



POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento Energia "Galileo Ferraris"
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica e
Nucleare

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

Opportunità di risparmio energetico legata
all'implementazione dei BACS negli edifici ad uso
ospedaliero

Relatori:

Prof. Vincezo Corrado
Prof. ssa Ilaria Ballarini

Candidato:

Andrea Carbone

Tutori Aziendali
Enerbrain S.r.l.
Lorenzo Ghiringhelli
Tiziana Buso

Novembre 2025

RINGRAZIAMENTI

Un sentito ringraziamento al Professor Vincenzo Corrado e alla Professoressa Ilaria Ballarini per il loro supporto e per i consigli preziosi, indispensabili alla stesura di ogni capitolo di questa tesi.

Ringrazio l'azienda Enerbrain per avermi offerto la possibilità di svolgere il mio lavoro di tesi in un contesto stimolante e dinamico, che mi ha offerto l'occasione di crescere professionalmente e maturare un'esperienza preziosa per il mio futuro. Un ringraziamento particolare va ai miei tutor aziendali, Lorenzo Ghiringhelli e Tiziana Buso, per la loro costante disponibilità e gentilezza.

Un sincero ringraziamento, dal più profondo del mio cuore, va alla mia famiglia e ai miei amici. A mia mamma, a mio papà e a mio fratello, per il sostegno costante, anche nei momenti di difficoltà. Mi avete sempre incoraggiato a portare a termine il mio percorso senza giudizio, ma con un supporto sincero e amorevole. Ai miei nonni Raffaella, Pietro e Angela. A nonno Domenico, che da lassù illumina il mio cammino. Ai miei zii Marco, Stefania, Toni, Anna, Biagio, Nicoletta e Antonio. Ai miei cugini Davide, Luca, Domenico, Giandomenico, Rosangela, Mariana e a tutti gli amici di giù con cui ho condiviso le migliori estati della mia vita. Ai miei amici delle superiori, Edoardo, Matilde, Alice, Omar, Furfi, Vittorio e Simone, con i quali ho vissuto esperienze di cui è un piacere mantenere il ricordo. Ai miei amici di zona, Emanuele, Domenico, Luna, Giulio, Paola, Nico, Umberto, Simone e Matteo, compagni di avventure in montagna e di grandi abbuffate. Ai miei amici festaioli Cipo, Christian, Isma, Bonny, Svix, Pie, Gio e Alice, con cui ho passato mistiche serate. A Stefano e Cristina, con cui condivido uno dei passatempi migliori del mondo: Piciera. Agli amici dell'Università Andrea, Michela, Arianna, Chiara, Luca e Maria Claudia, compagni indispensabili per affrontare i momenti di noia delle lezioni e di ansia delle sessioni. A Irene che è riuscita ad addolcire la mia vita con il suo affetto e il suo amore.

Ogni traguardo perde di significato se non lo si condivide con le persone che lo hanno reso possibile. Il mio affetto va a tutti voi, che mi avete accompagnato fino a qui e a tutti coloro che in futuro saranno al mio fianco.

Abstract

In Europa la riduzione delle emissioni dei gas climalteranti è diventata una delle sfide tecnologiche più importanti del nuovo millennio. La grande mole di dati sui consumi dei vari settori dimostra come il parco edilizio sia responsabile del 36% delle emissioni, di cui il 13.5% dovuto al terzo settore. Gli edifici ad uso ospedaliero, caratterizzati da un utilizzo continuativo degli impianti, coprono l'11% di tutto il settore terziario. L'Unione Europea, firmataria dell'accordo di Parigi, ha stilato un insieme di iniziative denominato Green Deal, tradotto poi a livello legislativo nel "Fit for 55", che ha lo scopo di favorire il raggiungimento della neutralità climatica entro il 2050. I provvedimenti adottati, tra cui la Direttiva sull'Efficienza Energetica (EED) e la Direttiva sulla Prestazione Energetica degli Edifici (EPBD), comprendono requisiti e azioni di efficientamento sul parco edilizio. Uno degli strumenti indicati nella direttiva EPBD per il miglioramento delle prestazioni energetiche degli edifici, sono i sistemi di "Building and Automation Control System" (BACS). Gli interventi che coinvolgono i BACS sono caratterizzati da costi contenuti e impatti significativi, con risparmi energetici intorno al 20% per edifici non residenziali e tempi di rientro medi di 3 anni. Le logiche poste alla base dei BACS e le fasi di progettazione necessarie all'implementazione in un edificio sono descritte in modo dettagliato nelle norme tecniche internazionali EN ISO 16484 e EN ISO 52120-1:2022 e sono fondamentali per standardizzare gli interventi e favorire l'interoperabilità tra soluzioni.

Questo lavoro di tesi, sviluppato presso l'azienda Enerbrain di Torino, pone il focus sugli edifici ad uso ospedaliero e quantifica il risparmio energetico ottenuto grazie a due tipologie di interventi di retrofit eseguiti su impianti di riscaldamento idronici. La prima tipologia di retrofit prevede interventi puntuali sugli impianti, andando a ottimizzare solo singole funzioni di controllo BACS. La seconda tipologia, invece, prevede un revamping completo del sistema di controllo locale. In entrambi i casi, sono stati implementati sistemi BACS, integrati con una soluzione in Cloud, che consente l'ottimizzazione, il monitoraggio e l'estrazione dei dati misurati in tempo reale. Con il supporto dell'azienda Enerbrain, sono state descritte le tecnologie utilizzate su 20 edifici (Ospedali/cliniche e RSA private). Inoltre, partendo dai dati raccolti sul campo, dalle bollette fornite dai clienti e dai dati meteo, è stata costruita la firma energetica degli edifici e successivamente la curva di baseline tramite interpolazione lineare. Il calcolo della baseline è differente per le due tipologie di retrofit: nel caso del revamping completo, si hanno a disposizione i consumi mensili su circa 10 anni; nel caso degli interventi puntuali, sono stati eseguiti periodi di on/off sull'impianto per costruire una curva accettabile. Sono stati infine calcolati i risparmi energetici percentuali, proiettando i consumi post intervento corrispondenti ai periodi in cui l'ottimizzazione è attiva. I risultati dimostrano che sia il rinnovo completo del sistema BACS, sia azioni su singole funzioni di controllo producono risparmi percentuali significativi.

Indice

1 Introduzione	5
1.1 Impatto del parco edilizio	5
1.2 Parco edilizio ospedaliero	6
1.3 Obiettivi della tesi	10
2 Quadro legislativo	13
2.1 Direttiva EU/2023/1791 (EED)	13
2.2 Direttiva EU/2024/1275 (EPBD IV)	14
2.3 Recepimento dell'EPBD in Francia	15
2.4 Recepimento dell'EPBD in Germania	16
3 Normativa tecnica	19
3.1 EN ISO 16484-1:2024 BACS - Project specification and implementation	20
3.1.1 Fase di design	20
3.1.2 Fase di progettazione	21
3.1.3 Fase di installazione	22
3.1.4 Fase di conclusione	22
3.1.5 Documentazione	23
3.2 EN ISO 16484-2:2025 BACS - Hardware	23
3.2.1 Catalogo delle funzionalità dei sistemi BACS	23
3.2.2 Topologia	25
3.3 EN ISO 16484-3:2024 BACS - Functions	26
3.3.1 Panoramica	26
3.3.2 Function Block Diagram	26
3.3.3 Software	27
3.3.4 Strumenti per la progettazione	27
3.3.5 Funzioni ingegnerizzate	28
3.4 EN ISO 52120-1:2022 EPB - Contribution of building automation, controls and building management	28
3.4.1 Classi BAC	29
3.4.2 Metodi di calcolo dettagliato	30
3.4.3 Metodo di calcolo " <i>factor based</i> "	31
3.5 Funzioni di controllo EN ISO 52120-1	33

3.5.1	Controllo riscaldamento	33
3.5.2	Controllo acqua calda sanitaria	36
3.5.3	Controllo ventilazione e condizionamento	37
4	Tecnologie utilizzate per il retrofit	39
4.1	Informazioni generali	39
4.2	Tecnologia utilizzata per gli interventi di retrofit	40
4.2.1	Cloud	40
4.2.2	Web app	40
4.2.3	eNode	41
4.2.4	Gateway	42
4.2.5	Controllore programmabile	42
4.2.6	Dispositivi di monitoraggio	43
5	Tipologie di intervento di retrofit	47
5.1	Soluzione BEMS Cloud	47
5.2	Soluzione Man in the Middle	48
5.3	RSA francesi	49
5.3.1	Generazione	49
5.3.2	Distribuzione	50
5.3.3	Emissione	51
5.3.4	Acqua calda sanitaria	51
5.3.5	Monitoraggio	51
5.4	RSA tedesche e ospedali francesi	51
5.4.1	Distribuzione ed emissione	51
5.4.2	Monitoraggio	53
6	Valutazione del risparmio energetico	57
6.1	Modello per la stima del risparmio	57
6.1.1	Metriche di errore	59
6.2	Casi studio: RSA francesi	59
6.2.1	Formato dei dati	59
6.2.2	Risparmio energetico	60
6.3	Casi studio: RSA tedesche e Ospedali francesi	70
6.3.1	Formato dei dati	70
6.3.2	Risparmio energetico nelle RSA tedesche	72
6.3.3	Risparmio energetico negli ospedali francesi	77
7	Conclusioni	81
A	Funzioni di controllo	85
A.1	Controllo riscaldamento	85
A.1.1	Controllo di emissione	85
A.1.2	Controllo di emissione per solai termo-attivi	86

A.1.3	Controllo temperatura acqua nella rete di distribuzione (mandata e ritorno)	88
A.1.4	Controllo delle pompe di distribuzione	88
A.1.5	Bilanciamento idronico della rete di riscaldamento	89
A.1.6	Controllo intermittente della emissione e/o distribuzione . .	89
A.1.7	Controllo dei generatori a combustione o del teleriscalda- mento, del generatore a pompe di calore	90
A.1.8	Controllo dei generatori a unità esterna	90
A.1.9	Controllo sequenziale di differenti generatori	91
A.1.10	Controllo dei serbatoi di accumulo dell'energia termica . .	92
A.2	Controllo acqua calda sanitaria	92
A.2.1	Controllo della temperatura di accumulo mediante riscal- datore elettrico integrato o pompa di calore	92
A.2.2	Controllo della temperatura di accumulo usando genera- tore di calore	93
A.2.3	Controllo della temperatura nel serbatoio con collettori solari e generazione di calore esterna	93
A.2.4	Controllo delle pompe ACS	94
A.3	Controllo di ventilazione e condizionamento	94
A.3.1	Controllo mandata aria in ambiente	94
A.3.2	Controllo della portata d'aria esterna	95
B	Definizioni	97
References		101

Capitolo 1

Introduzione

Il XXI secolo è segnato da una crescente urgenza di affrontare le sfide legate al cambiamento climatico e alla gestione delle risorse energetiche. Già dal secolo scorso si è potuto raccogliere dati e dimostrare che le emissioni di gas serra, derivanti dallo sviluppo industriale e dall'uso intensivo delle risorse fossili, sono direttamente correlate all'incremento della temperatura media del Pianeta. Inoltre, si presentano in modo sempre più frequente eventi meteorologici estremi, quali alluvioni, lunghi periodi di siccità e incendi che impattano direttamente sull'economia e sulla società. A livello europeo, è stato lanciato nel 2019 un pacchetto di iniziative strategiche denominato *Green Deal*, che prevede il raggiungimento della neutralità climatica entro il 2050 [12], tuttavia, la soglia limite di +1.5 °C rispetto all'era pre-industriale, stabilita nell'accordo di Parigi nel 2015, è stata già superata temporaneamente durante l'anno 2024 (Fig.1). In questo scenario, il miglioramento dell'efficienza energetica rappresenta uno degli strumenti più efficaci per conciliare progresso economico, riduzione delle emissioni e sostenibilità. Dal punto di vista legislativo, l'UE ha stilato il *"Fit for 55"*, un insieme di atti legislativi il cui obiettivo è ridurre le emissioni di gas a effetto serra di almeno il 55% entro il 2030. Questo è il primo passo per il raggiungimento della neutralità climatica entro il 2050.

1.1 Impatto del parco edilizio

Ponendo il focus sul parco edilizio, si evince che, in Europa, gli edifici attualmente sono responsabili del 40% del consumo di energia e del 36% delle emissioni [12]. Tra i provvedimenti adottati a riguardo, derivati dal *"Fit for 55"*, ci sono:

- la Direttiva sull'efficienza energetica (EED)
- la Direttiva sulla Prestazione Energetica degli Edifici (EPBD)

Per ottenere una significativa riduzione del consumo di energia degli edifici sono adottabili varie strategie, quali la riduzione della trasmissione termica dell'involucro, dell'efficienza degli impianti di climatizzazione e l'utilizzo di accumuli termici e di risorse rinnovabili [2]. Questa tesi si concentra sull'effetto dell'utilizzo dei *Building Automation and Control Systems* (BACS), la cui importanza è stata evidenziata nell'*Energy Performance of Buildings Directive* (EPBD) nel 2018. È stato stabilito che, con le misure presenti nell'EPBD, grazie all'implementazione di BACS, si raggiungerà un risparmio di 450 TWh annuali nel 2035 [10]. I vantaggi degli interventi di efficientamento relativi ai sistemi BACS, permettono tempi di rientro medi di 3 anni e risparmi medi del 20.3% per edifici non residenziali e 23.4% per edifici residenziali [9]. In particolare, il settore terziario è responsabile del 13,5% del consumo di energia in Europa (Fig.2), di cui l'11.1% è attribuito alle attività sanitarie e di assistenza sociale, compresi ospedali e attività di assistenza residenziale [36].

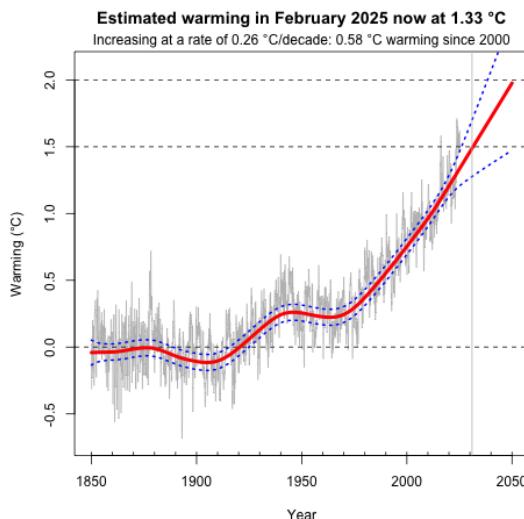


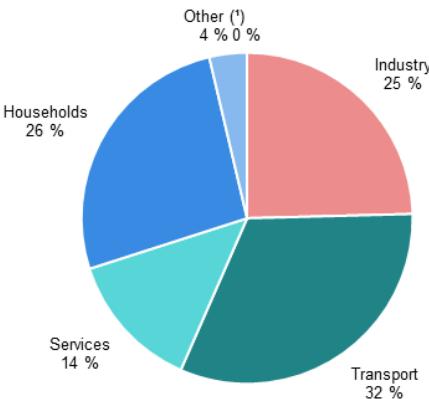
Figura 1: Differenza della temperatura media globale rispetto alla media dell'era pre-industriale (1850-1900)[32]

1.2 Parco edilizio ospedaliero

Questa tesi si concentra sugli edifici ad uso ospedaliero di tipo pubblico e privato, i quali sono caratterizzati da consumi molto elevati (quasi il doppio rispetto alle altre tipologie di edifici del terziario [16]), dovuti a un utilizzo continuativo, 24 ore su 24, 365 giorni l'anno. Questa caratteristica permette di ottenere, a seguito di interventi di retrofit, risparmi assoluti significativi che consentono tempi di rientro dell'investimento brevi [3].

I consumi specifici assoluti degli edifici ad uso ospedaliero sono influenzati da

Final energy consumption by sector, EU, 2023
(% of total, based on terajoules)



(¹) International aviation and maritime bunkers are excluded from category Final energy consumption for transport.
Source: Eurostat (online data code: nrg_bal_s)

eurostat

Figura 2: Consumo finale di energia per settore, UE, 2023 [39]

molti fattori quali: la destinazione d'uso (cliniche, ospedali, privati o pubblici), le condizioni meteo, la modalità di utilizzo degli impianti, mix energetico locale. Santamouris et al. [1] con uno studio basato su audit energetici di 30 ospedali a Hellas, ha stabilito che il consumo medio annuale di energia è pari a 407 kWh/m²/anno (73% per il riscaldamento) negli ospedali e 275 kWh/m²/anno (63.5% per il riscaldamento) nelle cliniche.

García-Sanz-Calcedo [3] ha eseguito uno studio sull'efficienza energetica su 55 centri sanitari spagnoli sotto i 3000², ottenendo un consumo medio energetico pari a 86.01 kWh/m²/anno.

Nel più recente García-Sanz-Calcedo, Gómez-Chaparro e Sanchez-Barroso [8], un'analisi quantitativa su 13 ospedali con superfici da 2314 a 23,888 m² privati spagnoli, mostra un consumo di 300 kWh/m²/anno (25% di energia termica, 75% di energia elettrica).

Uno studio di Marino, Pariso e Picariello [22] analizza i consumi mensili di 1062 ospedali italiani, in un periodo di 6 anni (2016-2022). I risultati mostrano un consumo medio annuale di 407 kWh/m²/anno (50% energia termica, 50% energia elettrica).

I casi studio analizzati in questo lavoro sono localizzati in Francia e in Germania, perciò si è ritenuto opportuno presentare i consumi del settore ospedaliero in questi due Stati. L'analisi di González González, García-Sanz-Calcedo e Rodríguez Salgado [7] su 90 eco-audit, eseguiti su 23 ospedali pubblici tedeschi tra il 2005 e il 2015, mostra un consumo energetico medio annuale di 270

kWh/m²/anno e 23.41 MWh/letto/anno. In media, in Germania, il consumo di energia termica è pari a 29 MWh/letto/anno di energia termica e 6 MWh/- letto/anno di energia elettrica.

Dai dati presenti in rete, i consumi del settore ospedaliero nel 2023 in Francia ammontano a 21.5 TWh/anno [16], mentre in Germania ammontano a 18.1 TWh/anno [15].

Infine, secondo Roméo Juge [29], il consumo di energia finale per il settore ospedaliero francese ammonta a 170 kWh/m²/anno, mentre il consumo di energia primaria a 289 kWh/m²/anno. Questo valore di riferimento di energia finale viene declinato in due voci (Fig.3):

- ospedali pubblici e privati: 254 kWh/m²/anno
- case di riposo e assistenza sanitaria sociale: 149 kWh/m²/anno

Per quanto riguarda i consumi delle case di riposo e l'assistenza sanitaria sociale, come si può notare in Fig.4, i consumi di energia finale in Francia e Germania sono rispettivamente 149 kWh/m²/anno e 138 kWh/m²/anno. I consumi sono molto differenti da paese a paese perché non sono stati normalizzati sui dati meteo e perché dipendono da come l'edificio è utilizzato. In Durable [27] viene presentata la tassonomia degli edifici Europei attraverso i consumi medi in kWh/m²/anno per il top 15% e il top 30% degli edifici più performanti. La top 15%(30%) corrisponde al consumo di energia primaria sotto il quale ricadono il 15% (30%) degli edifici e, a livello Europeo, si può notare una riduzione dei consumi energetici dal 2021 al 2023, a dimostrazione del fatto che gli Stati europei stanno attuando misure per la riduzione delle emissioni degli edifici. Confrontando i valori in Tab.1.1 con i consumi del settore ospedaliero francese di energia primaria (289 kWh/m²/anno), si nota che la Francia si colloca fuori dalla Top 30%. I dati precedentemente riportati si riferiscono alla letteratura. In questa tesi verrà verificata l'attendibilità e la coerenza dei dati presenti in questi report e negli articoli, attualizzando i consumi con uno studio sui dati misurati prima e dopo un intervento di efficientamento.

	2021		2022		2023	
	Top15	Top30	Top15	Top30	Top15	Top30
HEALTHCARE	197	250	184	234	178	222
Public or private hospitals	298	346	277	369	263	339
Retirement homes and social healthcare	187	231	173	214	167	211

Tabella 1.1: Tabella tassonomia dei consumi di energia primaria (kWh/m²/anno) degli edifici in Europa [27]

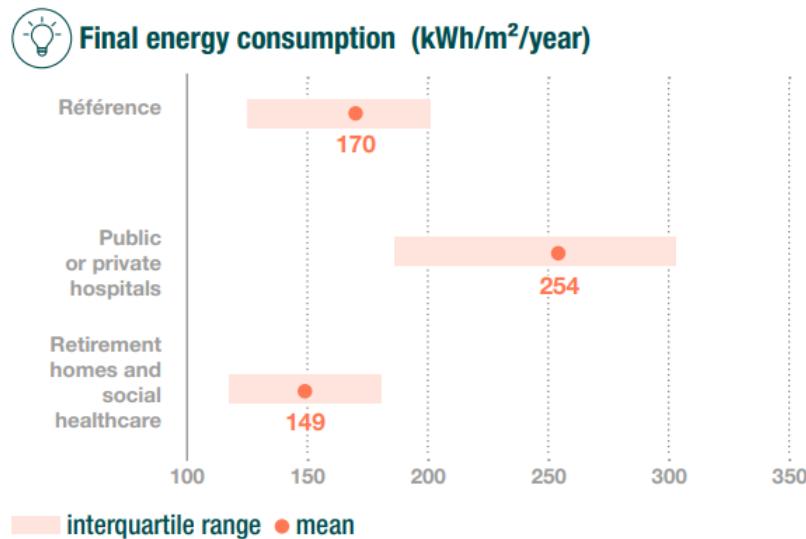


Figura 3: Consumo di energia finale (HEALTHCARE, Final energy consumption [29])

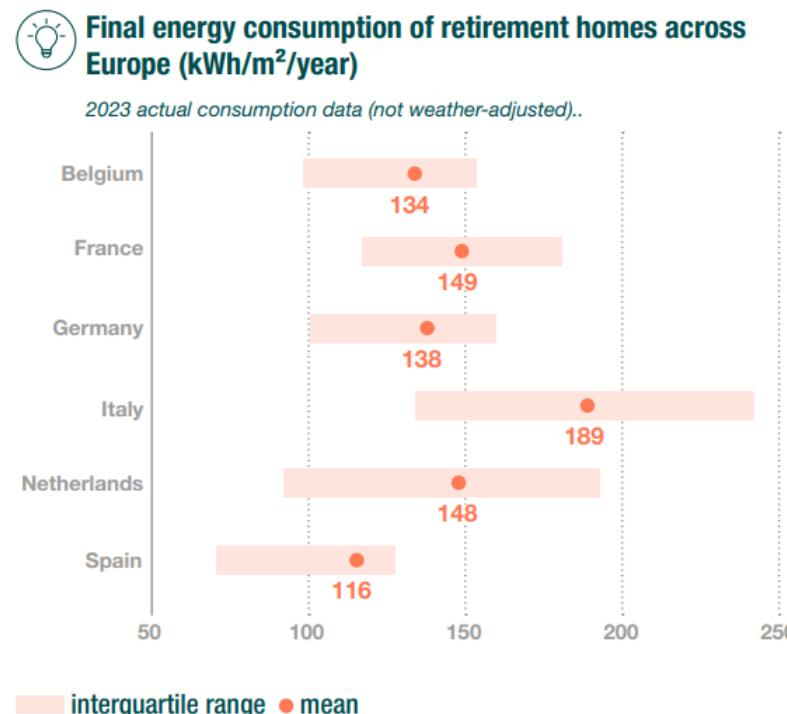


Figura 4: Consumo di energia finale (HEALTHCARE, Final energy consumption of retirement homes across Europe [29])

1.3 Obiettivi della tesi

Lo scopo di questa tesi è quantificare in maniera più accurata, rispetto al metodo *"factor based"*, il risparmio che si può ottenere da specifici interventi di efficientamento energetico su edifici ad uso ospedaliero. L'analisi è stata eseguita su 20 edifici, in collaborazione con l'azienda [©]Enerbrain S.r.l., la quale ha fornito i dati delle bollette e misurati pre e post retrofit in campo. Nei capitoli successivi si parlerà delle direttive europee più recenti riguardanti l'efficientamento energetico degli edifici (Cap.2), poi si andranno a descrivere gli standard tecnici legati alla gestione e automazione degli edifici con un focus sulle funzioni BAC implementate nei casi studio (Cap.3). Completato il quadro normativo e tecnico, si è eseguita una descrizione delle tecnologie utilizzate nei casi studio (Cap.4), successivamente la descrizione dettagliata dei casi presi in esame (Cap.5) e infine, la valutazione del risparmio energetico calcolata a partire dai dati misurati e forniti dalle bollette (Cap.6).

Capitolo 2

Quadro legislativo

Il quadro legislativo in Europa è composto da più livelli. Il livello più alto sono le direttive emanate dalla Commissione Europea, le quali, una volta approvate e pubblicate sulla Gazzetta Ufficiale dell’UE, danno un tempo massimo di 2 anni agli stati membri per la ricezione interna. Pertanto, le direttive non sono direttamente applicabili, ma richiedono un recepimento sotto forma di leggi, decreti o regolamenti nazionali, che a loro volta sono declinati in leggi regionali e locali.

2.1 Direttiva EU/2023/1791 (EED)

La direttiva 2023/1791 promuove l’efficienza energetica come principio fondamentale, fissa gli obblighi e le misure per ridurre il consumo energetico e definisce il campo di applicazione nei settori di: edilizia, industria, trasporti, pubblica amministrazione. Per quanto riguarda il parco edilizio, viene definita come obbligatoria una riduzione del consumo di energia pari almeno all’11,7% nel 2030 rispetto alle proiezioni dello scenario di riferimento UE 2020, al fine di portare il consumo di energia finale dell’Unione al di sotto di 763 Mtep e il consumo di energia primaria al di sotto di 992.5 Mtep (Art.4). Per quanto riguarda gli enti pubblici, è stata stabilita una soglia minima del 3% della superficie coperta utile totale degli edifici riscaldati e/o raffrescati da ristrutturare ogni anno, per portarli almeno a emissioni quasi zero. La percentuale di edifici in eccedenza al 3% viene aggiunta nel conteggio dell’anno successivo, inoltre, la quota del 3% vale per edifici con superficie utile coperta superiore a 250 m². Entro il 2040, tutti gli edifici di proprietà di enti pubblici dovranno essere portati a emissioni quasi zero (Art.6). Vengono poi definiti i nuovi risparmi annui dal 2021 al 2023 (Art.8). Le percentuali del consumo annuo medio di energia finale realizzato nel triennio precedente il 2019 sono:

- i) 0.8% dal 2021 al 2023 compreso

- ii) 1.3% dal 2024 al 2025 compreso
- iii) 1.5% dal 2026 al 2027 compreso
- iv) 1.9% dal 2028 al 2030 compreso

Successivamente, viene imposto l'obbligo di fissare dei prezzi concorrenziali per contatori di riscaldamento e ACS (Art.14), viene definita la modalità di contabilizzazione divisionale e ripartizione dei costi per il riscaldamento, il raffrescamento e l'acqua calda per uso domestico (Art.15) e infine viene imposto l'obbligo di installazione di dispositivi che permettano la lettura dei contatori da remoto (Art.16). L'accesso a questi dati teleletti deve essere gratuito, la ripartizione dei costi delle informazioni di fatturazione in relazione al consumo individuale è effettuata senza scopo di lucro(Art.19,Art.20). Infine, vengono poi definite, dal 2027 al 2025, le quote percentuali di energia rinnovabile, calore di scarto, calore da cogenerazione ad alto rendimento, utilizzabili da un sistema di teleriscaldamento e teleraffrescamento (Art.26).

