



Ricerca di Sistema elettrico

Monitoraggio energetico degli impianti tecnici in edifici di tipo residenziale multifamiliare con impianti tecnici e gestione energetica avanzata attuata tramite sistemi di building automation

L. Martirano, E. Habib, F. Massarella
A. Di Giorgio, A. Giuseppi, M. Manganeli

MONITORAGGIO ENERGETICO DEGLI IMPIANTI TECNICI IN EDIFICI DI TIPO RESIDENZIALE MULTIFAMILIARE
CON IMPIANTI TECNICI E GESTIONE ENERGETICA AVANZATA ATTUATA TRAMITE SISTEMI DI BUILDING
AUTOMATION

L. Martirano, E. Habib, F. Massarella, A. Di Giorgio, A. Giuseppi, M. Manganelli (Sapienza Università di Roma)

Settembre 2018

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2017

Area: Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici

Progetto: Tecnologie per costruire gli edifici del futuro

Obiettivo: A. Soluzioni innovative per l'efficientamento degli edifici

Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Monitoraggio energetico degli impianti tecnici in edifici di tipo residenziale multifamiliare con impianti tecnici e gestione energetica avanzata attuata tramite sistemi di building automation"

Responsabile scientifico ENEA: Biagio Di Pietra

Responsabile scientifico DIAEE Università Sapienza di Roma : Luigi Martirano



Si ringrazia l'arch. Paolo di Laura Frattura per la preziosa collaborazione nella ricerca e per aver messo a disposizione gli elaborati tecnici del progetto degli impianti tecnici dell'edificio oggetto delle simulazioni.

Si ringrazia l'Immobiliare Le Torri" per aver messo a disposizione della ricerca il Complesso Edilizio "Elena" di Campobasso.

Indice

SOMMARIO.....	6
1 INTRODUZIONE.....	9
2 EDIFICI A ENERGIA QUASI ZERO.....	9
2.1 GENERALITÀ.....	9
2.2 SERVIZI TECNICI DI EDIFICIO ED IMPIANTI TECNICI DI EDIFICIO (TBS).....	10
2.3 SISTEMI DI BUILDING AUTOMATION (BACS, HBES) E MANAGEMENT (TBM, BEMS).....	11
2.3.1 Sistemi HBA.....	11
2.3.2 Sistemi HBES e BACS.....	11
2.3.3 TBM e BEMS.....	12
2.3.4 Sistemi Konnex (KNX).....	13
2.3.5 Supervisore Locale.....	13
2.3.6 Sistemi di supervisione centralizzati.....	13
2.4 DA EDIFICIO A ENERGIA QUSI ZERO (NZEB) A EDIFICIO A ENERGIA A KM ZERO (KZEB).....	14
2.4.1 Edificio gas-free.....	15
2.4.2 Generazione locale.....	15
2.5 DA NZEB A "ZERO EMISSION BUILDING" (ZEB).....	15
3 ARCHITETTURA D'IMPIANTO DI RIFERIMENTO.....	16
3.1 GENERALITÀ: SMDU E MURB.....	16
3.2 CARATTERISTICHE DEL COMPLESSO.....	17
3.3 IMPIANTI TECNICI NELL'EDIFICIO OGGETTO DELLE MISURE.....	20
3.4 ARCHITETTURA DI RETE DELLA BUILDING AUTOMATION E DOMOTICA (HBES/BACS).....	24
3.5 ARCHITETTURA DI SMART MICRO GRID PER GLI NZEB.....	27
3.6 RETE ELETTRICA.....	28
3.7 CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE.....	33
3.8 IMPIANTO ELETTRICO, DOMOTICO E DI BUILDING AUTOMATION.....	37
3.9 IMPIANTO TERMICO.....	39
3.9.1 Circuito primario.....	45
3.9.2 Circuito secondario.....	46
3.9.3 Ventilazione meccanica dei locali.....	46
3.10 ALLACCIO UNICO ALLA RETE ELETTRICA.....	47
3.11 ASPETTI INNOVATIVI DEL COMPLESSO OGGETTO DELLO STUDIO "LE TORRI" DI CAMPOBASSO.....	51
4 SISTEMA DI METERING AVANZATO PER IL COMPLESSO "LE TORRI" DI CAMPOBASSO.....	53
4.1 SISTEMI DI SMART METERING.....	53
4.2 ENERGY MANAGEMENT INFORMATION SYSTEM (EMIS).....	55
4.3 ARCHITETTURA DEL SISTEMA DI METERING E MONITORING.....	56
4.4 ARCHITETTURA DEL SISTEMA EMIS PER IL COMPLESSO "LE TORRI".....	58
4.4.1 Metering elettrico.....	59
4.4.2 Metering acqua calda, calore e acqua potabile a livello di unità.....	60
4.4.3 Metering acqua calda a livello di centrale.....	62
4.4.4 Metering parametri ambientali.....	64
4.4.5 Trasparenza dei consumi e dei costi.....	64
5 SISTEMI DI CONTROLLO.....	65
5.1 INTRODUZIONE AI SISTEMI DI CONTROLLO.....	65
5.1.1 Loop di controllo.....	66
5.2 SISTEMI DI CONTORLLO LINEARI.....	67

5.2.1	Sistema di controllo proporzionale (P)	69
5.2.2	Sistema di controllo proporzionale-integrale (PI)	69
5.2.3	Sistema di controllo proporzionale-integrale-derivativo (PID).....	70
5.2.4	Sistema di controllo Enhanced Proportional-Integral-Derivative (EPID).....	71
5.3	SISTEMI DI CONTROLLO A LOGICA FUZZY	71
5.4	CONTROLLO HVAC	74
5.5	SENSORI E CONTROLLI PER I SISTEMI HVAC	75
5.5.1	Sensori di temperatura	75
5.5.1.1	Temperatura dell'aria esterna	75
5.5.1.2	Temperatura dell'aria di ritorno	75
5.5.1.3	Termostato antigelo	75
5.5.1.4	Temperatura di punto fisso	75
5.5.1.5	Temperatura ambiente.....	75
5.5.1.6	Temperature dell'acqua di mandata ai fan coil	77
5.5.2	Sensori di pressione.....	78
5.5.2.1	Sensori di pressione differenziale delle serrande	78
5.5.2.2	Sensori di pressione differenziale per filtri	78
5.5.2.3	Sensori di pressione differenziale per ventilatori	78
5.5.2.4	Sensori di pressione differenziale per i locali.....	79
5.5.2.5	Sensori di pressione differenziale per liquidi per i componenti idrici.....	79
5.5.2.6	Sensori di pressione differenziale per pompe	79
5.5.2.7	Sensori di pressione dei condotti.....	79
5.5.3	Sensori di portata.....	79
5.5.3.1	Sensori di portata per le tubazioni idriche.....	79
5.5.3.2	Sensori di portata d'aria	79
5.5.4	Humidity sensors.....	79
5.5.5	Altri sensori ambiente	79
5.5.5.1	Sensore di occupazione	79
5.5.5.2	Sensori di qualità dell'aria interna	80
5.5.5.3	Sensori di velocità dell'aria	80
5.6	INTRODUZIONE AI BUILDING AUTOMATION CONTROL SYSTEM (BACS).....	80
5.7	COMMUNICATION PROTOCOLS.....	82
5.7.1	Il protocollo BACnet	82
5.7.2	Protocollo KNX	84
5.8	SISTEMI SUPERVISORY CONTROL & DATA ACQUISITION (SCADA)	87
5.9	INTERFACCIA UOMO-MACCHINA (HMI).....	88
6	IMPATTO DELLA BUILDING AUTOMATION NELLA PRESTAZIONE ENERGETICA DEGLI EDIFICI.....	89
6.1	EN 15232-1:2017 "ENERGY PERFORMANCE OF BUILDINGS - PART 1: IMPACT OF BUILDING AUTOMATION, CONTROLS AND BUILDING MANAGEMENT - MODULES M10-4,5,6,7,8,9,10"	90
6.1.1	Classificazione dei sistemi di controllo del riscaldamento	92
6.1.2	Classificazione dei sistemi di controllo del raffrescamento.....	93
6.1.3	Classificazione dei sistemi di controllo della ventilazione e del condizionamento	94
6.1.4	Classificazione dei sistemi di controllo dell'illuminazione.....	95
6.1.5	Classificazione dei sistemi di controllo della schermatura solare	95
6.1.6	Classificazione dei sistemi di controllo dei sistemi BACS.....	95
6.1.7	Classificazione dei sistemi Technical Home and Building Management	96
6.2	PROCEDURA DI CALCOLO DELL'EFFICIENZA DEL SISTEMA BACS	96
6.2.1	Procedura di calcolo dettagliata	96
6.2.2	Metodo dei fattori BAC (BAC Factors).....	96
7	SISTEMI DI GESTIONE OTTIMIZZATA DI IMPIANTI A SERVIZIO DI EDIFICI DI TIPO MULTIFAMIGLIARE MEDIANTE BUILDING AUTOMATION	99
7.1	INTRODUZIONE AL DEMAND SIDE MANAGEMENT	99
7.2	HVAC ROLE IN DEMAND SIDE MANAGEMENT.....	101
7.3	THERMAL ENERGY STORAGE (TES) PER DSM.....	104
7.4	DEMAND SIDE MANAGEMENT IN EDIFICI RESIDENZIALI.....	105
7.5	OBIETTIVI DEL DSM	106

8	SISTEMI DI CONTROLLO AVANZATI PER EDIFICIO	109
8.1	DEMAND SIDE MANAGEMENT MEDIANTE GESTIONE DEL SISTEMA HVAC	109
8.2	INDICATORI DI PRESTAZIONE ENERGETICA DEI CONTROLLI PROPOSTI	109
8.3	GESTIONE HVAC AVANZATA MEDIANTE CONTROLLI DI TIPO TRADIZIONALE	109
8.3.1	<i>Accumulo termico centralizzato – Controllo T1</i>	<i>111</i>
8.3.2	<i>Accumuli termici distribuiti. Controllo T2.....</i>	<i>112</i>
8.3.3	<i>Preriscaldamento. Controllo T3.....</i>	<i>113</i>
8.4	GESTIONE AVANZATA DEL SISTEMA HVAC MEDIANTE MODEL PREDICTIVE CONTROL	114
8.4.1	<i>Generalità</i>	<i>114</i>
8.4.2	<i>Cenni storici.....</i>	<i>114</i>
8.4.3	<i>Obiettivi e punti di forza.....</i>	<i>114</i>
8.4.4	<i>Principi di funzionamento</i>	<i>115</i>
8.4.5	<i>Confronto con metodi di controllo tradizionali (e.g. PID).....</i>	<i>117</i>
8.4.6	<i>Varianti</i>	<i>117</i>
8.4.7	<i>Implementazioni</i>	<i>117</i>
8.4.8	<i>Controlli predittivi applicati all’HVAC.....</i>	<i>117</i>
8.4.9	<i>Modello dell’involucro.....</i>	<i>118</i>
8.4.10	<i>Modello del pavimento radiante.....</i>	<i>119</i>
8.4.11	<i>Modello dell’ambiente</i>	<i>120</i>
8.4.12	<i>Modello dell’impianto.....</i>	<i>120</i>
8.4.13	<i>Modello dell’MPC.....</i>	<i>120</i>
8.5	ESEMPIO DI CONTROLLO BACS PER APPLICAZIONI DI DEMAND SIDE MANAGEMENT	122
8.5.1	<i>Generalità</i>	<i>123</i>
8.5.2	<i>Sistema di controlli implementato</i>	<i>130</i>
9	CAMPAGNA DI ANALISI SVOLTA PER L’EDIFICIO	136
9.1	DESCRIZIONE DEL SITO OGGETTO DI ANALISI	136
9.2	DESCRIZIONE DELLE SIMULAZIONI	137
10	CONCLUSIONI.....	143
11	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	145

Sommario

La ricerca riguarda il monitoraggio energetico degli impianti tecnici in edifici di tipo residenziale multifamiliare con impianti tecnici e la gestione energetica avanzata attuata tramite sistemi di building automation.

L'attività è stata suddivisa in due macro parti.

Una prima parte riguarda gli aspetti di monitoraggio energetico elettrico e termico.

La seconda parte riguarda l'implementazione di un sistema di controllo del tipo BEMS (building energy management system) tramite impiego di PLC centralizzato e/o HBES distribuito programmabile.

Le attività sono riferite ad un modello di edificio di riferimento del tipo multifamiliare dotato di reti energetiche evolute: con allaccio compune e distribuzione interna per la parte elettrica e con generazione centralizzata del calore per riscaldamento e acqua calda sanitaria mediante pompe geotermiche, sistema di distribuzione centralizzata con distacchi a satellite e sistema di diffusione a pavimento per la parte riscaldamento. Il sistema in considerazione è alimentato da una rete elettrica dotata di impianto fotovoltaico comune. Per quanto riguarda le analisi energetiche si è fatto riferimento ad un edificio pilota di riferimento in corso di ultimazione, realizzato secondo il modello proposto.

Il sistema di controllo avanzato di tipo BEMS è supportato dal punto di vista fisico da un sistema di building automation distribuito (HBES), da un sistema di metering digitale su architettura avanzata proposto come modello, del tipo energy management information system (EMIS) ed un supervisore centralizzato di edificio con allocato il sistema di gestione del tipo Supervisory, Control and Data Acquisition (SCADA).

Le logiche di controllo sviluppate e proposte perseguono funzioni obiettivo di demand side management (DSM) e sono sia di tipo convenzionale (PID) sia di tipo predittivo, model predictive control (MPC).

Al fine di consentire un pretest delle logiche prima della implementazione effettiva nell'edificio pilota, è stato realizzato un ambiente simulativo di edificio in laboratorio, dotato di HBES, PLC; metering e SCADA dello stesso tipo dell'architettura di rete di edificio, e capace di simulare ingressi e elaborare le uscite del controllore per testare le logiche avanzate di demand side management proposte.

