

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Energetica e Nucleare

Tesi di Laurea Magistrale

Analisi energetica dei consumi ante e post-ottimizzazione
delle strategie di regolazione HVAC: il ruolo di
pre-accensione e pre-spegnimento dinamico degli impianti



**Politecnico
di Torino**

Relatore:

Prof. Marco Carlo Masoero

Candidato:

Mattia Raccosta

Abstract

Italiano

Gli edifici rappresentano una componente fondamentale del panorama energetico mondiale, contribuendo in modo significativo ai consumi totali di energia; si evince quindi l'importanza di adottare misure di efficienza energetica sugli fabbricati per mitigare l'impatto ambientale e ridurre la dipendenza dalle fonti energetiche non rinnovabili. I consumi energetici degli immobili sono influenzati da una serie di fattori, tra cui la progettazione e costruzione degli edifici stessi, l'efficienza dei sistemi di riscaldamento, ventilazione e condizionamento (HVAC), l'illuminazione e l'utilizzo di dispositivi e macchinari elettrici.

In questo contesto, le soluzioni di retrofit sui sistemi esistenti giocano un ruolo cruciale nel migliorare l'efficienza energetica degli edifici, senza la necessità di demolizioni o ricostruzioni complete e impattanti. Questo progetto di tesi si propone di esaminare i consumi energetici di due edifici prima e dopo l'implementazione di una soluzione di retrofit non invasiva riguardante le strategie di regolazione degli impianti di riscaldamento esistenti, che ha come obiettivo la riduzione del fabbisogno di energia dell'edificio e dell'impatto ambientale che ne deriva, il tutto senza compromettere la qualità ambientale interna. L'analisi si svolge in due fasi: in prima battuta viene analizzato l'impatto di una strategia di regolazione adattiva per la gestione impiantistica; successivamente si verifica l'impatto che funzionalità predittive aggiuntive, quali la pre-accensione ed il pre-spegnimento dinamico, consentono di ottenere sulle prestazioni energetiche dello stabile e sul livello di comfort interno.

La proposta tecnica analizzata in questo progetto è stata implementata per un cliente della società Enerbrain, con la quale il candidato ha collaborato per i periodi di tirocinio curricolare e di tesi in azienda. La strategia di ottimizzazione HVAC di Enerbrain si basa su logiche di regolazione che derivano da un algoritmo in cloud: i dati in ingresso vengono forniti dai dispositivi installati nell'edificio, come i sensori IoT per il monitoraggio ambientale ed energetico, e grazie all'algoritmo si inviano i risultati ottenuti agli attuatori o controllori dei singoli componenti del sistema mediante segnali di comando.

In conclusione, l'obiettivo di questo elaborato è di evidenziare l'importanza delle azioni di retrofit su edifici esistenti come strategia efficace per ridurre i consumi energetici degli edifici, contribuendo sia alla sostenibilità ambientale che al risparmio economico per il costo operativo degli impianti HVAC.

English

Buildings are a key component of the global energy scenario, contributing significantly to total energy consumption; therefore, it is important to adopt energy efficiency measures on buildings to mitigate their environmental impact and reduce dependence on non-renewable energy sources. The energy consumption of buildings is influenced by a number of factors, including the design and construction of the buildings themselves, the efficiency of heating, ventilation and air conditioning (HVAC) systems, lighting and the use of electrical devices and equipment.

In this context, retrofit solutions on existing systems play a crucial role in improving the energy efficiency of buildings, without the need for complete and impactful demolitions or reconstructions. The aim of this thesis project is to examine the energy consumption of two buildings before and after the implementation of a non-invasive retrofit solution concerning the control strategies of existing HVAC systems, which aims to reduce the building's energy demand and the resulting environmental impact, all without compromising indoor environmental quality. The analysis is carried out in two stages: first, the impact of an adaptive control strategy for system management is analyzed; then, the further impact that additional predictive features, such as dynamic pre-start and dynamic pre-stop, can have on the building's energy performance and indoor comfort level is verified.

The technical proposal analyzed in this project was implemented for a customer of the company Enerbrain, with whom the candidate worked during his curricular and thesis periods. Enerbrain's HVAC optimization strategy is based on control logic derived from a cloud-based algorithm: input data is provided by the devices installed in the building, such as IoT sensors for environmental and energy monitoring, and thanks to the algorithm, the results are sent to the actuators or controllers of the individual system components via command signals.

In conclusion, the aim of this research paper is to highlight the importance of retrofit actions on existing buildings as an effective strategy to reduce the energy consumption of buildings, contributing to both environmental sustainability and economic savings for the operational cost of HVAC systems.

Sommario

1.	Introduzione.....	10
1.1	Consumi energetici degli edifici	11
1.2	Scenari futuri	12
1.3	Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza	17
1.4	Obiettivi di sviluppo sostenibile.....	18
2.	Ottimizzazione degli impianti HVAC.....	20
2.1	L'azienda: Enerbrain S.r.l.....	21
2.1.1	Monitoraggio energetico	22
2.1.2	Monitoraggio ambientale	23
2.1.3	Ottimizzazione HVAC	24
2.2	L'algoritmo Enerbrain in cloud	25
2.3	Accensione e spegnimento dinamico dell'impianto.....	25
3.	Caso studio: Campus universitario	28
3.1	Edifici e destinazione d'uso	28
3.2	Impianto termotecnico	28
3.2.1	Sistema di generazione	29
3.2.2	Sistema di distribuzione.....	29
3.2.3	Sistema di contabilizzazione.....	32
3.2.4	Regolazione impianto	32
3.3	Proposta tecnica	35
4.	Project management	36
4.1	Periodi ON-OFF e impostazioni di default	36
4.2	Analisi dei dati raccolti.....	37
4.3	Protocollo di misurazione e verifica delle performance	38

5.	Analisi dati - POC 2022/2023.....	41
5.1	Baseline dei consumi EB OFF.....	41
5.2	Risparmio energetico EB ON	44
5.3	Analisi comfort ambientale	44
6.	Analisi dati - POC 2023/2024.....	48
6.1	Gradi giorno	49
6.2	Baseline dei consumi EB OFF.....	50
6.3	Risparmio energetico EB ON	53
6.4	Analisi del comfort ambientale.....	55
6.4.1	Bâtiment 11B NORD.....	55
6.4.2	Bâtiment 11B SUD	59
6.4.3	Bâtiment 11C NORD	63
6.4.4	Bâtiment 11C SUD	67
7.	Confronto POC1 e POC2	72
7.1	Impatto pre-accensione e pre-spegnimento dinamico	76
8.	Commento dei risultati.....	81
9.	Conclusioni.....	83
10.	Riferimenti	84

Indice delle figure

Figura 1 - Domanda di energia degli edifici per fonte e per uso finale.....	11
Figura 2 - Domanda di energia degli edifici per uso finale per regioni e paesi chiave	12
Figura 3 - Domanda di energia degli edifici per fonte e per uso finale secondo diversi scenari.....	13
Figura 4 - Domanda energetica mondiale per fonte e per diversi scenari.....	15
Figura 5 - Domanda energetica in % per il riscaldamento degli edifici per vettore e per scenario.....	16
Figura 6 - Emissioni globali di CO ₂ per i 3 scenari BP.....	17
Figura 7 – Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (5).....	18
Figura 8 - Sistema Enerbrain (7).....	21
Figura 9 - Dispositivo eMeter	22
Figura 10 - Dispositivo eSense	23
Figura 11 - Esempi di orario di optimal start (9).....	26
Figura 12 - Centrale termica teleriscaldamento.....	29
Figura 13 - Schema sottostazione 11B-11C	30
Figura 14 - Circuiti riscaldamento Bâtiment 11B	31
Figura 15 - Circuiti riscaldamento Bâtiment 11C	31
Figura 16 – Misuratore di energia termica 11B-11C	32
Figura 17 - Regolazione climatica (10)	33
Figura 18 - Servomotore Schneider	34
Figura 19 - Collegamento servomotore Schneider.....	34
Figura 20 - Calendario settimanale e setpoint ambiente	37
Figura 21 - Metodo di calcolo del risparmio secondo IPMVP	38
Figura 22 - Esempio linea di regressione di ordine 2 per baseline OFF	40
Figura 23 - Esempio consumi ON rispetto a polinomiale baseline OFF	40
Figura 24 - Periodi ON-OFF del POC 1	41
Figura 25 - Grafico a dispersione POC1 consumi 11B weekday	42
Figura 26 - Grafico a dispersione POC1 consumi 11B weekend.....	42
Figura 27 - Grafico a dispersione POC1 consumi 11C weekday	43

Figura 28 - Grafico a dispersione POC1 consumi 11C weekend.....	43
Figura 29 - Carpet plot POC1 11B	45
Figura 30 - Carpet plot POC1 11C.....	46
Figura 31 - Periodi ON-OFF del POC 2	48
Figura 32 - Gradi giorno POC2 bâtiment 11B.....	49
Figura 33 - Gradi giorno POC2 bâtiment 11C	50
Figura 34 - Grafico a dispersione POC2 consumi 11B weekday	51
Figura 35 - Grafico a dispersione POC2 consumi 11B weekend.....	52
Figura 36 - Grafico a dispersione POC2 consumi 11C weekday	52
Figura 37 - Grafico a dispersione POC2 consumi 11C weekend.....	53
Figura 38 - Temperatura interna bâtiment 11B NORD dicembre	56
Figura 39 - Temperatura interna bâtiment 11B NORD gennaio-febbraio	56
Figura 40 - Carpet plot OFF POC2 11B NORD.....	58
Figura 41 - Tempo in comfort OFF POC2 11B NORD	58
Figura 42 - Carpet plot ON POC2 11B NORD.....	59
Figura 43 - Tempo in comfort ON POC2 11B NORD	59
Figura 44 - Temperatura interna bâtiment 11B SUD dicembre	60
Figura 45 - Temperatura interna bâtiment 11B SUD gennaio-febbraio	60
Figura 46 - Carpet plot OFF POC2 11B SUD.....	61
Figura 47 - Tempo in comfort OFF POC2 11B SUD	61
Figura 48 - Carpet plot ON POC2 11B SUD.....	62
Figura 49 - Tempo in comfort ON POC2 11B SUD.....	62
Figura 50 - Temperatura interna bâtiment 11C NORD dicembre	63
Figura 51 - Temperatura interna bâtiment 11C NORD gennaio-febbraio	64
Figura 52 - Carpet plot OFF POC2 11C NORD.....	65
Figura 53 - Tempo in comfort OFF POC2 11C NORD	65
Figura 54 - Carpet plot ON POC2 11C NORD	66
Figura 55 - Tempo in comfort ON POC2 11C NORD.....	66
Figura 56 - Temperatura interna bâtiment 11C SUD dicembre	67
Figura 57 - Temperatura interna bâtiment 11C SUD gennaio-febbraio	68
Figura 58 - Carpet plot OFF POC2 11C SUD.....	69
Figura 59 - Tempo in comfort OFF POC2 11C SUD.....	69
Figura 60 - Carpet plot ON POC2 11C SUD	70
Figura 61 - Tempo in comfort ON POC2 11C SUD.....	70
Figura 62 - Confronto consumo energetico EB ON POC1/POC2 11B weekday.....	73
Figura 63 - Confronto consumo energetico EB ON POC1/POC2 11B weekend.....	73

Figura 64 - Confronto consumo energetico EB ON POC1/POC2 11C weekday.....	74
Figura 65 - Confronto consumo energetico EB ON POC1/POC2 11C weekend	74
Figura 66 - Consumo energetico orario bâtiment 11B weekday	77
Figura 67 - Consumo energetico orario bâtiment 11C weekday	78
Figura 68 - Consumo energetico orario bâtiment 11B weekend	79
Figura 69 - Consumo energetico orario bâtiment 11C weekend.....	79
Figura 70 – Rappresentazione grafica delle temperature da WebApp	80
Figura 71 - Risparmi energetici per edifici POC2	81

Indice delle tabelle

Tabella 1 - Hardware Enerbrain installato	35
Tabella 2 - Fasce orarie e setpoint temperatura	36
Tabella 3 - Dettaglio report periodo POC2	37
Tabella 4 - Risultati POC1	44
Tabella 5 - Tempo in comfort POC1 11B	46
Tabella 6 - Tempo in comfort POC1 11C	47
Tabella 7 - Risultati POC2 bâtiment 11B	53
Tabella 8 - Risultati POC2 bâtiment 11C	54
Tabella 9 - Confronto EB ON POC1/POC2	75
Tabella 10 - Confronto comfort ambientale POC1/POC2	76
Tabella 11 - Risparmio complessivo POC2	82

1. Introduzione

Gli edifici rappresentano una componente fondamentale del panorama energetico mondiale, contribuendo in modo significativo ai consumi totali di energia; si evince quindi l'importanza di adottare misure di efficienza energetica sugli fabbricati per mitigare l'impatto ambientale e ridurre la dipendenza dalle fonti energetiche non rinnovabili. I consumi energetici degli immobili sono influenzati da una serie di fattori, tra cui la progettazione e costruzione degli edifici stessi, l'efficienza dei sistemi di riscaldamento, ventilazione e condizionamento (HVAC), l'illuminazione e l'utilizzo di dispositivi e macchinari elettrici.

Nel primo capitolo di questo elaborato, si riportano alcuni dati statistici e scenari futuri per avere una panoramica dei consumi energetici per gli edifici a livello mondiale e nel dettaglio a livello europeo. Nel capitolo successivo viene introdotta l'ottimizzazione degli impianti HVAC come strategia di intervento per ridurre i consumi energetici.

In questo contesto, le soluzioni di retrofit sui sistemi esistenti giocano un ruolo cruciale nel migliorare l'efficienza energetica degli edifici, senza la necessità di demolizioni o ricostruzioni complete e impattanti. Questo progetto di tesi si propone di esaminare i consumi energetici di due edifici prima e dopo l'implementazione di una soluzione di retrofit non invasiva riguardante le strategie di regolazione degli impianti di riscaldamento, che ha come obiettivo la riduzione del fabbisogno di energia dell'edificio e dell'impatto ambientale che ne deriva, il tutto senza compromettere la qualità ambientale interna. L'analisi si svolge in due fasi: in prima battuta viene analizzato l'impatto di una strategia di regolazione adattiva per la gestione impiantistica, e sarà oggetto del capitolo numero 5. Successivamente si verifica l'impatto che funzionalità predittive aggiuntive, quali la pre-accensione ed il pre-spegnimento dinamico, consentono di ottenere sulle prestazioni energetiche dello stabile e sul livello di comfort interno: entrambe le analisi di risparmio energetico e di comfort saranno inserite nel capitolo 6.

La proposta tecnica analizzata in questo progetto è stata implementata per un cliente della società Enerbrain, con la quale il candidato ha collaborato per i periodi di tirocinio curricolare e di tesi in azienda. La strategia di ottimizzazione HVAC di Enerbrain si basa su logiche di regolazione che derivano da un algoritmo in cloud: i dati in ingresso vengono forniti dai dispositivi installati nell'edificio, come i sensori IoT per il monitoraggio ambientale ed energetico, e grazie all'algoritmo si inviano i risultati ottenuti agli attuatori o controllori dei singoli componenti del sistema mediante segnali di comando.

I capitoli finali n.6 e n.7 del presente elaborato tirano le somme delle analisi svolte e dei risultati ottenuti: l'obiettivo di questo progetto è di evidenziare l'importanza delle azioni di retrofit su edifici esistenti come strategia efficace per ridurre i consumi energetici degli edifici, contribuendo sia alla sostenibilità ambientale che al risparmio economico per il costo operativo degli impianti HVAC.

1.1 Consumi energetici degli edifici

I fabbricati usano e consumano energia per mantenere gli occupanti in un livello di comfort accettabile, sia per il livello termo-igrometrico che per la qualità dell'aria. Il settore edilizio è responsabile di più del 30% del consumo totale di energia a livello globale con un valore di 133 EJ per il 2022, con un tasso di crescita dell'1% annuo (1).

Questi numeri mettono in luce l'importanza critica di affrontare l'efficienza energetica degli edifici per mitigare l'impatto ambientale e ridurre la dipendenza dalle fonti energetiche non rinnovabili, come il gas naturale, il petrolio e il carbone.

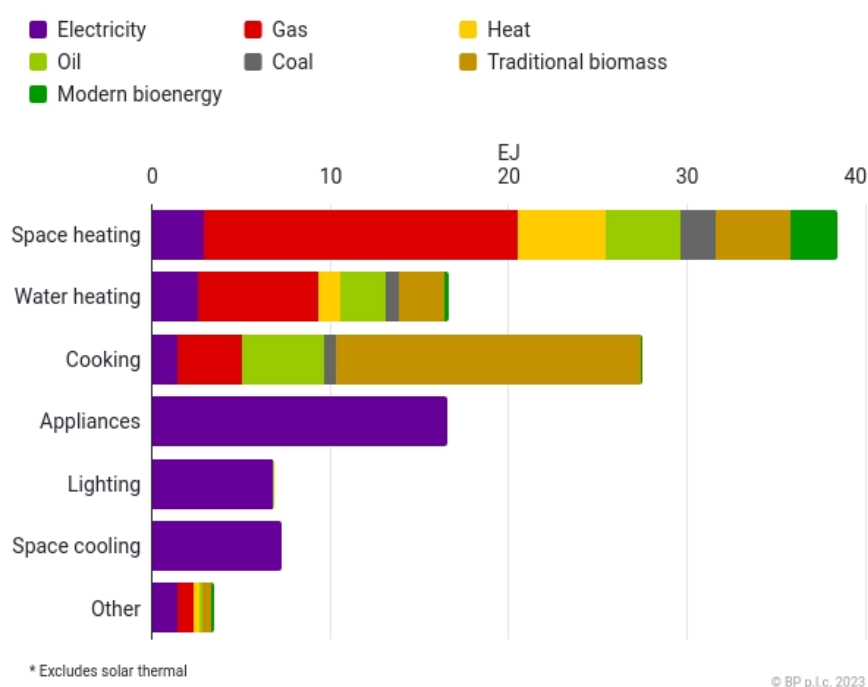


Figura 1 - Domanda di energia degli edifici per fonte e per uso finale

Il termine "Space heating" racchiude al suo interno tutti i consumi di energia da diverse fonti utilizzati con il fine ultimo di scaldare gli ambienti interni di case e uffici: come

illustrato nella Figura 1, il riscaldamento degli edifici è il fattore più impattante della domanda di energia con un valore pari a circa 38 EJ nel 2019 (2), mentre al secondo posto si trovano i consumi energetici per la cottura dei cibi.

Analizzando nel dettaglio la prima categoria, la fonte energetica più usata per la generazione di calore è il gas metano, seguito dai vettori energia elettrica, calore (come il sistema di teleriscaldamento), combustibili liquidi come il diesel e combustibili solidi come le biomasse. Per la preparazione e cottura degli alimenti la voce dominante è la biomassa tradizionale e, proseguendo, si trovano le fonti fossili come il gas naturale e il petrolio.

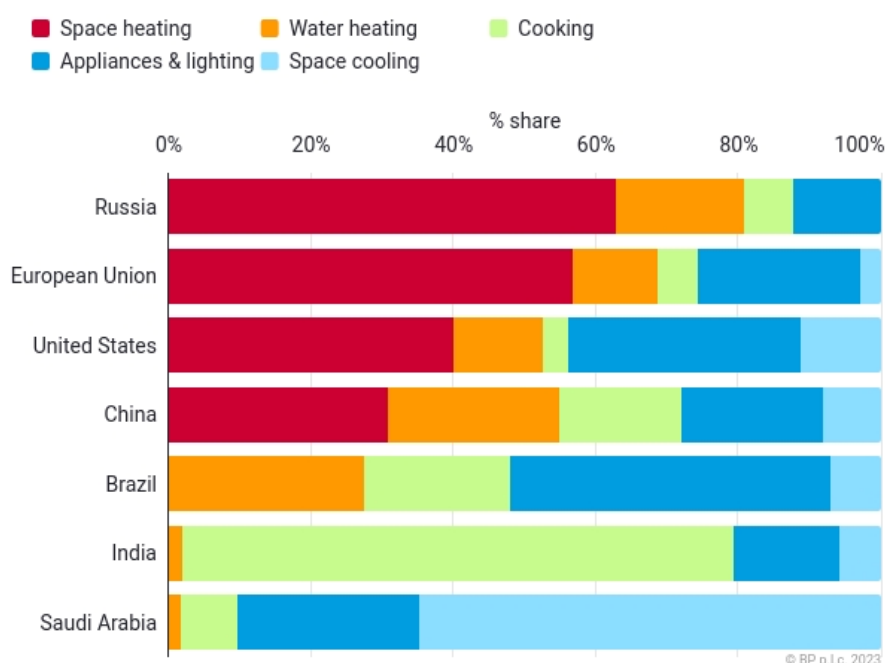
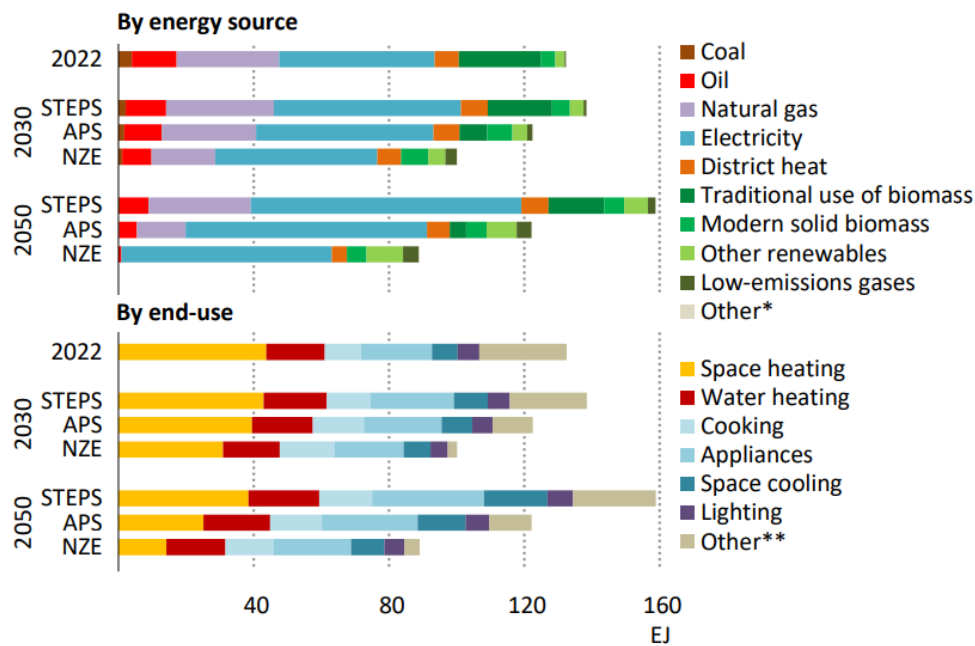


Figura 2 - Domanda di energia degli edifici per uso finale per regioni e paesi chiave

1.2 Scenari futuri

L'International Energy Agency nei suoi report utilizza 3 diversi scenari per creare degli andamenti dei consumi di energia fino all'anno 2050: Net Zero Emission by 2050 Scenario (NZE), Announced Pledges Scenario (APS) e Stated Policies Scenario (STEPS) (1). Essi sono rappresentati nella Figura 3 e per ciascuno di essi sono indicati i quantitativi stimati di energia per fonte energetica e per uso finale.



IEA. CC BY 4.0.

Figura 3 - Domanda di energia degli edifici per fonte e per uso finale secondo diversi scenari

La suddivisione per fonte di energia in tutti gli scenari predilige l'energia elettrica che può essere generata attraverso sistemi rinnovabili come pannelli solari, impianti eolici e idroelettrici, i quali contribuiscono al taglio delle emissioni di anidride carbonica.

Le diverse quote degli usi finali invece rimangono a grandi linee uguali in termini percentuali ma diminuiscono nei valori assoluti.

I 3 scenari futuri dell'IEA sono dettagliati qui di seguito:

- Scenario Stated Policies Scenario (STEPS): questo scenario rappresenta un percorso in cui vengono implementate le politiche attualmente annunciate e le misure che sono già state stabilite dai governi in tutto il mondo. Tuttavia, questa proiezione non tiene conto di eventuali cambiamenti politici o tecnologici che potrebbero accadere nel futuro. Nello scenario STEPS, le politiche esistenti contribuiscono a rallentare l'aumento delle emissioni di gas serra e promuovono l'efficienza energetica, ma non sono sufficienti per raggiungere gli obiettivi stabiliti per contrastare i cambiamenti climatici.
- Announced Pledges Scenario (APS): questa seconda proiezione rappresenta un percorso in cui vengono implementate politiche e azioni più ambiziose rispetto alla prima per raggiungere gli obiettivi dell'Accordo di Parigi sul clima e promuovere uno sviluppo sostenibile. Vengono adottate misure per massimizzare l'efficienza

energetica, aumentare l'uso delle energie rinnovabili, ridurre le emissioni di gas serra e migliorare l'accesso all'energia per le popolazioni che attualmente ne sono prive. Questo scenario APS mira a limitare l'aumento della temperatura media globale a livelli accettabili e a garantire un futuro energetico più sostenibile.

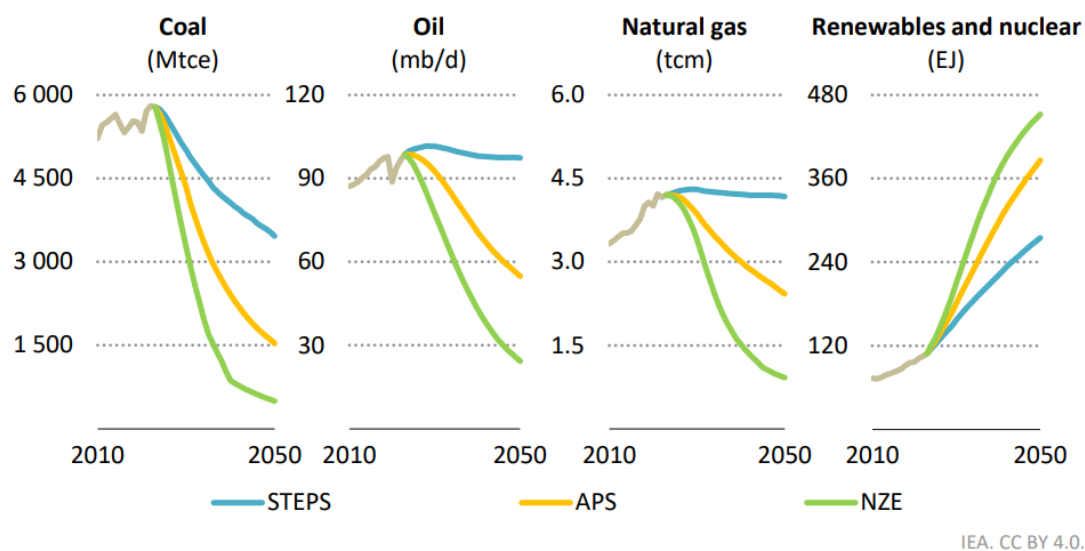
- Net Zero Emissions by 2050 (NZE): questo scenario implica una trasformazione radicale del sistema energetico globale attuale, con una rapida riduzione delle emissioni di gas serra attraverso l'adozione massiccia e diffusa di tecnologie a basse emissioni e a zero emissioni. Ciò include l'elettrificazione generalizzata dei nostri sistemi, l'uso diffuso dell'idrogeno verde, l'implementazione di moderne tecnologie di cattura e stoccaggio dell'anidride carbonica e la riforma delle politiche energetiche e industriali. Questa visione del futuro richiede un forte impegno da parte dei singoli governi del pianeta, del settore dell'industria e della società civile in generale per raggiungere gli obiettivi e garantire un futuro sostenibile per il pianeta.