2.2 Direttiva EU/2024/1275 (EPBD IV)

L'ultima direttiva Europea, riguardante il settore edilizio, è la 2024/1275 [26], entrata in vigore il 28 maggio 2024, tuttavia, attualmente, gli stati membri hanno recepito solo l'EPBD III (2018/844). Nella parte introduttiva è indicata la situazione attuale del comparto edilizio in termini di consumi ed efficienza energetica. Viene sottolineato il consumo elevato di energia finale da parte degli edifici sul suolo Europeo, inoltre, è stabilito che ogni stato deve adoperarsi alla riduzione significativa dei consumi di energia da parte degli edifici già esistenti e alla realizzazione solo di edifici nuovi a zero emissioni entro il 2030. In aggiunta, è stato fissato l'obiettivo di rendere tutti gli edifici a zero emissioni entro il 2050(Art.3). Per raggiungere questi obiettivi, impone l'esclusione di fonti fossili e la diffusione e l'utilizzo sempre maggiore di fonti rinnovabili. In seguito, la direttiva impone la fissazione di requisiti minimi di prestazione energetica (Art.5) e il calcolo dei livelli ottimali in funzione dei costi (Art.6). Sono elencati inoltre tutti i sistemi tecnici utili all'efficientamento e al monitoraggio degli impianti, correlati a requisiti minimi da raggiungere entro determinate date (Art.13). L'adozione di sistemi di automazione e monitoraggio si basa su alcuni standard ISO indicati nell'Art.4, riguardanti la prestazione energetica degli edifici. Oltre agli standard citati in quest'ultimo articolo, ve ne sono presenti altri riguardanti i BACS:

- EN ISO 16484–1:2024 → Building automation and control systems - Part 1: Project specification and implementation
- EN ISO 16484–2:2025 → Building automation and control systems - Part 2: Hardware

- EN ISO 16484–3:2005 → Building automation and control systems - Part 3: Functions
- EN ISO 16484–4:2025 → Building automation and control systems - Part 6: Data communication conformance testing
- EN ISO 16484–5:2022 → Building automation and control systems - Part 5: Data communication protocol
- EN ISO 16484–6:2025 → Building automation and control systems - Part 6: Data communication conformance testing
- EN ISO 52127–1:2021 → Energy performance building - Building management system
- EN 12098–1:2022 → Energy performance of buildings - Controls for heating systems - Part 1: Control equipment for hot water heating systems - Modules M3-5, 6, 7, 8
- EN 12098–3:2022 → Energy performance of buildings - Controls for heating systems - Part 3: Control equipment for electrical heating systems - Modules M3-5,6,7,8
- EN 14597:2012 → Temperature control devices and temperature limiters for heat generating systems
- CEN/TS 15379:2006 → Building management - Terminology and scope of services
- EN 15500–1:2017 → Energy Performance of Buildings - Control for heating, ventilating and air conditioning applications - Part 1: Electronic individual zone control equipment - Modules M3-5, M4-5, M5-5
- EN 16946–1:2017 → Energy Performance of Buildings - Inspection of Automation, Controls and Technical Building Management - Part 1: Module M10-11
- EN 13321–1:2021 → Open data communication in building automation, controls and building management - Home and building electronic system - Part 1: Product and system requirements
- EN 14908 → Open Data Communication in Building Automation, Controls and Building Management - Control Network Protocol

2.3 Recepimento dell'EPBD in Francia

Nello stato francese, le direttive europee sono state recepite tramite il CCH (Code de la construction et de l'habitation) [30] che riunisce leggi e regolamenti

relativi alle costruzioni e all’abitazione. Nel CCH sono citati vari decreti attualmente in vigore: il decreto (décret) n°2021-1004 [17] sui requisiti degli edifici di nuova costruzione, il n°2017-919 [6] che impone dei miglioramenti dell’efficienza dell’edificio in caso di ristrutturazioni importanti, il n°2021-1104 [31] che impone, in caso di vendita di edifici di classe F o G, un audit energetico dettagliato. Inoltre, nel CCH viene prevista una diagnosi di prestazione energetica obbligatoria (Diagnostic de performance énergétique - DPE) per la vendita di edifici dalla classe A alla classe G [25]. Per quanto concerne i sistemi BACS, il decreto BACS [24] prevede l’obbligo di installazione di sistemi di automazione e controllo, negli edifici terziari, nuovi e esistenti, in cui gli impianti HVAC superano una potenza nominale totale di 290 kW a partire dal 1° gennaio 2025 e compresi tra 70 kW e 290 kW a partire dal 1° gennaio 2027.

2.4 Recepimento dell’EPBD in Germania

In Germania, la direttiva EPBD è stata recepita tramite la legge federale Gebäudeenergiegesetz (GEG) (Legge sull’energia negli edifici)[28] e definisce: per gli edifici esistenti, in caso di ristrutturazioni importanti, un miglioramento della prestazione energetica degli impianti; nel caso di edifici di nuova costruzione, sono definiti obiettivi molto stringenti, al fine di ottenere edifici a emissioni zero o quasi zero, anche tramite una penetrazione significativa di energie rinnovabili nei sistemi di riscaldamento e produzione ACS; stabilisce, inoltre, i requisiti per la prestazione energetica degli edifici, il rilascio e l’utilizzo degli attestati di prestazione energetica e di energie rinnovabili negli edifici. Una modifica del 1° gennaio 2024 ha ridotto il limite del fabbisogno primario per i nuovi edifici, aumentato la quota minima di energia rinnovabile che deve essere utilizzata per il riscaldamento, fissato delle scadenze per il raggiungimento delle quote di rinnovabile e, infine, fissata per il 2045 l’esclusione delle fonti fossili dai sistemi di riscaldamento. Per quanto riguarda i sistemi BACS, il GEG 70 impone, quanto tecnicamente possibile, l’installazione di tecnologie di monitoraggio, controllo e regolazione degli impianti HVAC. A differenza del decreto BACS francese, il GEGE 70 vale per impianti di qualsiasi potenza. Poiché la Germania è uno stato federale, ognuno dei 16 stati federati produce normative locali proprie riguardanti l’applicazione della GEG. Infine, a livello attuativo, esistono norme tecniche specifiche tedesche che fanno riferimento agli standard tecnici europei e internazionali, riguardanti i metodi di calcolo e i requisiti operativi per la progettazione, la costruzione e la valutazione energetica degli edifici: la normativa DIN V 18599 riguardante il bilancio energetico degli edifici, la DIN 4108 sui requisiti minimi dell’involtucro edilizio, la EN ISO 16484 sul controllo e l’automazione negli edifici, la VDI 3814 sulla pianificazione, esecuzione, integrazione, gestione dei sistemi di automazione edilizia e la EN ISO 52120 (a sostituzione della UNI EN 15232).

Capitolo 3

Normativa tecnica

Le normative tecniche nazionali e internazionali hanno lo scopo di garantire sicurezza, qualità, interoperabilità e coerenza tra i prodotti, i processi e i servizi. L'uniformità e la compatibilità vengono ottenuti stabilendo le specifiche per i prodotti e le componenti, mentre la sicurezza e la qualità vengono stabilite dagli standard che fissano rispettivamente i requisiti minimi e prestazionali. Seguire gli standard permette inoltre di eliminare le barriere tecniche tra i paesi e favorisce la diffusione di tecnologie innovative, oltre a tutelare il consumatore. Normalmente gli standard nazionali e internazionali non sono obbligatori, ma possono diventarlo nel caso in cui siano citati in leggi, in contratti tra privati o necessari per ottenere certificazioni.

In ambito di prestazione energetica dell'edificio, in Europa, gli standard tecnici citati nell'EPBD forniscono un quadro metodologico generale per la valutazione EPB (EN ISO 52000-1, EN ISO 52003-1 e EN ISO 52018), una guida per il calcolo del fabbisogno energetico (EN ISO 52010 e EN ISO 52016) e il contributo dei BACS alla prestazione energetica dell'edificio (EN ISO 52120). Altre norme della serie 52000 forniscono metodi specifici per la valutazione della performance di ogni tipologia di sistema tecnico di un edificio (EN ISO 52031÷52036).

Infine, per la progettazione dei BACS negli edifici, gli standard di riferimento sono la serie EN ISO 16484 di valenza internazionale, le serie EN 12098, EN 14597, EN 15500, EN 16946, EN 13321, EN 14908 di valenza europea.

In questa tesi si fornisce una descrizione degli standard riguardanti la progettazione di sistemi di automazione con un focus sulle funzioni di automazione implementate nei BACS, al fine di quantificare il risparmio generato dall'implementazione di quest'ultime. Le funzioni sono descritte in dettaglio negli standard EN ISO 16484-4 e riportate nella EN ISO 52120-1.

3.1 EN ISO 16484-1:2024 BACS - Project specification and implementation

Questo standard definisce le fasi richieste da un progetto BACS:

- design: definizione dei requisiti del progetto e redazione della documentazione di progetto, incluse le specifiche tecniche;
- progettazione dettagliata delle funzioni e dell' hardware;
- installazione e messa in servizio del sistema BACS;
- consegna, accettazione e chiusura del progetto.

3.1.1 Fase di design

La fase di design inizia con la determinazione dei requisiti di progetto che comprende:

- l'analisi delle esigenze del cliente e dei requisiti generali del sistema.
- considerazione di:
 - struttura e utilizzo dell'edificio;
 - requisiti d'integrazione e compatibilità con i sistemi presenti, come illuminazione, sicurezza, energia, HVAC, allarmistica;
 - attributi fisici e infrastrutturali, come cablaggio, alimentazione, spazi, condizioni ambientali, presenza di BACS;
 - bisogni operativi e occupazionali, come condizioni di comfort, prestazioni energetiche e priorità operative;
 - specificità del sito e del committente, come la documentazione riguardante l'installazione, le licenze software e il commissioning, la formazione del personale e l'organizzazione della manutenzione.

Segue poi la pianificazione e l'organizzazione del progetto, in cui vengono definite fasi, attività, scadenze, responsabilità. È poi necessario stabilire un organigramma e i ruoli di coordinamento, la sicurezza, gli orari di lavoro, gli accessi agli edifici, contatti con terze parti e, infine, le procedure di gestione dei cambiamenti per analizzare i riscontri del cliente ed eventuali mancanze del progetto.

Vengono poi definiti i documenti e le specifiche tecniche da produrre:

- norme e regolamenti richiesti;
- schemi, disegni e descrizioni funzionali;
- lista dei punti e delle funzioni BACS (ISO 16484-3);

- requisiti di collaudo, formazione e documentazione;
- dettagli su sistemi, apparecchiature, interfacce e parti di ricambio.

La fase di design termina con la stesura del contratto che contiene tutte le specifiche tecniche che saranno stabilite dalle parti interessate. Il contratto deve essere firmato per passare alla fase di progettazione.

3.1.2 Fase di progettazione

In questa fase, lo scopo è tradurre i requisiti e le specifiche definite nella fase di design in un progetto tecnico dettagliato e realizzabile, comprendente tutte le configurazioni, le funzioni di controllo e i test di sistema necessari per l'implementazione del BACS:

1. Per iniziare, si programmano le attività tra le varie discipline tecniche (impianti elettrici, HVAC, sicurezza, illuminazione) e si pianificano e organizzano la gestione delle modifiche al progetto e le fasi di verifica, test e consegna.
2. Si revisionano le specifiche tecniche al fine di identificare i requisiti di alimentazione, l'accesso alla rete e le condizioni ambientali. Vengono poi creati dei documenti che includono:
 - Architettura del sistema e descrizione.
 - Lista dei punti dati e delle funzioni BACS.
 - Descrizione funzionale aggiornata, incluse le sequenze operative.
 - Documenti aggiuntivi richiesti.
3. Si sottopongono documenti progettuali creati al cliente per approvazione, garantendo che soddisfino le specifiche tecniche.
4. Se esegue la progettazione di cablaggi, schemi elettrici, identificazione dei terminali, connettività dei dispositivi e configurazione di rete. Si formula poi un piano di test per verificare la conformità hardware e un piano di messa in servizio.
5. si configura il software di controllo per la gestione di input/output e le funzioni BACS. Dovranno essere incluse le sequenze operative, le gestione di eventi e gli allarmi, i livelli utente, la condivisione di dati e priorità. Infine, va formulato un piano di test e di messa in servizio.
6. Si configurano le funzioni di gestione, supervisione e controllo per l'operatore. Comprendono la raccolta dati, il backup, l'archiviazione e le integrazioni con terze parti. Anche in questo passaggio è necessario formulare un piano di test e di messa in servizio.

7. Si esegue infine un test preliminare delle strategie di controllo, dei pannelli elettrici, interfacce utente (HSI), dell'interoperabilità ed usabilità, per confermare che soddisfi le specifiche funzionali e operative

3.1.3 Fase di installazione

Conclusa la fase di progettazione, si può procedere all'implementazione fisica del sistema BACS, seguendo le specifiche progettuali e le normative applicabili. Questa fase comprende:

1. l'installazione in campo di componenti hardware, come sensori, attuatori e pannelli di controllo, assicurando che siano posizionati correttamente e collegati secondo i diagrammi elettrici forniti.
2. la verifica e la messa in servizio del sistema. Si eseguono dei test di funzionalità, la configurazione dei parametri di controllo e la registrazione delle impostazioni per garantire che il sistema operi come previsto.

Durante ogni passaggio, è fondamentale produrre una documentazione dettagliata, come i report di test, le registrazioni delle configurazioni e le eventuali modifiche apportate durante il processo.

3.1.4 Fase di conclusione

La fase di completamento segna la conclusione del progetto BACS, assicurando che tutte le attività siano state eseguite e che il sistema sia pronto per l'uso operativo. Quest'ultima fase si articola nei seguenti passaggi:

1. si esegue una dimostrazione formale del sistema per il cliente, mostrando tutte le funzionalità del BACS.
2. si fornisce una formazione agli operatori e al personale di manutenzione su operazioni quotidiane, manutenzione preventiva e risoluzione dei problemi riguardanti i BACS.
3. Fornire al cliente la documentazione "*as-built*", che include:
 - schede tecniche e manuali operativi;
 - documenti di garanzia e certificazioni;
 - elenco delle attrezzature fornite e delle impostazioni finali;
4. il cliente esamina il sistema e conferma che tutte le specifiche siano state soddisfatte. Eventuali problemi identificati devono essere risolti prima dell'accettazione finale,
5. Una volta completate tutte le attività e ottenuta l'accettazione, il progetto viene ufficialmente chiuso ed è possibile eventualmente raccogliere feedback per miglioramenti futuri;

6. Si verifica che tutte le attività siano state completate, che il sistema sia operativo e che tutta la documentazione necessaria sia stata fornita e archiviata correttamente.

3.1.5 Documentazione

Tutta la documentazione specifica del progetto deve essere fornita in formato "*as-built*", garantendo che rifletta accuratamente l'installazione finale e le configurazioni del sistema BACS. Sono presenti 3 tipologie:

- Documentazione utente: documenti per ogni tipo di interfaccia utente, contenenti istruzioni chiare su come utilizzare il sistema.
- Schede Tecniche: una scheda per ogni tipo di dispositivo di campo e di attrezzatura BACS fornita, inclusi diagrammi di cablaggio per altri dispositivi.
- Documenti di Operazione e Manutenzione: forniscono informazioni sufficienti per operare e mantenere il BACS in modo sicuro e conforme, includendo dettagli su prestazioni, affidabilità e supporto del sistema.

3.2 EN ISO 16484-2:2025 BACS - Hardware

Questo standard stabilisce i requisiti e le linee guida per i componenti hardware dei sistemi di automazione e controllo degli edifici. Include specifiche per dispositivi di controllo, sensori, attuatori e interfacce di comunicazione, garantendo un'integrazione efficace e sicura. L'obiettivo è migliorare l'efficienza operativa e la gestione degli edifici attraverso l'automazione. Il documento si divide in catalogo delle funzionalità dei sistemi BACS e topologia.

3.2.1 Catalogo delle funzionalità dei sistemi BACS

In questa sezione viene fornito un elenco dei componenti per i BACS, per la gestione dei dati e per i dispositivi attivi e passivi di un impianto.

Componenti BACS

Le componenti BACS sono suddivise in tre categorie principali:

1. Componenti Hardware: sensori, attuatori, dispositivi di controllo e interfacce di comunicazione, necessari per il monitoraggio e la gestione degli ambienti.
2. Configurazione del Sistema: i componenti possono essere combinati e configurati per soddisfare le esigenze specifiche di automazione. La normativa di riferimento è la ISO 16484-3.

3. Criteri di Prestazione: i requisiti di prestazione di base per i componenti hardware devono essere adeguati ai requisiti di progetto.

Gestione degli Edifici

I dispositivi per l'elaborazione, l'archiviazione e la memorizzazione dei dati possono essere distribuiti in tutto l'edificio, tuttavia in molti casi si utilizzano sistemi cloud e applicazioni *mobile*. Nella progettazione di un BACS bisogna tenere conto di:

- a) Qual è la dimensione del sistema (numero di dispositivi, numero di punti dati)
- b) Quali tempi di risposta devono essere garantiti
- c) Quale livello di sicurezza informatica deve essere rispettato
- d) Quali altri sistemi devono essere integrati (antincendio, ricarica elettrica, rete intelligente, ecc.)

Quando si decide quale combinazione di risorse hardware locali o di elaborazione basata su cloud implementare, occorre considerare: le prestazioni dell'hardware selezionato, la velocità di rete, la larghezza di banda e la capacità di trasmissione dati, la disponibilità di una connessione Internet ad alta velocità, la memoria disponibile e capacità di archiviazione, i requisiti di *cybersecurity* del sistema, i requisiti di ridondanza. È necessario poi progettare una GUI (*Graphical User Interface*) utile alla visualizzazione dei dati di campo come consumi, temperature, pressioni, allarmi e anche per la programmazione oraria e visualizzazione di curve di tendenza. Rappresenta la parte visibile e interattiva del sistema BACS e generalmente fa parte delle stazioni di gestione. Invece le DIU (*Data Interface Unit*) sono implementate tramite funzioni software virtualizzate, eseguite localmente sulle stazioni di automazione, sui dispositivi *edge* o nel *cloud*. Le DIU servono a collegare o integrare reti, dispositivi o sottosistemi diversi all'interno del BACS.

Dispositivi di controllo

I dispositivi di controllo, distribuiti in tutto l'edificio, persegono i seguenti scopi: controllo digitale automatico e diretto, ottimizzazione energetica, monitoraggio dell'impianto, allarmi, guasti e informazioni su manutenzione, storicizzazione e analisi dei dati.

Un dispositivo fondamentale per i sistemi di automazione è l'*edge*. Questo svolge compiti di elaborazione dei dati vicino alla fonte di generazione, riducendo la latenza e migliorando l'efficienza del sistema. È responsabile della raccolta, dell'analisi e della trasmissione dei dati ai sistemi centrali, garantendo una comunicazione efficace tra i dispositivi. Inoltre, supporta l'integrazione con altri

dispositivi e sistemi per ottimizzare le operazioni di automazione degli edifici. Proseguendo lungo la catena di automazione, si trova la stazione di automazione, che funge da unità centrale per il controllo e la gestione dei dispositivi nell'impianto dell'edificio. Una stazione di automazione può consistere in un modulo con un numero fisso di I/O o in un gruppo di moduli (modulo base + espansioni). La classificazione di quest'ultima tipologia di dispositivi dipende dal numero di: I/O, tipi di funzioni descritte nella ISO 16484-3, indirizzi di accesso per dati, allarmi, schedule e informazioni e dai MB di memoria.

Ogni modulo può avere o non avere un alimentatore integrato, inoltre, in caso di mancata alimentazione, i parametri presenti nel modulo devono rimanere salvati. Per quanto riguarda i segnali I/O ne esistono di 3 tipi: segnali digitali (o binari), segnali analogici, conta impulsi.

3.2.2 Topologia

La disposizione e la configurazione dei componenti del sistema BACS influiscono sulla comunicazione e sull'efficienza operativa.

Sistema di comunicazione

Il network tra dispositivi è parte integrante dell'edificio e garantisce che tutti i dispositivi connessi ricevano o forniscano i dati necessari. Deve includere: delle connessioni cablate e *wireless* all'interno e all'esterno dell'edificio, una larghezza di banda adeguata e una connessione Internet ad alta velocità per servizi *cloud* e accesso remoto. La rete non è gerarchica, perciò, ogni dispositivo interno o esterno è collegato direttamente alla rete dell'edificio. Anche i dispositivi in *sleep mode* devono essere considerati connessi. Inoltre, i dispositivi mobili degli utenti finali devono mantenere una connessione costante per ricevere allarmi e notifiche.

Per quanto riguarda la sicurezza informatica, tutti i dispositivi devono rispondere allo standard IEC 62443, in aggiunta, è necessario prevedere aggiornamenti periodici e audit periodici di cybersicurezza. La progettazione e la scelta dell'hardware devono rispettare le normative locali sulla protezione dei dati, ad esempio nel caso di memorie rimovibili o dischi accessibili pubblicamente.

Per quanto riguarda l'interazione uomo-macchina, tutte le stazioni operatori, i dispositivi di monitoraggio e le unità di programmazione devono essere connessi in rete, ma protetti contro accessi non autorizzati secondo lo standard IEC 62443-3-1. Quest'ultimo standard descrive anche la storizziazione di dati in locale o in *cloud*.

Infine, per la connessione *wireless*, si raccomanda l'uso di reti *mesh*, per garantire comunicazione continua anche in condizioni difficili e la progettazione della rete con strumenti dedicati per ridurre interferenze tra sistemi radio differenti.

3.3 EN ISO 16484-3:2024 BACS - Functions

Struttura dei requisiti e delle funzioni

Questo standard definisce i requisiti per la funzionalità e i servizi ingegneristici dei sistemi di automazione e controllo degli edifici (BACS). Include i termini per le specifiche, le linee guida per la documentazione funzionale e un modello per la lista dei punti BACS. Copre anche i requisiti per il software di gestione del sistema, le funzioni generiche per applicazioni specifiche e l'integrazione di processi di sistema specializzati.

3.3.1 Panoramica

I requisiti sono suddivisi in tre gruppi: funzioni di sistema e interfaccia utente indipendenti dall'impianto, strumenti per la configurazione del *hardware*, delle strategie di controllo e per la messa in servizio e funzioni specifiche per l'impianto o per il progetto, con i metodi per la loro documentazione.

Invece le funzioni automatiche sono articolate in: gestione, supervisione e analisi energetica, automazione/controllo (funzioni di elaborazione e regolazione), interfaccia con i dispositivi di campo (I/O). Le funzioni operatore non appartengono a un livello preciso.

Descrizione delle funzioni

Le funzioni specifiche dell'impianto si documentano con schemi di controllo, diagrammi di flusso e il *BACS Points List* (BACS PL), preferibilmente in formato foglio elettronico. I progetti complessi possono includere ulteriori documenti come schemi psicrometrici, schedulazioni di *reset*, istruzioni di montaggio dei dispositivi.

3.3.2 Function Block Diagram

Lo standard adotta la metodologia dei function blocks (FB) per rappresentare graficamente le applicazioni BACS, utilizzando i simboli delle norme EN 60617-12 (logica binaria) e EN 60617-13 (elementi analogici). Gli FB garantiscono un linguaggio comune per descrivere input, output, parametri e funzioni, sia testualmente sia graficamente, facilitando la comunicazione tra progettisti.

Bacs point list

Il BACS PL è una lista strutturata dei punti di sistema che consente l'elaborazione e lo scambio elettronico dei dati di progetto, fornisce una convenzione uniforme per nomi e numerazione delle funzioni e serve come base comune per progettazione, specifiche e gare d'appalto. La lista include tutti i dati relativi ai punti, funzioni di elaborazione, comunicazione, interfaccia uomo-macchina, gestione energetica e manutenzione.

3.3.3 Software

Il software di un BACS è suddiviso in due categorie principali: il *software di sistema* che gestisce le funzioni di base del controllore, la comunicazione tra dispositivi e la gestione dei dati e il *software applicativo* che contiene le funzioni specifiche del progetto, come la logica di controllo, le strategie di regolazione e la gestione energetica. Il software BACS deve essere affidabile, sicuro e documentato, consentire l'aggiornamento e la manutenzione senza compromettere le funzioni operative del sistema ed essere compatibile con il protocollo di comunicazione scelto (nei casi studio è utilizzato il Modbus).

3.3.4 Strumenti per la progettazione

Questa sezione tratta le funzioni necessarie per configurare e mettere in servizio le varie parti di un sistema BACS. Le attività di ingegneria sono specifiche del progetto/sistema e comprendono la configurazione di hardware, strategie di controllo, delle funzioni di gestione, le attività di collaudo e messa in servizio e la documentazione del sistema.

Configurazione hardware

È basata sulle specifiche finali del progetto e produce la documentazione per l'hardware richiesto, tra cui: gli schemi di controllo o P&ID, la lista dei punti BACS (I/O, funzioni di elaborazione, prestazioni del processore e memoria), le descrizioni di sistema e rete, le liste delle apparecchiature, gli schemi di cablaggio e collegamenti e le etichette per le apparecchiature.

Configurazione delle strategie di controllo

In questo passaggio si prendono i requisiti del consulente e dell'utente per generare strategie di controllo da scaricare nei controllori. Le strategie di controllo includono i file di download della strategia di controllo, le stampe o schemi della strategia, i set di parametri predefiniti e la lista punti BACS completata con funzioni di elaborazione e operatore.

Configurazione delle funzioni di gestione

A partire sempre dai requisiti del consulente e dell'utente, si generano le funzioni di gestione (supervisione, allarmi, report, orari, diritti utente). Sono inclusi: i sinottici con collegamenti dinamici ai punti, la gestione allarmi (gruppi, classi, filtri), il controllo accessi utente, i formati dei report e dei collegamenti ai dati, i programmi orari e la lista punti BACS completa (I/O, elaborazione, gestione, operatore).

Attività di collaudo e messa in servizio

Gli strumenti per la messa in servizio hanno i seguenti scopi: verifica delle connessioni hardware e dei dispositivi di campo, test di comunicazione e analisi protocolli, simulazione e verifica delle strategie di controllo, download delle strategie e inizializzazione parametri, verifica funzionale tramite simulazioni di impianto/interblocchi, ottimizzazione e taratura del sistema.

