

# POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Energetica

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica e Nucleare



Tesi di Laurea Magistrale

## ***Monitoraggio e supervisione dell'impianto a pompa di calore a servizio di un edificio storico***

*Relatore:*

Prof. Marco Carlo Masoero

*Correlatore:*

Ing. Alberto Castello

*Candidato:*

Montesano Felice

Luglio 2018

*Alla mia famiglia*



# Indice

<b>Introduzione .....</b>	<b>1</b>
<b>Capitolo 1-Building Automation .....</b>	<b>2</b>
1.1 <i>EN 15232: Impatto dell'automazione sulle prestazioni energetiche degli edifici .....</i>	3
1.1.1 Il metodo semplificato.....	7
1.1.2 Struttura di un sistema di automazione edifici.....	8
1.2 <i>Protocolli standard della building automation .....</i>	10
1.2.1 Modbus.....	11
1.2.2 KNX .....	12
1.2.3 BACnet .....	14
1.2.4 M-bus.....	17
<b>Capitolo 2-L'impianto di Maison Lostan .....</b>	<b>19</b>
2.1 <i>Il progetto GRETA.....</i>	20
2.1.1 Sistemi a pompa di calore geotermica .....	21
2.2 <i>Architettura dell'impianto meccanico .....</i>	23
2.2.1 Impianto geotermico.....	23
2.2.2 Centrale termofrigida.....	26
2.2.3 Sottocentrali .....	30
2.2.4 Terminali .....	31
2.3 <i>Sistema BMS Siemens.....</i>	34
2.3.1 Management level: Designo CC .....	35
2.3.2 Automation level.....	38
2.3.3 Field level .....	40
2.3.4 Modbus RS-485 .....	48
<b>Capitolo 3 - Controllo e regolazione dell'impianto di Maison Lostan .....</b>	<b>52</b>
3.1 <i>CFC Editor.....</i>	52
3.2 <i>Descrizione della logica di regolazione.....</i>	53
3.2.1 Pannelli radianti a pavimento .....	53
3.2.2 Regolazione UTA Archivi.....	56
3.2.3 Regolazione UTA Nord e Sud .....	58
3.2.4 Regolazione circuito radiatori Archivi .....	60
3.2.5 Regolazione circuito radiatori sottocentrali Nord e Sud .....	60
3.2.6 Regolazione ventilconvettori .....	60
3.2.7 Regolazione centrale termofrigida .....	61
3.2.8 Regolazione pompe geotermiche .....	62
<b>Capitolo 4 - Osservazioni sperimentali e sviluppi futuri.....</b>	<b>63</b>
4.1 <i>COP centrale termofrigida generazione .....</i>	63
4.2 <i>Rilevamento anomalie.....</i>	64
4.3 <i>Migliorie della logica di regolazione.....</i>	65
4.3.1 Pompe.....	65
4.3.2 Regolatori ambiente.....	68
4.3.3 Nigth Purging .....	69
4.4 <i>Sviluppi futuri .....</i>	69

4.4.1 Fancoil.....	69
4.4.2 UTA Sottocentrali Nord e Sud.....	69
4.4.3 UTA Archivi .....	70
4.4.4 Controllo della deumidificazione basato sui valori di umidità assoluta .....	71
4.4.5 Recupero di calore dalle pompe di calore.....	75
<b>Conclusioni .....</b>	<b>77</b>
<b>Riferimenti.....</b>	<b>78</b>

## Indice delle figure

Figura 1 Consumo energetico finale Italia 2015 .....	2
Figura 2 Disaggregazione dei consumi finali in ambito residenziale in Italia 2015 .....	2
Figura 3 Classi di efficienza secondo la UNI 15232 .....	4
Figura 4 Modello richiesta/apporto di energia .....	5
Figura 5 Lista funzioni e classi di efficienza energetica per un sistema di ventilazione .....	6
Figura 6 Modello di struttura di un sistema di building automation .....	9
Figura 7 Protocolli di comunicazione standard più diffusi e relativo livello di applicazione .....	11
Figura 8 Struttura sistema KNX.....	13
Figura 9 Struttura BACnet .....	15
Figura 10 Utilizzo di BACnet Routers per collegare diverse reti BACnet.....	15
Figura 11 Utilizzo di gateway BACnet .....	16
Figura 12 Riassunto del protocollo BACnet .....	16
Figura 13 Architettura sistema M-bus.....	18
Figura 14 Planimetria d'insieme di Maison Lostan e dell'antistante piazza Caveri: foro romano (nero), corpo principale (rosso), corte interna (verde), corpo secondario (blu).....	19
Figura 15 Schema funzionale a blocchi.....	24
Figura 16 Estratto dello schema funzionale.....	25
Figura 17 Scambiatori a piastre installati presso Maison Lostan .....	25
Figura 18 Pompe di calore installate presso Maison Lostan.....	26
Figura 19 Inversione del ciclo di lavoro di una pompa di calore reversibile .....	26
Figura 20 Prestazioni in riscaldamento-Applicazione acqua di falda .....	28
Figura 21 Prestazioni in raffreddamento-Applicazione acqua di falda .....	28
Figura 22 A sinistra: serbatoio di accumulo freddo con in alto a destra il ritorno dal collettore delle utenze e in basso i due ritorni verso le pompe di calore. A destra: serbatoio di accumulo caldo con in basso a sinistra l'ingresso per l'acqua di ritorno dalle utenze. In alto a destra le uscite verso la pompa di calore 1, la pompa di calore 2 e il circuito comune di recupero. ....	29
Figura 23 Valvole a 3 vie con servomotore elettrico per la commutazione dei circuiti provenienti dalle pompe di calore .....	30
Figura 24 Collettore caldo e pompaggi primari .....	30
Figura 25 Schema funzionale sottocentrale Nord/Sud .....	33
Figura 26 Schema UTA Archivi.....	34
Figura 27 Schema UTA Nord/Sud .....	34
Figura 28 PXM20 .....	35
Figura 29 Struttura BMS Maison Lostan (AS04).....	36
Figura 30 Interfaccia utente Desigo CC.....	37

Figura 31 Moduli TXI2.OPEN per l'integrazione delle pompe di calore e delle pompe di circolazione via Modbus.....	39
Figura 32 PXC001.E-D: concentratore KNX. In alto a destra è visibile il collegamento BACnet su rete dati....	40
Figura 33 Collegamento fancoil tramite KNX.....	40
Figura 34 Collegamento tra pompa di calore e automation station senza Modbus .....	46
Figura 35 Collegamento tra pompa di calore e automation station tramite Modbus .....	47
Figura 36 Comunicazione Master-slave su Modbus RS485 .....	48
Figura 37 Composizione di un CFC Chart .....	53
Figura 38 Valori della richiesta di caldo o freddo in funzione della temperatura ambiente .....	54
Figura 39 Curva climatica temperatura mandata pannelli radianti .....	54
Figura 40 Variazione della curva climatica nel tempo al persistere della richiesta massima .....	55
Figure 41 A sinistra: controllore proporzionale. A destra: controllore integrale .....	57
Figura 42 Controllore PI.....	57
Figura 43 Curva climatica temperatura di mandata batterie calde UTA Archivi.....	58
Figura 44 Curva climatica temperatura di mandata UTA Nord e Sud .....	59
Figura 45 Curva climatica temperatura mandata circuito radiatori.....	60
Figure 46 Limiti di funzionamento delle pompe di calore. A sinistra: modalità riscaldamento. A destra: modalità raffreddamento. Twu=Temperatura acqua in uscita lato utilizzo [°C]; Tws=Temperatura acqua in uscita lato sorgente. I limiti sono riferiti a $\Delta T=5^{\circ}\text{C}$ sia lato sorgente che lato utilizzo. ....	62
Figura 47 Diagramma Sankey .....	64
Figura 48 Temperature degli accumuli dal 17-05-18 al 31-05-18 .....	65
Figura 49 Variazione della portata volumetrica di aria di rinnovo in funzione della concentrazione di CO2 in ripresa .....	70
Figura 50 Relazione tra temperatura ambiente e temperatura esterna. ....	72
Figura 51 Carpet plot. Le celle gialle rappresentano le ore in cui la deumidificazione è possibile sfruttando l'aria esterna.....	72
Figura 52 Diagramma psicrometrico. E=aria esterna. R=ripresa. P=dopo il recuperatore. M=mandata. ....	74
Figura 53 Scambiatore a piastre 6 luglio 2018.....	75
Figura 54 Potenza termica recuperabile in funzione della temperatura di condensazione e della temperatura di uscita dell'acqua dal recupero. ....	76

## Indice delle tabelle

Tabella 1 Effetto classe BACS su sistema di riscaldamento/raffreddamento per un edificio di tipo uffici.....	8
Tabella 2 Architettura BACnet.....	15
Tabella 3 Suddivisione delle funzioni.....	20
Tabella 4 Automation station installate presso Maison Lostan .....	38
Tabella 5 Elenco elementi field level suddivisi per automation station.....	40
Tabella 6 Elenco variabili gestite tramite Modbus-multimetro bticino .....	44
Tabella 7 Elenco variabili gestite tramite Modbus-Pompe di calore Clivet.....	45
Tabella 8 Elenco punti da gestire in un'installazione classica di una pompa di calore .....	45
Tabella 9 Punti necessari a gestire una pompa di calore in un'installazione classica.....	46
Tabella 10 Alcuni tra i punti aggiuntivi acquisibili tramite Modbus rispetto alla soluzione classica. ....	47
Tabella 11 Input Resister di una pompa di circolazione Wilo .....	51
Tabella 12 Holding Register di una pompa di circolazione Wilo .....	51
Tabella 13 Assorbimenti elettrici centrale termofrigo generazione. ....	63
Tabella 14 Ottimizzazione della gestione delle pompe. ....	65

# Introduzione

---

In Italia il consumo energetico dovuto agli immobili è superiore sia a quello dovuto ai trasporti che alle attività industriali. Gli impianti sono affetti da gravi inefficienze che spesso derivano da una cattiva gestione degli stessi.

Negli ultimi anni sempre più rilievo stanno assumendo i sistemi di gestione dell'edificio BMS tanto da spingere l'Unione Europea ad emanare direttive e norme a riguardo. La necessità di creare sistemi versatili, ampliabili nel tempo e costruttivamente semplici ha portato le aziende del settore a stipulare un insieme di regole di carattere elettronico da adottare come standard.

Nel primo capitolo di questo elaborato viene presentata la norma EN 15232, che tramite un metodo semplificato permette di valutare in poche mosse l'incidenza di un BMS sul consumo energetico di un edificio, e i protocolli di comunicazione standard più diffusi nella building automation.

Nel secondo capitolo viene descritto l'impianto di Maison Lostan, un edificio storico situato ad Aosta. Esso è al centro del progetto di ricerca GRETA che punta a migliorare la conoscenza del potenziale geotermico delle regioni alpine e mira a incrementarne lo sviluppo. È stato annoverato nell'elenco degli esempi di Best Practices sia per l'impianto geotermico a circuito aperto che per il sistema di gestione basato su un uso massiccio di protocolli standard e sulla versione più aggiornata del software Desigo prodotto da Siemens. Il cuore dell'impianto di generazione è rappresentato dalle due pompe di calore reversibili Clivet le quali sono state accoppiate con sistemi ad acqua a bassa entalpia, nello specifico pannelli radianti che garantiscono elevati livelli di comfort.

Il terzo capitolo è incentrato sulla logica di regolazione implementata sulle dieci automation station presenti nell'edificio. La gestione della generazione e della distribuzione del fluido tecnico è basata sull'effettiva richiesta da parte degli ambienti come previsto dal modello EN 15232.

In ultimo vengono presentate le considerazioni basate sull'analisi dei dati raccolti dalla postazione centrale che sono risultate utili in fase di commissioning. Vengono inoltre avanzate delle proposte di miglioramenti futuri per ridurre i consumi energetici.

# Capitolo 1-Building Automation

Da un rapporto dell'Eurostat [1] basato su dati del 2015 emerge che nell'Unione Europea circa il 40% dei consumi finali è imputabile agli immobili. Un analogo documento ENEA, focalizzato sulla condizione italiana, riporta che nel periodo 1995-2005 il settore residenziale è stato caratterizzato da una crescita nei consumi pari al 23,4% [2].

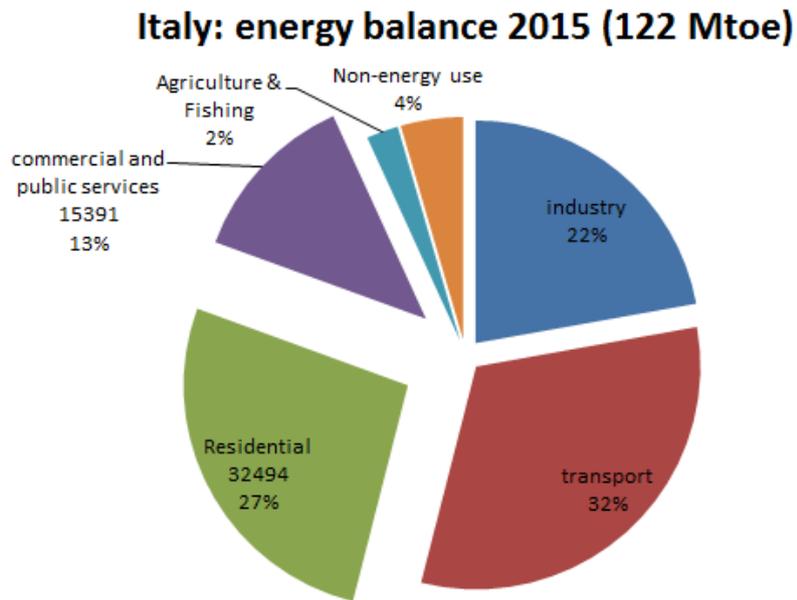


Figura 1 Consumo energetico finale Italia 2015

## Residential use

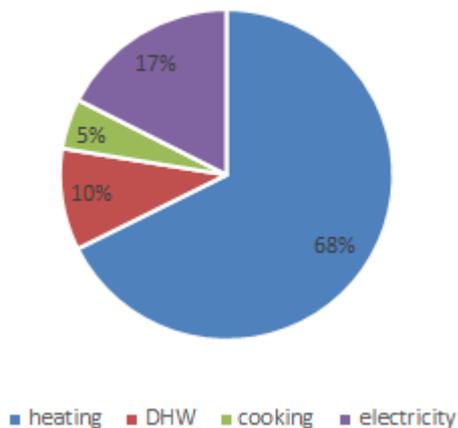


Figura 2 Disaggregazione dei consumi finali in ambito residenziale in Italia 2015

Sulla base di trend di questo di tipo l'Unione Europea ha emanato nel 2002 la direttiva 2002/91/EC sul rendimento energetico nell'edilizia (meglio conosciuta come "EPBD" - Energy

Performance of Buildings Directive), aggiornata nel 2010 con la direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell'edilizia che definisce 4 punti principali:

- L'indicatore di prestazione energetica deve essere presente già nell'offerta economica;
- Tutti i nuovi edifici a partire dal 2020 dovranno essere a bassissimo consumo;
- È obbligatorio un sistema di verifica dei certificati energetici;
- I requisiti di prestazione energetica sono obbligatori anche per gli impianti.

Alle linee guida delle direttive fa seguito la norma EN15232 "Incidenza dell'automazione, della regolazione e della gestione tecnica degli edifici", che permette di valutare l'effetto dell'automazione e della gestione tecnica sui consumi energetici delle strutture edilizie.

Questa norma sposta l'attenzione dall'efficienza dei singoli sistemi energetici presenti in uno stabile all'efficienza del sistema visto nel complesso: è essenziale automatizzare l'interazione e il controllo delle utenze al fine di raggiungere il minimo consumo energetico finale.

Con il D.M. 26/06/2015 – "Criteri generali e requisiti delle prestazioni energetiche degli edifici", applicazione della normativa europea a livello nazionale, diventa un obbligo la costruzione degli impianti secondo i criteri della UNI EN15232. Nello specifico, a partire da ottobre 2015, è necessario dotare nuovi fabbricati di sistemi di automazione corrispondenti a classe minima B.

### **1.1 EN 15232: Impatto dell'automazione sulle prestazioni energetiche degli edifici**

Le prestazioni energetiche di un edificio vengono calcolate basandosi sulle norme della famiglia UNI/TS 11300, che però considerano solo alcuni effetti di un sistema BAC Building Automation Control, come la riduzione dei tempi di funzionamento o i funzionamenti in regime attenuato degli impianti.

La EN 15232 intende riempire questo vuoto con la finalità di "Fornire una serie di standard per il calcolo dell'efficienza energetica dei sistemi tecnici degli edifici (riscaldamento, raffrescamento, ventilazione e illuminazione) tenendo in conto la riduzione dei consumi dovuta all'introduzione di sistemi BAC e TBM Technical Building Management" e "specificare metodi e convenzioni per la stima dei fattori di risparmio energetico derivanti dai sistemi di automazione e dalla gestione tecnica degli edifici".

La norma è rivolta a due categorie di soggetti. La prima di esse include i personaggi coinvolti nella decisione delle misure da implementare e nella loro valutazione in termini di risparmio

energetico. Il primo compito può essere svolto da architetti, ingegneri o direttamente dai proprietari degli edifici, mentre il secondo è affidato ai progettisti. La seconda categoria riguarda le autorità pubbliche a cui è affidato il compito di definire il metodo di calcolo, i requisiti minimi da rispettare e le procedure di ispezione dei sistemi tecnici. In aggiunta, la norma è rivolta ai costruttori e agli installatori poiché il nuovo standard è anche una guida per strutturare offerte, semplificando la definizione delle specifiche tecniche e rendendo quindi più semplice la comparazione economica.

Sono state definite 4 classi di efficienza energetica per caratterizzare i sistemi BAC, contrassegnate da lettere da D ad A (Figura 3).

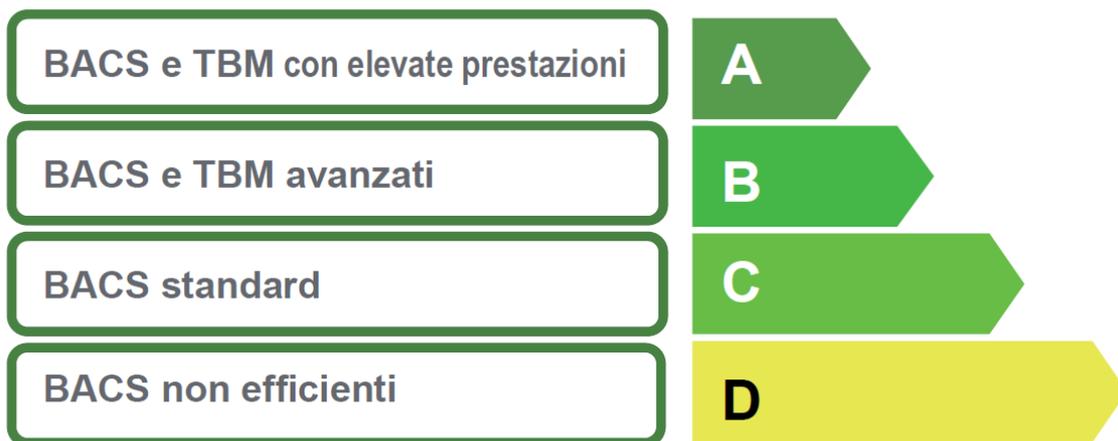


Figura 3 Classi di efficienza secondo la UNI 15232

La classe C è lo standard tecnologico di partenza, tuttavia per gli edifici esistenti il livello medio appartiene alla classe D.

La classe A, definita “high energy performance”, può essere conseguita tramite sistemi BAC e TBM in grado di integrare i vari servizi dell’edificio (illuminazione, shading ecc.) con le funzioni HVAC: i dispositivi presenti negli ambienti devono gestire gli impianti basandosi su parametri come l’occupazione dell’ambiente e/o la qualità dell’aria.

Occorre notare che tutte le funzioni implementate devono essere di classe D, C, B o A affinché il sistema di automazione possa conseguire rispettivamente la classe D, C, B o A. Ovviamente anche implementazioni parziali permettono di raggiungere risparmi d’energia.

Le azioni del sistema di automazione devono avvenire nel verso del segnale di richiesta dell’energia (Figura 4). Dagli ambienti partono le richieste e sulla base di esse devono essere gestite le funzioni di distribuzione e generazione in modo da contenere le rispettive perdite.

Questo criterio ricalca la tradizionale successione degli step di progettazione degli impianti tecnici di edificio.

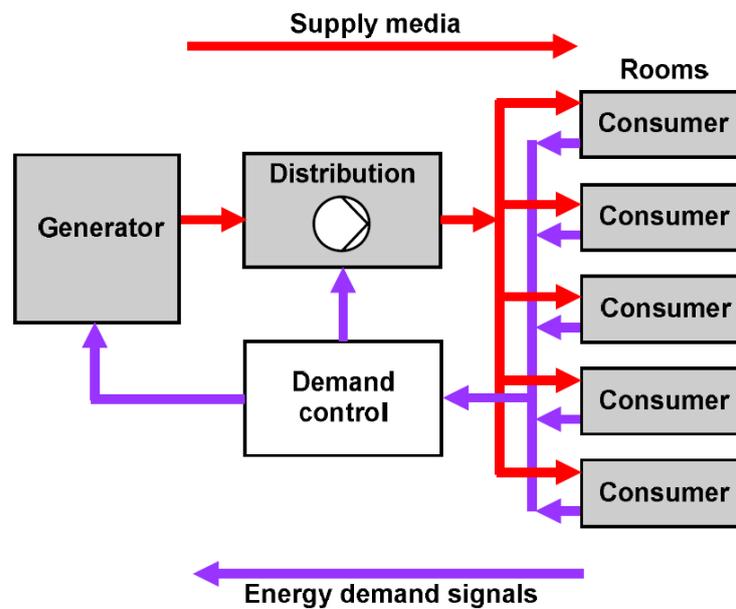


Figura 4 Modello richiesta/apporto di energia

La norma UNI EN 15232 definisce una lista strutturata delle funzioni di regolazione e automazione BAC e gestione tecnica degli edifici TBM che hanno un'incidenza sulla prestazione energetica degli stessi.

Le funzioni prese in considerazione sono:

- Riscaldamento
- Raffrescamento
- Ventilazione e Condizionamento
- Produzione acqua calda sanitaria ACS
- Illuminazione
- Controllo delle schermature solari
- Gestione centralizzata dell'edificio (TBM)

Le tabelle riassuntive distinguono tra “edifici residenziali” e “edifici non-residenziali”.

A titolo di esempio esaminiamo la scheda per le funzioni di controllo automatico della ventilazione (Figura 5). Ad ogni funzione di controllo sono associati diversi livelli prestazionali, identificati con un numero. Per ogni classe sono indicati in grigio i livelli minimi prestazionali che devono essere garantiti per ogni funzione di automazione. L'elenco delle funzioni procede nel

verso del segnale di richiesta dell'energia, partendo dall'analisi dell'ambiente e procedendo verso la rete di distribuzione e successivamente di generazione.

<b>CONTROLLO AUTOMATICO</b>			Definizione delle Classi								
Codice di funzione	Rif. EN15232		Residenziale				Non Residenziale				
			D	C	B	A	D	C	B	A	
			<b>Controllo della ventilazione e del condizionamento</b>								
<b>Controllo mandata aria in ambiente</b>											
	0	Nessun controllo									
SE54BC	1	Controllo a tempo									
SE55AB	2	Controllo a presenza									
SE56A	3	Controllo a richiesta									
<b>Controllo mandata aria nell'unità trattamento aria</b>											
	0	Nessun controllo									
SE57C	1	Controllo On/Off a tempo									
	2	Controllo automatico multi-stadio									
SE58A	3	Controllo automatico di portata o prevalenza									
<b>Controllo sbrinamento scambiatore di calore</b>											
	0	Senza controllo di sbrinamento									
SE59A	1	Con controllo di sbrinamento									
<b>Controllo surriscaldamento scambiatore di calore</b>											
	0	Senza controllo di surriscaldamento									
SE60A	1	Con controllo di surriscaldamento									
<b>Raffrescamento meccanico gratuito</b>											
	0	Nessun controllo									
SE61C	1	Raffrescamento notturno									
SE62A	2	Raffrescamento gratuito									
SE63A	3	Controllo entalpico									
<b>Controllo della temperatura di mandata</b>											
	0	Nessun controllo automatico									
SE64C	1	Set point costante									
SE65B	2	Set point variabile con compensazione in funzione della temperatura esterna									
SE66A	3	Set point variabile con compensazione in funzione del carico									
<b>Controllo Umidità</b>											
	0	Nessun controllo automatico									
SE67C	1	Controllo del punto di rugiada									
SE68A	2	Controllo dell'umidità									

Figura 5 Lista funzioni e classi di efficienza energetica per un sistema di ventilazione

Le tabelle tecnologiche per come sono strutturate rappresentano uno strumento molto utile sia per i progettisti che per le autorità pubbliche.

Per quanto riguarda il calcolo dell'impatto della building automation sui consumi dell'edificio, la norma espone due metodi detti rispettivamente metodo dettagliato e metodo semplificato, meglio noto come "metodo dei fattori BACS". Il primo di essi richiede una conoscenza approfondita del sistema, ma fornisce risultati accurati. È quindi da utilizzare quando è necessaria un'esatta quantificazione del risparmio (non solo energetico ma anche economico) a spese di una procedura di calcolo alquanto elaborata. In questo caso la EN 15232 rimanda alla norma di

riferimento per ogni tipo di impianto preso in considerazione (illuminazione, ventilazione, acqua calda sanitaria...).

### 1.1.1 Il metodo semplificato

Il metodo dei fattori BACS è stato concepito con l'intento di ottenere uno strumento di calcolo semplice e rapido che consenta di determinare il risparmio di energia derivante dall'implementazione di una determinata classe BACS sia in termini percentuali che, nel caso in cui si conoscano i consumi energetici relativi alla classe di partenza, assoluti.

Questa procedura è particolarmente indicata durante le prime fasi progettuali poiché non sono necessarie informazioni riguardo alle particolari funzioni di automazione, ma consente di stimare indicatori fondamentali quali il pay-back time di un sistema di automazione e la riduzione degli indici di prestazione energetica EP [kWh/m<sup>2</sup>anno o kWh/m<sup>3</sup>anno] per effetto della sua implementazione.

Il parametro fondamentale è il *fattore BAC*:

$$BAC\ factor = \frac{richiesta\ energetica\ BAC_{classe\ pianificata}}{richiesta\ energetica\ BAC_{classe\ C}}$$

Dalla formula precedente appare chiaro che la classe C è assunta come classe di riferimento.

Questi fattori vengono presentati dalla norma sotto forma tabellare e sono stati ottenuti mediante simulazioni dinamiche effettuate con il software TRNSYS su differenti tipi di edifici.

