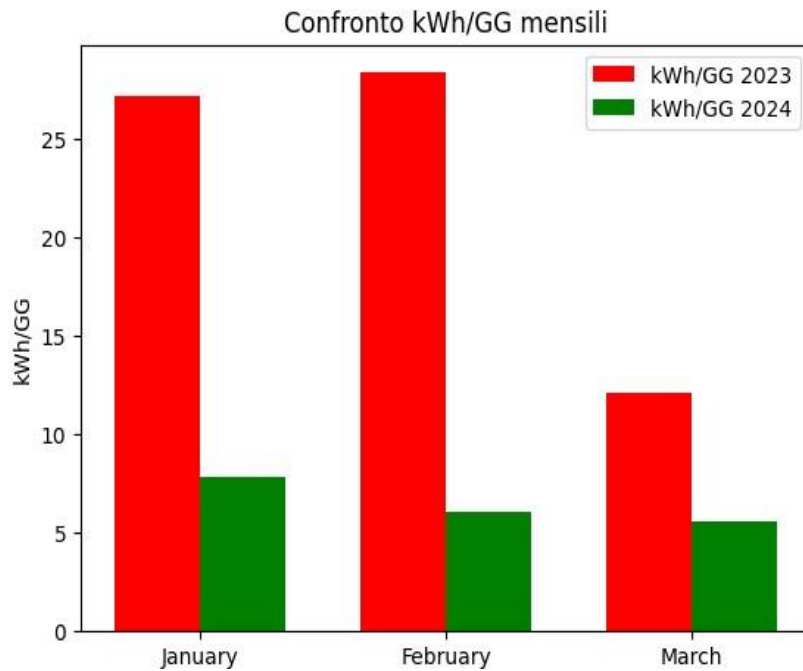


Figura 49 - Confronto KPI UTA Nord-Ovest

	<b>Gennaio</b>	<b>Febbraio</b>	<b>Marzo</b>
<b>KPI 2023</b>	27.2	28.4	12.1
<b>KPI 2024</b>	7.9	6.1	5.6
<b>RISPARMIO %</b>	70.9	78.5	53.7

Tabella 12 - Valori KPI UTA Uffici Nord-Ovest

È importante sottolineare che il risparmio energetico così calcolato non è imputabile interamente alla regolazione introdotta da Eurix. Infatti, come spiegato nel paragrafo 2.2.1, durante le due stagioni di riscaldamento considerate, sono state apportate altre modifiche, tra cui variazioni degli orari di funzionamento e della temperatura di set point, che sono indipendenti dalla regolazione proposta da Eurix. Per ottenere una valutazione più precisa dei risparmi energetici, sono stati messi a confronto i consumi del mese di febbraio di entrambi gli anni, insieme a quelli di novembre 2023. La scelta di includere novembre 2023 nel confronto è dovuta al fatto che, in quel mese, le modifiche relative alla temperatura di set point e agli orari di funzionamento erano già operative, rendendolo un riferimento utile per valutare l'efficacia delle ottimizzazioni.

Inoltre, i mesi selezionati, come febbraio e novembre, sono stati scelti anche perché presentano valori di gradi giorno (GG) molto simili (come si può vedere dalla figura sottostante), il che garantisce un confronto più equo tra i due periodi, riducendo l'influenza di fattori climatici esterni.

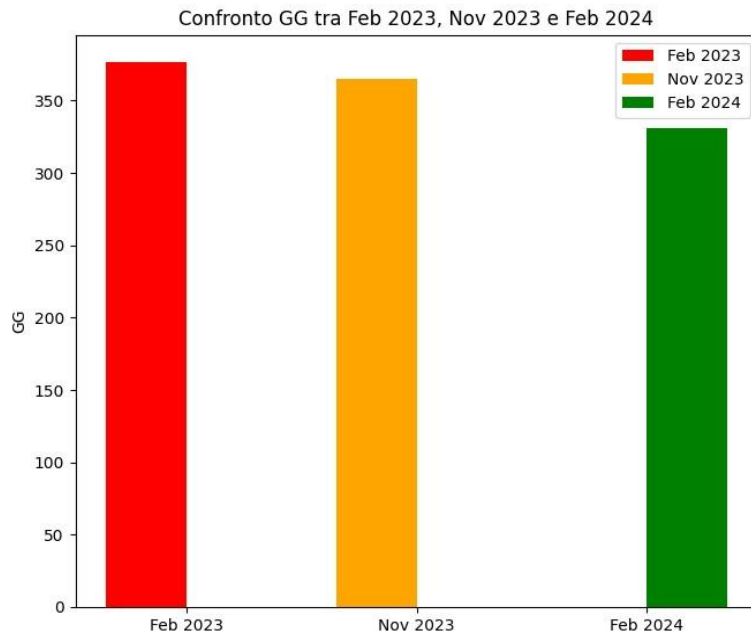


Figura 50- Confronto Gradi Giorno

Di seguito sono presentati i grafici di confronto dei consumi mensili cumulati e del KPI mensile:

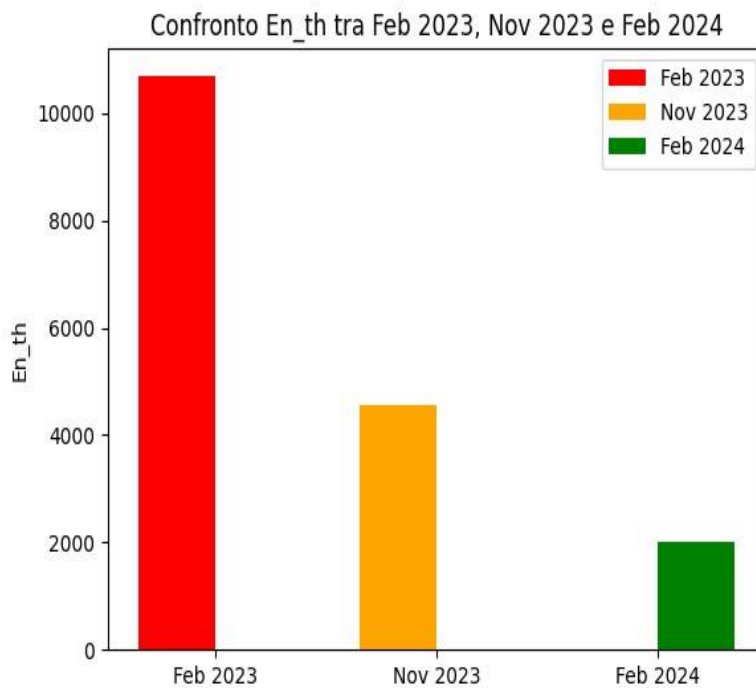
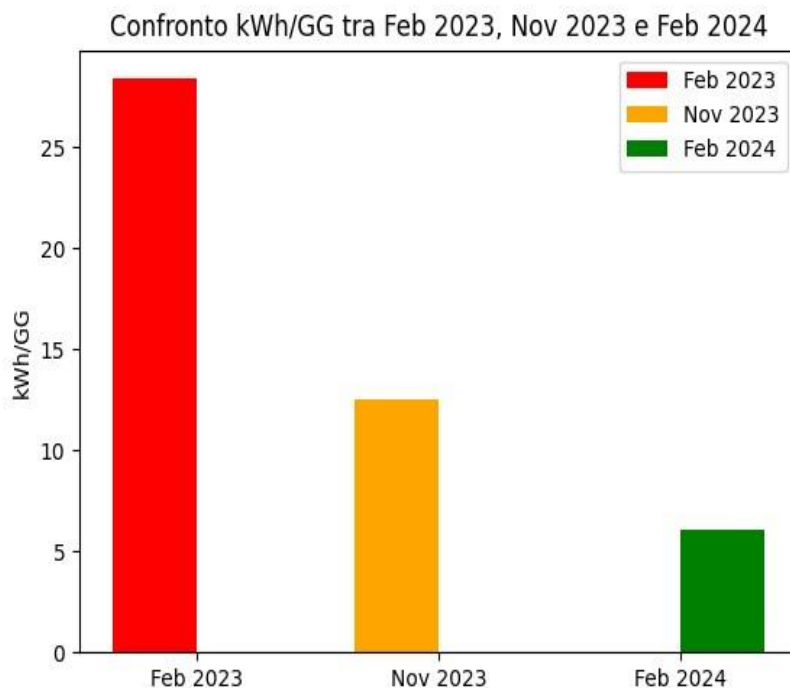