Infine, le logiche proposte sono state simulate su un modello appositamente realizzato per l'edificio pilota al fine di ottenere risultati di prefattibilità.

In sintesi, i risultati raggiunti possono essere descritti in:

- 1) analisi di architetture impiantistiche innovative a servizio di edifici multi unità a prevalente destinazione abitativa (Multi Unit Residential Building MURB) costituiti dal palazzo/condominio con unità immobiliari (appartamenti, uffici e negozi) dislocate verticalmente su più piani, e con servizi comuni di connettività e parcheggi.
- 2) Modellazione degli impianti tecnici (elettrici e termici HVAC) a servizio di edifici MURB.
- 3) Sviluppo di controlli avanzati per la gestione di sistemi HVAC mediante controllori PID e di tipo predittivi (MPC) al fine di perseguire logiche di demand side management della potenza elettrica sfruttando l'inerzia termica dell'edificio e dell'impianto meccanico.
- 4) Simulazioni di calcolo dei controlli PID e MPC attraverso indicatori energetici e prestazionali.
- 5) Sviluppo di un modello di sistema di monitoraggio energetico avanzato innovativo definito EMIS Energy Management Information System per il monitoraggio continuativo della prestazione energetica dell'edificio.
- 6) Predisposizione all'implementazione in campo dei controlli progettati, in un edificio di tipo MURB disponibile e predisposto ad ospitare i controlli realizzati.
- 7) Predisposizione, nello stesso edificio MURB del punto precedente, di un sistema di monitoraggio energetico elettrico e termico.
- 8) Realizzazione di un ambiente simulativo di edificio all'interno di un laboratorio universitario.

A fine attività è stato implementato un sistema di monitoraggio energetico tipo EMIS sull'edificio pilota, per monitorare il comportamento energetico dell'edificio in particolare riguardo i rendimenti dell'impianto termico. L'attività di metering elettrico e termico è in corso di attuazione. I risultati saranno disponibili a fine stagione. In attesa delle rilevazioni in campo, è stata analizzata la prestazione del sistema mediante simulazione del comportamento termico e controllistico. L'esito ha confermato le attese illustrando la

capacità del sistema proposto di sfruttare la capacità termica dell'edificio per introdurre una flessibilità del carico elettrico, consentendo la riduzione dei picchi di assorbimento di potenza elettrica e un incremento significativo dell'autoconsumo della produzione locale da rinnovabile. Le analisi preliminari illustrano la capacità del controllo BEMS di edifici "gas-free" di realizzare un'utenza flessibile, capace quindi di reagire con un feedback positivo ad eventuali riduzioni del prezzo dell'energia a fronte di incremento della produzione della rete, semplicemente includendo il costo dell'energia nella funzione obiettivo di controllo. L'attività ha riguardato l'individuazione di un edificio multifamiliare dotato di impianti ad elevato contenuto tecnologico e l'architettura del sistema di monitoraggio da realizzare. In una prima parte descrittiva sono state delineate le caratteristiche dell'edificio oggetto della ricerca (Capitolo 2 e 3) che può essere considerato come un modello di edificio MURB di tipo nZEB replicabile. È descritto il modello di architettura di micro grid innovativo a servizio dell'edificio con alimentazione esclusivamente elettrica (gas free) di tutti i servizi tecnici sia comuni sia delle singole unità. La micro grid prevede un unico punto di allaccio con la rete di distribuzione elettrica a livello di media tensione, una cabina di trasformazione, una rete di distribuzione di proprietà dell'edificio e servizi energetici centralizzati (fotovoltaico). La rete alimenta sia i servizi elettrici (comuni di edificio e di singole unità) sia i servizi termici (riscaldamento, raffrescamento, ventilazione e acqua calda sanitaria). Gli impianti di riscaldamento e di generazione dell'acqua calda sanitaria sono previsti di tipo centralizzato con pompa di calore geotermica, serbatoio di accumulo e rete di distribuzione comune fino a centri satellite di unità per lo stacco dei servizi locali di riscaldamento ed acqua calda sanitaria. La rete elettrica è prevista affiancata da un sistema Home and Building Electronic System HBES sia per le unità residenziali (home automation HES) sia per le parti comuni di edificio (Building Electronic System BES).

Il capitolo 4 è dedicato alla descrizione dell'innovativo sistema di monitoraggio energetico proposto sul modello avanzato dell'EMIS (Energy Monitoring Information System) per le misure che si sono previste per l'edificio e al sistema di metering implementato nell'edificio e in corso di ultimazione. Il sistema EMIS è strutturato per realizzare il monitoraggio energetico e del rendimento del sistema di generazione di calore ed esaminare e verificare l'effettiva possibilità di sfruttare l'inerzia termica delle strutture edilizie e degli impianti come energy storage per il differimento temporale del fabbisogno energetico.

I capitoli 5 e 6 descrivono i sistemi di controllo previsti per l'edificio e il loro impatto in termini di prestazione energetica. L'attività ha previsto la messa a punto di un sistema di controllo realizzabile tramite sistema distribuito HBES o sistema concentrato PLC degli impianti termici e elettrici di un edificio di tipo multifamiliare dotato di microgrid evoluta con generazione locale di energia. Il modello di controllore BEMS (Building Energy Management System) prevede la possibilità di implementazione sia nel caso di aggregazione virtuale degli utenti con forniture separate sia nel caso di aggregazione fisica degli impianti con punti di fornitura unici e subfornitura contabilizzata tra gli utenti finali.

I capitoli 7 e 8 introducono i sistemi di controllo avanzato proposti per attuare logiche di demand side management di impianti a servizio di edifici di tipo multifamiliare mediante building automation. Sono descritte alcune logiche di gestione proposte implementabili nel BEMS di edificio. Uno degli aspetti innovativi consiste nella proposta di gestire l'impianto di riscaldamento e di acqua calda sanitaria, alimentati da pompa di calore elettrica, al fine di ottenere variazioni di potenza elettrica nel nodo di saldo dell'edificio, sfruttando l'inerzia termica degli impianti e il livello di sensibilità al comfort degli utenti. La presenza di un puffer di accumulo per la gestione del riscaldamento e dei boiler di accumulo per l'acqua calda sanitaria costituiscono sistemi di accumulo termico naturali che abbinati alla elevata resistenza termica dell'edificio ed alla notevole inerzia termica del sistema dei pannelli radianti, offrono notevoli margini di controllo dell'impianto a parità di comfort o ancora con impatti positivi sul comfort termoigrometrico. Inoltre l'elevata resistenza termica degli ambienti consente un ulteriore livello di gestione sui set point dei termostati locali.

La ricerca ha preso in considerazione strategie di controllo sia mediante controllori tradizionali di tipo PID sia mediante controllori avanzati e innovativi di tipo predittivo.

Nel capitolo 8 è descritto un modello replicato di ambiente residenziale realizzato nel laboratorio di impianti elettrici del Dipartimento di Ingegneria Elettrica dell'Università Sapienza di Roma (LAMBDA) che

consente di realizzare, sperimentare e testare esempi di controllo BACS per applicazioni di Demand Side Management prima della realizzazione in campo.

Il capitolo 9 descrive le analisi svolte sulle logiche proposte per l'edificio preso in considerazione e contiene i risultati ottenuti. Il modello simulativo realizzato consente di analizzare: - il profilo di carico termico individuale di ciascuna unità, in base a un modello termico dell'unità, - il comportamento della centrale termica (pompa di calore, boiler, sistema geotermico etc.) e conseguentemente il profilo di carico elettrico per il riscaldamento, - il profilo di carico elettrico individuale di ciascuna unità, - il profilo di generazione fotovoltaica, - l'aggregazione dei profili a livello di edificio. Il modello si basa su un approccio statistico per valutare le presenze e i comportamenti degli utenti.

1 Introduzione

L'*edificio ad energia quasi zero* introdotto dalla recente normativa europea è un edificio ad altissima prestazione energetica, il cui fabbisogno energetico, già ridotto tramite impiego di soluzioni tecnologiche ad alta efficienza, è in gran parte soddisfatto da energia prodotta da fonti rinnovabili in loco o nelle vicinanze.

Il presente lavoro vuole evidenziare, tra l'altro, la possibilità di distinguere le definizioni di *edificio a energia quasi zero* (NZEB) previsto in normativa, dalla definizione di *edificio ad energia zero* (ZEB) ovvero "km zero energy building" (KZEB, a energia a chilometri zero).

Il termine *energia zero* si riferisce ad edifici energeticamente autonomi, ossia potenzialmente *off-grid*. La differenza è notevole come sarà evidenziato nei capitoli successivi e riguarda in particolare l'impatto con la rete elettrica.

La qualifica di NZEB si basa sul quantitativo annuale di energia primaria e non già sul bilancio istantaneo di potenza, per cui non tiene conto dell'impatto sulle reti tecniche (elettrica e gas). Per tale ragione, è certamente più appropriato introdurre la definizione di edificio a energia "net zero" (zero al netto) in luogo di "nearly zero" (quasi zero). In un edificio NZEB lo scambio di potenza con la rete elettrica può avvenire nei due sensi e ciò può generare fenomeni caotici nella rete, come evidenziato da studi.

Un edificio che riesca a bilanciare istantaneamente consumi e generazione risulta invece con impatto nullo sulla rete elettrica. Tale tipologia di edificio può essere definito: edificio ad energia a km 0 (KZEB).

Il presente lavoro evidenzia come un edificio classificato NZEB per la qualità degli isolamenti e l'efficienza degli impianti possa ottenere un ulteriore miglioramento prestazionale attraverso l'impiego di sistemi di gestione dell'energia (Building Energy Management Systems) che operano sui sistemi di controllo dell'edificio (Building Automation Control Systems BACS) grazie alle informazioni ricevute dai BACS stessi e dal sistema di metering.

Il BEMS attua alcune logiche gestionali per ottimizzare l'autoconsumo della generazione locale, ottimizzare la prestazione degli impianti termici in funzione delle effettive esigenze e controllare alcuni carichi differibili al fine di controllare il diagramma complessivo di assorbimento elettrico dell'edificio.

L'architettura di impianti suggerita per il modello di NZEB residenziale multifamiliare è del tipo full elettrico (gas free), con unico allaccio elettrico per tutto l'edificio, un sistema di riscaldamento e produzione acqua calda sanitaria centralizzato a pompe di calore con geotermia. In tale modello, gli impianti tecnologici sono serviti da una microgrid elettrica supportata da domotica a livello di singola unità interfacciata con un sistema di building automation e metering a livello di edificio integrato con un supervisore di edificio. Lo scambio delle informazioni tra unità singole e supervisore di edificio consente l'implementazione di algoritmi di controllo per l'ottimizzazione della performance, sfruttando lo storage termico degli impianti termici e la differibilità di alcuni carichi (smart appliance). A tal fine è stato messo a punto un software di simulazione degli NZEB finalizzato alla valutazione dell'impatto dei sistemi di controllo sulla prestazione energetica dell'edificio attraverso alcuni indicatori di performance (KPI).

2 Edifici a energia quasi zero

2.1 Generalità

Il concetto di *edificio a energia quasi zero* (Nearly Zero Energy Building, NZEB) è definito per la prima volta all'interno della Direttiva europea 2010/31/EU ovvero *Energy Performance of Buildings Directive* (EPBD) *recast*.

L'*edificio ad energia quasi zero* è un edificio ad altissima prestazione energetica, il cui fabbisogno energetico, già ridotto, è in gran parte soddisfatto da energia prodotta da fonti rinnovabili in loco o nelle vicinanze.

Gli aspetti fondamentali di un NZEB sono l'involucro, la produzione di energia da fonte rinnovabile e gli impianti.

Per ottenere la qualifica di NZEB, un edificio deve possedere un sistema di impianti tecnici (Technical Building Systems TBS) ad elevata efficienza per la fornitura dei servizi tecnici essenziali dell'edificio quali, riscaldamento, ventilazione, aria condizionata (HVAC), illuminazione, acqua, sistemi di trasporto interni ecc. Il complesso di impianti presenti all'interno di un NZEB necessita quindi di un sistema di building automation (BACS) e di management integrato ad un sistema di metering distribuito (SMS) in un sistema generale di gestione e controllo energetico (building energy management system BEMS). L'impiego quindi di generazione locale da fonti rinnovabili completa il ciclo di qualificazione di un NZEB.

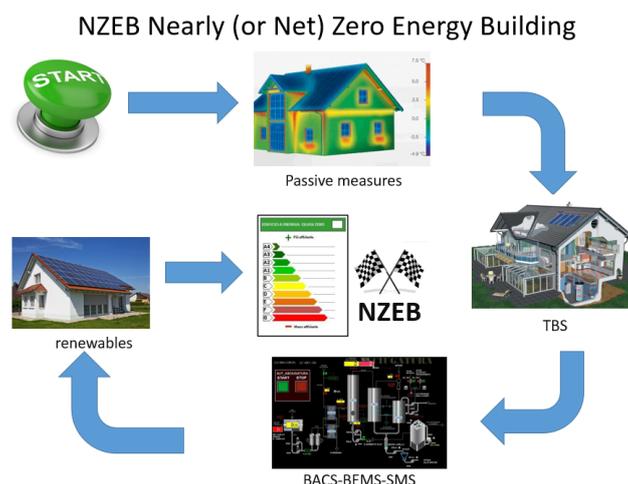


Figura 1. Ciclo di un NZEB

2.2 Servizi tecnici di edificio ed impianti tecnici di edificio (TBS)

Gli impianti tecnici (TBS) presenti all'interno di un edificio NZEB possono variare da caso a caso in funzione dei servizi tecnici presenti.

Gli impianti tecnici si suole suddividerli in due macro famiglie:

- impianti meccanici, ovvero idro-termo-sanitari;
- impianti elettrici e elettronici, compresi quelli relativi alla comunicazione;
- impianti di trasporto.

Gli impianti meccanici comprendono:

- gli impianti di climatizzazione indicati dall'acronimo HVAC (in inglese), gli impianti sanitari,
- gli impianti antincendio.