3.3.5 Funzioni ingegnerizzate

Questo paragrafo descrive le funzioni software create o adattate specificamente per un progetto BACS, al fine di soddisfare i requisiti tecnici e funzionali definiti nella fase di progettazione. Le funzioni applicative personalizzate sono sviluppate per gestire e ottimizzare le prestazioni degli impianti tecnici di un edificio (riscaldamento, raffrescamento, ventilazione, illuminazione, ecc.) e quindi traducono i requisiti dell'utente in strategie operative e di controllo. La norma identifica diverse categorie di *engineered functions*:

- Controllo e regolazione: include logiche PID, sequenze operative, cicli di commutazione, regolazione di temperatura, pressione, umidità, ecc.
- Supervisione e gestione: monitoraggio delle prestazioni, gestione di stati di funzionamento, limitazioni di setpoint, reset automatici.
- Ottimizzazione energetica: strategie per ridurre il consumo energetico (es. ottimizzazione dell'avvio/arresto, compensazione climatica, gestione della domanda).
- Gestione degli allarmi e sicurezza: rilevazione, classificazione e segnalazione di guasti o situazioni anomale con livelli di priorità e registrazione degli eventi.
- Gestione del tempo e del calendario: pianificazione automatica delle operazioni secondo orari, giorni festivi o modalità stagionali.
- Funzioni logiche e matematiche: funzioni di calcolo, comparazione, media, soglie, ecc., utilizzate all'interno dei programmi di controllo.

3.4 EN ISO 52120-1:2022 EPB - Contribution of building automation, controls and building management

Lo standard europeo a cui si fa riferimento riguardo l'automazione degli edifici, è la UNI EN ISO 52120-1, la quale definisce i BAC come tutti i sistemi e i prodotti, software e servizi ingegneristici per il controllo, l'ottimizzazione, il

monitoraggio, l'operazione, l'intervento umano e il management, finalizzati al raggiungimento di alta efficienza energetica, economica e operativa dei servizi di un edificio [20]. Questa fa parte degli "EPB set of standards" [38], aventi lo scopo di definire una metodologia di valutazione delle performance energetiche degli edifici utilizzabile da tutti. Il documento [20] fornisce:

- *"una lista strutturata delle funzioni di automazione e controllo (Building Automation and Control - BAC) e gestione tecnica degli edifici (Technical Building Management - TBM) che hanno incidenza sulla prestazione energetica degli stessi e relativa classificazione (A, B, C, D);"*
- *requisiti minimi funzionali per ogni classe;*
- *un metodo analitico e semplificato per ottenere una prima stima dell'impatto di queste funzioni su edifici e profili di utilizzo rappresentativi."*

3.4.1 Classi BAC

La normativa fornisce la definizione di 4 classi di efficienza "BAC": A,B,C,D, utili a classificare i sistemi di automazione di un edificio:

- Classe D "NON ENERGY EFFICIENT": comprende gli impianti tecnici tradizionali e privi di automazione e controllo.
- Classe C "STANDARD": dotati di sistemi di automazione e controllo degli edifici (BACS) "tradizionali" o con prestazioni minime.
- Classe B "ADVANCED": sistemi di automazione e controllo degli edifici (BACS) avanzati e dotati anche di alcune funzioni di gestione degli impianti tecnici di edificio per una gestione centralizzata.
- Classe A "HIGH ENERGY PERFORMANCE": corrisponde a sistemi BAC e TBM "ad alte prestazioni energetiche" cioè con livelli di precisione e completezza del controllo automatico tali da garantire elevate prestazioni energetiche all'impianto.

Gli edifici sono suddivisi in 2 macro tipologie: residenziale, non-residenziale, mentre i servizi dell'edificio sono suddivisi in 7 tipologie applicative:

- Riscaldamento
- Acqua calda sanitaria
- Raffrescamento
- Ventilazione e Condizionamento
- Illuminazione

- Schermature solari
- Sistemi TBM (Technical building management)

Per ogni tipologia applicativa sono definite delle funzioni di controllo legate alle classi BAC. Maggiore è l'ottimizzazione conseguita dalla funzione di controllo, maggiore sarà la classe BAC corrispondente. Allo stato attuale, l'investimento necessario a implementare delle funzioni che permettano un efficientamento significativo di un edificio, consente un payback time che varia da 0 a 5 anni [14, 34].

3.4.2 Metodi di calcolo dettagliato

Il metodo dettagliato fornisce risultati puntuali e precisi, a costo di uno sforzo di calcolo significativo. Esso può essere usato, ad esempio, nei contratti a garanzia di risultato (Energy Performance Contracting) per quanto riguarda i consumi di energia. Nella normativa, è presente una tabella che associa ogni tipologia applicativa alla normativa specifica di riferimento.

Nel calcolo dettagliato sono adattabili calcoli con diversi passi temporali (annuale, mensile, orario) o di tipo statistico (BIN method) effettuati con software di simulazione energetica dinamica.

Per le varie funzioni di controllo elencate nella Tabella 8 della normativa, possono essere utilizzati cinque tipi di approccio:

- Metodo diretto:
il calcolo delle prestazioni energetiche è basato su un metodo di simulazione dettagliato o un metodo di simulazione oraria come descritto nella UNI EN ISO 52016-1.
- Metodo basato sulla modalità operativa:
questo approccio prevede di calcolare in sequenza il consumo energetico per ogni modalità operativa, ottenendo per somma il consumo totale di ogni applicazione.
- Metodo basato sul tempo di funzionamento:
utilizzato quando il sistema di controllo ha un impatto diretto sul tempo di funzionamento. Impatto del sistema di controllo rappresentato da un coefficiente, calcolato come rapporto fra la durata dell'azione di controllo dei dispositivi (on/off o modulazione) e la durata dell'intervallo di tempo considerato di uno dei dispositivi
- Metodo basato sul set-point:
può essere utilizzato quando il sistema di controllo ha un impatto diretto sull'accuratezza del controllo effettuato da un dispositivo in campo
- Metodo del coefficiente di correzione:
utilizzato quando il sistema di controllo agisce in modo combinato su

diversi fattori, come ad esempio: tempi di funzionamento, set point di temperatura. Il coefficiente di correzione è determinato, mediante alcune simulazioni, a partire da parametri rilevanti come: tipo di edificio, tipo di sistema, profilo dell'utente, clima ecc.

3.4.3 Metodo di calcolo "factor based"

Permette di stimare in modo semplice e su base statistica l'impatto dell'applicazione dei sistemi BAC e TBM sull'ammontare di consumo energetico degli impianti tecnici degli edifici in un arco temporale stabilito (l'anno).

La normativa definisce 3 fattori BAC:

- $f_{BAC,H}$ = i fattori di efficienza BAC per l'energia termica di riscaldamento
- $f_{BAC,C}$ = i fattori di efficienza BAC per l'energia termica di raffrescamento
- $f_{BAC,el}$ = i fattori di efficienza BAC per l'energia elettrica

Inoltre definisce Q (energia termica) e W (energia elettrica) per le seguenti tipologie di sistemi tecnici:

- Riscaldamento (sia Q che W)
- Raffrescamento (sia Q che W)
- Ventilazione (solo W)
- illuminazione (solo W)
- ACS (solo Q)

Il metodo dei fattori BAC può essere usato sostanzialmente in due modalità:

- 1) se il consumo di energia dell'edificio non è noto (**Q e W non noti**), i fattori BAC possono essere usati per determinare il risparmio di energia in termini percentuali [%] passando da una classe di efficienza di partenza scelta come riferimento (tipicamente C o D) ad una classe di efficienza più performante (tipicamente A o B);
- 2) se il consumo di energia dell'edificio è noto (**Q e W noti**), i fattori BAC possono essere usati per determinare il risparmio di energia, oltre che in termini percentuali anche in termini assoluti [kWh] rispetto alla classe scelta come riferimento. Conoscendo il costo dell'energia [€/kWh], e rapportando il risparmio ottenibile annualmente al costo del sistema di automazione implementato, sono quindi facilmente stimabili (sempre con un certo grado di approssimazione) utili indicatori economici come ad esempio il risparmio economico annuo previsto e il tempo di ritorno dell'investimento

Tabelle fattori BAC

Le tabelle dei fattori BAC[20], si suddividono in:

- Tabelle generiche:
 - Energia termica per riscaldamento, raffrescamento, ACS ($f_{BAC,H} = f_{BAC,C} = f_{BAC,acs}$)
 - Energia elettrica illuminazione e dispositivi ausiliari (compresa ventilazione) ($f_{BAC,el}$)
- Tabelle dettagliate:
 - Energia termica per raffrescamento e riscaldamento separati ($f_{BAC,H}$ e $f_{BAC,C}$)
 - Energia termica per acqua calda sanitaria ($f_{BAC,acs}$)
 - Energia elettrica illuminazione e dispositivi ausiliari (compresa ventilazione) separati ($f_{BAC,el}^{illum}$ $f_{BAC,el}^{aux}$)

Queste tabelle esistono sia per la categoria di edifici *residenziali* che *non residenziali*.

Ipotesi di validità e condizioni limite dei fattori BAC

I fattori BAC sono stati determinati tramite una vasta gamma di transitori condotti con lo strumento TRANSYS, per le tipologie di edifici più comuni. Le funzionalità (in accordo con le classi A, B, C e D) dei diversi sistemi di automazione BAC e TBM sono state rappresentate da:

- tempo di funzionamento del sistema di riscaldamento e/o raffrescamento;
- set point di temperatura per riscaldamento/raffrescamento;
- caratteristiche del flusso di aria esterno (costante/variabile).

Le condizioni limite che sono state considerate e fissate, per ogni classe BAC e per ogni tipologia di edificio, per la determinazione dei fattori BAC, sono:

- set point di temperatura e tempo di funzionamento per il riscaldamento
- set point di temperatura e tempo di funzionamento per il raffrescamento;
- potenza e tempo di funzionamento per il livello di illuminazione;
- persone/ m^2 e dispositivi per gli apporti gratuiti
- ricambio d'aria di ventilazione;
- valore soglia di irradiazione per il controllo delle schermature;

- profili di occupazione settimanale (giorni lavorativi/giorni di weekend).

Il metodo dei fattori BAC è di facile utilizzo, tuttavia, è riportato in letteratura che spesso le stime di risparmio energetico sono inaccurate [4, 5, 13]. La causa è legata al fatto che alcune condizioni al contorno quali, schedule occupazionali, comportamento dei residenti, condizioni climatiche, algoritmi di controllo e proprietà fisiche specifiche degli edifici, sono trascurate nel calcolo dei fattori BAC [19, 23].

3.5 Funzioni di controllo EN ISO 52120-1

In questa tesi sono stati analizzati dei casi studio in cui l'intervento di retrofit ha riguardato solo l'impianto di riscaldamento e l'ACS, pertanto in questo paragrafo si analizzeranno nello specifico le funzioni legate a queste tipologie applicative.

3.5.1 Controllo riscaldamento

Il controllo di riscaldamento è caratterizzato da 11 funzioni di controllo: controllo di emissione, controllo di emissione per solai termo-attivi, controllo temperatura acqua nella rete di distribuzione (mandata e ritorno), controllo delle pompe di distribuzione, bilanciamento idraulico della rete di riscaldamento, controllo intermittente della emissione e/o distribuzione, controllo dei generatori a combustione o del teleriscaldamento, controllo del generatore a pompa di calore, controllo dei generatori a unità esterna, controllo sequenziale di differenti generatori e controllo dei serbatoi di accumulo dell'energia termica (Tab.3.1,3.2). Le funzioni presenti in Tab.3.1,3.2 sono caratterizzate da un codice rappresentativo ricollegabile a una scheda esplicativa presente in [20], di cui l'ultima lettera rappresenta la classe BAC in cui ricade la funzione stessa. Nelle tabelle esplicative di seguito, sono state accorpate le funzioni di controllo dei generatori a combustione o del teleriscaldamento, di controllo del generatore a pompa di calore, di controllo dei generatori a unità esterna perché simili tra di loro, inoltre, le descrizioni dettagliate delle funzioni nelle tabelle in Appendice A provengono dallo standard EN ISO 16484-4.

CONTROLLO RISCALDAMENTO	
Codice di funzione	
Rif. UNI EN ISO 52120-1	Non Residenziale
Controllo di emissione	
<i>La funzione di controllo è applicata sul terminale a livello ambiente; per il tipo 1 una funzione può controllare diversi ambienti</i>	
0	Nessun controllo automatico
1	Controllo automatico centralizzato
SE-H1C	2 Controllo automatico di ogni ambiente con valvole termostatiche o regolatore elettronico
SE-H1B	3 Controllo automatico di ogni ambiente con comunicazione tra i regolatori e verso il sistema BAC *
SE-H1A	4 Controllo integrato di ogni locale con comunicazione e controllo di presenza **
* Per impianti con elevata inerzia termica (es. riscaldamento a pavimento) la funzione diventa di classe A ** Non applicata a impianti con elevata inerzia termica	
Controllo di emissione per solai termo-attivi	
0	Nessun controllo automatico
SE-H2C	1 Controllo automatico centralizzato
SE-H2B	2 Controllo automatico centralizzato avanzato
SE-H2A	3 Controllo automatico centrale avanzato a funzionamento intermittente e feed-back della temperatura ambiente
Controllo temperatura acqua nella rete di distribuzione (mandata e ritorno)	
<i>Funzioni simili possono essere applicate al controllo di reti di riscaldamento elettrico</i>	
0	Nessun controllo automatico
SE-H3C	1 Compensazione con la temperatura esterna
SE-H3A	2 Controllo basato sulla richiesta termica
Controllo delle pompe di distribuzione	
<i>Le pompe controllate possono essere installate a diversi livelli nella rete di distribuzione</i>	
0	Nessun controllo automatico
SE-H4C	1 Controllo ON/OFF
	2 Controllo pompa multi-stadio
	3 Controllo pompe a velocità variabile
SE-H4A	4 Controllo pompe a velocità variabile (basato su segnale esterno)
Bilanciamento idronico della rete di riscaldamento	
<i>Il bilanciamento idronico è applicato in emissione o a un gruppo di emettitori maggiore di 10</i>	
0	Nessun bilanciamento
1	Bilanciato staticamente per unità terminale senza bilanciamento di gruppo
2	Bilanciato staticamente per unità terminale con bilanciamento statico di gruppo
SE-H4aC	3 Bilanciato staticamente per unità terminale con bilanciamento dinamico a gruppi (ad esempio per piano)
SE-H4aA	4 Bilanciato dinamicamente per unità terminale

Tabella 3.1: Controllo riscaldamento part.1 [20]

CONTROLLO RISCALDAMENTO					
Codice di funzione	Rif. UNI EN ISO 52120-1	Non Residenziale			
		D	C	B	A
Controllo intermittente della emissione e/o distribuzione					
<i>Un solo regolatore può controllare diversi ambienti/zona aventi lo stesso profilo di occupazione</i>					
SE-H5C	0 Nessun controllo automatico				
SE-H5B	1 Controllo automatico con programma orario fisso				
SE-H5A	2 Controllo automatico con partenza/arresto ottimizzato				
SE-H5A	3 Controllo automatico con calcolo della richiesta termica				
Controllo dei generatori a combustione o del teleriscaldamento					
SE-H6C	0 Temperatura costante				
SE-H6A	1 Temperatura termovettore variabile in dipendenza da quella esterna				
SE-H6A	2 Temperatura variabile in dipendenza dal carico				
Controllo del generatore a pompe di calore					
SE-H7C	0 Temperatura costante				
SE-H7C	1 Temperatura termovettore variabile in dipendenza da quella esterna				
SE-H7A	2 Temperatura termovettore variabile in dipendenza del carico o della richiesta				
Controllo dei generatori a unità esterna					
SE-H8B	0 Controllo On-Off				
SE-H8B	1 Controllo multistadio della capacità del generatore in funzione del carico o della richiesta				
SE-H8A	2 Controllo variabile della capacità del generatore in funzione del carico o della richiesta				
Controllo sequenziale di differenti generatori					
SE-H9C	0 Priorità basate solo sul tempo di funzionamento				
SE-H9C	1 Controllo in funzione di una lista di priorità fissa				
SE-H9B	2 Controllo in funzione di una lista di priorità dinamica				
SE-H9A	3 Controllo in funzione di una lista di priorità dinamica basata sulla previsione del carico				
Controllo dei serbatoi di accumulo dell'energia termica					
SE-H10B	0 Accumulo continuo				
SE-H10B	1 Accumulo del serbatoio a due sensori				
SE-H10A	2 Accumulo del serbatoio basato sulla previsione del carico				

Tabella 3.2: Controllo riscaldamento part.2 [20]

3.5.2 Controllo acqua calda sanitaria

Il controllo dell'ACS è caratterizzato da 4 funzioni: controllo della temperatura di accumulo mediante riscaldatore elettrico integrato o pompa di calore, controllo della temperatura di accumulo usando generatore di calore, controllo della temperatura nel serbatoio con collettori solari e generazione di calore esterna e controllo delle pompe ACS Le (Tab.3.3) delle classi BAC riferite alle funzioni di controllo dell'ACS, sono organizzate come quelle del paragrafo sul controllo del riscaldamento.

CONTROLLO ACQUA CALDA SANITARIA					
Codice di funzione	Rif. UNI EN ISO 52120-1	Non Residenziale			
		D	C	B	A
Controllo della temperatura di accumulo mediante riscaldatore elettrico integrato o pompa di calore					
SE-W1C	0 Controllo automatico ON/OFF				
SE-E1A	1 Regolazione automatica ON/OFF della temperatura di accumulo e programma orario				
SE-E1A	2 Regolazione automatica ON/OFF della temperatura di accumulo con programma orario. Gestione con sensori multipli				
Controllo della temperatura di accumulo usando generatore di calore					
SE-W2C	0 Controllo automatico ON/OFF				
SE-W2A	1 Controllo automatico ON/OFF e controllo temporale				
SE-W2A	2 Controllo automatico ON/OFF, controllo temporale, accumulo in funzione della richiesta o controllo della temperatura di ritorno e gestione con più sensori di temperatura				
Controllo della temperatura nel serbatoio con collettori solari e generazione di calore esterna					
SE-W3C	0 Controllo manuale per energia solare o generatore di calore				
SE-W3A	1 Controllo automatico per accumulo da fonte solare (prioritaria) e integrazione con altra fonte				
SE-W3A	2 Controllo automatico per accumulo da fonte solare (prioritaria) e integrazione con altra fonte, accumulo in funzione della richiesta, controllo della temperatura di ritorno e gestione con più sensori di temperatura				
Controllo delle pompe ACS					
SE-W4A	0 Nessun controllo temporale, funzionamento continuo				
SE-W4A	1 Controllo temporale				

Tabella 3.3: Controllo acqua calda sanitaria [20]

3.5.3 Controllo ventilazione e condizionamento

Il controllo dell'ACS è caratterizzato da 10 funzioni. Di queste 10, solo 2 funzioni sono state interessate da un aumento di classe: il controllo della mandata d'aria in ambiente e il controllo della portata d'aria esterna. Sono state descritte in dettaglio solo queste due funzioni di controllo (Tab.3.4).

CONTROLLO VENTILAZIONE E CONDIZIONAMENTO				
Codice di funzione	Rif. UNI EN ISO 52120-1	Non Residenziale		
		D	C	B
Controllo mandata aria in ambiente				
SE-V1B	0 Nessun controllo			
SE-V1B	1 Controllo a tempo			
SE-V1B	2 Controllo in funzione dell'occupazione			
SE-V1A	3 Controllo in funzione della qualità dell'aria			
Controllo della portata d'aria esterna				
SE-V4B	0 Controllo fisso			
SE-V4B	1 Controllo della portata d'aria esterna (alta o bassa) da programma orario			
SE-V4B	2 Controllo della portata d'aria esterna (alta o bassa) in funzione dello stato di occupazione			
SE-V4A	3 Controllo variabile			

Tabella 3.4: Controllo ventilazione e condizionamento [20]

Capitolo 4

Tecnologie utilizzate per il retrofit

4.1 Informazioni generali

L’azienda [®]Enerbrain S.R.L. fornisce ai clienti servizi di monitoraggio ambientale, monitoraggio energetico e ottimizzazione dei sistemi HVAC, integrati con un servizio di Web App. Per l’ottimizzazione, l’azienda può proporre tre soluzioni possibili in base al tipo di controllori presenti in campo:

- Man in the Middle: prevede l’installazione di un dispositivo (eNode) interposto tra il controllore locale (BMS, cronotermostato) e l’attuatore che controlla. Inoltre, vengono installati sensori ambientali. L’eNode comunica con il Cloud [®]Enerbrain.
- Enerbrain as a Service: il BMS locale viene interfacciato con il Cloud permettendo una parziale integrazione dell’ottimizzazione [®]Enerbrain nel sistema.
- BEMS Cloud: implementazione completa di un sistema di termoregolazione.

Nei casi presi in esame, sono state utilizzate le soluzioni *Man in the Middle* e *BEMS Cloud*, che verranno descritte in dettaglio nel capitolo successivo. Verrà invece tralasciata la soluzione *Enerbrain as a service*, dato che non è stata implementata nei casi studio. Tutte le soluzioni si basano su un sistema IoT basato su layer [11]:

- Perception layer
- Transport layer
- Processing layer

- Application layer
- Business layer

Il *perception layer* comprende tutti i dispositivi fisici presenti in campo e la sua funzione è quella di raccogliere le informazioni e digitalizzarle per la trasmissione. Il *transport layer* ha lo scopo di trasferire i dati dal perception layer al processing layer attraverso reti 3G/4G, LAN, NFC, Sigfox [11]. DI questo layer fanno parte i gateway. Il *processing layer (middleware layer)* serve a storicizzare e processare i dati e comprende i database e il Cloud computing. L'*application layer* serve a rendere disponibili e interpretabili i dati all'utente finale. In questo layer sono presenti interfacce, tool e applicazioni web (web app [®]Enerbrain). Infine il *business layer* che ha lo scopo di gestire l'intero sistema di layer. Nel paragrafo successivo sono descritte tutte le tecnologie hardware e software utilizzate per gli interventi di efficientamento. Si procederà ora a descrivere le componenti hardware e software utilizzate per implementare le 2 soluzioni dei casi studio.

4.2 Tecnologia utilizzata per gli interventi di retrofit

4.2.1 Cloud

Il servizio Cloud Enerbrain gestisce l'acquisizione, la storicizzazione e l'elaborazione dei dati provenienti da sensori ambientali, misuratori energetici e dispositivi di controllo o gateway di comunicazione. I dati vengono trasmessi tramite protocolli diversi, principalmente basati su tecnologie IoT e processati mediante servizi cloud dedicati, la cui configurazione varia in funzione del tipo di applicazione: monitoraggio ambientale, energetico o controllo degli attuatori.

L'elaborazione dei dati è effettuata da algoritmi adattivi e predittivi, specifici per ciascun tipo di sistema o attuatore. Tali algoritmi calcolano i segnali di controllo ottimali sulla base delle misure rilevate in campo, delle condizioni ambientali, delle previsioni meteorologiche, dei calendari operativi e dei requisiti impostati dall'utente, al fine di massimizzare l'efficienza energetica e il comfort.

4.2.2 Web app

Il servizio di web app è la principale Graphical User Interface (GUI) e permette al cliente di visualizzare i dati caratteristici dell'edificio (ubicazione, superficie calpestabile, contatti), impostare calendari e setpoint ambientali, visualizzare i dati di campo e ambientali sotto forma di grafici e scaricarli in formato CSV, visualizzare i consumi di elettricità, gas e acqua (se i misuratori in campo sono integrati nel servizio di web app), consultare i sinottici con eventuali allarmi e visualizzare lo stato dell'hardware in campo e la lettura dei registri Modbus.

4.2.3 eNode

Il dispositivo eNode, utilizzato nella soluzione *Man in the Middle*, consente l'integrazione del sistema Enerbrain con impianti HVAC esistenti, dotati di BMS completi o di semplici PLC, quando l'aggiornamento o la sostituzione di questi ultimi non sono economicamente sostenibili. L'eNode è progettato per essere installato su punti di controllo con logiche di regolazione semplici, come ON/OFF o PID, ottimizzando il funzionamento di singoli attuatori. È tipicamente impiegato per la gestione di servomotori di valvole e serrande o ventilatori, la cui regolazione ottimizzata non compromette la sicurezza complessiva dell'impianto.

Ogni eNode è costituito da canali, ciascuno interposto elettricamente tra il controllore locale e il servomotore. Il dispositivo acquisisce i comandi provenienti dal BMS e li restituisce sotto forma di feedback, garantendo la coerenza del segnale ed evitando la generazione di allarmi. In parallelo, l'eNode riceve dal Cloud i comandi ottimizzati elaborati dall'Algoritmo e li trasmette all'attuatore. Alcune versioni consentono inoltre la lettura diretta di sonde o altri sensori di campo, permettendo all'eNode di operare anche in assenza di un BMS completo.

La comunicazione con il cloud avviene tramite rete mobile 4G o Wi-Fi, utiliz-

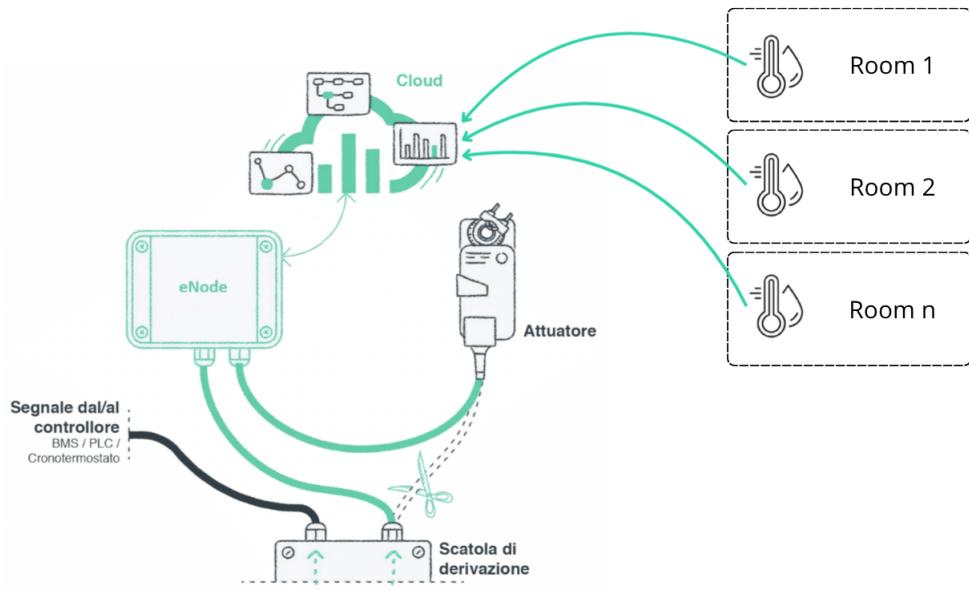


Figura 5: Schema esemplificativo di un eNode integrato

zando protocolli IoT. In caso di mancata comunicazione, il dispositivo entra in modalità bypass e il segnale proveniente dal BMS passa direttamente all'attuatore senza essere elaborato dall'algoritmo di ottimizzazione in cloud, garantendo così la continuità operativa. Questa modalità consente di integra-

re Enerbrain senza la necessità di modificare il sistema di termoregolazione esistente.