Figura 51 - Confronto dei consumi termici cumulati UTA Nord-Ovest



*Figura 52 - Confronto KPI UTA Nord-Ovest*

	<b>Febbraio 2023</b>	<b>Novembre 2023</b>	<b>Febbraio 2024</b>
<b>Gradi Giorno</b>	376.7	364.8	330.7
<b>Energia termica</b>	10687.8	4573.7	2013.6
<b>KPI</b>	28.4	12.5	6.1

*Tabella 13 - Confronto risultati UTA Uffici Nord-Ovest*

Le analisi condotte dimostrano che non tutto il risparmio energetico può essere attribuito esclusivamente alla regolazione implementata da Eurix. In particolare, per quanto riguarda il risparmio in termini di KPI, la modifica della temperatura di setpoint e la riorganizzazione delle ore di funzionamento hanno contribuito a un risparmio del 56%. Successivamente, la regolazione introdotta da Eurix ha portato a un ulteriore risparmio del 51%. Questo risultato è coerente con quanto osservato nel mese di marzo, quando le modifiche iniziali erano già state implementate e si sono visti i benefici della nuova regolazione.

#### 4.4 Firma Energetica – Raffrescamento UTA Uffici Nord-Ovest

Per l'UTA Uffici Nord Ovest, è stata elaborata la firma energetica relativa al periodo estivo, utilizzando la stessa metodologia descritta nei capitoli precedenti. L'obiettivo principale è valutare l'efficienza del sistema durante la stagione di raffrescamento, in relazione alla temperatura esterna media giornaliera.

Analogamente all'UTA Auditorium, non è possibile effettuare un confronto diretto tra due diversi periodi di regolazione, poiché i dati attuali si riferiscono esclusivamente al periodo estivo

antecedente all'intervento di ottimizzazione. Pertanto, l'analisi comparativa delle prestazioni post-regolazione potrà essere condotta in futuro, una volta che saranno disponibili i dati relativi alla stagione di raffrescamento successiva all'implementazione delle modifiche.

Nonostante la mancanza di un confronto immediato, la firma energetica ricavata fornisce una solida base di riferimento per il comportamento energetico dell'impianto degli Uffici Nord Ovest in condizioni di raffrescamento. Tale analisi preliminare potrà essere sfruttata per valutare le future ottimizzazioni e verificare eventuali miglioramenti nell'efficienza energetica.

Analogamente a quanto fatto per l'UTA Auditorium, la firma energetica dell'UTA Uffici Nord Ovest è stata rielaborata escludendo i sabati, poiché questi giorni presentano un profilo operativo differente rispetto agli altri giorni della settimana.

Successivamente, sono state prodotte due diverse tipologie di firma energetica. La prima è la firma energetica classica, che mette in relazione l'energia termica consumata con la temperatura esterna media giornaliera. Questo approccio permette di identificare come varia il consumo energetico in funzione delle condizioni ambientali esterne, fornendo una visione generale del comportamento dell'impianto durante il periodo di raffrescamento.

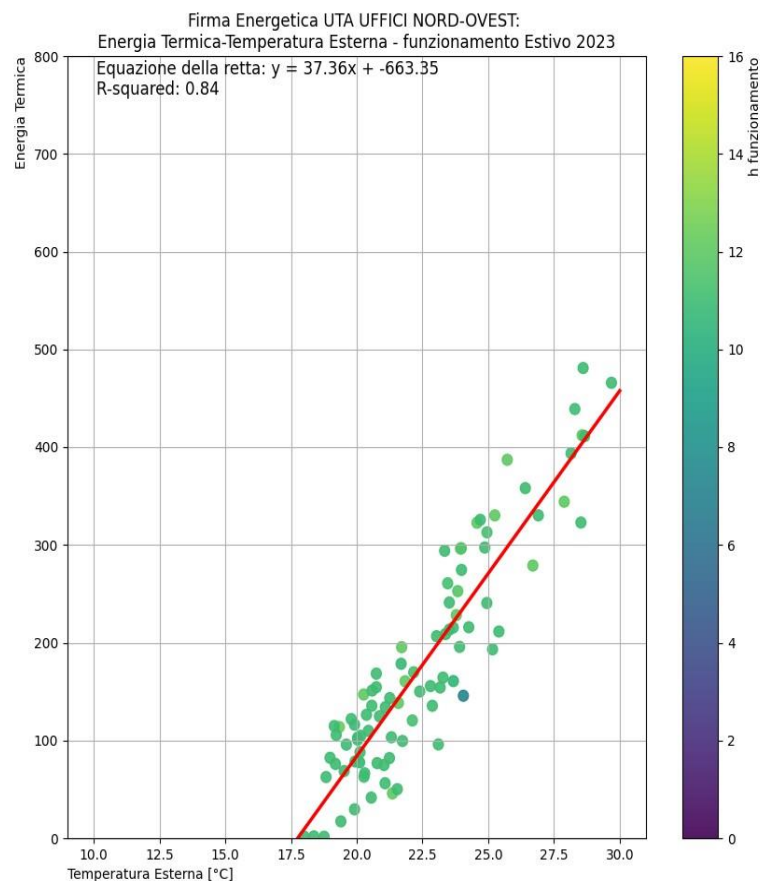


Figura 53 - Firma energetica UTA Uffici Nord-Ovest comportamento estivo I

In parallelo, è stata elaborata una seconda firma energetica, che considera il consumo energetico specifico. Questo tipo di analisi consente di approfondire ulteriormente l'efficienza dell'UTA Uffici Nord Ovest, tenendo conto del consumo energetico per unità di carico o per superficie

servita. Tale approccio è utile per valutare l'efficacia dell'impianto in termini relativi, facilitando il confronto con altri sistemi o periodi di funzionamento.