Degli edifici di riferimento vengono specificate le dimensioni (e quindi le superfici), i valori delle trasmittanze termiche, i profili di occupazione e i rapporti endogeni dovuti a persone e apparecchi.

La classe BACS sintetizza in un unico indice il livello di accuratezza e qualità del controllo che si ripercuote su:

- Setpoint di riscaldamento e raffrescamento;
- Tempo di funzionamento degli impianti;
- Gestione dei ricambi d'aria;
- Valore soglia di irradiazione per il controllo delle schermature;
- Tempo di funzionamento dell'impianto acqua calda sanitaria;
- Temperatura dell'accumulo dell'acqua calda sanitaria.

Per un edificio di tipo “uffici” la classe BACS influirà sul sistema di riscaldamento e raffreddamento come illustrato dalla Tabella 1:

*Tabella 1 Effetto classe BACS su sistema di riscaldamento/raffreddamento per un edificio di tipo uffici*

<b>Classe BACS</b>	<b>Effetti sul sistema di riscaldamento/raffrescamento</b>
D	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stesso setpoint di temperatura per riscaldamento e raffrescamento (nessuna banda neutra)</li> <li>• Impianto funzionante 24h/giorno</li> </ul>
C	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Differenza di 1°C fra il set point di temperatura di riscaldamento e di raffrescamento (banda a energia zero)</li> <li>• L’impianto HVAC funziona da 2 ore prima dell’ora prevista di occupazione e fino a 3 ore dopo che l’occupazione è terminata</li> </ul>
B	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Un sistema di gestione permette una banda neutra più ampia di quella in classe C</li> <li>• Tempi di accensione e spegnimento ottimizzati</li> </ul>
A	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Setpoint di raffrescamento adattivi e/o e ventilazione su richiesta (con sensori di presenza)</li> </ul>

Una volta reperito dalle tabelle fornite dalla UNI 15232 il fattore BAC di nostro interesse, si può giungere al risparmio in termini assoluti tramite la seguente formula:

$$\text{Risparmio en.} = 100 * \text{Consumo en. } BAC_{\text{classe C}} * (1 - \text{fattore } BAC_{\text{classe pianificata}})$$

### **1.1.2 Struttura di un sistema di automazione edifici**

Un sistema di automazione edifici è strutturato in maniera gerarchica (Figura 6). Possono essere individuati i seguenti 3 livelli:

- Management level
- Automation level
- Field level

Lo scambio di informazioni può avvenire sia in maniera verticale tra i vari livelli che in maniera orizzontale tra componenti appartenenti a uno stesso livello.

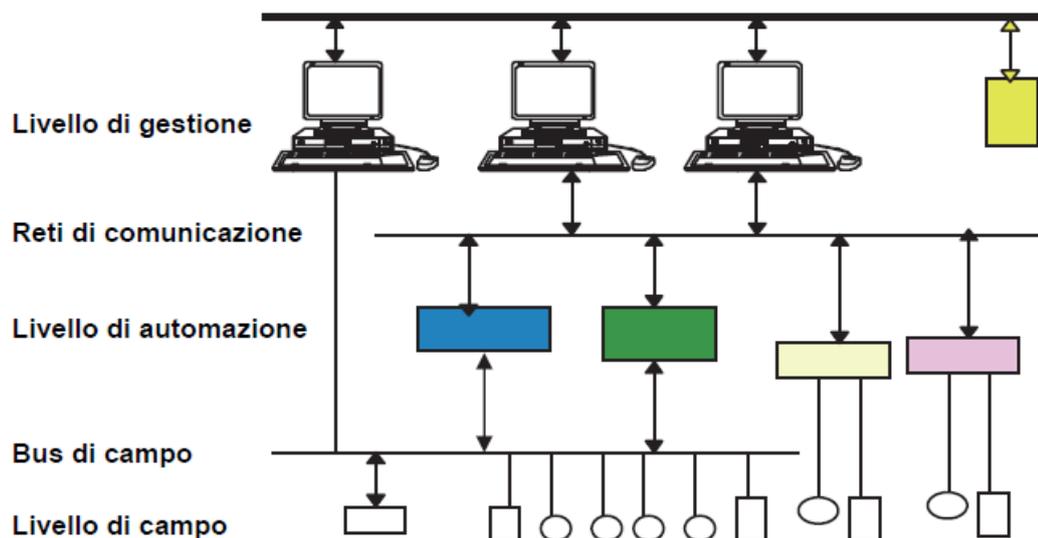


Figura 6 Modello di struttura di un sistema di building automation

Fanno parte del Management level i componenti predisposti per l'interfaccia con l'operatore anche detti HMI Human Machine Interface: possono essere semplici pannelli operatori, interfacce web server o più sofisticati software installati su uno o più computer. In assenza di questo livello il sistema funziona ugualmente ma non può essere gestito. La sua finalità è monitorare e controllare i sistemi e i livelli subordinati svolgendo le seguenti funzioni:

- Impostazione degli orari di funzionamento e dei parametri necessari per la gestione degli impianti, come valori desiderati delle principali grandezze controllate (temperatura, umidità, qualità dell'aria) per garantire il benessere ambientale;
- Sorveglianza e monitoraggio delle diverse installazioni tecniche presenti nell'edificio (unità trattamento aria, centrali di produzione caldo e freddo, sottocentrali di pompaggio e distribuzione...);
- Ottimizzazioni dei consumi energetici;
- Accumulo di dati per successive elaborazioni o trasmissioni a terze parti;
- Analisi e visualizzazione dei dati misurati;
- Registrazione dei guasti e degli allarmi.

Il livello di automazione è formato dai vari controllori, ognuno dei quali supervisiona una parte dell'impianto e lavora in maniera pressoché autonoma. Le stazioni di automazione sono interconnesse per consentire lo scambio di dati e raggiungere l'ottimizzazione delle funzioni su questo livello. Generalmente i controllori sono dislocati nelle varie parti dell'impianto e installati all'interno dei quadri elettrici.

Per soluzioni standard l'hardware è costituito da elementi compatti, mentre per creare soluzioni impiantistiche personalizzate il controllore può essere esteso con specifici moduli di input/output. I moduli di input/output costituiscono l'interfaccia di comunicazione tra le automation station e gli elementi di campo.

I segnali digitali possono essere immediatamente processati, mentre quelli analogici (tensioni, correnti o resistenze elettriche) necessitano di essere convertiti in segnali digitali da convertitori A/D affinché l'automation station possa elaborarli. Il percorso inverso avviene per valori trasmessi dall'automation station al campo.

Infine, il livello di campo è formato dai sensori che registrano le condizioni operative attuali, le quali possono essere modificate tramite attuatori. A questo livello appartengono le valvole, i misuratori di portata volumetrica, temperatura, pressione, umidità e qualità dell'aria, i motori e gli interruttori.

## **1.2 Protocolli standard della building automation**

Nei primi periodi di diffusione commerciale, il mercato della building automation era caratterizzato da costruttori che proponevano gamme di prodotti che utilizzavano esclusivamente protocolli di comunicazione proprietari. Tuttavia, era spesso necessario ricorrere a prodotti di marchio diverso sia per questioni economiche sia perché raramente un singolo costruttore riusciva a coprire la totalità delle esigenze del cliente finale.

Per far comunicare due o più sistemi di differenti costruttori bisognava ricorrere a elementi hardware detti *gateway* i quali svolgevano la funzione di traduttore da un protocollo all'altro. Questo comportava un grosso sforzo, sia dal punto di vista economico che temporale, per lo sviluppo ed il test dei gateway/driver realizzati. Risultò subito chiaro il vantaggio legato all'utilizzo di protocolli di comunicazione standard che semplificavano il lavoro sia degli installatori che degli integratori di sistema, riducendo inoltre i costi per il cliente finale.

Attualmente esistono sul mercato molteplici protocolli di comunicazione che vengono selezionati in base alla dimensione del sistema (tenendo conto anche di sviluppi futuri), alla velocità di trasmissione richiesta e alla sicurezza della comunicazione. Determinante nella scelta del protocollo è garantire che nessun livello si sovraccarichi per evitare tempi di elaborazione e reazioni eccessivi.

In Figura 7 sono riportati i protocolli standard più diffusi, alcuni dei quali verranno descritti nei prossimi paragrafi.

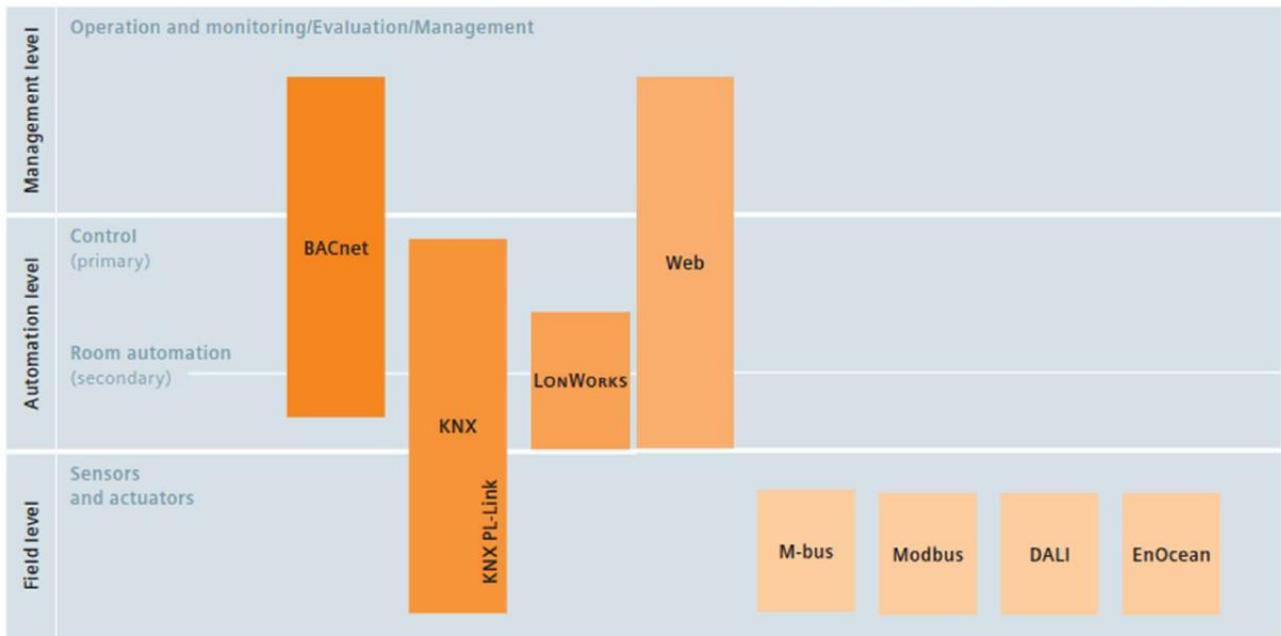


Figura 7 Protocolli di comunicazione standard più diffusi e relativo livello di applicazione

### 1.2.1 Modbus

È sicuramente tra i protocolli più diffusi sul mercato non solo per quanto riguarda la building automation ma per l'automazione in generale.

La sua nascita risale al 1979 ad opera di Modicon (oggi Schneider Electric) e anche se la tecnica di trasmissione lo penalizza a livello di performance rispetto agli altri standard, ha dalla sua parte vantaggi come la semplicità d'installazione, l'estesa disponibilità sul mercato di apparecchiature di campo che lo utilizzano e il fatto di essere un protocollo pubblicato apertamente e royalty-free.

Altra caratteristica fondamentale è la versatilità che ne consente l'utilizzo in modalità TCP/IP su Ethernet o comunicazione seriale asincrona su vari mezzi di comunicazione. Nel primo caso (Modbus TCP) si tratta di un architettura Client/Server mentre nel secondo (Modbus RTU) di architettura Master/Slave. Parliamo di un protocollo Richiesta/Risposta, cioè vi è sempre un Master/Client che invia una richiesta allo Slave/Server che risponde. Non vi sono però comunicazioni spontanee a fronte di un evento, ma l'invio di richieste e le conseguenti ricezioni di risposte avvengono in modo ciclico e continuo per tutte le variabili (Polling).

Si parla di Broadcast nel caso in cui la richiesta del Master sia inviata a tutti gli Slave.

Il numero massimo di dispositivi che possono essere connessi sotto un unico slave è 247.

Nei BMS il Modbus viene utilizzato per l'interfacciamento con sistemi di terze parti, come multimetri elettrici, gruppi frigoriferi, pompe di calore e pompe di circolazione.

### 1.2.2 KNX

Nel 1999 dalla fusione di EIBA (European Installation Bus Association), EHSA (European Home system Association) e BCI (Batibus Club International) nacque la KNX Association con lo scopo di creare il primo standard di building automation aperto. I membri di questa associazione sono i costruttori di dispositivi del settore home and building automation basata su KNX.

KNX è stato approvato come standard europeo (EN 50090 EN 13321-1) e mondiale (ISO/IEC 14543).

I componenti, realizzati da costruttori diversi, vengono garantiti, dopo una procedura di certificazione operata dall'associazione Konnex, per essere interoperabili, cioè per funzionare correttamente senza necessità di realizzare interfacce.

I prodotti certificati KNX permettono di realizzare installazioni elettriche con le seguenti funzioni:

- controllo dell'illuminazione e delle schermature solari;
- gestione dell'impianto di riscaldamento/ventilazione;
- monitoraggio degli allarmi;
- gestione di impianti audio e video.

La configurazione dei dispositivi può avvenire mediante 2 diverse modalità:

- *E-mode*. È orientata ad installatori con limitate conoscenze KNX. I prodotti compatibili con l'E-mode sono pre-programmati con una serie di parametri di default. Questa modalità è adatta ad impianti semplici e di piccole dimensioni
- *S-mode*. Permette di realizzare sofisticate funzioni di controllo degli edifici. I componenti S-mode vengono programmati tramite un software comune: ETS.

Per quanto riguarda la topologia, un sistema KNX ammette reti filari, ad albero, a stella o una qualsiasi combinazione di queste. L'unica topologia non ammessa è quella ad anello chiuso.

A livello di struttura in un sistema KNX possiamo individuare (Figura 8):

- Nodi N
- Linee L
- Linee Principali ML
- Aree A
- Linea Dorsale BL

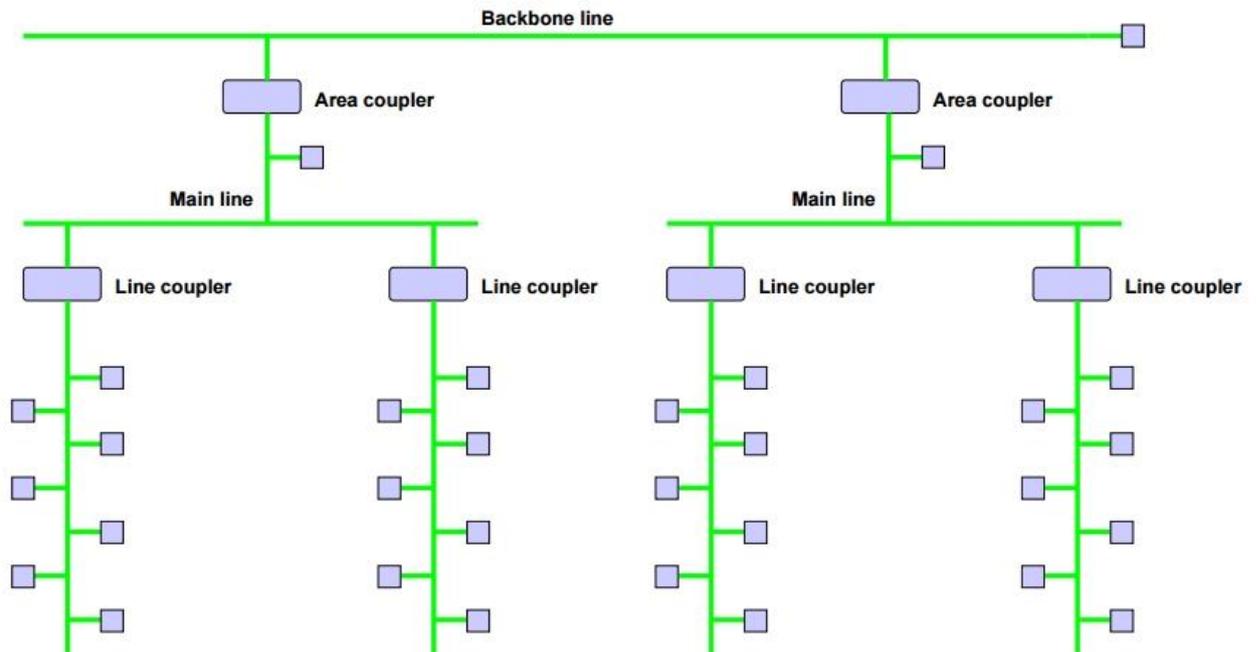


Figura 8 Struttura sistema KNX

Ogni linea può essere formata da massimo 64 dispositivi. Per sistemi più grandi si aggiunge una nuova linea alla linea principale tramite un accoppiatore di linea fino a un massimo di 15. Un gruppo di 15 linee forma un'area che può essere ulteriormente ampliata tramite un accoppiatore di area e una linea dorsale fino a un massimo di 15. Ogni linea, segmento, linea principale o dorsale ha bisogno per funzionare di un alimentatore.

Ad ogni dispositivo si assegna per identificarlo un indirizzo di 16 bit del tipo Area(4 bit).Linea(4 bit).Dispositivo(8 bit). In S-mode, grazie a ETS, si possono creare dei gruppi a cui assegnare i dispositivi in modo da consentire la comunicazione tra di essi.

La comunicazione avviene tramite telegrammi sotto forma di bit, i quali contengono l'indirizzo di partenza, l'indirizzo di arrivo, i dati utili e i byte di controllo.

È possibile accedere al sistema KNX tramite rete LAN, reti telefoniche analogiche o cellulari per avere un controllo centrale o distribuito del sistema tramite PC, display touch-screen e smartphone. [3]

Lo standard KNX trova particolare impiego nella domotica poiché consente di realizzare sistemi che regolano l'illuminazione, il comfort termico e la ventilazione che si adattano nelle diverse ore del giorno in base alle esigenze dell'utente.

### 1.2.3 BACnet

BACnet (Building Automation and Control Networks) è un protocollo creato da ASHRAE nel 1995. Esso nasce per essere applicabile a tutte le esigenze dell'edificio e quindi:

- HVAC
- Sistema antincendio
- Controllo dell'illuminazione
- Sicurezza

BACnet trova applicazione principalmente nel collegamento tra le varie automation station, anche di costruttori diversi, e tra le automation station e il management level. Ultimamente viene impiegato parallelamente al Modbus per connettere il sistema BMS con unità di terze parti.

Questo standard è basato sul concetto di *oggetto*, semplicemente definito come un insieme di informazioni dette *proprietà* (nome, valore minimo o massimo, valore attuale...). Attualmente sono definiti circa 50 diversi tipi di oggetti che vanno dai semplici input/output analogici/digitali ad oggetti specifici per la sicurezza (LifeSafety), per la programmazione oraria (Schedule), per i trend e molti altri. Ogni produttore è libero di aggiungere ulteriori proprietà non standard senza compromettere l'interoperabilità degli oggetti stessi.

Un *dispositivo BACnet* si ottiene dall'unione di oggetti BACnet per rappresentare la funzione eseguita da un dispositivo reale.

L'architettura a 4 livelli adottata da BACnet è riportata in Tabella 2.

A livello fisico e datalink BACnet supporta varie LAN (Local Area Network), come Internet, Arcanet, MS/TP e LonTalk. Comunicazioni tra tipi di rete diversi possono essere realizzate grazie a dei routers BACnet (Figura 10).

Tabella 2 Architettura BACnet

Livello	Descrizione
Application	Per gestire l'interfaccia con il programma applicativo dell'utente
Network	Per la comunicazione da una rete all'altra
Data link	Per la comunicazione da una stazione di automazione all'altra all'interno di una stessa rete
Physical	Per la conversione di segnali elettronici in dati

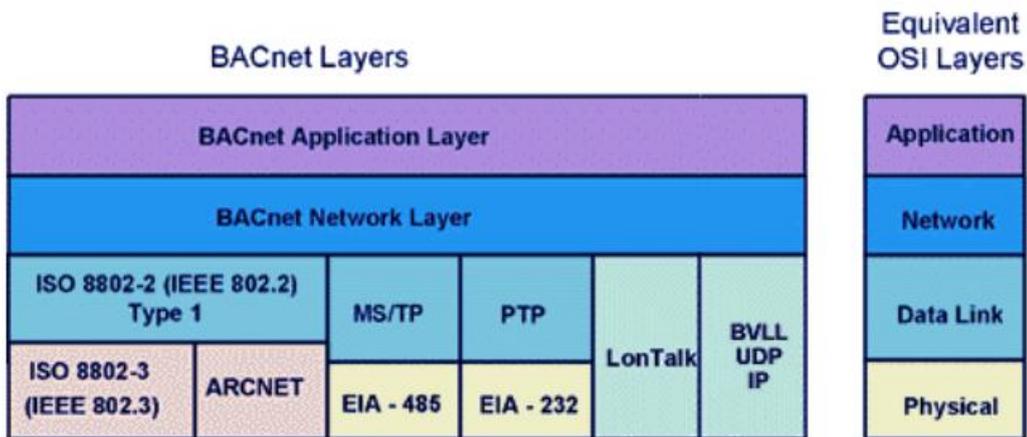


Figura 9 Struttura BACnet

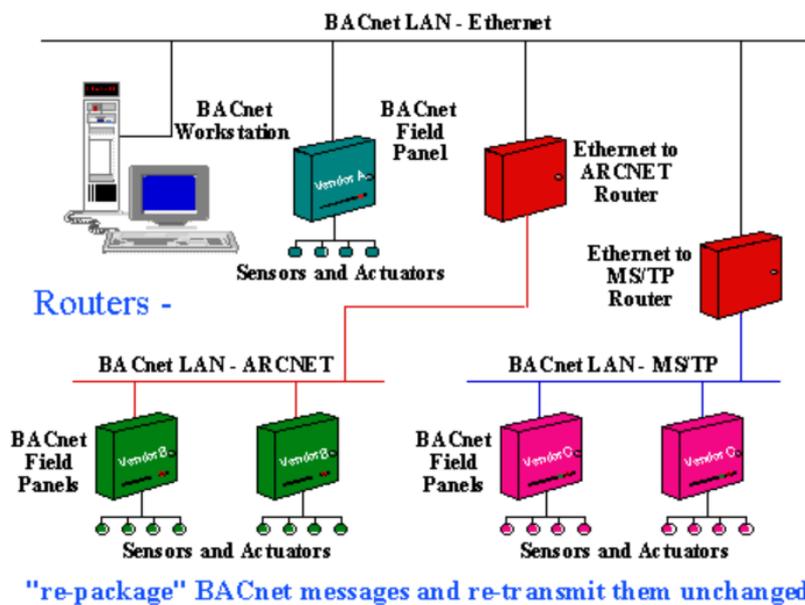


Figura 10 Utilizzo di BACnet Routers per collegare diverse reti BACnet

Un BACnet gateway è invece utilizzato per collegare una rete BACnet con una non BACnet. Un gateway è ad esempio utilizzato per collegare una rete BACnet con un'altra rete, ad esempio Modbus (Figura 11).

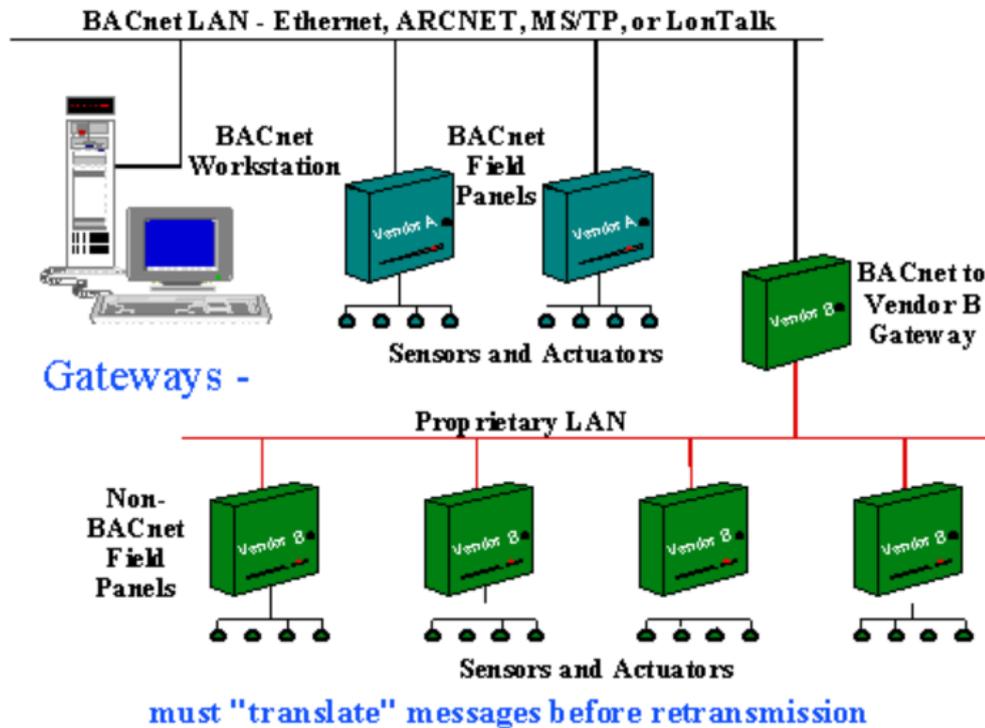


Figura 11 Utilizzo di gateway BACnet

La comunicazione è basata sul modello Client-Server e i messaggi scambiati sono detti *services* (Figura 12). Un client invia una richiesta sotto forma di service al server, che la elabora e rimanda una risposta.

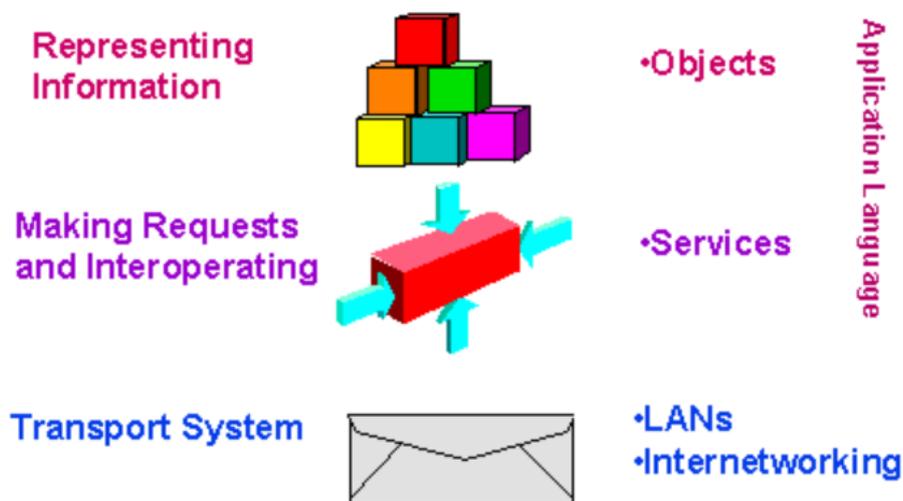


Figura 12 Riassunto del protocollo BACnet

La comunicazione può avvenire sia per cambio di valore COV che per richiesta ciclica (Polling). La prima modalità è sicuramente più efficiente richiedendo lo scambio di dati solo quando un'effettiva variazione dei parametri in gioco si manifesta.