Tuttavia, questa tecnologia presenta alcune limitazioni: è adatta principalmente a sistemi relativamente semplici, richiede la presenza di BMS locali funzionanti e manutenuti periodicamente, non fornisce input per la lettura diretta degli elementi controllati e non permette di visualizzare sul BMS locale i comandi inviati dagli eNode agli attuatori. Poiché consente l'implementazione di singole funzioni di ottimizzazione, non soddisfa i requisiti per un BACS di classe B o superiore secondo la norma EN ISO 52120-1, escludendo l'accesso agli incentivi previsti dal “Conto Termico”.

4.2.4 Gateway

I gateway, utilizzati nella soluzione *BEMS Cloud*, consentono la traduzione dei protocolli dei sistemi in campo verso protocolli standard utilizzati per la comunicazione con il cloud, e viceversa. Operano a livello di transport layer e, in particolare, raccolgono dati e informazioni dal campo, li elaborano e uniformano il formato, garantendo l'accesso e l'integrazione dei dati all'interno del sistema.

Il gateway fornito da Enerbrain, denominato eGateway, acquisisce i dati principalmente tramite il protocollo Modbus TCP e li trasmette al cloud.

L'eGateway, basato su Modbus TCP lato campo, può integrare altri protocolli come KNX, BACnet e altri standard grazie all'utilizzo di gateway di comunicazione aggiuntivi. Questa flessibilità permette di centralizzare e uniformare la gestione dei dati provenienti da sistemi eterogenei, rendendo possibile la loro elaborazione all'interno del Cloud Enerbrain.

4.2.5 Controllore programmabile

Il controllore programmabile utilizzato nei casi studio è fornito dall'azienda [©]COSTER GROUP S.R.L. [33] ed è programmato con un software proprietario che presenta funzioni preconfigurate, eventualmente espandibili con un linguaggio FBD. I dispositivi installati in campo sono di quattro tipologie diverse:

1. EHC 602: dispositivo per la gestione della comunicazione per sistemi di regolazione e di monitoraggio, comunica in modbus RS485 con i dispositivi YLC 880 e in modbus TCP tramite porta ethernet o wi-fi. Possiede un'interfaccia web fornita su licenza dall'azienda.
2. YLC 880: regolatore multi-configurabile per impianti di riscaldamento, raffrescamento, ACS, UTA. La programmazione è realizzabile mediante un software proprietario che permette la configurazione grafica degli applicativi per la gestione degli impianti HVAC ed è importabile nella centralina attraverso SD card.

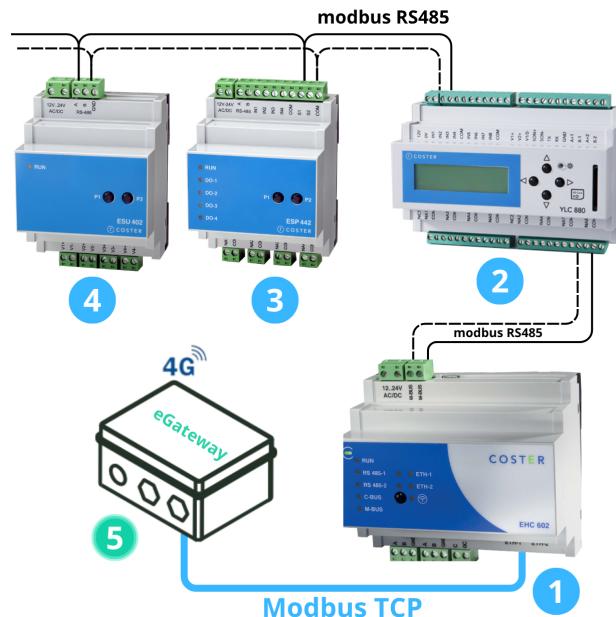


Figura 6: Schema esemplificativo di un controllore programmabile integrato

3. ESP 442: modulo di espansione I/O in grado di comunicare con l'YLC 880. Consente l'espansione della struttura del sistema con ingressi digitali e analogici e dispone di una porta RS485 che rende possibile la comunicazione attraverso il protocollo Modbus RTU485.
4. ESU 402: modulo di espansione con 4 uscite analogiche 0-10V in grado di comunicare con l'YLC 880 tramite una porta RS485.

Il sistema è programmato localmente con una logica standard e comunica con un eGateway che, a sua volta, comunica con il Cloud Enerbrain. Il Cloud elabora i dati e invia comandi ottimizzati anche sulla base di temperatura esterna, temperatura interna e occupazione (Fig.6). Nel normale funzionamento, il controllo è ottimizzato dal cloud e i calendari sono gestiti dall'applicazione web, mentre, in caso di interruzione della comunicazione, il sistema di termoregolazione segue la logica e i calendari di default locali. Questi dispositivi sono compresi nell'offerta BEMS Cloud che riguarda impianti che necessitano di un revamping completo del sistema di termoregolazione.

4.2.6 Dispositivi di monitoraggio

eMeter

L'eMeter è un quadro misure che permette di effettuare il monitoraggio elettrico di utenze elettriche monofase e trifase (10 carichi elettrici trifase e 30 monofase). È dotato di multimetero multicircuito e oscilloscopio. Il dispositivo

può essere collegato direttamente a un'alimentazione trifase con neutro per la misura delle tensioni, mentre deve essere collegato a trasformatori amperometrici o bobine Rogowski per la misura delle correnti. Possiede una memoria interna capace di acquisire 6 anni di dati e può comunicare in modbus RTU o TCP. I dati vengono resi disponibili da un web server accessibile dall'utente e tramite API per il collegamento con sistemi di terze parti.

Sensori ambientali o API da BEMS locale

I sensori ambientali rilevano temperatura, umidità relativa e, optionalmente, concentrazione di CO₂, trasmettendo i dati tramite la rete LPWAN Sigfox o LoRa. Le informazioni raccolte costituiscono input per gli algoritmi di ottimizzazione Enerbrain, permettendo la regolazione e il controllo dei sistemi HVAC. Sensori già presenti nell'impianto possono essere integrati tramite API software dedicate, consentendo la centralizzazione dei dati e la loro elaborazione all'interno del cloud Enerbrain senza interventi hardware aggiuntivi.

Containimporsi

Per acquisire i dati dai contatori di gas, sono stati utilizzati containimporsi LoRa-WAN [35]. Questo dispositivo che permette l'acquisizione di segnali impulsivi forniti da contatori tradizionali dotati di contatto reed o open collector. I dati raccolti, vengono inviati alla rete LoRa tramite segnali radio a lunghissimo raggio e storicizzati dal Cloud.

Capitolo 5

Tipologie di intervento di retrofit

Gli edifici presi in esame sono tutti edifici ad uso ospedaliero, di cui 11 Residenze Sanitarie Assistenziali (RSA) e 9 ospedali. Di tutti questi edifici, due RSA sono situate in Germania, mentre tutti i restanti sono situati in Francia. Gli interventi di retrofit sono stati eseguiti per gli impianti di riscaldamento e, nei casi delle RSA, anche per l'ACS. A livello di impianti, si hanno due tipi di generazione di calore a livello di centrale termica: caldaie a gas e teleriscaldamento. Nei paragrafi successivi verranno descritte le due tipologie di interventi eseguiti nei casi studio e, successivamente, verranno descritte le funzioni BACS nelle situazioni pre intervento e post intervento.

5.1 Soluzione BEMS Cloud

Questa soluzione prevede l'architettura visibile nello schema in Fig.7. In questo caso, nel "*perception layer*" sono presenti i sensori ambientali e il controllore configurabile con le espansioni Coster. Nel "*transport layer*" si collocano i gateway Coster e Enerbrain e i dispositivi Sigfox o LoRa per la trasmissione dei dati al cloud. Quest'ultimo fa parte del "*processing layer*", insieme al database che storizza i dati dei sensori ambientali. Infine, nel "*application layer*", è presente la Web app di Enerbrain. Si può notare come il "*business layer*" sia assente perché non è stata venduta e configurata per il cliente una piattaforma di business intelligence (BI). Per quanto riguarda il monitoraggio dei carichi energetici, l'installazione o l'integrazione di dispositivi di misura dipende dal tipo di contratto stipulato con il cliente e quindi è a discrezione di quest'ultimo.

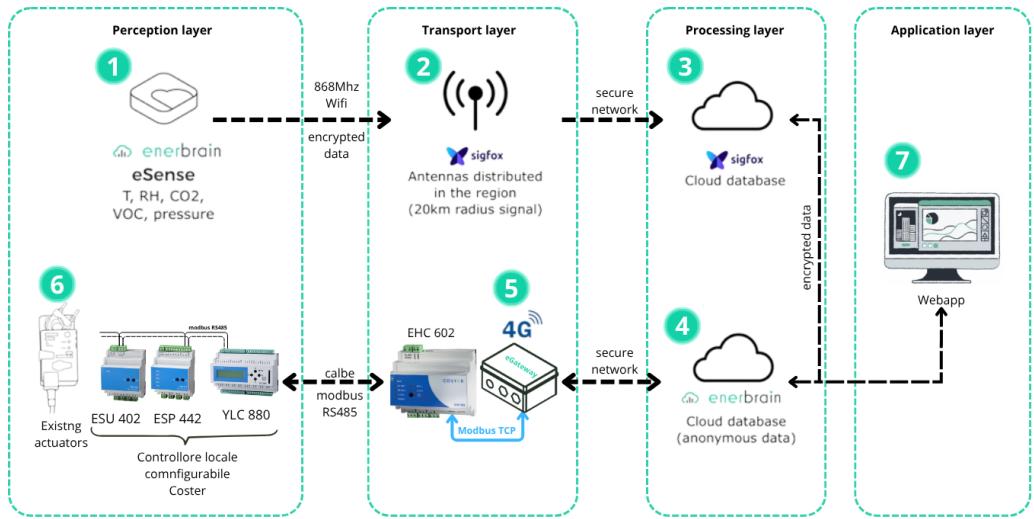
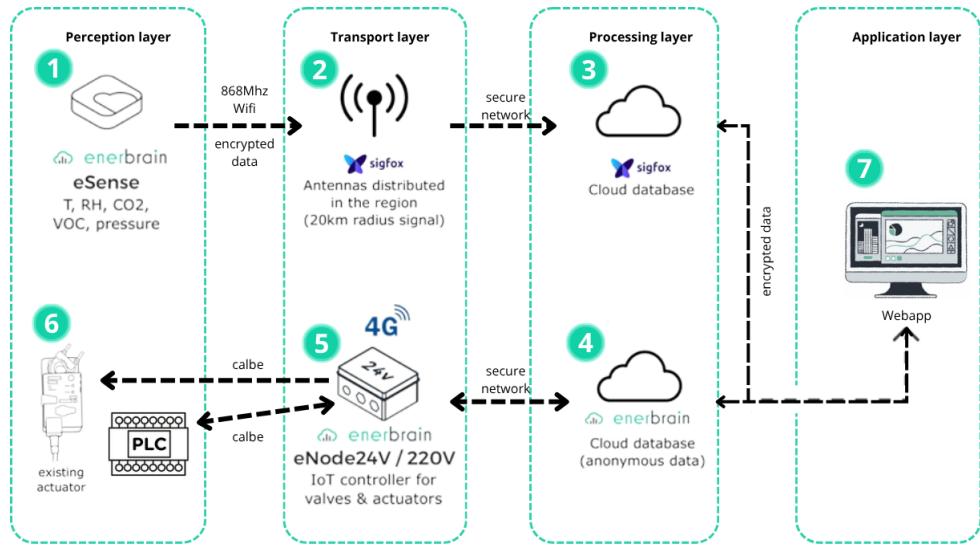


Figura 7: Architettura generale comunicazione Enerbrain per la soluzione *BEMS cloud*

5.2 Soluzione Man in the Middle

La soluzione *Man in the Middle* prevede l'architettura visibile nello schema in Fig.8. Il sistema di termoregolazione locale, non viene sostituito e ha la funzione di mantenere la gestione sui componenti non controllati da Enerbrain e la continuità di funzionamento anche in assenza di ottimizzazione su quelli collegati agli eNode. Quest'ultimi fanno parte del "transport layer", in quanto ricevono i dati e li codificano in un formato leggibile per il Cloud. Lato ambiente, dai sensori al Cloud, l'architettura è analoga alla soluzione *BEMS Cloud*. Connesso al Cloud è presente anche il servizio di Web app Enerbrain (7). In Fig.8 si osserva la suddivisione dei vari elementi nei layer descritti nel capitolo precedente.

Figura 8: Architettura generale comunicazione Enerbrain per la soluzione *MiM* [11]

5.3 RSA francesi

Le RSA francesi oggetto di questa tesi sono nove, localizzate in diverse regioni della Francia. Gli impianti di questi edifici sono molto simili tra di loro, perciò si è ritenuto opportuno descrivere l'impianto tipo in generale, una sola volta, nei casi di pre e post intervento, basandosi sulle funzioni descritte nello standard ISO 52120-1. Sono presenti 2 eccezioni:

- RSA n°6: acs priva di accumulo;
- RSA n°9: generazione demandata al teleriscaldamento.

La soluzione adottata è quella del BEMS Cloud (par.5.1). Si è pertanto eseguito un revamping completo del sistema di controllo locale, inserendo l'ottimizzazione da Cloud.

5.3.1 Generazione

La generazione di acqua calda per gli impianti idronici, nella situazione pre retrofit, è affidata a due caldaie a gas naturale di taglia equivalente, regolate con cascata a punto fisso. Nella situazione post-retrofit, è stato implementato un sistema di regolazione della cascata dei generatori, basato su un setpoint climatico calcolato come il massimo dei setpoint dei circuiti di distribuzione, aumentato di un ΔT parametrizzato.

Funzioni di controllo	Pre retrofit	Classe BACS	post-retrofit	Classe BACS
Controllo dei generatori a combustione o del teleriscaldamento	Ogni manda ha un cronotermostato settato a temperatura costante.	D	Le caldaie adattano il loro setpoint di temperatura di manda in base alla richiesta dei circuiti che servono.	A (SE-H6A)
Controllo sequenziale di differenti generatori	Setpoint di temperatura di manda fisso diverso su ogni caldaia.	C (SE-H9C)	Il sistema accende la seconda caldaia nel caso in cui la prima non riesca a soddisfare tutto il carico termico, seguendo una lista di priorità dinamica.	B (SE-H9B)

Tabella 5.1: funzioni di controllo per la generazione - RSA francesi

5.3.2 Distribuzione

Nella distribuzione sono presenti diversi casi, tra i quali circuiti miscelati e diretti, con pompa singola o gemellare. Nel caso pre-retrofit, la temperatura di manda dei circuiti dipendeva dalla temperatura esterna, con partenza del circuito che seguiva un programma orario fisso. Nel caso post-retrofit la temperatura di manda dipende dalla temperatura esterna e dalla temperatura misurata in ambiente e sono presenti logiche di partenza e arresto ottimizzati dipendenti dal calendario impostato dal cliente. Nel caso delle pompe e del bilanciamento idronico, si ha rispettivamente un controllo on/off e un bilanciamento statico per unità terminale, sia nel caso pre retrofit che post-retrofit.

Funzione di controllo	Pre retrofit	Classe BACS	post-retrofit	Classe BACS
Controllo temperatura acqua nella rete di distribuzione	T di manda dipendente dalla T esterna. Se è presente una valvola miscelatrice a 3 vie, l'apertura/chiusura dipende della T esterna	C (SE-H3C)	T di manda dipendente dalla T esterna e dalla T dell'ambiente. Se è presente una valvola miscelatrice a 3 vie, l'apertura/chiusura dipende della T esterna e dalla T dell'ambiente	A (SE-H3A)
Controllo delle pompe di distribuzione	On/Off semplice	C (SE-H4C)	On/Off semplice	C (SE-H3C)
Bilanciamento idronico della rete di riscaldamento	Bilanciato staticamente per unità terminale senza bilanciamento di gruppo	D	Bilanciato staticamente per unità terminale senza bilanciamento di gruppo	D
Controllo intermittente della emissione e/o distribuzione	Controllo automatico con programma orario fisso	D	Controllo con programma orario e arresto e partenza ottimizzati	B (SE-H5B)

Tabella 5.2: funzioni di controllo per la distribuzione - RSA francesi

5.3.3 Emissione

Il controllo di emissione non è stato modificato. Essendoci molti emettitori, l'investimento necessario per implementare la funzione di classe B (eletrovalvola sul singolo emettitore comandata dal sistema BAC) era troppo elevato.

5.3.4 Acqua calda sanitaria

L'impianto di acqua calda sanitaria presenta, in 7 casi su 9 un accumulo riscaldato dai generatori di calore a gas, mentre lato utenze sono presenti uno o più circuiti di ricircolo che mantengono l'acqua calda. Fa eccezione l'RSA n°6 che non possiede un accumulo, ma solo uno scambiatore a piastre e l'RSA n°9 la cui generazione è demandata al teleriscaldamento.

Funzioni di controllo	Pre retrofit	Classe BACS	post-retrofit	Classe BACS
Controllo della temperatura di accumulo usando generatore di calore	Richiesta al generatore di calore fisso	D	Richiesta alle caldaie che segue il programma orario e tiene conto della temperatura dell'accumulo misurata in più punti (T alta, T bassa, T mezza altezza)	A (SE-W2A)
Controllo delle pompe ACS	Pompe sempre accese	D	Accensione pompe che segue il calendario impostato dal cliente	B (SE-W4A)

Tabella 5.3: funzioni di controllo per l'acqua calda sanitaria - RSA francesi

5.3.5 Monitoraggio

Il monitoraggio dei consumi di gas è eseguito tramite dispositivi contaimpulsi LoRa installati sui contatori di gas esistenti. Nel caso del teleriscaldamento, il monitoraggio è eseguito tramite i dispositivi eGateway integrati con il contatermie esistente. I dati sono tuttavia disponibili solo per le RSA francesi n°1,2,4,6.

5.4 RSA tedesche e ospedali francesi

Per le due RSA tedesche (RSA_DE) e gli ospedali francesi (HST) è stata implementata la soluzione *Man in the Middle*. Gli eNode sono stati installati solo sui circuiti di distribuzione e sulle UTA presenti e permettono l'ottimizzazione di singole funzioni di controllo (riassunte in Tab.5.4).

5.4.1 Distribuzione ed emissione

Le tipologie di circuiti interessati dagli interventi di retrofit sono due: circuiti miscelati con valvola a tre vie ed emissione in ambiente tramite radiatori

o pannelli radianti e unità di trattamento aria. Gli eNode installati permettono l'ottimizzazione di specifiche funzioni di controllo tramite l'algoritmo in Cloud. In base al tipo di funzione, vengono presi come input il calendario, la temperatura, l'umidità relativa, la concentrazione di CO₂ ambiente e/o la temperatura di mandata. La funzione "re" è utilizzata nei casi studio per comandare l'accensione dei ventilatori in base al calendario orario impostato dal cliente. La funzione "se" prende come input, in aggiunta, la concentrazione di CO₂ e controlla l'apertura delle serrande di aria esterna. La funzione "ve", come l'"re", è utilizzata per comandare l'on/off dei ventilatori, con la differenza che tiene conto anche della temperatura e della concentrazione di CO₂ in ambiente. La funzione "vh" è utilizzata per controllare le valvole miscelatrici a monte delle batterie delle UTA e prende in input temperatura e umidità relativa ambiente. Infine, la funzione "rc_vh_clim" è utilizzata per comandare le valvole miscelatrici dei circuiti caldi e, a differenza del "vh", prende come input la temperatura esterna, temperatura ambiente, la temperatura di mandata del fluido del circuito. Gli interventi di retrofit non hanno interessato la generazione di calore, che è demandata al teleriscaldamento nel caso degli ospedali e alle caldaie a gas nel caso delle RSA tedesche. Per gli ospedali, le sottostazioni totali di teleriscaldamento sono quattro, perciò alcune di esse servono più edifici contemporaneamente. Le funzioni implementate permettono di raggiungere la classe B (o classe A) solo per alcune funzioni di controllo[38] (Tab.5.4) e non per tutte le tipologie applicative dell'impianto. Le UTA hanno un ventilatore

Funzioni di controllo	input	output	Funzione ISO 52120-1
re	Calendario	on/off	SE-V1B
Descrizione: accensione del ventilatore se il calendario attivo			
se	Calendario, CO ₂	apertura 0-100%	SE-V4A
Descrizione: apertura serranda aria nuova se il calendario è attivo e se il set point di CO ₂ non è rispettato			
ve	Calendario, T amb, CO ₂	on/off	SE-V1A
Descrizione: accensione del ventilatore se il calendario attivo, se il setpoint di CO ₂ e di T ambiente non sono rispettati			
vh	Calendario, T amb, phi	apertura 0-100%	-
Descrizione: regolazione della T di mandata con apertura/chiusura della valvola miscelatrice in funzione della T e della phi ambiente			
rc_vh_clim	Calendario, T mandata, T amb	Setpoint ottimizzato	SE-H3A
Descrizione: regolazione della T di mandata con apertura/chiusura della valvola miscelatrice in funzione della T ambiente			

Tabella 5.4: Descrizione delle funzioni di controllo integrate da Enerbrain sugli casi studio

di mandata e una batteria calda con valvola miscelatrice a tre vie e in alcuni casi, batterie calde di post-riscaldamento con valvola miscelatrice a tre vie, ventilatore di ripresa e serranda di regolazione del ricircolo dell'aria. Nei casi

pre retrofit, le UTA erano controllate con on/off semplice (classe D), mentre per i circuiti di distribuzione, le valvole a 3 vie si basavano su una climatica tradizionale in funzione della temperatura esterna (classe C). L'ottimizzazione delle UTA delle RSA tedesche avviene tramite l'utilizzo delle funzioni "*re*" (per ventilatori) e "*vh*" (valvole miscelatrici delle batterie calde), mentre per i circuiti dei radiatori, viene ottimizzato il controllo sulle valvole miscelatrici tramite la funzione "*rc_vh_clim*". Nel caso degli ospedali, per il controllo dei ventilatori delle UTA viene utilizzata la funzione "*ve*" e solo per l'UTA dell'edificio HST3 si ha il controllo ottimizzato della serranda di aria esterna tramite la funzione "*se*". Le tipologie di circuito e le funzioni di controllo utilizzate post-retrofit sono riassunte nella Tab.5.6 e nella Tab.5.5.

5.4.2 Monitoraggio

I consumi di energia termica, nel caso delle RSA tedesche, sono monitorati separatamente per le UTA e per i circuiti dei radiatori. Nel primo caso sono stati installati dei misuratori clamp-on, mentre nel secondo caso sono stati integrati i contatermie esistenti. Nel caso del teleriscaldamento, l'eGateway è stato integrato con il contatermie del circuito primario, mentre nel caso delle caldaie, è stato integrato con il contatore del gas. Per quanto riguarda gli ospedali francesi, il monitoraggio avviene tramite la lettura delle bollette. I dati perciò risultano aggregati come nel caso delle RSA francesi.

Edificio	n° eNode	Circuiti controllati	Attuazione	Funzione di controllo
HST1	eNode 1	UTA 1	Ventilatori	ve
	eNode 2	UTA 2	Ventilatori	ve
	eNode 3	Circuito radiatori 1	Valvola miscelatrice a tre vie	rc_vh_clim
		Circuito radiatori 2	Valvola miscelatrice a tre vie	rc_vh_clim
HST2	eNode 1	Circuito radiatori 1	Valvola miscelatrice a tre vie	rc_vh_clim
		Circuito radiatori 2	Valvola miscelatrice a tre vie	rc_vh_clim
HST3	eNode 1	UTA	Ventilatori	ve
			Serrande aria esterna	se
			Valvola batteria calda	vh
			Valvola batteria fredda	vh
	eNode 2	Circuito radiatori 1	Valvola miscelatrice a tre vie	rc_vh_clim
HST4	eNode 1	Circuito radiatori 1	Valvola miscelatrice a tre vie	rc_vh_clim
		Circuito radiatori 2	Valvola miscelatrice a tre vie	rc_vh_clim
HST5	eNode 1	Circuito radiatori 1	Valvola miscelatrice a tre vie	rc_vh_clim
HST6	eNode 1	UTA 1	Ventilatori	ve
		UTA 4	Ventilatori	ve
			Valvola batteria post risc.	vh
	eNode 2	UTA 2	Ventilatori	ve
			Valvola batteria post risc.	vh
		UTA 3	Ventilatori	ve
	eNode 3	Circuito distrib. caldo 1	Valvola miscelatrice a tre vie	rc_vh_clim
		Circuito distrib. caldo 2	Valvola miscelatrice a tre vie	rc_vh_clim
HST7	eNode 1	UTA	Ventilatori	ve
	eNode 2		Valvola batteria calda	vh
	eNode 3	Circuito radiatori 1	Valvola miscelatrice a tre vie	rc_vh_clim
		Circuito radiatori 2	Valvola miscelatrice a tre vie	rc_vh_clim
HST8	eNode 1	UTA	Ventilatori	ve
	eNode 2		Valvola batteria calda	vh
	eNode 3	Circuito radiatori 1	Valvola miscelatrice a tre vie	rc_vh_clim
		Circuito radiatori 2	Valvola miscelatrice a tre vie	rc_vh_clim
	eNode 4	Circuito radiatori 3	Valvola miscelatrice a tre vie	rc_vh_clim
HST9	eNode 1	UTA 1	Ventilatori	ve
	eNode 2	UTA 2	Ventilatori	ve
	eNode 3	UTA 3	Ventilatori	ve
	eNode 4	UTA 4	Ventilatori	ve
	eNode 5	Circuito radiatori 1	Valvola miscelatrice a tre vie	vh
	eNode 6	Circuito radiatori 2	Valvola miscelatrice a tre vie	vh
	eNode 7	Circuito radiatori 3	Valvola miscelatrice a tre vie	vh
	eNode 8	Circuito radiatori 4	Valvola miscelatrice a tre vie	vh

Tabella 5.5: Dispositivi installati e funzioni implementate per gli ospedali francesi

Edificio	n° eNode	Circuiti controllati	Attuazione	Funzione di controllo
RSA_DE1	eNode 1	UTA 1	Ventilatori	ve
			Valvola batteria calda	vh
		UTA 2	Ventilatori	re
	eNode 2	Circuito radiatori 1	Valvola miscelatrice a tre vie	rc_vh_clim
		Circuito radiatori 2	Valvola miscelatrice a tre vie	rc_vh_clim
	eNode 3	UTA 3	Ventilatori	re
			Valvola batteria calda	vh
		UTA4	Ventilatori	re
			Valvola batteria calda	vh
RSA_DE2	eNode 1	UTA 1	Ventilatori	re
			Valvola batteria calda	vh
	eNode 2	Circuito radiatori 1	Valvola miscelatrice a tre vie	rc_vh_clim
		Circuito radiatori 2	Valvola miscelatrice a tre vie	rc_vh_clim
	eNode 3	UTA 2	Ventilatore	re
			Ventilatore di estrazione	re
	eNode 4		Valvola batteria calda	vh
	eNode 5	UTA 3	Ventilatori	re
			Valvola batteria calda	vh
	eNode 6	UTA 4	Ventilatori	re
	eNode 7	Circuito radiatori 3	Valvola miscelatrice a tre vie	rc_vh_clim

Tabella 5.6: Dispositivi installati e funzioni implementate per le RSA tedesche

Capitolo 6

Valutazione del risparmio energetico

6.1 Modello per la stima del risparmio

Il modello per la stima del risparmio energetico è il medesimo per le due soluzioni tecniche adottate. La firma energetica pre-retrofit è stata calcolata con un modello lineare a 2 parametri:

$$E_{\text{baseline}} = C + B X \quad (6.1)$$

Dove

E = energia consumata in kWh;

X = Variabile indipendente (temperatura esterna o differenza di temperatura oraria cumulativa);

C = intercetta (consumo indipendente dal riscaldamento);

B = coefficiente angolare che rappresenta l'aumento di consumo energetico per grado di freddo in più;

La differenza di temperatura oraria cumulativa (Heating Degree Hours - HDH) è definita in eq.6.2 come in [21]. Questo tipo di variabile è indicata come indice utilizzabile per un'analisi energetica, nello standard UNI 10349-3:2016 - "Riscaldamento e raffrescamento degli edifici - Dati climatici - Parte 3: Differenze di temperatura cumulate (gradi giorno) ed altri indici sintetici". L'eq.6.2 è stata utilizzata nel caso in cui sono disponibili i dati orari misurati in campo. Per i dati aggregati presi dalle bollette mensili, è stata eseguita la media mensile dei valori di HDH, dividendo per il numero di giorno del mese (ea.6.3).

$$HDH = \sum_{i=1}^{24} \max(21 - T_{\text{esterna},i}, 0) \quad (6.2)$$

$$HDHm = \frac{1}{GM} \sum_{i=1}^{GM} HDH_i \quad (6.3)$$

dove:

$HDHm$ = valore medio mensile di HDH;

HDH_i = valore di HDH del giorno i -esimo del mese;

GM = numero di giorni del mese.