L'Accordo di Parigi prima nominato è un trattato internazionale sul cambiamento climatico adottato durante la Conferenza delle Parti (COP) delle Nazioni Unite nel dicembre 2015 a Parigi (3). Questo accordo rappresenta un importante impegno globale per affrontare il cambiamento climatico limitando l'aumento della temperatura media globale al di sotto di 2°C rispetto ai livelli preindustriali, e perseguendo gli sforzi per limitare l'aumento della temperatura a 1,5°C.

La più recente conferenza sui cambiamenti climatici è stata la COP 28 e si è svolta dal 30 novembre al 13 dicembre 2023 a Dubai, negli Emirati Arabi Uniti. Il bilancio aggiornato ha evidenziato la necessità di raggiungere il picco delle emissioni globali di gas serra entro il 2025 e di una loro riduzione del 43% entro il 2030, aumentando la percentuale al 60% entro il 2035 rispetto ai livelli del 2019, sempre al fine di limitare il riscaldamento globale a 1,5 °C (4). La conferenza ha inoltre rilevato il ritardo di alcuni paesi per quanto concerne il conseguimento degli obiettivi dell'accordo di Parigi. Successivamente le parti hanno concordato di presentare entro la COP 30 i loro piani aggiornati per il clima per il 2035, che dovrebbero essere allineati al limite di 1,5 °C sulla base delle migliori conoscenze scientifiche disponibili e dei risultati del bilancio globale 2023.

L'UE e i suoi paesi durante la Conferenza delle Parti hanno incoraggiato i Paesi a concordare gli obiettivi globali in materia di energia, come l'abbandono progressivo dei combustibili fossili nel settore dell'energia entro il 2050 e la necessità di triplicare la capacità di energia rinnovabile a livello mondiale, nonché di raddoppiare il tasso di miglioramento dell'efficienza energetica entro il 2030.

Gli obiettivi che vengono fissati nelle diverse Conferenze sono dei paletti necessari per evitare l'eccessivo aumento della temperatura globale. I 3 scenari prima introdotti riflettono, in maniera più o meno marcata, le diverse scelte politiche ed economiche dei singoli Paesi: in Figura 4 sono indicati gli andamenti temporali della domanda di energia a livello mondiale differenziati tipo di combustibile e fonte primaria.



IEA. CC BY 4.0.

Figura 4 - Domanda energetica mondiale per fonte e per diversi scenari

Per i 3 combustibili fossili inseriti nella rappresentazione, ovvero il carbone, il petrolio e il gas naturale, i trend della domanda sono in diminuzione in tutti gli scenari analizzati, alcuni con valori molto bassi per NZE e APS ed altri più cautelativi per lo scenario STEPS. Le unità di misura usate nel grafico sono le seguenti: Mtce = milioni di tonnellate di carbone equivalente, mb/d = milioni di barili al giorno; tcm = triloni di metri cubi, EJ = exajoules.

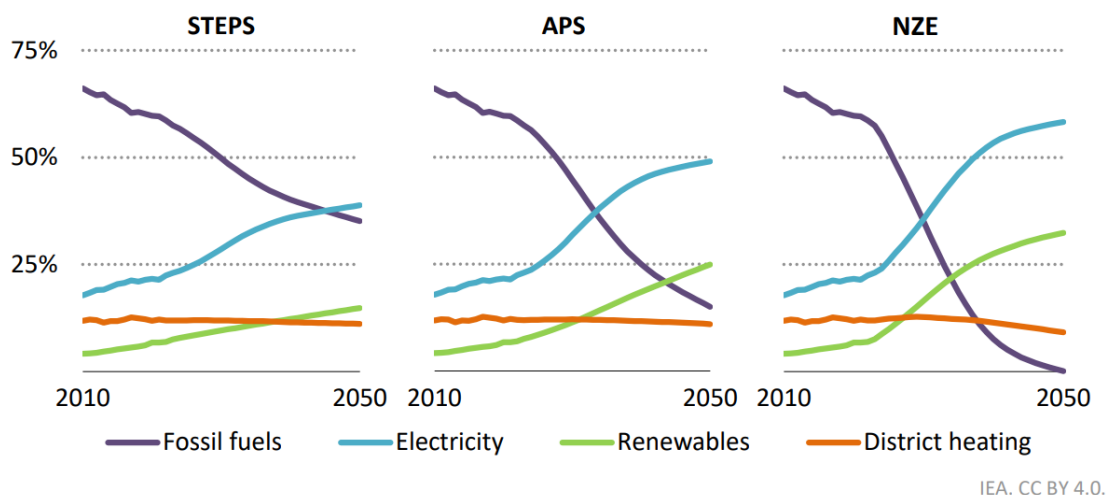


Figura 5 - Domanda energetica in % per il riscaldamento degli edifici per vettore e per scenario

Il riscaldamento degli edifici è la componente più energivora del mix degli usi finali dei fabbricati. La diminuzione della domanda di energia da parte delle abitazioni include uno shift dall'uso di combustibili fossili per il riscaldamento verso un'elettificazione dei sistemi HVAC. Nella Figura 5 la componente non rinnovabile dei combustibili fossili viene simulata in decrescita in termini percentuali da circa il 60% attuale a circa il 32% per il caso STEPS, al 20% per APS e fino allo 0% per lo scenario NZE. Il peso del teleriscaldamento viene ipotizzato costante in tutti gli scenari analizzati, mentre le energie rinnovabili e l'energia elettrica crescono entrambe in maniera proporzionale rispetto alla riduzione dei combustibili fossili.

La società British Petroleum BP, come la IEA, rilascia dei report periodici chiamati Energy Outlook: osservando l'edizione del 2023, sono rappresentati i consumi energetici a livello mondiale e sono stati stilati 3 modelli di scenario futuri, molto simili a quelli dell'IEA.

Il primo modello chiamato New Momentum viene rappresentato con il colore verde chiaro nella Figura 6: esso modella l'andamento delle emissioni globali di gas serra con la stessa traiettoria con cui il sistema energetico globale sta viaggiando attualmente, con una stima di riduzione pari al 30% rispetto alle emissioni del 2019.

Gli scenari più stringenti sono l'Accelerated e il Net Zero, nei quali si ipotizza l'introduzione di nuove norme riguardanti le emissioni generali calcolate come CO₂ equivalente: nel primo scenario si ipotizza una riduzione della quantità di anidride carbonica equivalente emessa pari al 75% entro il 2050, mentre nel Net Zero la percentuale si alza fino al 95%.

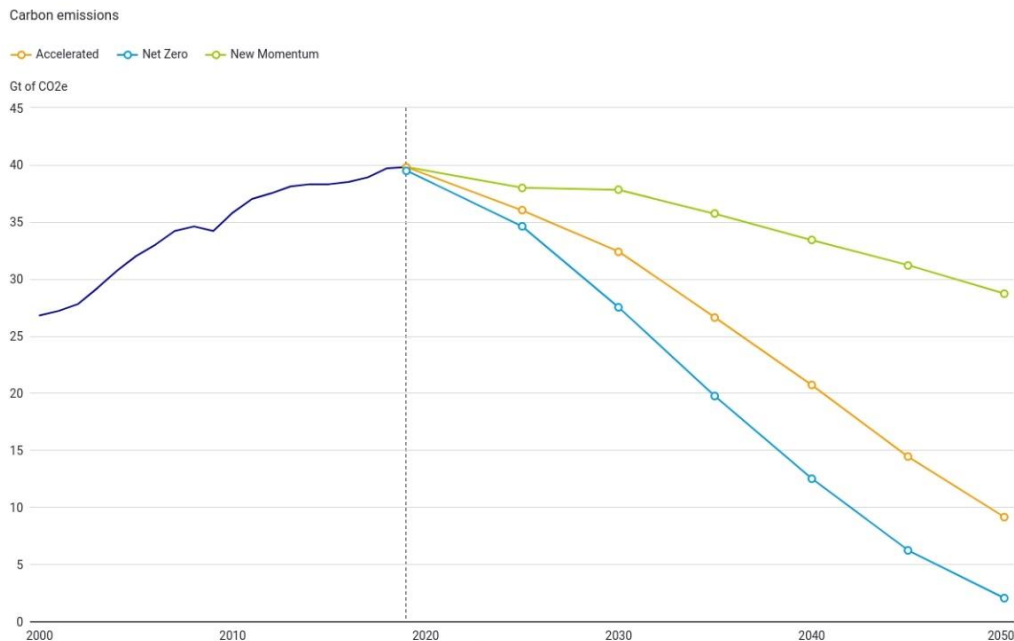


Figura 6 - Emissioni globali di CO₂ per i 3 scenari BP

1.3 Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza

Dopo la pandemia da Covid-19, l'Unione Europea ha risposto alla conseguente crisi economica con la Next Generation EU: è un'iniziativa della Commissione Europea, creata per affrontare le sfide economiche e sociali e per promuovere una ripresa sostenibile nell'Unione. Essa è parte integrante del quadro finanziario dell'UE e del Fondo di Ripresa e Resilienza (RRF). Il PNRR, acronimo di Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza, è stato sviluppato in risposta alle linee guida stabilite dall'Unione Europea e rappresenta la strategia del governo italiano per utilizzare i finanziamenti previsti dal Recovery Fund.

Il PNRR ha diverse finalità, tra cui:

- la ripresa economica: promuovere la crescita economica, la creazione di occupazione e il rilancio dei settori più colpiti dalla pandemia, come il turismo, la cultura, e l'industria manifatturiera. Questo include degli investimenti nelle infrastrutture, la digitalizzazione, una spinta dell'innovazione e della transizione ecologica.
- la resilienza e trasformazione strutturale: rafforzare la resilienza dell'Italia e promuovere la sua trasformazione verso un modello economico più sostenibile e inclusivo, in linea con gli obiettivi di sviluppo sostenibile dell'Agenda 2030 delle Nazioni Unite. Questo include necessariamente misure per affrontare le

disuguaglianze sociali, migliorare l'accesso ai servizi pubblici, promuovere l'istruzione e la formazione professionale, e contrastare il cambiamento climatico.

1.4 Obiettivi di sviluppo sostenibile

Gli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (Sustainable Development Goals) sono una serie di 17 obiettivi globali fissati dalle Nazioni Unite nel 2015 come parte dell'Agenda 2030 per lo sviluppo sostenibile (5). Questi obiettivi sono stilati per affrontare sfide globali come la povertà, l'insicurezza alimentare, la disuguaglianza, il cambiamento climatico e l'accesso all'acqua pulita. Il raggiungimento di questi obiettivi richiede la collaborazione dei governi, della società, del settore privato e di molti altri attori sia a livello globale, nazionale che locale.



Figura 7 – Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (5)

Gli obiettivi adottati dai membri delle Nazioni Unite sono i seguenti:

1. Sconfiggere la povertà: porre fine alla povertà in tutte le sue forme e in tutte le parti del mondo;
2. Sconfiggere la fame: porre fine alla fame, raggiungere la sicurezza alimentare e migliorare la nutrizione e la promozione dell'agricoltura sostenibile;

3. Salute e benessere: garantire una vita sana e promuovere il benessere per tutti, a tutte le età;
4. Educazione di qualità: garantire un'istruzione inclusiva, equa e di qualità, e promuovere opportunità di apprendimento per tutti;
5. Parità di genere: raggiungere l'uguaglianza di genere e l'emancipazione delle donne e ragazze;
6. Acqua pulita e servizi igienico-sanitari: garantire la disponibilità e la gestione sostenibile dell'acqua e delle strutture igienico-sanitarie per tutti;
7. Energia pulita ed accessibile: garantire l'accesso ad un'energia affidabile, sostenibile e moderna a tutti;
8. Lavoro dignitoso e crescita economica: promuovere una crescita economica sostenuta, inclusiva e sostenibile, nonché una produttiva occupazione e un lavoro dignitoso per tutti;
9. Imprese, innovazione e infrastrutture: costruire infrastrutture resilienti, promuovere l'industrializzazione inclusiva e sostenibile, favorire l'innovazione;
10. Ridurre le disuguaglianze: ridurre le disuguaglianze all'interno e tra i paesi;
11. Città e comunità sostenibili: rendere le città e gli insediamenti umani inclusivi, sicuri, resilienti e sostenibili;
12. Consumo e produzione sostenibili: garantire modelli di produzione e consumo sostenibili;
13. Lotta contro il cambiamento climatico: adottare misure urgenti per combattere il cambiamento climatico e i suoi impatti;
14. Vita sott'acqua: conservare e utilizzare in modo sostenibile gli oceani, i mari e le risorse marine per lo sviluppo sostenibile;
15. Vita sulla terra: proteggere, ripristinare e promuovere un utilizzo sostenibile dell'ecosistema terrestre, gestire in modo sostenibile le foreste, combattere la desertificazione e fermare/invertire la perdita di biodiversità;
16. Pace, giustizia e istituzioni solide: promuovere società pacifiche e inclusive per lo sviluppo sostenibile, fornire accesso alla giustizia per tutti e costruire istituzioni efficaci, responsabili e inclusive a tutti i livelli;
17. Partnership per gli obiettivi: rafforzare i mezzi di implementazione e rivitalizzare il partenariato globale per lo sviluppo sostenibile.

Nel dettaglio di questo elaborato di tesi, gli obiettivi che meglio riassumono le tematiche trattate sono i numeri 11 e 12 sulla sostenibilità delle comunità e sul consumo energetico.

2. Ottimizzazione degli impianti HVAC

I consumi energetici degli edifici, come dettagliato in precedenza, svolgono un ruolo molto importante e decisivo nell'uso finale dell'energia, con valori elevati di fabbisogno di energia elettrica, frigorifera e, soprattutto, termica. I fabbricati, che siano residenziali, terziari o industriali, necessitano di essere riscaldati per una buona parte del tempo durante l'arco dell'anno e necessitano di essere raffrescati, impianti permettendo, durante i periodi estivi.

Con l'acronimo HVAC (Heating, Ventilating and Air Conditioning) si intende l'insieme di sistemi e componenti impiantistici a servizio di edifici che svolgono la funzione di riscaldamento, ventilazione e raffrescamento dell'ambiente interno. Questi sistemi sono gestiti e ottimizzati da controllori chiamati BMS (Building Management System) che supervisionano l'interno edificio nelle sue diverse funzioni tecnologiche, come i sistemi per il controllo accessi, la sicurezza, l'illuminazione, gli ascensori e infine la climatizzazione; un tipo di supervisione più specifica è il sistema di gestione dell'energia chiamato BEMS (Building Energy Management System) (6) che utilizza tecnologie avanzate per monitorare, controllare e ottimizzare l'utilizzo dell'energia di uno o più edifici.

Questi controllori sono programmati con diverse logiche di funzionamento, come un contatto relè per lo stato ON/OFF, una modulazione di un inverter o una regolazione PID (proporzionale, integrativa e derivativa) per la temperatura di mandata dell'acqua. In alcuni casi queste regolazioni possono risultare banali e antiquate, non adatte al tipo di macchinario/sistema da gestire, o installate e applicate in maniera errata.

La regolazione dei sistemi HVAC oggi ha raggiunto livelli molto elevati, passando da logiche reattive e in molti casi binarie verso nuovi sistemi dinamici e predittivi. Questi nuovi livelli di ottimizzazione sono la base per ottenere un risparmio energetico a livello di sistema/edificio, per riuscire ad usare l'energia in maniera razionale pur garantendo la qualità del comfort interno per gli occupanti. I controllori più avanzati non hanno solo il compito di mantenere livelli di temperatura e CO₂ in ambiente accettabili, ma devono gestire in maniera intelligente la fonte energetica dei diversi vettori usati: per un sistema che vanta più sistemi di approvvigionamento (per l'energia elettrica possono essere la rete nazionale, l'impianto fotovoltaico, l'impianto cogenerativo o l'accumulo elettrico), il controllore deve saper scegliere con quale fonte energetica soddisfare la domanda dell'edificio basandosi su variabili come il prezzo dinamico dell'energia elettrica, radiazione solare, temperatura esterna e/o stato di carica dell'accumulo.

Le aziende a livello mondiale che si occupano di regolazione e ottimizzazione dei sistemi HVAC sono molte e tra queste c'è Enerbrain, con la quale è stata svolta questa ricerca di tesi.

2.1 L'azienda: Enerbrain S.r.l.

Enerbrain è una start up fondata nel 2015 a Torino all'interno dell'Incubatore i3P del Politecnico di Torino da un team di 4 professionisti: Giuseppe Giordano, Filippo Ferraris, Marco Martellacci e Francesca Freyra. Insieme hanno avuto l'obiettivo di monitorare la qualità dell'aria negli edifici, intervenendo con strategie per ridurre le emissioni, risparmiare energia e aumentare il comfort interno (7).

La soluzione implementata è in grado di controllare da remoto la gestione degli impianti di riscaldamento, raffrescamento e ventilazione (HVAC), connettendoli ad un sistema in cloud attraverso gli attuatori/controllori degli impianti.

Il sistema Enerbrain tipicamente include:

- dispositivi per il monitoraggio energetico e ambientale;
- controllori per la gestione dei componenti di regolazione HVAC;
- Architettura Enerbrain in Cloud per interconnettere tra loro i dispositivi, raccogliere dati in tempo reale e, grazie all'algoritmo Enerbrain, inviare comandi agli attuatori o controllori in campo;
- Web App per la visualizzazione e il download dei dati di monitoraggio e funzionamento dell'impianto e per la gestione dei setpoint e dei calendari.



Figura 8 - Sistema Enerbrain (7)

2.1.1 Monitoraggio energetico

A seconda delle caratteristiche e delle esigenze del fabbricato oggetto di intervento, Enerbrain può proporre di:

- per il monitoraggio elettrico - installare nuovi misuratori di potenza con trasformatori di corrente con modem integrato, al fine di effettuare la misura diretta del consumo e remotizzare la lettura e storicizzazione del dato sulla WebApp Enerbrain. Il dispositivo proposto da Enerbrain allo scopo è l'eMeter;
- per il monitoraggio elettrico e termico - integrare sulla Web App Enerbrain i dati letti dai misuratori esistenti tramite protocolli Modbus, M-Bus o uscite impulsive. I dispositivi proposti in questi casi sono gli eGateway e i contaimpulsi IoT;
- per il monitoraggio elettrico e termico - interfacciarsi con il sistema di monitoraggio esistente per scambiare i dati provenienti dai misuratori in campo ad esso collegati, per la visualizzazione e storicizzazione del dato anche sulla Web App Enerbrain. Il dispositivo necessario all'interfacciamento è l'eGateway.

Tali soluzioni sono tra loro combinabili, allo scopo di fornire al Cliente un servizio di monitoraggio flessibile e completo, fruibile attraverso la Web App Enerbrain.



Figura 9 - Dispositivo eMeter

2.1.2 Monitoraggio ambientale

Il monitoraggio ambientale interno avviene tramite il dispositivo denominato eSense. Esso è in grado di rilevare la temperatura, l'umidità relativa e la concentrazione di CO2 e di comunicare i dati all'architettura Enerbrain in cloud. L'installazione non richiede alcun cablaggio dato che il dispositivo è dotato di batteria ed un modulo di comunicazione IoT integrato, e viene fornito già configurato e pronto per trasmettere dati.



Figura 10 - Dispositivo eSense

I dati di comfort ambientale vengono inviati al cloud Enerbrain e da qui:

- sono visualizzabili in tempo reale e con le serie storiche sulla Web App Enerbrain;
- vengono utilizzati come dati di input per l'algoritmo Enerbrain per offrire il servizio di ottimizzazione della regolazione degli impianti di climatizzazione.

Gli eSense e gli altri dispositivi IoT comunicano con il cloud Enerbrain attraverso la rete Sigfox: la tecnologia della connessione si basa sulla comunicazione radio Ultra Narrow Band UNB a bassa frequenza (8). Le caratteristiche della rete Sigfox sono la bidirezionalità, ovvero che i dispositivi connessi alla rete possono sia inviare che ricevere messaggi, e il basso consumo energetico, grazie all'utilizzo della rete senza fili a bassa potenza e lunga distanza.

2.1.3 Ottimizzazione HVAC

Il servizio offre la gestione ottimizzata dei sistemi di regolazione degli impianti HVAC grazie alle strategie di regolazione in cloud elaborate dall'algoritmo Enerbrain. Tali strategie utilizzano come dati di input:

- le impostazioni desiderate per l'edificio (i setpoint di temperatura e gli orari di occupazione degli ambienti) che il Cliente può impostare tramite la WebApp Enerbrain;
- una serie di variabili esterne (ad esempio la temperatura esterna);
- le condizioni ambientali interne monitorate in tempo reale dagli eSense.

Sulla base di questi dati, l'algoritmo calcola i comandi ottimali per garantire il mantenimento delle condizioni interne desiderate.

L'azienda offre al cliente delle soluzioni che sono modulari e si adattano ad ogni tipo di impianto; in tutte le sue declinazioni, il sistema punta a garantire il risparmio energetico, la riduzione delle emissioni e il miglioramento del comfort interno.

La regolazione ottimizzata può essere implementata secondo tre differenti approcci:

- installando controllori IoT tra i controllori in campo ed il BMS esistente: tale soluzione non prevede alcuna modifica al BMS esistente poiché si pone "in mezzo" al flusso di comando, intercettando il segnale in arrivo al controllore e sostituendolo con il segnale elaborato dall'algoritmo in Cloud. Enerbrain definisce questa soluzione *Man in the Middle*, che vede gli eNode e gli ePLC quali dispositivi per la regolazione.
- interfacciandosi con il BMS esistente: questa soluzione presuppone una modifica al software del BMS per permettere lo scambio dati in lettura e scrittura con l'algoritmo in cloud. Quando la regolazione Enerbrain è abilitata, il BMS invierà ai controllori di campo il segnale impartito dall'Algoritmo Enerbrain. Questa opzione è definita *Enerbrain as a Service* e prevede l'utilizzo di eGateway come dispositivi di scambio dati con il BMS;
- sostituendo il sistema di controllo esistente con un BMS ex-novo già predisposto per la comunicazione con cloud Enerbrain: tale modalità di implementazione, denominata *BEMS Cloud*, è più complessa e personalizzata e viene proposta quando il BMS esistente è obsoleto ed il Cliente esprime la volontà di sostituirlo. In tal caso i dispositivi forniti saranno tutti i controllori e supervisor necessari alla

realizzazione del sistema di controllo locale, a cui abbinare gli eGateway necessari all'interfacciamento del nuovo sistema con il cloud Enerbrain.

2.2 L'algoritmo Enerbrain in cloud

L'algoritmo si basa su una logica adattiva, che ha come obiettivo il raggiungimento delle condizioni di comfort desiderate dal cliente: i comandi sono elaborati considerando la differenza tra le condizioni monitorate e le condizioni target, nonché la reazione del sistema edificio-impianto.

Il vantaggio principale di questo algoritmo è che rende possibile svincolarsi dalla geometria dell'edificio, quindi si tratta di una metodologia molto versatile che funziona su diverse tipologie di edifici.

L'algoritmo prevede la gestione di diversi tipi di componenti, sia di generazione che di distribuzione, regolando ventilazione, riscaldamento e raffrescamento degli ambienti per raggiungere i set point ambiente di temperatura e CO₂ desiderati. Il cliente può decidere il set point e l'orario di comfort/occupazione attraverso un'interfaccia che consente di modificare in modo rapido questi parametri. L'algoritmo, una volta lette le richieste inserite dal cliente, adatterà i suoi comandi in uscita rispetto alle condizioni impostate.

2.3 Accensione e spegnimento dinamico dell'impianto

Negli edifici per garantire la temperatura di comfort all'inizio dell'occupazione il sistema deve accendersi e incominciare a scaldare o raffrescare prima: per dare un'indicazione di tempo la preaccensione tipica di alcuni edifici ad uso terziario può essere valutata in 1 o 2 ore, arrivando a 3 ore per i lunedì mattina quando il sistema rimane spento per i fine settimana.

La fase di preaccensione di tipo tradizionale, con un tempo fisso di pre-accensione, ha come target quello di scaldare (o raffrescare) l'ambiente per raggiungere la temperatura desiderata. Un fattore da tenere in conto per questa strategia è che il tempo impostato di preaccensione non corrisponde sempre al tempo che l'impianto realmente necessita per raggiungere la temperatura: quando il tempo fissato è maggiore di quello reale si ha un consumo di energia più elevato perché si mantiene l'edificio in temperatura per più tempo del necessario; quando invece la preaccensione non è sufficiente per raggiungere la temperatura, si genera del discomfort interno percepito dagli occupanti.

La lunghezza della fase di preaccensione deve invece tenere conto delle diverse variabili per essere il più precisa possibile, come la temperatura esterna e quella interna. Queste due grandezze sono fondamentali in prima battuta per determinare il livello di partenza a cui si trova l'ambiente interno e in seconda battuta per stimare le trasmissioni di calore che si avranno attraverso l'involucro in funzione della differenza tra le temperature esterne e interne.

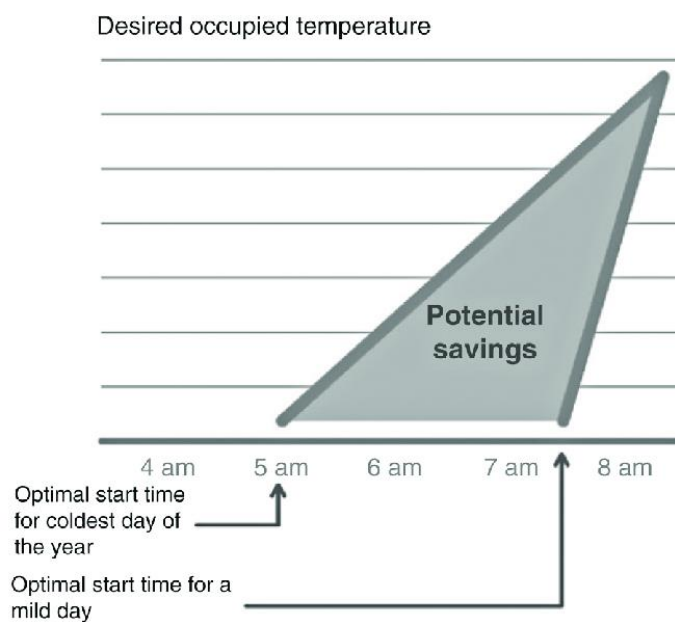


Figura 11 - Esempi di orario di optimal start (9)

In Figura 11 il valore di optimal start per la giornata più fredda dell'anno ha un valore molto diverso rispetto ad una giornata mite a fine stagione termica. Se il sistema di riscaldamento partisse sempre ad un orario fissato, l'area sottesa dalla curva di temperatura sarebbe un indicatore di quanta energia si potrebbe risparmiare mantenendo l'edificio in temperatura solo nei momenti di reale occupazione.