L'unico service obbligatorio per ogni dispositivo BACnet è *ReadProperty*. Molto interessanti sono anche i services *I-am* e *Who-is* che permettono a un client BACnet di autoapprendere tutta la struttura della rete a cui appartiene, ovvero quanti dispositivi BACnet sono collegati, come si chiamano e gli oggetti in essi contenuti. Tutto questo avviene senza alcuna programmazione preventiva.

I services sono raggruppati in 5 classi:

- Allarmi ed eventi
- Accesso file
- Accesso oggetti
- Gestione di dispositivi remoti
- Terminali Virtuali (per stabilire una connessione bidirezionale con un programma applicativo in esecuzione su un dispositivo remoto)

Ad esempio, alla classe "Accesso oggetti" appartengono i services che permettono di scrivere o leggere le proprietà di un oggetto.

Il BACnet Testing Laboratories è l'ente che si occupa di certificare i dispositivi BACnet dei vari costruttori. In base a quante funzionalità il dispositivo supporta esso può essere più o meno conforme allo standard.

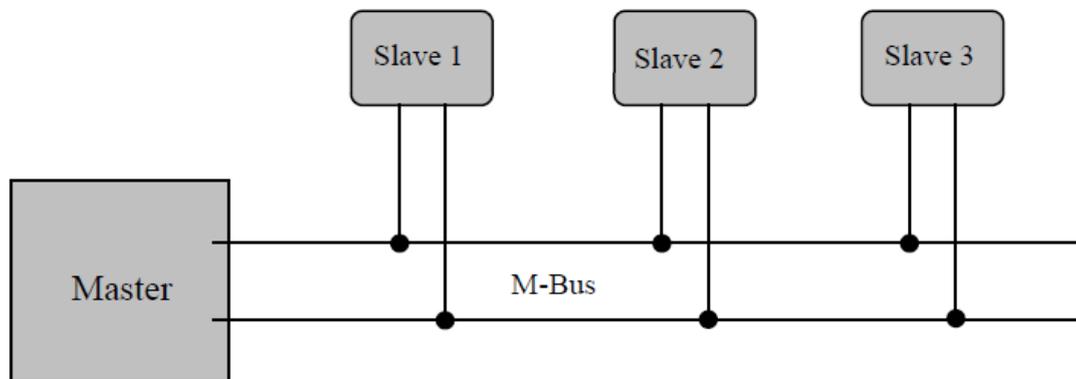
Non esistono tool standard per la configurazione dei dispositivi ma ogni costruttore può usare il suo tool proprietario. [4]

Viene utilizzato per collegare tra loro le varie automation station anche di costruttori diversi e per il collegamento verso il management level. Ultimamente viene impiegato parallelamente al Modbus per connettere il sistema BMS con unità di terze parti.

#### **1.2.4 M-bus**

L'M-Bus (Meter Bus) è stato sviluppato per soddisfare l'esigenza di un sistema per la connessione in rete e la lettura a distanza dei contatori (acqua, calore, elettricità, gas).

Si tratta di un sistema aperto, nel senso che possono essere collegati su rete M-bus contatori di costruttori diversi. Esso è definito come sistema Master-Slave per cui quando interrogati, i misuratori consegnano i dati raccolti a un master comune. Il collegamento avviene mediante un cavo bus a 2 fili (Figura 13).



*Figura 13 Architettura sistema M-bus*

Ogni rete M-Bus consente di collegare e comunicare con massimo 250 misuratori, ma tramite ripetitori questo vincolo può essere aggirato. La lunghezza massima del cavo è di 4000 metri.

## Capitolo 2-L'impianto di Maison Lostan

L'impianto oggetto di questo elaborato è al servizio del complesso monumentale di Maison Lostan, situato tra l'omonima via e piazza Caveri (Figura 14), nel centro storico della città di Aosta.



Figura 14 Planimetria d'insieme di Maison Lostan e dell'antistante piazza Caveri: foro romano (nero), corpo principale (rosso), corte interna (verde), corpo secondario (blu).

Lo stabile è di proprietà della Regione Autonoma Valle d'Aosta, la quale ha intrapreso un profondo piano di ristrutturazione con l'intento di recuperare l'immobile e di istituirvi la nuova sede degli archivi e degli uffici della Soprintendenza ai Beni Culturali. Inoltre, anche piazza Caveri è stata oggetto di interventi di riqualificazione per riportarne in luce il tracciato archeologico del foro romano.

L'edificio si articola su due corpi, "corpo principale" e "corpo secondario", suddivisi in ali di diversa altezza. Il corpo principale è formato da 4 ali disposte attorno alla corte interna:

- Ala Nord: 4 piani fuori terra e uno in parte interrato;
- Ala Sud: 2 piani fuori terra, un sottotetto e un piano interrato;
- Ala Est: su Piazza Caveri, 4 piani fuori terra e un piano interrato;
- Ala Ovest: su Via Lostan, 4 piani fuori terra e un piano interrato.

Inoltre, sotto la corte interna vi sono 2 ulteriori piani interrati che costituiscono il “corpo ipogeo”.

Il corpo secondario (in blu in Figura 14), con pianta ad “L”, sul lato Nord presenta 2 ali:

- Ala Nord: 2 piani fuori terra;
- Ala Ovest: 3 piani fuori terra e un cantinato.

In totale si ha una superficie lorda riscaldata di 3650 m<sup>2</sup> e un volume lordo riscaldato di 9800 m<sup>3</sup>. Le funzioni assegnate ai vari locali sono riassunte in Tabella 3:

*Tabella 3 Suddivisione delle funzioni*

<b>Locali</b>	<b>Funzione</b>
Corpo ipogeo: piano secondo interrato	Archivi
Corpo ipogeo: piano primo interrato	Archivi e spazi tecnici
Corpo centrale e secondario: piano terreno	Percorso archeologico, spazi tecnici e spazi a disposizione
Corpo centrale e secondario: piano secondo, terzo e quarto	Uffici
Corpo centrale e secondario: sottotetto	Locali tecnici
Piazza Caveri: piano interrato	Centrale Termofrigo

## **2.1 Il progetto GRETA**

Attualmente le principali fonti di calore rinnovabili per edifici sono la biomassa legnosa, le pompe di calore e i pannelli solari termici. Tra queste, le biomasse legnose occupano il primo posto per quantitativi di calore prodotto in molti paesi europei per la loro alta competitività economica, pur presentando alcuni svantaggi legati alle emissioni. Infatti, anche se si possono considerare idealmente nulle le emissioni di CO<sub>2</sub> (in quanto la stessa quantità di biossido di carbonio è assorbita e poi rilasciata durante i processi di crescita e combustione degli alberi), sempre più rilievo sta assumendo l'inquinamento dell'aria ad opera di particolato (PM10 e PM2.5) e composti volatili organici VOC, CO e NO<sub>x</sub>, tutti riconducibili a problematiche caratteristiche della combustione.

Il problema del riscaldamento a biomassa pone dei seri problemi di qualità dell'aria nelle regioni alpine, per cui il loro utilizzo è da limitare nel prossimo futuro.

“La pompa di calore geotermica rappresenta una delle tecnologie meno carbon-intensive per il riscaldamento e il raffrescamento degli edifici, e utilizza una fonte energetica rinnovabile sfruttabile in gran parte dell'area alpina. Ciononostante, la geotermia a bassa entalpia è sempre stata poco considerata dalle politiche europee e dai progetti di cooperazione” [5].

Il progetto GRETA (near-surface Geothermal RESources in the Territory of the Alpine space), fondato dal programma europeo INTERREG-Alpine Space, intende incrementare la produzione energetica da fonti geotermiche a bassa entalpia nel territorio alpino. L'obiettivo viene perseguito migliorando lo scambio di conoscenze e informazioni sulle migliori pratiche tecniche e amministrative e sviluppando strumenti di supporto decisionale per le singole installazioni (mappe del potenziale geotermico) e per la pianificazione energetica a livello locale e regionale. L'area di cooperazione del progetto comprende territori appartenenti a Italia, Francia, Germania, Slovenia, Austria, Svizzera e Liechtenstein.

### **2.1.1 Sistemi a pompa di calore geotermica**

Le pompe di calore geotermiche utilizzano il terreno o le acque sotterranee come sorgente o pozzo di calore a seconda dell'effetto utile che si intende perseguire. Il vantaggio dell'uso dell'acqua come sorgente primaria di calore è dovuto al suo elevatissimo calore specifico per unità di volume rispetto all'aria. Tra le risorse idriche a disposizione, l'acqua del sottosuolo è la più idonea all'impiego con pompe di calore grazie a una temperatura praticamente costante durante l'anno indipendentemente dalla stagione in corso: è quindi un tipo di energia stabile e affidabile. Il sottosuolo risulterà più freddo dell'aria in estate e più caldo in inverno: ciò si ripercuote in un coefficiente di performance COP più alto rispetto alle pompe di calore ad aria.

Tuttavia, le normative locali e i costi economici necessari ad accertare il livello e la temperatura della falda limitano l'accesso alle acque sotterranee: il progetto GRETA mira a superare questi ostacoli.

Un ultimo fattore da tenere in considerazione è quello della qualità dell'acqua sotterranea. Valori elevati del pH o delle concentrazioni di ferro e manganese possono rispettivamente causare la corrosione dell'acciaio o formare composti insolubili in grado di ostruire sia i pozzi che gli scambiatori.

Gli impianti geotermici possono essere suddivisi in impianti a circuito chiuso e impianti a circuito aperto. Nei primi l'energia termica viene sottratta al fluido geotermico in maniera indiretta per mezzo di un fluido termovettore, mentre nei secondi è l'acqua sotterranea ad essere movimentata per mezzo di pompe sommerse.

L'energia del sottosuolo può quindi essere sfruttata con i seguenti mezzi

- *Acque di falda;*

- *Collettori orizzontali* realizzati con tubi in materiale plastico per derivare calore a bassa profondità;
- *Sonde verticali* realizzate con tubi in materiale plastico in fori profondi da 100 a 200 m;
- *Pali energetici* realizzati con tubi in materiale plastico alloggiati nei pali di cemento delle fondazioni.

L'impianto di Maison Lostan appartiene alla prima categoria, ossia agli impianti di calore con sorgente ad acqua di falda. Questa tipologia è soggetta a vincoli, dettati da normative locali, che ne definiscono le modalità sia di prelievo che di restituzione o smaltimento.

Questa configurazione si presta molto bene all'accoppiamento con pompe di calore reversibili, per cui un attento dimensionamento evita l'installazione di caldaie o refrigeratori integrativi.

I sistemi ad acqua di falda possono essere ulteriormente categorizzati in sistemi a uno o a due pozzi. Nel caso di sistemi a due pozzi bisogna conoscere la direzione del flusso della falda in modo da posizionare il pozzo di drenaggio a valle di quello di pescaggio. Inoltre, i due pozzi devono essere posti a una distanza tale per cui non si verifichino fenomeni di interferenza termica. Nei sistemi a pozzo singolo, l'unico pozzo presente ha funzione di pescaggio mentre lo smaltimento, a seconda della normativa vigente, può avvenire nella rete fognaria, in corsi d'acqua o essere sfruttato per l'irrigazione qualora la qualità dell'acqua lo consenta.

Le pompe di calore di tipo geotermico si accoppiano bene con:

- *Pannelli radianti*: le basse temperature utilizzate consentono uno sfruttamento ideale della tecnologia a pompe di calore garantendo il massimo comfort;
- *Radiatori*: questa tecnologia funziona in genere con temperature comprese tra i 70 e i 90 gradi, ma un utilizzo con temperature dell'acqua più basse è comunque possibile attraverso un sovradimensionamento dei terminali;
- *Ventilconvettori*: per essi vale, seppur in misura minore, lo stesso discorso dei radiatori, ma hanno il vantaggio di poter lavorare sia in regime di riscaldamento che di raffrescamento;
- *Unità Trattamento Aria*: la pompa di calore può fornire l'acqua sia calda che refrigerata necessaria al funzionamento delle batterie di scambio termico.

## 2.2 Architettura dell'impianto meccanico

In Figura 15 è riportato lo schema funzionale a blocchi in cui sono evidenti gli scambi di fluido tra le varie porzioni dell'impianto. Il fluido tecnico, caldo e/o freddo, viene smistato dalla centrale principale verso le 3 sottocentrali e da queste prosegue verso i relativi terminali.

Oltre ai terminali riportati in Figura 15 Schema funzionale a blocchi sono presenti dei ventilconvettori nei locali caratterizzati dalle maggiori dispersioni termiche. Questi apparecchi sono alimentati solo durante la stagione di riscaldamento e sono situati nei pressi della scala B e della scala C.

### 2.2.1 Impianto geotermico

Il progetto iniziale prevedeva un impianto a circuito chiuso realizzato mediante sonde geotermiche poiché la Regione Autonoma Valle d'Aosta vietava la reimmissione nella falda stessa. Tuttavia, durante la fase progettuale, alcune variazioni dei permessi relativi allo scarico dell'acqua in superficie, e più precisamente nella rete del Mere des Rives, hanno fatto emergere la possibilità di realizzazione di un impianto a circuito aperto. Queste possibilità sono state poi confermate da uno studio geologico e idrogeologico che ha dimostrato la presenza della falda a una profondità non eccessiva e con portata adeguata. La variazione ha avuto l'effetto benefico di ridurre il numero dei pozzi previsti da 34 a 2 con conseguenti miglioramenti delle emissioni acustiche e delle vibrazioni durante la fase di trivellazione e quindi con minori impatti sui reperti archeologici di piazza Caveri.

Oltre al minor costo d'investimento, il passaggio a un circuito di tipo aperto comporta un aumento del *Seasonal energy efficiency ratio (SEER)* dell'impianto grazie alla possibilità di free cooling dell'acqua tecnica, con un risparmio sui costi di gestione di circa il 10% rispetto a un impianto di tipo chiuso [6].

La scelta di realizzare 2 pozzi di pescaggio della profondità di 50 metri ciascuno è stata dettata dalla necessità di garantire la continuità di servizio anche durante eventuali guasti o manutenzioni programmate. L'acqua di falda viene innalzata per mezzo di pompe sommerse dotate di inverter per un controllo ottimale della portata e poi inviata attraverso due scambiatori a piastre in acciaio inox.

L'introduzione di sabbia è prevenuta per mezzo di filtri del tipo a ponte.



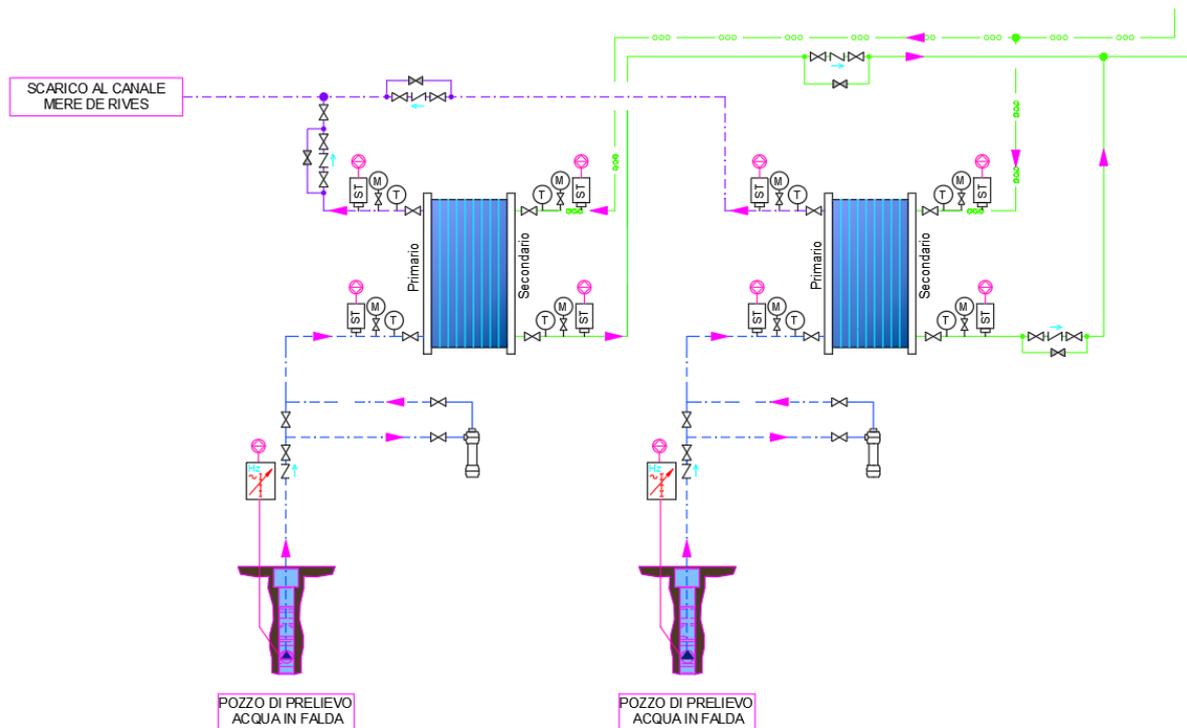


Figura 16 Estratto dello schema funzionale

Gli scambiatori da 324 kW (Figura 17) sono stati dimensionati per avere un salto di temperatura su entrambi i lati tra i 4 e i 5°C. In questi apparecchi l'acqua del sottosuolo cede calore all'acqua del secondario nel periodo di riscaldamento e lo riceve in quello di raffreddamento. Una volta effettuato lo scambio termico essa viene raccolta per l'irrigazione delle aree verdi adiacenti piazza Caveri e, se in esubero, riversata nella rete superficiale del Consorzio delle Acque Mere des Rives.



Figura 17 Scambiatori a piastre installati presso Maison Lostan

## 2.2.2 Centrale termofrigo

Il cuore della centrale sono le due pompe di calore CLIVET WSHN-XEE2 da 70 KW elettrici ognuna (Figura 18). Si tratta di unità in grado di invertire il ciclo di lavoro del fluido R-410A per mezzo di una valvola a 4 vie posta a monte del compressore e di una valvola deviatrice a 3 vie posta sul tratto dove viene fatto espandere il fluido (Figura 19).



Figura 18 Pompe di calore installate presso Maison Lostan

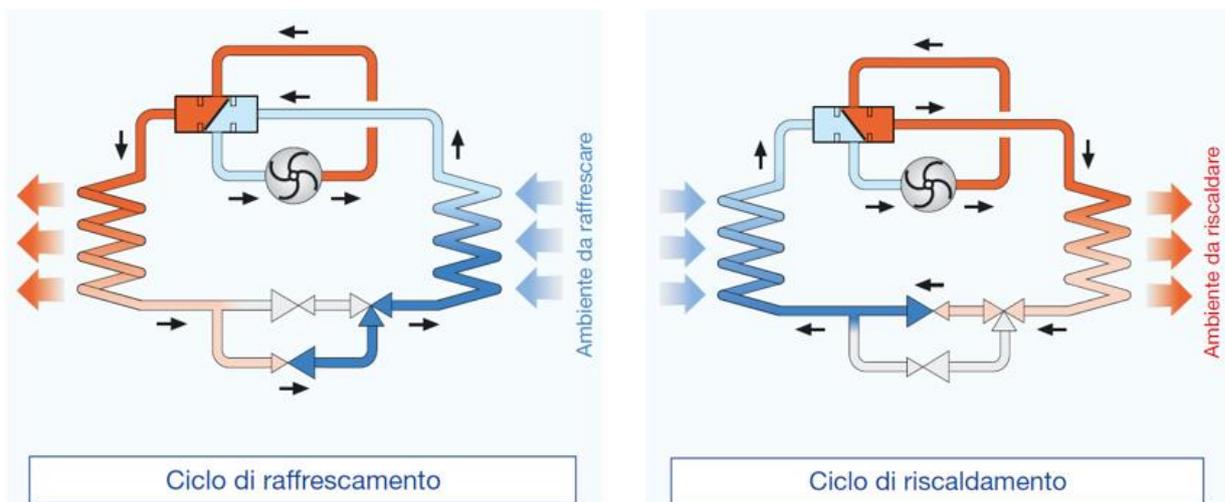


Figura 19 Inversione del ciclo di lavoro di una pompa di calore reversibile

Durante la fase di test è stato confermato che un'unica pompa è in grado di coprire il carico dell'intero edificio, tuttavia non essendo previsti altri dispositivi di integrazione era stato ritenuto opportuno installarne due per fronteggiare guasti imprevisti senza interrompere il servizio e per coprire richieste di caldo e freddo simultanee.

La movimentazione del fluido lato utilizzo avviene per mezzo di due pompe in parallelo comandate da inverter incorporate nella macchina che permettono una precisa modulazione della portata d'acqua mantenendo costante la differenza tra temperatura di mandata e di ritorno. In caso di temporanea indisponibilità di una delle due pompe, la funzionalità è comunque assicurata garantendo l'80% della portata nominale.

L'unità sfrutta due compressori SCROLL di diversa taglia che le permettono di mantenere valori di efficienza massimi su un range di carico che va dal 25% al 75% e una valvola di espansione elettronica che riduce le perdite energetiche per effetto di un'accurata regolazione della quantità di refrigerante in transito nell'evaporatore.

I parametri di funzionamento possono essere controllati in loco per mezzo del display installato a bordo dell'unità o gestiti in remoto grazie al collegamento di tipo seriale.

Con una temperatura di uscita lato utilizzo di 55°C e una temperatura di uscita lato sorgente di 5°C, la macchina assorbe 67,9 kW elettrici e produce 221 kW termici (Figura 20), con un coefficiente di performance COP di 3,25. In regime di raffreddamento, con una temperatura di uscita lato utilizzo di 7°C e una temperatura di uscita lato sorgente di 30°C, la potenza assorbita è di 41,3 kW elettrici e quella erogata di 230 kW frigoriferi (Figura 21), con un rapporto di efficienza energetica di 5,56. Queste prestazioni fanno riferimento a una differenza di temperatura di 5°C sia lato sorgente che lato utilizzo e al funzionamento con miscela acqua e glicole al 30%. Queste condizioni corrispondono a quelle operative dell'impianto di Maison Lostan.

La configurazione scelta prevede al suo interno uno scambiatore a piastre saldobrasate INOX che consente la produzione di acqua calda durante il funzionamento in raffreddamento, grazie al recupero di parte del calore di condensazione che verrebbe altrimenti smaltito sulla sorgente esterna. È possibile recuperare circa il 20% della potenza termica dissipata pari alla somma della potenza frigorifera e della potenza elettrica assorbita dai compressori. Questo valore diminuisce al diminuire della temperatura di condensazione e al crescere della temperatura di uscita dal recuperatore.

Il recupero parziale viene attivato da due gruppi pompa gemellari Wilo (uno per ogni pompa di calore). Questa condizione migliora le prestazioni dell'unità con un incremento della potenza frigorifera del 3,2% e una riduzione della potenza elettrica assorbita del 3,6%, poiché riduce la temperatura di condensazione [7].

Grandezze	To °C	Temperatura acqua uscita lato sorgente °C											
		5		7		10		12		15		17	
		kWt	kWe	kWt	kWe	kWt	kWe	kWt	kWe	kWt	kWe	kWt	kWe
43.2	30	144	25,1	152	25,2	164	25,5	174	25,6	188	25,9	198	26,2
	35	144	28,2	151	28,4	163	28,7	171	28,9	186	29,3	195	29,6
	45	143	34,2	150	34,4	161	34,7	169	34,9	182	35,3	190	35,5
	55	136	42,8	144	43,0	152	43,3	158	43,5	169	43,8	176	44,0
	60	137	48,1	143	48,3	153	48,6	160	48,6	169	48,9	178	49,1
45.2	30	155	26,4	163	26,5	177	26,7	185	26,8	201	27,0	211	27,0
	35	155	29,9	161	30,1	176	30,4	182	30,6	198	30,9	209	31,1
	45	153	36,3	162	36,6	173	36,9	180	37,1	193	37,5	204	37,8
	55	147	45,3	153	45,5	163	45,9	169	46,1	181	46,4	189	46,8
	60	-	-	152	50,9	160	50,6	169	51,3	181	51,7	190	52,1
50.2	30	175	29,0	185	29,2	201	29,6	213	29,8	232	30,2	244	30,5
	35	173	32,5	182	32,8	198	33,2	208	33,5	227	34,0	239	34,3
	45	168	39,3	178	39,6	192	39,9	202	40,2	218	40,7	230	41,1
	55	158	49,1	165	49,4	177	49,7	185	49,9	200	50,4	209	50,8
	60	156	55,4	163	55,5	176	55,8	184	56,0	198	56,5	209	56,8
55.2	30	191	31,9	202	32,1	219	32,5	232	32,7	252	33,2	266	33,5
	35	188	35,9	199	36,2	215	36,6	228	36,9	247	37,4	261	37,8
	45	184	43,5	194	43,7	209	44,1	221	44,4	239	44,9	251	45,2
	55	172	54,0	180	54,3	193	54,6	202	54,9	218	55,4	229	55,7
	60	171	60,5	179	60,7	191	61,1	201	61,3	217	61,7	227	62,0
60.2	30	213	35,8	226	36,1	244	36,5	259	36,8	282	37,3	298	37,7
	35	210	40,5	222	40,7	241	41,2	254	41,6	276	42,2	291	42,6
	45	206	49,1	217	49,3	235	49,8	247	50,1	267	50,7	281	51,1
	55	192	61,2	201	61,5	216	61,9	227	62,2	244	62,8	255	63,3
	60	192	68,6	201	68,9	216	69,3	225	69,5	243	70,1	256	70,6
70.2	30	245	40,8	259	41,2	283	41,9	299	42,5	325	43,4	342	44,0
	35	243	45,6	257	46,0	279	46,7	294	47,3	319	48,1	336	48,7
	45	228	55,0	251	55,4	271	55,9	285	56,4	308	57,1	324	57,7
	55	221	67,9	232	68,3	249	68,9	262	69,3	281	70,0	296	70,6
	60	219	75,7	230	76,1	246	76,7	258	77,2	277	77,9	293	78,5

Figura 20 Prestazioni in riscaldamento-Applicazione acqua di falda

Grandezze	To °C	Temperatura acqua uscita lato sorgente °C									
		30		35		40		45		50	
		kWf	kWe	kWf	kWe	kWf	kWe	kWf	kWe	kWf	kWe
70.2	5	215	40,8	204	46,0	194	50,0	180	56,0	165	62,6
	7	230	41,3	218	46,4	209	50,4	193	56,5	177	63,1
	10	259	42,3	246	47,5	236	51,3	218	57,4	201	64,1
	12	264	43,0	250	48,2	239	52,0	221	58,2	203	64,9
	15	294	44,1	279	49,3	268	53,0	247	59,2	227	65,9
	18	314	44,9	297	50,1	284	53,7	262	59,9	241	66,6

Figura 21 Prestazioni in raffreddamento-Applicazione acqua di falda

I circuiti idraulici sono stati realizzati impiegando delle valvole a tre vie on/off in modo da bypassare le unità quando la temperatura dell'acqua refrigerata richiesta non è troppo bassa. L'acqua geotermica si mantiene a una temperatura di circa 10°C durante tutto l'anno per cui essa può essere sfruttata per ottenere un free-cooling con conseguenti riduzioni dei consumi elettrici.