Gli impianti di climatizzazione HVAC (Heating Ventilation Air Conditioning), sono quelli che comprendono a loro volta:

- gli impianti di riscaldamento,
- gli impianti di condizionamento
- gli impianti di ventilazione.

Gli impianti sanitari sono quelli che comprendono:

- gli impianti di smaltimento delle acque reflue e delle acque piovane,
- gli impianti di adduzione idrica,
- gli impianti di pressurizzazione,
- gli impianti di riscaldamento dell'acqua a fini sanitari (ACS).

Gli impianti antincendio comprendono:

- gli impianti di rilevazione e segnalazione incendi,
- gli impianti di spegnimento incendi,
- gli impianti automatici di spegnimento incendi.

Gli impianti elettrici ed elettronici comprendono:

- gli impianti elettrici,
- gli impianti di illuminazione,

- gli impianti elettrici speciali per la sicurezza (safety e security),
- sistemi audio video,
- sistemi bus per gli edifici (HBES),
- building automation e domotica (integrazione di impianti con supervisione),
- reti di comunicazione.

Al fine di realizzare un NZEB è necessario:

- che i sistemi tecnici TBS siano organizzati in una visione d'insieme e non singolarmente;
- prevedere le soluzioni più efficienti e che determinino opportunità di controllo come per esempio pompe di calore, pannelli radianti, smart appliance, ecc.;
- un sistema di gestione energetica (Building Energy Management System BEMS) che consiste in un sistema SCADA capace di gestire e ottimizzare gli impianti TBS;
- i sistemi BEMS necessitano di:
 - 1) un Building Automatic Control Systems (BACS),
 - 2) uno smart metering system (SMS),
 - 3) un building manager (BM).

Gli impianti di un NZEB non possono essere gestiti come strutture passive autogestite, ma sono sistemi che necessitano di una gestione e manutenzione continua.

In questa ottica i sistemi gestionali che si avvalgono dei sistemi di controllo giocano il ruolo principale.

Il ciclo è del tipo: design – install – operate – optimize (DIOO).

Gli algoritmi di ottimizzazione gestionale implementati attraverso il BEMS possono essere migliorati in modo continuativo durante l'esercizio dell'edificio facendo tesoro dei dati di misurazione disponibili tramite il sistema di metering.

In questa ottica oltre al progettista giocano un ruolo chiave gli esecutori e soprattutto i gestori/manutentori.

2.3 Sistemi di building automation (BACS, HBES) e management (TBM, BEMS)

2.3.1 Sistemi HBA

Con il termine HBA, Home and Building Automation, si intende in modo generico un sistema (ad es. BACS o HBES), comprendente prodotti e software per il controllo automatico degli impianti tecnici dell'abitazione e dell'edificio con l'impiego della comunicazione seriale su BUS.

I sistemi di home e building automation (HBA) si basano sui sistemi BUS di edificio (HBES e BACS).

2.3.2 Sistemi HBES e BACS

Un sistema di automazione degli impianti tecnici di edificio è un sistema elettrico/elettronico che ha come obiettivo quello di controllare e comandare, in maniera automatizzata o no, un insieme integrato di funzioni in edifici ad uso residenziale, civile, terziario o industriale [8].

si definisce:

- HBES se conforme alla serie di Norme CEI EN 50090 del CLC/CT205 [8]
- BACS se conforme alle Norme EN ISO 16484 del CEN/TC247 [9]

La caratteristica fondamentale di un sistema HBES è la digitalizzazione dei comandi. Le norme CEI 205-2 e 205-14 indicano i requisiti per la progettazione e l'installazione dei sistemi BUS per la casa e negli edifici (HBES). I sistemi HBES utilizzano un sistema BUS (binary unit system) per la comunicazione, ovvero un sistema sequenziale di trasmissione digitale delle informazioni (segnali elettrici) secondo un protocollo definito. Esistono innumerevoli protocolli di comunicazione. Si fa riferimento nel seguito al protocollo di comunicazione Konnex (o anche KNX) che sta ormai diffondendosi a livello mondiale come lo standard più adatto alla gestione degli impianti tecnici di edificio e che è rispondente alla normativa EN 50090.

Comunicazione seriale su BUS. Tecnica di comunicazione che permette la trasmissione e/o ricezione sequenziale di segnali di controllo, comando o più generalmente di dati tra dispositivi interconnessi

mediante mezzo di comunicazione condiviso (ad es. coppia intrecciata, onde radio , raggi infrarossi).

Definizione da Norma CEI 205-14 [CEI 205-14]

Un sistema HBES è costituito da un'architettura ad intelligenza distribuita, contenente:

- componenti di sistema, per l'alimentazione, la protezione ed il funzionamento della rete alimentatori, cavi, accoppiatori, ecc.);
- sensori o dispositivi di ingresso (comandi, sensori, ecc.);
- attuatori o dispositivi di uscita (interruttori, regolatori, valvole, ecc.);

Si definisce ad intelligenza distribuita perché ogni componente dell'impianto è dotato di un'intelligenza autonoma con capacità di elaborazione e memorizzazione. Non è necessario un componente centrale o computer. Ciascun componente (sensore o attuatore) è programmato per svolgere autonomamente la sua funzione.

I sensori rappresentano i dispositivi di ingresso perché costituiscono l'interfaccia del sistema verso il mondo esterno ovvero gli utenti e i parametri ambientali.

Gli attuatori rappresentano i dispositivi di uscita perché costituiscono i comandi verso gli apparati di macchine o impianti da regolare.

La digitalizzazione dei comandi consente:

- di automatizzare alcune operazioni;
- di realizzare scenari di funzionamento attivabili secondo schemi logici complessi;
- di tracciare tutte le informazioni e quindi supervisionare e memorizzare;
- di remotizzare qualsiasi comando verso postazioni remote anche fuori dal contesto degli impianti tramite applicativi web.

Per quanto riguarda i supervisori è possibile definire:

- supervisori locali di appartamento;
- supervisori centralizzati di edificio.

Le funzioni eseguibili in un impianto tecnico possono essere suddivise in:

- funzioni elementari, allocate all'interno dei componenti HBES;
- funzioni complesse, allocate in un supervisore locale o centralizzato.

Le funzioni elementari sono quelle che si sarebbero realizzate con un sistema tradizionale (accensione luce, termoregolazione con orario, ecc.).

Le funzioni complesse sono quelle costituite da un insieme di funzioni elementari che seguono logiche booleane, orarie o ancora più complesse.

La guida CEI 205-18 identifica gli schemi funzionali e la stima del contributo alla riduzione del fabbisogno energetico di un edificio dei sistemi di automazione degli impianti tecnici.

2.3.3 TBM e BEMS

La parte della gestione di edificio relativa al funzionamento, manutenzione e gestione degli impianti tecnici per la verifica della loro efficienza energetica si definisce TBM, Technical building management.

Comprende funzioni di misura, registrazione e verifica della tendenza dei consumi, rivelazione degli allarmi e diagnostica relative all'uso improprio di energia.

Un sistema di gestione energetica dell'edificio nel suo complesso è definito Building Energy Management System BEMS. Il BEMS è un sistema di controllo basato sul monitoraggio delle apparecchiature meccaniche ed elettriche dell'edificio.

L'ottimizzazione dei BEMS dipende dall'installazione, dall'operatore, dai livelli di controllo, dalla suddivisione

delle zone, oltre che dal tipo di ambiente in cui la soluzione viene applicata.

La norma europea CEN-EN15232 "Energy performance of buildings – Impact of Building Automation, Controls and Building Management" definisce i metodi per la valutazione del risparmio energetico conseguibile in edifici ove vengano impiegate tecnologie di gestione e controllo automatico degli impianti tecnologici e dell'impianto elettrico [6].

2.3.4 Sistemi Konnex (KNX)

Konnex (KNX) è uno standard internazionale per la Building Automation e la Domotica approvato in tutto il mondo, sviluppato da KNX Association sulla base dell'esperienza dei suoi predecessori BatiBUS, EIB ed EHS. KNX è aperto, coperto da royalty ed indipendente dalla piattaforma, approvato come standard europeo (EN 50090 – EN 13321-1) e mondiale (ISO/IEC 14543) .

La programmazione dei dispositivi avviene attraverso un software di indirizzamento e parametrizzazione chiamato Engineering Tool Software (ETS), disponibile attualmente nella versione 5.0.

2.3.5 Supervisore Locale

Un supervisore locale è costituito da un'apparecchiatura hardware capace di comunicare in modo diretto con il sistema HBES in protocollo KNX del quale sistema ne costituisce un nodo.

Il supervisore inoltre è capace di comunicare con altri standard diffusi nei sistemi HBA (Modbus per esempio) e con il protocollo TCP-IP attraverso il quale è possibile collegarlo al router locale per il collegamento ad internet.

Il supervisore svolge una serie di importanti funzioni:

- 1) Implementa un'interfaccia grafica di gestione (supervisione e telecontrollo) tramite dispositivi mobili quali smartphone e tablet
- 2) Integra il sistema Konnex ad altri sottosistemi (quale ad esempio Modbus, M.Bus, Z-Wave, DALI, allarmi, videosorveglianza, ecc.) per una piena interoperabilità ed integrazione tra tutti i sottosistemi presenti
- 3) Collega il sistema HBES (Konnex e da altri protocolli) ad internet attraverso il Router per la remotizzazione della gestione
- 4) Consente la programmazione di funzioni complesse sul sistema Konnex e sugli altri sottosistemi

L'installazione di un supervisore locale quindi consente di realizzare un'interfaccia uomo/impianto unica, semplice, affidabile e remotizzabile, integrando tutti i sottosistemi presenti nell'appartamento: termoregolazione, luci, controllo carichi, allarmi, metering, antincendio, allarmi, videosorveglianza, videocitofono, ecc. ecc.

La presenza di un supervisore locale consente di realizzare un'interfaccia uomo/impianto (HSI) su dispositivi mobile di uso comune. L'interfaccia è integrata, unica, semplice, affidabile e remotizzabile.

Consente inoltre di remotizzare la gestione degli impianti e delle macchine presenti nell'appartamento.

Il supervisione locale è basato su un'architettura del tipo client-server. La sezione dal lato server consiste in un dispositivo che rappresenta l'unità logica del sistema e permette il controllo di tutti i dispositivi ad esso connessi.

La componente client consiste nei PC, touch screen, tablet e smartphone, connessi alla rete LAN via cavo (Ethernet) o WiFi; questi dispositivi comunicano tramite il software del supervisore con il server per controllare l'impianto.

Il supervisore costituisce un arricchimento importante dell'impianto domotico della singola unità.

2.3.6 Sistemi di supervisione centralizzati

Un supervisore centrale di edificio (SuViCe) è costituito da un'apparecchiatura hardware con elevata capacità di calcolo capace di comunicare in modo diretto con tutti i sistemi HBES e BACS presenti nell'edificio. Di fatto è un server sul quale è allocato un software di gestione SCADA. L'acronimo SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition, cioè "controllo di supervisione e acquisizione dati") indica un sistema software distribuito per il monitoraggio elettronico di sistemi fisici.

La parte del sistema SCADA che gestisce i sistemi energetici ai fini di una loro ottimizzazione prestazionale è definita BEMS.

Il sistema SCADA costituisce anche l'interfaccia uomo impianto (human machine interface) HMI.

La crescente domanda di soluzioni potenti ed aperte per il settore della Building Automation e della Domotica ha portato una serie di aziende leader nel settore dei sistemi SCADA industriali a creare una speciale edizione di prodotto per il settore BEMS.

2.4 Da edificio a energia quasi zero (NZEB) a edificio a energia a km zero (KZEB)

La qualifica di NZEB si basa sulla media mensile e annuale di energia primaria e non già sul bilancio istantaneo di potenza, per cui non tiene conto dell'impatto sulle reti tecniche (elettrica e gas). Per tale ragione, potrebbe essere più appropriato introdurre la definizione di edificio a energia "net zero" (zero al netto) in luogo di "nearly zero" (quasi zero). La Figura REF mostra che, in un edificio con qualifica NZEB, il bilancio energetico annuale è pari a zero, tuttavia la potenza istantaneamente scambiata con la rete è, in generale, diversa da zero. Lo scambio di potenza può avvenire nei due sensi e ciò può generare fenomeni caotici nella rete e importanti diseconomie per gli utenti, come evidenziato da studi.

La presente ricerca si pone l'obiettivo di minimizzare lo scambio di potenza con la rete, facendo in modo che la domanda di energia dalla rete sia possibilmente controllata e con verso invariante (consumatore o produttore di energia) per periodi superiori a quelli caratteristici di adeguamento della rete a scala regionale.

Per portare a zero lo scambio di potenza con la rete è possibile avvalersi di strategie di DSM applicate ai carichi controllabili e alle possibilità di accumulo di energia (energy storage) elettrico e termico. In questo modo si può arrivare a un edificio dal comportamento "near zero power" (a potenza quasi zero) e quindi a un edificio "km zero energy building" (KZEB, a energia a chilometri zero).