Alla logica adattiva del Sistema Enerbrain sono state abbinate funzionalità di tipo predittive utili a gestire il regime transitorio delle fasi di accensione e spegnimento degli impianti. Le logiche di pre-accensione e pre-spegnimento dinamico intervengono all'inizio e fine di ciascuna fascia di occupazione delle zone termiche gestite dal Sistema Enerbrain andando ad anticipare l'accensione e lo spegnimento del sistema di riscaldamento o di raffrescamento: alla base del funzionamento del codice ci sono alcune variabili coinvolte nel fenomeno fisico di scambio termico dell'involucro dell'edificio, come

la temperatura interna, la temperatura esterna e il tasso di riscaldamento dell'ambiente interno espresso in °C/h.

Per risparmiare energia e per arrivare al setpoint di temperatura ambiente, il sistema Enerbrain fa quindi affidamento sia alla logica adattiva che a quella predittiva. Nel caso studio in oggetto, introdotto nel paragrafo successivo, le due funzionalità del codice sono state unite per andare a gestire in maniera ottimizzata la regolazione dei sistemi HVAC degli edifici. Avendo svolto un periodo di analisi prima dell'introduzione della logica predittiva, per questi edifici è stato possibile svolgere un confronto tra i risultati ottenuti dal Sistema Enerbrain con la sola funzionalità adattiva rispetto a risultati riscontrati con la logica adattiva-predittiva prima descritta.

3. Caso studio: Campus universitario

Il sistema predittivo di Enerbrain è stato applicato ad un caso studio con il fine di ottimizzare la regolazione dei sistemi HVAC: il sito in questione è un Campus universitario che si trova in Francia, più precisamente nella zona nord-est della nazione.

Per motivi di privacy in questo elaborato non verranno divulgati il nome del Campus universitario o la città francese in cui sorge, e si parlerà in maniera anonima dei fabbricati e dei sistemi impiantistici oggetto di studio. Il Campus è costituito da edifici costruiti negli anni '60 in diverse fasi e pochi edifici sono stati rinnovati negli anni. Il numero totale degli edifici è di circa 80.

Il tipo di contratto stipulato con il cliente comprende l'implementazione della soluzione di ottimizzazione HVAC su 2 edifici del Campus con un progetto pilota *Proof Of Concept*, anche chiamato POC, con la soluzione tecnica *Man in the Middle* MiM.

3.1 Edifici e destinazione d'uso

Le due strutture in questione sono gli edifici numero 11B e 11C del Campus. Per quanto riguarda la struttura interna, i fabbricati sono entrambi composti dal piano interrato (sous-sol), dal piano terra (rez-de-chaussée) e dal primo piano (1er étage). Ogni piano ha una superficie interna di circa 1500 m² ed è composto da uffici, laboratori e alcune sale. Entrambi gli edifici hanno l'esposizione libera su tre lati (nord, est e sud) mentre il quarto lato è collegato con un altro bâtiment.

3.2 Impianto termotecnico

Gli edifici analizzati sono dotati di sistemi di emissioni a radiatori e/o ventilconvettori per il solo riscaldamento. Il locale centrale termica nel piano interrato è unico e serve entrambi i fabbricati. I capitoli seguenti analizzano il sistema presente per quanto riguarda la generazione, la distribuzione, la contabilizzazione e la regolazione.

3.2.1 Sistema di generazione

L'impianto si compone di una rete di teleriscaldamento che alimenta tutti gli edifici del Campus universitario. La generazione di acqua calda è affidata a 3 caldaie a gas per una potenza termica installata pari a circa 50 MW: nella Figura 12 si possono vedere le caldaie di generazione e le pompe di distribuzione dei diversi circuiti primari della rete di teleriscaldamento.



Figura 12 - Centrale termica teleriscaldamento

3.2.2 Sistema di distribuzione

Nel dettaglio degli edifici 11B e 11C, la sottostazione presente nel locale centrale termica riceve l'acqua calda da un circuito di distribuzione secondario che alimenta un totale di 6 edifici.

Il collettore della centrale termica conta 4 circuiti di distribuzione, 2 per ogni edificio:

- 11B - zona Nord;
- 11B - zona Sud;

- 11C - zona Nord;
- 11C - zona Sud.

Lo schema impiantistico della sottostazione è riportato nella seguente immagine.

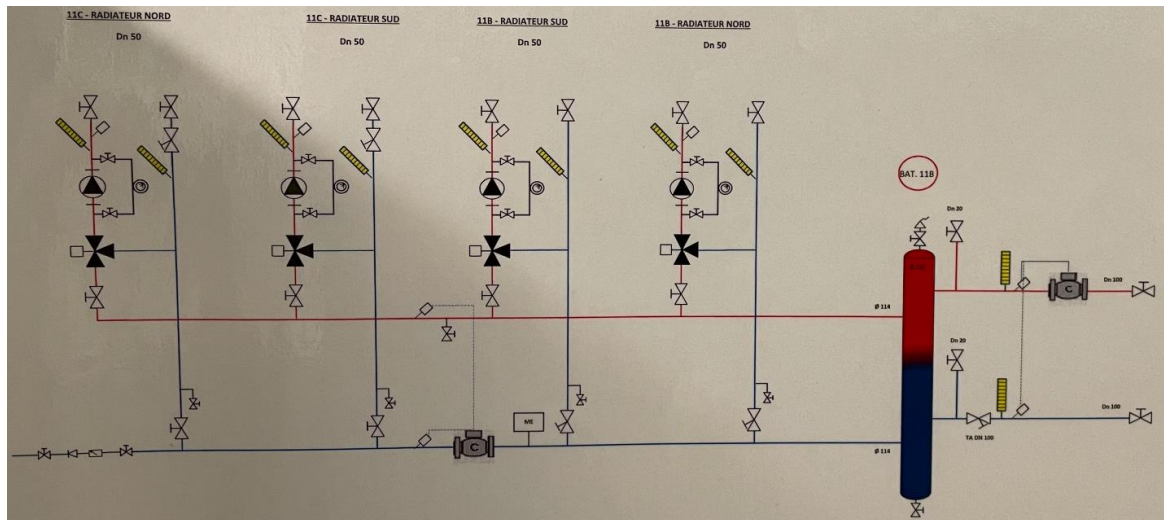


Figura 13 - Schema sottostazione 11B-11C

Ogni circuito che parte dal collettore ha un proprio circolatore e una propria valvola miscelatrice a 3 vie attuata da servomotori.

La Figura 14 e la Figura 15 raffigurano i 4 circuiti di distribuzione. Il primo collettore orizzontale è quello delle tubazioni di mandata mentre quello dietro è delle tubazioni del ritorno; a destra si vede una parte del collettore di arrivo dell'acqua dalla rete, chiamato separatore idraulico, al quale si inseriscono le tubazioni di mandata e ritorno.



Figura 14 - Circuiti riscaldamento Bâtiment 11B

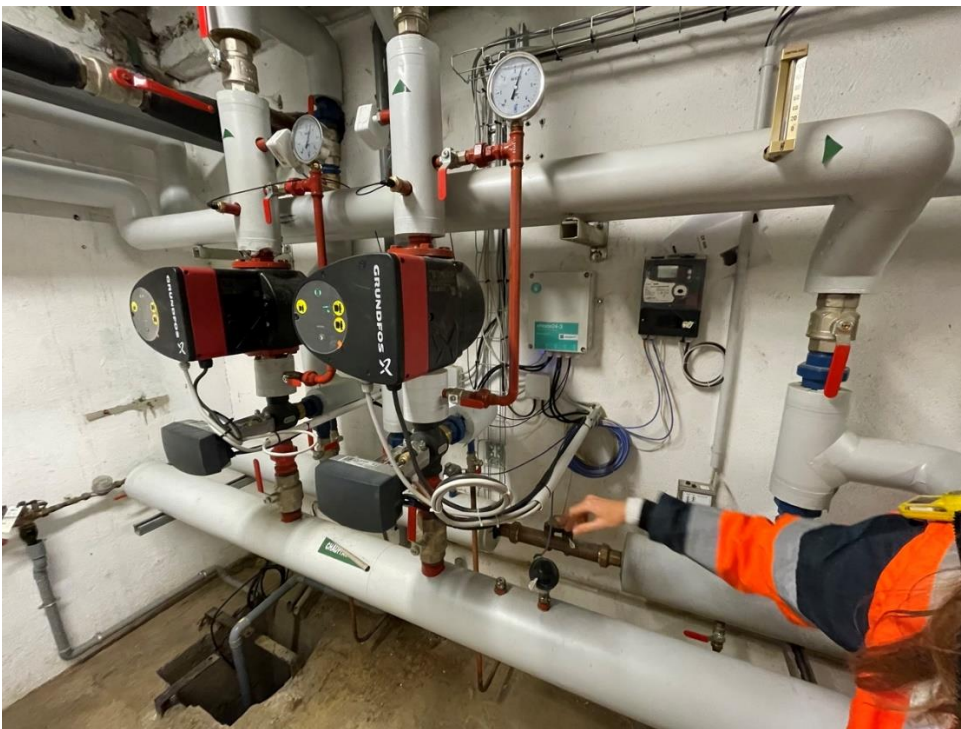


Figura 15 - Circuiti riscaldamento Bâtiment 11C

3.2.3 Sistema di contabilizzazione

La sottostazione dispone di 2 misuratori di energia termica rappresentati nello schema in Figura 13: il primo è posizionato a monte del separatore idraulico e contabilizza l'energia termica totale dei 2 edifici, mentre il secondo è inserito a valle dei circuiti del bâtiment 11B, per monitorare solo i consumi del Bâtiment 11C.

Grazie a questi misuratori di energia è possibile monitorare i consumi termici di ogni edificio, con misure dirette per il bâtiment 11C e per differenza delle letture per il bâtiment 11B.



Figura 16 – Misuratore di energia termica 11B-11C

3.2.4 Regolazione impianto

Il BMS presente nell'edificio ha una logica di controllo basata su una curva climatica a 2 punti, senza compensazione della temperatura interna.

La regolazione climatica si basa sul fatto che il fabbisogno termico dell'edificio sia proporzionale alle dispersione termiche attraverso l'involucro e per i ricambi d'aria, ed è

quindi condizionato dal valore di temperatura esterna. La temperatura di mandata dell'impianto viene quindi regolata in funzione delle reali condizioni climatiche esterne.

Il sistema di regolazione è in genere costituito dai seguenti elementi, rappresentati in Figura 17:

1. Una centralina elettronica o PLC;
2. Una sonda di temperatura dell'acqua posizionata sulla mandata dell'impianto;
3. Un sistema fisico di regolazione della temperatura tipicamente composto da una valvola miscelatrice con relativo servomotore;
4. Una sonda di temperatura dell'aria esterna.

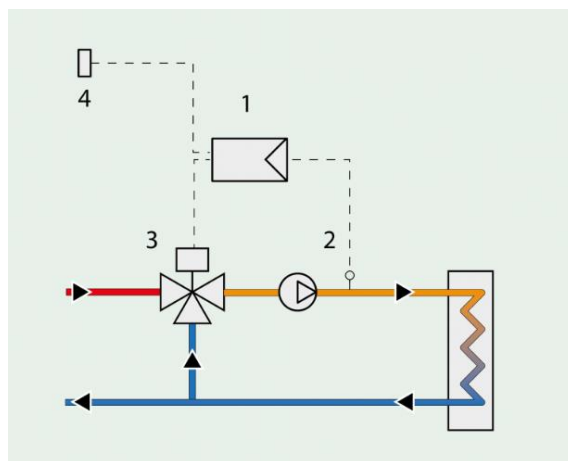


Figura 17 - Regolazione climatica (10)

Tornando al caso studio, negli edifici del campus ci sono 2 controllori e ognuno di essi controlla due valvole miscelatrici.

I servomotori e i circolatori presenti nel locale sono i seguenti:

- Circuito 11B-Nord: valvola a 3 vie attuata da servomotore Schneider FORTA M400 con comando 0-10 V e pompa Grundfoss MAGNA1 40-100;
- Circuito 11B-Sud: valvola a 3 vie attuata da servomotore Schneider FORTA M400 con comando 0-10 V e pompa Grundfoss MAGNA1 40-100;
- Circuito 11C-Nord: valvola a 3 vie attuata da servomotore Schneider FORTA M400 con comando 0-10 V e pompa Grundfoss MAGNA1 40-100;
- Circuito 11C-Sud: valvola a 3 vie attuata da servomotore Schneider FORTA M400 con comando 0-10 V e pompa Grundfoss MAGNA1 40-100.

In Figura 18 viene riportato uno dei 4 servomotori che regolano la valvola a 3 vie per la miscelazione dell'acqua di mandata. I collegamenti elettrici per l'alimentazione del servomotore e l'attuazione con comando 0-10V sono illustrati in Figura 19.



Figura 18 - Servomotore Schneider



Figura 19 - Collegamento servomotore Schneider

3.3 Proposta tecnica

Una volta raccolte tutte le informazioni sullo stato di fatto dei sistemi presenti in campo, è stato possibile procedere con l'installazione dei dispositivi Enerbrain secondo la soluzione tecnica *Man in the Middle* MiM riportata in Tabella 1:

Prodotto	Locale	Attuatore/circolatore controllato	Circuito servito	Tipo segnale/comando
eNode 24-3	CT Bâtiment 11B	Schneider FORTA M400	Bâtiment 11B - Nord	0-10 V
		Pt 1000		Temperatura mandata acqua
		Schneider FORTA M400	Bâtiment 11B - Sud	0-10 V
		Pt 1000		Temperatura mandata acqua
eNode 24-3	CT Bâtiment 11B	Schneider FORTA M400	Bâtiment 11C - Nord	0-10 V
		Pt 1000		Temperatura mandata acqua
		Schneider FORTA M400	Bâtiment 11C - Nord	0-10 V
		Pt 1000		Temperatura mandata acqua

Tabella 1 - Hardware Enerbrain installato

La proposta di ottimizzazione HVAC contiene, in aggiunta ai 2 attuatori eNode, 12 sonde eSense che sono state posizionate negli edifici (6 sonde nel Bâtiment 11B e 6 nel Bâtiment 11C) in stanze/uffici che potessero essere rappresentativi della temperatura dell'edificio: tradotto numericamente, per ciascuno dei 4 circuiti di distribuzione sono state associate 3 sonde ambientali di temperatura e umidità relativa.

4. Project management

Per gli edifici 11B e 11C sono stati effettuati 2 periodi di POC: il primo è stato nella stagione termica 2022/2023 mentre il secondo è iniziato a dicembre 2023 ed è tutt'ora in corso, con termine ad aprile 2024.

Con project management si intendono tutte quelle attività volte alla gestione dei due edifici del campus per tutta la durata del periodo POC: controllo delle temperature di mandata, verifica corretto funzionamento della regolazione climatica, monitoraggio ambientale interno, alternanza periodi ON-OFF dell'algoritmo di ottimizzazione ed eventuale supporto tecnico al cliente.

4.1 Periodi ON-OFF e impostazioni di default

Durante il periodo *Proof Of Concept* si alternano periodi di Enerbrain ON, dove l'algoritmo in cloud regola gli attuatori, a periodi Enerbrain OFF dove gli eNode vengono messi in modalità bypass, permettendo al segnale del BMS del campus di controllare i servomotori. Questa alternanza rende possibile la creazione del modello di regressione dei consumi energetici degli edifici, come dettagliato nei capitoli successivi.

Le fasce orarie di comfort da mantenere per i bâtiments sono descritte nella seguente Tabella 2:

Area code	Area name	Indoor air Setpoint maintenance schedule		Indoor air Setpoint Heating period [°C]
		Mon.-Fri.	Sat.-Sun.	Mon.-Fri.
B11B	Bâtiment 11B	8:00-11:00	Not used	20
		11:00-18:00	Not used	19
B11C	Bâtiment 11C	8:00-11:00	Not used	20
		11:00-18:00	Not used	19

Tabella 2 - Fasce orarie e setpoint temperatura

Questa suddivisione giornaliera si ripete in maniera identica per tutti i giorni della settimana, come si può vedere dal calendario dell'edificio impostato in WebApp in Figura 20.

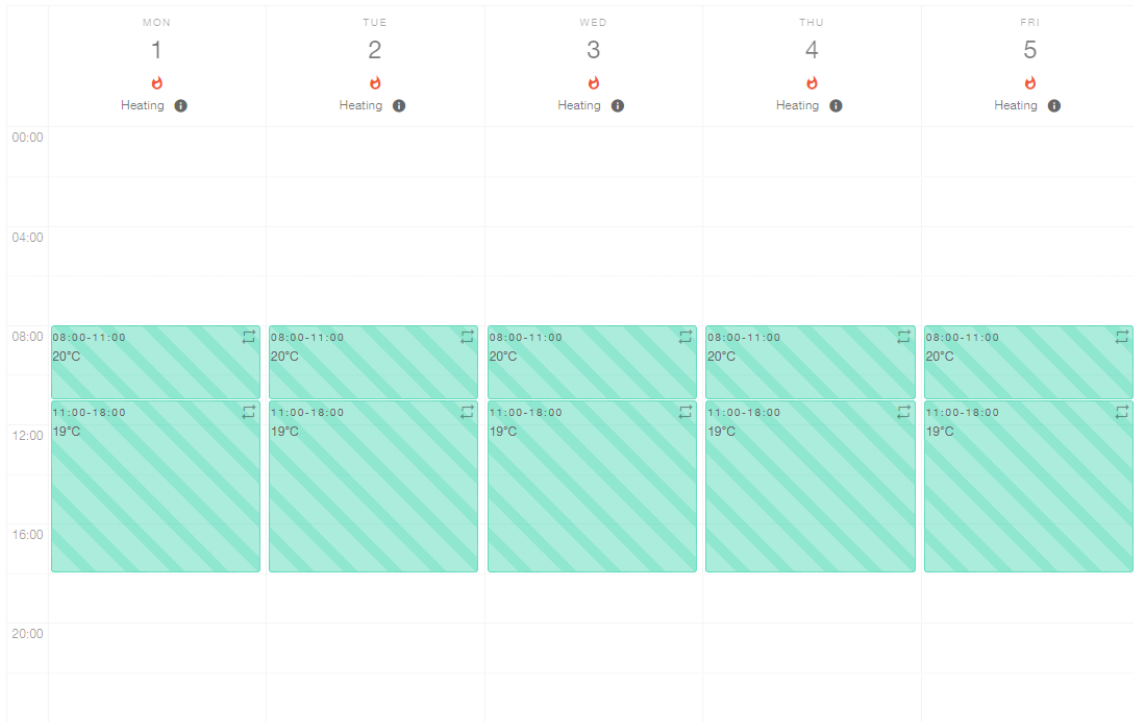


Figura 20 - Calendario settimanale e setpoint ambiente

Per iniziare a controllare il sistema HVAC, è stato inoltre necessario impostare e regolare alcuni parametri dell’algoritmo, come le impostazioni delle aree/zone termiche e dei controllori in campo.

4.2 Analisi dei dati raccolti

Il presente elaborato basa i suoi dati sul primo report che è stato inviato al cliente come da accordi del contratto POC, con le date di riferimento in Tabella 3:

Report n.	Reference Start Day	Reference End Day
1	01/12/2023	12/02/2024
2	13/02/2024	19/04/2024

Tabella 3 - Dettaglio report periodo POC2

Tra la società Enerbrain e il cliente è stato concordato inizialmente un contratto nel 2022 che prevedeva un periodo pilota per la stagione di riscaldamento 2022/2023. Esso comprendeva un totale di 4 edifici: i bâtiment 1, 2, 11B e 11C. Al termine della stagione, è stato redatto un report con i risultati ottenuti dall'ottimizzazione della regolazione HVAC degli impianti.

In questi capitoli di analisi dati sono riportati i risultati di entrambi i periodi di Proof of Concept (POC1 e POC2) per poter verificare gli effetti dell'introduzione della curva climatica compensata e della preaccensione dinamica degli impianti.

4.3 Protocollo di misurazione e verifica delle performance

L'azienda adotta un "Protocollo di Misurazione e Verifica" per fornire al cliente una previsione quanto più precisa possibile dei risparmi energetici raggiunti grazie al sistema Enerbrain. La procedura di calcolo è conforme alle linee guida indicate nell'International Performance Measurement and Verification Protocol (IPMVP) (11).

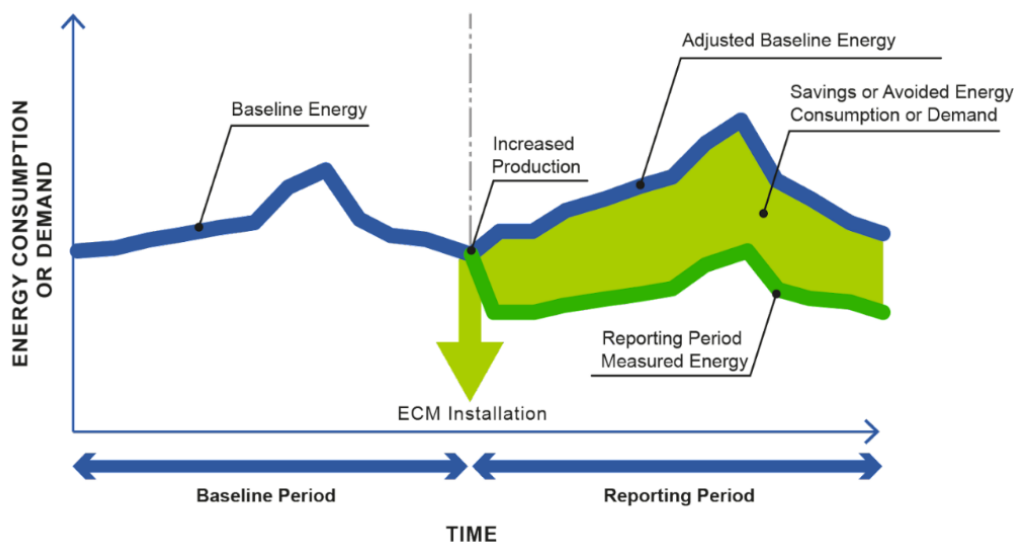


Figura 21 - Metodo di calcolo del risparmio secondo IPMVP

L'IPMVP descrive le modalità di misura per determinare in modo affidabile gli effettivi risparmi energetici generati all'interno di un singolo impianto o edificio tramite Azioni di Miglioramento dell'Efficienza Energetica (AMEE), anche attraverso periodi di prova con la regolazione alternata dei sistemi energetici (come avviene nel POC).

Il metodo prevede l'identificazione di un modello energetico che rappresenti il normale comportamento energetico di un edificio, che sarà poi utilizzato per calcolare il consumo energetico atteso in assenza di AMEE. Il risparmio sarà determinato dalla differenza tra il consumo misurato post-intervento e il consumo calcolato applicando il modello energetico.

Il Protocollo IPMVP raccomanda di identificare un modello di calcolo in grado di descrivere il consumo energetico di un edificio. La costruzione di questi modelli energetici prende in considerazione una variabile dipendente, il consumo di energia, e diverse variabili indipendenti come ad esempio i gradi giorno, la temperatura esterna, l'occupazione, il volume riscaldato o le ore di funzionamento.

Il modello energetico si costruisce attraverso il supporto di un grafico a dispersione, dove i consumi energetici giornalieri (o settimanali) in OFF vengono rapportati ad una o più variabili indipendenti (comunemente la temperatura esterna e i gradi giorno). L'insieme dei punti rappresentati avrà una tendenza descritta da una linea di regressione, con una sua equazione e con un suo coefficiente di determinazione R^2 : tale linea di regressione rappresenta la baseline di riferimento.

Il grafico della Figura 22 rappresenta un esempio di consumi di energia elettrica giornaliera per condizionamento di un edificio in funzione dalle temperature esterne. La linea di regressione identificata è una polinomiale di ordine 2: la curva evidenzia come all'aumentare delle temperature esterne aumenti anche il consumo per il raffrescamento.

Una volta identificata la baseline dei consumi, sullo stesso grafico si inseriscono le misure rilevate durante il periodo di EB ON, in modo da verificare, anche graficamente, che a parità dei valori delle variabili indipendenti il sistema di ottimizzazione stia effettivamente facendo consumare meno energia.

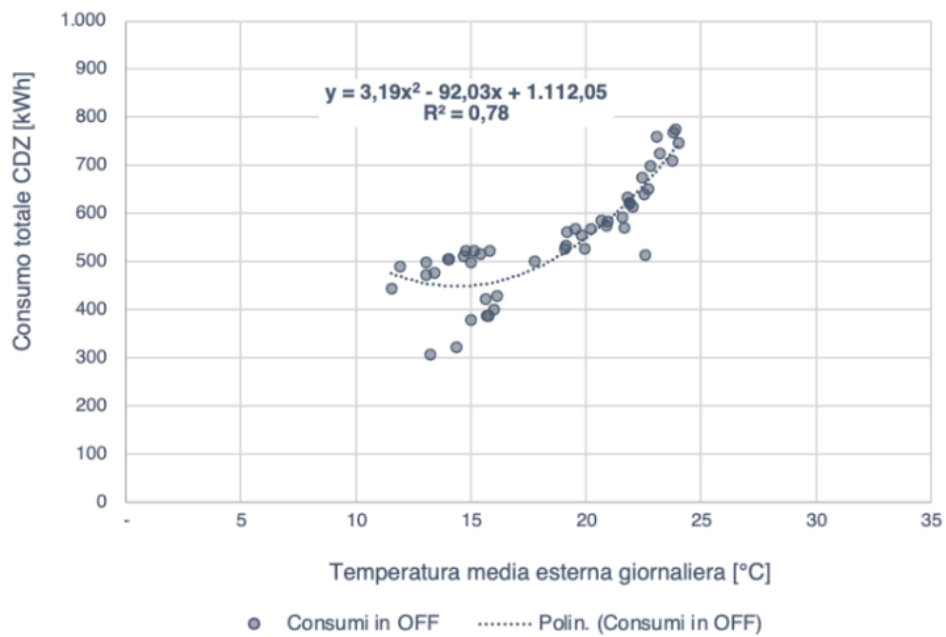


Figura 22 - Esempio linea di regressione di ordine 2 per baseline OFF

Il grafico seguente (Figura 23) illustra in maniera simile a prima la curva di baseline ricavata, sopra la quale vengono aggiunte le misure di consumo del periodo EB ON: dal grafico si può evidenziare che a parità di temperatura esterna i consumi in ON sono inferiori rispetto ai consumi in OFF (baseline).