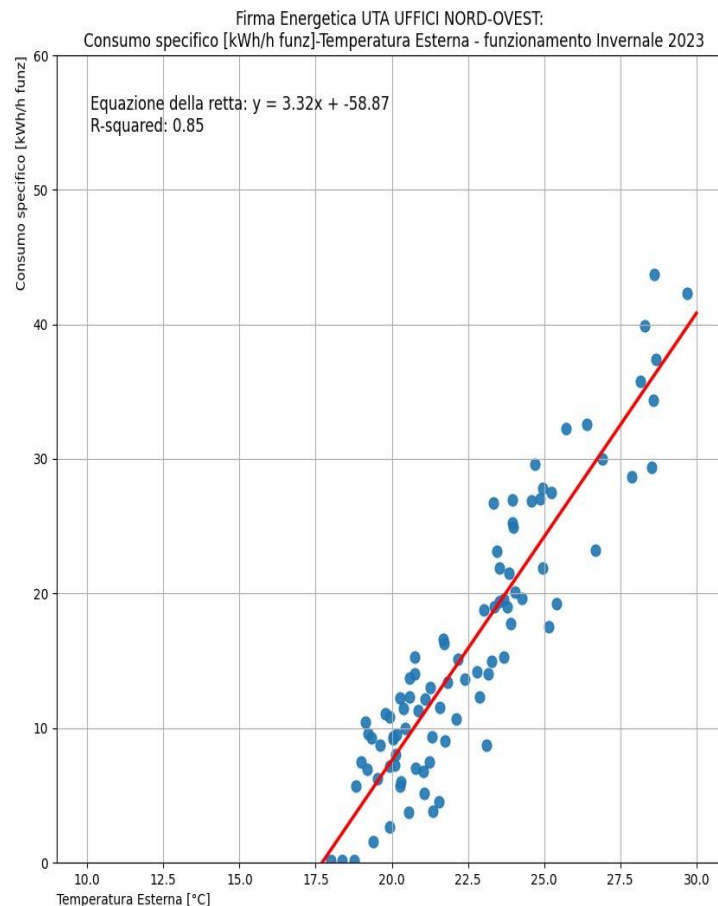


Figura 54 - Firma energetica UTA Uffici Nord-Ovest comportamento estivo II

Queste due firme energetiche, seppur differenti, forniscono una visione complementare delle prestazioni dell'UTA Uffici Nord Ovest e rappresentano una base solida per future analisi comparative, una volta disponibili i dati post-regolazione.

#### 4.5 UTA Uffici Nord-Est

Nel contesto dell'analisi delle prestazioni energetiche dell'UTA (Unità di Trattamento Aria) per gli Uffici Nord-Est, sono state sviluppate due firme energetiche distintive per rappresentare due periodi operativi separati. Questi due intervalli temporali consentono un confronto efficace tra le condizioni operative preesistenti e quelle successive all'intervento di ottimizzazione implementato da Eurix, permettendo così di valutare l'impatto delle regolazioni apportate.

Il Periodo 1, compreso tra il 1° gennaio 2023 e il 30 novembre 2023, rappresenta la fase precedente all'implementazione della regolazione di Eurix. Durante questo intervallo, l'UTA

operava con i parametri standard, senza alcuna influenza dalle nuove strategie di controllo, consentendo di stabilire una base di riferimento per l'analisi dei consumi energetici.

Al contrario, il Periodo 2, che copre il periodo dal 1° gennaio 2024 al 30 aprile 2024, riflette la fase successiva all'intervento di Eurix. In questa fase, l'UTA è gestita interamente sotto il controllo delle regolazioni ottimizzate introdotte. Questo periodo fornisce un quadro chiaro per misurare i benefici ottenuti grazie alle nuove impostazioni, consentendo di confrontare i consumi e le prestazioni con quelli osservati nel Periodo 1.

Di seguito è presentata la firma energetica elaborata per il 1° Periodo:

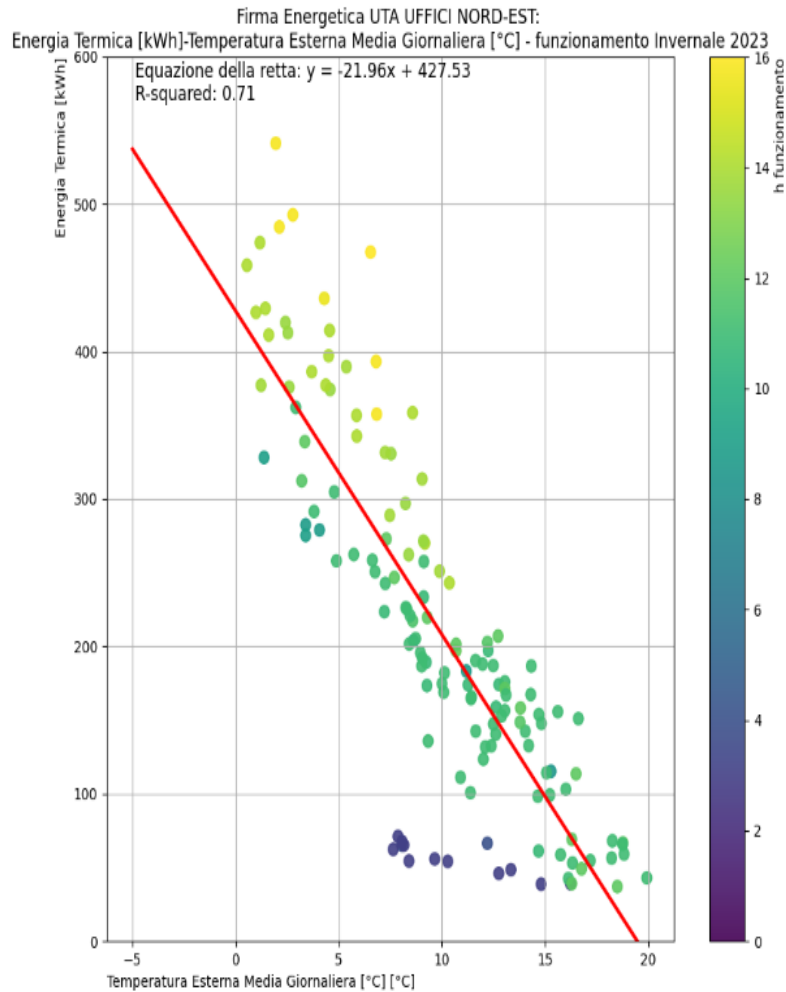


Figura 55 - Firma energetica Uta uffici Nord-Est preregolazione I

Anche per l'analisi di quest'UTA (Unità di Trattamento Aria) non sono stati presi in considerazione i sabati, in quanto presentano un comportamento energetico distinto rispetto agli altri giorni della settimana, come descritto nel paragrafo 2.3.1. Escludere i sabati dall'analisi consente di ottenere una valutazione più accurata e rappresentativa delle prestazioni dell'UTA durante i giorni lavorativi standard, quando i consumi energetici seguono uno schema più stabile e comparabile.

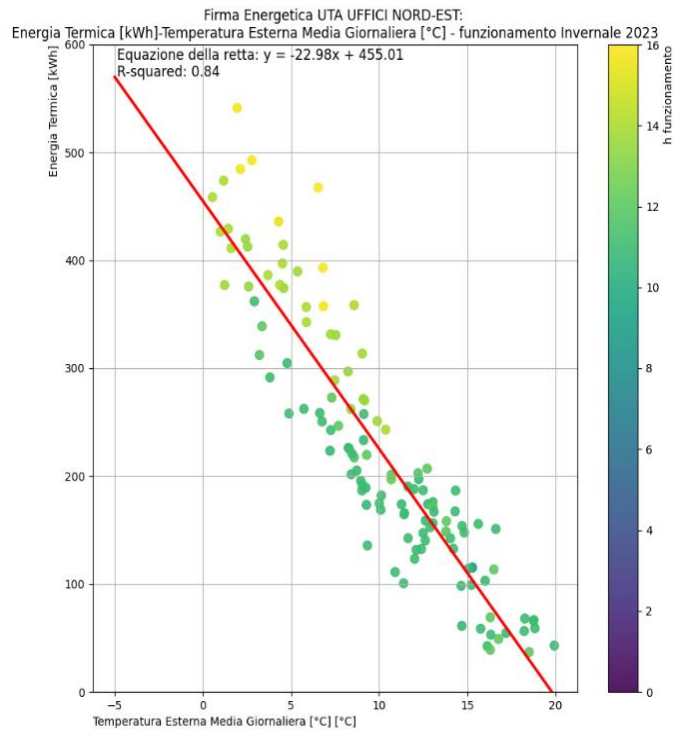


Figura 56 - Firma energetica Uta uffici Nord-Est prerregolazione II

Questa scelta permette di ottenere un coefficiente di determinazione ( $R^2$ ) sufficientemente alto, poiché escludendo i sabati, che presentano dinamiche di consumo energetico anomale rispetto ai giorni lavorativi, si riduce la variabilità nei dati. Ciò migliora l'affidabilità dei modelli di regressione utilizzati per analizzare le prestazioni energetiche dell'UTA. La stessa situazione si ripresenta per il periodo successivo all'implementazione della regolazione, come evidenziato nelle due figure successive.