Una volta noti i consumi post-retrofit, si riportano alla medesima granularità dei dati pre-retrofit, si proiettano sulla retta di regressione (eq.6.4) e si calcola il risparmio percentuale facendo il rapporto tra E_{saving} e $E_{baseline}$, la quale viene calcolata sulle stesse temperature (o HDH) dei consumi post-retrofit (eq.6.5).

$$E_{saving} = C + BX_{post} - E_{post} \quad (6.4)$$

$$Risp = \frac{E_{saving}}{C + BX_{post}} \quad (6.5)$$

Per modellare la firma energetica post-retrofit, nel caso delle RSA di cui si posseggono i dati misurati in campo, è stato utilizzato un modello e tre parametri discontinuo (eq.6.6). La discontinuità del modello è legata all'utilizzo delle caldaie in cascata.

$$\begin{cases} E_{post} = C_1 + B_1 X & \text{per i mesi di gennaio e febbraio} \\ E_{post} = C_2 + B_2 \cdot \max(X_b - X, 0) & \text{da marzo ad agosto} \end{cases} \quad (6.6)$$

dove

E = energia consumata post-retrofit in kWh;

X = Variabile indipendente (temperatura esterna o differenza di temperatura oraria cumulativa);

X_b = temperatura o differenza di temperatura oraria cumulativa di bilanciamento;

C_1 = intercetta della retta 1 (consumo con 2 caldaie attive);

C_2 = intercetta della retta 2 (consumo con una caldaia attiva);

B_1, B_2 = coefficienti angolari che rappresentano l'aumento di consumo per grado di freddo in più.

Nel caso della soluzione *Man in the Middle*, seguendo il Protocollo Internazionale di Misura e Verifica delle Prestazioni [18], sono stati eseguiti periodi di

misura con prove di attivazione e disattivazione dell'ottimizzazione Enerbrain. La baseline è stata costruita con un modello a due parametri (eq.6.1) basato sui dati misurati durante il periodo in cui l'ottimizzazione era disattivata. Il risparmio (eq.6.5) è stato calcolato utilizzando i dati misurati durante il periodo in cui l'ottimizzazione era attiva.

6.1.1 Metriche di errore

Le metriche principali per misurare l'accuratezza delle regressioni sono:

- Coefficiente di determinazione:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (6.7)$$

- Coefficiente di variazione dell'errore quadratico medio:

$$CV(RMSE) = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2}}{\bar{y}} \quad (6.8)$$

- Errore medio assoluto percentuale:

$$MAPE = 100 \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - f(x_i)}{y_i} \right| \quad (6.9)$$

Dove:

y_i = valori reali;

$f(x)$ = funzione di regressione;

$f(x_i)$ = valori predetti;

\bar{y} = media dei valori reali

6.2 Casi studio: RSA francesi

6.2.1 Formato dei dati

I dati pre intervento sono in formato di bollette, perciò aggregati con cadenza mensile. I consumi di gas e calore da teleriscaldamento sono già forniti in kWh, insieme alla superficie totale dell'edificio e al numero di letti presenti. In Fig.9-10 è possibile vedere i consumi specifici delle RSA francesi dal 2015

al 2025. I consumi di gas sono maggiori nei mesi invernali e minimi nei mesi estivi, come ci si aspetterebbe da impianti di riscaldamento che servono anche l'impianto ACS. I dati post intervento non sono disponibili per tutti i casi studio francesi, ma solo per le RSA n°1,2,4,6. Queste misurazioni del consumo di gas hanno cadenza oraria. Per rendere possibile la comparazione di dati con cadenza mensile e oraria, si è preso il consumo mensile delle bollette e lo si è diviso per il numero di giorni del mese corrispondente, ottenendo così un consumo giornaliero medio del mese. Per i dati post intervento, è bastato aggregare i dati orari sommando i consumi orari per ottenere quelli giornalieri. I dati pre intervento spaziano dal 2015 al 2024, mentre i dati post intervento spaziano da gennaio 2025 (messa in servizio della soluzione BEMS Cloud) fino ad agosto 2025. In alcuni casi, alcuni anni sono stati considerati come outlier perché si discostavano significativamente dal resto del dataset (es. anni 2020-2021, pandemia di COVID 19) o perché presentavano valori nulli.

I dati meteo pre-retrofit sono stati scaricati dal sito francese [37] e presentano una cadenza di 3 ore (8 dati per giorno). Per calcolare la differenza di temperatura oraria cumulativa giornaliera caratteristica del mese, è stata utilizzata l'eq.6.3. Invece, nel caso dei dati post-retrofit, i dati meteo sono stati scaricati dal servizio Web app Enerbrain e hanno cadenza oraria, analogamente ai consumi di energia e di gas misurati in campo. È stato perciò sufficiente calcolare la media per la temperatura esterna oraria e applicare l'equazione 6.2 per la differenza di temperatura oraria cumulativa giornaliera.

6.2.2 Risparmio energetico

L'implementazione di funzioni di controllo di classe BAC più elevata ha portato alla modifica e al miglioramento della firma energetica. In Fig.13-19-22 si possono osservare le rette basate sul modello lineare (eq.6.1) e il modello a 3 parametri per la firma energetica post-retrofit (eq.6.6), con consumi energetici prima in funzione dei HDH e poi della temperatura media esterna. Per l'RSA n°1 e n°2, la firma energetica post-retrofit (fig.12,13,15,16) mostra una discontinuità, passando dal mese di febbraio a marzo. Questo è giustificato dalla presenza di due caldaie gestite con una logica in cascata, che prevede l'utilizzo della seconda caldaia solo se la prima sta erogando la potenza massima (SE-H9B). Pertanto, nei mesi più freddi si ha una retta traslata verso l'alto, derivante dall'utilizzo di entrambe le caldaie, mentre con l'aumento della temperatura, si avrà una retta traslata verso il basso, dovuta all'utilizzo di una sola caldaia. Per temperature più elevate (o differenza di temperatura oraria cumulativa basse), la firma energetica è costante e rappresenta il consumo di gas dovuto all'utilizzo dell'ACS con accumulo e ricircolo.

Nel caso dell'RSA n°4 invece, la retta non mostra discontinuità causata dalla cascata delle caldaie, tuttavia, in alcune giornate nei mesi invernali i consumi sono molto bassi o molto alti. Questi punti dimostrano un discostamento

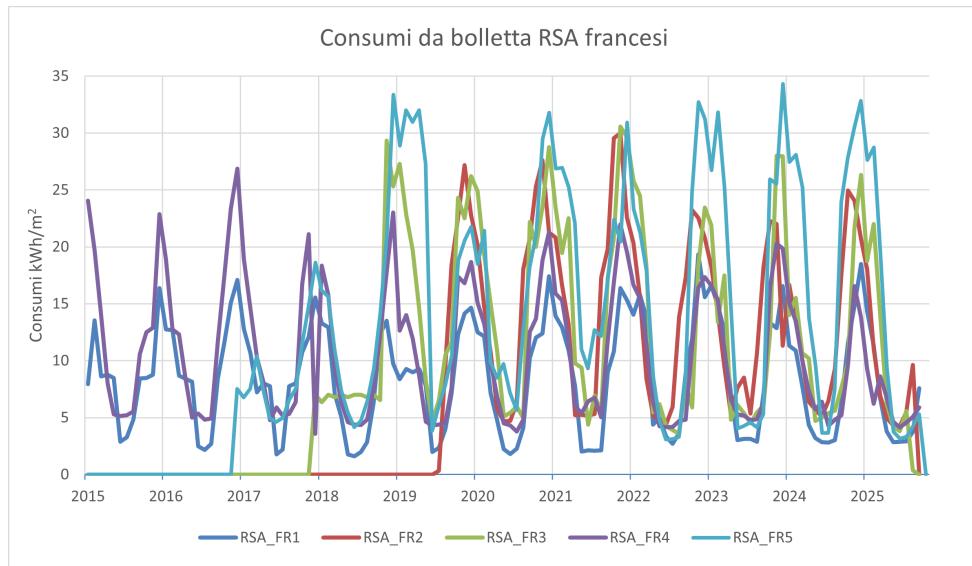


Figura 9: Andamento dei consumi di energia nel tempo per le RSA francesi n°1,2,3,4,5

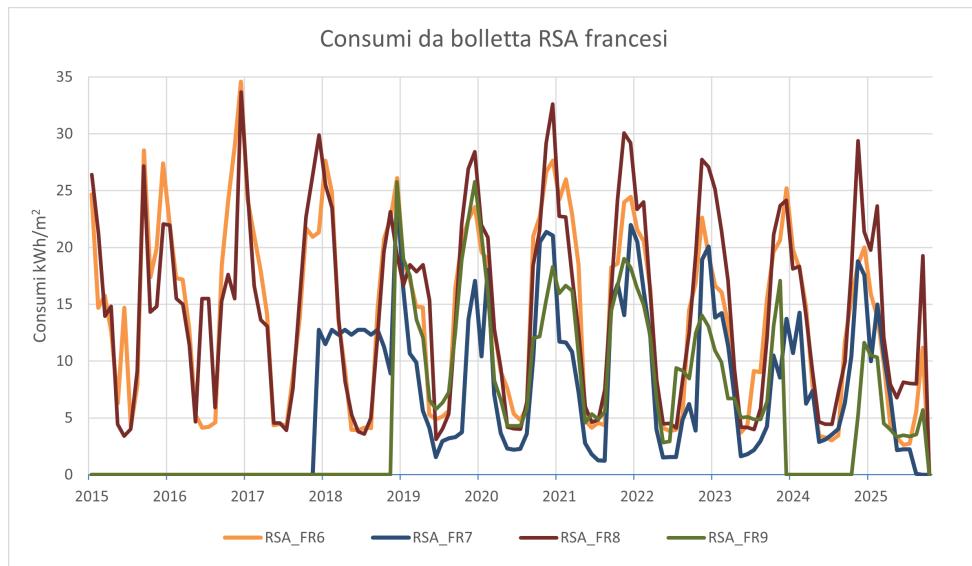


Figura 10: Andamento dei consumi di energia nel tempo per le RSA francesi n°6,7,8,9

dal normale funzionamento dell'impianto, probabilmente dovuto a manutenzioni o all'aumento temporaneo dei setpoint. In questo caso, inoltre, le caldaie presenti nell'impianto sono più recenti e il controllore manda il setpoint alla caldaia master, la quale gestisce l'accensione della caldaia slave secondo una logica interna già ottimizzata. Questo evita discontinuità nella generazione di potenza e, quindi, nel consumo di energia mostrato e nella firma energetica risultante (Fig.18,19).

Per quanto riguarda l'RSA n°6, nella firma energetica(Fig.21,22) si osservano 2 discontinuità: una dovuta alla presenza della cascata delle caldaie e una presente al passaggio da regime invernale a regime estivo. La seconda discontinuità è dovuta al cambio di setpoint eseguito dai manutentori sulle caldaie, durante la commutazione stagionale. Infine, si osserva che, in regime estivo, la retta non è costante come nei casi studio precedenti. Questo è dovuto al fatto che l'RSA n°6 è priva di un accumulo per l'ACS, rendendo la generazione più sensibile alle variazioni della richiesta da parte dell'utenza.

Per tutte le RSA francesi, si è eseguita un'analisi del risparmio energetico, proiettando i dati post-retrofit delle bollette sulla baseline. Sono stati esclusi gli anni 2020 e 2021 per il calcolo della baseline, perché influenzati dalla presenza della pandemia di Codiv 19, eccetto per le RSA n°1 e n°2 in cui i dati non si discostano significativamente dalla nuvola di punti (fig.11,14). Tutte le regressioni costruite partendo dai dati delle bollette hanno un R^2 compreso tra 0.5 e 0.6 (eccetto per l'RSA n°9 che è pari a 0.34) e un CV(RMSE) intorno al 35%. Questo è probabilmente dovuto al fatto che la regressione è stata eseguita su dati troppo aggregati, che coprono un lungo periodo di tempo (da un minimo di 5 a un massimo di 10 anni). Dall'elevata dispersione di dati pre-retrofit si può notare come la regolazione fosse eseguita in modo pessimo, indice dell'assenza di funzioni di controllo automatiche e di un utilizzo errato dell'impianto. L'effetto degli interventi di retrofit è visibile chiaramente nelle firme energetiche post-retrofit calcolate per le RSA n°1,2,4,6. Si nota una riduzione significativa della pendenza delle rette di regressione, indice di un aumento dell'efficienza nella gestione dell'impianto. Questo risultato è particolarmente marcato per l'RSA n°4 (Fig.19) e nell'RSA n°6 (Fig.22). Inoltre, nelle RSA n°1,2,6, dove sono presenti le discontinuità, il risparmio maggiore è stato ottenuto nei mesi di marzo,aprile e maggio, grazie alla gestione ottimizzata della cascata dei generatori a gas.

Tutti i risparmi energetici calcolati sono riassunti nella Tab.6.1. I risparmi senza * sono stati calcolati utilizzando i dati presi dalle bollette. I risparmi di tipo * e di tipo **, sono stati calcolati dai dati medi giornalieri post-retrofit (solo per le RSA n°1,2,4,6). La media dei tre metodi di calcolo dà come risultati il 24% per RSA n°1, 18% per la n°2, 38% per la n°4 e 44% per la n°6. I risparmi minori ottenuti sono del 9.5% e del 16.8%, rispettivamente nel caso dell'RSA n°8 e n°9. Questo è probabilmente dovuto a ritardi nella messa in servizio,

6.2. Casi studio: RSA francesi

che hanno influenzato i consumi di energia nei mesi di gennaio e febbraio. Tali risultati sono promettenti, tuttavia, come detto in precedenza, sono affetti da errori relativamente elevati a causa della dispersione dei dati pre-retrofit.

Si può concludere che quantificare il risparmio energetico con precisione non è possibile, ma un'analisi sulle firme energetiche permette di visualizzare l'effetto degli interventi di retrofit, individuando eventuali periodi in cui l'ottimizzazione da Cloud ha performato peggio. Invece, nei casi in cui sono disponibili solo i dati da bolletta, si può osservare che i consumi sono localizzati nella parte bassa della nuvola di punti.

Edifici	Consumi predetti (kWh)	Consumi post retrofit (kWh)	Risparmio %	R2	CV(RMSE) %	MAPE %
RSA_FR1	328648	240726	26.8	0.56	36.9	47
RSA_FR1*	284754	226602	20.4	0.57	36.8	47
RSA_FR1**	283722	216056	23.8	0.57	36.8	47
RSA_FR2	615993	440150	28.5	0.63	33.1	62
RSA_FR2*	471302	422415	10.4	0.62	33.3	63
RSA_FR2**	538546	451305	16.2	0.63	33.2	62
RSA_FR3	382966	305714	20.2	0.66	36.2	35
RSA_FR4	479606	295802	38.3	0.67	30.9	25
RSA_FR4*	455624	289701	36.4	0.69	30.5	25
RSA_FR4**	478171	295732	38.2	0.67	31.4	30
RSA_FR5	600738	448344	25.4	0.53	43.4	52
RSA_FR6	496796	273130	45.0	0.55	36.4	49
RSA_FR6*	494096	283792	42.6	0.56	36.3	49
RSA_FR6**	499301	274142	45.1	0.56	36.0	49
RSA_FR7	264420	220087	16.8	0.65	41.8	53
RSA_FR8	490713	443993	9.5	0.56	36.6	44
RSA_FR9	489547	249404	49.1	0.34	41.5	44

*i dati post-retrofit provengono dal database Enerbrain e sono dati sati aggregati a timestamp giornaliero facendo la media dei dati orari. I dati pre-retrofit sono sati divisi per il giorni del mese, ottenendo i consumi medi giornalieri caratteristici di ogni mese.

** i dati post-retrofit come in *, ma graficati sulla temperatura media esterna anziché sulla differenza di temperatura oraria cumulativa (HDH).

Tabella 6.1: Consumi e risparmi delle RSA francesi

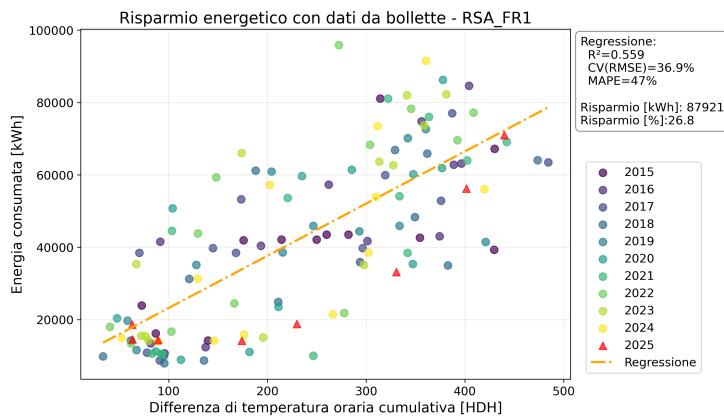


Figura 11: Calcolo del risparmio calcolato dalle bollette - RSA n°1

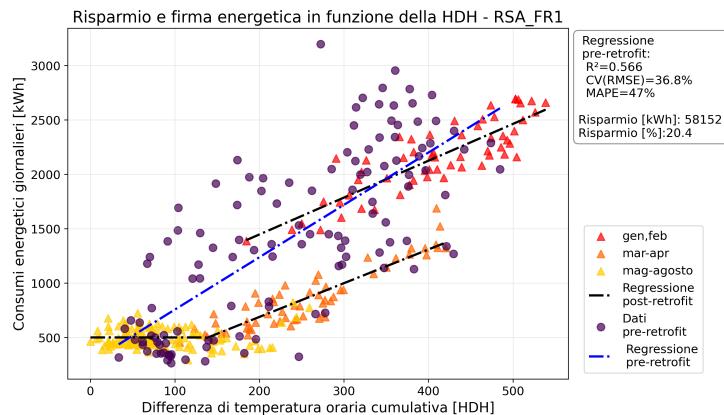


Figura 12: Calcolo del risparmio e firma energetica in funzione della differenza di temperatura oraria cumulativa - RSA n°1

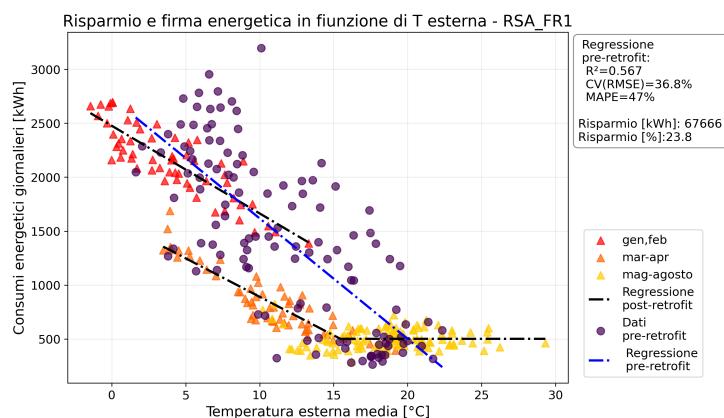


Figura 13: Calcolo del risparmio e firma energetica in funzione della temperatura esterna - RSA n°1

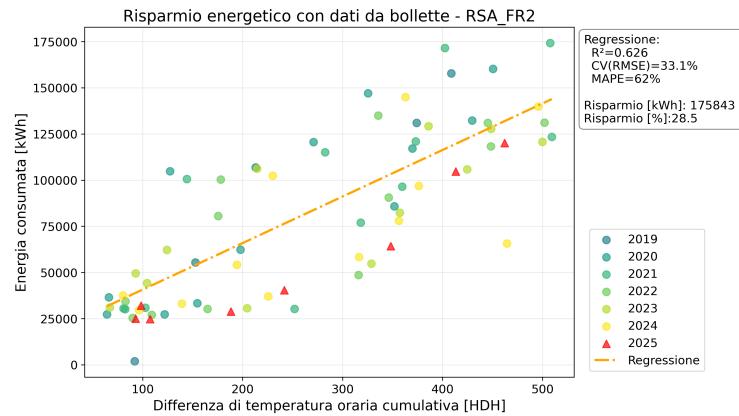


Figura 14: Calcolo del risparmio calcolato dalle bollette - RSA n°2

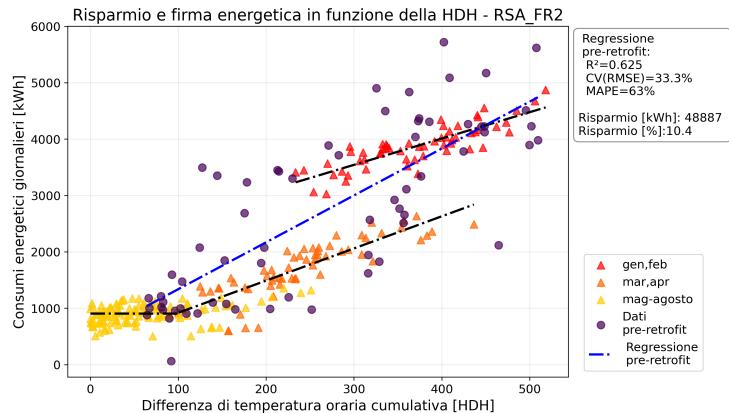


Figura 15: Calcolo del risparmio e firma energetica in funzione della differenza di temperatura oraria cumulativa - RSA n°2

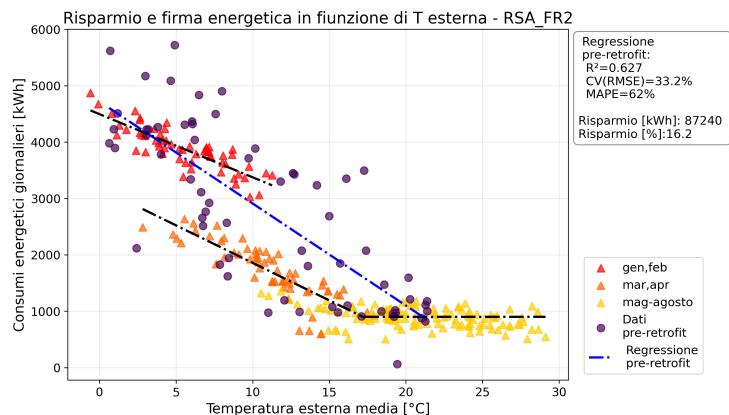


Figura 16: Calcolo del risparmio e firma energetica in funzione della temperatura esterna - RSA n°2

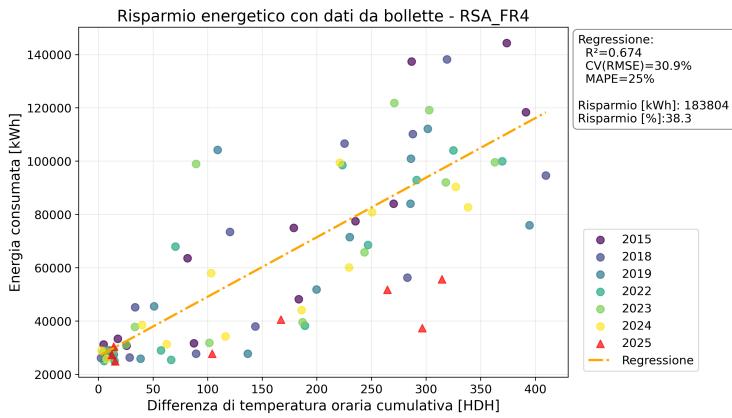


Figura 17: Calcolo del risparmio calcolato dalle bollette - RSA n°4

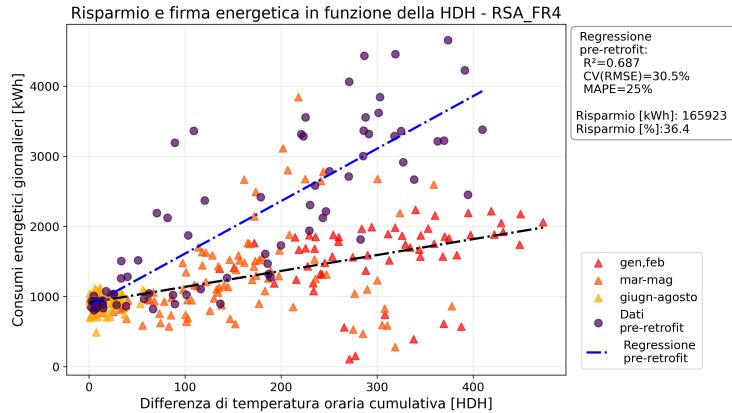


Figura 18: Calcolo del risparmio e firma energetica in funzione della differenza di temperatura oraria cumulativa - RSA n°4