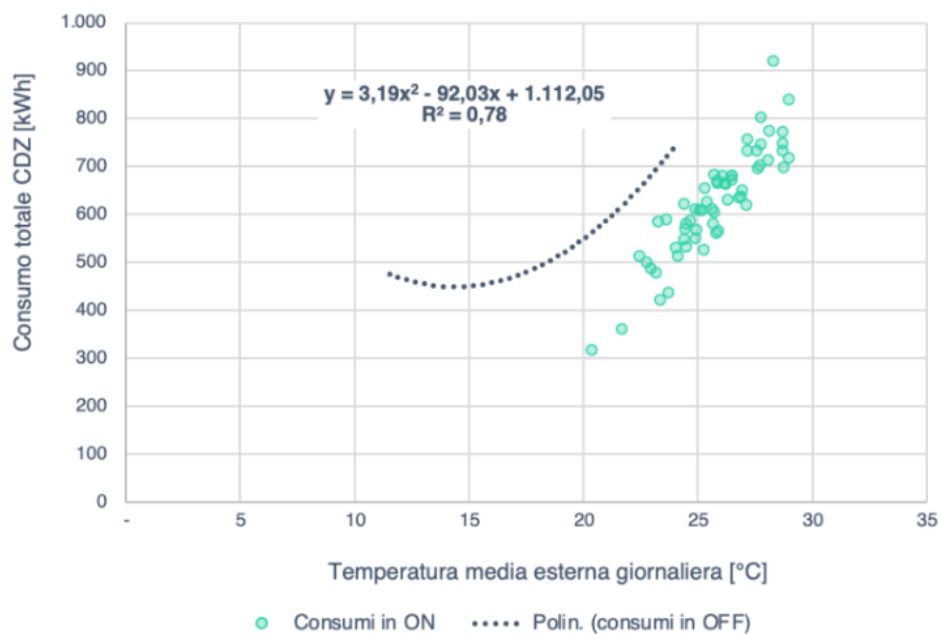


Figura 23 - Esempio consumi ON rispetto a polinomiale baseline OFF

5. Analisi dati - POC 2022/2023

Nei seguenti capitoli si riportano i dati energetici ottenuti dall'analisi dei risparmi e del comfort dal primo periodo di POC per i soli edifici 11B e 11C, oggetto di questo elaborato.

Il periodo POC è caratterizzato dall'alternanza di periodi con regolazione EB ON a periodi EB OFF dove si lascia gestire il sistema al BMS locale. L'immagine seguente mostra l'andamento nel tempo dell'inizio e della fine del POC, con indicati gli intervalli ON in verde chiaro e OFF in grigio scuro.

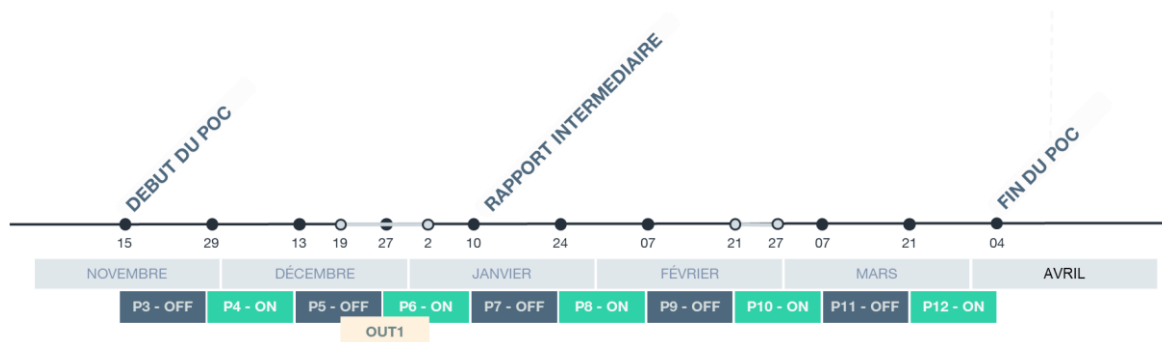


Figura 24 - Periodi ON-OFF del POC 1

5.1 Baseline dei consumi EB OFF

Come mostrato nel paragrafo riguardante la contabilizzazione, la sottostazione del teleriscaldamento è dotata di 2 misuratori di energia termica che registrano e trasmettono i consumi espressi in kWh con granularità oraria. In aggiunta a questi dati, nel foglio di calcolo è stata inserita una colonna con i dati di temperatura esterna, sempre con granularità oraria, forniti in automatico alla WebApp Enerbrain tramite un servizio di terze parti.

I 4 grafici a dispersione allegati qui di seguito mostrano in asse delle ascisse i gradi giorno giornalieri calcolati come la differenza tra la temperatura di setpoint ambiente e la temperatura media esterna giornaliera, mentre in asse delle ordinate è presente l'energia giornaliera consumata dall'edificio. Nei grafici è stata inserita l'equazione polinomiale di grado 2 per i consumi EB OFF.

Nella prima rappresentazione (Figura 25) sono stati presi in considerazione solo i giorni settimanali dal lunedì al venerdì dell'edificio 11B, mentre i giorni di sabato e domenica sono stati analizzati nel secondo grafico (Figura 26). Questa scelta è stata fatta per avere

due modelli di regressione: uno per le giornate in cui l'edificio era occupato (weekday) e uno per i fine settimana (weekend), quando gli edifici sono chiusi. Proseguendo, sono riportati i grafici per il bâtiment 11C, sempre suddivisi in weekday (Figura 27) e weekend (Figura 28).

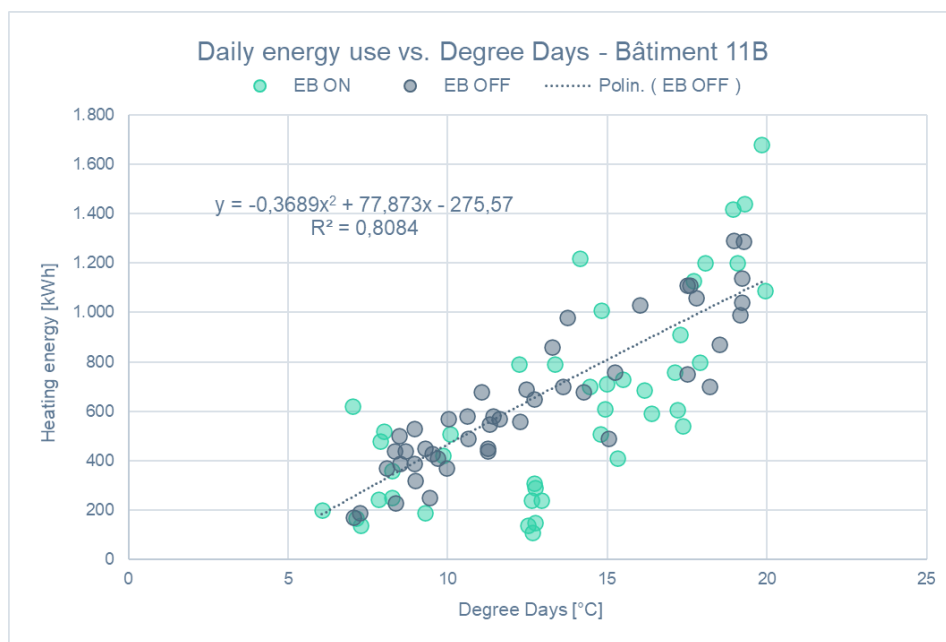


Figura 25 - Grafico a dispersione POC1 consumi 11B weekday

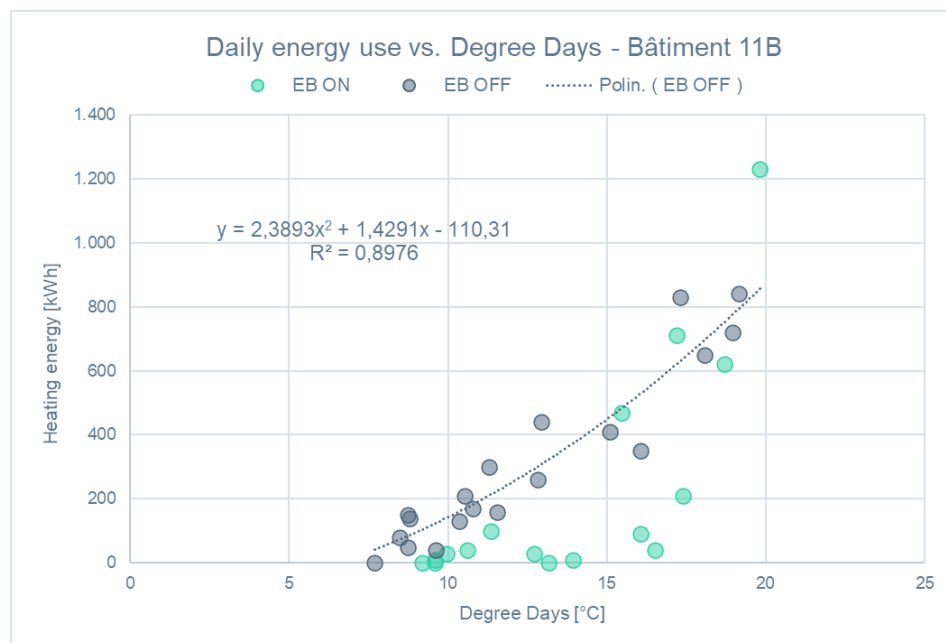


Figura 26 - Grafico a dispersione POC1 consumi 11B weekend

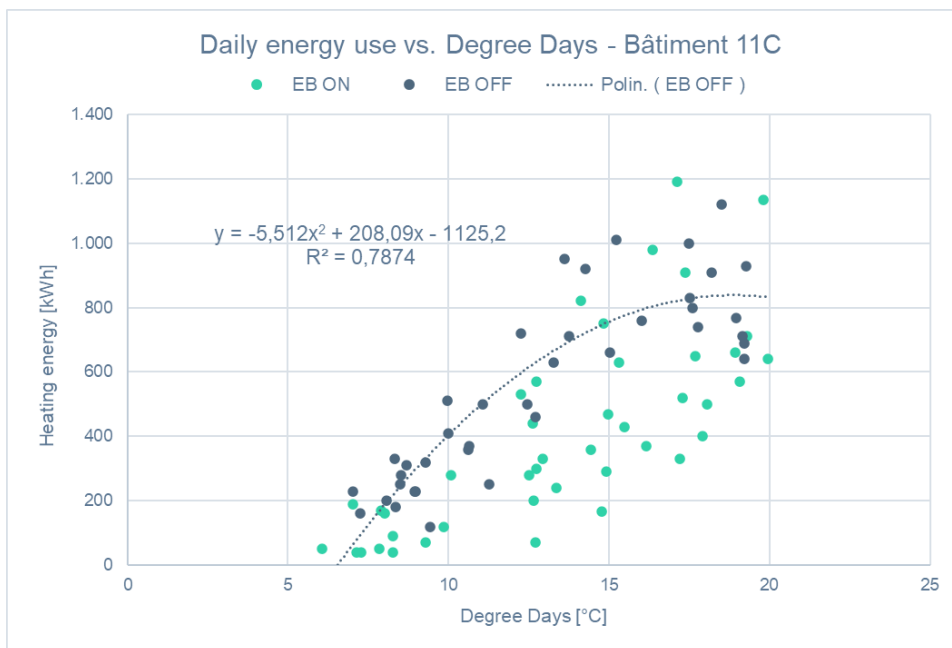


Figura 27 - Grafico a dispersione POC1 consumi 11C weekday

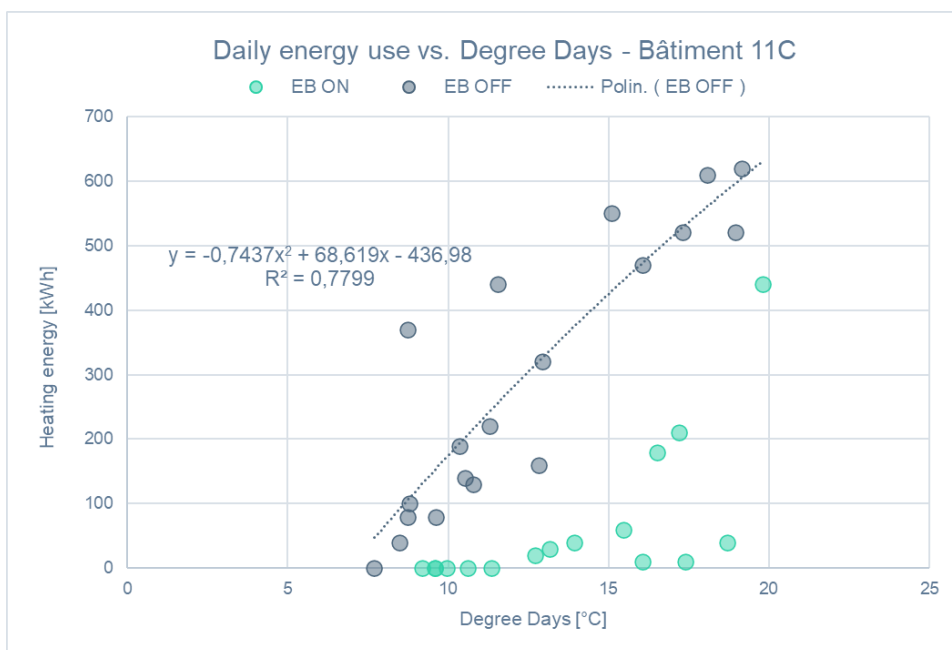


Figura 28 - Grafico a dispersione POC1 consumi 11C weekend

La linea di tendenza mostrata nel primo grafico ha un coefficiente di determinazione $R^2=0,80$ quindi l'approssimazione della dispersione dei punti EB OFF con la polinomiale risulta accettabile. La verifica, svolta anche per la seconda rappresentazione, ha riscontrato un valore pari a $R^2=0,89$.

Per il bâtiment 11C i valori ottenuti sono $R^2=0,78$ e $R^2=0,77$ rispettivamente per il terzo e quarto grafico. Il coefficiente R^2 per questi due casi risulta di poco inferiore limite del valore di accettabilità fissato a $R^2=0,8$ ma comunque rappresentativo dell'andamento della serie EB OFF.

5.2 Risparmio energetico EB ON

Le baseline dei consumi EB OFF per i giorni settimanali e del weekend sono state create: facendo la differenza tra la polinomiale e l'energia realmente consumata dall'edificio durante i periodi EB ON, si ottengono i risparmi energetici in termini di kWh.

Nella Tabella 4 sono stati inseriti i valori di energia termica risparmiata grazie alla regolazione dei sistemi HVAC da parte di Enerbrain. I dati sono stati aggregati per i singoli bâtiment in esame e i valori di risparmio energetico sono validi per tutto il periodo di POC, ovvero per la stagione termica 2022/2023.

Bâtiment	Risparmio %	Energia risparmiata
11B	11 %	3.250 kWh
11C	30 %	7.850 kWh

Tabella 4 - Risultati POC1

5.3 Analisi comfort ambientale

Le sonde ambientali posizionate negli edifici misurano i valori di temperatura e umidità relativa, e inviano i dati all' algoritmo in cloud per calcolare il segnale opportuno per gli attuatori in campo. Questa grande mole di dati è usata anche per il servizio di "Monitoraggio ambientale", all'interno del quale si svolge l'analisi del comfort ambientale. Per ogni edificio in questione, sono stati creati due grafici carpet plot: il primo con le temperatura medie orarie interne durante i periodi OFF e il secondo con i periodi ON. Le legende dei colori usati sono allegate sotto ai grafici e vanno dai 17°C ai 20°C, mentre la temperatura di setpoint è 19 +/- 1°C.

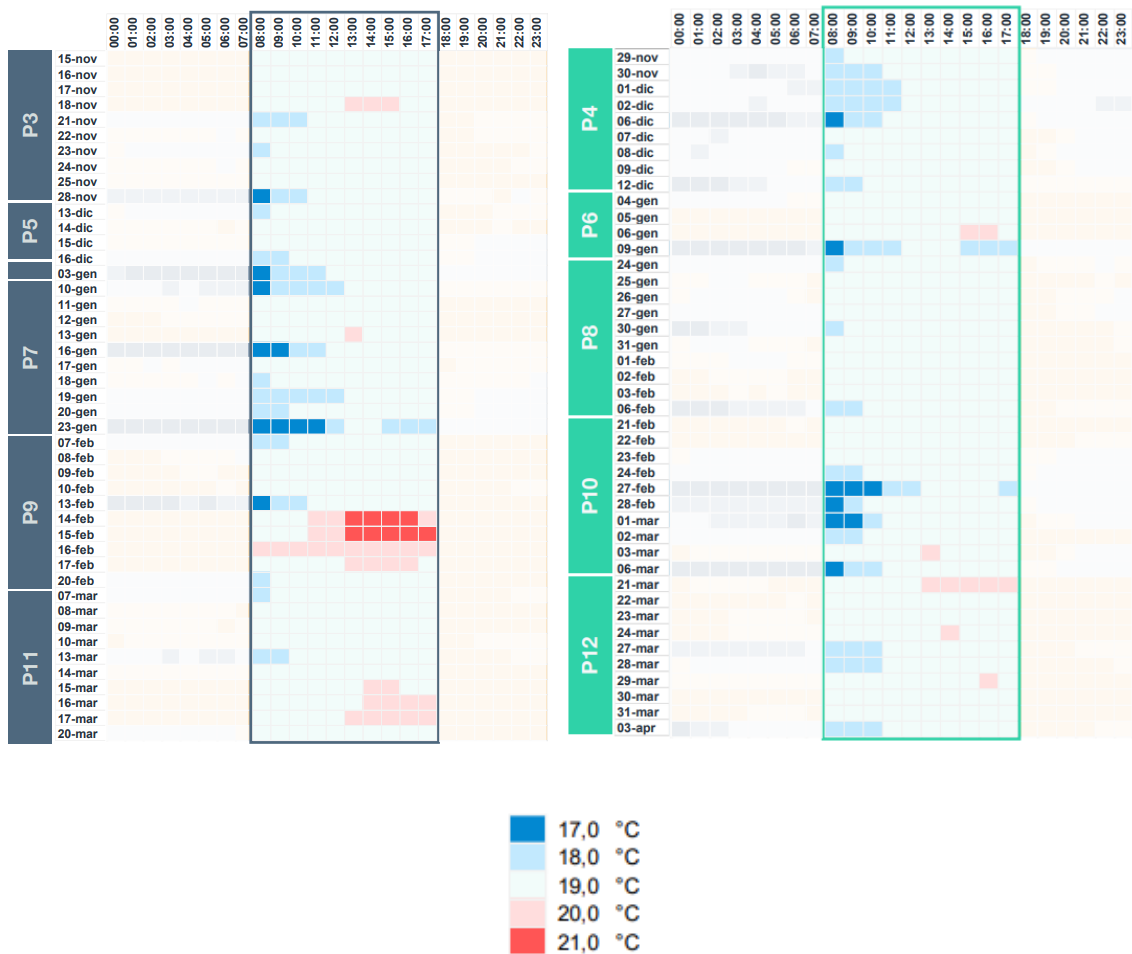


Figura 29 - Carpet plot POC1 11B

I carpet plot mostrano i diversi valori orari di temperatura durante le ore di occupazione dell'edificio, dalle ore 8 alle 18.

Nel grafico di sinistra nella Figura 29, le ore del mattino sono colorate di blu/azzurro per le basse temperature riscontrate in ambiente ad inizio settimana, dopo lo stop dell'impianto nel weekend. Nel mese di febbraio, invece, in alcuni giorni si nota una fase di overheating durante i pomeriggi. L'immagine di destra dà una panoramica delle temperature durante i periodi ON: si può notare che si sono azzerate le fasi di overheating oltre i 21°C e sono diminuite anche quelle sopra i 20°C (colore rosso chiaro/rosa). Andando su colori più freddi, i problemi di temperature basse ad inizio mattinata non vengono risolti in maniera definitiva, ma nel complesso la percentuale di tempo in comfort è aumentata, come riportato nella Tabella 5.

Enerbrain status Bâtiment 11B	Tempo in comfort [%]	T < 18°C [%]	T > 20°C [%]
OFF	79 %	11 %	10 %
ON	85 %	13 %	2 %

Tabella 5 - Tempo in comfort POC1 11B

Un lavoro identico è stato svolto per l'edificio 11C, i cui risultati sono inseriti nella Figura 30 e in Tabella 6.

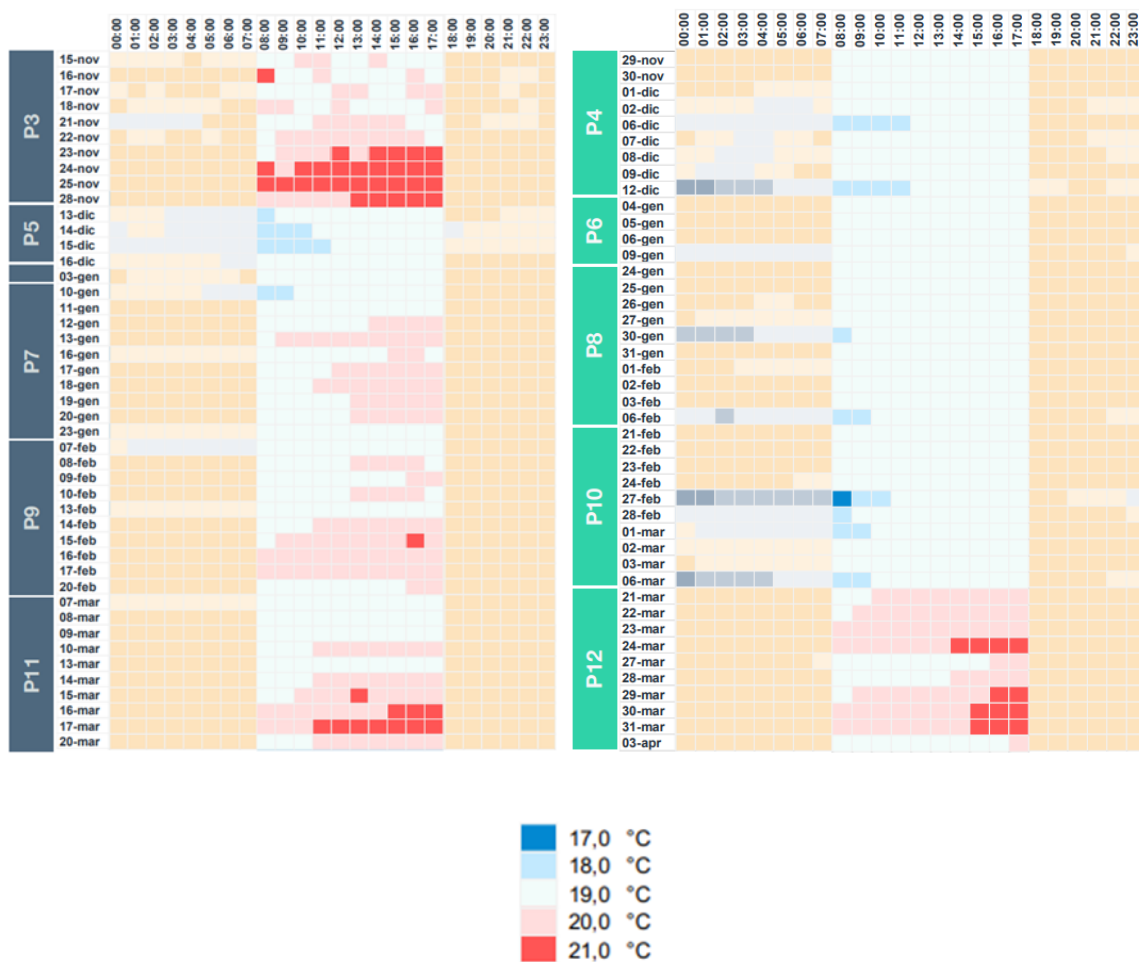


Figura 30 - Carpet plot POC1 11C

Per l'edificio 11C si notano chiaramente molte zone in overheating nei diversi mesi di analisi quando il sistema Enerbrain è OFF: in particolare il mese di marzo presenta delle temperature interne relativamente calde, sia nel grafico di sinistra che in quello di destra. Un dato visibile confrontando le due regolazioni è che l'algoritmo tende a mantenere più "fresco" l'ambiente e a prevenire l'overheating, con la conseguenza di riscontrare qualche lunedì mattina delle temperature interne leggermente più basse rispetto alla regolazione del BMS locale.

Le percentuali di tempo in comfort, con $T < 18^{\circ}\text{C}$ e con $T > 20^{\circ}\text{C}$ sono riportate in Tabella 6. Come anticipato graficamente, le temperature misurate sotto i 18°C sono state in numero leggermente maggiore nel periodo ON rispetto a quello OFF, ma in parallelo sono diminuite le ore di overheating passando dal 45% al 17% del tempo di occupazione. Per quanto riguarda le condizioni di comfort, esse sono state mantenute per il 79% del tempo, contro il 53% della fase OFF.

Enerbrain status Batiment 11C	Tempo in comfort [%]	$T < 18^{\circ}\text{C}$ [%]	$T > 20^{\circ}\text{C}$ [%]
OFF	53 %	2 %	45 %
ON	79 %	4 %	17 %

Tabella 6 - Tempo in comfort POC1 11C

6. Analisi dati - POC 2023/2024

Il secondo periodo pilota Proof of Concept è stato concordato a partire dal 1 dicembre 2023 fino al 19 aprile 2024, data di spegnimento degli impianti di riscaldamento in Francia nella zona climatica del campus. Il presente progetto POC è quello a cui l'elaborato di ricerca fa riferimento ed è stato gestito dal candidato presso l'azienda Enerbrain. Le analisi di risparmio energetico sono state svolte sulla falsa riga di quelle relative al primo periodo POC, con un focus particolare sul comfort ambientale degli occupanti: a sostegno di ciò, in questo secondo periodo pilota sono state introdotte le funzionalità di compensazione climatica della temperatura di mandata sulla temperatura esterna e su quella interna, nonché la pre-accensione e il pre-spegnimento dinamici degli impianti.

Per il progetto sono stati definiti degli intervalli di tempo in cui l'edificio sarebbe stato sotto l'attuazione da parte di Enerbrain. La prima ipotesi di lavoro era quella di iniziare già da dicembre con il periodo ON ma a causa di alcune problematiche la partenza è stata posticipata al primo febbraio; in quel periodo infatti alcuni dispositivi eSense riscontravano un basso segnale di connessione alla rete Sigfox e di conseguenza la zona SUD dell'edificio 11C rischiava di non avere nessun dato di monitoraggio ambientale su cui fare future elaborazioni. Il tutto si è risolto a fine gennaio con il posizionamento di una Base Station Sigfox la quale amplifica il segnale a beneficio dei dispositivi IoT con bassa ricezione, sia nell'edificio 11C che nell'11B.

La regolazione EB ON è dunque potuta iniziare il primo febbraio ed è terminata il 12, come rappresentato in Figura 31. Il mese di febbraio è stato scelto come mese intermedio in cui svolgere le prime analisi di risparmio energetico e comfort ambientale, essendo a metà tra dicembre e aprile. I periodi evidenziati come OUT1 e OUT2 sono invece giorni di vacanza in Francia e sono stati esclusi dall'analisi di risparmio.