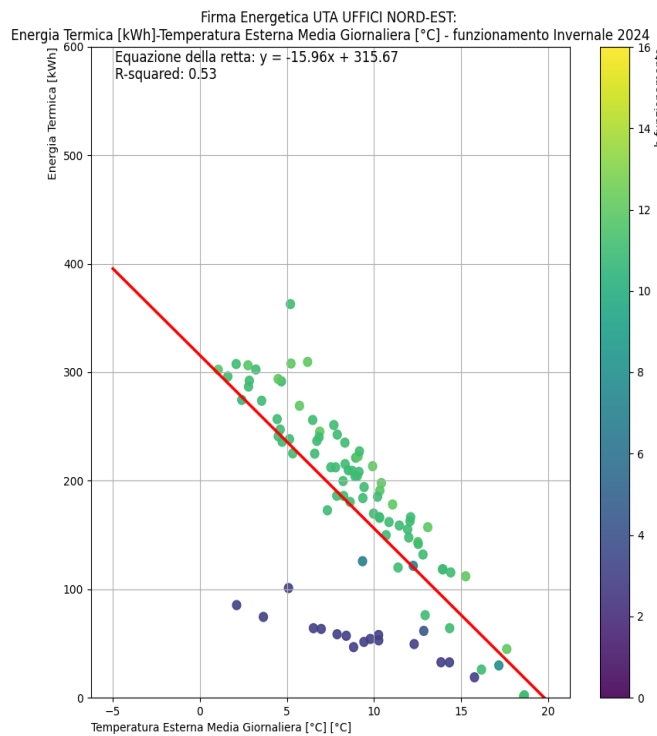


Figura 57 - Firma energetica Uta uffici Nord-Est postregolazione I

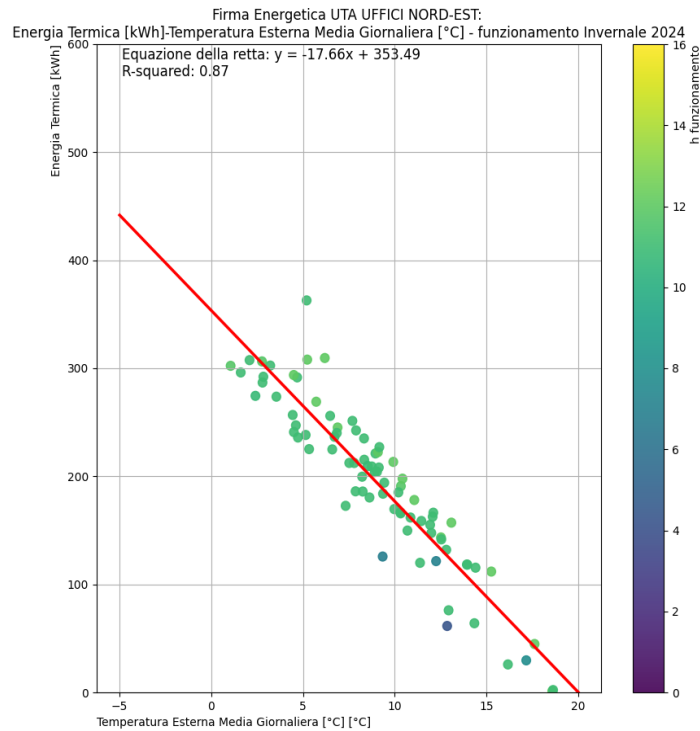


Figura 58 - Firma energetica Uta uffici Nord-Est postregolazione II

Dal confronto tra le due firme energetiche classiche emerge che, giornalmente, si registra un risparmio energetico nel periodo successivo all'implementazione della regolazione proposta da Eurix. Questo è evidenziato dalla pendenza della retta di interpolazione del periodo successivo, rappresentata dalla linea verde, che risulta inferiore rispetto a quella del periodo precedente.

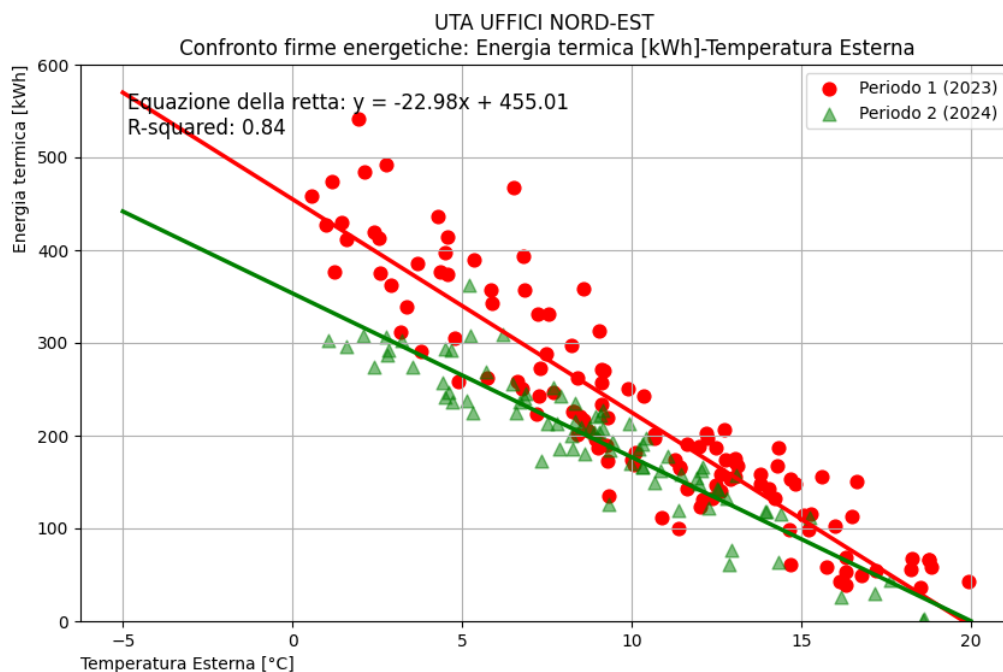


Figura 59 - Confronto Firme UTA Uffici Nord-Est



Analogamente a quanto fatto per le altre UTA analizzate, sono state elaborate le firme energetiche che mettono in relazione il consumo specifico con la temperatura esterna media giornaliera. Questo tipo di confronto consente di mostrare in maniera più chiara ed efficace l'efficienza della regolazione attuata da Eurix.