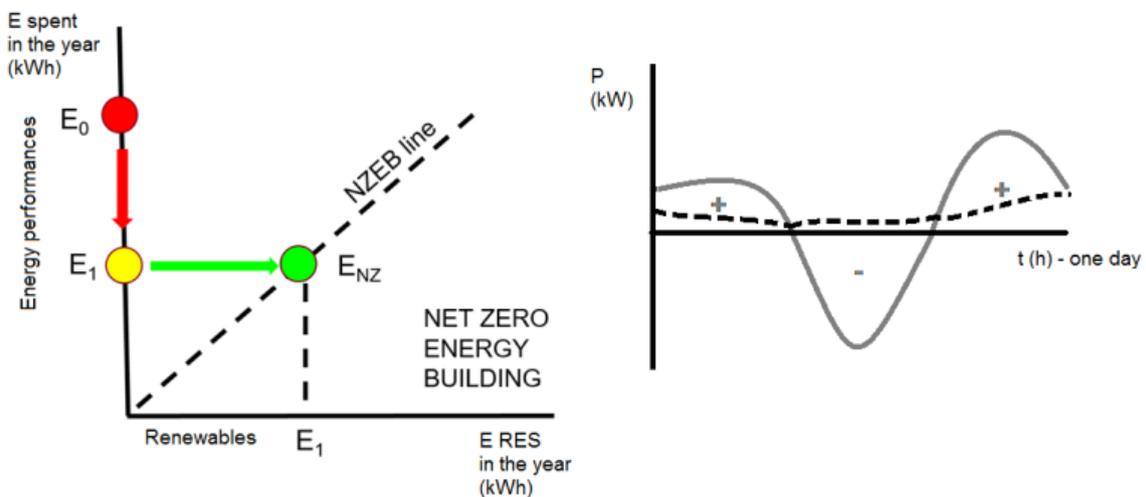


Figura 2. In un edificio NZEB il bilancio energetico annuo è nullo (sinistra) ma la potenza istantaneamente scambiata con la rete di distribuzione in generale non è uguale a zero (destra, linea continua).

L'approccio proposto consiste nell'integrazione di TBS in un edificio di tipo terziario o residenziale, in riferimento all'interazione energetica e all'ottimizzazione della gestione dei flussi di energia. In questo modo, l'edificio può essere considerato un soggetto che interagisce con la rete di distribuzione (elettrica e del gas naturale), potenziando le sue prestazioni in termini di efficienza energetica e costo. In tale approccio, il DSM della domanda di energia elettrica può avere un grande impatto rispetto alla rete, specialmente tenendo in considerazione la presenza di carichi gestibili, come gli elettrodomestici (ad es. lavatrici) e i sistemi di condizionamento, che possono essere sfruttati come sistemi di accumulo di energia. Un BEMS avanzato può migliorare il comportamento energetico dell'edificio, in modo tale da promuovere la qualifica da NZEB a KZEB, con molteplici vantaggi:

- risparmio economico e maggiore conform per gli utenti

- profilo di carico controllato e minore impatto per il distributore.

2.4.1 Edificio gas-free

L'architettura proposta per il TBS è *gas-free*, in cui tutti i sistemi sono alimentati elettricamente, inclusa la produzione di calore per riscaldamento, acqua calda sanitaria (attraverso un sistema a pompa di calore) e cucina (tramite fornelli a induzione).

2.4.2 Generazione locale

Nell'architettura proposta, la generazione locale è data da un sistema fotovoltaico, mentre il riscaldamento localizzato è dovuto a un sistema geotermico accoppiato a pompe di calore. le pompe di calore geotermiche consentono un consumo di energia di gran lunga inferiore rispetto ai sistemi di riscaldamento tradizionali, in quanto sfruttano il terreno come sorgente di calore gratuita.

2.5 Da NZEB a "zero emission building" (ZEB)

L'uso di un modello completamente elettrico, privo di riscaldamento centralizzato a gas e di cogenerazione, rende l'edificio un edificio a emissioni zero o "zero emission building" (ZEB). Un altro vantaggio importante è la possibilità di implementare un BEMS avanzato, con un impatto rilevante sul DSM elettrico, come schematizzato in Figura REF. In tale figura si illustrano le possibilità di evoluzione di un edificio fino alla qualifica di ZEB.

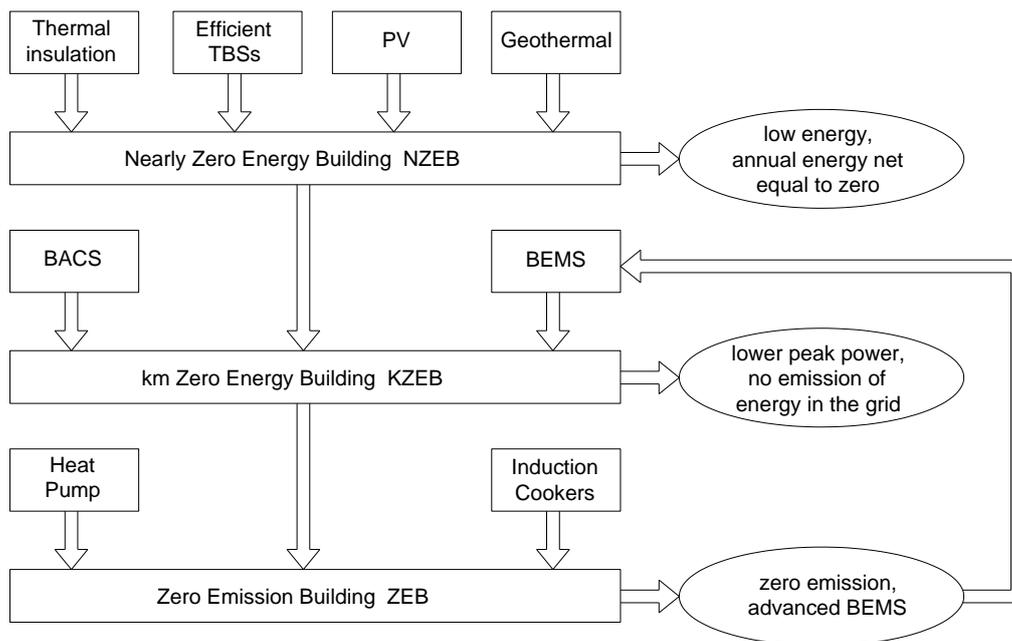


Figura 3. Schema di evoluzione da NZEB a ZEB

3 Architettura d’impianto di riferimento

3.1 Generalità: SMDU e MURB

Gli edifici di tipo residenziale-terziario-commerciale possono essere suddivisi in:

- edificio a singola unità (case unifamiliari, case a schiera, complessi immobiliari) – *single and multi dwelling units (SMDU)*;
- edificio multi unità - *Multi Unit Residential Building (MURB)*.

La problematica di gestione dell’energia all’interno di un edificio multifamiliare consiste nel fatto che le unità possono essere indipendenti dal punto di vista della proprietà, mentre gli impianti tecnici devono avere una visione comune al fine di ottimizzarne la prestazione energetica.

Gli edifici considerati sono quelli multi unità a prevalente destinazione abitativa chiamati *MURB*, costituiti dal palazzo/condominio con unità immobiliari (appartamenti, uffici e negozi) dislocate verticalmente su più piani, e con servizi comuni di connettività e parcheggi.

Un edificio di tipo residenziale-terziario-commerciale multi unità è dotato di una serie di servizi tecnici garantiti da impianti tecnici energivori definiti nei capitoli precedenti.

In un edificio NZEB si possono suddividere:

- gli impianti tecnici di servizio alle singole unità (residenziali, terziarie e commerciali),
- gli impianti tecnici condominiali.

Gli impianti tecnici sono alimentati da utenze energetiche (tipicamente elettriche e gas, e a volte teleriscaldamento) che corrispondono ai punti di fornitura/allaccio con le reti pubbliche di distribuzione.

Si possono individuare due tipologie di allaccio alle reti pubbliche come riportato nella tabella seguente.

Tabella 1. Tipologie di punti di allaccio

Punti di allaccio indipendenti per ogni unità	I
Punto di allaccio comune per l’edificio	C

Il presente lavoro ha voluto innanzitutto individuare una tipologia di edificio considerabile come medolle di riferimento.

Si è considerato a tal fine un edificio *MURB* multi unità a prevalente destinazione abitativa, costituito dal palazzo/condominio con unità immobiliari (appartamenti, uffici e negozi) dislocate verticalmente su più piani, e con servizi comuni di connettività e parcheggi. Sono gli edifici tipici delle nuove realizzazioni all’interno delle città e dei grandi centri urbani.

Nel presente modello gli impianti tecnici energivori sono classificati come nella tabella seguente, nella quale sono evidenziate le possibili alimentazioni energetiche.

Tabella 2. Impianti tecnici a servizio degli NZEB e possibili alimentazioni (C indica una fornitura centralizzata, I indica una fornitura indipendente per unità)

TBS	Sigla	Elettrico	Gas	Telerisc.
riscaldamento invernale	H	X (C,I)	X (C,I)	X (C)
climatizzazione estiva	AC	X (C,I)	X (C)	X (C)
ventilazione meccanica	V	X (C,I)		
acqua calda sanitario	DHW	X (C,I)	X (C,I)	X (C)
cottura cibi	CK	X (C,I)	X (I)	
illuminazione	L	X (C,I)		
Lavaggi stoviglie	DW	X (C,I)		
Lavaggi panni	WM	X (C,I)		
Servizio prese, impianti elettrici	IE	X (C,I)		
Impianti elettrici speciali e elettronici	HBES	X (C,I)		
Impianti di comunicazione (nota)	ICT	X (C,I)		
Ascensori, impianti di servizio di edificio	AS	X (C)		

Nota. Per impianti di comunicazione (ICT) si intende quei sistemi ed apparecchiature, inclusi gli elementi di rete non attivi, che consentono di trasmettere segnali via cavo, via radio, a mezzo fibre ottiche e con altri mezzi elettromagnetici. Sono esclusi da questa famiglia gli impianti per l'automazione integrata dei servizi di edificio (domotica e building automation) che ricadono nella famiglia degli impianti elettrici speciali e elettronici (HBES).

3.2 *Caratteristiche del complesso*

Nel presente lavoro si fatto riferimento ad un complesso edilizio realmente in costruzione situato a Campobasso, coincidente con il modello di MURB individuato.

Il complesso è costituito da due edifici in elevazione ad uso residenziale ed una piastra centrale dedicata a uso commerciale e area parcheggio.

I due corpi fabbrica in elevazione (denominati rispettivamente Torre A e Torre B) sono destinati come segue:

- la Torre A è a uso residence (unità in locazione),
- la Torre B è a uso unità abitative private (in vendita).

In Figura 4 si riporta lo stato dei lavori a marzo 2016.



Figura 4. Edificio considerato come riferimento.

Come si può vedere, gli edifici sono ormai ultimati nella parte strutturale. Sono in corso di realizzazione la parte impiantistica e le rifiniture.

In Figura 5 si riporta l'area in cui è situato il complesso edilizio. La struttura è situata a Sud del centro cittadino, presso l'Università degli Studi del Molise.



Figura 5. Area del complesso edilizio

I dati principali relativi alla struttura edilizia sono sintetizzati in Figura 6 che presenta un estratto dalla relazione tecnica.

Dati edificio

Località

Comune:	Campobasso	Zona climatica:	E
Latitudine:	41,56 °	Gradi Giorno:	2346
Altitudine:	701 m	Temperatura esterna di progetto:	-4 °C

Edificio

Categoria:	Residenziale / Alberghi		
Destinazione:	Abitazione	n° di abitanti:	300
Sup. riscaldata/utile:	11100 mq	Volume netto:	30000 mc
Sup. raffrescata:	11100 mq	Locale tecnico:	Si
n° di piani:	10	Piscina:	No
Tetto:	Tetto a falda	Orientamento:	0 °
		Inclinazione:	18 °
Tipo intervento:	Nuova costruzione		

Prestazione Energetica

L'indice di prestazione energetica EPH esprime il fabbisogno di energia dell'involucro per il riscaldamento invernale. L'indice di prestazione energetica EPC esprime il fabbisogno di energia dell'involucro per il raffrescamento estivo.

EPH involucro:	40 kWh/mq anno
EPC involucro:	11 kWh/mq anno

Figura 6. Dati salienti della struttura edilizia

Lo schema in Figura 7 riporta l'ubicazione delle varie destinazioni d'uso all'interno del complesso edilizio.

Per ogni piano è indicato il numero di appartamenti e la potenza elettrica disponibile prevista per ciascun appartamento. Le sigle sono così definite:

- A: torre residence
- B: torre residenziale privati
- C: commerciale(suddiviso in CA e CB)
- P: parcheggi
- UC: servizi comuni

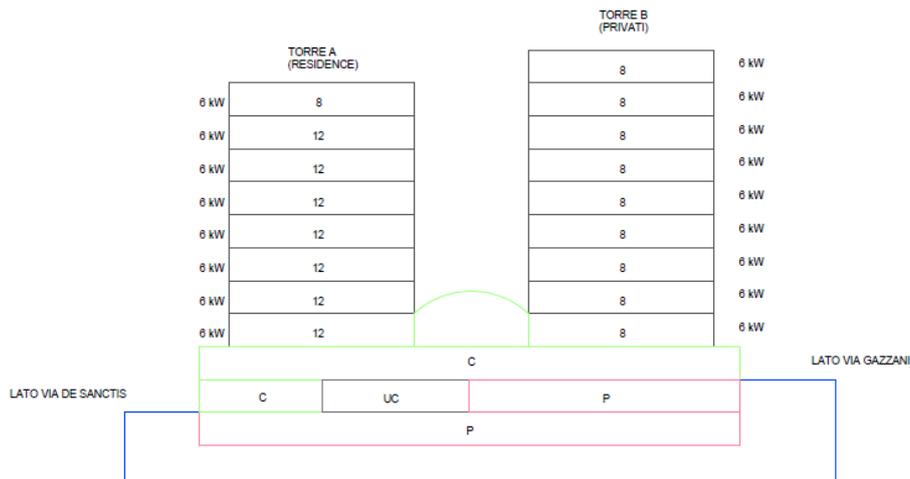


Figura 7. Schema delle unità immobiliari

La torre A è costituita da 92 unità residenziali, di superficie mediamente pari a 40-50 m² (Figura 8). La torre B è costituita da 72 unità residenziali, di superficie mediamente pari a 75 m².