A valle delle pompe di calore troviamo due serbatoi di accumulo da 1500 litri ognuno (Figura 22). Entrambi sono posizionati sul ritorno. Questi serbatoi sono utilizzati per realizzare un parziale disaccoppiamento tra generazione e utilizzazione dell'energia termica. Grazie a loro si può fronteggiare una richiesta variabile nel tempo e in alcuni istanti perfino superiore alla capacità di generazione, mantenendo la produzione a valori pressoché costanti con conseguente riduzione

del numero di avvii dei compressori delle pompe di calore. La fase di accendimento di questi organi è caratterizzata da elevati assorbimenti elettrici e sforzi meccanici che ne riducono le prestazioni energetiche e la vita utile.

L'acqua in arrivo dalle pompe di calore viene deviata verso l'accumulo caldo o freddo, in accordo con la modalità di produzione, per mezzo di valvole a 3 vie on/off con servomotore elettrico (Figura 23).

A valle dei serbatoi troviamo i collettori dei pompaggi primari. La prevalenza necessaria al fluido a vincere le perdite di carico del circuito è fornita da 3 pompe a portata variabile: due di esse sono sufficienti in condizioni di carico massimo, mentre la terza ha funzione di backup.

Sul collettore dell'acqua calda a monte delle pompe sono stati predisposti gli attacchi per il futuro allacciamento alla rete di teleriscaldamento. In Figura 24 sono illustrati, da sinistra verso destra, il ritorno verso l'accumulo caldo, il ritorno dalle sottocentrali, la mandata verso le sottocentrali e l'arrivo di acqua calda dalle pompe di calore.

L'acqua all'interno dei circuiti subisce delle variazioni di volume specifico per effetto della variazioni di temperatura. L'insorgenza di pressioni troppo elevate è controllata tramite vasi di espansione del tipo chiuso.



*Figura 22 A sinistra: serbatoio di accumulo freddo con in alto a destra il ritorno dal collettore delle utenze e in basso i due ritorni verso le pompe di calore. A destra: serbatoio di accumulo caldo con in basso a sinistra l'ingresso per l'acqua di ritorno dalle utenze. In alto a destra le uscite verso la pompa di calore 1, la pompa di calore 2 e il circuito comune di recupero.*



*Figura 23 Valvole a 3 vie con servomotore elettrico per la commutazione dei circuiti provenienti dalle pompe di calore*



*Figura 24 Collettore caldo e pompaggi primari*

### **2.2.3 Sottocentrali**

Le centrali tecniche e i collegamenti principali sono stati collocati in modo da limitare al minimo le interferenze con l'edificio storico. Al fine di ottimizzare i passaggi degli impianti sono stati sfruttati gli spazi in corrispondenza di camini e cavedi (collegamenti verticali) e di vuoti in corrispondenza dei solai (collegamenti orizzontali), per la presenza di volte o di solai che presentavano spazi disponibili. Inoltre, sono state definite puntualmente le strutture murarie dove realizzare le tracce e le cassette a parete per gli impianti a pannelli radianti o per le derivazioni elettriche.

Il fluido è convogliato dalla centrale di produzione verso i collettori di 3 sottocentrali. La prima di esse è adibita al soddisfacimento dei carichi termici degli archivi ed è collocata al primo piano interrato in un ambiente adiacente alla centrale termofrigo. Nei sottotetti agibili sono state collocate due sottocentrali gemelle a servizio rispettivamente della manica Nord e della manica Sud.

Le sottocentrali nord e sud presentano 4 collettori:

- Collettore mandata acqua calda;
- Collettore ritorno acqua calda;
- Collettore mandata acqua fredda;
- Collettore ritorno acqua fredda.

Da ogni collettore di mandata l'acqua viene aspirata per mezzo di due gruppi pompe gemellari.

Si hanno 4 circuiti:

- Circuito acqua calda UTA con pompe a numero di giri variabile;
- Circuito acqua calda radiatori e ventilconvettori con pompa a numero di giri variabile;
- Circuito acqua refrigerata UTA con pompa a numero di giri variabile;
- Circuito acqua calda/refrigerata pannelli radianti con pompe a numero di giri variabile.

Di questi solo il circuito relativo ai pannelli radianti è di tipo miscelato poiché un attento controllo della temperatura in mandata è necessario a garantire il giusto grado di comfort e ad evitare fenomeni indesiderati di condensazione. La commutazione stagionale dei pannelli viene gestita per mezzo di due valvole a tre vie on/off con servomotore elettrico.

La sottocentrale archivi presenta solo due collettori, uno per la mandata e uno per il ritorno del fluido caldo. Essa è composta da due circuiti: uno per i radiatori con pompe on/off e un altro per le batterie calde dell'UTA con pompe a numero di giri variabile.

#### **2.2.4 Terminali**

Per conseguire uno sfruttamento ideale del calore a bassa temperatura prodotto dalle pompe di calore, la scelta dei terminali è ricaduta ove possibile su pannelli radianti annessi a parete e a pavimento con ottimizzazione dei percorsi in modo da ridurre le perdite di carico. Per i servizi si è invece ricorso a radiatori, così come nelle scale. Sono inoltre presenti dei ventilconvettori nei locali con maggiori carichi termici invernali per integrare il calore fornito dai pannelli a pavimento. I fancoil sono a 2 tubi e vengono alimentati solo durante la stagione di riscaldamento.

Nella sottocentrale archivi è presente una UTA (Figura 26) dotata di batteria di preriscaldamento e postriscaldamento ma sprovvista di batteria di raffreddamento. L'unità è inoltre provvista di recuperatore di calore del tipo a flussi incrociati che consente di sottrarre energia all'aria espulsa per preriscaldare l'aria di rinnovo. L'utilizzo del recuperatore risulta particolarmente vantaggioso nella stagione invernale con temperature dell'aria esterna molto basse.

Sono presenti 3 serrande coniugate azionate mediante servomotori modulanti in modo da poter regolare la quota di aria di rinnovo. È inoltre possibile, qualora l'aria esterna sia a temperature minori (magiori) rispetto all'aria interna, operare il free-cooling (free-heating) degli ambienti per mezzo di una serranda che aprendosi consente all'aria di rinnovo di bypassare il recuperatore. L'umidificazione avviene tramite un lavatore adiabatico.

I ventilatori di mandata e di ripresa del tipo a pale rovesce possono garantire una portata nominale di 2300 m<sup>3</sup>/h. Sono ventilatori EC brushless ad alta efficienza energetica e con basso livello sonoro che dispongono di una elettronica con integrata la regolazione di velocità e le protezioni del motore.

Altre due unità trattamento aria sono presenti nelle sottocentrali Nord e Sud. Si tratta di unità simili dal punto di vista costruttivo che differiscono solo per le dimensioni: l'UTA Nord può fornire 5700 m<sup>3</sup>/h e la Sud 2400 m<sup>3</sup>/h. I ventilatori di mandata e ritorno sono del tipo a velocità fissa.

In queste unità il recupero avviene mediante due batterie di tubi alettati appartenenti a un circuito ad anello chiuso con un fluido intermedio che viene fatto circolare per mezzo di una pompa. Il calore ceduto dalla corrente d'aria più calda ad una batteria viene trasferito alla corrente più fredda per mezzo di una miscela acqua-glicole. Oltre al recuperatore sono presenti tutti i componenti per un trattamento completo dell'aria, ossia batteria di preriscaldamento, batteria di raffreddamento/deumidificazione, umidificatore adiabatico, batteria di postriscaldamento. Le serrande per l'aspirazione e per l'espulsione di aria esterna sono azionate da servomotori on/off.

Le batterie delle UTA sono state ampiamente sovradimensionate in conseguenza delle basse temperature dell'acqua previste.

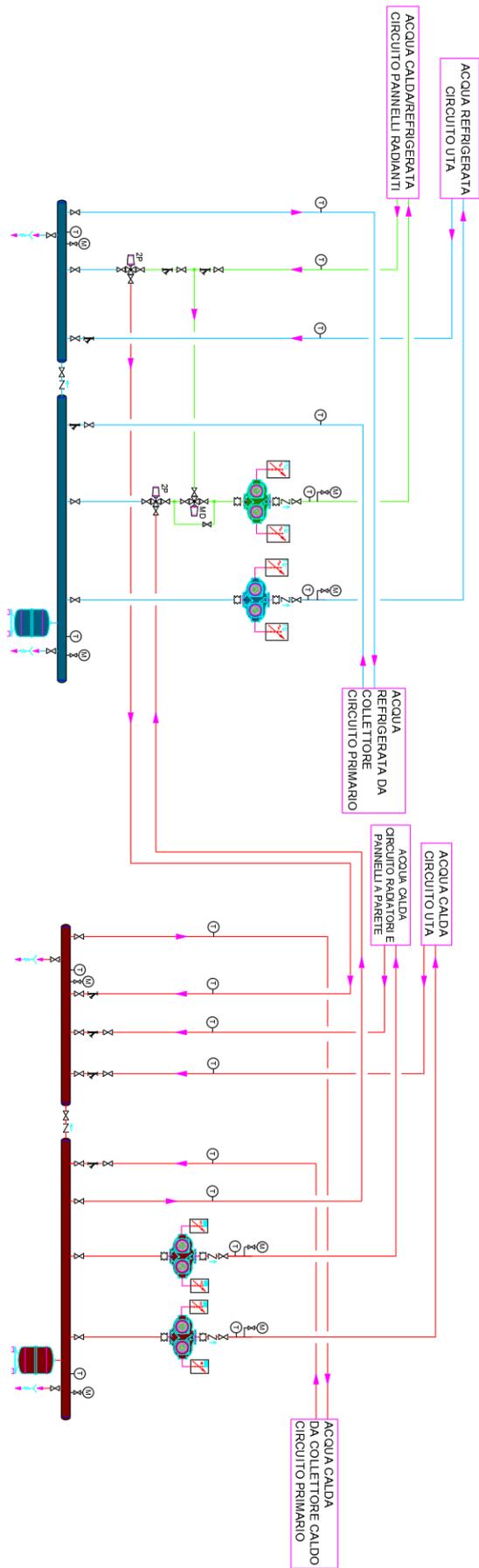


Figura 25 Schema funzionale sottocentrale Nord/Sud

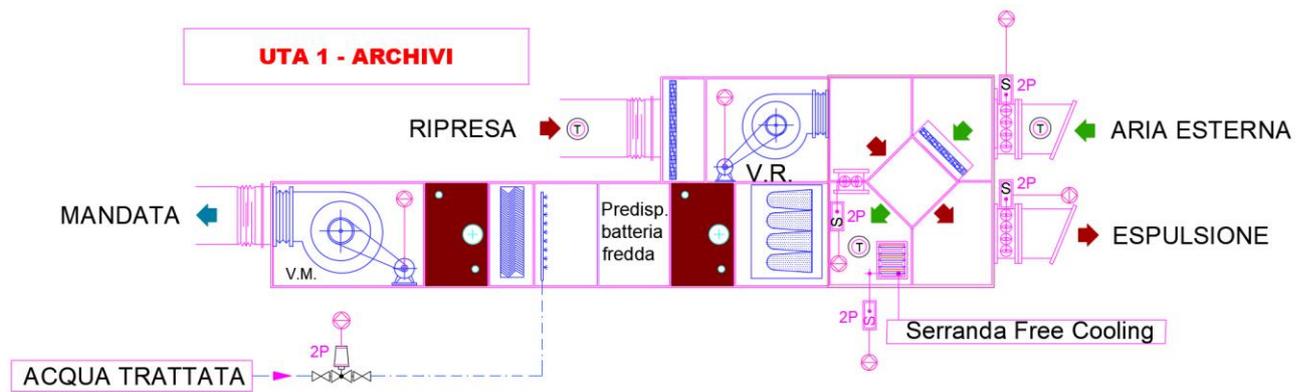


Figura 26 Schema UTA Archivi

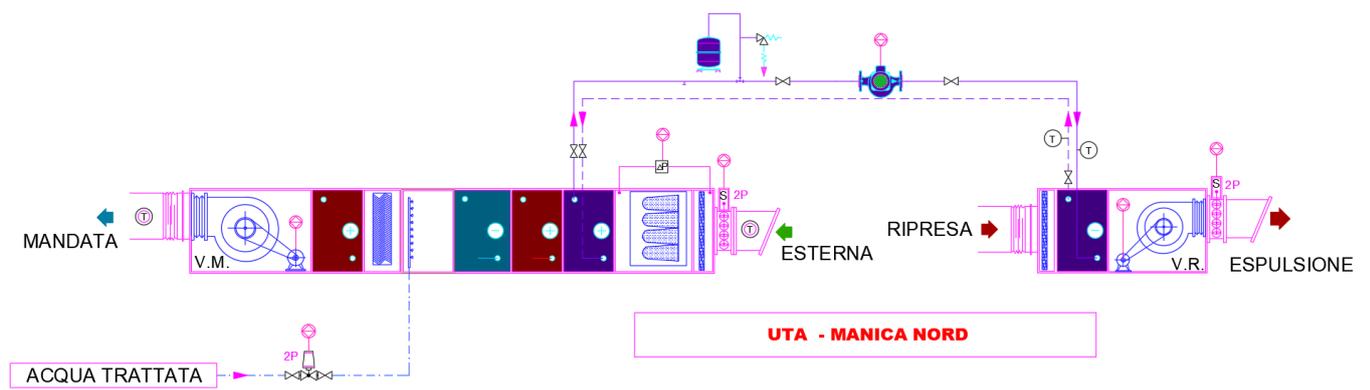


Figura 27 Schema UTA Nord/Sud

## 2.3 Sistema BMS Siemens

In Figura 29 è riportata una rappresentazione parziale del BMS di Maison Lostan. È stata riprodotta una sola delle 10 automation station per non appesantire lo schema e per mettere in evidenza i collegamenti tra i vari livelli per mezzo dei protocolli standard. In questo specifico esempio è riportata l'AS04, adibita al controllo della centrale termofrigo lato generazione, che riceve i segnali analogici e digitali di sonde, sensori e attuatori (field level) tramite i moduli TXM1.

Nell'impianto di Maison Lostan sono stati utilizzati 3 modelli di TXM1:

- TXM1.6R: output digitali (BO);
- TXM1.16D: acquisisce ingressi digitali (BI);
- TXM1.8U: input e output analogici (AI e AO).

La comunicazione con le pompe di calore, le pompe geotermiche e le pompe di circolazione è realizzata tramite Modbus RS485 adottando i moduli di interfaccia TXI2OPEN (Figura 31). I

TXI2OPEN sono stati utilizzati anche nei collegamenti tra tutte le altre pompe di circolazione presenti nell'impianto e le relative automation station tramite Modbus RS485 e tra i misuratori di energia termica e l'AS05 tramite M-bus.

I controllori comunicano tra di loro e con il management level tramite protocollo BACnet su rete dati. L'ultimo protocollo utilizzato, il KNX, si è reso necessario per realizzare lo scambio di dati tra i regolatori ambienti e i fancoil con le AS06, AS07 e AS08.

### 2.3.1 Management level: Desigo CC

Questo livello è costituito da due elementi:

- Postazione centrale su pc sulla quale è installato il software Desigo CC;
- Display PXM20.

Tramite il **PXM20** (Figura 28) si possono eseguire operazioni sull'impianto come la messa in manuale dei componenti, il riconoscimento e il reset degli allarmi, la visualizzazione dei trend e la modifica dei programmi orari e dei setpoint. Non è possibile apportare modifiche alla logica di funzionamento, ma risulta un componente molto utile per la gestione e il contrasto delle anomalie essendo posizionato direttamente in centrale termofrigida accanto al quadro elettrico generazione utenze. I valori visualizzati attraverso il display, come le temperature, le pressioni e gli stati, sono aggiornate in real-time e la struttura grafica che procede dal generale al particolare permette di avere una visione immediata delle funzioni del sistema controllato.

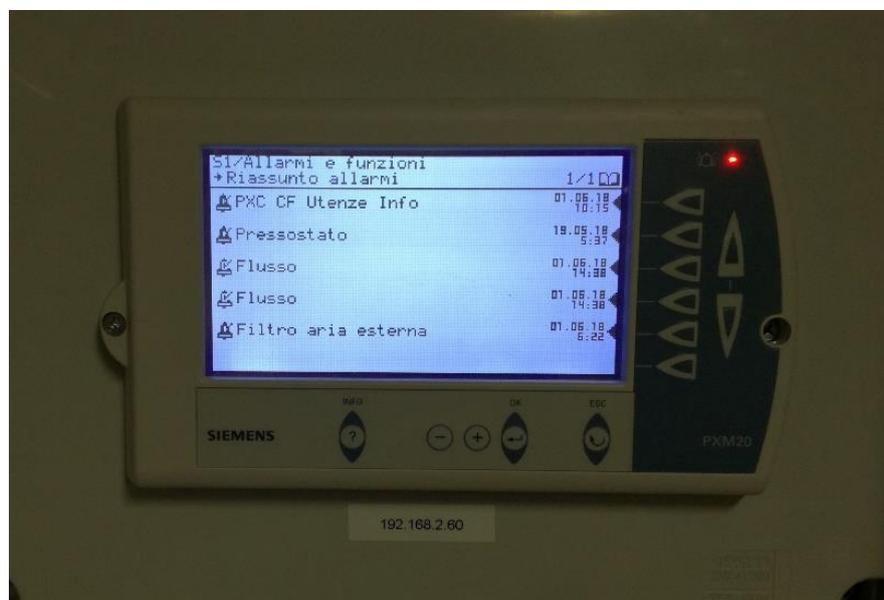


Figura 28 PXM20

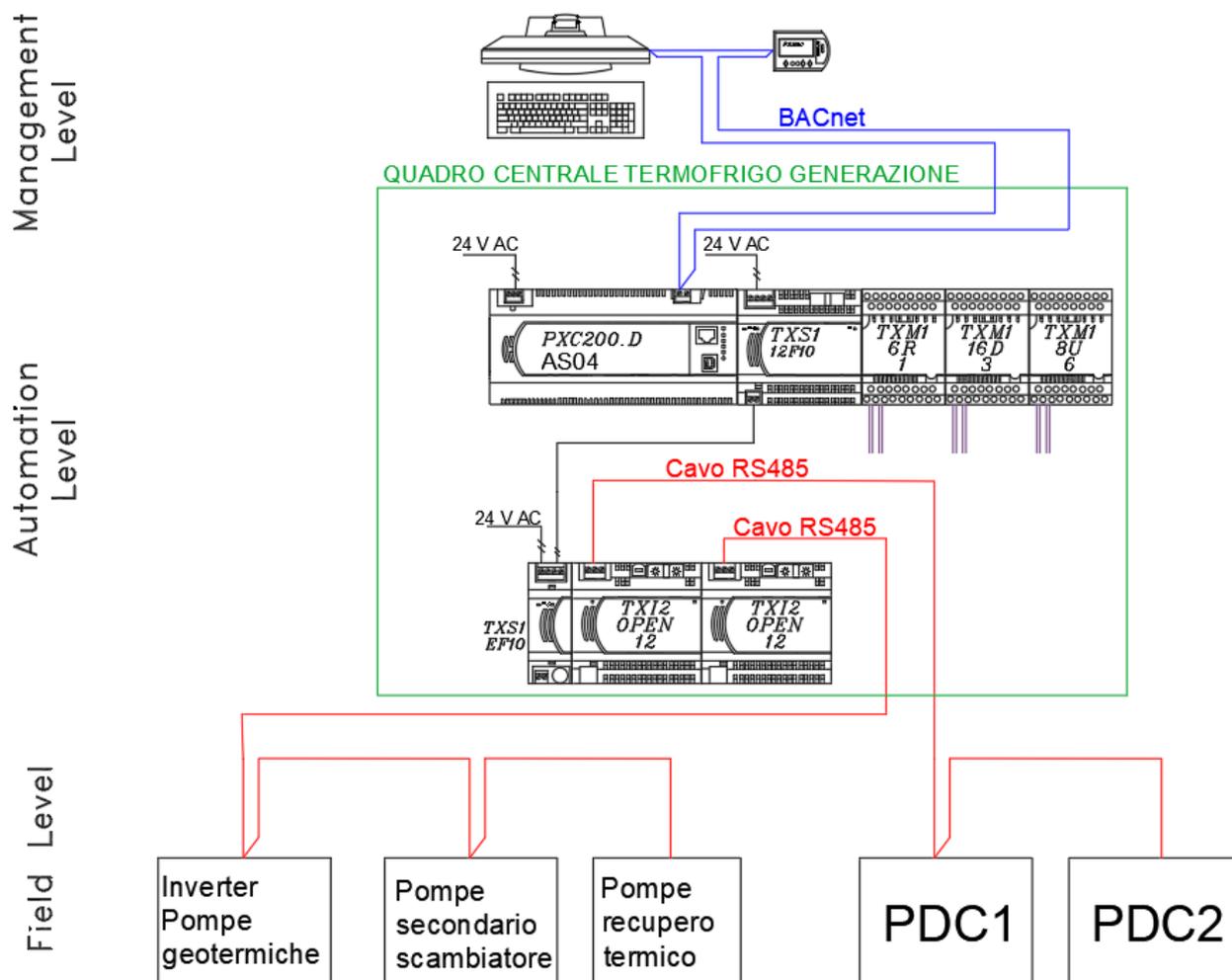


Figura 29 Struttura BMS Maison Lostan (AS04)

**Desigo CC** è l'ultima piattaforma di gestione e controllo prodotta da Siemens. Esso è stato progettato per fornire un unico punto di accesso a tutte le installazioni presenti all'interno di un moderno edificio, ossia HVAC, sistemi di gestione degli ingressi e videosorveglianza, illuminazione e sistemi antincendio. Permette inoltre di integrare sistemi di terze parti tramite protocolli di comunicazione standard.

Sono possibili diverse configurazioni client/server, che consentono di configurare e monitorare gli impianti da qualsiasi luogo tramite pagina web o applicativi installati su pc. Il server ospita i dati del sistema come il database sul quale è salvato il progetto e l'history database HDB, mentre ai client è consentita la visualizzazione tramite un'interfaccia per monitorare e comandare gli impianti. Per piccole installazioni in genere il client è installato sullo stesso pc che agisce anche da server. L'HDB memorizza i parametri di funzionamento dell'impianto (temperature, consumi, stati...), gli allarmi e il loro trattamento e tiene traccia delle attività dei diversi utenti sul sistema.

È possibile assegnare dei privilegi ai vari utenti che hanno accesso al sistema, permettendo loro di avere accesso solo alle attività di loro competenza.

L'interfaccia utente è suddivisa in riquadri (Figura 30). Navigando nel sistema le informazioni relative ad un impianto o ad una parte di esso vengono automaticamente visualizzate, evitando sovrapposizioni di finestre e fornendo all'operatore le informazioni essenziali e necessarie.

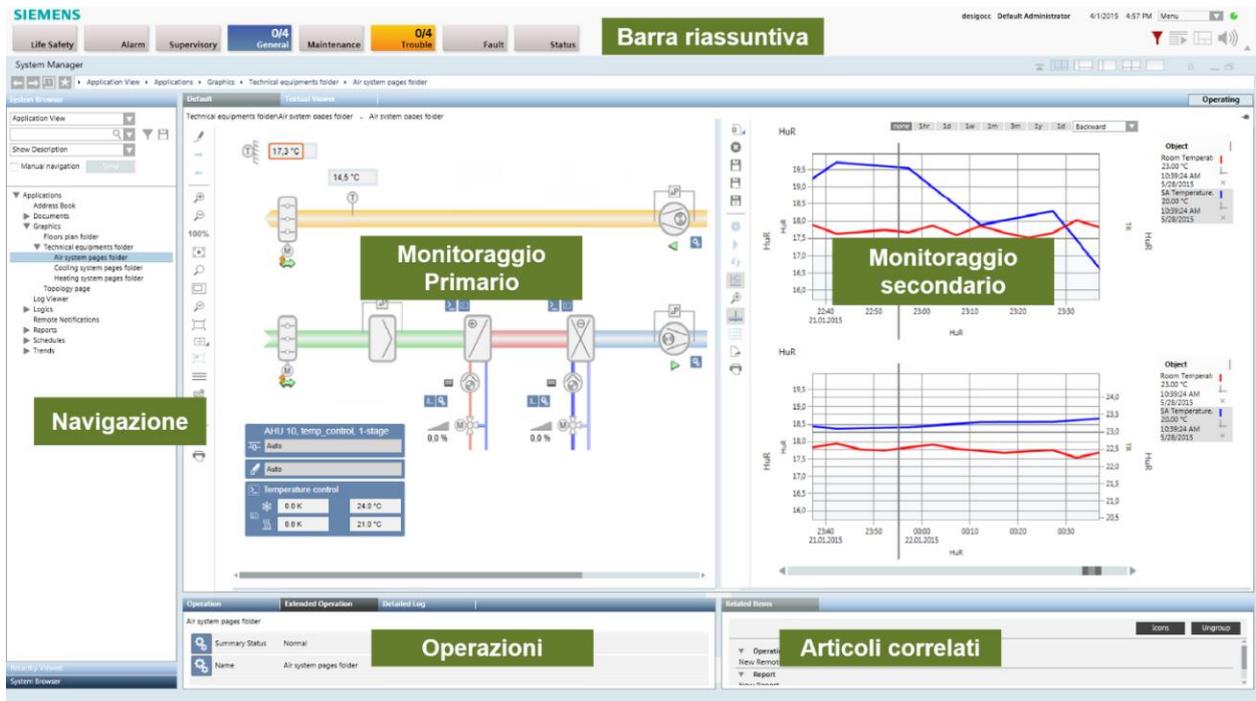


Figura 30 Interfaccia utente Desigo CC

Le pagine grafiche possono essere costruite semplicemente trascinando degli “oggetti intelligenti” presenti nelle librerie che hanno al loro interno tutte le informazioni relative alla funzione associata. Sono possibili modifiche online senza alcuna interruzione di servizio che risulteranno disponibili non appena verranno salvate. Grazie a un tool di importazione da AutoCAD si possono creare in maniera rapida pagine grafiche per il controllo del comfort dei vari ambienti.