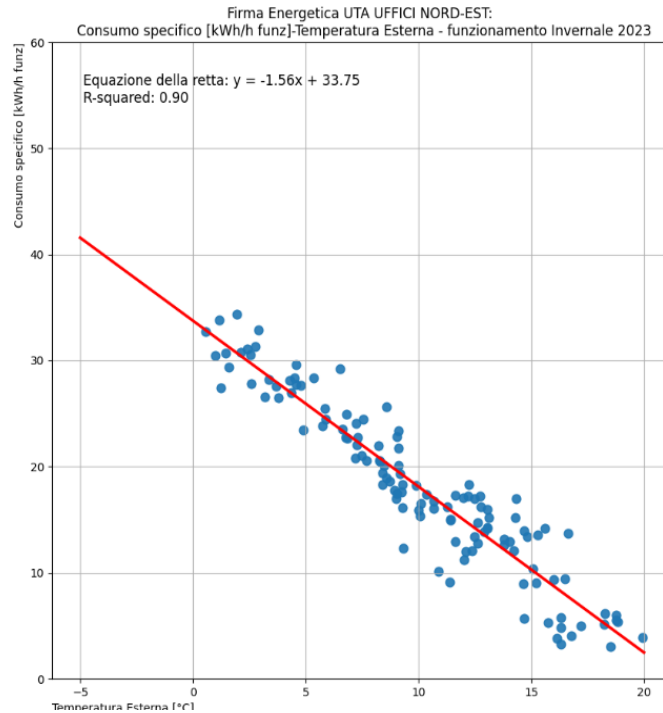


Figura 60 - Firma energetica (consumo sp.-T ext )Uta Uffici Nord Est prerregolazione

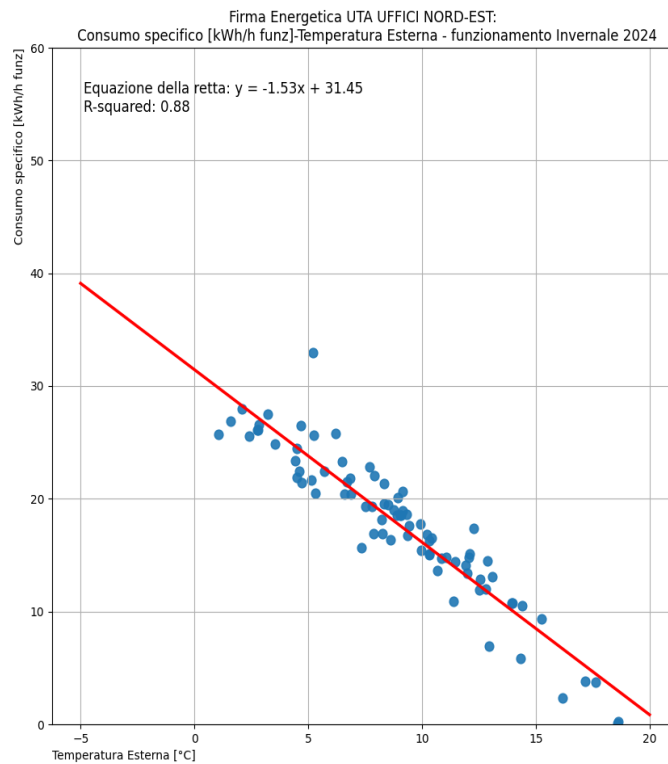


Figura 61 - Firma energetica (consumo sp.-T ext )Uta Uffici Nord Est postregolazione

Nella figura successiva è presentato il confronto tra i due periodi:

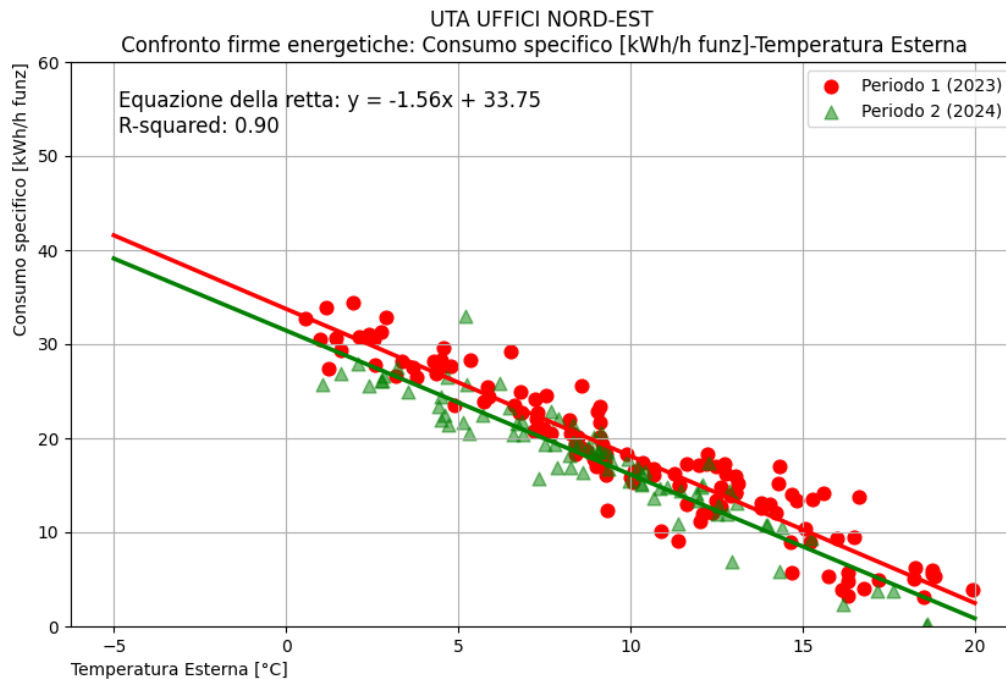


Figura 62 - Confronto Firme energetica (consumo sp.-T ext) Uta Uffici Nord Est

Dal confronto si evince il risparmio energetico ottenuto anche in termine di consumo all'unità di ora, che però è molto meno evidente rispetto ai casi precedenti. Per analizzarlo in maniera più approfondita si rimanda alle analisi del paragrafo successivo.

#### 4.5.1 Risparmio energetico

Per quanto riguarda i risparmi energetici dell'UTA Uffici Nord-Est, è stato condotto un confronto tra i consumi termici cumulativi registrati negli stessi mesi di due anni differenti: l'anno precedente e quello successivo all'implementazione dell'ottimizzazione proposta. Questo confronto ha l'obiettivo di mettere in evidenza eventuali variazioni nei consumi energetici attribuibili all'ottimizzazione. La figura seguente mostra un diagramma a barre che permette di visualizzare chiaramente il confronto dei consumi termici cumulativi nei due periodi considerati.

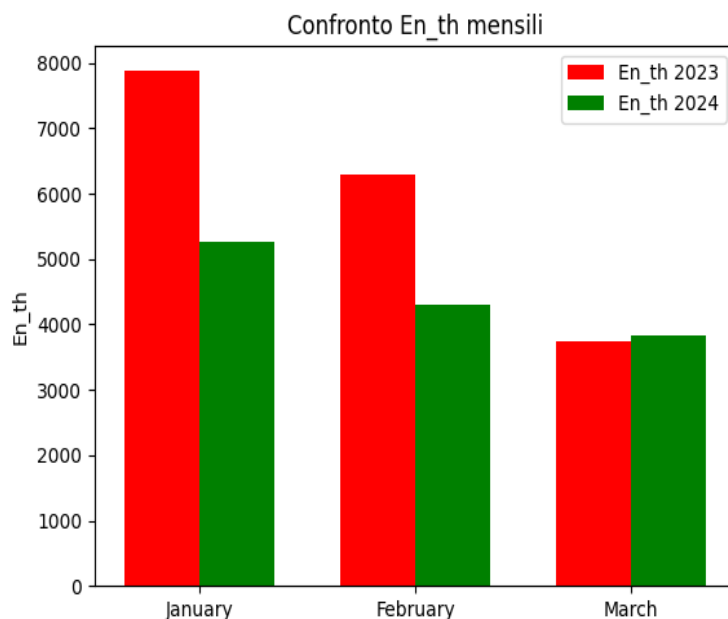


Figura 63 - Confronto dei consumi termici cumulati UTA Nord-Est

I valori di consumo sono presentati nella seguente tabella:

	<b>Gennaio</b>	<b>Febbraio</b>	<b>Marzo</b>
<b>Consumi 2023 [kWh]</b>	7881.5	6304.7	3734
<b>Consumi 2024 [kWh]</b>	5260	4299.3	3832.8
<b>RISPARMIO %</b>	33.3	31.8	-2.6

Tabella 14 - Confronto consumi termici mensili

Nel mese di gennaio e febbraio si osserva una riduzione dei consumi termici, mentre a marzo si registra un aumento, attribuibile al maggior numero di gradi giorno nel marzo 2024, come illustrato nella tabella successiva.