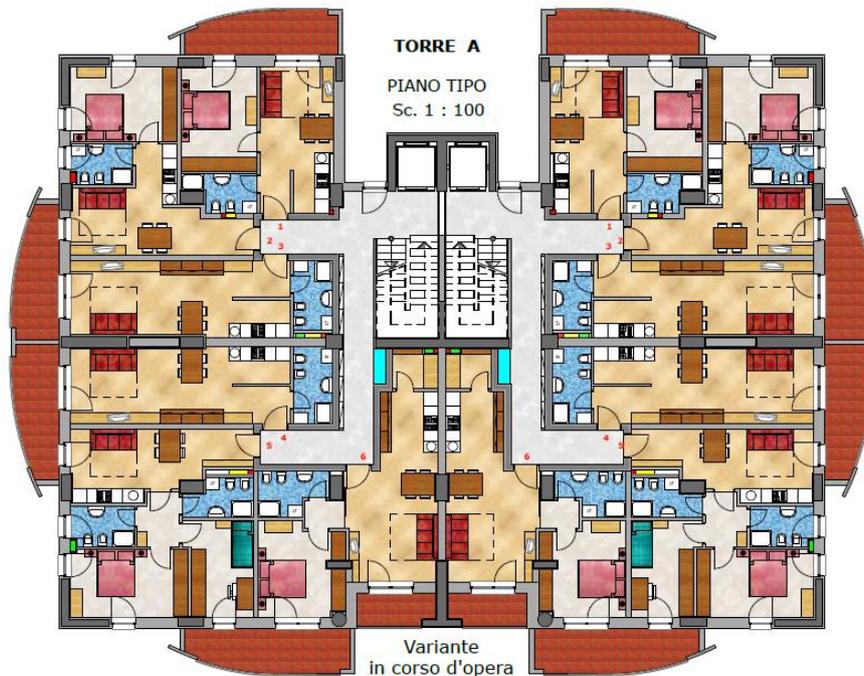


Figura 8. Piano tipo della torre A

La zona commerciale C è ammonta complessivamente a circa 2000 m², ripartiti in 1000 m² relativi alla Torre A e 1000 m² alla Torre B.

La zona parcheggi P è costituita da una superficie di circa 2000 m², destinata in parte a parcheggi privati ed in parte a parcheggi pubblici.

All'interno del complesso edilizio sono presenti le utenze energetiche di seguito elencate, con la rispettiva sigla:

- CTA, centrale termica per la torre A ed il commerciale CA ricadente nella Torre A;
- CTB, centrale termica per la torre B ed il commerciale CB ricadente nella Torre B;
- P, parcheggio privato e parcheggio pubblico
- UC, utenze comuni per illuminazione, ventilazione, idrico etc.
- UEA, utenze elettriche della torre A
- UEC, utenze elettriche del commerciale.

In una prima fase la proprietà ha deciso di attivare la sola torre A in modalità residence ovvero con locazione delle unità immobiliari per brevi e medi periodi con contratto che prevede oltre alla locazione anche le utenze energetiche elettriche di riscaldamento e di acqua calda sanitaria.

Le simulazioni condotte pertanto si sono riferite alle sole utenze energetiche presenti nella torre A.

3.3 Impianti tecnici nell'edificio oggetto delle misure

La prima attività svolta ha riguardato l'individuazione di un edificio del tipo MURB ottimale per le misure e le simulazioni.

L'architettura impiantistica proposta per gli edifici NZEB prevede l'utilizzo di:

- pompe di calore, geotermiche dove tecnicamente vantaggioso, per la generazione del calore sia per il riscaldamento d'ambiente sia per l'acqua calda sanitaria
- sistemi di pannelli radianti a pavimento per la diffusione del calore

Gli edifici NZEB sono caratterizzati da un elevatissimo livello di isolamento termico sia delle superfici opache sia delle superfici trasparenti con conseguente ridotto fabbisogno energetico per la climatizzazione. Inoltre l'uso di sistemi di emissione a pannelli radianti a pavimento consente la distribuzione del fluido termovettore a bassa temperatura.

Inoltre, la combinazione dell'elevato isolamento termico e dell'uso di sistemi radianti determina un'elevata capacità termica (inerzia termica) della porzione di edificio riscaldato. Ciò richiede di programmare in modo attento i tempi di accensione e spegnimento al fine di ottimizzare la prestazione energetica nell'uso intermittente con attenuazione.

D'altra parte, l'elevato isolamento termico consente di sfruttare l'inerzia termica per anticipare l'accensione dell'impianto di riscaldamento senza variazioni significative del fabbisogno energetico del sistema.

Per attuare politiche di ottimizzazione gestionale è necessario implementare sistemi di gestione avanzati (BEMS) che sfruttano i segnali di input e output dei sistemi di controllo intelligenti (HBES e BACS).

I sistemi di generazione del calore ed i cicli frigoriferi, tradizionalmente, sono regolati prevalentemente con modalità on-off, anche in quanto l'inerzia termica intrinseca dei sistemi serviti non richiede un controllo particolarmente fine. Nell'ambito delle pompe di calore, anche in presenza di un'unica macchina, la potenzialità complessiva è suddivisa tra più circuiti, in modo che sia possibile una regolazione a gradini della potenza erogata. Per applicazioni di piccola potenza, per le quali non è commercialmente sostenibile la suddivisione in gradini di parzializzazione, si sono diffuse negli ultimi anni macchine con portata variabile di refrigerante. Tali macchine, volgarmente denominate "a inverter", equipaggiate prevalentemente con compressori "scroll", modulano la potenza erogata utilizzando alternativamente, motori asincroni con alimentazione tramite convertitore di frequenza statico (inverter), motori a corrente continua, by-pass del refrigerante trattato dal compressore, ecc. Per le macchine di maggiore potenza, dal punto di vista termico, è sufficiente accoppiare la macchina ad un serbatoio d'acqua (sull'aspirazione della macchina) di volume sufficiente a garantire una temperatura di mandata all'impianto con modeste variazioni nel tempo, non

oltre 1 °C per minuto. Ciò però comporta che l'assorbimento di energia elettrica sia caratterizzato da picchi di valore massimo costante e durata variabile in funzione della potenza media richiesta dall'impianto.

Si osservi inoltre che molte pompe di calore manifestano inoltre una variazione concorde di efficienza e assorbimento di potenza elettrica al variare delle condizioni operative: nelle condizioni ambientali più favorevoli (es. temperatura di evaporazione più alta) aumentano sia la potenza termica erogata che la potenza elettrica assorbita con maggiore aumento della prima che determina un miglioramento dell'efficienza della macchina. Ciò comporta che, in condizioni ambientali favorevoli, a parità di fabbisogno termico, la potenza elettrica di picco della macchina aumenta, ma si riduce maggiormente la durata media di ciascun picco, con riduzione della potenza elettrica media assorbita dalla pompa di calore.

È evidente quindi che per un corretto dimensionamento dell'impianto, anche dal punto di vista elettrico, è necessario che la potenzialità complessiva di progetto sia fornita mediante un numero di gradini di parzializzazione non inferiore a 3 (es. 3 macchine a 1 gradino, oppure 2 macchine ciascuna con 2 gradini). Per un funzionamento ottimale è opportuno che le macchine siano predisposte per il funzionamento in parallelo, mediante accoppiamento elettronico (una sola macchina opera con controllo "master" mentre le altre operano con controllo "slave"). In alternativa è possibile l'accoppiamento virtuale delle macchine mediante il sistema di regolazione della centrale termofrigorifera, operando sui set-point di attivazione delle macchine.

Nell'architettura di reti con PDC, i servizi termici di riscaldamento di invernale (H) e di acqua calda sanitaria (DHW) sono centralizzati di edificio e riferiti ad un'unica centrale termica di edificio (CT) allacciata al punto di fornitura elettrica condominiale (UEC).

I servizi di cottura cibi (CK) sono indipendenti con fornitura di gas per ogni utenza (UGA).

L'aria condizionata (AC) è locale alimentata dalla fornitura elettrica indipendente (UEA).

Le utenze energetiche presenti in un NZEB sono quindi quelle riportate nella tabella seguente.

	TBS	Vettore	Tipo	Sigla
Utenze elettriche delle unità residenziali, terziarie e commerciale	L, DW, WM, IE, AC, HBES, ICT	E	I	UEA
Utenze gas delle unità residenziali, terziarie e commerciale	CK	G	I	UGA
Utenza condominiale e centrale termica di edificio	IE, L, AS, H, DHW	E	C	UEC

La figura seguente mostra l'architettura delle reti elettriche e gas a partire dalle reti pubbliche di distribuzione, per la soluzione proposta.

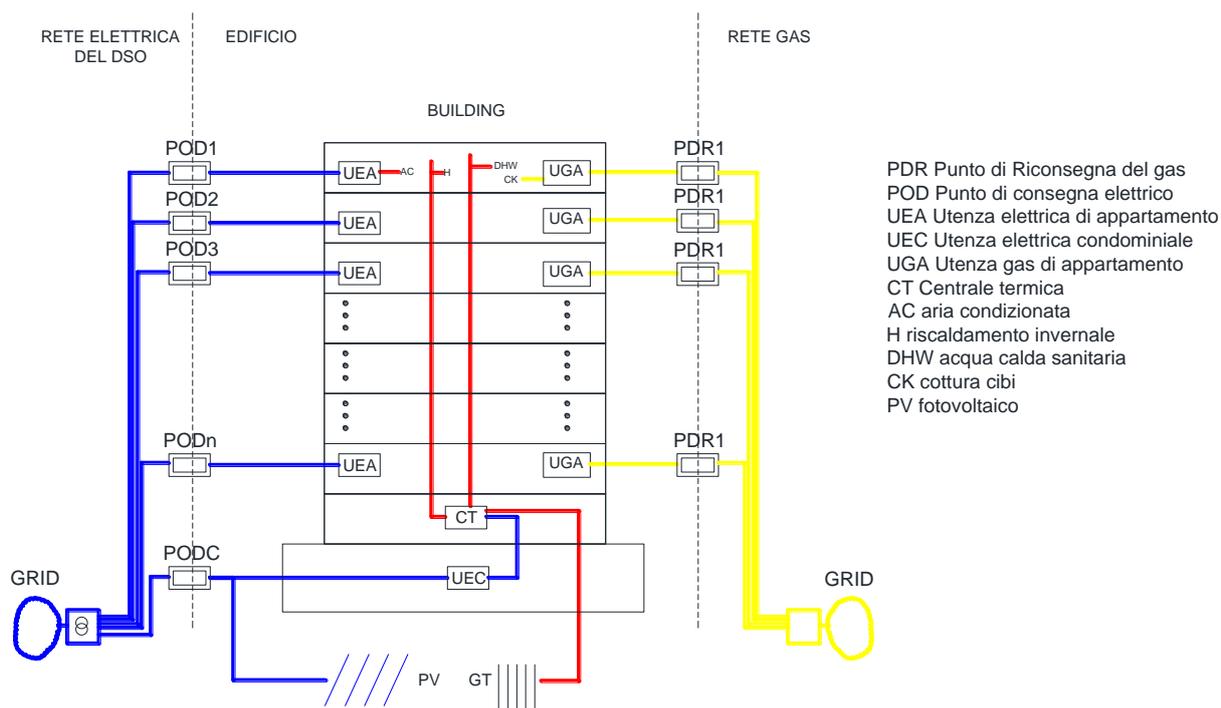


Figura 9. Architettura delle reti elettriche e gas a partire dalle reti pubbliche di distribuzione, per la soluzione proposta

Il sistema di riscaldamento centralizzato a PDC può essere utilizzato anche in raffreddamento evitando i sistemi di aria condizionata locali.

Per la ventilazione meccanica degli ambienti l'architettura prevede aspiratori locali stand alone del tipo aspiratori-estrattori statici con recupero di calore. Tali aspiratori sono particolarmente adatti per il ricambio d'aria nelle abitazioni. Il rendimento dell'aspiratore/estrattore può essere anche molto elevato. In alternativa si può realizzare un sistema con canalizzazioni.

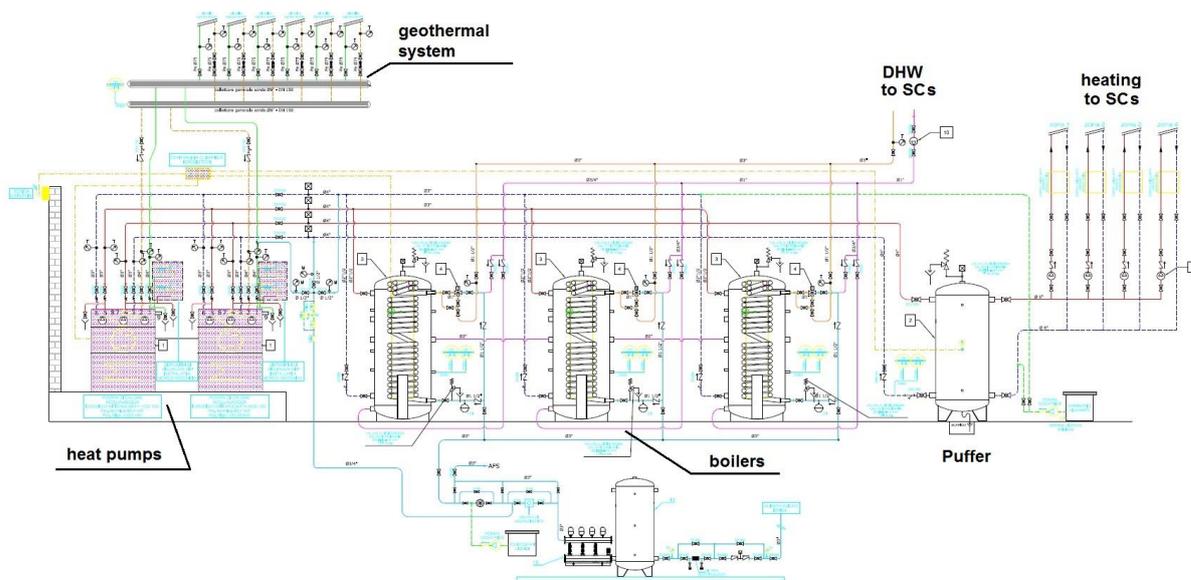


Figura 10. Esempio di schema generale di un impianto termico

L'architettura di impianto con pompe di calore geotermiche prevedono:

- una o più pompe di calore;
- un sistema di sonde geotermiche;

- un puffer per l'alimentazione di circuito di distribuzione per il riscaldamento;
- un serbatoio (o più serbatoi) di produzione e accumulo dell'acqua calda sanitaria;
- le pompe di distribuzione dell'impianto di riscaldamento e di ricircolo dell'acqua calda sanitaria (per garantire una tempestiva erogazione ad ogni unità indipendentemente dalla distanza dalla sottocentrale);
- un sistema di distribuzione con satelliti di regolazione controllo e contabilizzazione per ogni unità abitativa.