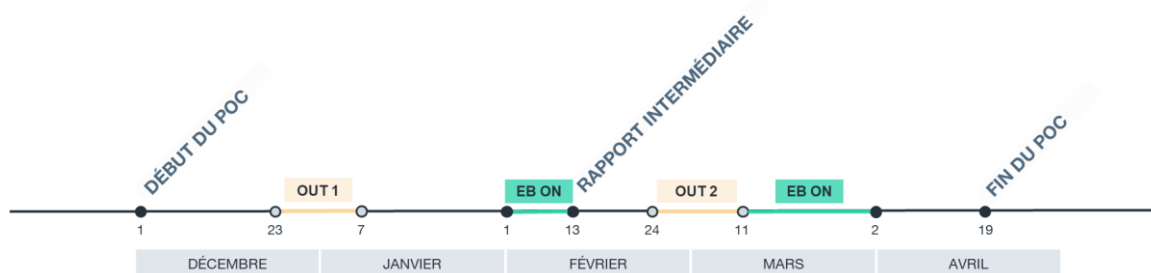


Figura 31 - Periodi ON-OFF del POC 2

6.1 Gradi giorno

Alla base della creazione delle baseline di consumo ci sono i valori di grado giorno giornalieri da inserire sull'asse delle ascisse, calcolati come differenza tra una temperatura fissata, tipicamente 20°C, e la temperatura esterna media giornaliera; in maniera analoga si possono usare i gradi giorno reali ottenuti sottraendo la temperatura interna media giornaliera alla temperatura esterna media giornaliera. Per questo specifico progetto e periodo pilota, è stato deciso di usare i gradi giorno reali, i quali racchiudono al loro interno sia l'andamento della temperatura esterna che quella interna in ambiente.

Nei grafici in Figura 32 e Figura 33, viene evidenziata la differenza tra le due opzioni di calcolo dei gradi giorno per i due fabbricati in esame.

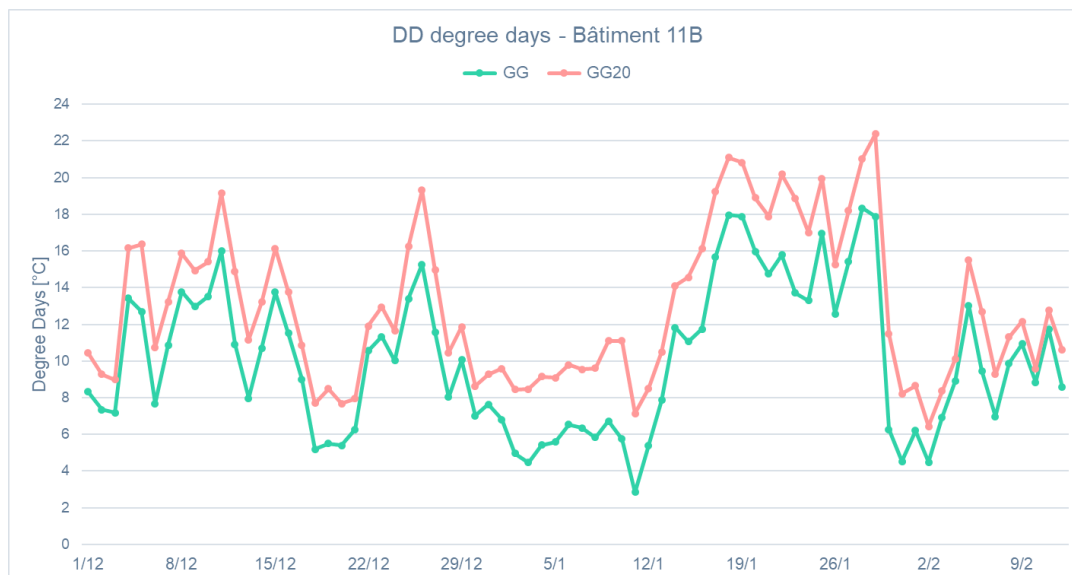


Figura 32 - Gradi giorno POC2 bâtiment 11B

Per il bâtiment 11B si nota una differenza tra la linea spezzata verde dei gradi giorno reali e quella in rosso per i gradi giorno con base 20°C: nell'edificio infatti si sono mantenute temperature più basse del setpoint ipotizzato, soprattutto nel mese di gennaio quando le temperature esterne medie giornaliere sono state negative.

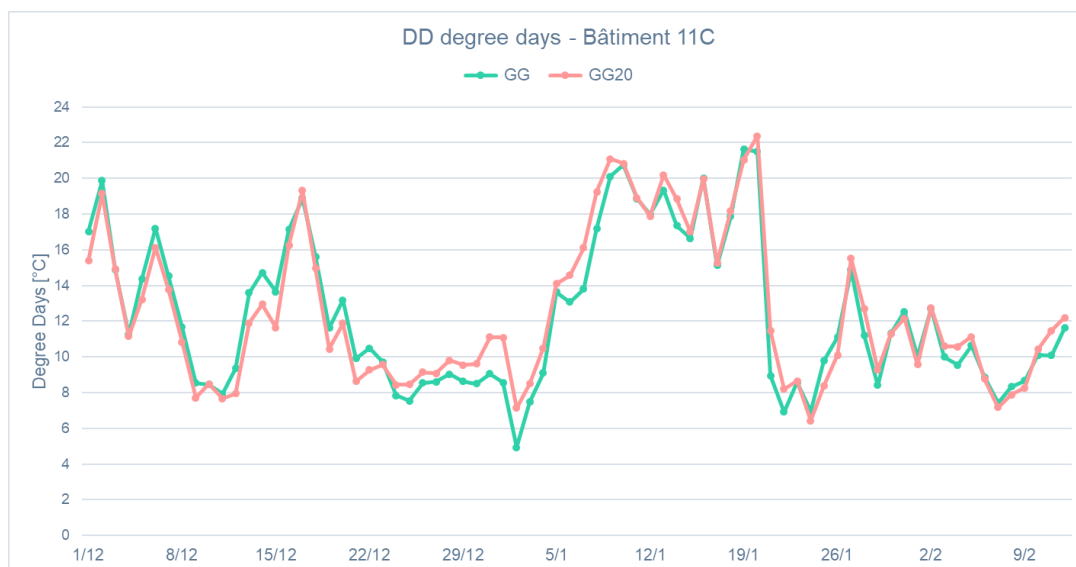


Figura 33 - Gradi giorno POC2 bâtiment 11C

Il grafico del bâtiment 11C invece rappresenta due linee che sono quasi sovrapponibili, con lievi discrepanze tra le due modalità di calcolo dei gradi giorno. Nel fabbricato infatti sono state mantenute temperature più elevate rispetto a quelle osservate nell'altro edificio.

6.2 Baseline dei consumi EB OFF

La regolazione HVAC da parte di Enerbrain è durata, e sta durando tutt'ora, per più giorni consecutivi rispetto al primo POC ma con solo 2 periodi ON; in maniera complementare c'è stato un lungo periodo di EB OFF per tutto dicembre e gennaio, quando la regolazione di Enerbrain è stata in OFF per mancanza di dati ambientali nel bâtiment 11C NORD. Questo significa che sono stati raccolti una grande quantità di dati di consumo con diverse condizioni al contorno riguardanti la regolazione EB OFF, sui quali poi verrà costruita la linea di tendenza.

Una volta definiti i gradi giorno, si possono aggregare i dati di consumo dei bâtiment arrivando ad una granularità giornaliera, per essere rappresentati nei grafici a dispersione seguenti. Analogamente al primo report, vengono differenziati i consumi energetici nei giorni settimanali dal lunedì al venerdì e nei weekend con sabato e domenica.

Le linee di tendenze sono state create a partire dalla serie di dati EB OFF attraverso un'equazione lineare con i coefficienti riportati a lato. Durante le analisi è stata vagliata

l'opzione di applicare una polinomiale di secondo grado anziché una corrispondenza lineare tra i gradi giorno e i consumi energetici; essendo i valori di riscaldamento molto allineati e vicini sulla linea di tendenza iniziale, il valore di R^2 rimaneva praticamente costante tra l'equazione lineare ed quella di secondo grado. Si è quindi preferito mantenere una relazione più semplice tra i gradi giorno e i consumi energetici, pur mantenendo una buona precisione dell'approssimazione.

I coefficienti di determinazione sono risultati sempre maggiori di 0,8 e quindi accettabili: per il bâtiment 11B i valori sono stati di $R^2 = 0,87$ e $R^2 = 0,82$, mentre per il bâtiment 11C entrambi sono pari a $R^2 = 0,86$.

Per il bâtiment 11B le baseline sono presenti nella Figura 34 e Figura 35, mentre per il bâtiment 11C i grafici sono nella Figura 36 e nella Figura 37.

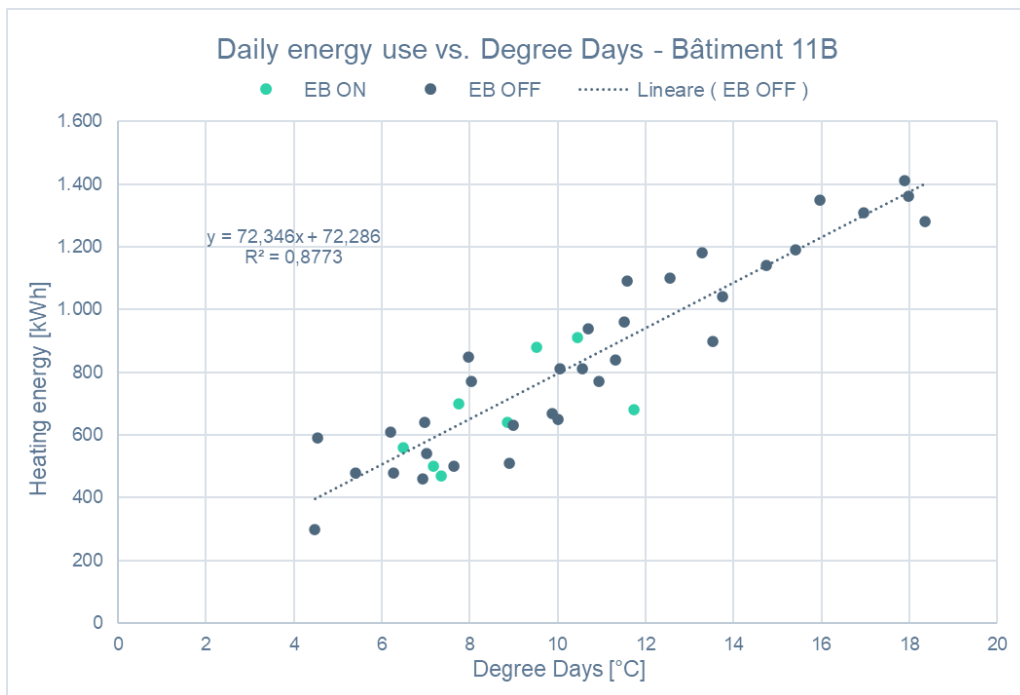


Figura 34 - Grafico a dispersione POC2 consumi 11B weekday

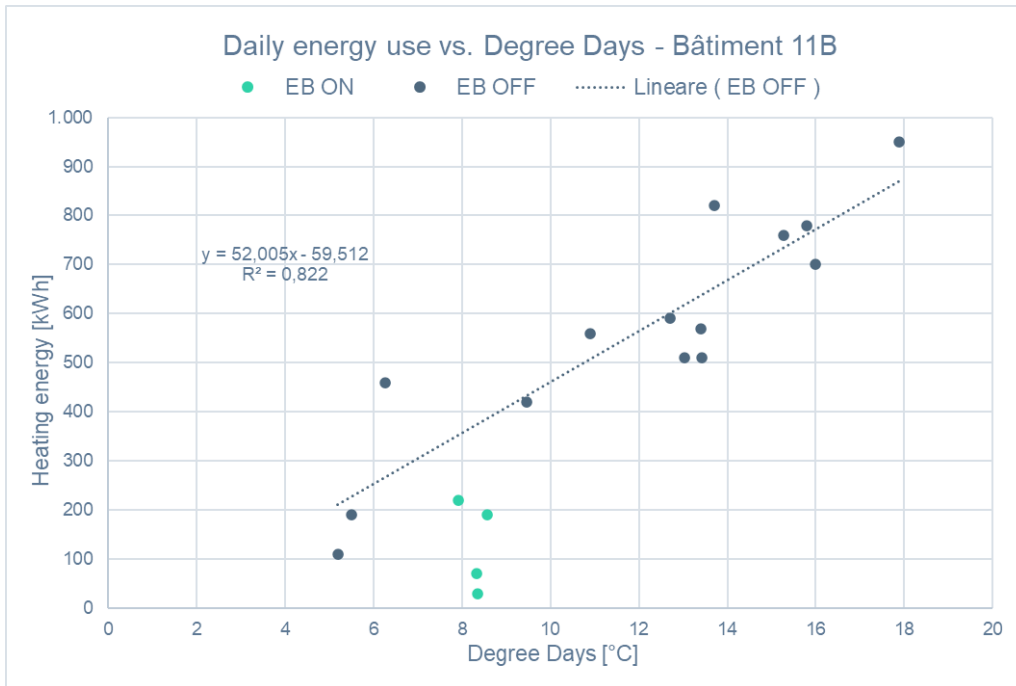


Figura 35 - Grafico a dispersione POC2 consumi 11B weekend

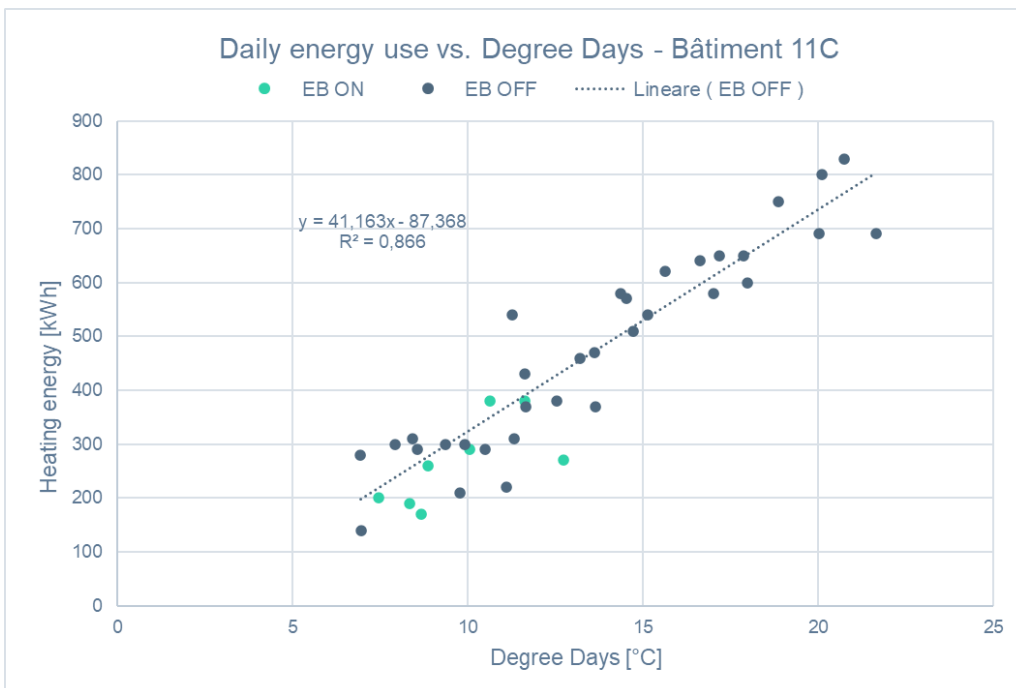


Figura 36 - Grafico a dispersione POC2 consumi 11C weekday

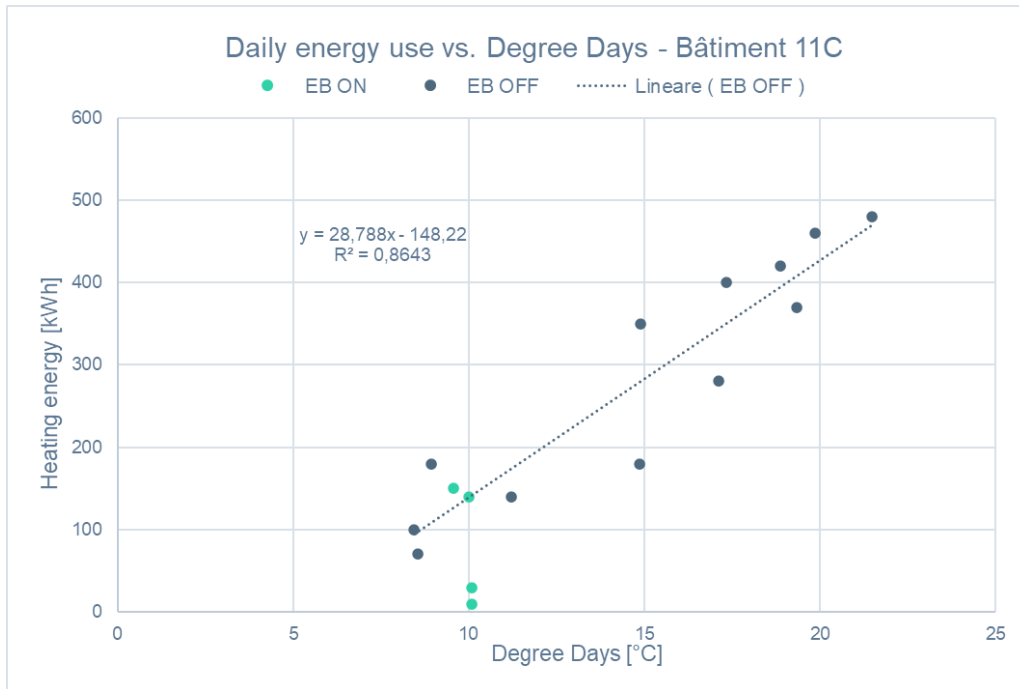


Figura 37 - Grafico a dispersione POC2 consumi 11C weekend

6.3 Risparmio energetico EB ON

I risultati della regolazione dei sistemi HVAC da parte dell'Algoritmo in Cloud Enerbrain sono inseriti nella Tabella 7 e nella Tabella 8: i valori sono distinti per le baseline create per weekday e per weekend con i relativi consumi in EB ON e secondo baseline EB OFF.

Bâtiment 11B	EB ON [kWh]	Baseline EB OFF (GG)	RISPARMI [kWh]	SAVING %
weekday	5.340	5.797	457	8%
weekend	510	1.702	1.192	70%
TOTAL	5.850	7.499	1.649	22%

Tabella 7 - Risultati POC2 bâtiment 11B

Bâtiment 11C	EB ON [kWh]	Baseline EB OFF (GG)	RISPARMI [kWh]	SAVING %
weekday	2.140	2.675	535	20%
weekend	330	703	373	53%
TOTAL	2.470	3.378	908	27%

Tabella 8 - Risultati POC2 bâtiment 11C

I risultati ottenuti sono positivi: nel complesso la regolazione HVAC in EB ON ha permesso di risparmiare più di 2.550 kWh in una finestra temporale di appena 2 settimane. Le percentuali di saving più alte sono state riscontrate nei weekend dove la logica di Enerbrain permetteva uno spegnimento dell'impianto completo a differenza della logica impostata sul BMS locale. L'affidabilità di questi valori è buona nei casi dove sono stati recuperati molti dati giornalieri, quindi durante i giorni della settimana, mentre le proiezioni di risparmio nei weekend sono state testate solamente su 4 giorni (3, 4, 10 e 11 febbraio): essi non possono essere considerati rappresentativi di tutte le condizioni al contorno (temperatura esterna, condizioni meteo) riscontrabili in una stagione di riscaldamento ma dovranno essere integrati con i successivi dati del secondo periodo di EB ON iniziato il giorno 11 marzo.

I valori più significativi sono quelli aggregati per edificio, dove vengono sommati i risparmi e le baseline per ottenere un valore più rappresentativo: per il bâtiment 11B sono stati risparmiati quasi 1.650 kWh a fronte di una baseline OFF di 7.499 kWh (22% di saving), mentre nel bâtiment 11C sono stati evitati 908 kWh, pari al 27% dei 3.378 kWh stimati.

Questi numeri sono l'evidenza del risparmio ottenuto grazie alla regolazione del sistema HVAC da parte dell'algoritmo in cloud di Enerbrain. In aggiunta al taglio delle bollette energetiche del riscaldamento, Enerbrain ha come obiettivo il mantenimento del comfort ambientale riducendo le ore di overheating e di discomfort interno: le analisi a sostegno di questo obiettivo sono riportate nel capitolo successivo.

6.4 Analisi del comfort ambientale

Le 12 sonde eSense posizionate nei due fabbricati permettono il monitoraggio delle temperature degli ambienti interni. Dalla WebApp Enerbrain è possibile scaricare i dati dei sensori e svolgere le analisi sul comfort termico degli ambienti interni.

I dispositivi in ambiente sono posizionati ed associati alle 4 aree servite dai corrispettivi circuiti di riscaldamento, come indicato nel capitolo 3: questo permette di svolgere le analisi di comfort suddivise in 4 zone termiche, ognuna con la propria regolazione.

Partendo dal bâtiment 11B NORD fino al bâtiment 11C SUD si procede a riportare alcuni grafici utili a comprendere l'andamento della temperatura interna rispetto alla temperatura esterna, in aggiunta a delle rappresentazioni carpet plot con la temperatura interna media oraria e dei grafici a torta con le percentuali di tempo in cui sono state mantenute determinate condizioni di temperatura.

6.4.1 Bâtiment 11B NORD

I due grafici, separati per comodità di visualizzazione, riportano sull'asse delle ascisse i giorni rispettivamente dei mesi di dicembre (Figura 38) e di gennaio-febbraio (Figura 39), mentre in ordinata sono riportate diverse temperature: le aree di colore grigio (EB OFF) e verde (EB ON) sono le temperature medie giornaliere degli ambienti interni, la linea rossa tratteggiata è il setpoint ambiente mentre la linea azzurra è la temperatura media esterna giornaliera. Con questa rappresentazione compatta si possono fare delle osservazioni e distinzioni sull'andamento della temperatura interna per i diversi giorni della settimana e in base al tipo di regolazione.

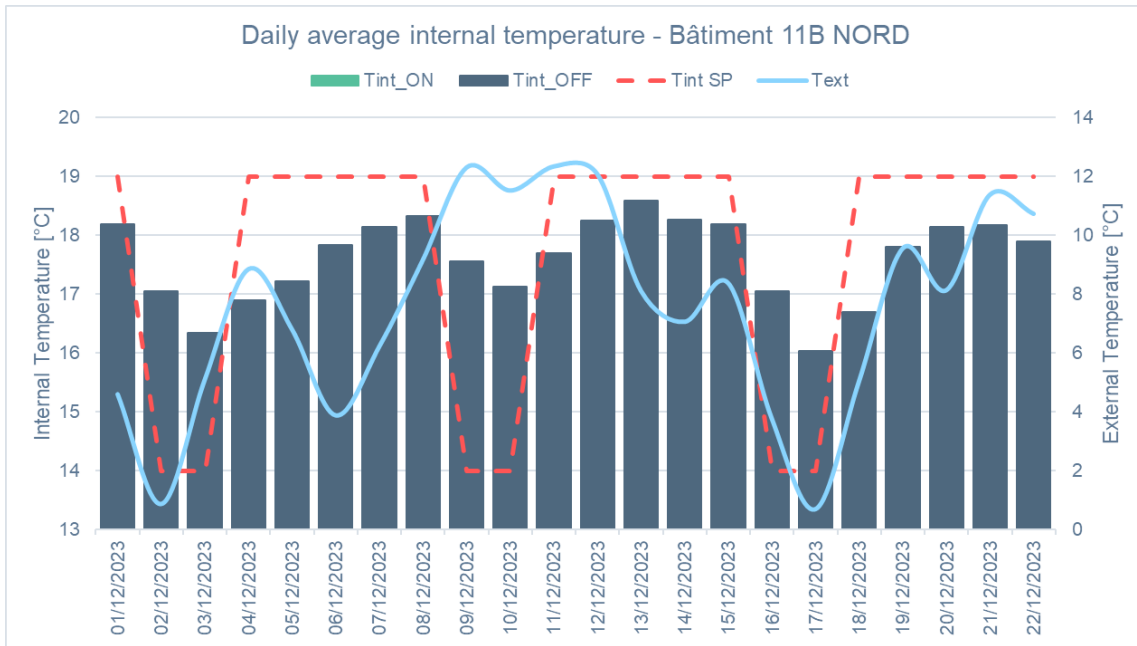


Figura 38 - Temperatura interna bâtiment 11B NORD dicembre

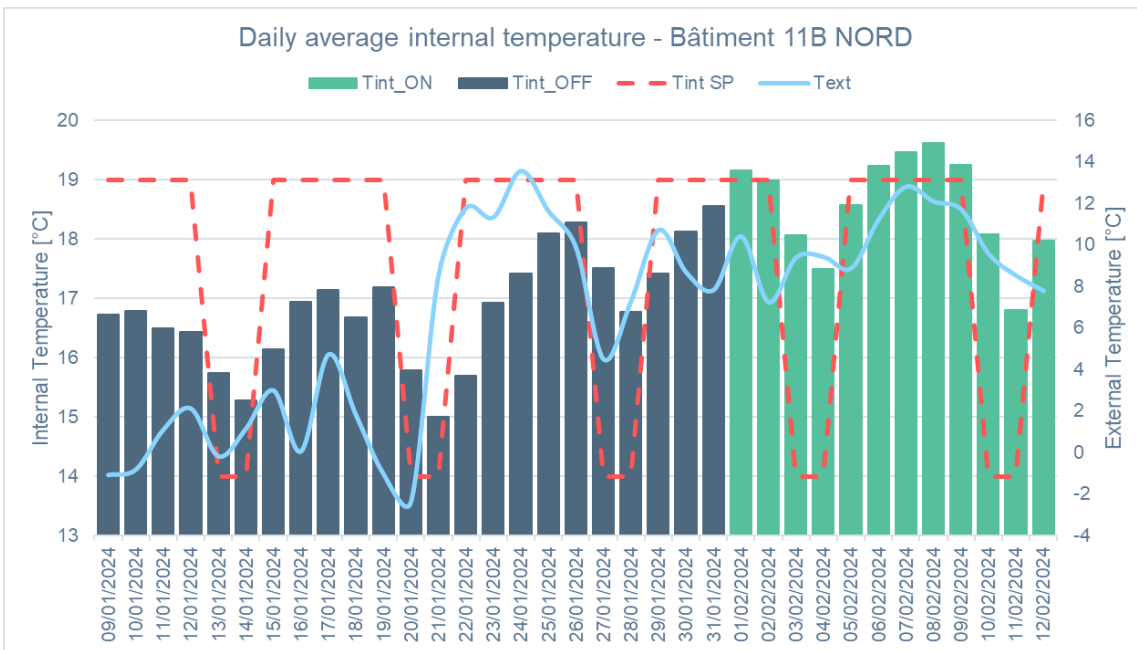


Figura 39 - Temperatura interna bâtiment 11B NORD gennaio-febbraio

Si nota come le temperature interne facciano fatica a raggiungere il setpoint impostato a 19°C quando il BMS locale è in azione, sia con temperature esterne relativamente miti come a dicembre che con temperature più rigide a gennaio. Le colonne colorate di verde invece raggiungono e si stabilizzano attorno al setpoint, oscillando in quell'intorno.