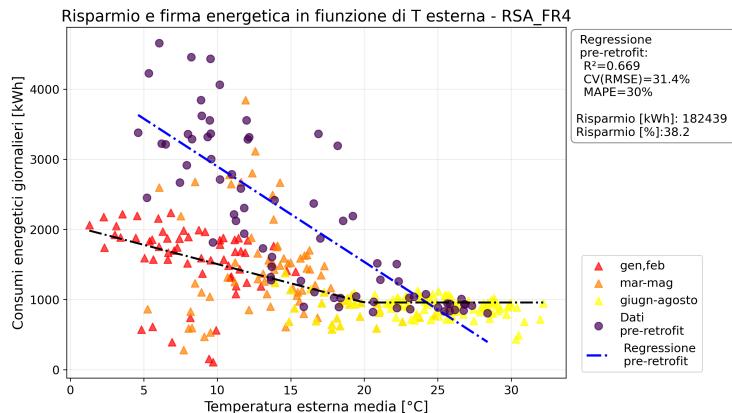


Figura 19: Calcolo del risparmio e firma energetica in funzione della temperatura esterna - RSA n°4

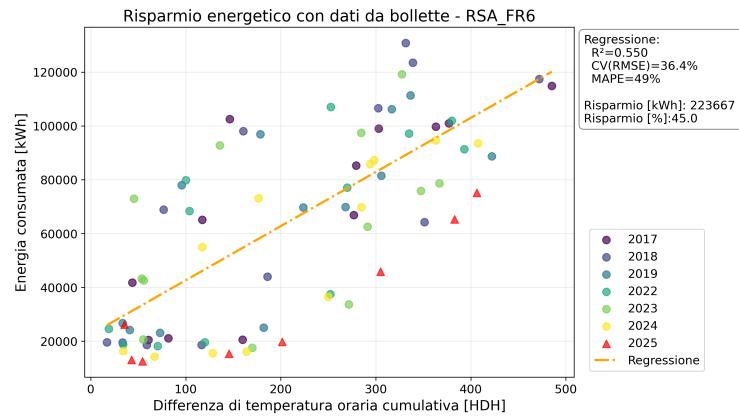


Figura 20: Calcolo del risparmio calcolato dalle bollette - RSA n°6

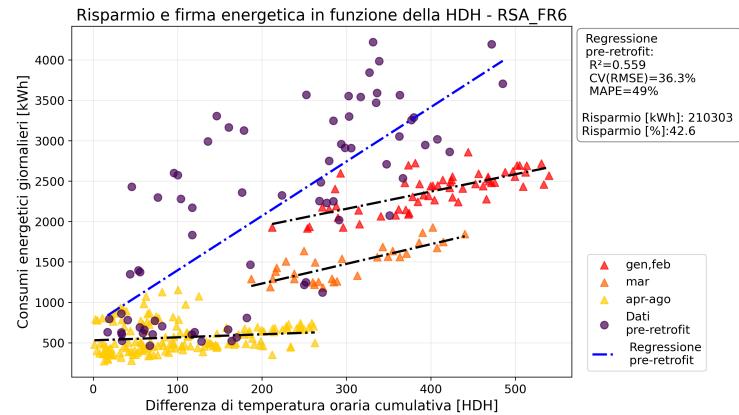


Figura 21: Calcolo del risparmio e firma energetica in funzione della differenza di temperatura oraria cumulativa - RSA n°6

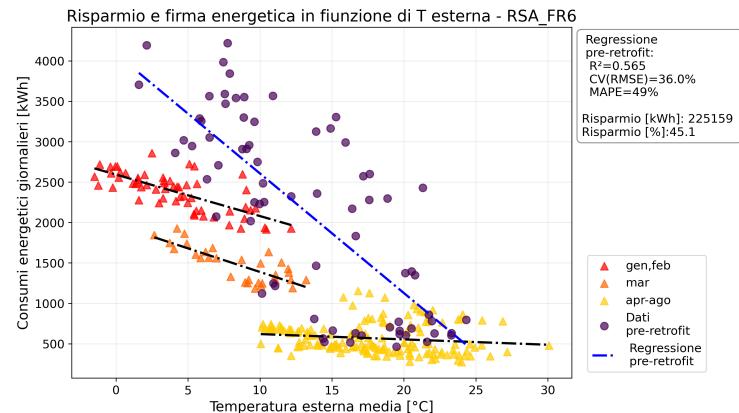


Figura 22: Calcolo del risparmio e firma energetica in funzione della temperatura esterna - RSA n°6

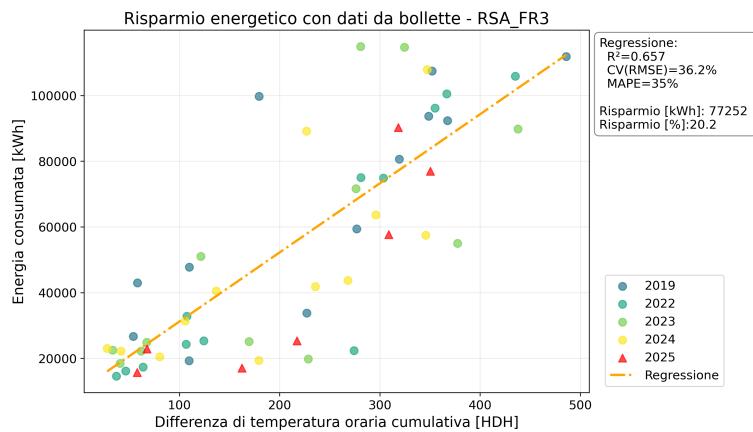


Figura 23: Calcolo del risparmio calcolato dalle bollette - RSA n°3

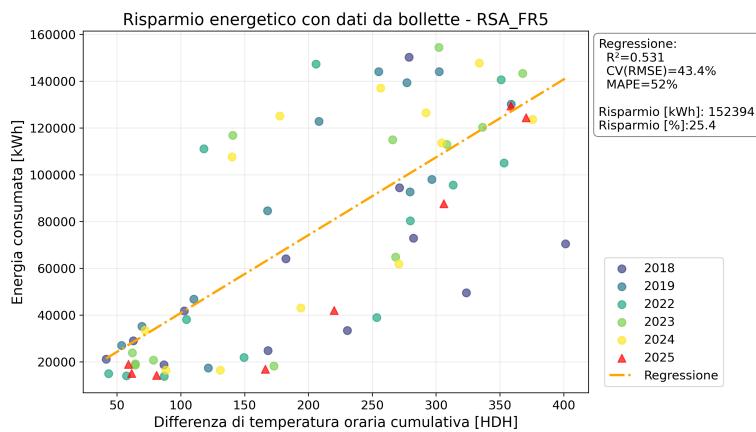


Figura 24: Calcolo del risparmio calcolato dalle bollette - RSA n°5

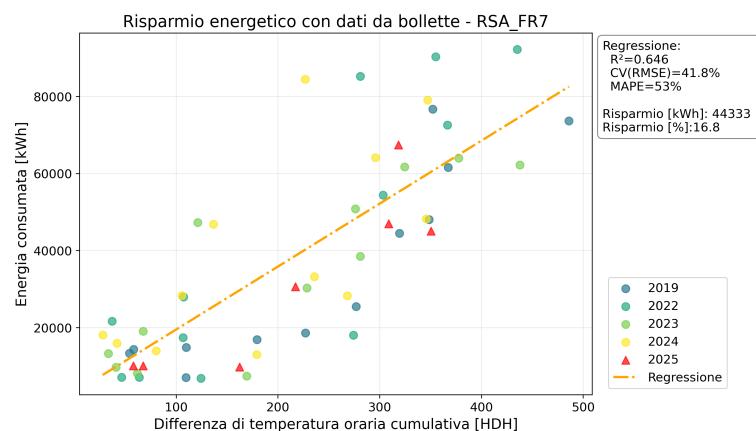


Figura 25: Calcolo del risparmio calcolato dalle bollette - RSA n°7

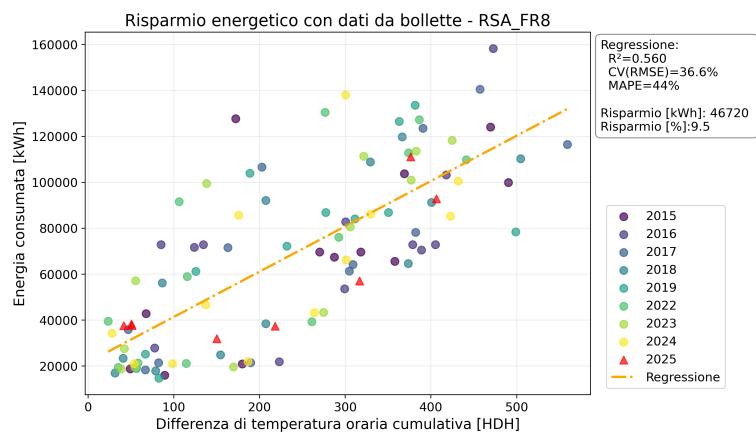


Figura 26: Calcolo del risparmio calcolato dalle bollette - RSA n°8

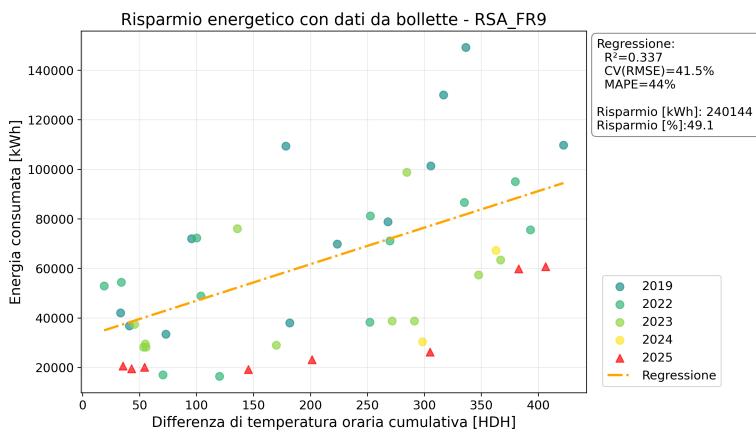


Figura 27: Calcolo del risparmio calcolato dalle bollette - RSA n°9

6.3 Casi studio: RSA tedesche e Ospedali francesi

6.3.1 Formato dei dati

I dati disponibili nel caso della soluzione *Man in the Middle* differiscono tra le RSA tedesche e gli ospedali francesi. Tramite i test su periodi on/off eseguiti sugli impianti, sono stati estratti i dati pre-retrofit (ottimizzazione Enerbrain off) e post-retrofit (ottimizzazione Enerbrain on).

Per le RSA tedesche, i dati hanno granularità oraria perché provengono dai misuratori installati sui circuiti. I dati meteo sono stati scaricati dal servizio di Web app Enerbrain e hanno anch'essi granularità oraria. In Fig.28 è possibile vedere i consumi dell'RSA n°1 ripartiti tra le UTA, il circuito radiatori 1 (Bauteil 1) e il circuito radiatori 2 (Bauteil 2), mentre in Fig.29 si osservano i consumi dell'RSA n°2 ripartiti tra le UTA e i tre circuiti dei radiatori. Nei giorni evidenziati in verde, l'ottimizzazione Enerbrain era attiva, mentre in quelli non evidenziati l'eNode era in modalità bypass. Inoltre, è possibile osservare come i consumi siano coerenti con l'andamento delle HDH (eq.6.2), riferiti all'asse delle ordinate destro. I dati disponibili vanno da metà febbraio a metà aprile (fine della stagione di riscaldamento).

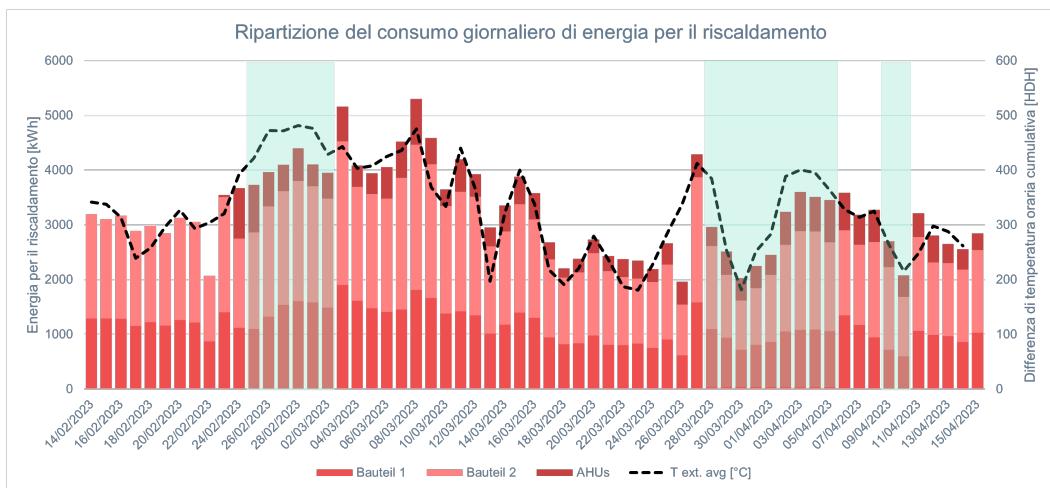


Figura 28: Consumi giornalieri di energia con periodi di on/off dell'ottimizzazione - RSA tedesca n°1

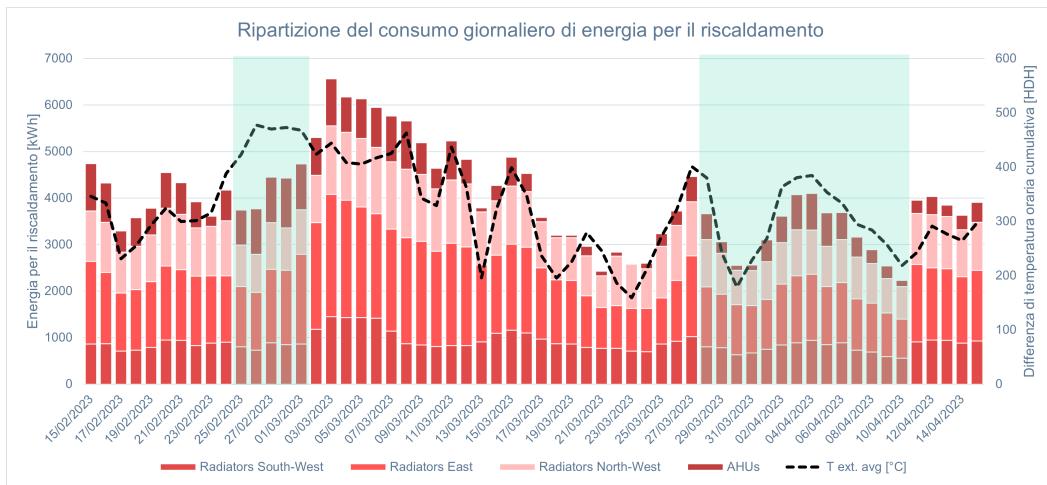


Figura 29: Consumi giornalieri di energia con periodi di on/off dell'ottimizzazione - RSA tedesca n°2

Per gli ospedali, i dati hanno granularità mensile perché provengono dalle bollette dei fornitori, inoltre, questi consumi si riferiscono alle sottostazioni che, in alcuni casi, servono più edifici. È stato perciò necessario distribuire i consumi in base alla superficie calpestabile. Questo non influisce sui risparmi percentuali aggregati delle sottostazioni, ma solo su quelli assoluti dei singoli edifici che condividono la generazione di calore. Come si può notare dalla Fig.30, i consumi mensili spaziano da dicembre 2020 a dicembre 2024, seguono l'andamento della differenza di temperatura oraria cumulativa e sono nulli nei mesi estivi, poiché relativi agli impianti di riscaldamento. I consumi in verde rappresentano i mesi in cui l'ottimizzazione da Cloud era attiva, mentre quelli in blu rappresentano i mesi in cui gli eNode erano in modalità bypass. Per il calcolo delle baseline e del risparmio, sono stati considerati solo i consumi dei mesi invernali (da ottobre a marzo).

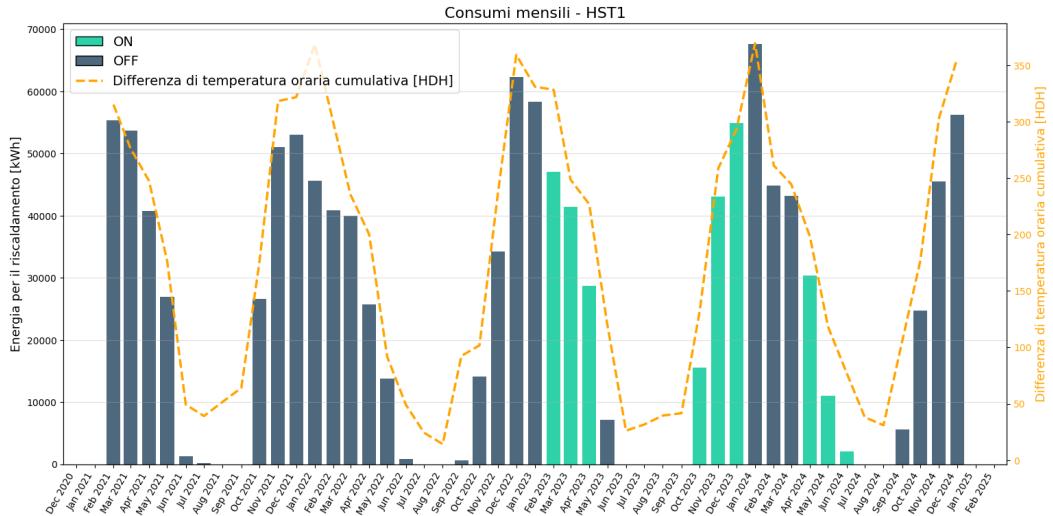


Figura 30: Consumi mensili di energia con periodi di on/off dell'ottimizzazione - Ospedale n°1

6.3.2 Risparmio energetico nelle RSA tedesche

Il risparmio energetico derivante dall'ottimizzazione delle funzioni applicative degli impianti di distribuzione, ha portato risparmi inferiori rispetto alla soluzione BEMS Cloud, ma comunque significativi. La baseline, in questo caso, è stata calcolata con i dati corrispondenti ai periodi in cui l'ottimizzazione era inattiva (eNode in modalità bypass) e i risparmi sono stati calcolati proiettando i dati post-retrofit (ottimizzazione attiva) sulla baseline. Anche per i dati post-retrofit è stata calcolata la retta di regressione, ma solamente nei casi in cui i dati non erano troppo dispersi.

Per l'RSA n°1, si può notare come le regressioni post-retrofit siano traslate verso il basso rispetto alle baseline per i circuiti dei radiatori (Fig.32,33). La riduzione del termine noto delle regressioni lineari è legata all'accensione e allo spegnimento ottimizzati. Ne risulta un risparmio del 17% sia nel circuito radiatori 1 che nel circuito radiatori 2. Per le UTA, invece, non si è ottenuto un risparmio, ma si sono registrati consumi maggiori (Fig.31). Questo è dovuto al fatto che il cliente ha impostato un calendario 24h su 24h fisso su tutto il periodo, senza spegnimento notturno, rendendo impossibile il raggiungimento di un risparmio energetico. Nonostante ciò, complessivamente, il risparmio ottenuto raggiunge l'11,5% (Fig.34), indice del fatto che i consumi delle UTA non incidono molto su quelli totali dell'edificio.

Per l'RSA n°2, a differenza della n°1, si nota non solo una riduzione del termine noto della regressione, ma anche una riduzione del coefficiente angolare (Fig.36,37,38). Questo indica che la compensazione sulla curva climatica ha significativamente migliorato l'efficienza dell'impianto. Come risultato, si è ottenuto un risparmio percentuale medio del 26% su tre circuiti che servono i

6.3. Casi studio: RSA tedesche e Ospedali francesi

radiatori. Per le UTA invece, sempre a causa di un accensione continuata senza attenuazione notturna, il risparmio supera di poco l'1% (Fig.35). Complessivamente, il risultato ottenuto su questa RSA è pari al 23% (Fig.39). Si può affermare che per entrambe le RSA tedesche, sarebbe bastata l'ottimizzazione sulla funzione di controllo dei circuiti dei radiatori, escludendo le UTA che in ogni caso non avrebbero portato a un risparmio energetico significativo.

Per quanto riguarda i parametri di affidabilità della regressione, per le regressioni sui consumi totali si ha un R^2 pari a 0.73 e un $CV(RMSE)$ pari al 12.4%, nel caso dell'RSA tedesca n°1, mentre un R^2 pari a 0.78 e un $CV(RMSE)$ pari all'11.3%. Questi parametri mostrano che il modello di regressione è decisamente più accurato rispetto a quello ottenuto dai dati delle RSA francesi. Tutti i risultati numerici sono riassunti nella Tab.6.2.

Edifici	Circuito	Consumi predetti (kWh)	Consumi post retrofit (kWh)	Risparmio %	R^2	$CV(RMSE)$ %	MAPE %
RSA_DE1	UTA	8285	9048	-9.2	0.53	23.8	19
	circuito radiatori 1	22704	18714	17.6	0.71	12.8	11
	circuito radiatori 2	32899	27320	17.0	0.69	12.8	11
	totali	62220	55082	11.5	0.73	12.4	9
RSA_DE2	UTA	10945	10790	1.4	0.72	32.7	48
	radiatori sud-ovest	18768	14740	21.5	0.41	16.0	12
	radiatori est	33712	23900	29.1	0.68	15.8	13
	radiatori north-ovest	22620	16590	26.7	0.58	11.2	9
	totali	86046	66020	23.3	0.78	11.3	10

Tabella 6.2: Risparmi delle RSA tedesche

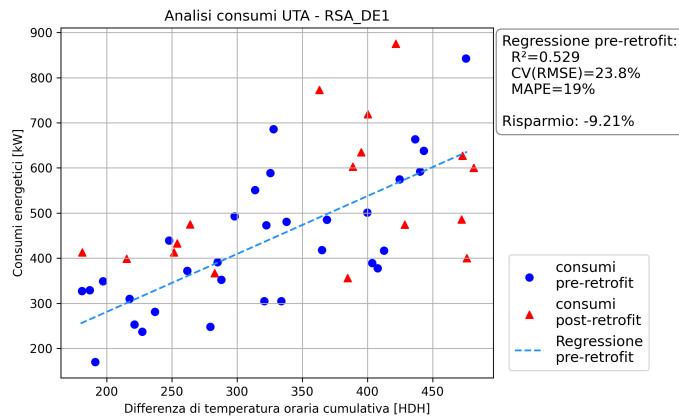


Figura 31: Calcolo del risparmio - RSA tedesche n°1, UTA

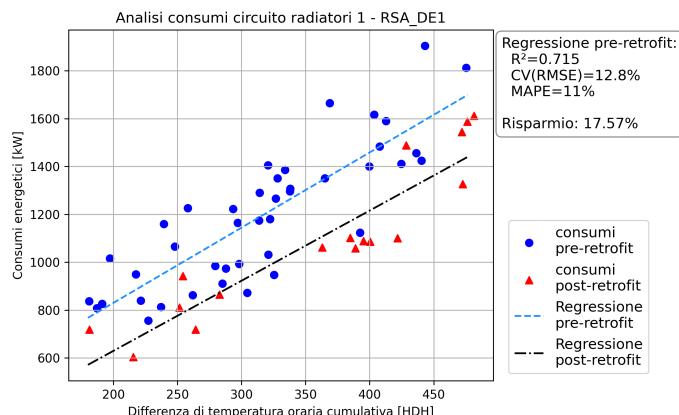


Figura 32: Calcolo del risparmio - RSA tedesca n°1, circuito radiatori 1

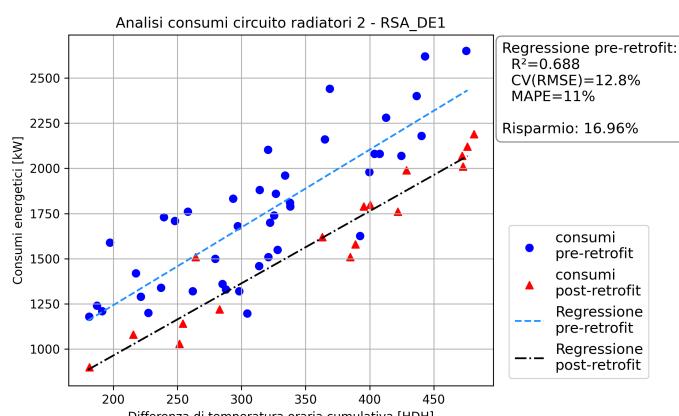


Figura 33: Calcolo del risparmio - RSA tedesca n°1, circuito radiatori 2

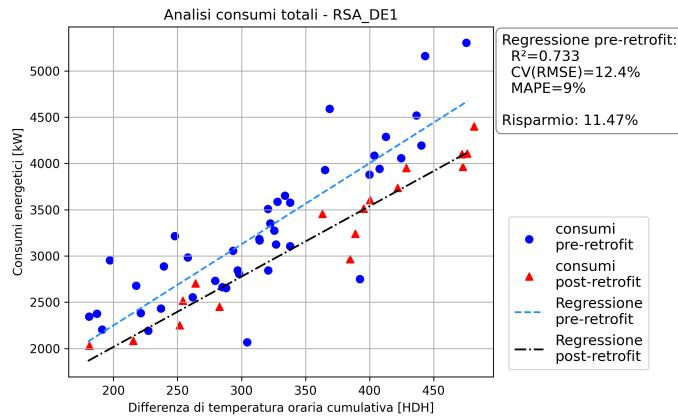


Figura 34: Calcolo del risparmio totale - RSA tedesca n°1

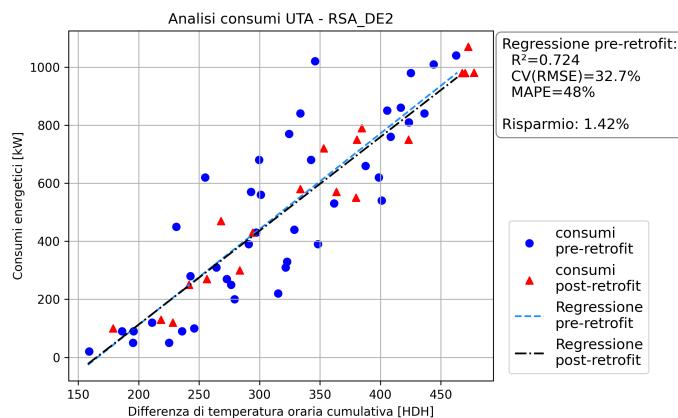


Figura 35: Calcolo del risparmio - RSA tedesca n°2, UTA

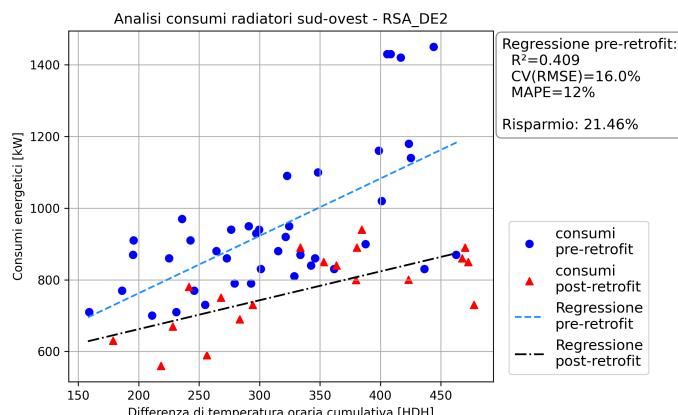


Figura 36: Calcolo del risparmio - RSA tedesche, circuito radiatori sud-ovest

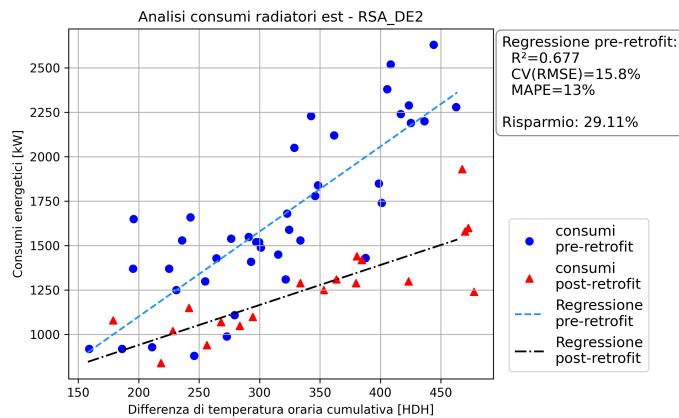


Figura 37: Calcolo del risparmio totale - RSA tedesca n°2, circuito radiatori est