Attraverso la schermata è possibile:

- Operare e monitorare graficamente l'automazione dell'edificio;
- Comandare direttamente gli apparati dell'impianto;
- Individuare, visualizzare e riconoscere guasti e allarmi;
- Registrare, visualizzare e comparare online o offline trend di dati in forma grafica o tabellare con possibilità di esportazione in csv o pdf;

- Creare programmi orari per automatizzare le operazioni dell'edificio;
- Comporre e configurare Report di performance energetiche.

### 2.3.2 Automation level

Tabella 4 Automation station installate presso Maison Lostan

<b>Sigla</b>	<b>Modello</b>	<b>Localizzazione</b>	<b>Funzione</b>
<b>AS01</b>	PXC50.E-D	Sottocentrale Archivi	Controllore sottocentrale S1 Archivi (circuiti AC, UTA Archivi)
<b>AS02</b>	PXC50.E-D	Sottocentrale Sud	Controllore sottocentrale S2 Sud (circuiti AC, AR, UTA aria primaria)
<b>AS03</b>	PXC50.E-D	Sottocentrale Nord	Controllore sottocentrale S3 Nord (circuiti AC, AR, UTA aria primaria)
<b>AS04</b>	PXC200.E-D	Centrale termofrigido	Controllore centrale termofrigido generazione (pompe di calore)
<b>AS05</b>	PXC50.E-D	Centrale termofrigido	Controllore centrale termofrigido utenze
<b>AS06</b>	PXC001.E-D	Quadro scala interna	Concentratore KNX Manica Nord PT, P1, P2
<b>AS07</b>	PXC001.E-D	Quadro scala interna	Concentratore KNX Manica Nord P3, P4, P5
<b>AS08</b>	PXC001.E-D	Quadro scala interna	Concentratore KNX Manica Sud
<b>AS09</b>	PXC100.E-D	Cabina ricevimento MT	Controllore quadri elettrici media tensione e bassa tensione
<b>AS10</b>	PXC100.E-D	Locale UPS	Controllore quadri elettrici UPS, locali tecnici

Le PXC50.E-D, PXC100.E-D e PXC200.E-D sono unità liberamente programmabili che si differenziano per numero di punti in grado di ricevere in input o trasmettere in output. La comunicazione tra di essi e con il livello di gestione avviene tramite protocollo BACnet su rete IP. È possibile personalizzare il mix di punti in input-output per mezzo dei moduli di integrazione TX-I/O. In particolare, si possono avere:

- *AI Analogical Input*: segnale elettrico in ingresso (tensione, corrente, resistenza) che varia in funzione della grandezza misurata. Range tipici sono 0-10 V e 0-24mA;
- *DI Digital Input*: segnale in ingresso di tipo digitale per l'acquisizione di stati e/o allarmi;
- *AO Analogical Output*: segnale elettrico in uscita per il comando proporzionale di dispositivi come servocomandi di valvole o serrande modulanti e inverter di pompe o ventilatori;
- *DO Digital Output*: segnale in uscita di tipo digitale per comandi on/off;
- *Moduli di interfaccia TX Open*: per l'integrazione di sistemi e dispositivi di terze parti, come multimetri elettrici, pompe di circolazione e pompe di calore che comunicano via

Modbus e i misuratori di energia termica acquisiti tramite M-bus. I moduli TXI2.OPEN installati a Maison Lostan sono capaci di gestire fino a 160 punti.



*Figura 31 Moduli TXI2.OPEN per l'integrazione delle pompe di calore e delle pompe di circolazione via Modbus.*

La gestione delle pompe di circolazione e delle pompe di calore via Modbus comporta dei costi ulteriori dal punto di vista della strumentazione elettronica ma semplifica il cablaggio tra gli organi in campo e il quadro elettrico. A titolo di esempio consideriamo il caso di una pompa di circolazione. Essa viene generalmente gestita attraverso 3 punti corrispondenti al comando, allo stato e all'allarme che, in un'installazione classica, necessitano di 6 fili tra il quadro elettrico del controllore e la pompa. Con il Modbus sono necessari 2 soli fili per mettere in comunicazione il controllore con le varie pompe elettroniche e permette di acquisire una quantità maggiore di informazioni come la velocità, la prevalenza, la portata, l'energia e la potenza assorbite e il numero di ore di funzionamento.

Questi controllori sono capaci di gestire in autonomia le periferiche ad essi connesse in assenza della piattaforma di supervisione. Logiche di funzionamento anche complesse possono essere elaborate su pc e scaricate all'interno di essi tramite l'applicativo XWorks. Tra le funzioni principali troviamo la segnalazione degli allarmi, l'invio di mail e/o sms di notifica e il programma orario.

I controllori PXC001.E-D (Figura 32) raccolgono i dati di temperatura e umidità e le conseguenti richieste di calore o raffrescamento provenienti dai regolatori ambiente via KNX che comandano le relative valvole di zona dei circuiti a pannelli radianti. A loro volta i regolatori ricevono le informazioni relative alla stagione in corso e all'orario di funzionamento. L'installazione via KNX è semplice ed economica in quanto è possibile con un unico cavo collegare in serie tutti i regolatori e rendere i loro dati disponibili ai livelli più alti del BMS.

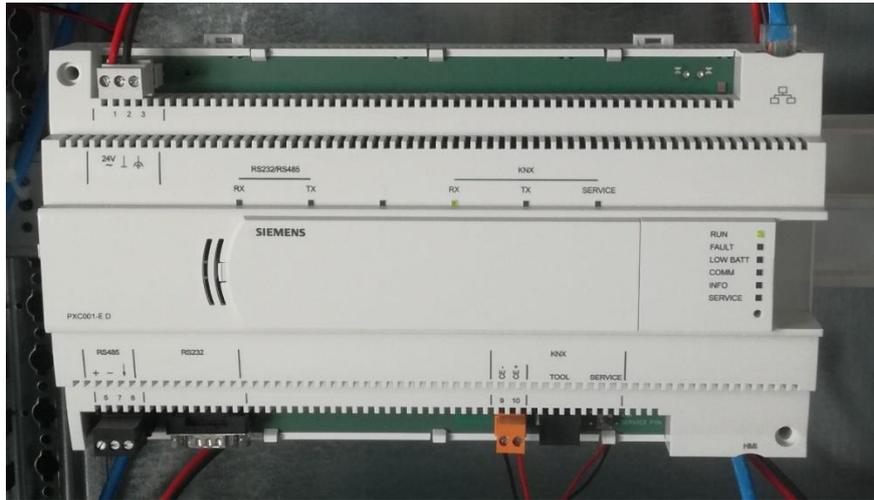


Figura 32 PXC001.E-D: concentratore KNX. In alto a destra è visibile il collegamento BACnet su rete dati.



Figura 33 Collegamento fancoil tramite KNX

L'AS01 svolge la funzione di Primary Server. Esso memorizza la data e l'ora e la rende disponibile a tutte le altre automation station, gestisce l'invio di allarmi al livello di gestione e contiene l'elenco degli utenti che possono accedere al sistema.

### 2.3.3 Field level

È il livello dei terminali con funzioni di input/output: sensori, attuatori e misuratori di energia. In Tabella 5 è riportato l'elenco dei punti I/O fisici gestiti dal BMS attraverso i moduli TXM1 delle automation station dalla 1 alla 5.

Tabella 5 Elenco punti field level suddivisi per automation station

Indirizzo modulo	Descrizione
<b>AS01 (Archivi)</b>	
1.1	Comando pompa 1 circuito radiatori
1.2	Comando pompa 2 circuito radiatori

1.3	Comando ventilatore mandata UTA Archivi
1.4	Comando ventilatore ripresa UTA Archivi
1.5	Comando umidificatore UTA Archivi
2.1	Serranda tagliafuoco 1
2.2	Serranda tagliafuoco 2
2.3	Serranda tagliafuoco 3
2.4	Interruttore generale quadro elettrico condizionamento
2.5	Guasto ventilatore mandata
2.6	Mancanza flusso ventilatore mandata
2.7	Serranda tagliafuoco 4
2.8	Guasto ventilatore ripresa
2.9	Mancanza flusso ventilatore ripresa
2.10	Incendio UTA Archivi
2.11	Antigelo Batteria preriscaldamento
2.12	Filtro aria esterna
2.13	Filtro mandata
2.14	Filtro ripresa
2.15	Serranda tagliafuoco 5
2.16	Serranda tagliafuoco 6
3.1	Temperatura saturazione
3.2	Temperatura mandata
3.5	Umidità ripresa
3.6	Temperatura ripresa
3.7	Segnale inverter ventilatore mandata
3.8	Segnale inverter ventilatore ripresa
4.1	Valvola batteria preriscaldamento
4.2	Valvola batteria postriscaldamento
4.3	Serranda aria esterna
4.4	Serranda aria ricircolo
4.5	Serranda recuperatore
4.6	Serranda miscela
5.1	Temperatura ritorno circuito radiatori
5.2	Temperatura ritorno circuito UTA
5.3	Temperatura mandata circuito radiatori
5.4	Temperatura mandata circuito UTA
<b>AS02 (Sottocentrale SUD)</b>	
1.1	Comando ventilatore mandata UTA
1.2	Comando ventilatore ripresa UTA
1.3	Comando umidificatore
1.4	Comando pompa recuperatore
1.5	Valvola commutazione circuito pavimenti
2.1	Valvola commutazione circuito pavimenti-mandata
2.2	Valvola commutazione circuito pavimenti-ritorno
2.3	Termostato di sicurezza circuito pannelli a pavimento
2.6	Mancanza flusso ventilatore mandata
2.9	Mancanza flusso ventilatore ripresa
2.10	Incendio UTA Sud
2.11	Antigelo batteria preriscaldamento
2.12	Interruttore generale quadro elettrico condizionamento
2.13	Filtro mandata

2.14	Filtro ritorno
3.1	Serranda aria esterna
3.2	Serranda espulsione
3.5	Pressostato pompa recuperatore
4.1	Temperatura saturazione aria primaria
4.2	Temperatura mandata aria primaria
4.3	Temperatura mandata pompa recuperatore
4.4	Temperatura ritorno pompa recuperatore
4.5	Umidità ripresa
4.6	Temperatura ripresa aria
4.7	Temperatura mandata pannelli
4.8	Temperatura ritorno pannelli
5.1	Valvola batteria preriscaldamento
5.2	Valvola batteria postiscaldamento
5.3	Valvola batteria raffreddamento
5.4	Valvola regolazione circuito pannelli a pavimento
6.1	Temperatura ritorno circuito AC UTA
6.2	Temperatura ritorno circuito AR UTA
6.3	Temperatura ritorno circuito radiatori
6.4	Temperatura mandata AC collettore sottocentrale
6.5	Temperatura ritorno AC collettore sottocentrale
6.6	Temperatura mandata AR collettore sottocentrale
6.7	Temperatura ritorno AR collettore sottocentrale
<b>AS03 (Sottocentrale Nord)</b>	
Stessi punti AS02 (Sottocentrale Sud)	
<b>AS04 (Centrale Termofrigo Generazione)</b>	
1.1	Valvola commutazione mandata pompa di calore 2
1.2	Valvola commutazione ritorno pompa di calore 2
1.3	Valvola commutazione mandata free cooling pompa di calore 2
1.4	Valvola commutazione ritorno free cooling pompa di calore 2
1.5	Valvola commutazione mandata pompa di calore 1
1.6	Valvola commutazione ritorno pompa di calore 1
2.1	Valvola commutazione mandata free cooling pompa di calore 1
2.2	Valvola commutazione ritorno free cooling pompa di calore 1
2.3	Valvola di intercettazione pompa di calore 2
2.4	Valvola di intercettazione pompa di calore 1
2.5	Valvola di intercettazione scambiatore a piastre 1
2.6	Valvola di intercettazione scambiatore a piastre 2
5.3	Interruttore alimentazione pompe di calore
5.4	Interruttore alimentazione pompe scambiatore pompa di calore 2
5.5	Interruttore alimentazione pompe recupero pompa di calore 2
5.6	Interruttore alimentazione pompe scambiatore pompa di calore 1
5.7	Interruttore alimentazione pompe recupero pompa di calore 1
5.8	Interruttore alimentazione pompe pozzo
5.11	Interruttore quadro elettrico centrale termofrigo generazione
6.1	Temperatura mandata primario scambiatore 1
6.2	Temperatura ritorno primario scambiatore 1
6.3	Temperatura mandata secondario scambiatore 1
6.4	Temperatura ritorno secondario scambiatore 1
6.5	Temperatura mandata primario scambiatore 2

6.6	Temperatura ritorno primario scambiatore 2
6.7	Temperatura mandata secondario scambiatore 2
6.8	Temperatura ritorno secondario scambiatore 2
7.2	Temperatura mandata secondario scambiatori
8.1	Portata pozzo 1
8.2	Portata pozzo 2
<b>AS05 (Centrale termofrigio Utenze)</b>	
1.1	Temperatura esterna
1.2	Temperatura mandata AC
1.3	Temperatura ritorno AC
1.4	Temperatura mandata AR
1.5	Temperatura ritorno AR
1.6	Temperatura accumulo AC
1.7	Temperatura accumulo AR
2.1	Pressione mandata AC
2.2	Pressione ritorno AC
2.3	Pressione ritorno AR
2.4	Pressione mandata AR
2.5	Pressione rete vasca irrigazione
3.2	Valvola irrigazione
4.2	Richiesta reintegro vasca irrigazione
4.4	Interruttore addolcitore
4.9	Interruttore quadro elettrico centrale termofrigio utenze
4.10	Interruttore alimentazione pompa 4
4.11	Interruttore alimentazione pompa 5
4.12	Interruttore alimentazione pompa 6
4.13	Interruttore alimentazione pompa 1
4.14	Interruttore alimentazione pompa 2
4.15	Interruttore alimentazione pompa 3
10.1 (TXI2.OPEN)	Misuratore energia AC
10.9 (TXI2.OPEN)	Misuratore energia AR

Gli ultimi due punti della precedente tabella vengono acquisiti tramite M-bus dal misuratore di energia SITRANS FUE950 della SIEMENS, che sfrutta i valori provenienti da un misuratore di portata volumetrica e da due sonde di temperatura per applicare la seguente formula:

$$Energia = Volume * (T_H - T_C) * K$$

Dove:

- $T_H$ : temperatura misurata sul tubo caldo;
- $T_C$ : temperatura misurata sul tubo freddo;
- $K$ : coefficiente termico di entalpia e contenuto termico del fluido.

Le automation station dalla 6 alla 8 utilizzano il bus KNX per comunicare con i regolatori ambienti e acquisire per ogni piano dell'edificio gli scatti dell'interruttore linea normale, linea privilegiata

e linea continuità. Il KNX è stato impiegato anche per acquisire dal quadro locale antincendio le seguenti informazioni:

- Scatto interruttore generale ordinaria;
- Scatto interruttore ausiliari;
- Scatto interruttore generale privilegiata;
- Allarme centraline spegnimento;
- Allarme compressore;
- Scatto interruttore pompe sollevamento;
- Scatto interruttore generale luce;
- Scatto interruttore generale forza motrice;
- Allarme bombole;
- Allarme pompa singola.

L'AS09 acquisisce gli scatti degli interruttori dei quadri di media e bassa tensione presenti nella cabina di ricevimento MT, mentre l'AS10 è adibita ai 2 gruppi di continuità (luce e dati). Ai punti finora elencati vanno aggiunti quelli gestiti tramite Modbus relativi alle pompe di calore, ai multimetri e alle pompe di circolazione. Riguardo a queste ultime, a seconda del modello è possibile accedere a tutte o a parte delle variabili in Tabella 11 e

Tabella 12.

*Tabella 6 Elenco variabili gestite tramite Modbus-multimetro bticino*

<b>Multimetro bticino</b>	
<b>Descrizione</b>	<b>Unità di misura</b>
Potenza attiva	W
Potenza reattiva	var
Potenza apparente	VA
Frequenza	Hz
Energia attiva positiva	Wh
Energia reattiva positiva	varh
Tensione Fase 1, Fase 2 e Fase 3	mV
Corrente Fase 1, Fase 2 e Fase 3	mA
Tensioni concatenate	mV
Fattore di potenza	-

Tabella 7 Elenco variabili gestite tramite Modbus-Pompe di calore Clivet

<b>Pompa di calore Clivet</b>		
<b>Nome</b>	<b>Descrizione</b>	<b>U.M.</b>
Modo Attuale	0=Cooling; 1=Heating	-
Stato Attuale	0=Off; 2=On; 3=Solo pompaggio acqua	-
Setpoint Utilizzo Attuale	Setpoint Utilizzo Attuale	°C
N° Compressori On	Numero di compressori attualmente attivi	-
Allarmi Bloccanti	Segnalazione presenza allarmi bloccanti	-
Warning	Segnalazione presenza allarmi lievi	-
Richiesta Utilizzo	Stato della richiesta del termoregolatore di utilizzo	%
Temperatura In Utilizzo	Temperatura ingresso acqua allo scambiatore lato Utilizzo	°C
Temperatura Out Utilizzo	Temperatura uscita acqua allo scambiatore lato Utilizzo	°C
Temperatura Out Sorgente	Temperatura acqua in uscita dallo scambiatore lato sorgente	°C
Comando Stato Locale	0=Off; 2=On; 3=Solo pompaggio acqua	-
Comando Modo Locale	0=Cooling; 1=Heating	-
Setpoint Cooling	Valore desiderato della temperatura dell'acqua di impianto in modo raffreddamento	°C
Setpoint Heating	Valore desiderato della temperatura dell'acqua di impianto in modo riscaldamento	°C

Al fine di rendere evidenti i vantaggi derivanti da un'installazione via bus esaminiamo le 2 alternative (con e senza l'utilizzo del bus) per una pompa di calore Clivet caratterizzata dai punti elencati in Tabella 7.

*Alternativa 1: Installazione classica.*

Tabella 8 Elenco punti da gestire in un'installazione classica di una pompa di calore

<b>Pompa di calore Clivet</b>		
<b>Nome</b>	<b>U.M.</b>	<b>Tipo di punto</b>
Stato Attuale	-	DI
Allarmi Bloccanti	-	DI
Comando Stato Locale	-	DO
Comando Modo Locale	-	DO
Setpoint Cooling	°C	AO
Setpoint Heating	°C	AO

Tabella 9 Punti necessari a gestire una pompa di calore in un'installazione classica

Tipo di input/output	Numero
AO	2
DI	2
DO	2
<b>Totale</b>	<b>6</b>

Per gestire questi 6 punti il controllore PXC50E.D andrebbe esteso con i seguenti moduli:

- 1 TXM1.8U per gestire i 2 punti analogici;
- 1 TXM1.8D per gestire i 2 input digitali;
- 1 TXM1.6R per gestire i 2 output digitali.

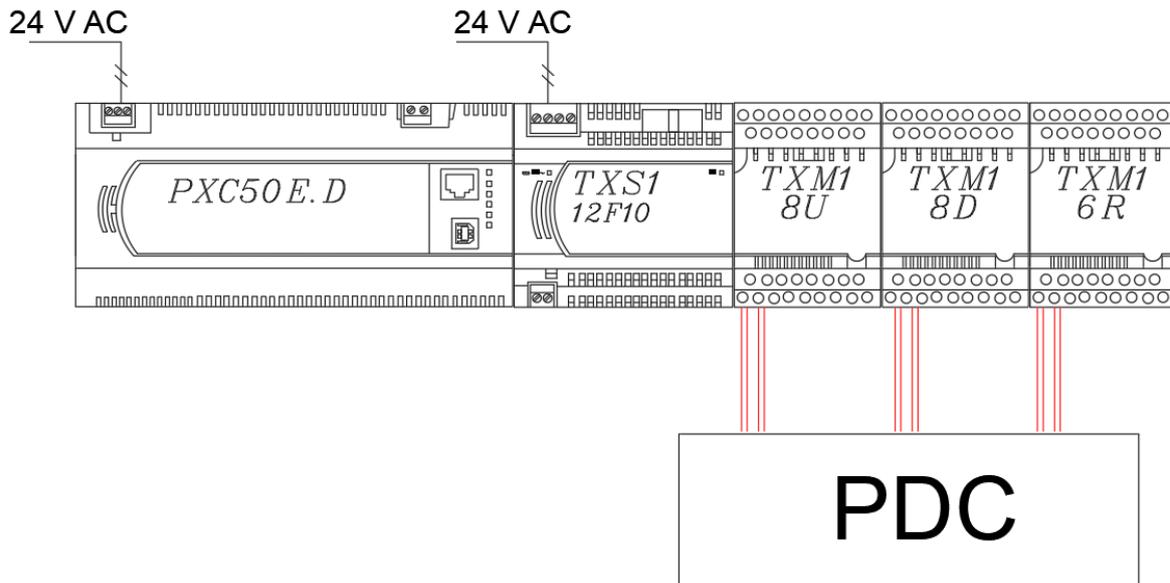


Figura 34 Collegamento tra pompa di calore e automation station senza Modbus

L'installazione classica richiede la posa di 2 fili tra il quadro elettrico e la pompa di calore per ogni punto, quindi un totale di 12 fili.

#### Alternativa 2: Installazione con Modbus.

Se con l'installazione classica volessimo acquisire anche i valori di temperatura in uscita dalla macchina, dovremmo aggiungere delle sonde apposite, mentre la soluzione Modbus permette di ricavare queste informazioni sfruttando la componentistica già presente a bordo macchina e necessaria per il suo corretto funzionamento. Inoltre, la soluzione Modbus permette di acquisire “gratuitamente” più punti di quella classica e in generale tutti quelli messi a disposizione dal

costruttore. Grazie al BMS questi dati possono essere registrati consentendo di diagnosticare le cause di eventuali guasti e anomalie in maniera rapida, senza l'intervento di personale tecnico specializzato e a distanza (se la configurazione del BMS lo prevede).

Tabella 10 Alcuni tra i punti aggiuntivi acquisibili tramite Modbus rispetto alla soluzione classica.

Pompa di calore Clivet		
Nome	U.M.	Tipo di punto
Modo Attuale	-	DI
Setpoint Utilizzo Attuale	°C	AI
N° Compressori On <i>È un multistato: 0-1-2. Servono 2 DI.</i>	-	DI
Warning	-	DI
Richiesta Utilizzo	%	AI
Temperatura In Utilizzo	°C	AI
Temperatura Out Utilizzo	°C	AI
Temperatura Out Sorgente	°C	AI

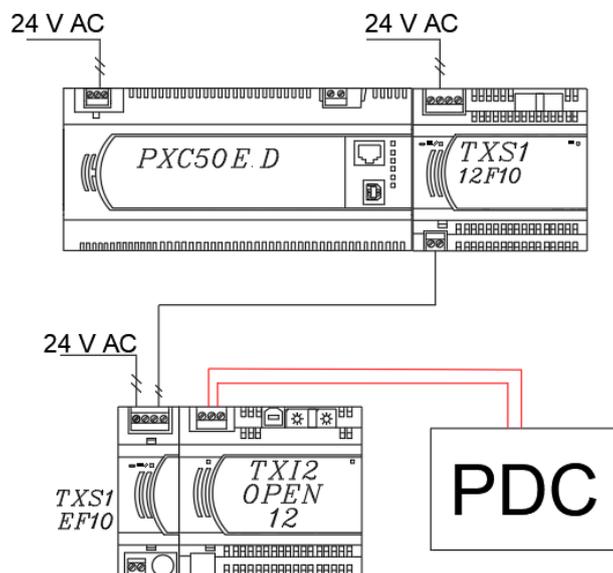


Figura 35 Collegamento tra pompa di calore e automazione station tramite Modbus

L'utilizzo del bus consente di acquisire tutti i punti attraverso il modulo TXI.2OPEN con soli 2 fili tra il quadro elettrico e la pompa di calore.

L'elettronica del BMS con la soluzione Modbus è più onerosa, ma generalmente i costi complessivi sono inferiori grazie ai risparmi sulla posa dei cavi elettrici e sulla strumentazione aggiuntiva necessaria per l'acquisizione degli AI.

La possibilità di integrare via Modbus dei dispositivi in un BMS è presente sugli impianti da circa un decennio, ma finora ha coinvolto solo qualche dispositivo (un gruppo frigo, uno o più multimetri). A Maison Lostan questa scelta è stata fatta in fase di progetto, cercando di integrare via Modbus tutti i componenti che lo permettevano: le pompe di calore Clivet, le pompe di circolazione Wilo, i multimetri elettrici e gli inverter Danfoss delle pompe di pozzo.

### 2.3.4 Modbus RS-485

Questo paragrafo descrive il protocollo che permette di gestire in maniera remota le due pompe di calore e tutte le pompe di circolazione di Maison Lostan al fine di integrarle all'interno del BMS.

Il protocollo MODBUS definisce il formato e la modalità di comunicazione tra un "master" che gestisce il sistema e uno o più "slave" che rispondono alle interrogazioni del master. Il protocollo definisce come il master e gli slave stabiliscono ed interrompono la comunicazione, come trasmettitore e ricevitore devono essere identificati, come i messaggi devono venire scambiati e come gli errori rilevati.

Il protocollo è caratterizzato da un limite logico che consente di connettere un master e fino a 247 slave anche se l'interfaccia fisica può limitare ulteriormente il numero di dispositivi. Per esempio, l'interfaccia standard RS-485 prevede un massimo di 31 slave connessi alla linea, tuttavia sostituendo l'ultimo elemento della linea con un apposito "bridge o ripetitore", si possono connettere altri 31 slave e così via sino al raggiungimento del numero massimo logico di dispositivi connessi.

Una transazione può essere avviata solo dal master e può avere il formato domanda/risposta diretta ad un singolo slave o broadcast in cui il messaggio viene inviato a tutti i dispositivi sulla linea che non danno risposta. Dopo una richiesta si ha quindi una risposta o una pausa e nessun'altra richiesta potrà essere inoltrata senza prima attendere una risposta o una pausa.

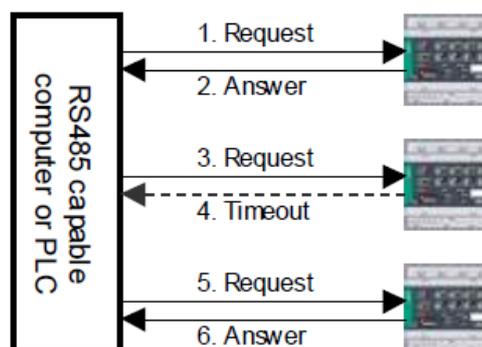


Figura 36 Comunicazione Master-slave su Modbus RS485

Per poter comunicare tra due dispositivi, il messaggio deve essere contenuto in un "involucro". MODBUS stabilisce il formato di questo involucro che, tanto per il master che per lo slave, comprende:

- l'indirizzo del dispositivo con cui il master ha stabilito la transazione (l'indirizzo 0 corrisponde ad un messaggio broadcast inviato a tutti i dispositivi slave);
- il codice della funzione che deve essere o è stata eseguita;
- i dati che devono essere scambiati;
- il controllo d'errore composto secondo l'algoritmo CRC16.