Il satellite center è costituito da:

- mandata e ritorno per il sistema di riscaldamento, completo di valvola di regolazione e meter;
- mandata per l'acqua calda sanitaria con sistema di ricircolo e meter
- mandata acqua fredda con meter

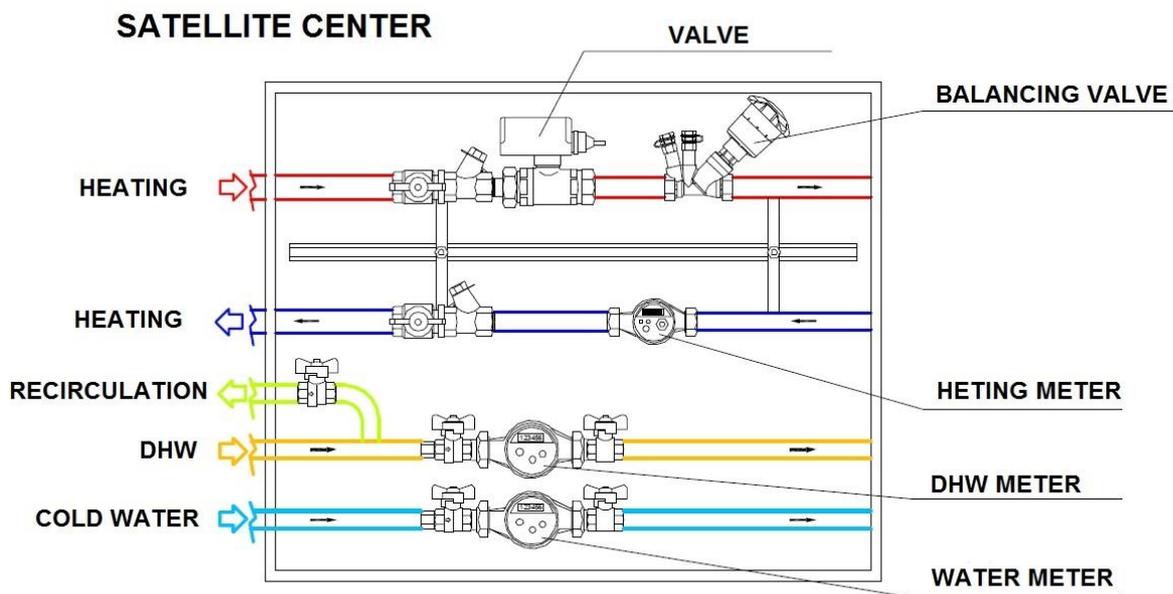


Figura 11. Satellite center

Il modello di micro grid suggerita per gli edifici NZEB di tipo MURB prevede l'impiego del vettore elettrico anche per la cottura dei cibi mediante piani ad induzione.

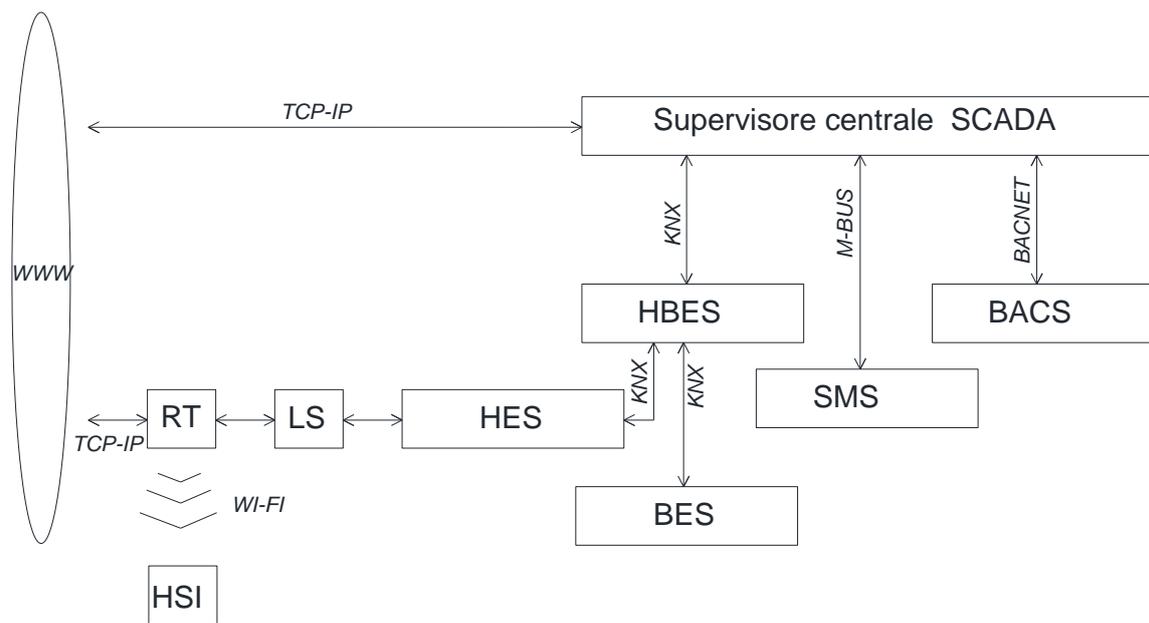


Figura 13. Schema di sistema SCADA

L'architettura completa del sistema HBES consiste di:

- Un sistema indipendente per ciascuna unità (Home Electronic System, HES), su BUS locale, completo di supervisore locale (LS) comunicante in KNX, e collegato ad un router (RT) a sua volta connesso alla rete dati (TCP-IP)
- Un sistema di edificio (Building Electronic System, BES) con una dorsale BUS connessa al sistema di supervisione principale (SCADA)

Gli HES connettono gli impianti tecnici di ciascuna unità (illuminazione, antifurto, schermatura solare, condizionamento etc.) tramite attuatori di tipo smart comunicanti in KNX. Gli HES sono usati dagli utenti per controllare tutti i sistemi domestici e gli elettrodomestici, attraverso una interfaccia uomo impianto - Human System Interface (HSI), ossia un software caricato su un tablet o uno smartphone e connesso via wi-fi al LS. Gli utenti possono accedere anche da remoto in quanto il LS è connesso al router (RT).

Per ogni unità abitativa è prevista l'installazione di un supervisore locale multiprotocollo con supervisore integrato.

Il supervisore è previsto del tipo Micro della Pulsar Engineering multi protocollo capace di integrare gli standard Konnex, Z-WAVE, Modbus ed altri.

Sul supervisore è allocato un sistema di supervisione locale del tipo ThinKnx per l'automazione della unità, basato su un'architettura del tipo client-server. La sezione dal lato server consiste in un dispositivo ThinKnx - Micro che rappresenta l'unità logica del sistema e permette il controllo di tutti i dispositivi ad esso connessi.

La componente client consiste nei PC, touch screen, tablet e smartphone, connessi alla rete LAN via cavo (Ethernet) o WiFi; questi dispositivi comunicano tramite il software ThinKnx con il server per controllare l'impianto.

Il supervisore costituisce un arricchimento importante dell'impianto domotico della singola unità con i seguenti vantaggi:

- Possibilità di implementare funzioni complesse, logiche e temporizzazioni;
- Possibilità di gestire apparati Z-Wave come smart plug o altri dispositivi;
- Creazione di un'interfaccia uomo impianto per ogni unità;
- Integrazione con il sistema di metering.

All'impianto HES di ciascuna unità sono collegati gli elettrodomestici smart.

Nell'architettura di rete proposta si prevede di collegare al sistema HES :

- la lavatrice
- la lavastoviglie

È importante notare la differente tipologia di connessione all’HES dei TBS fissi operanti in un edificio (illuminazione, HVAC etc.) e dei dispositivi smart alimentati mediante prese a spina (lavatrice e lavastoviglie).

I TBS fissi sono direttamente controllati dagli HES attraverso il sistema in standard Konnex (KNX).

Gli elettrodomestici non possono essere monitorati o controllati direttamente dall’HES, in quanto i produttori optano per l’adozione di protocolli proprietari. I dispositivi attuali non possono essere attivati o disattivati da parte dell’HES tramite attuatori, poiché essi sono controllati per mezzo di circuiti elettronici e il semplice alimentarli o disalimentarli non costituirebbe un impiego corretto. L’unica possibilità di monitorare e controllare tali tipi di dispositivi è l’uso dei protocolli proprietari e l’integrazione con il sistema HBES a un livello superiore, quale ad es. la rete TCP/IP o architetture di tipo cloud.

L’adozione di protocolli aperti da parte degli elettrodomestici smart costituirà una forte spinta alla diffusione dei BACS nelle strutture residenziali. L’integrazione degli elettrodomestici smart dotati di protocolli aperti all’interno di BACS distribuiti è un elemento chiave per la diffusione di tali sistemi. Nell’attesa di tale evoluzione, all’interno della microgrid proposta, gli elettrodomestici per lavaggi e gli altri carichi gestibili sono considerati alla stregua di dispositivi smart. Essi sono in grado di comunicare tramite wi-fi attraverso il router di unità verso un cloud e l’utente è in grado di operare localmente o da remoto attraverso l’interfaccia su tablet o smartphone.

Per quanto riguarda la parte BES, è prevista la realizzazione di una dorsale backbone di edificio del sistema HBES su protocollo Konnex on IP. Si utilizzeranno accoppiatori TP/IP per ogni unità. Il BES, d’altra parte, connette gli impianti tecnici centralizzati ed è collegato a tutti gli HES attraverso un accoppiatore (coupler, CP). Il BES è usato dal BEMS per gestire i servizi centralizzati e i carichi controllabili tramite il sistema SCADA.

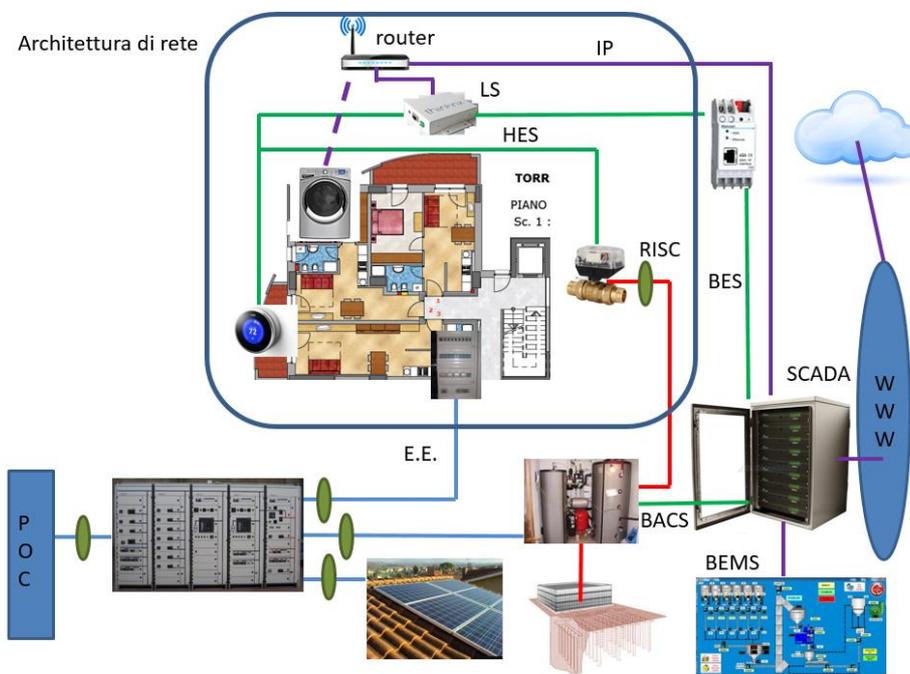


Figura 14. Elettrodomestici collegati in wi-fi con il router

E' prevista la realizzazione di un sistema di gestione e supervisione (SCADA) di tutti gli impianti elettrici e meccanici.

Il sistema consente:

- il monitoraggio dei consumi energetici (elettrici e termici) suddiviso per ogni unità e su profili orari;
- la supervisione degli impianti elettrici e termici per la diagnostica e la manutenzione;
- la gestione dell'impianto centralizzato di riscaldamento/raffrescamento;
- la gestione degli impianti elettrici e di illuminazione delle aree comuni;
- la possibilità di gestione degli impianti locali di riscaldamento/raffrescamento;
- la possibilità di gestione degli impianti locali elettrici, potendo intervenire sul distacco o ritardo di alcuni carichi non prioritari (lavaggi);
- la predisposizione alla gestione di carichi importanti e comuni quali ad esempio ricariche di veicoli o servizi di lavanderia;
- la predisposizione alla gestione di sistemi di accumulo elettrico centralizzato e/o distribuito.
- la predisposizione alla gestione di sistemi di generazione di emergenza (gruppi elettrogeni ed UPS).

3.5 Architettura di smart micro grid per gli NZEB

La complessità dei TBS richiede un'architettura particolare per il sistema elettrico, in grado superare lo schema rigido tradizionale che consiste nelle forniture singole da 3 kW ciascuna, verso una microgrid adattiva.

La proprietà/condivisione degli impianti consente la gestione di tipo comune dell'edificio.

Nel modello proposto, la proprietà della microgrid sta ai singoli utenti o al DSO, a seconda della normativa vigente. La gestione della microgrid è effettuata da un "building manager" (BM) che abbia la visione globale dell'edificio, non già da singoli utenti indipendenti. L'aggregazione dei singoli utenti in un sistema, alimentato da una rete comune connessa all'ente fornitore da un punto di connessione unico, permette il conseguimento di obiettivi sia economici che tecnici.