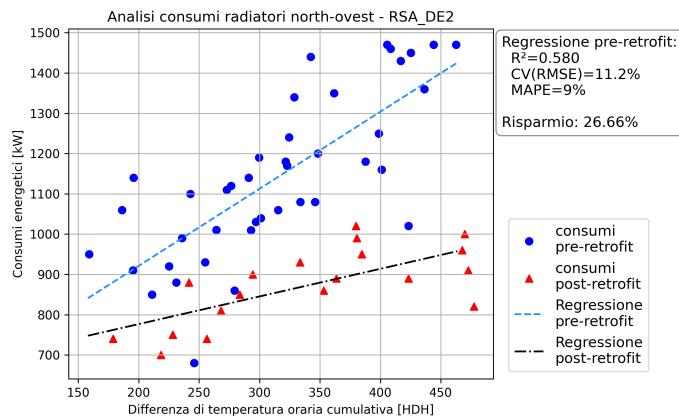


Figura 38: Calcolo del risparmio - RSA tedesca n°2, circuito radiatori nord-ovest

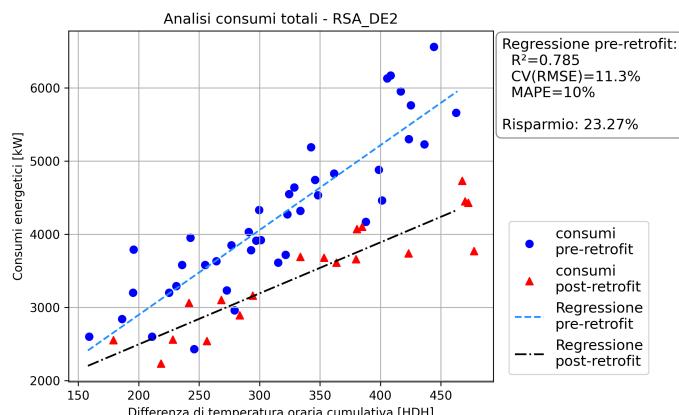


Figura 39: Calcolo del risparmio totale - RSA tedesca n°2

6.3.3 Risparmio energetico negli ospedali francesi

Per questi casi studio, i dati provengono dai misuratori posti sul circuito primario del teleriscaldamento. Le quattro sottostazioni si suddividono la generazione dei 9 edifici nel seguente modo: gli ospedali n°6 e n°9 hanno una sottostazione propria; gli edifici n°1,2,3 ne condividono una, così come gli edifici n°4,5,7,8. I consumi aggregati delle varie sottostazioni sono stati suddivisi tra i nove edifici in base alla superficie calpestabile, successivamente, dai valori ottenuti, è stato sottratto il consumo di energia relativo all'ACS, calcolato come la media dei consumi nella stagione di raffrescamento (da giugno a settembre). Per discernere tra i periodi in cui l'ottimizzazione era attiva e i periodi in cui era inattiva, sono stati utilizzati gli stati degli eNode: un mese è considerato "on" se l'eNode è stato attivo (non in bypass) per almeno il 70% del tempo; in caso contrario, il mese è considerato "off". Dai dati pre-retrofit (stato "off") si è ottenuta la baseline, da cui si è calcolato il risparmio energetico secondo il modello 6.4.

I risultati degli edifici n°1,2,3, i quali condividono la stessa stazione di teleriscaldamento ma diversa superficie, mostrano regressioni tra di loro simili, ma risparmi energetici differenti (Fig.40,41). Questo è dovuto a periodi di "off" simili tra di loro e periodi di "on" differenti. I risparmi ottenuti sono del 2.8 % per l'edificio n°1, 8.9% per l'edificio n°2 e 15.2% per l'edificio n°3.

Per gli edifici n°5,6,7,8 che condividono anch'essi una stazione di teleriscaldamento, presentano regressioni simili a coppie (Fig.41,42,43). Gli edifici n°4 e 5 hanno consumi e periodi di on/off uguali, ma superfici differenti. Lo stesso vale per gli edifici n°7 e 8. Ne consegue che i risparmi percentuali sono identici tra gli edifici 4 e 5 (12.6%) e tra gli edifici 7 e 8 (14.4%), mentre i consumi assoluti dipenderanno dalla superficie degli edifici.

Infine, per gli edifici n°6 e 9, si hanno regressioni diverse e risparmi rispettivamente pari al 20.4% e 8.0% (Fig.43,44). Il risparmio medio ottenuto tra tutti gli ospedali si attesta intorno al 12%. Le regressioni hanno quasi tutte un R^2 superiore a 0.8, con un $CV(RMSE)$ inferiore al 14%. Fanno eccezione le regressioni dell'edificio n°6 con un R^2 pari a 0.78 e $CV(RMSE)$ pari al 21% e la regressione dell'edificio n°9 con un $CV(RMSE)$ sempre del 21%. Questi parametri statistici mostrano che le regressioni sono affidabili, tuttavia, è necessario ricordare che la suddivisione dei carichi delle sottostazioni di teleriscaldamento è basata sulla superficie degli edifici, introducendo un errore significativo che non è quantificabile. L'ipotesi che i carichi siano suddivisi perfettamente in base alla superficie potrebbe non essere veritiera, dal momento che gli occupanti influenzano notevolmente l'utilizzo e il consumo degli impianti di riscaldamento.

Edificio	Superficie(m ²)	Consumo predetto (kWh)	Consumo post-retrofit(kWh)	Risparmio %	R ²	CV(RMSE) %	MAPE %
HST1	3061	279698	271959	2.77	0.89	13.13	14.69
HST2	1785	253345	230733	8.93	0.872	12.81	9.05
HST3	2781	149836	127028	15.22	0.892	12.21	10.25
HST4	1027	205491	179663	12.57	0.868	13.79	20.26
HST5	854	170876	149398	12.57	0.868	13.79	20.26
HST6	7099	885078	704647	20.39	0.781	21.32	21.75
HST7	1221	233954	200382	14.35	0.871	9.61	7.24
HST8	989	189501	162308	14.35	0.871	9.61	7.24
HST9	5932	711087	654414	7.97	0.816	21.26	14.68

Tabella 6.3: Risparmi degli ospedali francesi

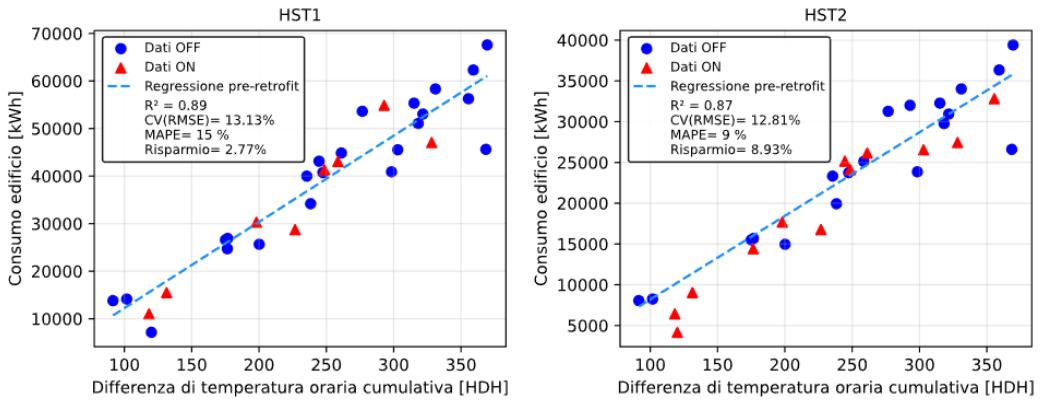


Figura 40: Confronto pre/post-retrofit per gli ospedali francesi n°1 e n°2

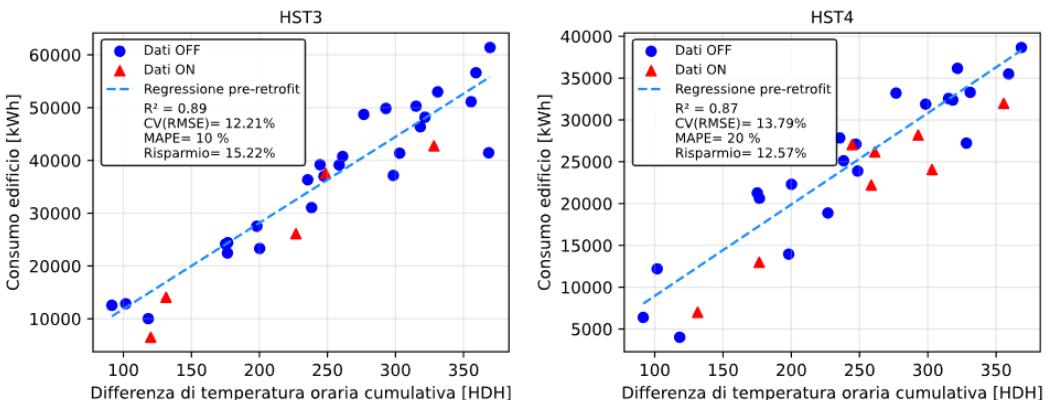


Figura 41: Confronto pre/post-retrofit per gli ospedali francesi n°3 e n°4

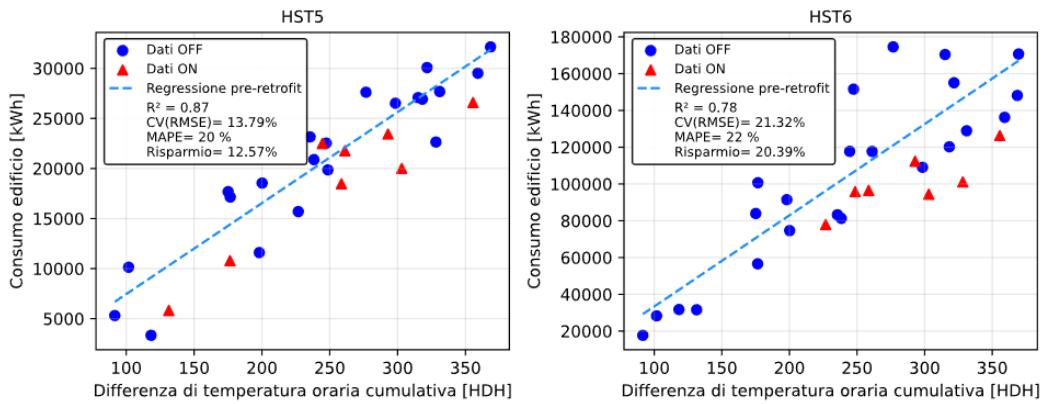


Figura 42: Confronto pre/post-retrofit per gli ospedali francesi n°5 e n°6

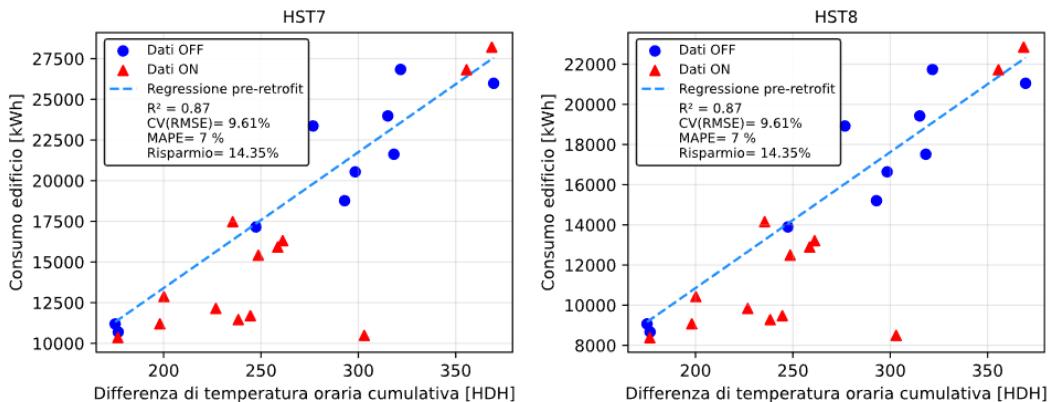


Figura 43: Confronto pre/post-retrofit per gli ospedali francesi n°7 e n°8

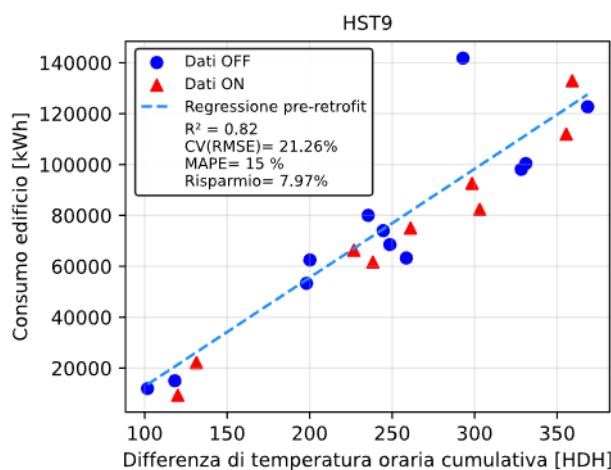


Figura 44: Confronto pre/post-retrofit per l'ospedale francesi n°9

Capitolo 7

Conclusioni

Questo lavoro di tesi, svolto presso l'azienda Enerbrain, ha permesso di valutare l'efficacia delle soluzioni di Building Automation and control System (BACS), attraverso la quantificazione dei risparmi energetici degli edifici ad uso ospedaliero che sono stati oggetto di interventi di retrofit. In questo contesto, la normativa tecnica diventa sempre più indispensabile per la corretta progettazione e messa in servizio degli impianti, in un contesto europeo dove le direttive del *"Fit for 55"* impongono l'utilizzo di tecnologie per l'automazione dell'edificio.

Grazie al tirocinio svolto presso Enerbrain, è stato possibile seguire da vicino le fasi di progettazione e commissioning dei sistemi di automazione installati nelle RSA francesi. L'esperienza maturata ha evidenziato come una delle principali criticità nella realizzazione dei sistemi BACS sia la comunicazione con il cliente, indispensabile per definire correttamente requisiti, aspettative e modalità operative. Oltre a una progettazione accurata e a una messa in servizio eseguita a regola d'arte, è fondamentale, come previsto dallo standard ISO 16484-1, fornire un'adeguata formazione ai manutentori e ai gestori degli impianti, affinché possano utilizzare in modo consapevole ed efficace le tecnologie installate. Per quanto complesso, sarebbe auspicabile estendere la formazione anche ai fruitori, così da migliorarne la comprensione delle interfacce utente, aumentare la consapevolezza e favorire un migliore comfort termo-igrometrico. L'assenza di una formazione adeguata, infatti, potrebbe portare a un uso improprio dei sistemi di controllo, con conseguenti malfunzionamenti e un drastico calo dell'efficienza energetica.

Tra i casi studio analizzati, merita particolare attenzione quello delle RSA francesi, dove non è stato possibile intervenire sul miglioramento delle funzioni di controllo relative al bilanciamento idronico, alla regolazione delle pompe di circolazione e al controllo dell'emissione. La scelta è stata dettata dal fatto che il miglioramento di queste sole tre funzioni avrebbe comportato un costo

paragonabile all'investimento complessivo, anche tenendo conto degli incentivi previsti per l'adozione di un sistema BACS di classe B, evidenziando come alcune disposizioni degli standard tecnici non siano sempre economicamente sostenibili. Nonostante tale limitazione, dai risultati ottenuti emerge che l'incremento delle prestazioni del sistema da una classe D a un livello prossimo alla classe B comporta risparmi energetici significativi.

L'implementazione della soluzione "*BEMS Cloud*" sugli impianti di riscaldamento e ACS ha permesso di ottenere una riduzione dei consumi pari a circa il 30%; tale valore risulta tuttavia poco preciso a causa dell'eccessiva dispersione dei dati storici utilizzati per la definizione della baseline. La marcata fluttuazione dei consumi pre-intervento evidenzia come una regolazione di classe D sia soggetta a oscillazioni significative e a un controllo poco stabile. Al contrario, la maggiore compattezza e coerenza dei dati misurati dopo il retrofit testimoniano l'efficacia del miglioramento del sistema di controllo, consentendo di ottenere una firma energetica più definita e affidabile per l'edificio, oltre a facilitare l'individuazione di eventuali anomalie operative.

Per quanto riguarda la seconda soluzione, denominata "*Man in the Middle*", l'incremento di classe delle singole funzioni di controllo ha generato risparmi inferiori rispetto a un revamping completo del sistema di termoregolazione. Nonostante ciò, la soluzione risulta commercialmente appetibile grazie a costi significativamente più contenuti rispetto alla "*BEMS Cloud*" e a tempi di rientro medi di circa tre anni. In questo caso, i risultati mostrano risparmi medi dell'11.5% per i nove ospedali analizzati e del 17.4% per le due RSA tedesche. A differenza dei valori rilevati nelle RSA francesi, questi risultati presentano una maggiore affidabilità, con valori di R^2 superiori a 0.7 e $CV(RMSE)$ medi pari al 16%.

Per ottenere stime più robuste, è necessario eseguire una campagna di misurazioni *ex ante*, così da poter costruire una *baseline* più solida e rappresentativa del reale funzionamento degli impianti.

Appendice A

Funzioni di controllo

A.1 Controllo riscaldamento

A.1.1 Controllo di emissione

SE-H1C	Input	Output	Variabile regolata
Valvola termostatica	T mandata	Movimento meccanico dello stantuffo dovuto all'espansione di gas o cera	Portata fluido terminali

Termostato	T ambiente	Segnale che apre/chiude la valvola	Portata fluido terminali
Elettrovalvola			

Descrizione

Il controllo individuale della temperatura di riscaldamento negli ambienti viene effettuato tramite valvole termostatiche oppure mediante unità di controllo elettroniche locali (non comunicanti). Il controllo individuale dovrebbe e può essere combinato con programmi di schedulazione che forniscono diversi modi di funzionamento.

SE-H1B	Input	Output	Variabile regolata
Regolatore elettronico	Schedule occupazionale	Segnale ottimizzato che apre e chiude la valvola con regolatore che comunica con il BACS.	Portata fluido terminali
Sonda T ambiente	T ambiente		
Valvola modulante			

Descrizione

Controllo modulante individuale della temperatura negli ambienti tramite il sistema di riscaldamento, con comunicazione tra i controllori e verso il sistema BACS, consente lo scambio di setpoint, richieste di carico e altre informazioni di stato.

Appendice A. Funzioni di controllo

SE-H1A	Input	Output	Variabile regolata
Regolatore elettronico	Schedule occupazionale		
Sonda T ambiente	T ambiente		
Sensore di presenza	Presenza occupanti		
Sensore apertura serramenti	Apertura serramenti	Segnale ottimizzato che apre/chiude la valvola in funzione di occupanti e dell'apertura dei serramenti	Portata fluido terminali
Valvola modulante			

Descrizione Il controllo modulante individuale della temperatura negli ambienti tramite riscaldamento, con comunicazione tra i regolatori e con il BACS, consente lo scambio di setpoint, domanda e altre informazioni di stato. È necessario installare un sistema di rilevamento della presenza per raggiungere il massimo livello di prestazione energetica. La temperatura dell'aria esterna varia il setpoint di temperatura interno dell'ambiente; in estate aumenta il setpoint di raffreddamento, in inverno riduce il setpoint di riscaldamento. La funzione Optimum Start Stop offre una modalità comfort pre-occupazione e un avvio/arresto ottimizzato in base a una programmazione oraria/calendaria e alla protezione della struttura interna dell'edificio.

A.1.2 Controllo di emissione per solai termo-attivi

SE-H2C	Input	Output	Variabile regolata
Regolatore elettronico			
Sensore T manda	T esterna		
Sensore T esterna	T fluido manda	Segnale dipendente dalla T esterna (climatica tradizionale)	
Valvola miscelatrice modulante			Portate miscelate fluidi manda e ritorno TABS

Descrizione Il controllo automatico centrale per una zona TABS (che comprende tutti gli ambienti che ricevono la stessa temperatura dell'acqua di manda) è tipicamente costituito da un anello di regolazione della temperatura dell'acqua di manda, il cui setpoint dipende dalla temperatura media esterna, ad esempio calcolata come media delle ultime 24 ore.

A.1. Controllo riscaldamento

SE-H2B	Input	Output	Variabile regolata
Regolatore elettronico			
Sensore T manda	T esterna		
Sensore T esterna	T fluido manda		
Valvola miscelatrice modulante		Segnale ottimizzato dipendente dalla T esterna (climatica per raffrescamento e riscaldamento). Commutazione stagionale ottimizzata	Portate miscele fluidi manda e ritorno TABS

Descrizione

Se il sistema TABS è utilizzato solo per il riscaldamento, il controllo automatico centralizzato è progettato e tarato per ottenere un'autoregolazione ottimale della temperatura ambiente all'interno dell'intervallo di comfort richiesto (specificato dal setpoint di temperatura ambiente per il riscaldamento). "Ottimale" significa che le temperature ambiente di tutti i locali appartenenti alla zona TABS rimangono, durante i periodi di funzionamento, all'interno dell'intervallo di comfort per garantire le condizioni di benessere, ma al tempo stesso sono mantenute il più basse possibile per ridurre la domanda energetica per il riscaldamento.

Se il sistema TABS è utilizzato per riscaldamento e raffrescamento, il controllo automatico centralizzato è progettato e tarato per ottenere un'autoregolazione ottimale della temperatura ambiente all'interno dell'intervallo di comfort richiesto (specificato dai setpoint di temperatura ambiente per riscaldamento e raffrescamento). "Ottimale" significa che le temperature ambiente di tutti i locali della zona TABS rimangono, durante i periodi di funzionamento, all'interno dell'intervallo di comfort per garantire le condizioni di benessere, ma sfruttano quanto più possibile l'intero intervallo di comfort, al fine di ridurre la domanda energetica sia per il riscaldamento che per il raffrescamento.

Se il sistema TABS è utilizzato per riscaldamento e raffrescamento, il passaggio automatico tra modalità di riscaldamento e di raffrescamento non avviene solo in funzione della temperatura dell'aria esterna, ma tiene conto — almeno in modo indiretto — anche dei guadagni termici interni e solari.

SE-H2A	Input	Output	Variabile regolata
Regolatore elettronico			
Sensore T manda	T esterna		
Sensore T esterna	T fluido manda		
Sensore T interna	T ambiente	Segnale ottimizzato dipendente dalla T esterna (Climatica compensata con T ambiente)	Portate miscele fluidi manda e ritorno TABS
Valvola miscelatrice modulante			

Descrizione

Controllo automatico centralizzato avanzato con funzionamento intermittente. Si tratta di un controllo automatico centralizzato avanzato conforme al tipo SE-H2B, con il seguente complemento: la pompa viene spenta regolarmente per ridurre il consumo di energia elettrica, secondo una logica di funzionamento intermittente. L'intermittenza può essere: ad alta frequenza, con un ciclo di accensione/spegnimento tipico di 6 ore, oppure a bassa frequenza, con un ciclo di accensione/spegnimento di 24 ore. Se il sistema TABS è utilizzato anche per il raffrescamento, l'operazione intermittente con ciclo di 24 ore può essere impiegata per smaltire il calore verso l'aria esterna quando la temperatura dell'aria esterna è sufficientemente bassa.

Controllo automatico centralizzato avanzato con retroazione della temperatura ambiente. Si tratta di un controllo automatico centralizzato avanzato conforme al tipo SE-H2B, con il seguente complemento: il setpoint della temperatura dell'acqua di manda viene corretto in base al segnale di uscita di un regolatore in retroazione della temperatura ambiente, in modo da adattare il setpoint alle variazioni imprevedibili dei carichi termici giornalieri. Poiché i sistemi TABS hanno una reattività termica lenta, la correzione della temperatura ambiente viene applicata solo su base giornaliera: non è possibile una regolazione istantanea. La temperatura ambiente utilizzata per la retroazione è quella di un locale di riferimento o di una temperatura rappresentativa della zona.

Appendice A. Funzioni di controllo

A.1.3 Controllo temperatura acqua nella rete di distribuzione (mandata e ritorno)

SE-H3C	Input	Output	Variabile regolata
Regolatore elettronico			
Sensore T esterna	T esterna	Segnale dipendente dalla T esterna (climatica tradizionale)	
Sensore T manda	T manda fluido		
Valvola miscelatrice modulante			Portate miscelate fluidi manda e ritorno circuiti
Descrizione	Controllo della temperatura di distribuzione dell'acqua calda basato sulla compensazione con la temperatura esterna		

SE-H3A	input	output	Variabile regolata
Regolatore elettronico			
Sensore T esterna	T esterna	Segnale dipendente dalla T esterna e dalla T degli ambienti (climatica compensata)	
Sensore T manda	T manda fluido		
Sensori ambiente	T ambienti		
Valvola miscelatrice modulante			Portate miscelate fluidi manda e ritorno circuiti
Descrizione	Controllo della temperatura di distribuzione dell'acqua calda basato sulla compensazione con la temperatura misurata in ambiente		

A.1.4 Controllo delle pompe di distribuzione

SE-H4C	Input	Output	Variabile regolata
Pompa normale o multi-stadio		Sengnale di accensione se T ambiente si discosta dal setpoint di un offset	on/off pompa
Termostato ambiente	T ambiente		
Descrizione	Il controllo automatico è realizzato per ottenere un funzionamento intermittente dei componenti di emissione e/o distribuzione.		

SE-H4A	Input	Output	Variabile regolata
Pompa			
Inverter			
Regolatore elettronico			
Sensore pressione manda	P manda	Sengnale ottimizzato all'inverter in base alla differenza di pressione misurata tra manda e ritorno del circuito	n° giri pompa
Sensore pressione ritorno	P ritorno		
Descrizione	Il controllo automatico è realizzato per ottenere un funzionamento intermittente dell'emissione e/o della distribuzione in base alla domanda (occupazione).		