Nei giorni di fine settimana non è stato impostato un vero e proprio setpoint da mantenere ma un valore di sicurezza pari a 14°C, al di sotto del quale si riaccende il sistema di riscaldamento quando la regolazione Enerbrain è attiva.

Quando il sistema è in bypass invece viene mantenuta una curva climatica simile a quella usata in settimana ma abbassata di qualche paio di gradi.

Andando nel dettaglio delle temperature interne ma con granularità oraria, si riportano i grafici carpet plot per l'area NORD del bâtiment 11B: in verticale si trovano i giorni weekday dal lunedì al venerdì con l'etichetta dello stato EB; in orizzontale sono indicate le ore di occupazione effettive dell'edificio, nelle quali è impostato un calendario nella WebApp Enerbrain (dalle 8:00 alle 18:00); a lato del grafico viene aggiunta la legenda dei colori usata per evidenziare le singole celle delle ore dei giorni.

Per conteggiare il tempo in cui sono state mantenute le diverse condizioni di comfort durante EB ON e EB OFF, si inseriscono dei grafici a torta con al loro interno le percentuali di tempo in cui l'ambiente è in comfort con temperature comprese tra 18,5°C e 19,5°C, in zona di discomfort con un temperatura $T < 18,5^{\circ}\text{C}$ e in condizioni di overheating con una $T > 19,5^{\circ}\text{C}$.

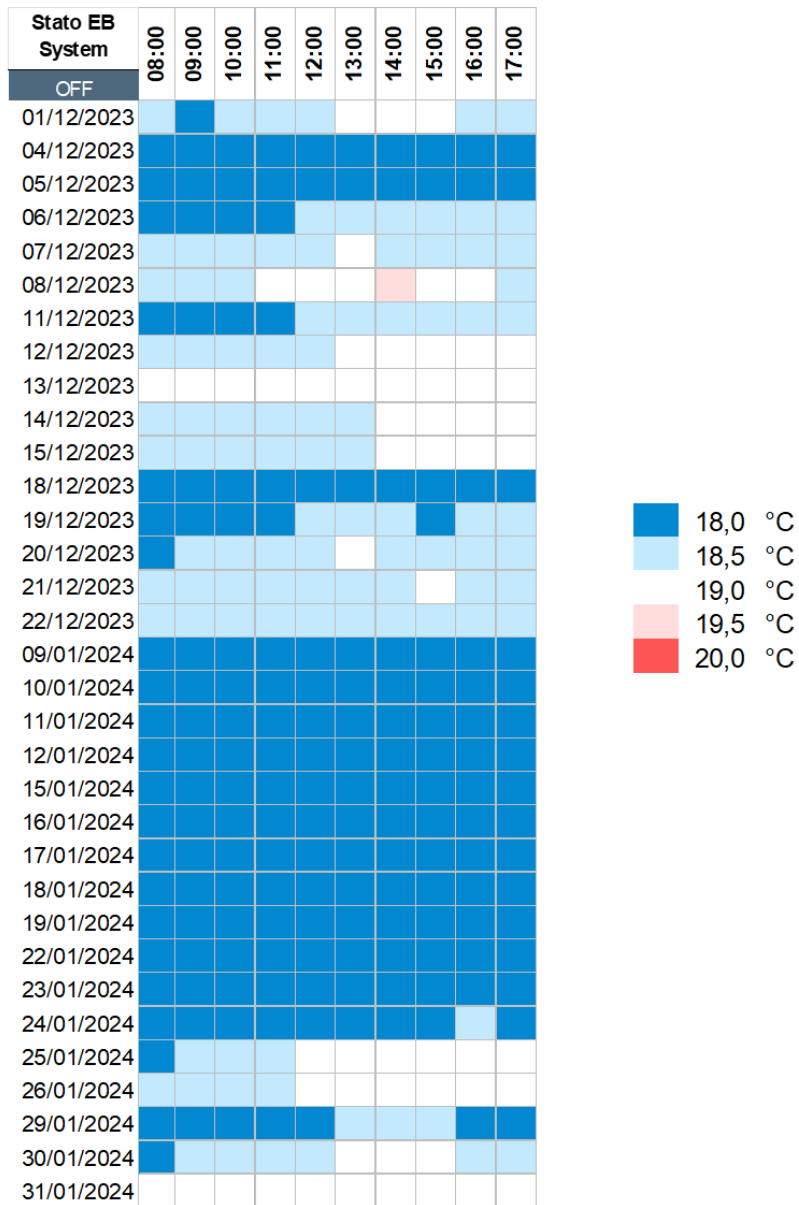


Figura 40 - Carpet plot OFF POC2 11B NORD

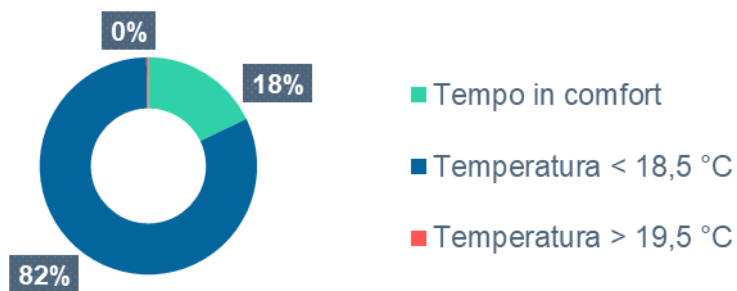


Figura 41 - Tempo in comfort OFF POC2 11B NORD

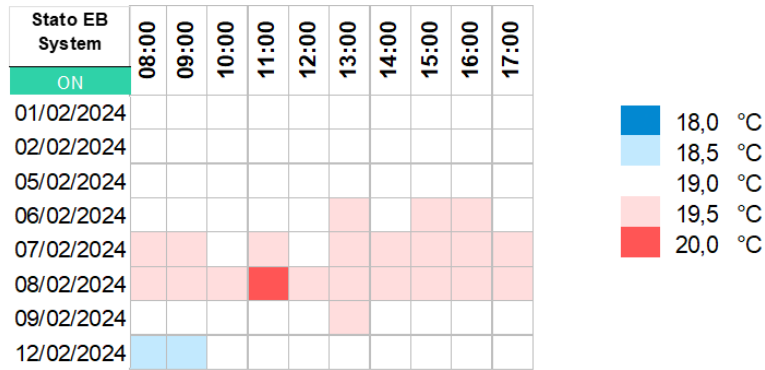


Figura 42 - Carpet plot ON POC2 11B NORD

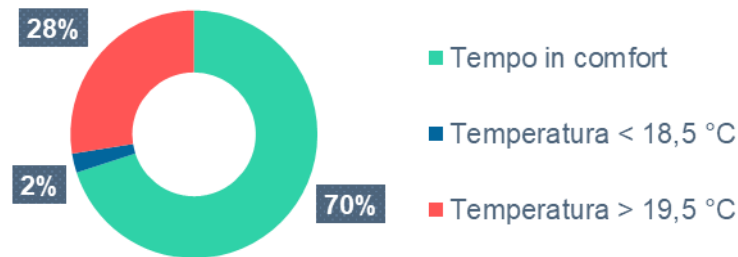


Figura 43 - Tempo in comfort ON POC2 11B NORD

Il carpet plot riferito al sistema OFF in Figura 40 è per la maggior parte di colore blu chiaro e blu scuro che corrispondono a circa l'82% del tempo totale. Solo una piccola parte del grafico rimane bianca e quindi in comfort, mentre il colore rosso non compare quasi mai, annullando le fasi di overheating.

Nel secondo carpet plot in Figura 42, con l'attuazione di Enerbrain si sono ridotte al minimo le zone di discomfort con temperature basse e si è riuscito a mantenere il comfort termico per il 70% delle ore di occupazione. Avendo rispettato il setpoint e raggiungendo temperature in generale più alte rispetto alla regolazione OFF, in ambiente ci sono state delle ore di overheating, per un totale del 28% del tempo.

6.4.2 Bâtiment 11B SUD

In maniera identica a prima, si riportano le due rappresentazioni delle temperature interne del bâtiment 11B per la zona SUD. Facendo parte dello steso edificio, le curve hanno un andamento simile a quello riscontrato in precedenza e i valori di temperatura sono confrontabili.

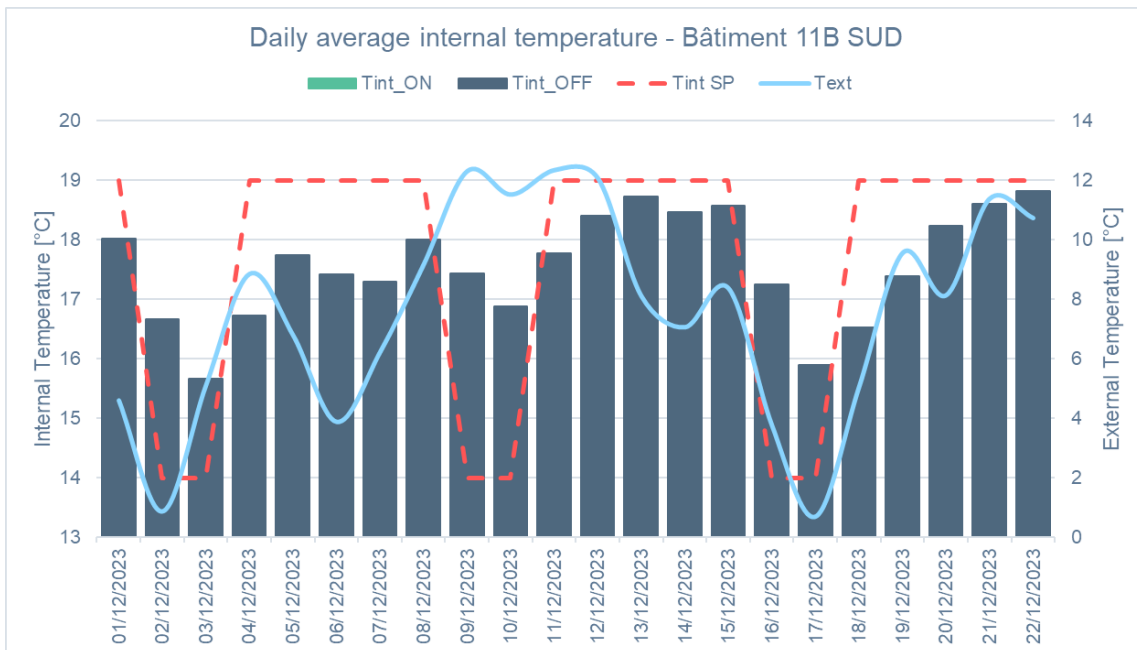


Figura 44 - Temperatura interna bâtiment 11B SUD dicembre

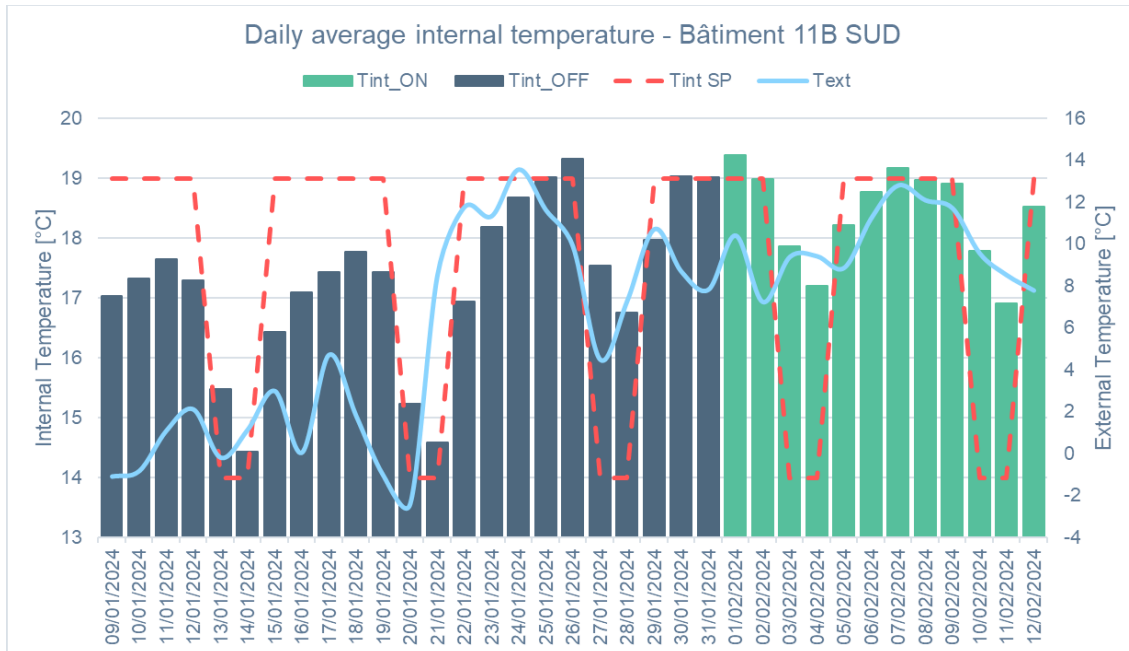


Figura 45 - Temperatura interna bâtiment 11B SUD gennaio-febbraio

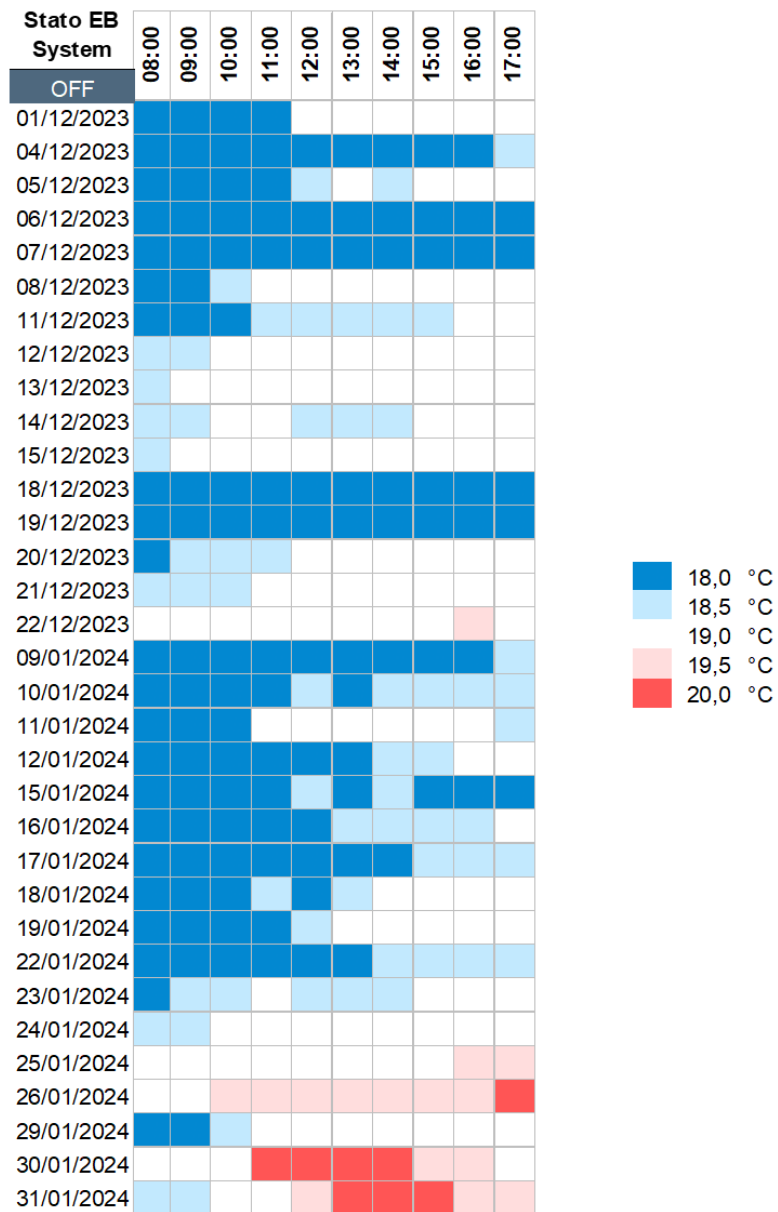


Figura 46 - Carpet plot OFF POC2 11B SUD

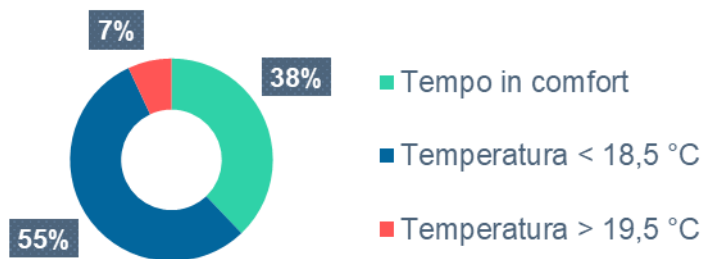


Figura 47 - Tempo in comfort OFF POC2 11B SUD

I risultati del comfort interno sono migliori rispetto all'area NORD dello stesso edificio. Con la regolazione nello stato di OFF in Figura 46, si osservano un maggior numero di valori che rientrano all'interno della zona di comfort colorata di bianco e raggiungono la zona di overheating nei giorni di fine gennaio.

Nel complesso la percentuale di tempo in comfort ha raggiunto il 38% mentre quella di discomfort per temperature basse è del 55%.

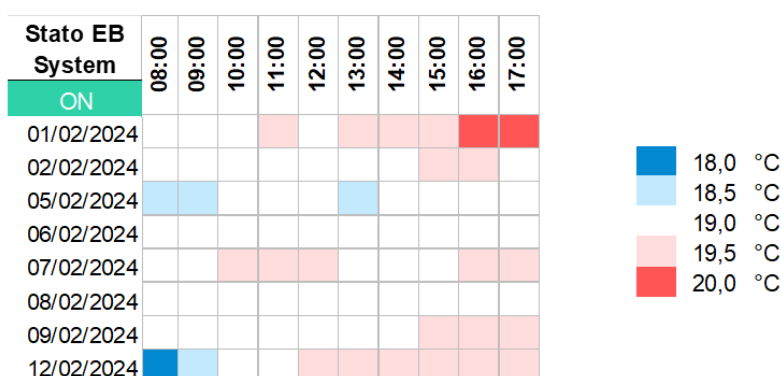


Figura 48 - Carpet plot ON POC2 11B SUD

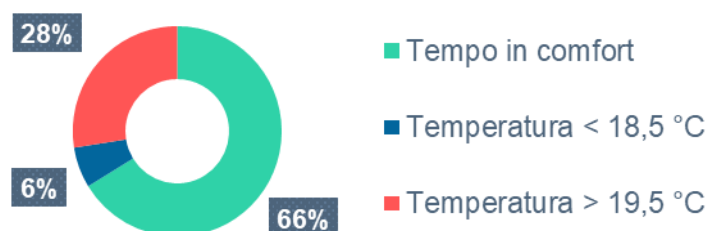


Figura 49 - Tempo in comfort ON POC2 11B SUD

Pur avendo una serie di dati limitata a 2 settimane, i risultati raccolti sono positivi: l'algoritmo Enerbrain ha cercato di ridurre al minimo le ore con temperature ambiente basse andando a pre-accendere il sistema di riscaldamento la mattina. Nel carpet plot di Figura 48 il colore blu è stato "limitato" al solo giorno di lunedì 12 febbraio tra le ore 8:00 e le 9:00, mentre le temperature più alte di 19,5°C sono posizionate a fine giornata, quando le temperature esterne sono più miti.

Analizzando le percentuali ottenute, la zona di comfort è stata mantenuta per il 66% del tempo di occupazione e la fascia di overheating è stata riscontrata nel 28% del tempo. Il

discomfort causato da basse temperature è risultato pari al 6%, decisamente inferiore rispetto al 55% con la regolazione OFF.

6.4.3 Bâtiment 11C NORD

Le analisi per l'edificio 11C hanno riscontrato alcune anomalie nei valori di temperatura interna, soprattutto nella zona NORD. I valori termici monitorati sono stati per la maggior parte del tempo sopra al setpoint fissato a 19°C, sia con regolazione da parte del BMS che da parte di Enerbrain. La fase di overheating si può notare in quasi tutti i giorni, anche di sabato e di domenica.