La gestione ottimale del sistema energetico di un edificio richiede che la consegna sia unica e l'aggregazione naturale è a livello di edificio con una fornitura MT ed una cabina MT/BT di proprietà.

L'edificio o un gruppo di edificio rappresenta il limite naturale dell'aggregazione, come per il sistema di riscaldamento. L'aggregazione dei consumatori gravita attorno un nodo elettrico in una microgrid comune, al fine di raggiungere i valori di soglia della domanda e di ottenere un profilo di carico cumulativo più virtuoso e flessibile.

L'architettura di smart grid per gli impianti tecnici a servizio di edifici multi unità di tipo NZEB può essere descritta sinteticamente nei seguenti punti:

- 1) Rete elettrica di distribuzione di proprietà del condominio allacciata alla rete mediante un unico punto di consegna in media tensione e cabina di trasformazione MT/BT (HV/LV) con un quadro elettrico generale di edificio in bassa tensione (MSB);
- 2) Sistema di generazione del calore per riscaldamento e acqua calda sanitaria centralizzato con pompe di calore geotermiche
- 3) Sistema di distribuzione del calore di edificio mediante centri satellite completi di misuratori di calore e acqua
- 4) Impianto fotovoltaico di edificio collegato alla rete elettrica dell'edificio
- 5) Sistema di distribuzione elettrica a partire dalla cabina MT/BT fino alle singole utenze realizzata con montanti singoli con possibilità di impiego di sistemi speciali di distribuzione a livelli di tensione non convenzionali
- 6) Soluzione domotica per ogni singola abitazione (HES) costituita da un BUS in protocollo KNX collegato ad un supervisore locale (LS) a sua volta connesso tramite un router alla rete internet. L'impianto elettrico si dirama da un quadro locale (ULP) completo di protezioni e dispositivi KNX.
- 7) Interfaccia uomo impianto (HSI) per ogni unità abitativa, costituito da sistema di gestione di tutti gli impianti dell'unità, degli elettrodomestici smart e dei consumi, del tipo APP con pagine grafiche intuitive su piattaforme mobili (tablet, smartphone)
- 8) Elettrodomestici smart comunicanti attraverso il router ad un cloud di gestione comunicante a sua volta con il sistema di gestione energetica dell'edificio

- 9) Sistema BUS di edificio (BES) di collegamento di tutti gli impianti domotici delle unità e degli altri sistemi tecnici con un supervisore principale di edificio
- 10) Sistema di controllo e automazione (BACS) degli impianti meccanici centralizzati
- 11) Sistema di smart metering distribuito (SMS)
- 12) Supervisore centrale (MS) di interazione dei sistemi HES, BES, BACS e SMS e dotato di un sistema di gestione energetica dell'edificio (BEMS) per l'ottimizzazione delle prestazioni ed il mantenimento i elevati livelli di comfort
- 13) Sistema di riscaldamento con pannelli radianti a pavimento

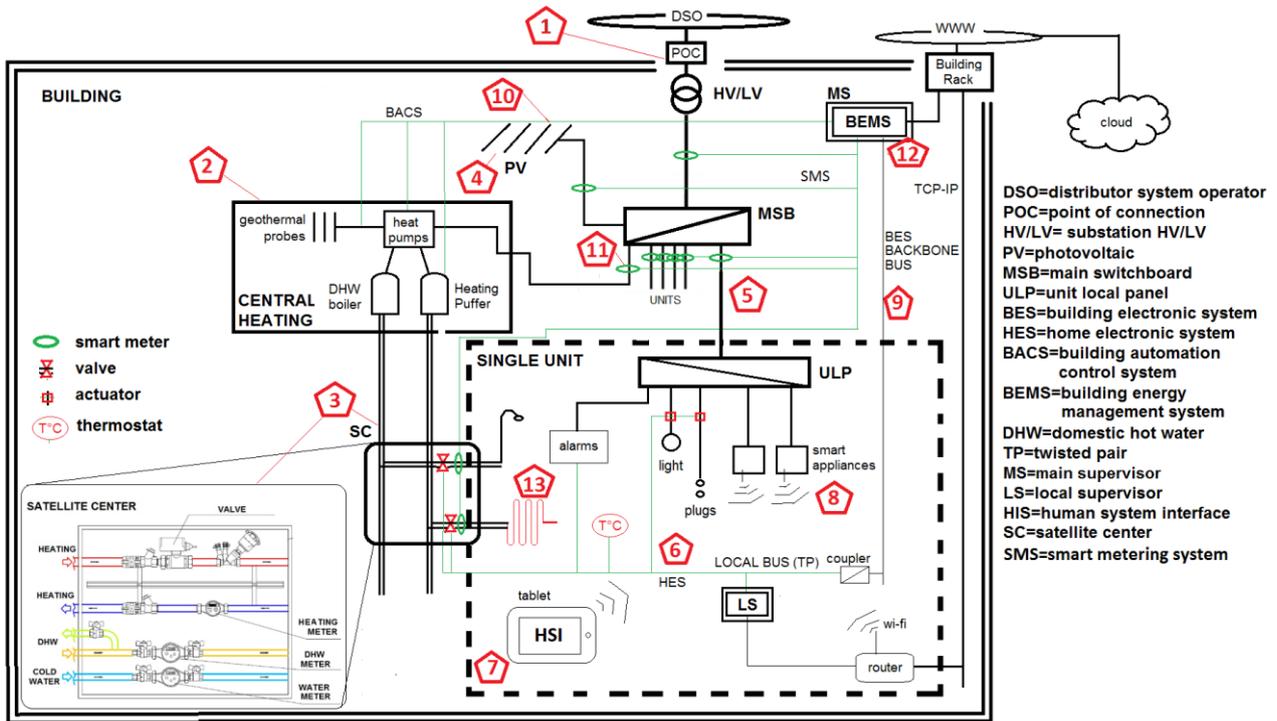


Figura 15. Architettura di smart micro grid per edifici NZEB

La presenza di sistemi BEMS/BACS per la gestione e il controllo dei TBS consente di implementare logiche DSM avanzate senza sostenere costi addizionali, sfruttando la presenza già prevista di sistemi di building automation (BACS, HBES e SMS), semplicemente implementando nel software di gestione (BEMS) tipicamente già presente in impianti di tale complessità, logiche avanzate di gestione.

Il beneficio economico sarà ripartito tra il building manager (BM) e i singoli utenti finali con modelli di saving sharing che possono prevedere benefici economici oppure bonus a punti. Il BM acquista l'energia dal punto di connessione unico con la rete e "ripartisce" i consumi tra gli utenti applicando contabilizzazioni del tipo:

- A consumo;
- Flat;
- Misti.

Una smart grid futura può essere ritenuta un aggregato di smart buildings, ognuno dei quali è considerato un singolo polo di carico.

3.6 Rete elettrica

Rete elettrica di distribuzione di proprietà del condominio allacciata alla rete mediante un unico punto di consegna in media tensione e cabina di trasformazione MT/BT (HV/LV) con un quadro elettrico generale di edificio in bassa tensione (MSB);

La rete elettrica di distribuzione fino ai singoli utenti è comune per tutta l'edificio ed allacciata alla rete attraverso un punto di fornitura unico in media tensione.

La cabina consiste in:

- un locale consegna MT, di pertinenza del distributore dove è allocato lo stallo entra esce del distributore
- un locale misure, con possibilità di accesso sia del distributore sia dell'utente, dove è allocato il misuratore fiscale
- un locale cabina MT/BT, suddiviso a sua volta in un locale MT contenente il quadro MT ed il/i trasformatore/i MT/BT ed un locale BT contenente il quadro generale di bassa tensione

La soluzione ottimale prevede l'impiego di una coppia di trasformatori gemelli al fine di garantire una completa ridondanza in caso di problemi su un trasformatore.

Un elevato miglioramento dell'affidabilità del sistema è garantito dalla presenza di un gruppo elettrogeno di emergenza (a gas o gasolio), poiché un disservizio elettrico generale comporterebbe un blocco su tutti gli impianti compresi quelli di riscaldamento, acqua calda e ventilazione meccanica. Nel caso di gruppo elettrogeno ad elevata autonomia è possibile pensare anche ad una soluzione ad un solo trasformatore MT/BT che semplifica notevolmente la sezione MT dell'impianto e le regole di connessione alla rete MT.

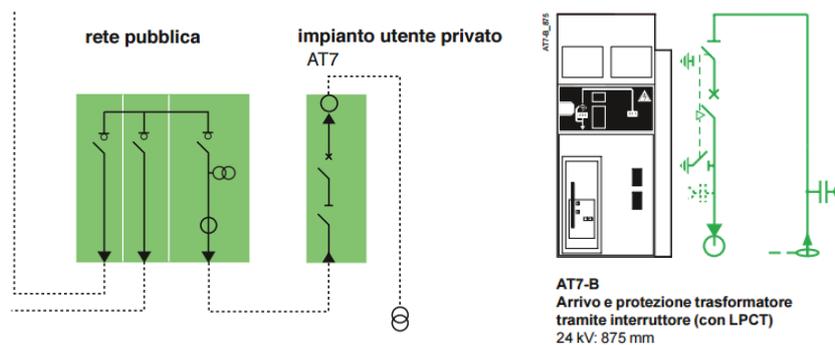


Figura 16. Protezione tipo AT7 della Schneider Electric

Infatti nel caso di un unico trasformatore è possibile utilizzare un'unità integrata MT con protezione conforme alla regola tecnica di connessione (tipo AT7 della Schneider Electric in Figura 16).

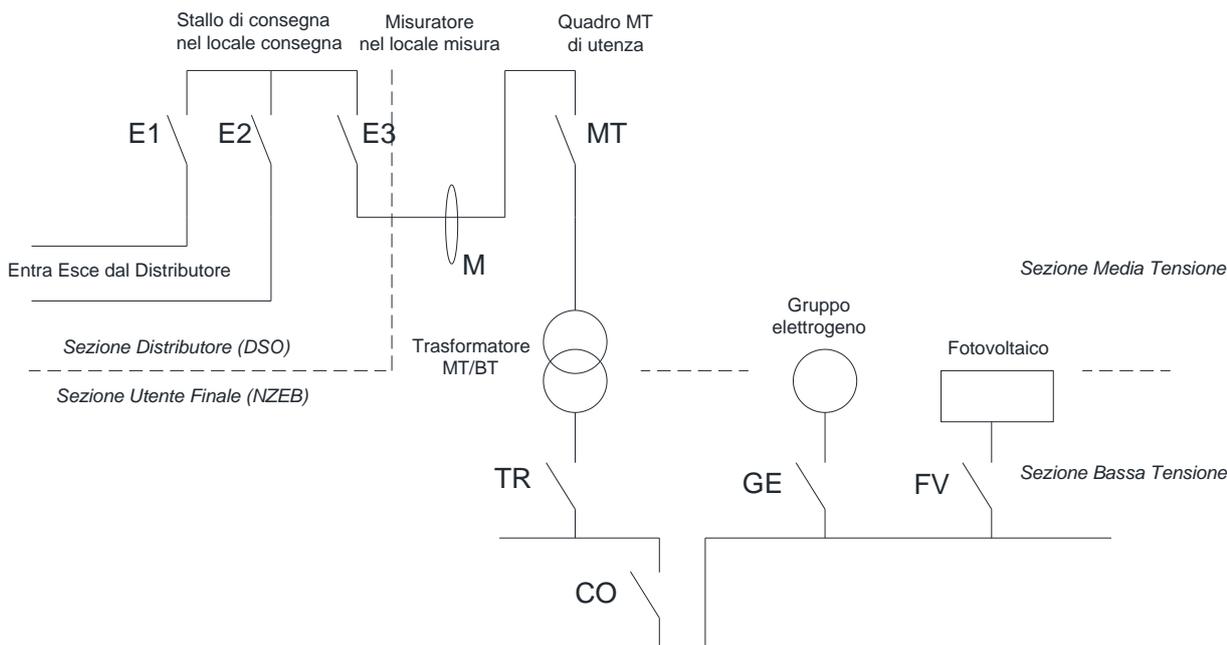


Figura 17

L'impianto di utenza è alimentato tramite una protezione generale (MT) in monoblocco completa di relè e misuratori. L'unità monoblocco è a ridotte dimensioni e a minima manutenzione.

Il trasformatore è del tipo a secco, triangolo stella con neutro a terra, completo di cassa di contenimento.

Il quadro generale di bassa tensione è suddiviso in due sezioni:

- una *sezione normale* alimentata da rete tramite il trasformatore;
- una *sezione preferenziale o in isola*, alimentata da rete in funzionamento ordinario e in isola tramite il gruppo elettrogeno in funzionamento di emergenza (assenza rete generale).

Il compromesso tecnico-economico migliore prevede l'utilizzo di un congiuntore (CO) che in caso di emergenza distacca preventivamente la sezione normale, limitando il carico alimentato dal gruppo elettrogeno mediante la chiusura dell'interruttore GE. In questo modo è possibile dimensionare il gruppo elettrogeno facendo riferimento al solo carico preferenziale.

L'impianto fotovoltaico è collegato alla sezione preferenziale del quadro, in modo tale che in caso di emergenza contribuisce all'alimentazione in isola della parte preferenziale, limitando l'uso del gruppo elettrogeno a gasolio.

Il sistema gestione avanzato BEMS deve prevedere una "modalità di esercizio in isola" in modo da mantenere sempre in funzionamento il gruppo elettrogeno per fornire la tensione portante al corretto funzionamento degli inverter dell'impianto fotovoltaico.

Il BEMS prevede successivamente al distacco del carico normale, la possibilità di richiusura del congiuntore CO, previa apertura della protezione generale TR, e controllo in real time dei singoli carichi alimentati dalla sezione normale, in modo da rialimentare la maggior parte possibile del carico dell'edificio.