	<b>Gennaio</b>	<b>Febbraio</b>	<b>Marzo</b>
<b>GG 2023</b>	478.75	376.7	256
<b>GG 2024</b>	494.5	330.75	300.57

Tabella 15 - Confronto GG mensili

Per valutare il miglioramento dell'efficienza dell'impianto, sono stati confrontati, come per le altre UTA, i KPI relativi ai mesi presi in esame.

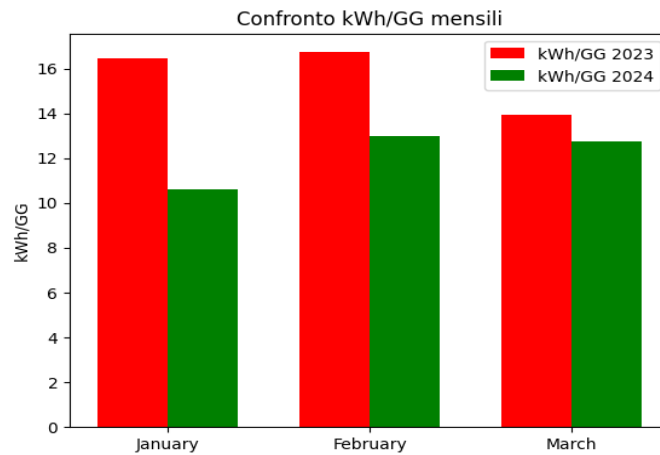


Figura 64 - Confronto KPI UTA Uffici Nord-Est

	<b>Gennaio</b>	<b>Febbraio</b>	<b>Marzo</b>
<b>KPI 2023 [kWh/GG]</b>	16.5	16.7	14.6
<b>KPI 2024 [kWh/GG]</b>	10.6	13	12.7
<b>RISPARMIO %</b>	35.7	22.1	13

Tabella 16 - Confronto KPI mensili

Per analizzare l'effettivo risparmio ottenuto grazie alle strategie di regolazione, però si deve tener conto della differenza della temperatura di set point tra le due diverse stagioni di riscaldamento come spiegato nel paragrafo 2.3.1, utilizzando lo stesso approccio dell'UTA Uffici Nord-Ovest, perciò, sono stati confrontati i consumi del mese di febbraio di entrambi gli anni, insieme a quelli di novembre 2023 per le motivazioni spiegate precedentemente.

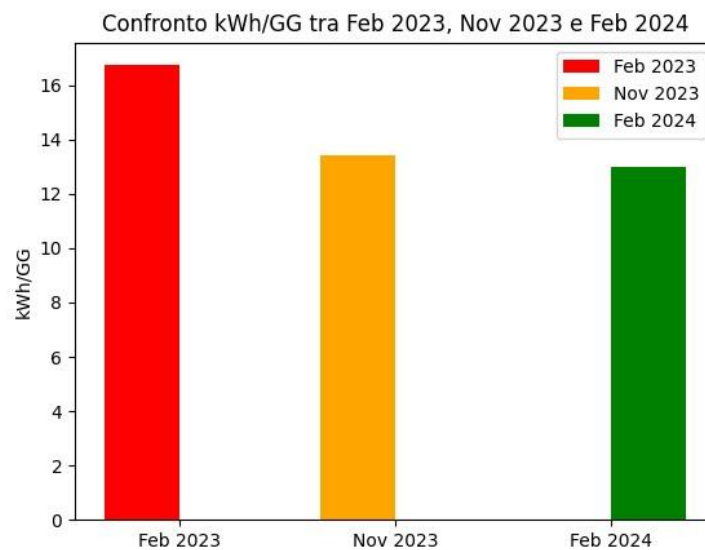


Figura 65 - Confronto KPI UTA Uffici Nord-Est II

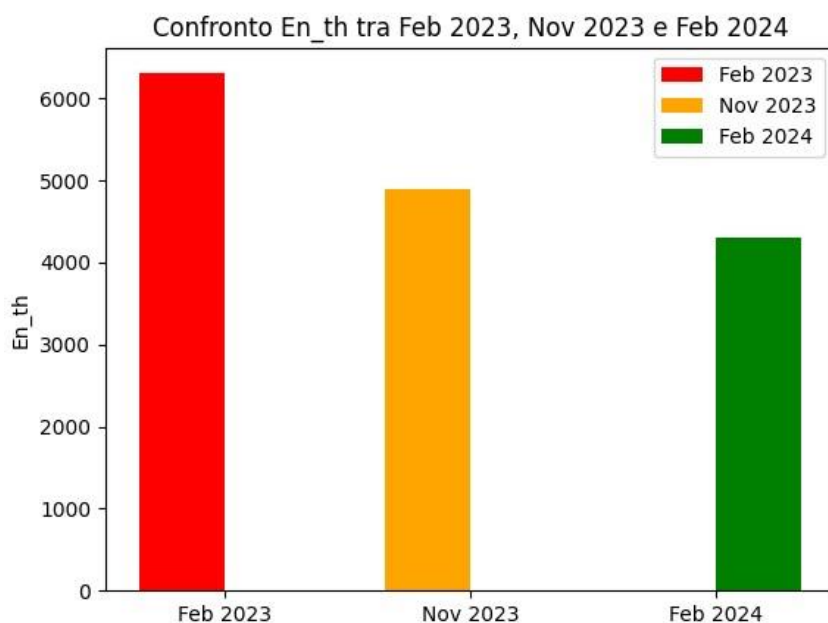


Figura 66 - Confronto Consumi termici cumulati UTA Uffici Nord-Est II

	Febbraio 2023	Novembre 2023	Febbraio 2024
<b>Gradi Giorno</b>	376.7	364.8	330.7
<b>Energia termica</b>	6304.75	4900.15	4299
<b>KPI</b>	16.74	13.43	13

Tabella 17 - Confronto risultati UTA Uffici Nord-Est

L'analisi condotta non conferma il risparmio percentuale rilevato per il mese di marzo, probabilmente perché a fine novembre 2023 si è registrato l'inizio del periodo di test. Durante questa fase iniziale, le condizioni operative non erano ancora ottimali, e ciò ha influito sui risultati di consumo ottenuti.

#### 4.6 Firma Energetica – Raffrescamento UTA Uffici Nord-Est

Per l'UTA Uffici Nord Est è stata sviluppata la firma energetica per il periodo estivo, seguendo la stessa metodologia descritta nei capitoli precedenti. L'obiettivo principale è valutare l'efficienza del sistema durante la stagione di raffrescamento, in relazione alla temperatura media giornaliera esterna.