Se un dispositivo individua un errore nel messaggio ricevuto il messaggio viene considerato non valido e scartato. Uno slave che rilevi un errore nel messaggio quindi non eseguirà l'azione e non risponderà alla domanda, così come se l'indirizzo non corrisponde ad un dispositivo in linea.

Per identificare il destinatario del messaggio viene trasmesso come primo carattere un byte che contiene l'indirizzo numerico del dispositivo slave selezionato. Ciascuno degli slave quindi avrà assegnato un diverso numero di indirizzo che lo identifica univocamente. Gli indirizzi ammissibili sono quelli da 1 a 247, mentre l'indirizzo 0, che non può essere assegnato ad uno slave, posto in testa al messaggio trasmesso dal master indica che questo è "broadcast", cioè diretto a tutti gli slave contemporaneamente. Possono essere trasmessi come broadcast solo messaggi che non richiedano risposta per espletare la loro funzione, quindi solo le assegnazioni.

Il secondo carattere del messaggio identifica la funzione che deve essere eseguita nel messaggio trasmesso dal master, cui lo slave risponde a sua volta con lo stesso codice ad indicare che la funzione è stata eseguita. Ogni dispositivo presenta due registri: l' Holding Register e l' Input Register. Il primo di essi può essere scritto o letto mentre il secondo può essere solamente letto. Al fine di chiarire questo concetto in Tabella 11 e

Tabella 12 sono riportati, seppur in maniera parziale, tali registri per una pompa di circolazione Wilo. Tra le funzioni più comuni e utilizzate troviamo la lettura e la scrittura dei registri.

Tramite il *set value* dell'holding register è possibile impostare la velocità o la pressione (a seconda dell'operation mode) desiderata in percentuale. Valori inferiori ai valori minimi (di velocità o pressione) vengono ignorati e la pompa gira al suo valore minimo.

Tramite l'indirizzo 40 dell'holding register si può spegnere la pompa o accenderla in modo che funzioni secondo la logica selezionata. È possibile inoltre farla girare al valore minimo o massimo impostato.

Gli ultimi due caratteri del messaggio contengono il codice di ridondanza ciclica (Cyclic Redundancy Check) calcolato secondo l'algoritmo CRC16. Il controllo CRC è molto diffuso perché la sua implementazione binaria è semplice da realizzare, richiede conoscenze matematiche modeste per la stima degli errori e si presta bene a rilevare errori di trasmissione su linee affette da elevato rumore di fondo.

Con il Modbus RS485 si possono coprire distanze fino a 1200 metri. La velocità espressa in bit per second è detta *baudrate* e tutti i dispositivi appartenenti a una stessa rete modbusRS485 devono avere lo stesso baudrate per poter comunicare tra di loro. I tipici range vanno da 9600 a 19200 bit per second. La topologia di una rete Modbus RS485 è seriale: tutti gli elementi sono collegati in serie.

Tabella 11 Input Register di una pompa di circolazione Wilo

Input register address	Description	Unit
1	Actual Differential Pressure	0.1 m WS <sup>1</sup>
2	Flow Rate	0.1 m <sup>3</sup> /h
3	Power Consumption	1 kWh
4	Power Rating	1 W
5	Operation Hours	10 h
6	Mains Current	0.1 A
7	Speed	1 rpm
8	Medium Temperature	0.1 K
10	Current Operation Mode	See Table 5.3.
16	Pump Module	See Table 5.6.
17	Pump Type	-
18	Max Speed	1 rpm
19	Min Speed	1 rpm
20	Max Pressure $\Delta p$ -c	0.1 m WS <sup>1</sup>
21	Min Pressure $\Delta p$ -c	0.1 m WS <sup>1</sup>
22	Max Pressure $\Delta p$ -v	0.1 m WS <sup>1</sup>
23	Min Pressure $\Delta p$ -v	0.1 m WS <sup>1</sup>
24	Max Flow Rate	0.1 m <sup>3</sup> /h
25	Min Flow Rate	0.1 m <sup>3</sup> /h

Tabella 12 Holding Register di una pompa di circolazione Wilo

Holding register address	Description	Unit
1	Set Value	0.5%
40	Pump Command	See Table 5.2
42	Operation Mode	See Table 5.3
44	Tmin for $\Delta p$ -T	0.1 K
45	Tmax for $\Delta p$ -T	0.1 K
46	pmin for $\Delta p$ -T	0.1 m WS <sup>1</sup>
47	pmax for $\Delta p$ -T	0.1 m WS <sup>1</sup>

# Capitolo 3 - Controllo e regolazione dell'impianto di Maison Lostan

---

Il condizionamento dell'intero edificio viene realizzato grazie alla produzione di fluido caldo e freddo in centrale termofrigio. Essendo l'edificio particolarmente esteso, possono verificarsi richieste eterogenee contemporanee e il loro soddisfacimento può avvenire grazie alla presenza di due pompe di calore reversibili.

Utilizzando valvole a tre vie deviatrici le pompe di calore possono essere temporaneamente escluse per ottenere fluido tecnico freddo alla temperatura di 11-12°C tramite free-cooling: lo scambio termico con il fluido geotermico avviene all'interno di scambiatori a piastre e la spesa energetica si riduce alla sola movimentazione dei fluidi.

Uno sfruttamento ottimale del raffreddamento gratuito dell'acqua comporta sensibili incrementi del rapporto di efficienza energetica stagionale dell'intero impianto e una riduzione dei costi di gestione.

## 3.1 CFC Editor

Per la progettazione e l'elaborazione delle logiche di funzionamento a bordo delle automation station viene utilizzato il software XWORKS, specifico per i controllori Desigo PX.

Il linguaggio di programmazione, il D-MAP (Desigo Modular Application Programming), è ottimizzato per applicazioni legate agli impianti tecnici dell'edificio. Le strategie di controllo e gestione vengono implementate tramite un linguaggio a blocchi di tipo grafico usando il *CFC Editor*. Il software è dotato di librerie contenenti *blocchi* e *compound* (insiemi di blocchi), ognuno dei quali rappresenta una funzione o un componente (es.: avvio impianto, pompa, pompe gemellari, ventilatore, operatori logici) che mediante opportuni collegamenti consentono di realizzare la rete attraverso la quale i dati in arrivo dal field level vengono smistati ed elaborati.

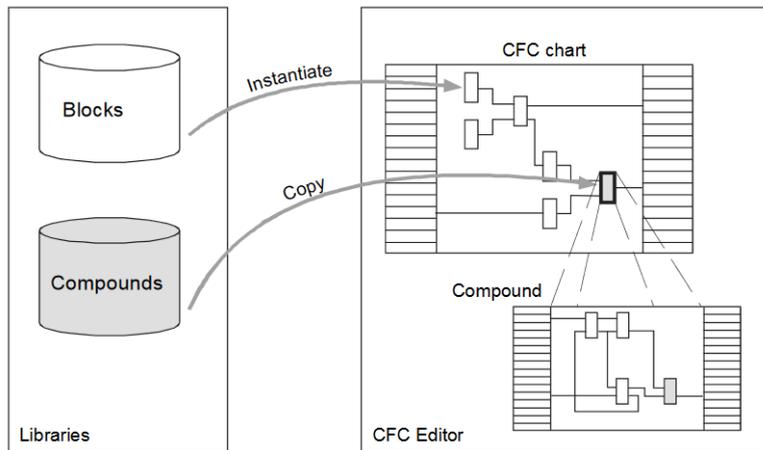


Figura 37 Composizione di un CFC Chart

## 3.2 Descrizione della logica di regolazione

### 3.2.1 Pannelli radianti a pavimento

Ogni ambiente è dotato di un regolatore da parete con display RDG165KN che comunica con la relativa automation station su bus KNX. Tale regolatore, tramite apposite sonde, acquisisce i valori di temperatura ambiente e umidità relativa e li comunica al BMS che, tra le altre cose, sfrutta queste informazioni per il calcolo del punto di rugiada. Il BMS, invece, comunica ai regolatori le informazioni relative alla stagione in corso e all'orario di funzionamento.

Per mantenere la temperatura desiderata (personalizzabile dall'utente), il regolatore interviene sulla valvola di zona on-off del relativo circuito pannelli a pavimento mantenendola aperta fino al raggiungimento del setpoint di temperatura.

Dal confronto della temperatura ambiente misurata con il setpoint impostato dall'occupante viene inoltre generata una richiesta espressa da un valore percentuale compreso tra -100 e 100, in cui i valori negativi rappresentano una richiesta di freddo e, al contrario, quelli positivi una necessità di caldo (Figura 38).

Dal punto di vista idraulico sono presenti due circuiti per i pannelli della manica nord e sud rispettivamente. Si tratta di circuiti miscelati e l'avviamento è legato all'effettiva richiesta degli ambienti, infatti la richiesta da parte del primo ambiente provoca l'accensione delle pompe del circuito alla velocità massima. La temperatura di questi circuiti è regolata, durante la stagione invernale, dalla valvola miscelatrice in funzione della temperatura esterna secondo la curva di compensazione in Figura 39. All'aumentare della temperatura esterna si riducono infatti le perdite

per trasmissione e ventilazione e di conseguenza un minore carico termico è richiesto dall'edificio che può essere soddisfatto con temperature di mandata inferiori.

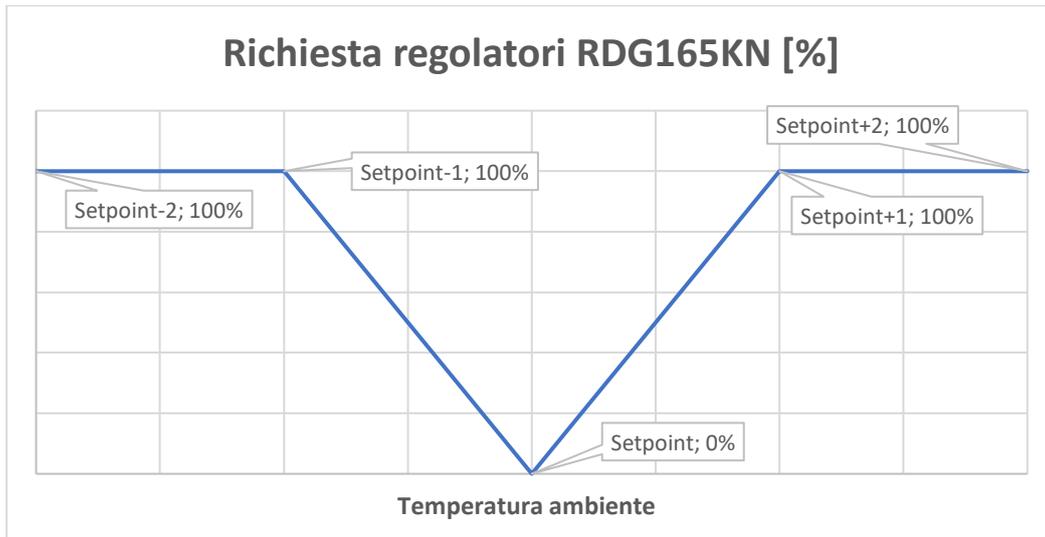


Figura 38 Valori della richiesta di caldo o freddo in funzione della temperatura ambiente

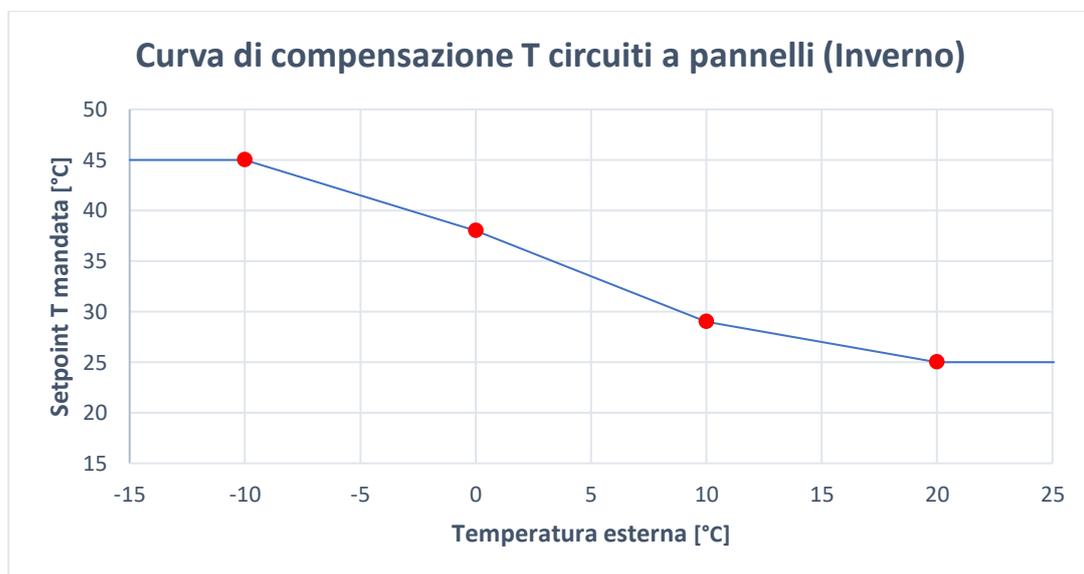


Figura 39 Curva climatica temperatura mandata pannelli radianti

Gli effetti di questa accortezza sono molteplici:

- riduzione delle perdite dovute alla distribuzione dei fluidi;
- funzionamento meno discontinuo degli apparecchi;
- aumento del COP delle pompe di calore.

La regolazione di tipo climatico consente di minimizzare l'inerzia termica del pavimento, infatti inviando ai pannelli fluido alla minima temperatura necessaria a far fronte al fabbisogno termico si limita anche il calore accumulato nel pavimento.

La richiesta degli ambienti è continuamente monitorata e nel caso in cui almeno una di esse raggiunga il valore massimo e tale valore persista per almeno 10 minuti si ha una ridefinizione della curva di compensazione. Ogni punto viene traslato verso l'alto di 20°C tenendo presente il limite massimo di 45°C. La ridefinizione della curva avviene in maniera lineare nel tempo su un intervallo di 5 minuti (Figura 40).

Non appena tutte le richieste degli ambienti scendono al di sotto del valore massimo, la curva di compensazione torna al suo valore standard.

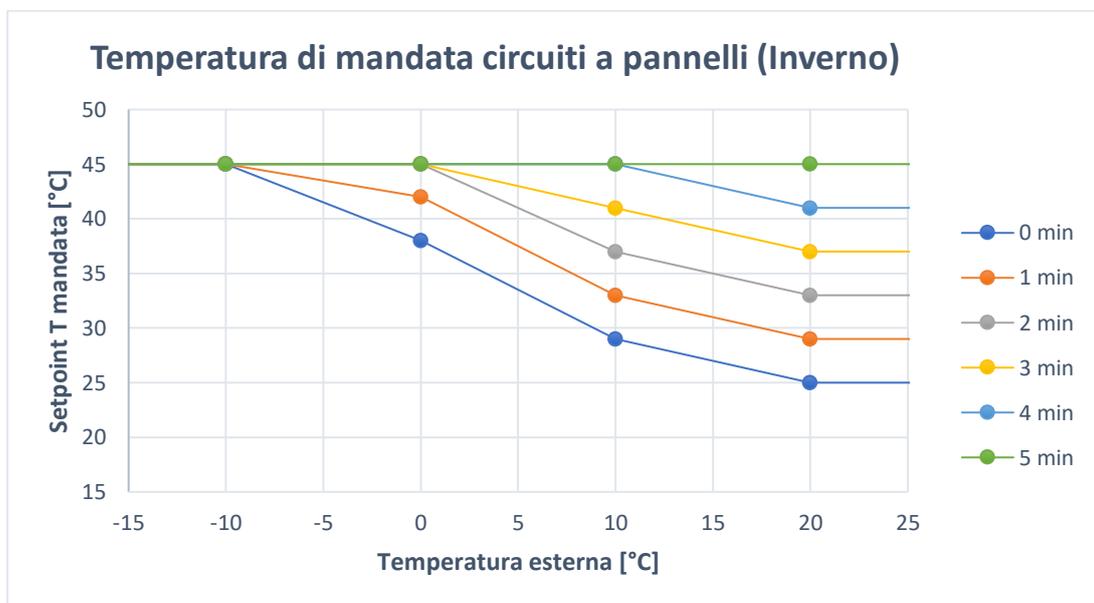


Figura 40 Variazione della curva climatica nel tempo al persistere della richiesta massima

Per impedire che acqua a temperatura troppo elevata possa fluire nel circuito a pavimento, è stato previsto un termostato di sicurezza che, nel caso in cui essa superi la temperatura di 50°C, spegne la pompa di circolazione e chiude la valvola.

La temperatura di mandata ai pavimenti è di 15°C se la stagione in corso è quella estiva. Analogamente a ciò che accade nel periodo invernale, si può avere una ridefinizione della curva di taratura con una traslazione massima verso il basso di 3°C.

Il BMS, grazie ai valori di umidità relativa e temperatura provenienti dai regolatori ambiente, calcola la temperatura di rugiada per ogni ambiente e ne determina il massimo, dopodiché usa

tale valore per limitare la temperatura di mandata ai pannelli ed evitare problemi di condensazione. È inoltre adottato un margine di sicurezza pari a 1°C.

### **3.2.2 Regolazione UTA Archivi**

Negli archivi è l'unità trattamento aria ad occuparsi della regolazione della temperatura. Quest'unità è dotata di un recuperatore a flussi incrociati che consente una forte riduzione dei consumi.

È presente un gruppo serrande costituito da 3 elementi coniugati modulanti e la logica attuale prevede che la serranda esterna sia aperta al 30% per garantire un continuo rinnovo dell'aria.

L'UTA degli archivi non è dotata di batteria di raffreddamento, per cui non è possibile deumidificare. Il raffrescamento degli archivi è possibile in modalità free cooling quando la temperatura dell'aria esterna è inferiore a quella interna. Se vi è una richiesta di freddo e le condizioni precedenti sono verificate, l'aria proveniente dall'esterno bypassa il recuperatore e l'impianto va in tutta aria esterna. Una logica analoga può far funzionare l'unità trattamento aria in free heating.

È possibile umidificare l'aria attivando la pompa del lavatore adiabatico e mantenere l'umidità relativa al di sopra del 40%.

La regolazione avviene sulla temperatura di ripresa mantenendo i setpoint di temperatura e umidità relativa impostati tramite il management level del BMS. Le due batterie calde sono servite da un unico gruppo pompe gemellari che viene azionato alla massima velocità all'arrivo della prima richiesta di caldo da parte di una di esse. Se vi è richiesta di caldo, la batteria del preriscaldamento è regolata mediante la propria valvola a 3 vie miscelatrice mantenendo la temperatura a valle dell'umidificatore a 18°C. Per quanto riguarda la batteria del postriscaldamento, l'azione sulla relativa valvola a 3 vie è determinata dalla differenza tra il valore di 18 °C e la temperatura desiderata in ripresa.

Le valvole a 3 vie vengono comandate attraverso un controllore proporzionale-integrale PI. Una regolazione di questo tipo è necessaria poiché il controllo proporzionale, pur essendo veloce, non porta mai la variabile controllata al valore di setpoint: la regolazione dipende dal carico e ha una differenza di controllo residua. Il controllore integrale è meno reattivo, ma continua ad agire fino al raggiungimento del setpoint desiderato.

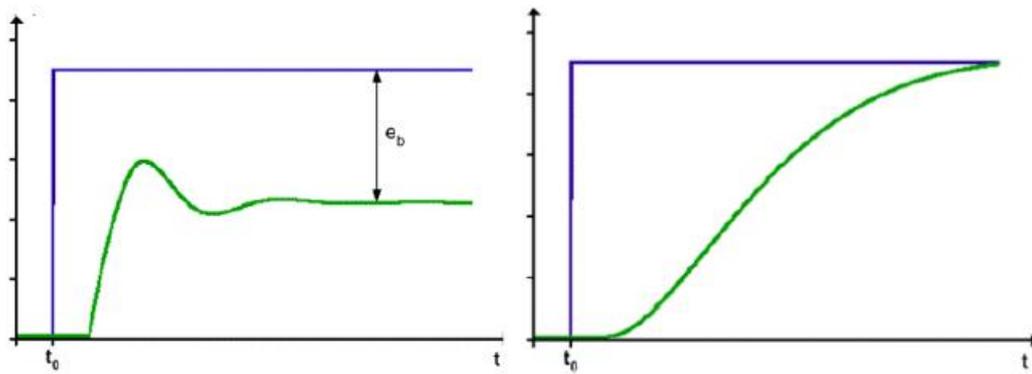


Figure 41 A sinistra: controllore proporzionale. A destra: controllore integrale

Combinando un controllore P e un controllore I, gli svantaggi dei singoli controllori vengono eliminati e i vantaggi uniti:

- la velocità del controllore P bilancia la lentezza del controllore I;
- il controllore I continua ad agire fino al raggiungimento del valore desiderato eliminando la differenza di controllo del controllore P.

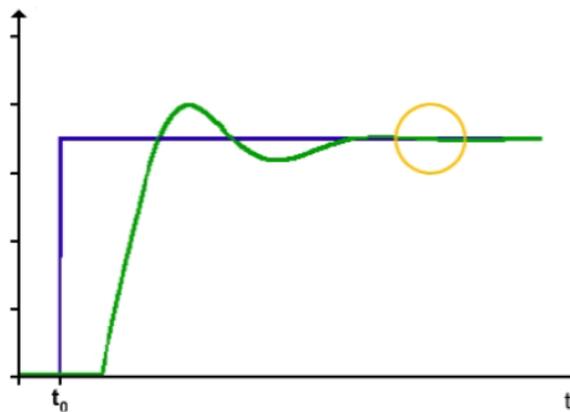


Figura 42 Controllore PI.

La temperatura di mandata dell'acqua verso le batterie calde dipende dalla temperatura esterna secondo la curva riportata in Figura 43. Come per i pannelli vi è un incremento della temperatura dell'acqua di alimentazione delle batterie calde in caso di richieste massime prolungate.

I ventilatori di mandata e di ripresa lavorano in continuo a una velocità fissa pari al 70% della velocità massima.

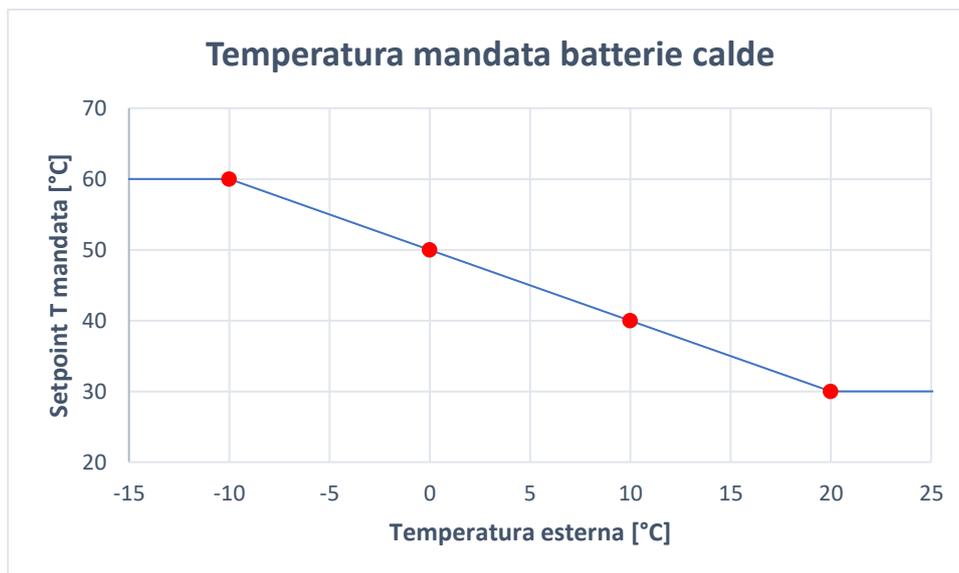


Figura 43 Curva climatica temperatura di mandata batterie calde UTA Archivi

### 3.2.3 Regolazione UTA Nord e Sud

Le UTA presenti nelle sottocentrali Nord e Sud sono dotate di recuperatori di calore la cui pompa entra in funzione se il valore assoluto della differenza tra la temperatura esterna e la temperatura in ripresa supera i 3°C. Quest'accortezza è dettata dalla necessità di giustificare la spesa energetica della pompa del circuito del recuperatore. Essendo il circuito del recuperatore senza reintegro automatico è stato installato su di esso un pressostato che segnala un allarme in caso di bassa pressione. Il circuito del recuperatore è glicolato, in quanto durante la stagione invernale la batteria del recuperatore sulla presa aria esterna è investita da un flusso d'aria con temperatura nettamente inferiori allo zero.

La regolazione della temperatura è fatta sulla mandata, in modo da garantire un valore compreso tra i 19 e i 21°C.

I ventilatori delle UTA Nord e Sud sono del tipo on/off e quando accesi forniscono una portata di molto superiore alla minima necessaria a garantire i ricambi. Si è quindi deciso di regolare la temperatura di mandata in funzione della temperatura esterna in modo da fornire parte dell'energia termica necessaria al raggiungimento del setpoint ambiente (Figura 44).

La richiesta di deumidificazione viene attivata se l'umidità relativa in ripresa supera il 50%. Per causare la condensazione del vapore d'acqua presente nell'aria la pompa di calore viene attivata per produrre acqua a 7°C.

L'umidificazione viene attivata per valori di umidità relativa in ripresa inferiori al 40%.