A.1.5 Bilanciamento idronico della rete di riscaldamento

SE-H4aC	Input	Output	Variabile regolata
Valvola di bilanciamento per terminale	Setpoint fissi portate terminali	Segnale di apertura e chiusura della PIBCV in funzione della differenza di pressione tra manadata e ritorno del gruppo. La resistenza idraulica del gruppo è mantenuta costante	Differenza di pressione tra mandata e ritorno
Valvola di bilanciamento a pressione indipendente su gruppi di terminali	Setpoint di portata massima		
	P mandata gruppi		
	P ritorno gruppi		
Descrizione	Il bilanciamento statico di ciascun emettitore è ottenuto tramite un dispositivo di regolazione manuale della portata dedicato a ogni emettitore. Il bilanciamento dinamico per gruppi di emettitori (fino a un massimo di 10 emettitori per gruppo) è ottenuto mediante un regolatore automatico di pressione differenziale, in combinazione con un dispositivo di regolazione della portata, che può essere elettronico o manuale, installato sul circuito di gruppo.		

SE-H4aA	Input	Output	Variabile regolata
Valvola di bilanciamento a pressione indipendente per ogni terminale	Setpoint di portata massima	Segnale di apertura e chiusura della PIBCV in funzione della differenza di pressione tra manadata e ritorno del terminale. La resistenza idraulica del terminale è mantenuta costante	Differenza di pressione tra mandata e ritorno
	P mandata gruppi		
	P ritorno gruppi		
Descrizione	Il bilanciamento dinamico di ciascun emettitore è ottenuto mediante un regolatore automatico di pressione differenziale, in combinazione con un dispositivo di regolazione manuale della portata. Il regolatore automatico di pressione misura e controlla la pressione differenziale ai capi della valvola di regolazione della temperatura ambiente, garantendo condizioni di funzionamento stabili e un corretto bilanciamento idraulico indipendentemente dalle variazioni di carico o dalle modifiche nella rete di distribuzione.		

A.1.6 Controllo intermittente della emissione e/o distribuzione

SE-H5C	Input	Output	Variabile regolata
Cronotermostato ambiente	T ambiente e schedule con T setpoint	Partenza che segue la schedule e i setpoint impostati	T fluido terminali
Description	Il controllo automatico è realizzato per ottenere un funzionamento intermittente dei componenti di emissione e/o distribuzione.		

SE-H5B	Input	Output	Variabile regolata
Regolatore di sistema locale/centralizzato	Programma orario	Partenza anticipata ottimizzata manualmente Spegnimento anticipato ottimizzato manualmente	T fluido terminali
	Inerzia ed esposizione edificio		
	Risposta lenta-veloce dei terminali		
Descrizione	Il controllo automatico è realizzato per ottenere un avvio/arresto ottimizzato del funzionamento intermittente dei componenti di emissione e/o distribuzione.		

SE-H5A	Input	Output	Variabile regolata
Regolatore di sistema locale/centralizzato	Programma orario Inerzia ed esposizione edificio Risposta lenta-veloce dei terminali Database dati storici misurati	Partenza anticipata ottimizzata con dati storici Spegnimento anticipato ottimizzato con dati storici	T fluido terminali
Descrizione	Il controllo automatico è realizzato per ottenere un funzionamento intermittente dell'emissione e/o della distribuzione in base alla domanda (ad esempio derivata dall'occupazione) con tempi di funzionamento minimi.		

A.1.7 Controllo dei generatori a combustione o del teleriscaldamento, del generatore a pompe di calore

SE-H6C-7C	Input	Output	Variabile regolata
Regolatore elettronico generatore			
Sensore T manda	T manda	Segnale di regolazione della generazione di calore in funzione della T esterna	T fluido manda generazione
Sensore T esterna	T esterna		
Descrizione	Il setpoint della temperatura del generatore è variabile in funzione della temperatura esterna. Ottenere prestazioni energetiche ottimali riducendo al minimo le temperature di funzionamento del generatore utilizzando le informazioni relative alla temperatura esterna.		

SE-H6A-7A	Input	Output	Variabile regolata
Regolatore elettronico generatore		Segnale di regolazione della generazione di calore in funzione della dei dati ambiente inviati dai regolatori elettronici degli ambienti	T fluido manda generazione
Regolatori elettronici ambiente	T ambienti		
Descrizione	Il setpoint della temperatura del generatore è variabile a seconda del carico del sistema. Ottenere prestazioni energetiche ottimali riducendo al minimo le temperature di funzionamento del generatore utilizzando le informazioni sulla domanda attuale del sistema.		

A.1.8 Controllo dei generatori a unità esterna

Per i generatori a unità esterna, le logiche di controllo sono integrate nella scheda di controllo interna alla macchina, perciò ogni tipo di unità esterna avrà funzionalità di classe A o B in base alle funzioni interne disponibili:

- Classe B (SE-H8B): L'emissione di calore del generatore (condizionatore split (unità esterna) come generatore di calore e freddo) viene controllata a seconda del carico o della richiesta (ad esempio accensione/spegnimento di diversi compressori).
- Classe A (SE-H8A): La potenza del generatore di calore dipende dal carico o dalla richiesta (ad es. bypass gas caldo, controllo della frequenza dell'inverter).

A.1.9 Controllo sequenziale di differenti generatori

SE-H9C	Input	Output	Variabile regolata
Regolatore elettronico	Capacità massima generatore	Richiesta di potenza erogata dal gruppo di generatori.	Carico richiesto a ogni generatore
	Potenza erogata dal generatore		
	Domanda di riscaldamento		

Descrizione Sequenziamento basato sulla priorità di più generatori di calore. I generatori con priorità più alta vengono avviati per primi. Un determinato generatore nell'elenco delle priorità viene avviato solo se i generatori con priorità più alta funzionano a pieno carico. La sequenza è fissa: l'elenco delle priorità viene creato in modo arbitrario.

SE-H9B	Input	Output	Variabile regolata
Regolatore elettronico	Capacità massima generatore	Richiesta di potenza erogata dal gruppo di generatori.	Carico richiesto a ogni generatore
	Potenza erogata dal generatore		
	Curva caratteristica potenza-efficienza		
	Efficienza attuale del generatore		
	Domanda di riscaldamento		

Descrizione I generatori con priorità più alta vengono avviati per primi. Un determinato generatore nell'elenco delle priorità viene avviato solo se i generatori con priorità più alta funzionano a pieno carico. L'elenco delle priorità viene creato dinamicamente in base all'efficienza e alla capacità attuali dei generatori.

SE-H9A	Input	Output	Variabile regolata
Regolatore elettronico	Capacità massima generatore	Richiesta di potenza erogata dal gruppo di generatori.	Carico richiesto a ogni generatore
	Potenza erogata dal generatore		
	Curva caratteristica potenza-efficienza		
	Efficienza attuale del generatore		
	Domanda di riscaldamento		
Supervisore centrale	Dati meteo e carico previsto		

Descrizione Sequenziamento basato sulla priorità di più generatori di calore in base alla loro capacità. I generatori con priorità più alta vengono avviati per primi. Un determinato generatore nell'elenco delle priorità viene avviato solo se i generatori con priorità più alta funzionano a pieno carico. L'elenco delle priorità viene creato dinamicamente in base al carico, tenendo conto dell'efficienza e della capacità attuali dei generatori (potenza massima).

A.1.10 Controllo dei serbatoi di accumulo dell'energia termica

SE-H10B	Input	Output	Variabile regolata
Regolatore elettronico		Richiesta di potenza erogata dal gruppo di generatori.	Carico richiesto al generatore
Sonda T accumulo	T parte alta accumulo		
Sonda T accumulo	T parte bassa accumulo		
Sonda T collettore	T colettore mandata		
Sonda T collettore	T collettore ritorno		

Descrizione Una volta che il TES è abilitato al funzionamento, viene caricato se il sensore di temperatura inferiore indica uno stato di carica minima. La carica verrà interrotta in base alle informazioni del secondo sensore nella parte superiore dell'accumulatore.

SE-H10A	Input	Output	Variabile regolata
Regolatore elettronico		Richiesta di potenza erogata dal gruppo di generatori.	Carico richiesto al generatore
Sonda T accumulo	T parte alta accumulo		
Sonda T accumulo	T parte bassa accumulo		
Sonda T collettore	T colettore mandata		
Sonda T collettore	T collettore ritorno		
Supervisore centrale	Previsione carico		

Descrizione La gestione del fluido all'interno del serbatoio è demandata ad un sistema di supervisione che, in funzione della previsione del carico richiesto, inserisce o disinserisce i generatori. Tale funzionalità è fornita da un supervisore centrale in grado di connettersi attraverso web services a servizi come, ad esempio, le previsioni metereologiche.

A.2 Controllo acqua calda sanitaria

A.2.1 Controllo della temperatura di accumulo mediante riscaldatore elettrico integrato o pompa di calore

SE-W1C	Input	Output	Variabile regolata
Termostato	T accumulo	Segnale accensione o spegnimento resistenza elettrica o pompa di calore	Generazione di calore
	T setpoint		
Timer	Calendario utilizzo ACS		

Descrizione Controllo della temperatura di accumulo dell'acqua calda sanitaria (ACS autonoma) evitando ricariche anticipate tramite il blocco della ricarica in base all'orario.

SE-W1A	Input	Output	Variabile regolata
Sensori T accumulo multipli	T accumulo a diverse altezze	Segnale accensione o spegnimento resistenza elettrica o pompa di calore	Generazione di calore
Regolatore digitale			

Descrizione Controllo automatico on/off e rilascio del tempo di carica e gestione dell'accumulo multisensoriale (ACS autonomo). Il controllo della temperatura di accumulo dell'ACS evita così ricariche anticipate grazie al rilevamento multisensoriale della capacità termica residua dell'accumulatore.

A.2.2 Controllo della temperatura di accumulo usando generatore di calore

SE-W2C	Input	Output	Variabile regolata
Sensore T accumulo	T accumulo	Richiesta potenza erogata dal generatore	Carico richiesto al generatore
Timer	Calendario utilizzo ACS		

Descrizione Controllo della temperatura di accumulo dell'acqua calda sanitaria (ACS autonoma) evitando ricariche anticipate tramite il blocco della ricarica in base all'orario.

SE-W2A	Input	Output	Variabile regolata
Sensori T accumulo multipli	T accumulo a diverse profondità	Richiesta potenza erogata dal generatore	Carico richiesto al generatore
Regolatore digitale			

Descrizione Controllo della temperatura di accumulo dell'acqua calda sanitaria evitando ricariche anticipate tramite il blocco della ricarica in base all'ora e l'invio delle informazioni sulla domanda ai generatori di calore o il rilevamento multi-sensoriale della capacità termica residua del serbatoio tampone.

A.2.3 Controllo della temperatura nel serbatoio con collettori solari e generazione di calore esterna

SE-W3C	Input	Output	Variabile regolata
Sensori T accumulo	T accumulo parte alta		
	T accumulo parte bassa	Segnale accensione o spegnimento pompe generatore e collettore solare	Generazione di calore
Sensore T collettore solare	T mandata collettore solare		
Sensore T generatore	T mandata circuito primario		
Regolatore elettronico	Calendario utilizzo ACS		

Descrizione Controllo della temperatura di accumulo dell'acqua calda sanitaria privilegiando l'energia solare in combinazione con una ricarica supplementare automatica nel caso in cui l'energia solare non sia sufficiente.

Appendice A. Funzioni di controllo

SE-W3A	Input	Output	Variabile regolata
Sensori T accumulo	T accumulo parte alta T accumulo cetro T accumulo parte bassa	Segnale accensione o spegnimento pompe generatore e collettore solare	Generazione di calore
Sonde T utenze	T mandata utenza T ritorno utenza		
Sensore T collettore solare	T mandata collettore solare		
Sensore T generatore	T mandata circuito primario		
Regolatore elettronico	Calendario utilizzo ACS		

Descrizione Controllo della temperatura di accumulo dell'acqua calda sanitaria privilegiando l'energia solare in combinazione con una ricarica supplementare automatica nel caso in cui l'energia solare non sia sufficiente. Per ottenere prestazioni energetiche ottimali massimizzando la ricarica dell'energia solare e, nel caso in cui l'energia solare non sia disponibile, controllando il carico supplementare del buffer con altre generazioni di calore con perdite minime e massima efficienza dei generatori.

A.2.4 Controllo delle pompe ACS

SE-W4A	Input	Output	Variabile regolata
Termostato	T accumulo Setpoint	Segnale di accensione se T accumulo si discosta dal setpoint di un offset	on/off pompa
Timer	Calendario utilizzo ACS		

Descrizione Controllo della pompa di circolazione dell'acqua calda sanitaria tramite programma con interruttore orario. Ottener prestazioni energetiche ottimali evitando perdite di energia nelle tubazioni e consumi energetici superflui della circolazione

A.3 Controllo di ventilazione e condizionamento

A.3.1 Controllo mandata aria in ambiente

SE-V1B	Input	Output	Variabile regolata
Regolatore elettronico	Programma orario	Segnale di accensione ventilatori	on/off UTA
Descrizione	La mandata aria in ambiente è controllata dai ventilatori ed è impostata per il massimo carico. Un programma a orario fisso, predisposto nel regolatore elettronico, controlla l'accensione e lo spegnimento dei ventilatori.		

SE-V1B	Input	Output	Variabile regolata
Regolatore elettronico	Programma orario	Segnale di accensione ventilatori	on/off UTA
Sensore di presenza	Presenza occupanti		
Descrizione	La mandata aria in ambiente è controllata dai ventilatori ed è impostata per il massimo carico. Un programma a orario fisso, predisposto nel regolatore elettronico, controlla l'accensione e lo spegnimento dei ventilatori.		

A.3. Controllo di ventilazione e condizionamento

SE-V1A	Input	Output	Variabile regolata
Regolatore elettronico		Segnale di accensione ventilatori	on/off UTA
Sensore qualità dell'aria	Concentrazione CO ₂		

Descrizione
La mandata aria in ambiente è controllata dai ventilatori ed è impostata per il massimo carico. In funzione della qualità dell'aria (in termini di ppm di CO₂) rilevata da un sensore, il regolatore elettronico controlla l'accensione e lo spegnimento dei ventilatori di mandata e ripresa in modo da rinnovare l'aria ambiente.

A.3.2 Controllo della portata d'aria esterna

SE-V4B	Input	Output	Variabile regolata
Regolatore elettronico	Programma orario	Segnale di apertura delle serrande di aria esterna	Portata di aria di rinnovo
Sensore di presenza			

Descrizione
Attraverso un programma orario impostato all'interno del regolatore si agisce sui servomotori delle serrande di mandata, ripresa e ricircolo modulando la portata d'aria prelevata dall'esterno, che può essere alta o bassa.

SE-V1B	Input	Output	Variabile regolata
Regolatore elettronico	Programma orario	Segnale di apertura delle serrande di aria esterna	Portata di aria di rinnovo
Sensore di presenza	Presenza occupanti		

Descrizione
Il rilevatore di presenza valuta l'occupazione delle stanze comunicandolo al regolatore, il quale agisce sulle serrande di mandata, ripresa ed espulsione garantendo il ricambio del volume d'aria e le condizioni termoigrometriche desiderate all'interno degli ambienti.

SE-V4A	Input	Output	Variabile regolata
Regolatore elettronico		Segnale di apertura delle serrande di aria esterna	Portata di aria di rinnovo
Sensore qualità dell'aria	Concentrazione CO ₂		

Descrizione
Il rilevatore di presenza valuta il numero di persone all'interno dell'ambiente mentre il sensore di qualità dell'aria di ripresa misura il contenuto di CO₂. Questi dati vengono inviati al regolatore, il quale modula le serrande di mandata, ripresa ed espulsione in modo tale da garantire il ricambio d'aria, in linea con i massimi valori di CO₂ ammissibili.

Appendice B

Definizioni

ACS: Acqua Calda Sanitaria

API: Application Programming Interface

BACS: [20] "Building Automation and Control Systems (*Sistemi di automazione e controllo degli edifici*). Sistemi che comprendono tutti i prodotti, software e servizi tecnici indicati nella definizione di "BAC" (inclusi i dispositivi di bloccaggio) [EN ISO 16484-2:2004].

- Nel mercato i BACS sono indicati anche come BMS - Building Management System
- L'uso della parola "controllo" non implica che il sistema-dispositivo si dedichi solo a funzioni di controllo, è contemplata anche l'elaborazione di dati e informazioni.
- Quando un Sistema di controllo degli edifici, o un Sistema di gestione dell'edificio ("BMS"), o un Sistema di gestione dell'energia dell'edificio (BEMS) rispetta i requisiti della serie di norme EN ISO 16484, dovrebbe essere denominato "Sistema di automazione e controllo degli edifici" (BACS).
- I servizi per gli edifici si dividono in tecnici, infrastrutturali e finanziari e la gestione dell'energia fa parte della gestione tecnica dell'edificio.
- Il sistema di gestione dell'energia dell'edificio (BEMS) fa parte del BMS. Esso include raccolta dati, registro, allarmi, rapporti e analisi dell'uso dell'energia ecc. Tale sistema è progettato per ridurre il consumo di energia, migliorarne l'uso e prevedere le prestazioni dei sistemi tecnici degli edifici oltre che per ridurre i costi."

CS: Connessione seriale

EED: Energy Efficiency Directive

Appendice B. Definizioni

EPB: Energy Performance Buildings

EPBD: Energy Performance Buildings Directive

FBD: Functional Block Diagram

HDH: Heating Degree Hours

I/O: Input/Output

LPWAN: Low Power Wide Area Network

P&ID: Piping and Instrumentation Diagram

PLC: Programmable Logic Controller

TBM: [20] "*Technical Building Management: processi e servizi relativi alle operazioni e alla gestione degli edifici e dei sistemi tecnici dell'edificio attraverso l'interconnessione tra le diverse discipline.*"

References

- [1] M. Santamouris, E. Dascalaki, C. Balaras, A. Argiriou e A. Gaglia. «Energy performance and energy conservation in health care buildings in Hellas». In: *Energy conversion and management* 35.4 (1994), pp. 293–305 (cit. a p. 7).
- [2] L. Harvey. «L.D.D. Reducing energy use in the buildings sector: measures, costs, and examples. Energy Efficiency 2». In: *Cryogenics* 2 (2009), 139–163 (2009). URL: <https://doi.org/10.1007/s12053-009-9041-2> (cit. a p. 6).
- [3] J. García-Sanz-Calcedo. «Analysis on energy efficiency in healthcare buildings». In: *Journal of Healthcare Engineering* 5.3 (2014), pp. 361–374 (cit. alle pp. 6, 7).
- [4] M. Ippolito, E. R. Sanseverino e G. Zizzo. «Impact of building automation control systems and technical building management systems on the energy performance class of residential buildings: An Italian case study». In: *Energy and Buildings* 69 (2014), pp. 33–40 (cit. a p. 33).
- [5] M. Beccali, M. Bonomolo, M. Ippolito, V. L. Brano e G. Zizzo. «Experimental validation of the BAC factor method for lighting systems». In: *2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe)*. IEEE. 2017, pp. 1–5 (cit. a p. 33).

- [6] *Décret n° 2017-919 du 9 mai 2017 modifiant les articles R. 131-28-7 et R. 131-28-9 du code de la construction et de l'habitation.* 11 Mag. 2017. URL: <http://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000034639364>. (accessed: 16.10.2025) (cit. a p. 16).
- [7] A. González González, J. García-Sanz-Calcedo e D. Rodríguez Salgado. «Evaluation of energy consumption in German hospitals: Benchmarking in the public sector». In: *Energies* 11.9 (2018), p. 2279 (cit. a p. 7).
- [8] J. García-Sanz-Calcedo, M. Gómez-Chaparro e G. Sanchez-Barroso. «Electrical and thermal energy in private hospitals: Consumption indicators focused on healthcare activity». In: *Sustainable cities and society* 47 (2019), p. 101482 (cit. a p. 7).
- [9] *Guidelines for the transposition of the new Energy Performance Buildings Directive (EU) 2018/844 in Member States.* Lug. 2019. URL: https://www.eubac.org/wp-content/uploads/2021/03/eu.bac_guidelines_on_revised_EPBD_June_2019.pdf?utm_source=chatgpt.com (cit. a p. 6).
- [10] P. Waide. *The impact of the revision of the EPBD on energy savings from the use of building automation and controls.* 2019. URL: https://eubac.org/wp-content/uploads/2021/03/EPBD_impacts_from_building_automation_controls.pdf (cit. a p. 6).
- [11] L. Ghiringhelli. «BEMS IoT: Definizione, progettazione, implementazione e risultati di una applicazione su un grande sito industriale = BEMS IoT: design, set-up, implementation and results of the application to a large industrial site». Tesi di dott. Politecnico di Torino, 2020 (cit. alle pp. 39, 40, 49).
- [12] *In focus: Energy efficiency in buildings.* 2020. URL: https://commission.europa.eu/news-and-media/news/focus-energy-efficiency-buildings-2020-02-17_en. (accessed: 07.08.2025) (cit. a p. 5).

- [13] M. Bonomolo, G. Zizzo, S. Ferrari, M. Beccali e S. Guarino. «Empirical BAC factors method application to two real case studies in South Italy». In: *Energy* 236 (2021), p. 121498 (cit. a p. 33).
- [14] J. A. Engvang e M. Jradi. «Auditing and design evaluation of building automation and control systems based on eu. Bac system audit–Danish case study». In: *Energy and Built Environment* 2.1 (2021), pp. 34–44. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2020.06.002> (cit. a p. 30).
- [15] M. Z. Holger Schröder. *Energiesparfibel*. 2021. URL: https://klinikum-darmstadt.de/fileadmin/user_upload/user_upload/Energiesparfibel_webkorr.pdf (cit. a p. 8).
- [16] *Transition énergétique dans les établissements de soin : vers une mobilisation par les pairs?* 2021. URL: <https://www.labanquepostale.fr/hopitaux/actualite/transition-energetique-etablissements-sante.html?>. (accessed: 01.10.2025) (cit. alle pp. 6, 8).
- [17] *Décret n° 2021-1004 du 29 juillet 2021 relatif aux exigences de performance énergétique et environnementale des constructions de bâtiments en France métropolitaine.* 1 Gen. 2022. URL: <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000043877196>. (accessed: 16.10.2025) (cit. a p. 16).
- [18] *International Performance Measurement and Verification Protocol - Core concepts (IPMVP)*. Mar. 2022. URL: <https://evo-world.org/en/products-services-mainmenu-en/protocols/ipmvp> (cit. a p. 58).
- [19] L. Van Thillo, S. Verbeke e A. Audenaert. «The potential of building automation and control systems to lower the energy demand in residential buildings: A review of their performance and influencing parameters». In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 158 (2022), p. 112099 (cit. a p. 33).

- [20] *EPB Center*. 2023. URL: https://cloud.go.se.com/_/IT_202305_MKTG-W20-SP-UNI-EN-ISO-52120-1-D.LP.3487951. (accessed: 22.08.2025) (cit. alle pp. 29, 32–37, 97, 98).
- [21] J. Kajewska-Szkudlarek. «Predictive modelling of heating and cooling degree hour indexes for residential buildings based on outdoor air temperature variability». In: *Scientific Reports* 13.1 (2023), p. 17411 (cit. a p. 57).
- [22] A. Marino, P. Pariso e M. Picariello. «Energy use and end-use technologies: Organizational and energy analysis in Italian hospitals». In: *International Journal of Energy Economics and Policy* 13.3 (2023), pp. 36–45 (cit. a p. 7).
- [23] L. Vandenbogaerde, S. Verbeke e A. Audenaert. «Optimizing building energy consumption in office buildings: A review of building automation and control systems and factors influencing energy savings». In: *Journal of Building Engineering* 76 (2023), p. 107233 (cit. a p. 33).
- [24] *Décret BACS*. Mag. 2024. URL: <https://rt-re-batiment.developpement-durable.gouv.fr/decret-bacs-r406.html> (cit. a p. 16).
- [25] *Diagnostic de performance énergétique - DPE*. 20 Set. 2024. URL: <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/diagnostic-performance-energetique-dpe>. (accessed: 16.10.2025) (cit. a p. 16).
- [26] *Direttiva (UE) 2024/1275 del Parlamento Europeo e del Consiglio del 24 aprile 2024 sulla prestazione energetica nell'edilizia (rifusione)*. 2024. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32024L1275> (cit. a p. 14).
- [27] O. de l'Immobilier Durable. «EU taxonomy Top15% and Top30%». In: *Ressources et Outils pour l'immobilier responsable* (2024). URL: <https://www.taloen.fr/esrei/84516f75-b919-4821-99b2-7930af0efcfb> (cit. a p. 8).

- [28] *Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden*. 20 Set. 2024. URL: <https://www.gesetze-im-internet.de/geg/>. (accessed: 16.10.2025) (cit. a p. 16).
 - [29] V. P. Roméo Juge. «2024 Energy performance barometer for buildings». In: *Ressources et Outils pour l'immobilier responsable* (2024). URL: <https://www.taloen.fr/esrei/6c38cac4-eecf-4e17-bc30-890b12b7393c> (cit. alle pp. 8, 9).
 - [30] *Code de la construction et de l'habitation*. 15 Ago. 2025. URL: https://www.legifrance.gouv.fr/codes/texte_lc/LEGITEXT000006074096/. (accessed: 16.10.2025) (cit. a p. 15).
 - [31] *LOI n° 2021-1104 du 22 août 2021 portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets (1)*. 5 Mag. 2025. URL: <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000043956924/>. (accessed: 16.10.2025) (cit. a p. 16).
 - [32] D. B. Stephenson e A. Garrett. «The 1.5° C global mean warming target: A climate change explainer». In: *Significance* 22.2 (2025), pp. 36–38 (cit. a p. 6).
 - [33] *Azienda Coster Group*. URL: <https://www.costergroup.eu/>. (accessed: 30.10.2025) (cit. a p. 42).
 - [34] *Energy efficiency*. n.d. URL: <https://www.siemens.com/global/en/products/buildings/energy-sustainability/energy-efficiency.html>. (accessed: 07.08.2025) (cit. a p. 30).
 - [35] *EU868 Sensore di impulsi LoRaWAN per contatori di gas - Certificato ATEX*. URL: <https://enless-wireless.com/it/prodotti/sensore-contatore-impulsi-atex-certificato-gas-lora/>. (accessed: 10.09.2025) (cit. a p. 44).

- [36] *Final energy consumption in services - detailed statistics*. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Final_energy_consumption_in_services--detailed_statistics. (accessed: 20.08.2025) (cit. a p. 6).
- [37] *Historique météo : archives météo pour le monde entier*. URL: <https://www.historique-meteo.net/>. (accessed: 10.09.2025) (cit. a p. 60).
- [38] *Schneider Electric, Guide UNI EN ISO 52120-1*. URL: <https://epb.center/support/documents/?title=&group=2>. (accessed: 22.08.2025) (cit. alle pp. 29, 52).
- [39] *Statistiche sull'energia - una panoramica*. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_statistics_-_an_overview&action=statexp-seat&lang=it. (accessed: 15.09.2025) (cit. a p. 7).