Analogamente a quanto accaduto per le altre UTA, non è possibile effettuare un confronto diretto tra due diversi periodi di regolazione, poiché i dati attualmente disponibili riguardano solo il periodo estivo precedente all'intervento di ottimizzazione. Di conseguenza, l'analisi comparativa delle prestazioni post-ottimizzazione potrà essere eseguita solo in futuro, quando saranno

disponibili i dati relativi alla stagione di raffrescamento successiva all'implementazione delle modifiche. Nonostante l'assenza di un confronto immediato, la firma energetica ottenuta rappresenta un valido punto di riferimento per il comportamento energetico dell'impianto Uffici Nord Est nelle condizioni di raffrescamento. Questa analisi preliminare servirà da base per valutare future ottimizzazioni e misurare eventuali miglioramenti nell'efficienza energetica.

Come per le altre UTA, la firma energetica dell'UTA Uffici Nord Est è stata rielaborata escludendo i sabati, poiché questi giorni presentano un profilo operativo diverso rispetto agli altri giorni della settimana.

Infine, sono state sviluppate due diverse tipologie di firma energetica. La prima è la firma energetica classica, che collega il consumo di energia termica alla temperatura media giornaliera esterna. Questo approccio consente di identificare come varia il consumo energetico in funzione delle condizioni ambientali esterne, offrendo una panoramica generale del comportamento dell'impianto durante il periodo di raffrescamento.

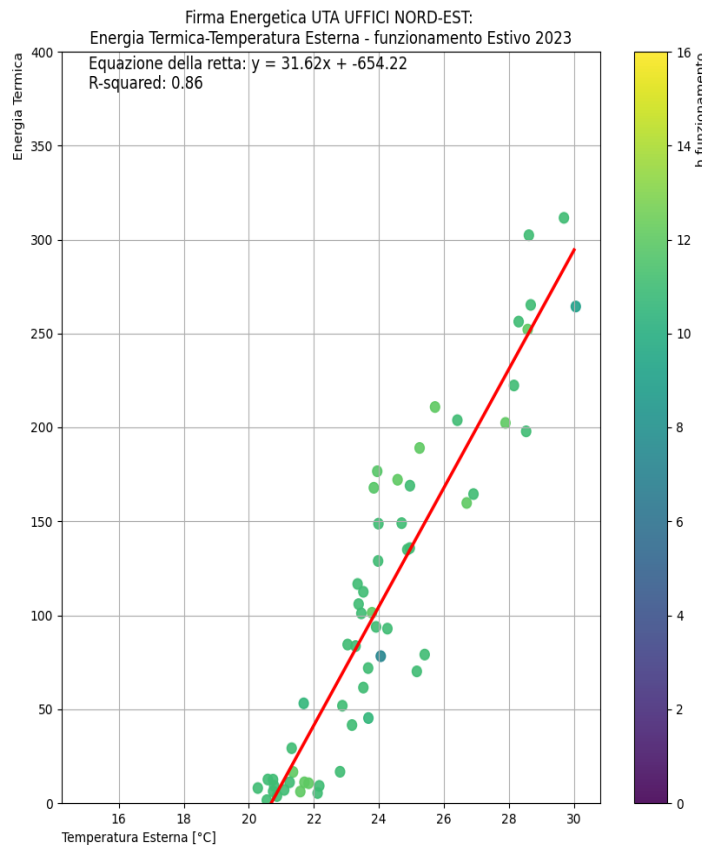


Figura 67 - Firma energetica funzionamento estivo Uta Uffici Nord-Est

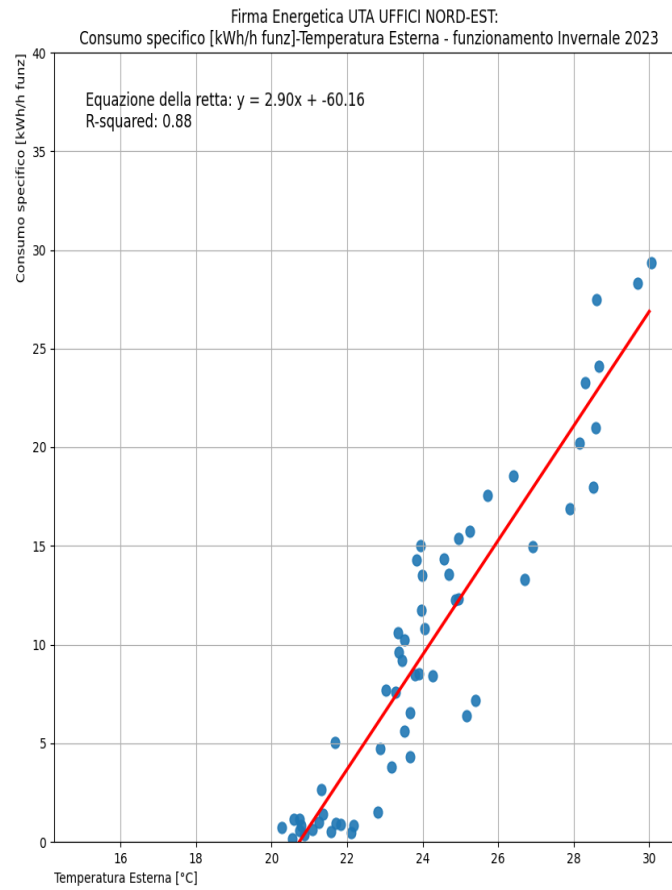


Figura 68 - Firma Energetica (cons. sp- Text) Comportamento estivo UTA Uffici Nord-Est

## 5. Conclusioni e sviluppi futuri

L'elaborato di tesi ha affrontato il calcolo dei risparmi energetici ottenuti attraverso le strategie di regolazione implementate da Eurix nelle Unità di Trattamento Aria (UTA) dell'Energy Center. In particolare, l'analisi ha riguardato tre zone termiche distinte: l'Auditorium, gli Uffici Nord-Ovest e gli Uffici Nord-Est.

Per raggiungere questo obiettivo, sono state elaborate le firme energetiche per ciascuna UTA sia in termini di consumi cumulati che di consumo specifico, al fine di normalizzare i consumi rispetto alle ore di funzionamento e confrontare periodi con condizioni operative differenti. Tutte le firme hanno mostrato un eccellente coefficiente di determinazione ( $R^2$ ), a indicare una forte correlazione tra il consumo energetico degli impianti e le variabili ambientali. Questo conferma la robustezza delle metodologie adottate per la modellazione e il monitoraggio delle UTA, validando le strategie di regolazione implementate in termini di efficienza energetica.

Il confronto tra le firme energetiche della stessa UTA, in periodi diversi (prima e dopo l'implementazione delle strategie di regolazione), ha consentito di visualizzare chiaramente i risparmi e rappresenta un primo approccio di analisi energetica.

Le firme energetiche sono state elaborate per entrambi i periodi, invernale ed estivo; tuttavia, il confronto è stato realizzato solo per il comportamento invernale, poiché i dati disponibili coprono solo il periodo estivo precedente all'intervento di ottimizzazione.

Per quantificare i risparmi, sono stati utilizzati due approcci: il primo valuta i consumi cumulati negli stessi mesi di due anni differenti, mentre il secondo si basa sul Key Performance Indicator (KPI), ossia i kWh/Giorno Gradi (kWh/GG), che normalizza i consumi in base alle condizioni ambientali esterne.