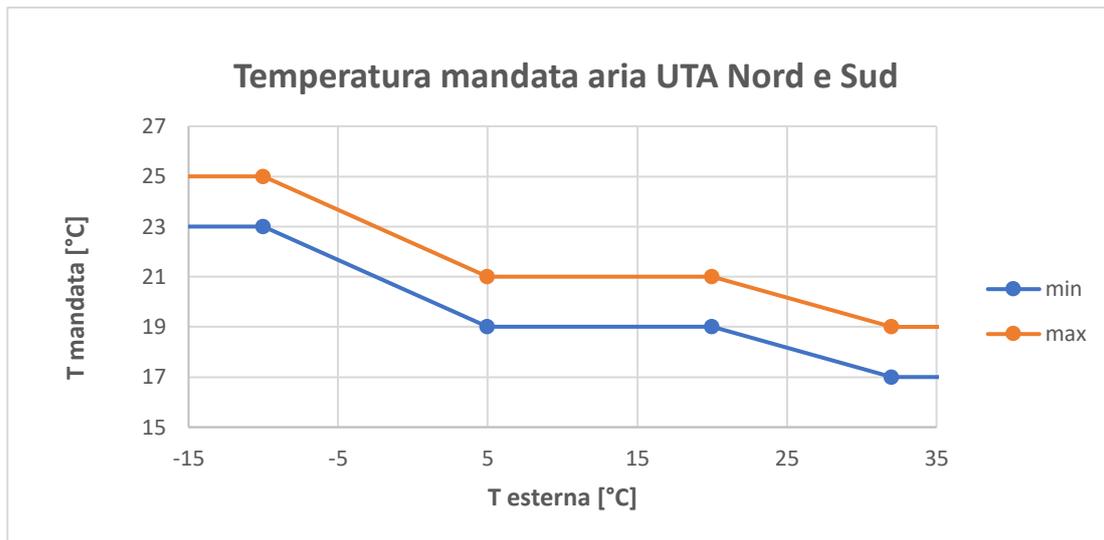


Figura 44 Curva climatica temperatura di mandata UTA Nord e Sud

Se è richiesto il raffrescamento ma non la deumidificazione, viene sfruttato il fluido prodotto tramite free cooling con l'acqua geotermica mantenendo spenta la pompa di calore.

Se vi è richiesta di riscaldamento, la valvola a tre vie miscelatrice della batteria di preriscaldamento è regolata, tramite un controllo proporzionale-integrale, mantenendo la temperatura a valle dell'umidificatore a 18°C. Per quanto riguarda la batteria del postriscaldamento, l'azione sulla relativa valvola a tre vie è determinata dalla differenza tra il valore di 18 °C e la temperatura desiderata in mandata. La temperatura dell'acqua di alimentazione delle batterie calde è funzione della temperatura esterna secondo il profilo di Figura 43.

Se vi è invece richiesta di raffreddamento le batterie fredde vengono alimentate con acqua a 12°C, indipendentemente dalla temperatura esterna, ma se la potenza termica non è sufficiente a soddisfare la richiesta questo setpoint è abbassato a 7°C.

L'apertura della valvola a tre vie sul circuito della batteria di raffreddamento è determinata da due richieste. La prima è funzione dello scostamento tra la temperatura a valle della batteria fredda e il setpoint desiderato in mandata, mentre la seconda dipende dall'umidità relativa misurata in ripresa (quest'ultima richiesta viene inoltrata solo se il valore misurato è superiore al valore soglia pari al 50%). Il BMS calcola il massimo delle due richieste e regola la valvola in base a tale valore.

Le pompe dei circuiti delle batterie UTA si accendono su richiesta portandosi al valore di velocità massima.

### 3.2.4 Regolazione circuito radiatori Archivi

Sono stati previsti dei circuiti non miscelati per i radiatori dei servizi, in cui la temperatura di mandata dipende dalla temperatura esterna (Figura 45). Le pompe di questo circuito sono del tipo on/off e seguono una programmazione oraria.

### 3.2.5 Regolazione circuito radiatori sottocentrali Nord e Sud

La regolazione è analoga a quella prevista per i radiatori degli archivi. L'unica differenza è nella gestione di pompe. In questo caso si hanno a disposizione dei gruppi gemellari a velocità variabile che tuttavia vengono comandati via Modbus a velocità massima secondo una programmazione oraria.

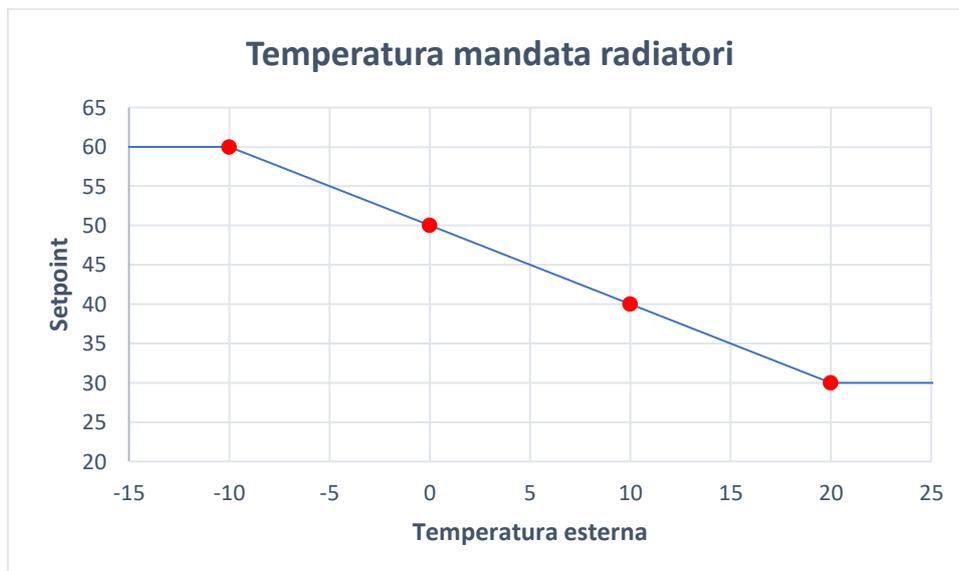


Figura 45 Curva climatica temperatura mandata circuito radiatori

### 3.2.6 Regolazione ventilconvettori

L'accensione dei ventilconvettori può avvenire solo se la stagione in corso è quella di riscaldamento. L'avvio della ventola dell'apparecchio è comandato dal relativo regolatore ambiente qualora la richiesta fosse maggiore di zero. Questi terminali sono serviti dalle stesse pompe adibite al circuito dei radiatori, per cui il comando da parte del regolatore su di essi viene disabilitato al di fuori del range orario previsto.

### 3.2.7 Regolazione centrale termofrigo

In centrale sono presenti un collettore di mandata per l'acqua calda e uno per l'acqua refrigerata e su ognuno di essi sono poste 3 pompe. L'avvio di quest'ultime avviene non appena vi è una richiesta dalle sottocentrali.

Le pompe sono gestite mantenendo una differenza di pressione tra il collettore di mandata e quello di ritorno pari a 15 kPa. Su questo principio il BMS decide se far partire una o due pompe e ne modula la velocità. Il sistema di gestione è inoltre responsabile di garantire l'uniformità di funzionamento accendendo la pompa che ha girato per un numero di ore inferiore.

Il massimo delle temperature delle richieste di riscaldamento delle utenze determina il setpoint dell'accumulo caldo e il minimo delle temperature delle richieste di raffrescamento delle utenze determina il setpoint dell'accumulo freddo. Tali valori sono utilizzati per la regolazione della temperatura di mandata delle pompe di calore:

$$\text{Setpoint } pdc \text{ (Riscaldamento)} = \text{Setpoint Accumulo AC} + 5^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Setpoint } pdc \text{ (Raffreddamento)} = \text{Setpoint Accumulo AR}$$

Se la temperatura dell'accumulo caldo non è al valore richiesto si ha l'avvio di una pompa di calore in caldo. Le unità di produzione sono dotate di un controllore autonomo che stabilisce l'avvio e l'arresto dei compressori. Può accadere che, nonostante l'accumulo abbia raggiunto il setpoint richiesto, la pompa di calore continui a funzionare poiché quest'ultima gestisce autonomamente i tempi minimi di marcia ed arresto.

Tramite Modbus dal BMS parte il comando di accensione anche per la seconda pompa in caldo se dopo 15 minuti la prima si trova a lavorare in condizioni di massimo carico e cioè con entrambi i compressori accesi. La richiesta di caldo ha priorità sul freddo, per cui in caso di richiesta contemporanea si avrà l'accensione di una pompa di calore in raffreddamento (o in free-cooling) solo se il soddisfacimento del carico termico può essere affrontato con una sola pompa di calore accesa in caldo.

Sotto consiglio tecnico dell'azienda produttrice delle pompe di calore, dopo aver registrato il blocco di una delle due macchine in modalità riscaldamento, le pompe di circolazione lato sorgente sono mantenute alla velocità massima.

### 3.2.8 Regolazione pompe geotermiche

L'accensione delle pompe geotermiche è determinata dall'accensione di uno dei compressori delle pompe di calore o dalla richiesta di free cooling. La velocità minima delle pompe di sollevamento è stata limitata all'80% del valore nominale per ragioni di prevalenza.

La temperatura dell'acqua di ritorno allo scambiatore a piastre, letta via Modbus dalle pompe di calore, gestisce la velocità della pompa geotermica in modo da mantenere tale temperatura all'interno di un range prestabilito. Il BMS inserisce i due scambiatori in sequenza per mantenere la temperatura in uscita dalle pompe di calore tra i 5 ed i 45 °C, come richiesto dal costruttore.

Il BMS regola la temperatura dell'acqua in uscita lato sorgente della pompa di calore in funzione. Se sono entrambe attive garantisce che la minima delle due temperature non scenda sotto i 5 °C e che la massima delle due non superi i 45 °C.

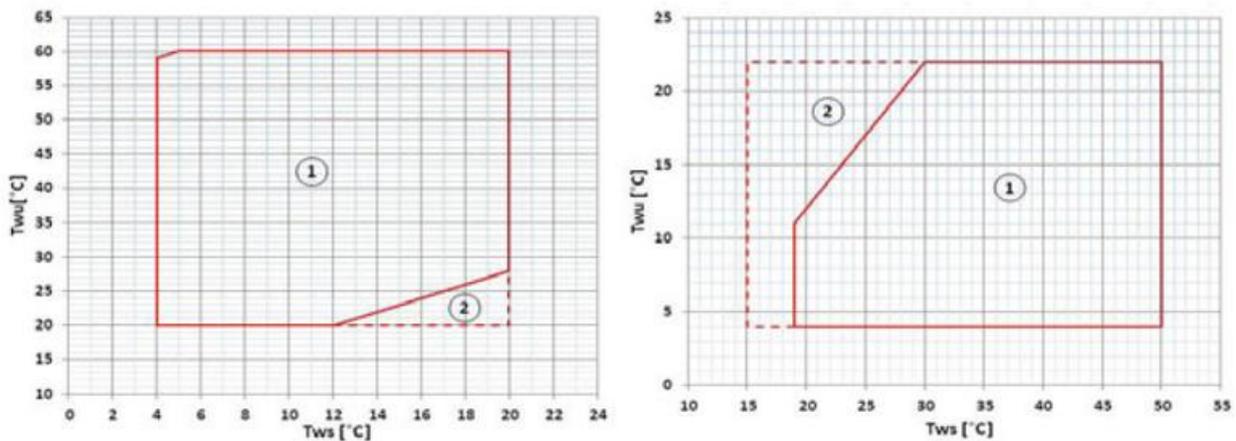


Figure 46 Limiti di funzionamento delle pompe di calore. A sinistra: modalità riscaldamento. A destra: modalità raffreddamento.  $T_{wu}$ =Temperatura acqua in uscita lato utilizzo [°C];  $T_{ws}$ =Temperatura acqua in uscita lato sorgente. I limiti sono riferiti a  $\Delta T=5^{\circ}\text{C}$  sia lato sorgente che lato utilizzo.

Nel caso in cui il BMS riceva una richiesta di reintegro da parte della vasca di irrigazione, le pompe geotermiche sono portate di colpo a 50 Hz.

# Capitolo 4 - Osservazioni sperimentali e sviluppi futuri

## 4.1 COP centrale termofrigo generazione

Di seguito sono riportati gli assorbimenti di energia elettrica dei componenti appartenenti alla centrale termofrigo coinvolti nella generazione di fluido tecnico (Tabella 13).

Tutti i dati sono stati acquisiti tramite Modbus RS485 ad eccezione dei consumi delle pompe di calore che sono stati ottenuti per differenza tra il consumo totale e i contributi dovuti agli altri apparecchi. Per poter effettuare il monitoraggio delle singole unità è stata richiesta l'installazione di multimetri elettrici dedicati: in questo modo è possibile calcolare i rendimenti anche nel caso in cui il regime di funzionamento delle macchine non sia lo stesso (ad esempio una in riscaldamento e l'altra in raffreddamento). Inoltre, bisogna considerare che per una valutazione più precisa delle prestazioni andrebbero evitate le attribuzioni per differenza in modo da non risentire dei problemi dovuti ad altri misuratori.

Tabella 13 Assorbimenti elettrici centrale termofrigo generazione.

<b>Modo Attuale: Riscaldamento</b>			
<b>Periodo: da 06/03/2018 06:00:00 a 20/03/2018 12:00:00</b>			
<b>Componente</b>	<b>Consumo</b>	<b>U.M.</b>	
Energia elettrica pompa geotermica 1	688	kWh	5,29%
Energia elettrica pompa geotermica 2	1196	kWh	9,20%
Energia termica AC	30900	kWh	
Energia elettrica totale centrale termofrigo	12998	kWh	
Energia elettrica pompa 1 primario pdc1	79	kWh	0,61%
Energia elettrica pompa 2 primario pdc1	80	kWh	0,62%
Energia elettrica pompa 1 primario pdc2	326	kWh	2,51%
Energia elettrica pompa 2 primario pdc2	325	kWh	2,50%
Energia elettrica pompe di calore	10304	kWh	79,27%
COP pompe di calore		<b>2,999</b>	
COP centrale termofrigo generazione		<b>2,377</b>	

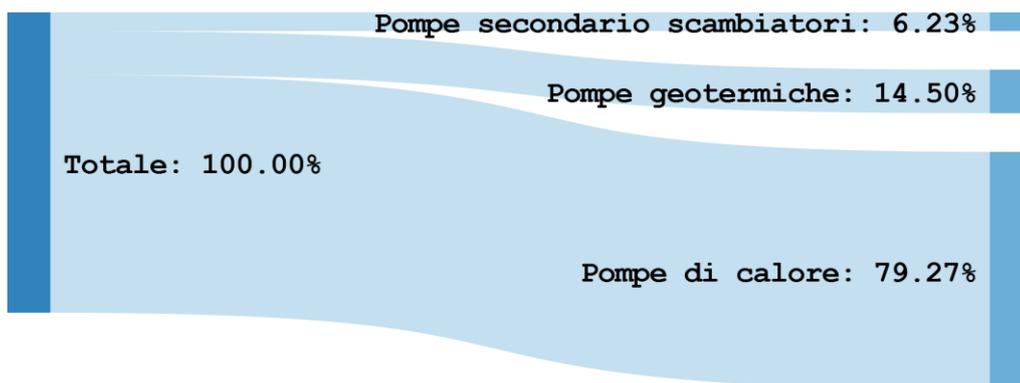


Figura 47 Diagramma Sankey

Grazie ai due misuratori di energia termica e ai multimetri dedicati alle pompe di calore recentemente installati, è possibile monitorare in maniera continua il COP delle due macchine inviando una notifica o una e-mail di allarme lieve qualora essi si discostino dai valori ottimali. In questo modo malfunzionamenti che non compromettono la produzione di liquido tecnico, ma che incidono sui costi energetici in maniera lineare con le ore di funzionamento, possono essere prontamente rilevati.

## 4.2 Rilevamento anomalie

Il cronoprogramma previsto dal costruttore ha previsto che l'impianto di Maison Lostan lavorasse per la produzione simultanea di fluido caldo e freddo nel periodo dal 23 aprile 2018 al 31 maggio 2018, tuttavia le condizioni meteo non hanno quasi mai attivato richieste di raffrescamento da parte dei circuiti a pannelli e le macchine hanno lavorato in regime di raffrescamento per periodi brevissimi. I dati raccolti dal BMS hanno comunque permesso di rilevare un'anomalia. Come mostrato in Figura 48, durante la notte il volume d'acqua contenuto nell'accumulo freddo si portava da una temperatura di 11-13°C a più di 40°C in circa due ore.

Attraverso prove eseguite in situ, avvalendosi dell'ausilio dei misuratori di portata e delle sonde di temperatura installate, sono stati ricercati flussi non previsti arrivando alla conclusione che le valvole a tre vie che gestiscono la commutazione delle pompe di calore in riscaldamento/raffrescamento erano oggetto di trafiletti non accettabili.

Il trafiletto dell'acqua calda avveniva sulla terza via (via ad angolo) delle valvole di commutazione. La soluzione adottata prevede di motorizzare le valvole di intercettazione manuali già presenti sulle tubazioni dell'acqua refrigerata tra la valvola a tre vie esistente e le

utenze AR. Ogni nuovo servocomando è comandato in parallelo al servocomando della valvola Siemens esistente.

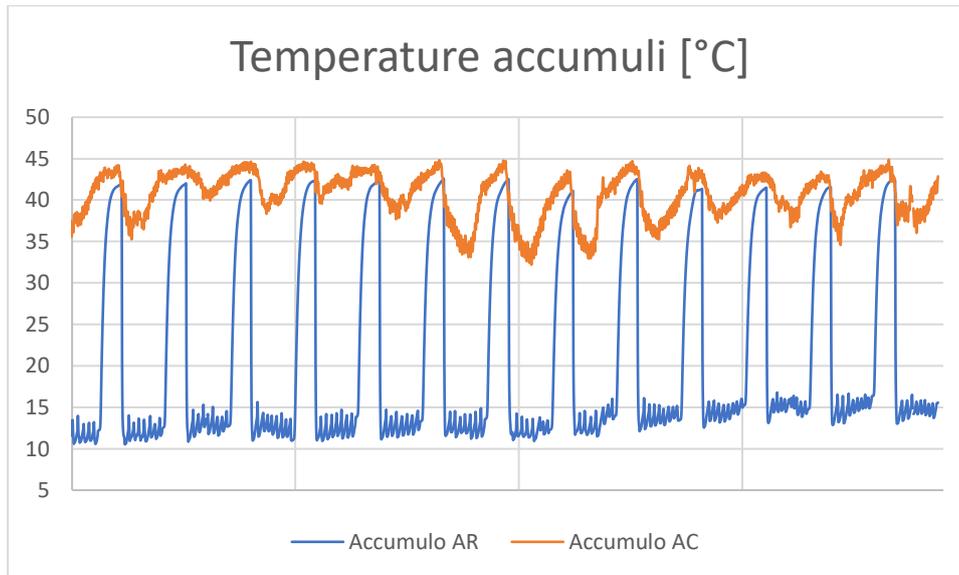


Figura 48 Temperature degli accumuli dal 17-05-18 al 31-05-18

## 4.3 Migliorie della logica di regolazione

### 4.3.1 Pompe

Tabella 14 Ottimizzazione della gestione delle pompe.

	<b>Funzionamento attuale</b>	<b>Funzionamento ottimizzato</b>
<b>Pompe geotermiche</b>	Velocità minima a 40 Hz e aumento in funzione della richiesta	Campo di regolazione più ampio
<b>Pompe secondario scambiatore</b>	Velocità massima	Funzionamento su richiesta in modo da rispettare i limiti di funzionamento delle pompe di calore.
<b>Pompe batterie UTA</b>	Velocità massima	$\Delta T$ costante
<b>Pompe radiatori sottocentrali Nord e Sud</b>	Velocità massima	Velocità in base al $\Delta p$
<b>Pompe pannelli a pavimento</b>	Velocità massima	Velocità in base al $\Delta p$

Le regolazioni basate sulla differenza di temperatura costante tra mandata e ritorno andrebbero implementate solo sul BMS in quanto le sonde di temperatura necessarie sono già presenti a bordo impianto. Per quanto riguarda invece la regolazione dei gruppi pompa dei pannelli radianti e dei radiatori sarebbe necessaria l'installazione di una sonda di pressione differenziale su ognuno di essi. Con una regolazione a differenza di pressione costante la portata in circolo

varierebbe in funzione dell'effettiva richiesta termica da parte dei terminali. Si potrebbe anche optare per una regolazione a differenza di pressione variabile, ma non conviene forzare troppo la pendenza della curva di regolazione. Con una tale regolazione si otterrebbero risparmi di gestione trascurabili correndo il rischio di non poter alimentare i terminali più sfavoriti [8].

Per quanto riguarda le pompe geotermiche sarebbe opportuno adottare una regolazione diversa da quella attuale per 3 motivi principali:

1. Riduzione dei consumi energetici;
2. Riduzione della portata riversata nel canale Mere des Rives;
3. Migliore regolazione della temperatura in uscita dalla pompe di calore lato sorgente al fine di rientrare nei limiti di funzionamento.

Per quanto riguarda il punto 1, attraverso prove in situ si è notato che la velocità minima delle pompe geotermiche corrisponde a 35 Hz. Sotto questo valore non si riesce a vincere l'altezza del pozzo e la pompa non innesca, ossia non si ha portata d'acqua che la attraversa. Ciò metterebbe a rischio la pompa che potrebbe bruciarsi perché percorsa da corrente elettrica senza essere raffreddata dal flusso d'acqua. La portata corrispondente a 35 Hz è 30 m<sup>3</sup>/h.

In secondo luogo, il consorzio che gestisce il Mere des Rives, nel quale viene riversata l'acqua di falda dopo il suo passaggio attraverso gli scambiatori, recentemente ha manifestato l'intenzione di modificare il contratto stipulato in fase di progetto con la Regione Valle d'Aosta (proprietaria dello stabile), esigendo il pagamento di 0,03 euro per ogni metro cubo d'acqua riversato. Questa spesa influisce sul bilancio energetico dell'impianto in maniera non trascurabile: considerando un funzionamento delle pompe geotermiche pari a 5000 ore annuali si tratterebbe di 150 €/anno per ogni metro cubo orario di acqua scaricata.

Infine, durante le prove di funzionamento in raffreddamento le pompe di calore hanno segnalato allarmi che ne hanno compromesso il funzionamento a causa del superamento dei limiti relativi alla temperatura dell'acqua di uscita lato sorgente. Un campo di regolazione sufficientemente ampio delle pompe geotermiche avrebbe consentito di superare questo problema e di ridurre al minimo il prelievo e lo scarico di acqua di falda, ma ciò non è stato possibile per le problematiche di prevalenza precedentemente illustrate. La portata di acqua di falda potrebbe comunque essere ridotta impostando un funzionamento pausa-impulso in sostituzione al funzionamento continuo della pompa, tuttavia questa possibilità è da valutare in relazione ai tempi minimi di accensione

e spegnimento indicati dal costruttore della pompa. Altre soluzioni, come l'installazione di valvola a tre vie, risulterebbero più invasive e comporterebbero un aumento dei costi di investimento.

Passando ora alla regolazione dei gruppi pompa sul secondario degli scambiatori a piastre e quindi relative al lato sorgente delle pompe di calore va premesso che in modalità raffreddamento le pompe di calore vanno in allarme se la temperatura dell'acqua in uscita lato utilizzo è inferiore ai 20 °C. Ciò accade poiché al ridursi della temperatura dell'acqua in uscita lato sorgente si riduce la pressione di condensazione fino ad arrivare in corrispondenza del minimo rapporto di compressione che comporta una segnalazione di allarme.

Per mantenere la temperatura a valori superiori a 20°C il BMS dovrebbe agire riducendo la portata dell'acqua spillata dalla falda, modulando la velocità delle pompe. Questo non è fattibile, in quanto per problemi di battente non si può scendere sotto i 35 Hz. L'unica strada percorribile è ridurre la portata delle pompe sul secondario degli scambiatori, garantendo il minimo richiesto dalla pompa di calore prima che questa vada in allarme per mancanza di flusso. Da prove sul campo si è riscontrato che tale minimo è comunque troppo elevato e la temperatura dell'acqua non raggiunge valori soddisfacenti per il funzionamento estivo.

Si è quindi agito nel modo seguente:

- In fase di raffreddamento la pompa di calore disabilita il controllo della presenza del flusso d'acqua riducendo la portata a valori minimi solitamente non permessi in fase di riscaldamento, in cui il controllo di flusso è attivo. L'unico controllo della pompa di calore in fase di raffrescamento è l'allarme di alta pressione gas. Finora le pompe di calore in raffreddamento andavano in allarme per eccesso di portata sul condensatore che comportava temperature molto basse e di conseguenza l'allarme per minimo rapporto di compressione.
- Se la pompa di calore è in raffreddamento, le pompe sul secondario dello scambiatore a piastre sono mantenute alla massima velocità dall'istante in cui viene richiesto l'avvio della pompa di calore fino ad un minuto dopo l'istante in cui parte almeno un compressore. Successivamente le pompe sono portate al 20 %, e viene aumentata la velocità solo se la temperatura dell'acqua in uscita dal primario della pompa di calore supera i 25 °C.
- In maniera analoga, se la pompa di calore è in riscaldamento, le pompe sul secondario dello scambiatore a piastre sono mantenute alla massima velocità dall'istante in cui viene

richiesto l'avvio della pompa di calore fino ad un minuto dopo l'istante in cui parte almeno un compressore. Successivamente le pompe sono portate al 50 %, e viene aumentata la velocità solo se la temperatura in uscita della pompa di calore scende sotto i 5 °C. La macchina generava allarmi per temperature inferiori ai 3 °C.

### **4.3.2 Regolatori ambiente**

Al momento i regolatori ambiente sono sempre accesi attivando i circolatori del circuito dei pannelli radianti quando la temperatura si discosta dal valore di setpoint. Sarebbe opportuno disattivare la richiesta di condizionamento da parte loro durante gli orari in cui non sarà presente personale nell'edificio (ad esempio di notte e nei fine settimana) una volta che lo stabile risulterà occupato.

La commutazione stagionale dei circuiti a pannelli a pavimento è al momento gestita in maniera manuale, ma grazie al BMS potrebbe essere automatizzata in modo da rispondere rapidamente a variazioni climatiche e del carico termico interno. Come accennato nel capitolo 3, ogni regolatore ambiente genera una richiesta espressa da un valore compreso tra -100 e 100, in cui i valori positivi corrispondono a richieste di caldo e quelli negativi a richieste di freddo. La media dei valori di richiesta dei locali appartenenti a un circuito potrebbe gestire la commutazione automatica del circuito in questione nel modo seguente:

- Media delle richieste superiore a 50: commutazione in caldo;
- Media delle richieste inferiore a -50: commutazione in freddo.

La presenza di una dead zone tra -50 e 50 è essenziale per evitare fluttuazioni da una modalità all'altra con conseguente affaticamento dell'impianto. Commutazioni troppo rapide, ad esempio da riscaldamento a raffreddamento, trasportano la massa d'acqua calda presente nel circuito fino all'unità di produzione del freddo. Quindi l'implementazione di queste logiche va in generale analizzata considerando i limiti di funzionamento delle pompe di calore. L'impianto di Maison Lostan lavora con temperature massime di circa 55°C e la logica di gestione varia i valori di mandata in funzione della temperatura esterna, per cui problemi di questo tipo non dovrebbero presentarsi.

### **4.3.3 Nigth Purging**

Durante periodi con elevate temperature diurne il night purging è utilizzato per ridurre il consumo di energia per il raffrescamento, soprattutto in edifici con elevata capacità termica, tramite un preraffrescamento con aria fresca notturna per il giorno seguente.