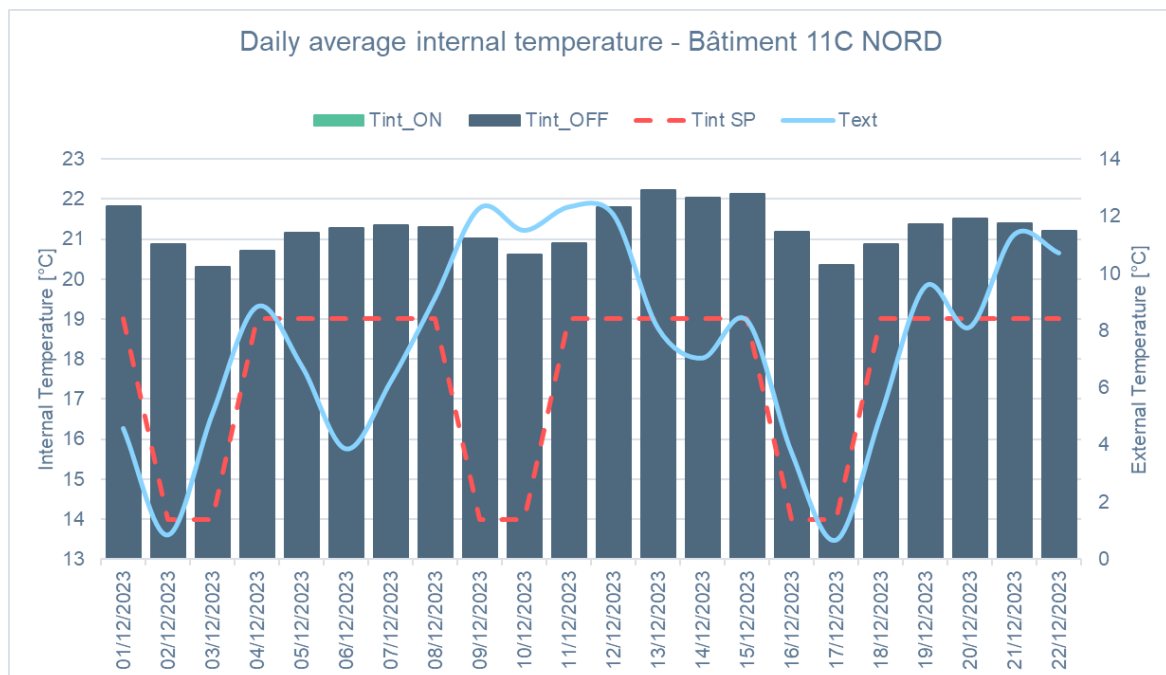


Figura 50 - Temperatura interna bâtiment 11C NORD dicembre

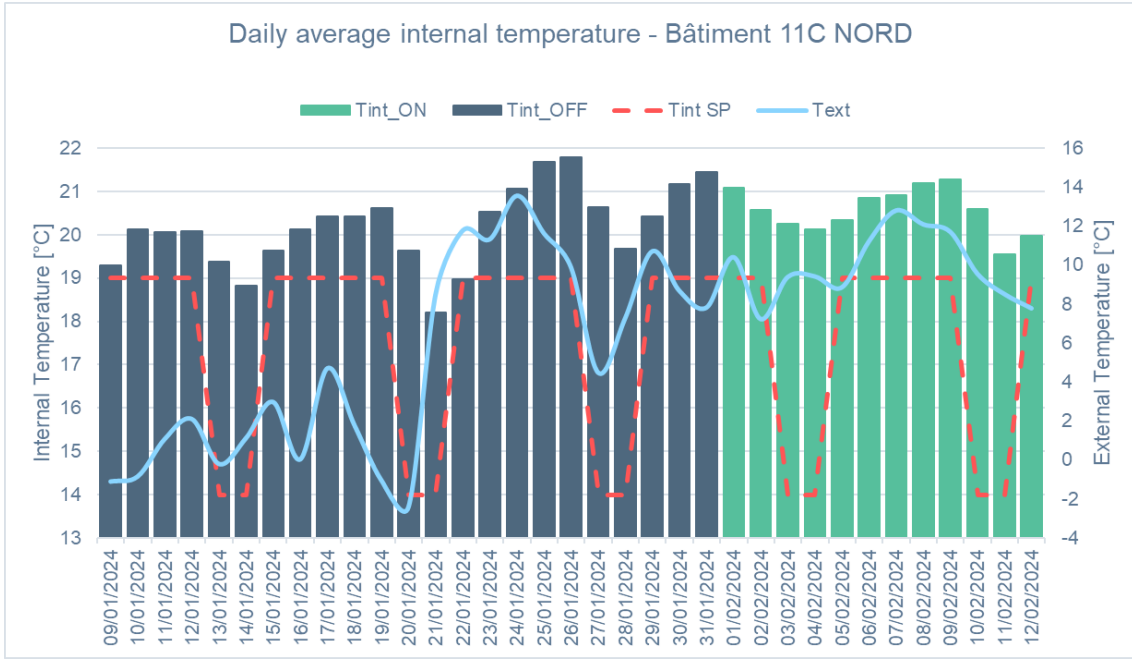


Figura 51 - Temperatura interna bâtiment 11C NORD gennaio-febbraio

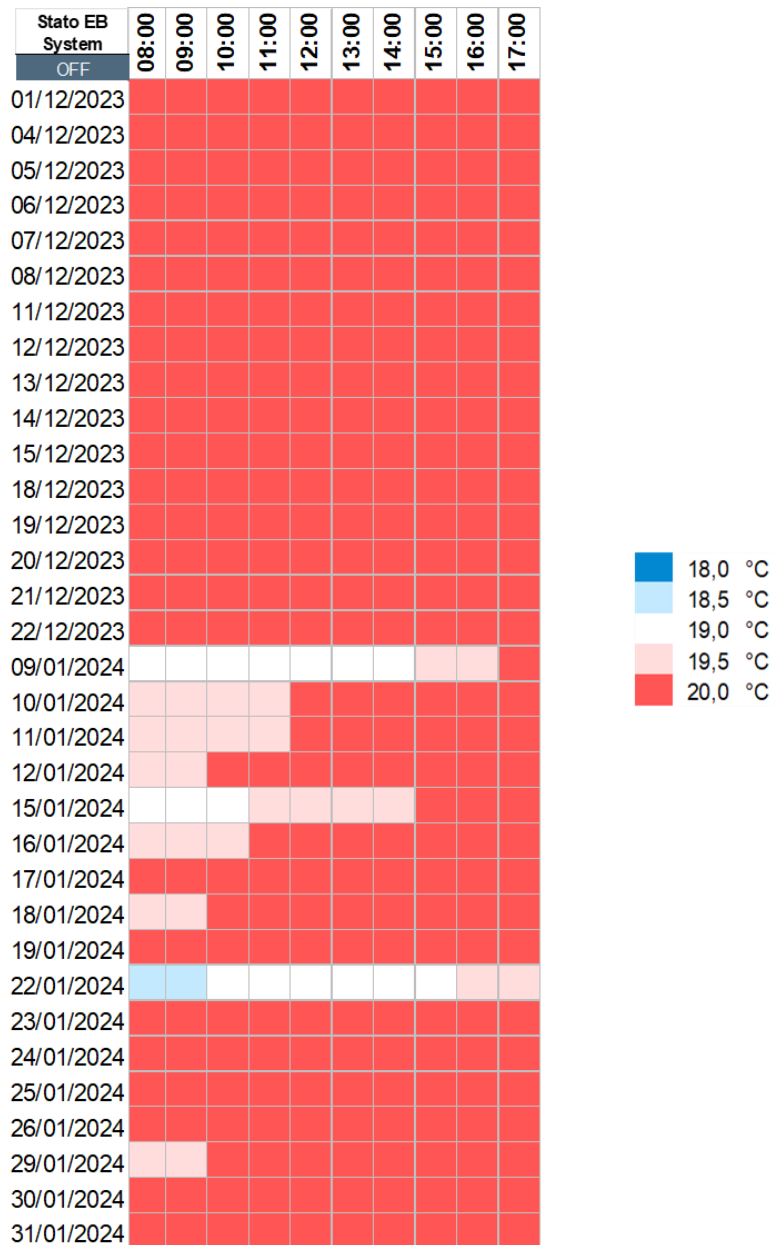


Figura 52 - Carpet plot OFF POC2 11C NORD

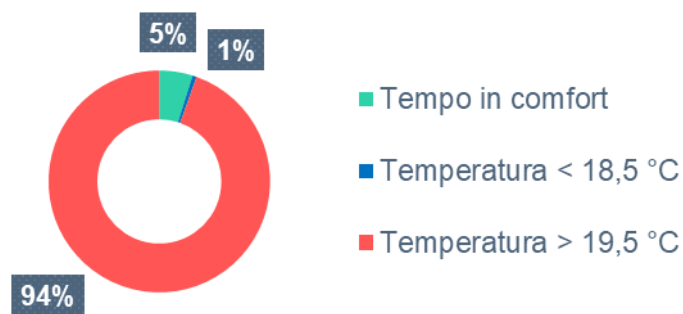


Figura 53 - Tempo in comfort OFF POC2 11C NORD

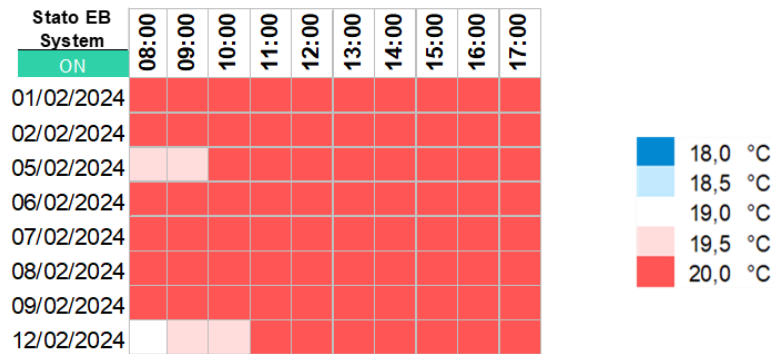


Figura 54 - Carpet plot ON POC2 11C NORD

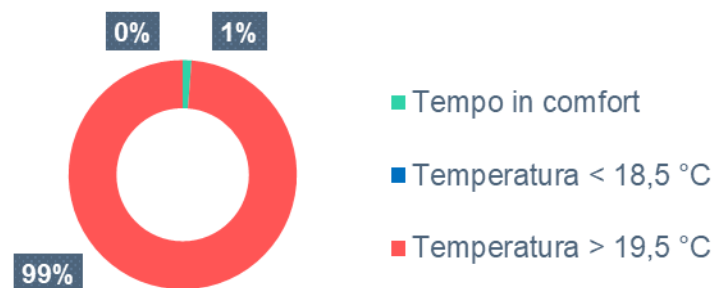


Figura 55 - Tempo in comfort ON POC2 11C NORD

Il diagramma a torta del periodo OFF risulta quasi per la sua totalità di colore rosso, segnando un 94% del tempo in overheating. Anche nel secondo grafico in Figura 55 con la regolazione nello stato di ON viene riscontrato lo stesso fenomeno di overheating.

Per questa zona dell'edificio è stato ipotizzato che ci siano stati dei sistemi che abbiano interferito con la regolazione della temperatura ambiente: una prima ipotesi è la presenza di un sistema di riscaldamento complementare o ausiliario, come possono essere delle stufe/radiatori elettrici, i quali non rientrano all'interno del perimetro di controllo dell'algoritmo Enerbrain ma influiscono sulla temperatura misurata dalle sonde in ambiente. La seconda opzione è la presenza di un sistema di ventilazione meccanica o di un'unità di trattamento aria (UTA) per l'aria primaria che rimane sempre in funzione: le temperature elevate sono infatti mantenute sia nei giorni settimanali che nei weekend.

La regolazione con l'algoritmo Enerbrain non è riuscita in questa zona termica a risolvere il discomfort causato da overheating. L'aspetto positivo dell'ottimizzazione delle logiche di regolazione è il fatto che grazie al feedback ambientale, l'algoritmo ha riscontrato la sovratemperatura nell'area e ha proceduto a modulare il segnale di controllo verso la

valvola miscelatrice. Nei giorni in cui le temperature interne sono state elevate, la regolazione ON è riuscita a mantenere chiusa la valvola a 3 vie per la maggior parte del tempo, ottenendo un risparmio energetico rispetto al controllo da parte del BMS.

6.4.4 Bâtiment 11C SUD

Nella seconda area del bâtiment 11C non è stato riscontrato il problema di overheating generalizzato ma piuttosto la mancanza di alcuni dati di monitoraggio ambientale, dovuta allo scarso segnale della rete Sigfox all'interno degli ambienti. Nei seguenti istogrammi in Figura 56 e Figura 57, si notano gli andamenti delle temperature medie giornaliere rispetto al setpoint e alla temperatura esterna. In alcuni giorni nei mesi di dicembre e gennaio si riscontrano dei valori nulli nelle colonne: in quelle giornate la mancanza dei dati trasmessi dai dispositivi eSense è stata tale da non riuscire ad avere neanche un valore di temperatura oraria e giornaliera da inserire nell'analisi.

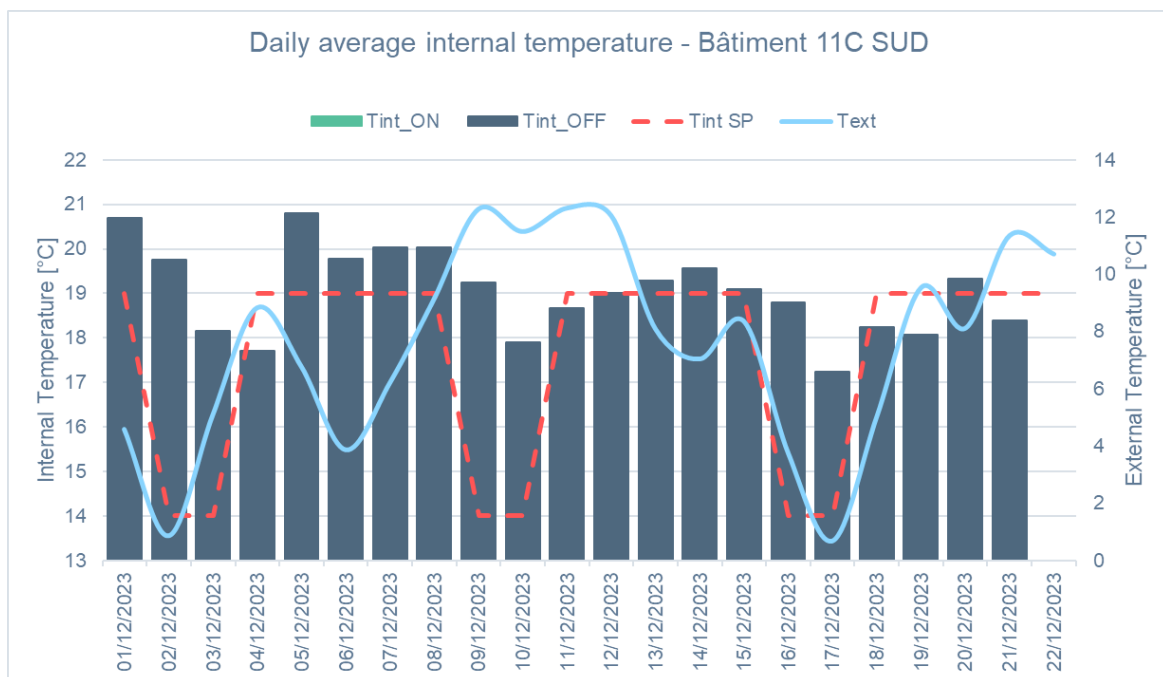


Figura 56 - Temperatura interna bâtiment 11C SUD dicembre

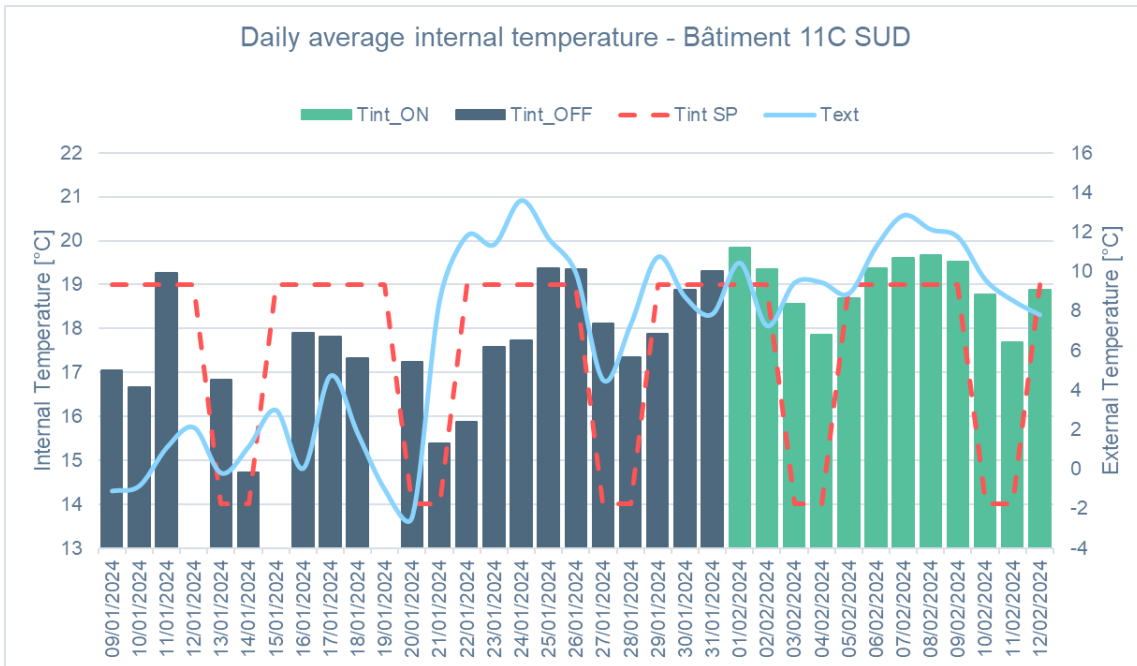


Figura 57 - Temperatura interna bâtiment 11C SUD gennaio-febbraio

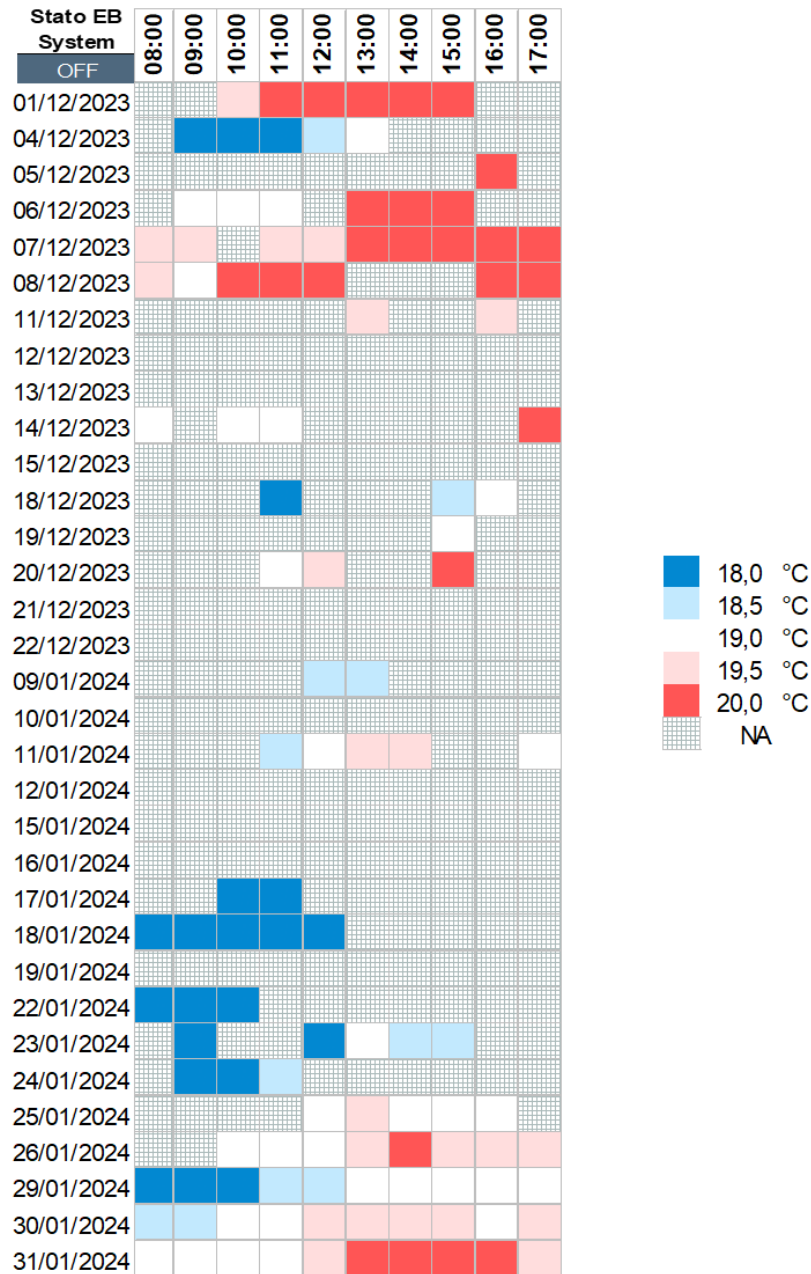


Figura 58 - Carpet plot OFF POC2 11C SUD

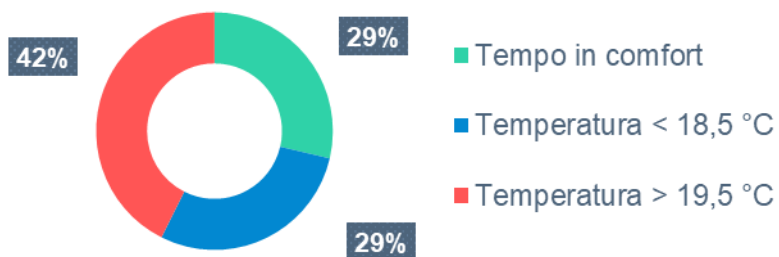


Figura 59 - Tempo in comfort OFF POC2 11C SUD

Nella Figura 58, il carpet plot ottenuto dal periodo OFF conferma il problema diffuso di ricezione del segnale e le singole celle sono state riempite con un motivo a quadretti grigio quando il dato medio orario di temperatura non è stato ricevuto.

Il segnale Sigfox è stato potenziato a partire dal giorno 26 gennaio con l'installazione di una Base Station e da quel momento in poi non si è più verificata la mancanza di dati ambientali.

Il grafico a torta con le percentuali è stato impostato considerando il tempo totale di occupazione come la sommatoria del numero di ore nelle quali ci fosse stato almeno un valore di temperatura registrato dai sensori: il numero risultante è di 115 ore di occupazione rispetto alle 330 ore originarie per i giorni indicati nell'asse verticale.

La fase di overheating è quella presente per il 42% del tempo mentre al secondo posto, a parità di ore, ci sono la fascia di comfort e quella di discomfort ($T < 18,5^{\circ}\text{C}$) con il 29% del tempo.

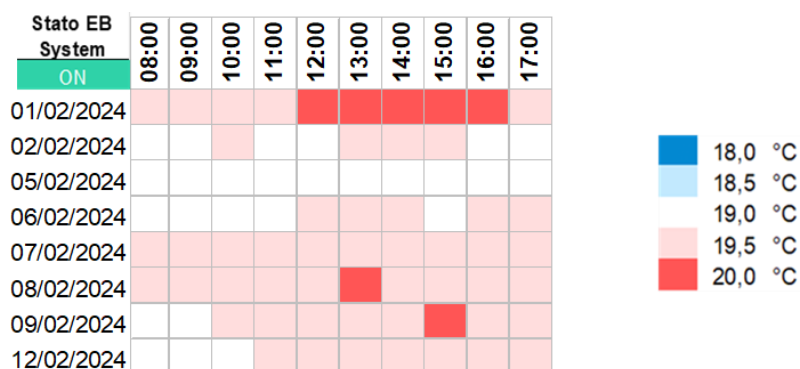


Figura 60 - Carpet plot ON POC2 11C SUD

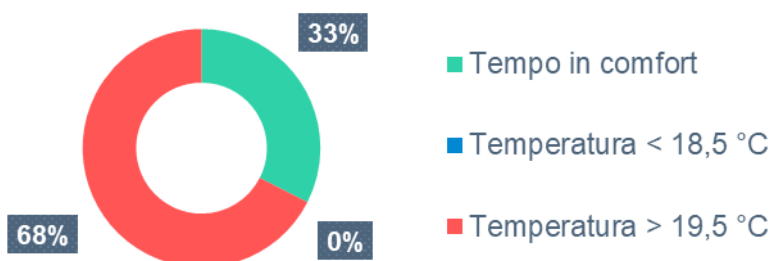


Figura 61 - Tempo in comfort ON POC2 11C SUD

Nella zona SUD del bâtiment 11C con la regolazione attiva è stato possibile ridurre il fenomeno del discomfort ambiente causato da temperature basse: nel carpet plot in Figura 60 sono rappresentati i giorni e le ore di occupazione e in nessuna cella si vedono i colori azzurro o blu. Globalmente le ore che con lo stato OFF risultavano più fredde, adesso si sono redistribuite nelle fasce di temperatura superiori, dai 18,5°C in su.

7. Confronto POC1 e POC2

I dati energetici e ambientali degli edifici 11B e 11C sono stati analizzati sia per il primo POC durante la stagione termica 2022/2023 che per il secondo periodo POC, da dicembre 2023 ad aprile 2024. In questo capitolo i risultati vengono confrontati per determinare quali sono stati i benefici dell'introduzione della logica predittiva a supporto di quella adattiva, in relazione ai consumi termici e al comfort ambientale.

Per verificare se ci sono state delle differenze tra i periodi ON del POC1 e i periodi ON del POC2, vengono presentate le firme energetiche dei 2 fabbricati suddivisi per weekday e weekend. La firma energetica è uno strumento grafico che mostra i consumi termici giornalieri di un edificio in base alla variazione del clima esterno. La temperatura media esterna è una grandezza analoga ai gradi giorno usati nei grafici in precedenza, ma che uniforma e rende confrontabili i risultati dei consumi e dei risparmi nei due casi: la variabile grado giorno, per il primo POC, è stata definita con la temperatura di riferimento di 20°C mentre per il POC n°2 i gradi giorno sono stati aggiornati con la reale temperatura mantenuta negli ambienti interni (vedi paragrafo 6.1 Gradi giorno).

In ciascun grafico a dispersione sono presentati i giorni con la regolazione nello stato di EB ON: per il POC1 è stato usato il colore verde e per il POC2 il colore rosso. Ai valori della serie EB ON del POC1 viene aggiunta la retta di regressione lineare con la quale verranno stimate le variazioni di consumo tra i due POC: la distanza verticale tra i punti rossi del POC2 e la linea di tendenza è la differenza dei consumi dell'edificio nei giorni EB ON a parità di condizioni climatiche esterne.

Le rappresentazioni sono riportate per il fabbricato 11B (Figura 62 e Figura 63) e per l'edificio 11C (Figura 64 e Figura 65).

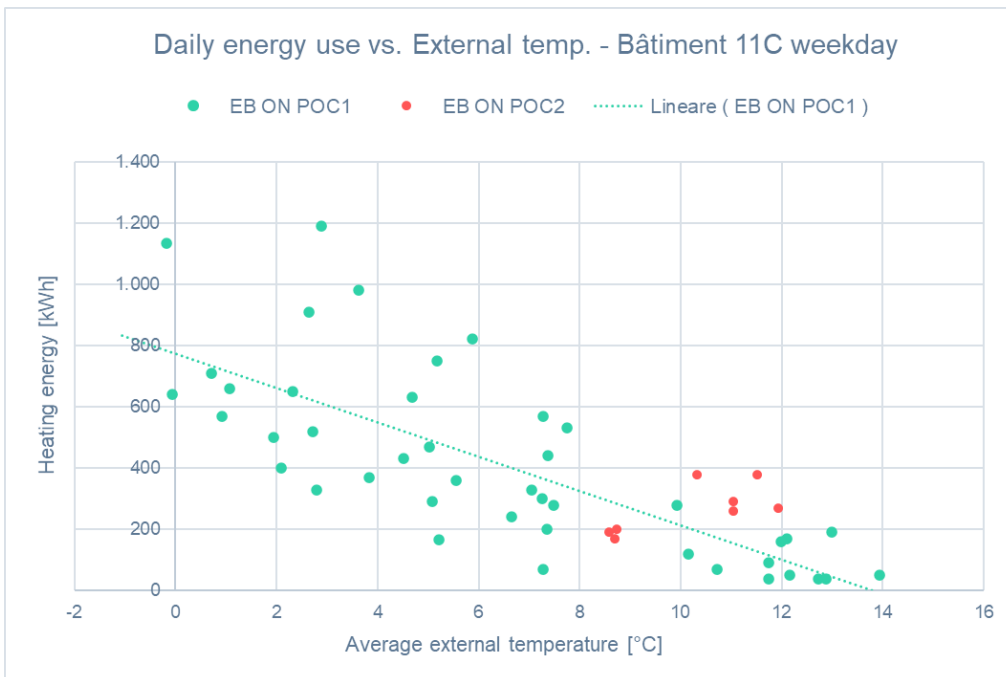


Figura 64 - Confronto consumo energetico EB ON POC1/POC2 11C weekday

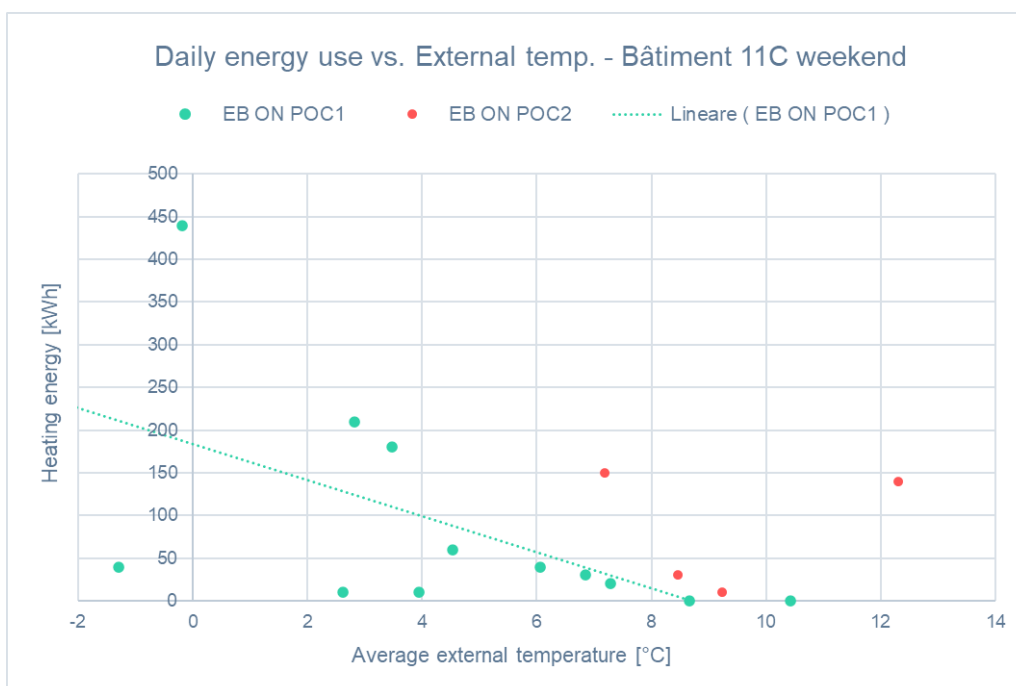


Figura 65 - Confronto consumo energetico EB ON POC1/POC2 11C weekend

Nei 4 grafici si può notare che la maggior parte dei giorni EB ON appartenenti al secondo periodo POC si posizionano sopra la linea di tendenza, indicando un consumo energetico

maggiore rispetto alla regolazione dell'anno precedente. Il risultato va contestualizzato e analizzato con logica: molti punti colorati di rosso sono ricaduti in un range di temperatura esterna che non presenta alcun valore della serie EB ON POC1, e quindi il modello lineare non dispone di una variabilità così ampia dei dati da stimare con una buona approssimazione i consumi energetici a quelle temperature esterne. Questo fenomeno si verifica soprattutto nei giorni di sabato e domenica sia per l'edificio 11B che per l'11C.

Un secondo problema riscontrato è la bassa quantità di dati per la serie EB ON del POC2: le 2 settimane di EB ON effettuate finora non sono sufficienti per avere un valore di variazione di consumo valido e consistente, avendo un limitato intervallo di temperature analizzate. La Tabella 9 seguente riassume i grafici appena mostrati e quantifica la variazione dei consumi tra i due periodi EB ON.

	EB ON POC2 [kWh]	BASELINE EB ON POC1 [kWh]	VARIAZIONE [kWh]	DELTA %
Bâtiment 11B	5.850	3.052	2.798	90%
Bâtiment 11C	2.470	1.612	858	35%
TOTAL	8.320	4.664	3.656	43%

Tabella 9 - Confronto EB ON POC1/POC2

La differenza dei consumi nei due edifici risulta positiva e quindi il Sistema Enerbrain, rispetto alla baseline ON dell'anno precedente, ha consumato più energia. Il passo successivo è costituito dalla verifica dei benefici che la logica adattiva e soprattutto predittiva hanno avuto sul comfort ambientale, anche in relazione ai consumi maggiori prima illustrati.

La Tabella 10 riporta i valori in termini percentuali delle ore di occupazione suddivise nei 3 livelli di comfort ambientale: la zona di comfort con la temperatura compresa tra 18,5°C e 19,5°C, la zona di overheating con $T > 19,5^{\circ}\text{C}$ e la zona di discomfort dove le temperature sono sotto i 18,5°C. Le percentuali sono state aggregate per i singoli edifici tramite i valori medi delle temperature tra le zone termiche Nord e Sud.