I risultati ottenuti variano a seconda dell'UTA analizzata:

- **UTA Auditorium:** È stato registrato un risparmio energetico significativo, sia in termini di consumo cumulato che di KPI. Tuttavia, questo risparmio non deriva da un miglioramento diretto dell'efficienza della regolazione dell'UTA, ma piuttosto da una gestione più efficiente e automatizzata del sistema, senza modifiche sostanziali alle variabili termodinamiche. Il risparmio è stato ottenuto principalmente grazie alla drastica riduzione delle ore di funzionamento dell'impianto (circa l'87% nel mese di febbraio), con una percentuale di risparmio energetico che rispecchia quella della riduzione delle ore di funzionamento.
- **UTA Uffici Nord-Ovest e Nord-Est:** Anche in questo caso, si è osservato un risparmio energetico, sebbene meno marcato rispetto all'UTA Auditorium. Per queste zone, è stata modificata la temperatura di set point senza ridurre le ore di funzionamento. Di conseguenza, il risparmio energetico è stato ottenuto grazie a una regolazione più efficiente delle variabili termodinamiche, con margini di ottimizzazione più ridotti. Per l'UTA Uffici Nord-Ovest, il risparmio calcolato in termini di KPI è stato di circa il 51%, mentre per la zona degli Uffici Nord-Est è stato attestato intorno al 13%.

I risultati ottenuti indicano un significativo miglioramento dell'efficienza dell'impianto HVAC, ma c'è ancora margine per ottimizzazioni ulteriori. Un'area di potenziale sviluppo riguarda l'integrazione di tecnologie avanzate, come il controllo della ventilazione basato sull'affollamento rilevato tramite sensori di CO<sub>2</sub>, che regolerebbero l'immissione di aria esterna



in base alla qualità dell'aria interna e al numero di occupanti. Un altro passo importante sarà l'analisi dei risultati per il periodo estivo, che potrebbe evidenziare ulteriori opportunità di risparmio energetico. Infine, sarebbe opportuno estendere gli interventi anche alle restanti Unità di Trattamento Aria (UTA), completando così l'ottimizzazione dell'intero sistema di gestione dell'edificio.

In conclusione, i risultati ottenuti nel contesto dell'Energy Center offrono una solida base per considerare l'estensione di questi interventi ad altre aree dell'edificio o ad altri edifici con caratteristiche simili. L'applicazione di strategie avanzate di regolazione e l'integrazione di nuove tecnologie rappresentano il futuro della gestione energetica degli edifici, contribuendo in modo significativo agli obiettivi di sostenibilità energetica e riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub>.

## 6. Riferimenti Bibliografici

- [1] McGill, R., Tukey, J. W., & Larsen, W. A. (1978). *Variations of Box Plots*. The American Statistician, 32(1), 12-16.
- [2] Tukey, J. W. (1977). *Exploratory Data Analysis*. Addison-Wesley.
- [3] European Environment Agency (EEA).
- [4] Commissione Europea - Politiche Climatiche ed Energetiche.
- [5] Parlamento Europeo - Enerma.
- [6] International Energy Agency (IEA).
- [7] The evolution of the ENERGY STAR<sup>®</sup> energy performance indicator for benchmarking industrial plant manufacturing energy use, Elizabeth Dutrow, Walt Tunnessen
- [8] ASHRAE Handbook (American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers)
- [9] Direttiva sull'Efficienza Energetica (EED): [EUR-Lex - Direttiva 2012/27/UE](#).
- [10] Strategia "Renovation Wave": [Commissione Europea - Renovation Wave](#)
- [11] A comprehensive review of variable refrigerant flow (VRF) and ventilation designs for thermal comfort in commercial buildings (2024). □ [Yat Huang Yau](#), [Umair Ahmed Rajput](#) & [Ahmad Badarudin](#)
- [12] An Influence of Air Volume Flow Rate and Temperature Set Point on Performance of Inverter Split-Type Air-Conditioner (2017), Rachapradit, S. Thepa, and V. Monyakulb
- [13] Kravchenko, O., Li, J., & Wang, W. (2019). "Application of Energy Performance Indicators for Energy Benchmarking in Industrial Plants." *Energy Reports*, 5, 124-133.
- [14] Zhang, Q., Wang, H., & Liu, Y. (2020). "Improving Energy Efficiency in Industrial Facilities Using Energy Performance Indicators: A Case Study." *Journal of Cleaner Production*, 260, 121-130.
- [15] Ahn, K. U., Kim, D. W., & Park, C. S. (2017). "Energy Performance Assessment of Variable Refrigerant Flow System using Energy Signature and Cluster Analysis." *Energy and Buildings*, 153, 297-306.
- [16] Amasyali, K., & Elhadidy, M. (2016). "Energy Consumption Forecasting for Heating and Cooling Using Degree Days." *Energy Reports*, 2, 42-51.
- [17] Tso, C., & Yau, Y. (2007). "Demand Forecasting and Benchmarking of Building Energy Consumption Using Degree Days." *Energy and Buildings*, 39(1), 76-84.
- [18] Staniškis, J., & Valius, J. (2017). "Seasonal Energy Consumption Analysis Using Degree Days: A Case Study." *Journal of Building Performance*, 8(2), 153-162.
- [19] R. McDowall, *Fundamentals of HVAC Control Systems*. 2006.
- [20] V. M. Hernández-Guzmán and R. Silva-Ortigoza, *Automatic Control with Experiments*. 2019.
- [21] S. Bennett, "Nicolas Minorsky and the Automatic Steering of Ships," *IEEE Control Syst. Mag.*, vol. 4, no. 4, pp. 10–15, 1984, doi: 10.1109/MCS.1984.1104827.
- [22] W. Bolton, *Instrumentation and Control Systems*. 2015.
- [23] V. Viktorov and F. Colombo, *Automazione dei sistemi meccanici-corso di base*. 2005.
- [24] EU, "European report energy consuming."
- [25] B. R. Mehta and Y. J. Reddy, *Industrial process automation systems: Design and implementation*. 2014.
- [26] Wikipedia, "SCADA." <https://it.wikipedia.org/wiki/SCADA>.

- [27] W. H. C. D. Kumara and K. G. A. S. Waidyasekara, "Contribution of Building Management System towards Sustainable Built Environment," Second World Constr. Symp. 2013 Socio-Economic Sustain. Constr., vol. 0, p. 11, 2013.
- [28] D. J. Brooks, M. Coole, P. Haskell-Dowland, M. Griffiths, and N. Lockhart, "Building Automation & Control Systems: An Investigation into Vulnerabilities, Current Practice & Security Management Best Practice," no. August, p. 210, 2017.
- [29] D. Caro, Industrial data communications protocols and application layers. 2016.
- [30] P. Ehrlich, "Building automation - Schneider," 2014. doi: 10.1016/b978-075067999-2/50015-2.
- [31] D. Meneghel, "REGOLATORI PID: TECNICHE DI SINTESI E PROBLEMATICHE IMPLEMENTATIVE," 2010.
- [32] Wikipedia, "PLC wiki."
- [33] P. Gabriele, E. Giacone, S. Mancò, "Dispense del corso di Gestione dei Sistemi Energetici", AA 2007-2008.
- [34] Fumo, N., & Biswas, M. R. (2015). "Regression Analysis for Prediction of Residential Energy Consumption." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 332-343.
- [35] Harish, V. S. K. V., & Kumar, A. (2016). "A Review on Modeling and Simulation of Building Energy Systems." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 1272-1292.
- [36] L. Keviczky, R. Bars, J. Hetthéssy, and C. Bányász, Control Engineering. 2019.