Durante questa modalità le serrande esterne sono completamente aperte, i ventilatori operano alla massima velocità e le pompe dei circuiti delle batterie di scambio termico e del recuperatore sono disattivati.

Il night purging è attivato se le seguenti condizioni sono simultaneamente soddisfatte:

- Il programma orario abilita il night purging;
- La temperatura ambiente è superiore al massimo valore impostato;
- La differenza tra temperatura ambiente media e temperatura esterna è superiore al valore impostato, in genere pari o superiore a 10°C.

## **4.4 Sviluppi futuri**

### **4.4.1 Fancoil**

Per i locali nei quali sono installati ventilconvettori si potrebbero montare delle sonde di presenza in modo da passare in regime di pre-comfort, cioè con un valore di setpoint ridotto, con locale non occupato.

In aggiunta va segnalato che se la temperatura ambiente è soddisfatta, il regolatore arresta la ventola del ventilconvettore, ma la batteria continua ad essere percorsa da acqua calda. Questo potrebbe causare surriscaldamenti del locale in pieno inverno, quando l'acqua viene inviata ai terminali alle temperature massime. L'installazione di valvole motorizzate sulle batterie consentirebbe un controllo più accurato della temperatura ambiente.

### **4.4.2 UTA Sottocentrali Nord e Sud**

Nella fase iniziale di messa a punto dell'impianto l'avvio di una delle due pompe di calore in freddo avveniva se almeno un'unità trattamento aria registrava sulla ripresa un valore di umidità relativa superiore al 50%. Per evitare accensioni spurie si è poi deciso di impostare un timer e di inoltrare la richiesta di accensione dopo 15 minuti di richiesta massima continua (valvola AR completamente aperta) da parte di almeno una delle due UTA.

I ventilatori delle UTA Nord e Sud forniscono una portata d'aria di rinnovo di 8000 m<sup>3</sup>/h. Una volta che tutti i locali saranno occupati l'edificio conterrà circa 80 persone, per cui considerando un ricambio di 40 m<sup>3</sup>/h, come indicato dalla norma UNI 10339 per un locale del tipo uffici, una portata di 3200 m<sup>3</sup>/h risulterà sufficiente. L'installazione di inverter permetterebbe una regolazione della velocità di rotazione dei ventilatori con conseguente riduzione della potenza elettrica assorbita da questi ultimi e della potenza termica necessaria a condizionare l'aria dalle condizioni di aspirazione a quelle di mandata. Con l'ulteriore installazione di una sonda di concentrazione di CO<sub>2</sub> sul canale di ripresa dell'aria si potrebbe attuare una regolazione continua della portata di aria di rinnovo in funzione dell'effettivo numero di occupanti (Figura 49).

La norma EN 13779 individua quattro categorie di qualità dell'aria interna basate sui valori di concentrazione di CO<sub>2</sub>. Per ottenere un alto livello di qualità dell'aria, corrispondente alla categoria IDA1, il valore di CO<sub>2, Limit</sub> andrebbe impostato a 350 ppm.

Il controllo della portata di aria in mandata potrebbe essere inoltre sfruttato per ottenere un controllo della temperatura ambiente più reattivo. Ad esempio, qualora il valore assoluto della media delle richieste provenienti dai regolatori ambiente attivi si mantenga superiore all'80% per più di 10 minuti si potrebbe incrementare la portata di aria in mandata in modo da integrare la potenza termica fornita dai pannelli radianti.

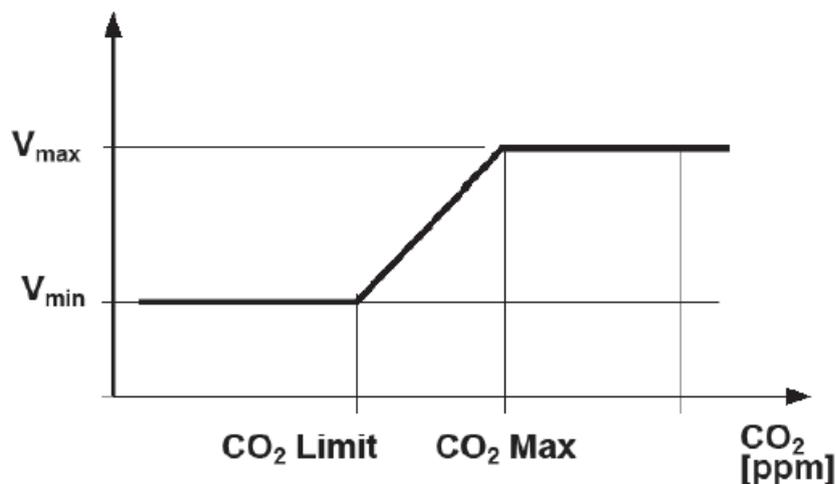


Figura 49 Variazione della portata volumetrica di aria di rinnovo in funzione della concentrazione di CO<sub>2</sub> in ripresa

#### 4.4.3 UTA Archivi

La documentazione tecnica prescrive per locali adibiti al deposito di libri una portata volumetrica di aria di rinnovo data dalla seguente formula:

$$Q \left[ \frac{m^3}{h} \right] = 1.5 * 3.6 * \text{Superficie del locale}$$

Con l'ausilio di una sonda di portata sul canale di presa aria esterna e di un regolare PID dedicato, si potrebbe modulare l'apertura delle serrande in modo da garantire tale portata. Nel caso in cui la serranda di presa aria esterna fosse completamente aperta e la portata non sia ancora sufficiente si dovrebbe poi aumentare la velocità del ventilatore.

#### **4.4.4 Controllo della deumidificazione basato sui valori di umidità assoluta**

Uno dei punti di forza dell'impianto di Maison Lostan è rappresentato dall'opportunità di free cooling dell'acqua. La possibilità di disporre di fluido tecnico a temperature intorno ai 10°C a costi moderati e il clima particolarmente secco, anche nel periodo estivo, della città di Aosta apre alla possibilità di effettuare deumidificazione degli ambienti utilizzando l'aria esterna.

Un'analisi preliminare dell'impatto che questa logica potrebbe avere è stata condotta a partire dai dati meteo disponibili sul sito Arpa Valle d'Aosta relativi al periodo 16-06-2017 / 31-08-2017 considerando solo le ore tra le 08:00 e le 18:00 (tipici orari lavorativi da ufficio).

Ipotizziamo che la temperatura ambiente all'interno dell'edificio sia funzione della temperatura esterna secondo la relazione rappresentata in Figura 50 e riportata di seguito:

- Se  $T_{est} < 20^\circ\text{C}$ :  $T_{amb} = 20^\circ\text{C}$ ;
- Se  $T_{est} > 32^\circ\text{C}$ :  $T_{amb} = 26^\circ\text{C}$ ;
- Se  $T_{est} \leq 32^\circ\text{C} \ \& \ T_{est} \geq 20^\circ\text{C}$ :  $T_{amb} = 0.5 * T_{est} + 10^\circ\text{C}$ .

L'applicazione pratica di questo processo di deumidificazione richiede la presenza di una batteria di raffreddamento, condizione verificata per le UTA delle sottocentrali Nord e Sud per le quali la temperatura di mandata è sempre compresa all'interno dell'intervallo 19-21°C.

A partire da questi dati è stata condotta un'analisi del processo secondo la seguente procedura:

1. Per ogni valore di temperatura esterna è stato calcolato il setpoint di temperatura ambiente corrispondente secondo la relazione di Figura 50;
2. Per ogni temperatura ambiente è stato calcolato il valore soglia di umidità assoluta in corrispondenza del quale viene inoltrata richiesta di deumidificazione:

$$x_{soglia} = x(T_{amb}; \Phi = 50\%)$$

3. Per ogni coppia di valori ( $T_{est}$ ,  $x_{est}$ ) è stata calcolata la corrispondente umidità assoluta:

$$x_{est} = x(T_{est}; \Phi_{est})$$

4. Dal confronto dei valori  $x_{soglia}$  e  $x_{est}$  si valuta se la deumidificazione è possibile;

*Se  $x_{est} < x_{soglia}$ : deumudificazione possibile*

Tramite uno script realizzato col software MATLAB è stato verificato che la relazione precedente risulta vera, nel periodo considerato, per il 62,53% delle ore totali, cioè per 481,5 ore su un totale di 770 (Figura 51).

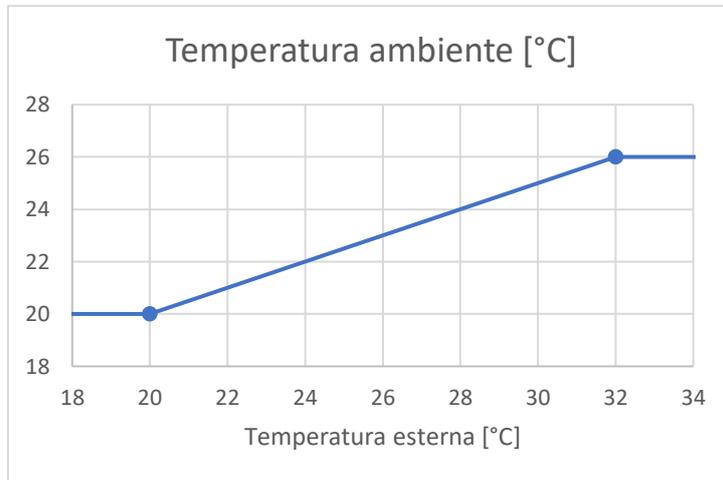


Figura 50 Relazione tra temperatura ambiente e temperatura esterna.

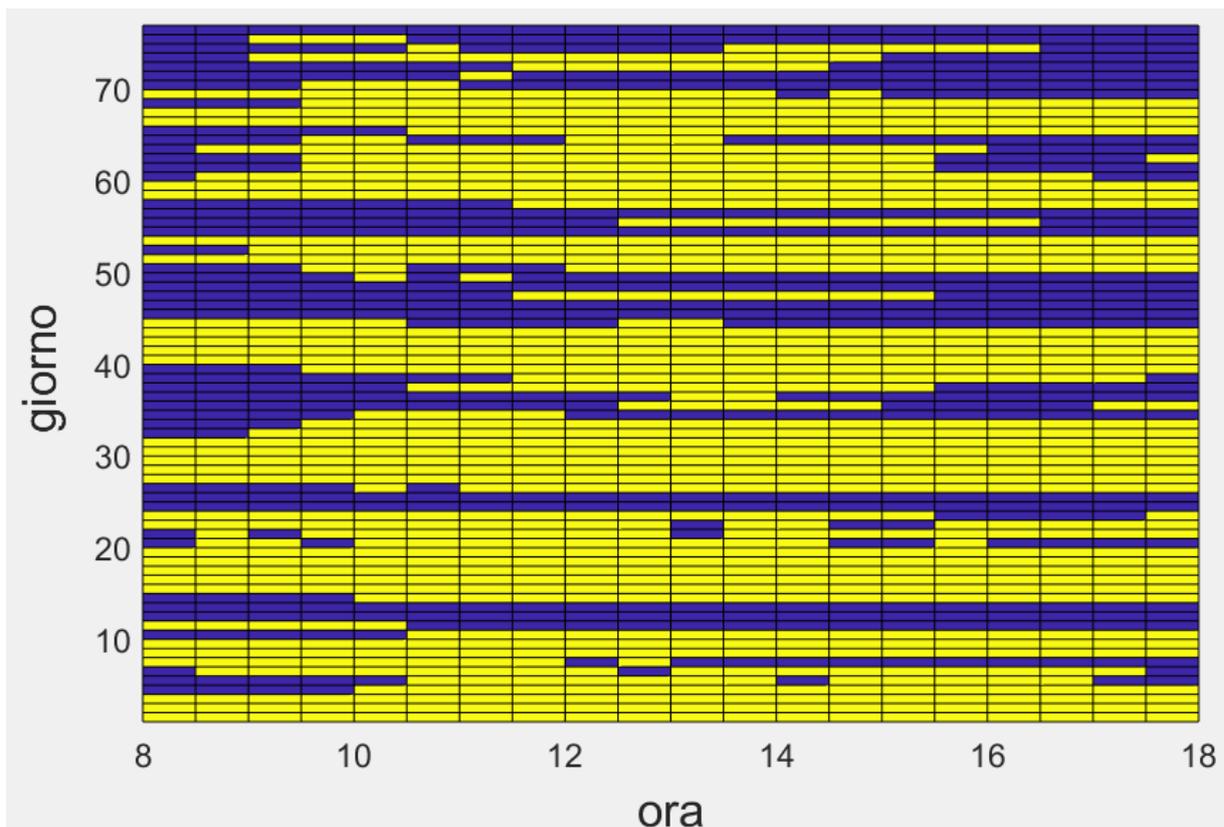


Figura 51 Carpet plot. Le celle gialle rappresentano le ore in cui la deumidificazione è possibile sfruttando l'aria esterna.

Nel periodo estivo, quando all'esterno si hanno temperature maggiori rispetto a quelle interne, l'aria esterna verrebbe così raffreddata fino alla temperatura di mandata utilizzando fluido freddo prodotto tramite free cooling evitando l'accensione delle pompe di calore. Inoltre, grazie ai recuperatori a batterie alettate parte del raffreddamento verrebbe realizzato per mezzo delle batterie di recupero.

A titolo di esempio vengono illustrate le trasformazioni che subirebbe l'aria esterna ipotizzando che essa si trovi nelle condizioni riportate dai dati Arpa per il giorno 16 giugno alle ore 8:00. Le condizioni di temperatura e umidità esterna sono:

$$T_E = 29.9^\circ C; \quad \varphi_E = 28\%$$

Il valore di umidità assoluta esterna vale:

$$x_E = x(T_E = 29.9^\circ C, \varphi_E = 28\%) = 7.57 \frac{g_v}{kg_a}$$

La temperatura interna, e quindi la temperatura in ripresa, vale  $T_R = 25^\circ C$  (Figura 50).

Ipotizziamo che la richiesta di deumidificazione sia attiva, cioè il valore misurato di umidità relativa in ripresa è pari al 50%. Il valore di umidità assoluta in ripresa vale:

$$x_R = x(T_R = 25^\circ C, \varphi_R = 50\%) = 10 \frac{g_v}{kg_a}$$

Essendo  $x_E < x_R$  si può deumidificare sfruttando l'aria esterna.

Secondo la logica attuale se  $|T_E - T_R| > 3^\circ C$ , condizione in questo caso verificata, il recuperatore entra in azione. Ipotizzando un'efficienza del recuperatore pari a 0.6:

$$\varepsilon = \frac{T_{post-rec} - T_E}{T_R - T_E} = 0.6$$

$$T_{post-rec} = \varepsilon * (T_R - T_E) + T_E = 27^\circ C$$

L'aria dopo aver attraversato la batteria del recuperatore viene raffreddata fino alla temperatura di mandata  $T_M = 21^\circ C$  dalla batteria di raffreddamento che viene alimentata con acqua prodotta mediante free cooling che in genere si trova intorno agli  $10^\circ C$ . La temperatura di saturazione dell'aria nelle condizioni  $T_{post-rec} = 27^\circ C$  e  $x_{post-rec} = 7.57 \frac{g_v}{kg_a}$  (indicate dal punto P) è di circa  $9.5^\circ C$  per cui non si avrà condensazione sulla superficie della batteria.

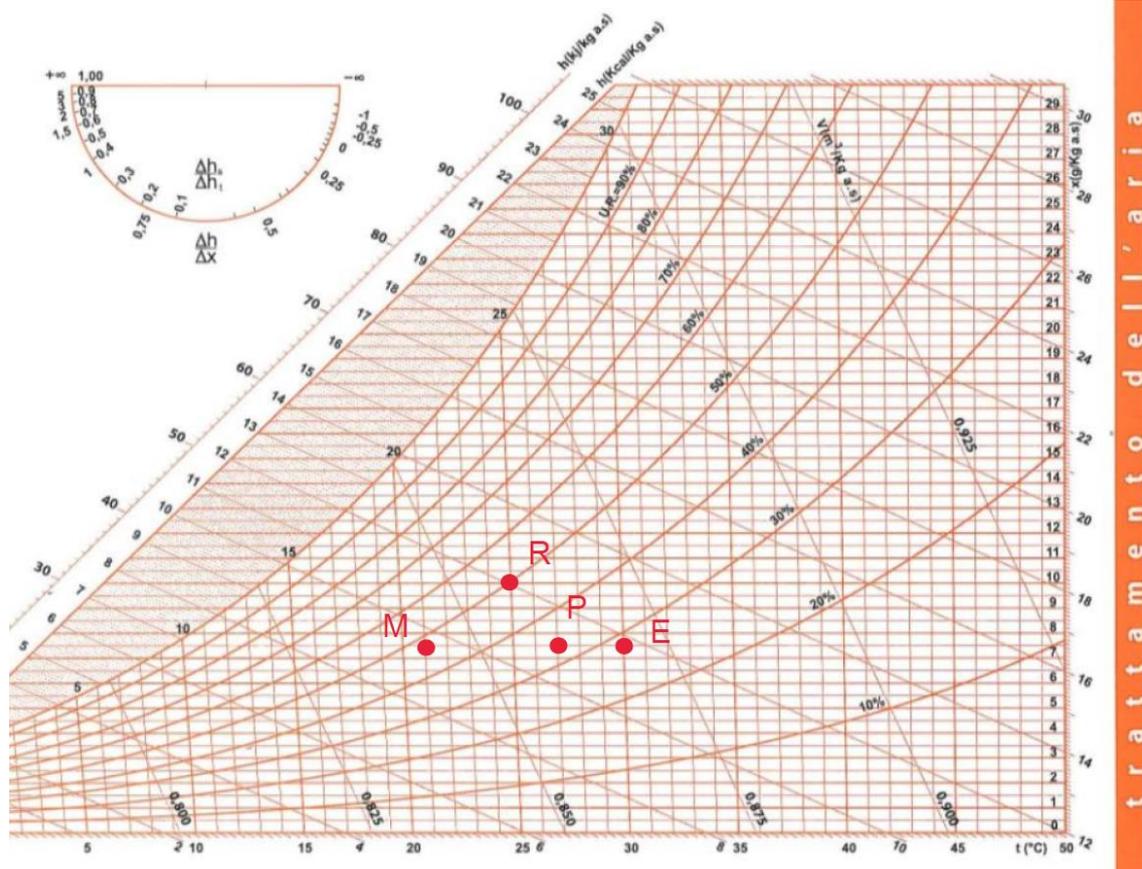


Figura 52 Diagramma psicrometrico. E=aria esterna. R=ripresa. P=dopo il recuperatore. M=mandata.

Per l'implementazione di questa logica sarebbe necessaria l'installazione di una sonda di umidità esterna attualmente non presente.

Dai valori misurati di umidità relativa e temperatura, in ripresa e in ambiente esterno, il BMS può calcolare le corrispondenti umidità assolute. Nel caso in cui risulti vera la disuguaglianza  $x_E < x_R$ , il BMS può variare per mezzo di un controllore PID la velocità del ventilatore in funzione della differenza di umidità assoluta tra l'esterno e la ripresa fino a riportare il valore di umidità relativa in ripresa al di sotto del 50%.

Nelle ore in cui la deumidificazione con aria esterna non è applicabile si potrebbe provare ad utilizzare l'acqua di falda per provocare la deumidificazione dell'aria sulla superficie della batteria di raffreddamento e misurare i risultati ottenuti. Infatti, come mostrato nella foto di Figura 53, scattata il 6 luglio 2018 con una temperatura esterna di 28°C, con lo scambiatore in funzione si nota la presenza di condensa sul pavimento che suggerisce l'utilizzo dell'acqua di falda anche per la deumidificazione, evitando di inserire le pompe di calore in raffreddamento e risparmiando ulteriormente energia. La temperatura dell'acqua di falda misurata era 9 °C, mentre il fluido in mandata alle utenze acqua refrigerata era alla temperatura di 10 °C.

Con un salto di temperatura di 5 gradi sulla batteria di raffreddamento, quest'ultima verrebbe a trovarsi a una temperatura media di 12.5°C, temperatura di saturazione corrispondente a un'umidità assoluta di  $9.05 \frac{g_v}{kg_a}$ . Tale valore di umidità assoluta corrisponde alla temperatura di 23.4°C con umidità relativa del 50%, per cui se la temperatura ambiente è superiore a tale valore si otterrebbe comunque una deumidificazione del locale. Ovviamente è necessario operare un postriscaldamento dell'aria per portarla fino alla temperatura di mandata.

Il calcolo precedente costituisce solo una valutazione preliminare in quanto è stato trascurato l'effetto del fattore di by-pass.



*Figura 53 Scambiatore a piastre 6 luglio 2018.*

#### **4.4.5 Recupero di calore dalle pompe di calore**

Su ogni pompa di calore è installato uno scambiatore a piastre saldobrasate INOX che consente la produzione di acqua calda gratuita durante il funzionamento in raffreddamento grazie al recupero di parte del calore di condensazione che verrebbe altrimenti smaltito sulla sorgente esterna.

Sulle unità installate a Maison Lostan il recupero di calore non è ancora entrato in funzione, ma si può prevedere quanta potenza termica può generare tenendo presente che entrerà in funzione solamente quando sarà richiesta acqua a 7°C per fronteggiare le richieste di deumidificazione.

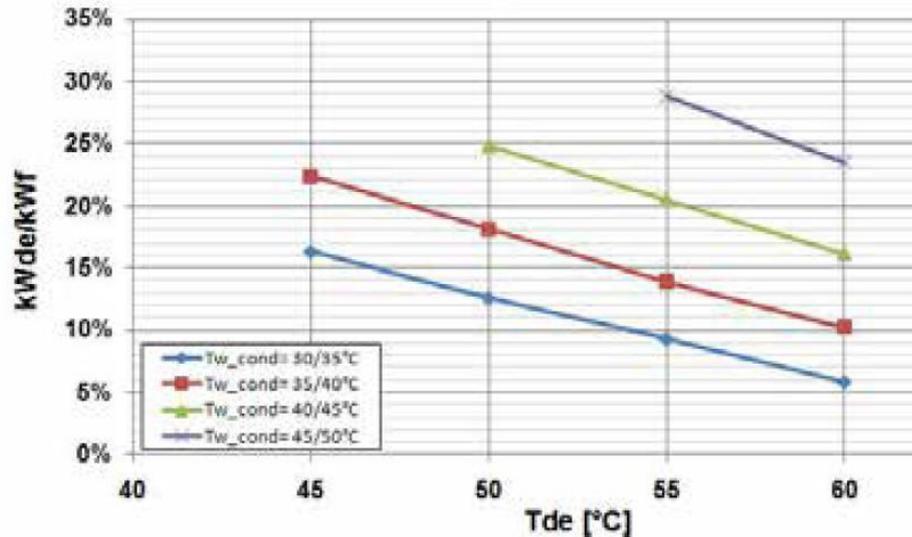


Figura 54 Potenza termica recuperabile in funzione della temperatura di condensazione e della temperatura di uscita dell'acqua dal recupero.

Con una temperatura di uscita dal recuperatore di 45°C e temperature dell'acqua lato sorgente di 30/35°C, con la pompa di calore in condizioni di carico massimo si otterrebbe dal circuito di recupero una potenza termica pari a:

$$P_{recupero} = k * P_{frigorifera} = 0.16 * 230 \text{ kW} = 36.8 \text{ kW}$$

Per la gestione del gruppo di pompe gemellari Wilo del circuito di recupero sarebbe necessaria l'installazione di due sonde di temperatura, una sulla mandata e una sul ritorno, in modo da regolare la velocità di rotazione in modo da mantenere costante la differenza di temperatura.

L'avvio delle pompe andrebbe abilitato solo nel caso in cui l'accumulo caldo si trovi ad una temperatura pari al setpoint di mandata del circuito di recupero meno 5°C. Tuttavia, trattandosi di energia ottenuta in maniera quasi gratuita (l'unica spesa è dovuta alla movimentazione del fluido) si potrebbe attuare una ridefinizione del setpoint di mandata del circuito di recupero al crescere della temperatura dell'accumulo portando quest'ultimo anche oltre il suo valore di setpoint.

# Conclusioni

---

Lo studio condotto sull'impianto di Maison Lostan ha sottolineato l'importanza dell'utilizzo di sistemi di gestione liberamente programmabili su impianti complicati e innovativi. Grazie ad esso è stato possibile superare problematiche, come quella relativa alla gestione delle pompe lato sorgente delle pompe di calore, che non avrebbero trovato soluzione a meno di modifiche di tipo costruttivo ai circuiti idraulici.

In secondo luogo, è stato reso evidente come l'implementazione del BMS, e in particolare delle sue funzionalità di acquisizione e registrazione dei dati, sia da effettuare già durante la fase di messa a punto dell'impianto. Dai valori registrati è stato infatti possibile individuare trafilemanti che risultavano evidenti solo nelle ore notturne e sui quali sarebbe stato più complicato intervenire nel caso in cui l'edificio fosse stato già occupato, dato che l'intervento avrebbe comportato un'interruzione del servizio oltre che costi ulteriori per la spesa energetica.

In ultimo, va sottolineato come un sistema liberamente programmabile possa consentire di far fronte a imprevisti non solo di natura tecnica. Per l'impianto in questione ci si aspettano variazioni del quadro legislativo che potrebbero limitare la quantità di acqua prelevata o scaricata. In aggiunta, il consorzio Mere Des Rives ha recentemente manifestato la volontà di modificare le condizioni contrattuali e di richiedere un pagamento di 0.03 €/m<sup>3</sup> di acqua scaricata.

In conclusione, questo studio ha permesso di notare e risolvere anomalie di funzionamento già in fase di commissioning e allo stesso tempo offre degli spunti al fine di perseguire ulteriori miglioramenti. Grazie alle possibilità offerte dal BMS potranno essere individuate le logiche di regolazione che consentiranno di raggiungere il maggior risparmio energetico, il minor consumo d'acqua e il maggior risparmio economico.

# Riferimenti

- [1] Eurostat, «Energy balance sheets 2015 DATA,» 2017.
- [2] ENEA, «Rapporto Annuale Efficienza Energetica,» 2017.
- [3] KNX Association, [Online]. Available: [www.knx.org](http://www.knx.org). [Consultato il giorno 2 Giugno 2018].
- [4] [Online]. Available: [www.bacnet.org](http://www.bacnet.org). [Consultato il giorno 3 giugno 2018].
- [5] C. e. al., «The GRETA Project».
- [6] Manitalidea S.p.a., *Restauro e rifunzionalizzazione del complesso monumentale Maison Lostan in Aosta*, 2014.
- [7] Clivet S.pa., *Bollettino tecnico WSHN-XEE2*.
- [8] Caleffi Hydroic Solutions, «Le pompe di circolazione,» n. 53, Dicembre 2017.