	EB ON	T < 18,5°C [%]	Tempo in comfort [%]	T > 19,5°C [%]
Bâtiment 11B	POC1	25 %	53 %	22 %
	POC2	4 %	68 %	28 %
Bâtiment 11C	POC1	8 %	53 %	39 %
	POC2	0 %	16 %	84 %

Tabella 10 - Confronto comfort ambientale POC1/POC2

Le analisi di comfort ambientale hanno evidenziato un aumento a livello generale delle percentuali di tempo in comfort negli edifici in esame. Solo nel fabbricato 11C il tempo nella fascia di comfort è diminuito, mentre la percentuale in discomfort con $T < 18,5^{\circ}\text{C}$ è passata dall'8% a zero. Negli altri casi le zone di comfort e di overheating sono aumentate, togliendo ore e punti percentuali alla fascia colorata di blu.

La differenza principale tra le due regolazioni con il Sistema Enerbrain è la riduzione del discomfort ambientale grazie alla logica predittiva dell'algoritmo: esso infatti permette all'edificio di arrivare in temperatura già alle prime ore della mattina, quando le persone incominciano ad occupare gli ambienti.

Dopo aver analizzato e confrontato i due periodi POC in materia di comfort ambientale e di risparmi energetici, nel capitolo successivo viene approfondita la funzionalità di accensione e spegnimento dinamico degli impianti.

7.1 Impatto pre-accensione e pre-spegnimento dinamico

Tra le funzionalità dell'algoritmo in cloud di Enerbrain ci sono la compensazione della curva climatica rispetto alla temperatura interna e la pre-accensione e il pre-spegnimento dinamico degli impianti. Grazie a queste due qualità la regolazione dell'impianto permette di arrivare e mantenere la temperatura di setpoint in ambiente per più tempo rispetto ai classici controllori non predittivi installati negli edifici.

Come introdotto prima, gli effetti della pre-accensione sono visibili nelle prime ore di occupazione dei fabbricati, quando già alle ore 8:00 in ambiente si possono apprezzare temperature vicine al setpoint, senza creare discomfort per troppo caldo o troppo freddo. Il pre-spegnimento dell'impianto invece lo si riscontra nei consumi energetici delle ultime ore della giornata: il sistema chiude le valvole miscelatrici prima dell'orario di fine occupazione del bâtiment sfruttando l'inerzia termica dell'involucro e delle altre masse presenti in ambiente, per rallentare la discesa della temperatura interna pur mantenendo il comfort degli occupanti.

Nel caso studio presentato, l'effetto della preaccensione si vede nell'andamento dei consumi energetici orari riportati negli istogrammi in suddivisi per weekday/weekend e per bâtiment.

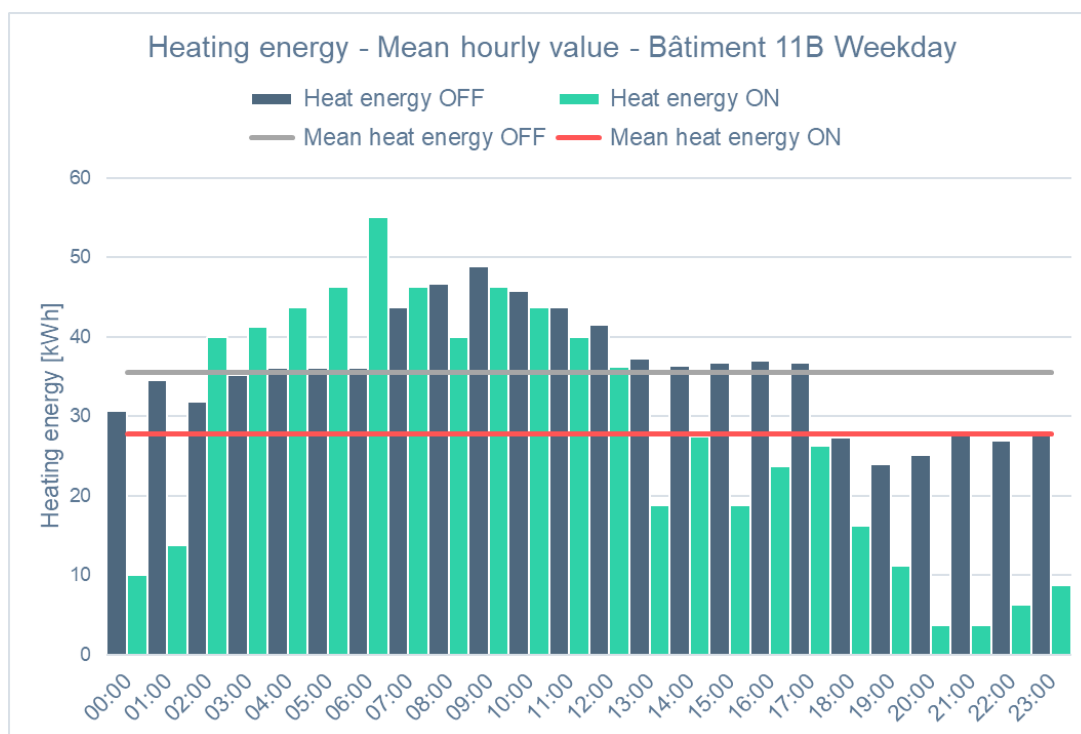


Figura 66 - Consumo energetico orario bâtiment 11B weekday

Considerando il grafico del bâtiment 11B - weekday, i consumi durante il periodo OFF in grigio hanno un andamento quasi costante per tutte le ore del giorno, con o senza occupazione: il valore medio calcolato è rappresentato dalla linea orizzontale grigia ed è pari a 35,5 kWh. Per il periodo EB ON, i consumi hanno una fase crescente nelle prime ore del mattino per andare a preriscaldare l'edificio in tempo per le 8:00, mentre dalle ore

11:00/12:00 inizia la fase discendente di solo mantenimento della temperatura interna. Nelle ore fuori occupazione, i consumi in ON sono inferiori rispetto a quelli del BMS, il quale manteneva la regolazione attiva con la curva climatica.

La media dei consumi orari per il periodo ON è di 27,8 kWh evidenziata in rosso nel grafico della Figura 66.

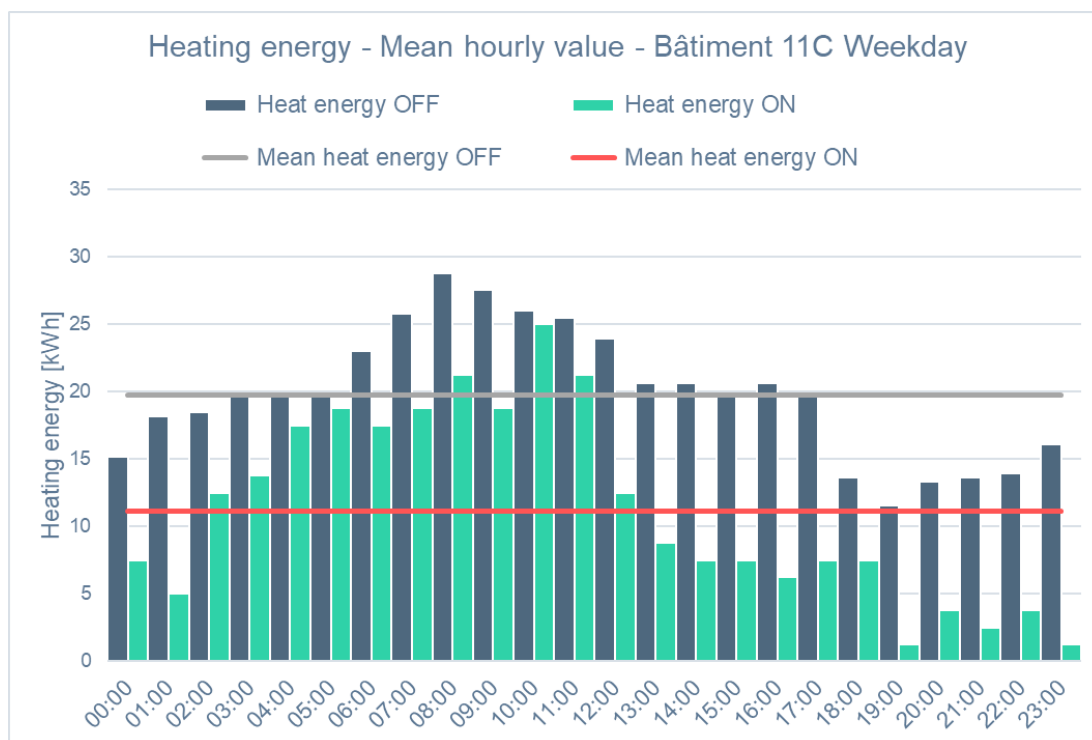


Figura 67 - Consumo energetico orario bâtiment 11C weekday

Lo stesso istogramma è stato riportato per i consumi del bâtiment 11C durante i giorni della settimana (Figura 67). L'andamento della regolazione ON e OFF è simile a quella dell'edificio 11B: si può notare la discesa dei consumi dopo le ore 11:00 e lo spegnimento dell'impianto dopo le ore 18:00.

I valori medi rappresentati sono pari a 19,8 kWh per la fase OFF mentre lo status di ON ha una media di 11,5 kWh.

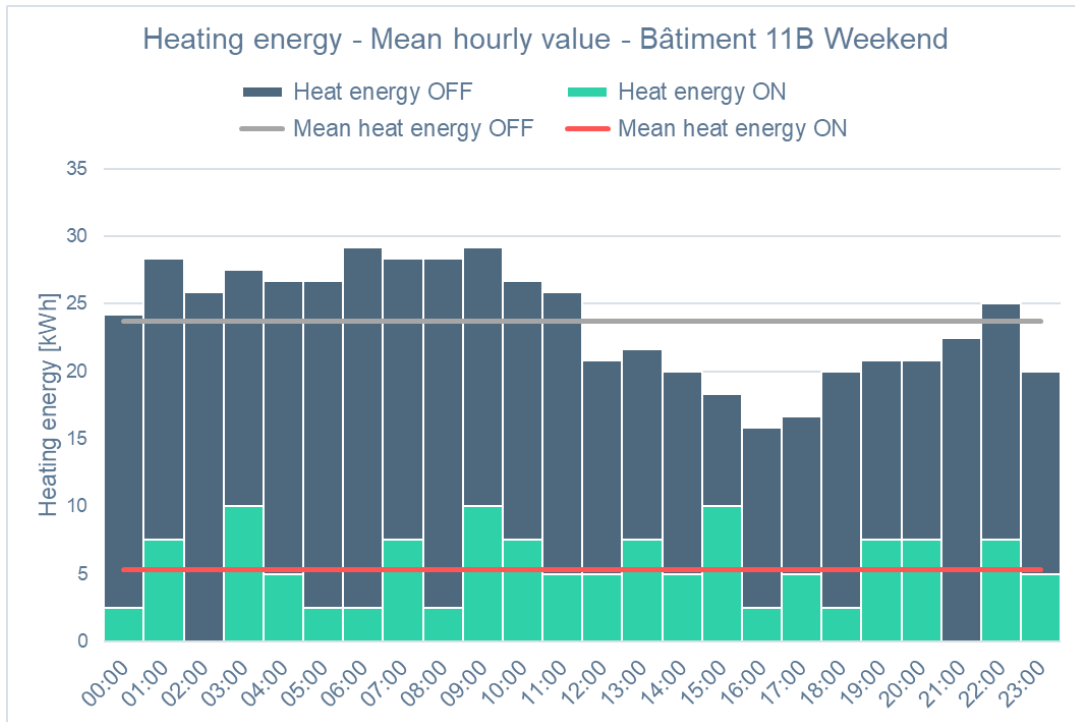


Figura 68 - Consumo energetico orario bâtiment 11B weekend

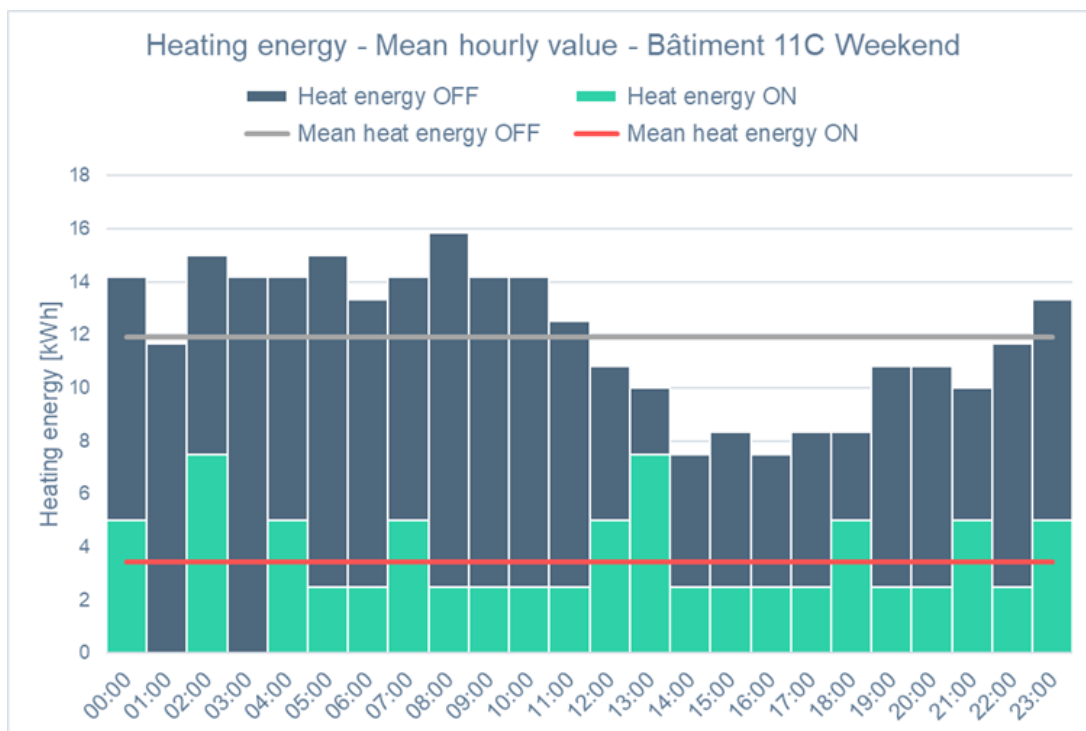


Figura 69 - Consumo energetico orario bâtiment 11C weekend

I grafici in Figura 68 e Figura 69 hanno la stessa tendenza e indicano i consumi orari medi durante i weekend rispettivamente per l'edificio 11B e 11C. Mantenendo la valvola miscelatrice praticamente chiusa per la maggior parte del tempo, i consumi in ON hanno valori bassi e costanti durante il giorno, mentre il controllore locale manterrebbe l'acqua ad una temperatura molto più alta.

I valori medi di consumo orario nei weekend sono di 23,7 kWh (EB OFF) e 5,3 kWh (EB ON) per il fabbricato 11B, mentre per il bâtiment 11C le medie equivalgono a 11,9 kWh e 3,4 kWh.

Nella Figura 70 viene riportato come esempio l'andamento della temperatura misurata da uno dei 4 circuiti di riscaldamento: la linea gialla è la temperatura esterna, la linea blu la temperatura di mandata dell'acqua misurata mentre quella tratteggiata in arancione è il setpoint di mandata del fluido termovettore calcolato dall'algoritmo. L'area colorata in arancione in basso è il segnale 0-10V di comando che il dispositivo eNode invia all'attuatore della valvola miscelatrice. Il segnale e la temperatura di mandata hanno un andamento oscillatorio perché gli attuatori e le valvole presenti in campo sono molto reattivi rispetto a piccole variazioni di tensione imposte. Si nota bene da questa rappresentazione come il sistema si pre-accenda attorno all'1:00 del mattino mentre già verso le ore 10:00 esso proceda allo spegnimento, dopo aver riscontrato una temperatura interna più elevata del setpoint ambiente di 19°C.

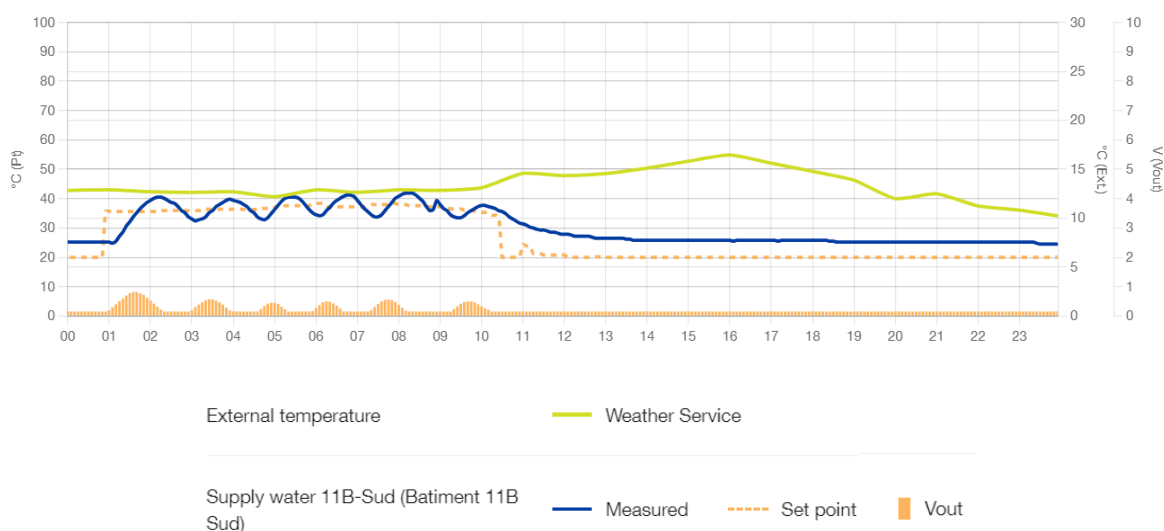


Figura 70 – Rappresentazione grafica delle temperature da WebApp

8. Commento dei risultati

I dati mostrati nei capitoli precedenti fanno riferimento al periodo di EB OFF da inizio dicembre a fine gennaio e all'unico periodo EB ON dal 1 al 12 febbraio. Con sole 2 settimane di consumi, la fase di ON da sola non basta per estendere ad un'intera stagione termica le percentuali di risparmio ottenute con l'ottimizzazione della regolazione HVAC, ma sarà necessario ampliare i dati raccolti con quelli nuovi che saranno disponibili a fine periodo POC (16 aprile 2024). Una volta ultimata l'analisi completa sulla stagione 2023/2024, i risultati calcolati avranno al loro interno un buon range di variazione delle condizioni al contorno, le quali influenzano i consumi termici e il comfort interno.

In Figura 71 vengono mostrati i due grafici riassuntivi dei fabbricati 11B e 11C con le baseline, i consumi effettivi con EB ON e il valore percentuale di risparmio ottenuto. I dati sono accorpati solo per i 2 edifici, non più per weekday/weekend o per zone termiche del fabbricato.

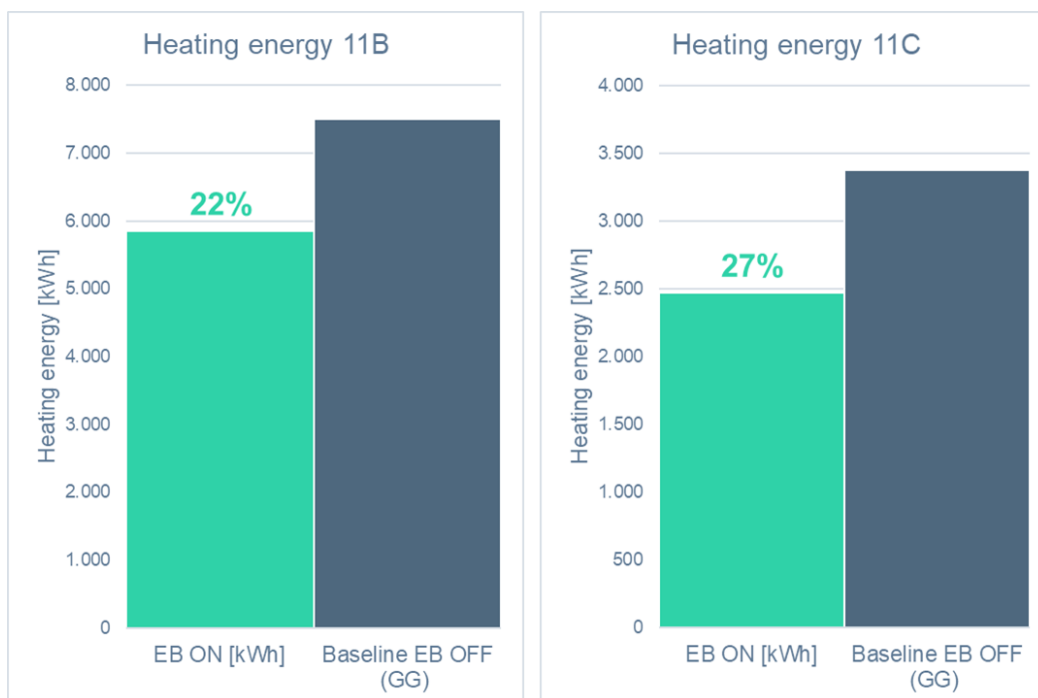


Figura 71 - Risparmi energetici per edifici POC2

I valori esatti con cui sono stati creati gli istogrammi sono riportati anche in Tabella 11, mostrando il valore di risparmio in kWh e in percentuale. L'ultima riga della tabella è quella importante e riassuntiva, utile per fare delle previsioni di risparmio energetico sul lungo periodo o per valutare il risparmio economico: basta semplicemente moltiplicare i kWh risparmiati per il costo unitario €/kWh dell'energia del teleriscaldamento, valore che è indicato nelle bollette del cliente.

	EB ON [kWh]	Baseline EB OFF (GG)	RISPARMI [kWh]	SAVING %
Bâtiment 11B	5.850	7.499	1.649	22%
Bâtiment 11C	2.470	3.378	908	27%
TOTAL	8.320	10.877	2.557	24%

Tabella 11 - Risparmio complessivo POC2

Complessivamente sono stati risparmiati più di 2.550 kWh termici in un intervallo di tempo di soli 12 giorni. La percentuale di saving raggiunta è pari al 24% ed è molto significativa.

L'algoritmo Enerbrain ha permesso di raggiungere 2 obiettivi importanti per il cliente: il primo riguardava il mantenimento del comfort ambientale nei due edifici e il secondo corrispondeva al risparmio energetico per il riscaldamento degli edifici.

Come è stato riportato nel capitolo precedente, il primo traguardo del comfort è stato raggiunto e a dimostrazione di ciò sono stati presentati i grafici carpet plot con le temperature interne per singola zona termica. L'introduzione della logica di regolazione predittiva è stata fondamentale per ridurre in maniera ulteriore il discomfort termico percepito dagli occupanti: nel primo POC la logica adattiva ha comunque permesso di mantenere un buon livello di comfort durante l'arco della giornata, ma andando a preaccendere in maniera dinamica il sistema il comfort è stato ampliato anche alle prime ore del mattino.

Per il secondo target del cliente, i misuratori di energia termica posizionati in centrale termica hanno evidenziato una diminuzione dei consumi per il riscaldamento degli edifici, come riportato nella tabella precedente.

9. Conclusioni

L'obiettivo di questo lavoro di tesi in azienda presso Enerbrain S.r.l. è stato la gestione complessiva della commessa per il cliente, suddivisa nella stesura di documenti tecnici a supporto del contratto stipulato e nelle varie attività di project management: tra di esse ci sono la gestione del secondo periodo POC degli edifici oggetto di intervento per la durata complessiva del contratto e le analisi di risparmio energetico e di comfort ambientale riportate in questo elaborato.

Il titolo dell'elaborato include diversi concetti chiave sviluppati poi nel testo del documento come l'ottimizzazione della regolazione HVAC, la pre-accensione e il pre-spegnimento dinamici degli impianti. Sono tutte strategie implementabili sia su edifici di nuova costruzione che su edifici esistenti attraverso interventi di retrofit.

Molto spesso gli edifici sono dotati di controllori e logiche di regolazione che, con il passare degli anni, diventano obsolete e non sono più in grado di mantenere delle condizioni di comfort ambientale soddisfacenti per gli occupanti. La soluzione tecnica di Enerbrain permette di ottimizzare il sistema HVAC senza andare a modificare lo stato di fatto del sistema di generazione, distribuzione e emissione: sono soluzioni poco ingombranti, modulari e pratiche che possono essere interfacciate con la maggior parte dei sistemi/impianti presenti degli edifici.

Il caso studio presentato nel corpo del testo è la prova reale di come dei dispositivi posizionati letteralmente a metà tra il controllore e gli attuatori siano in grado di rivoluzionare le logiche di regolazione dei sistemi HVAC dell'edificio. La soluzione MiM ha come punto di forza proprio la sua flessibilità e semplicità di applicazione nei diversi tipi e modelli di attuatori presenti in campo: pompe di circolazione a giri variabili, valvole di miscelazione a 3 vie, ventilatori con comando ON/OFF o modulante e serrande dei canali d'aria.

La riduzione delle emissioni e del consumo energetico degli edifici può essere conseguita grazie a dei dispositivi di ottimizzazione delle logiche di regolazione dei sistemi HVAC, senza necessariamente andare ad effettuare modifiche e/o sostituzioni costose ed impattanti ai sistemi. Le aziende che offrono servizi energetici come Enerbrain possono essere il primo semplice step per mettere in contatto i proprietari di edifici industriali e del terziario al grande tema della riduzione dei consumi energetici, mostrando loro i risultati ottenibili grazie a diversi casi studio consolidati come i due edifici del campus universitario analizzati in questo progetto.

10. Riferimenti

1. **IEA, International Energy Agency.** *World Energy Outlook 2023.*
2. **BP.** *Energy Outlook, How energy is used.* 2023.
3. **Consiglio europeo Accordo di Parigi - Consiglio dell'Unione europea.** [Online] <https://www.consilium.europa.eu/it/policies/climate-change/paris-agreement/>.
4. **Consiglio europeo COP 28 - Consiglio dell'Unione europea.** [Online] <https://www.consilium.europa.eu/it/policies/climate-change/paris-agreement/cop28/>.
5. **United Nations, Sustainable Development.** [Online] <https://sdgs.un.org/goals>.
6. **UNI EN 15232-1:2017 - Prestazione energetica degli edifici - Parte 1: Impatto dell'automazione, del controllo e della gestione tecnica degli edifici.**
7. **Enerbrain s.r.l.** [Online] <https://www.enerbrain.com/>.
8. **Sigfox 0G Technology.** [Online] <https://www.sigfox.com/>.
9. **Sayed, Khairy e Gabbar, Hossam A.** *Energy Conservation in Residential, Commercial, and Industrial Facilities (pp. 15-81).* 2018.
10. **Strategie di Regolazione degli Impianti: regolazione della temperatura di mandata.** Caleffi, Idraulica. Vol. 57.
11. **EVO - Efficiency Valuation Organization.** [Online] <https://www.evo-world.org/en/>.
12. **High-Performance VAV Systems.** Rand, Ingersoll. 2011.