La sezione preferenziale/in isola della rete prevede:

- impianti di sicurezza di edificio
- impianti tecnici comuni essenziali (luci, ascensori, idrico, ecc.)
- impianto di riscaldamento, ventilazione e acqua calda sanitaria
- impianti HES e di sicurezza delle singole unità

La sezione normale prevede:

- impianti elettrici delle singole unità, alimentati dai quadri locali (ULP)
- impianti comuni non essenziali.

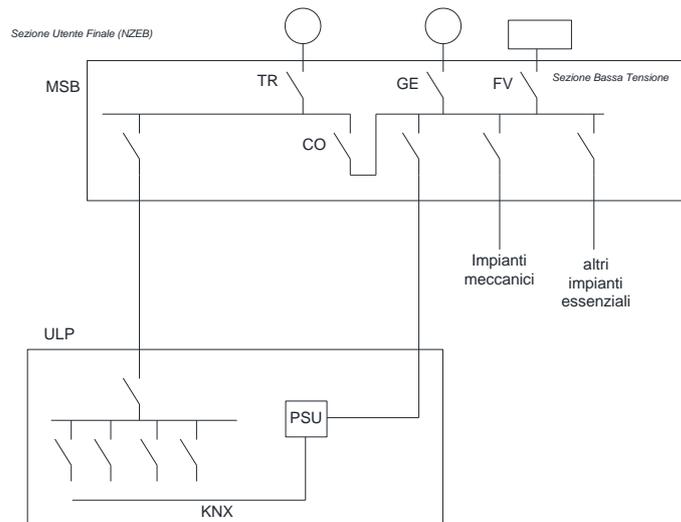


Figura 18. Schema dell'impianto elettrico

L'architettura di rete proposta con il modello della fornitura unica consente di ottenere notevoli vantaggi:

- Maggiore informazione sui consumi e sui costi energetici
- Trasparenza dei costi
- Aggregazione delle utenze
- Autogenerazione ed autoconsumo
- Partecipazione attiva (e remunerata) dei consumatori al controllo della domanda
- Abbattimento delle barriere a favore della concorrenza
- Favorire l'innovazione tecnologica e le applicazioni utilizzatrici avanzate
- Sfruttare l'intelligenza della rete a favore dei cittadini e non di altri player

L'architettura di rete proposta sembra andare nella stessa direzione prevista dal nuovo patto a livello europeo, un New Deal for Energy Consumers (luglio 2015) per il quale la Commissione Europea identifica tre pilastri fondamentali:

- dare maggior potere ai consumatori;
- realizzare veramente le smart home e gli smart network nell'interesse dei cittadini;
- proteggere i dati privati.

A seconda della potenza complessivamente impegnata, il punto di consegna unico può essere in bassa tensione o in media tensione.

La scelta di avere un punto di consegna unico rispetto a punti di consegna indipendenti determina vantaggi sia economici che tecnici.

I vantaggi economici sono:

- l'applicazione di tariffe BT o MT altri usi, invece della tariffa BT usi residenziali;
- la possibilità di sfruttare al meglio la generazione distribuita, incrementando la quota di autoconsumo;
- la possibilità di ottimizzare la gestione dei carichi, incrementando ulteriormente la quota di autoconsumo di energia generata localmente e ottimizzando gli oneri di acquisto dell'energia grazie a contratti che tengano conto del profilo di assorbimento controllato;
- la gestione ottimizzata e di precisione del riscaldamento, potendo verificare ed impostare i setpoint delle unità;
- la possibilità di implementare servizi innovativi di gestione dei carichi, quali in particolare la gestione ottimizzata del riscaldamento e la gestione ottimizzata dei lavaggi;
- la messa a punto di un sistema di supervisione e monitoraggio dei consumi, che consenta un'ulteriore ottimizzazione energetica (in quanto ciascun utente è a conoscenza dei propri consumi elettrici e termici e può di conseguenza ottimizzare le proprie abitudini).

I vantaggi tecnici sono:

- la migliore qualità del servizio elettrico, in caso di allaccio diretto in media tensione;
- la possibilità di migliorare ulteriormente la qualità del servizio, prevedendo sistemi di generazione in emergenza;
- la maggiore sicurezza degli utenti, per mezzo del sistema di distribuzione TN invece del sistema TT.

In caso di edificio costituito da sole utenze residenziali, il punto di consegna unico è a servizio di tali utenze. In tal caso gli oneri per l'acquisto dell'energia dovranno essere opportunamente ripartiti tra le utenze. In caso di edificio costituito anche da utenze non residenziali (ad esempio commerciali) possono esistere due configurazioni:

- Può esserci un punto di consegna unico solo per le utenze residenziali, mentre le utenze non residenziali possono essere servite da un altro punto di consegna unico ovvero da altri punti di consegna;
- Può esserci un punto di consegna a servizio di tutte le utenze dell'intero edificio.

Impianto fotovoltaico di edificio collegato alla rete elettrica dell'edificio

Per soddisfare i fabbisogni energetici annuali, l'architettura di rete proposta prevede l'installazione di un impianto fotovoltaico di edificio.

Le attuali disposizioni regolatorie prevedono due problematiche che ostacolano l'installazione efficiente ed economica degli impianti fotovoltaici per edifici multiunità. Le due problematiche sono:

- l'impianto fotovoltaico installato negli spazi condominiali deve essere asservito all'utenza condominiale comune e non alle utenze residenziali singole;
- l'impianto fotovoltaico non può alimentare in isola la rete, in caso di disservizio.

La prima problematica è superata dalla rete proposta per la presenza di un allaccio unico ed una micro grid unica che alimenta anche le utenze singole delle unità immobiliari.

Per la seconda problematica che riguarda l'aspetto fiscale della contabilizzazione dell'energia elettrica generata dal sistema fotovoltaico nel funzionamento in isola, il problema è superato dal fatto che tale funzionamento si attiva solo in caso di emergenza in assistenza al gruppo elettrogeno di emergenza. La rete infatti è prevista sempre esercita connessa al distributore.

Per il dimensionamento dell'impianto si deve considerare:

- la disponibilità di spazio in copertura;
- l'effettiva domanda di energia elettrica dell'edificio.

Considerando che le attuali efficienze consentono di raggiungere il valore di 150 W/m^2 , la disponibilità di una superficie dell'ordine di 1000 m^2 , consente di realizzare impianti dell'ordine di 100 kW , applicando un coefficiente pari a 0,7 per tenere conto dell'effettivo impiego dello spazio.

Il criterio di dimensionamento ottimale dell'impianto fotovoltaico deve tenere conto degli aspetti economici correlati alle immissioni in rete dell'energia. La soluzione ottimale prevede il massimo autoconsumo dell'energia, evitando le immissioni in rete. Il modello di architettura proposto con unico punto di fornitura consente di raggiungere valori di potenza/energia elevati ottimizzando l'autoconsumo in loco dell'energia. Inoltre la proposta di strategie di controllo della domanda di energia consente di ottenere ulteriori ottimizzazione in termini di autoconsumo dell'energia generata dall'impianto fotovoltaico.

Il modello di architettura di rete proposto in definitiva consente di aumentare la potenza elettrica installata dell'impianto fotovoltaico mantenendo elevati livelli di autoconsumo dell'energia.

Sistema di distribuzione elettrica a partire dalla cabina MT/BT fino alle singole utenze realizzata con montanti singoli con possibilità di impiego di sistemi speciali di distribuzione a livelli di tensione non convenzionali

L'alimentazione delle singole utenze a partire dal quadro generale di impianto avviene mediante circuiti montanti dedicati.

Nel modello proposto di edificio full electric, l'impianto elettrico di unità deve alimentare anche la cucina a induzione che prevede impieghi di potenza dell'ordine dei 4 kW.

Per il dimensionamento delle montanti, considerando unità abitative dell'ordine di 50 – 100 m², si fa riferimento ai valori mostrati in Tabella 3.

Tabella 3. Tabella per il dimensionamento delle montanti

	Potenza installata (kW)	C.C. di servizio (p.u.)	Potenza di progetto (kW)
Luce e prese	3	0.3	1
Lavaggi	2	0.5	1
Cucina	4	1	4
AC	2	1	2
C.C. di unità			0.7
Totale			6
Massimo tutto ON			10

Il circuito montante è dimensionato per una potenza di progetto pari a 6 kW.

In casi particolari di contemporaneità con cucina, climatizzazione e entrambi i lavaggiattivi, la potenza può raggiungere i 10 kW.

Il sistema di alimentazione dei circuiti può essere realizzato con:

- circuiti monofase alla tensione di 230 V
- circuiti trifase alla tensione di 400 V
- circuiti mono o trifase a livelli di tensione non convenzionali, per esempio di 950 V

Nel caso di sistema monofase con V=230V fase – neutro, ogni circuito è costituito da un cavo a 3 conduttori (fase, neutro e conduttore di protezione).

3.7 Caratteristiche costruttive

Nelle tabelle che seguono si riportano le caratteristiche costruttive dell'edificio

Tabella 4. Caratteristiche delle pareti

Pareti	Intonaco interno	Mattone interno	Isolante	Mattone esterno	Intonaco esterno	Totale
Spessore [m]	0,015	0,12	0,12	0,12	0,015	0,39
Lambda [W/(m K)]	0,700	0,590	0,035	0,590	0,700	
c [J/(kg K)]	1000	840	2300	840	1000	
rho [kg/(m ³)]	1400	1600	30	1600	1400	
Trasmittanza [W/m ² K]						0,25

Tabella 5. Caratteristiche dei solai intermedi

Solaio interpiano	Controsoffitto cartongesso	Pignatte	Calcestruzzo magro	Massetto	Pannello fibra di legno	Parquet	Totale
Spessore [m]	0,015	0,25	0,05	0,10	0,03	0,02	0,47
Lambda [W/(m K)]	0,66	0,250	0,190	0,27	0,14	0,20	
c [J/(kg K)]	840	840	880	880	2000	2400	
rho [kg/(m ³)]	750	800	2200	800	800	850	

Tabella 6. Caratteristiche dei tramezzi

Tramezzi	Intonaco calce e gesso	Mattone forato	Intonaco calce e gesso	Totale
Spessore [m]	0,015	0,08	0,015	0,11
Lambda [W/(m K)]	0,770	0,484	0,770	
c [J/(kg K)]	1000	1000	1000	
rho [kg/(m ³)]	1400	1800	1400	

Tabella 7. Caratteristiche della copertura

Copertura	Intonaco calce e cemento	Soletta Cemento armato	Isolante	Piastrelle ceramica	Totale
Spessore [m]	0,015	0,24	0,067	0,015	0,255
Lambda [W/(m K)]	0,9	0,900	0,035	0,720	
c [J/(kg K)]	910	880	2300	880	
rho [kg/(m ³)]	1800	2200	30	1800	

Nelle tabelle che seguono si riportano i risultati sulla profondità di penetrazione di sollecitazioni sinusoidali per diversi periodi. Sono state valutati tre periodi: 10 minuti, 1 ora e 24 ore, rilevanti per la modellizzazione della risposta dell'involucro alle sollecitazioni termiche interne indotte dalle variazioni di temperatura per l'attuazione di DSM. Il periodo più breve è finalizzato alla valutazione della risposta iniziale. Il periodo intermedio è finalizzato alla valutazione dell'accumulo di energia termica nel breve periodo. Il periodo più lungo corrisponde alla dinamica naturale conseguente al ciclo giornaliero di attivazione dell'impianto di riscaldamento. Sulla base delle profondità di penetrazione sono valutate le capacità termiche rilevanti per ciascuna dinamica. La valutazione è sviluppata come da UNI EN ISO 13786, valutando i singoli strati delle pareti che collaborano a ciascuna sollecitazione. In grigio sono riportati i valori associati agli strati dei componenti di involucro edilizio che non interessati dall'onda termica.

Tabella 8. Profondità di penetrazione per sollecitazione periodica (pareti)

Pareti	Intonaco interno	Mattone interno	Isolante	Mattone esterno	Intonaco esterno	Totale
Spessore [m]	0,015	0,12	0,05	0,12	0,015	0,32
Lambda [W/(m K)]	0,700	0,590	0,053	0,590	0,700	
c [J/(kg K)]	1000	840	2300	840	1000	
rho [kg/(m ³)]	1400	1600	30	1600	1400	
delta_T1 [m]	0,010	0,000	0,012	0,000	0,010	0,010
delta_T2 [m]	0,015	0,017	0,019	0,017	0,015	0,032
delta_T3 [m]	0,015	0,109	0,019	0,109	0,015	0,124
delta_T1 [mm]	9,772	0,000	12,112	0,000	9,772	9,772
delta_T2 [mm]	15,000	17,479	18,592	17,479	15,000	32,479
delta_T3 [mm]	15,000	108,975	18,592	108,975	15,000	123,975

Come si può notare, le sollecitazioni termiche di periodo 10 minuti (delta_T1) interessano solo lo strato di intonaco. Le sollecitazioni termiche di periodo 1 ora (delta_T2) interessano integralmente lo strato di intonaco e una piccola porzione dello strato di laterizio. Le termiche diurne (delta_T3) interessano integralmente lo strato di intonaco e una porzione rilevante dello strato di laterizio, senza raggiungere lo strato di isolante termico. Il comportamento dei solai è del tutto equivalente.

Tabella 9. Profondità di penetrazione per sollecitazione periodica (soffitto interpiano)

Soffitto interpiano	Controsoffitto cartongesso	Pignatte	Calcestruzzo magro	Massetto	Pannello fibra di legno	Parquet	Totale
Spessore [m]	0,015	0,25	0,05	0,10	0,03	0,02	0,47
T penetrazione [s]	675	527788	80028	81914	32314	12818	
Lambda [W/(m K)]	0,66	0,250	0,190	0,27	0,14	0,20	
c [J/(kg K)]	840	840	880	880	2000	2400	
rho [kg/(m ³)]	750	800	2200	800	800	850	
delta_T1 [m]	0,014	0,000	0,000	0,000	0,000	0,004	0,018
delta_T2 [m]	0,015	0,019	0,000	0,000	0,000	0,01	0,044
delta_T3 [m]	0,015	0,101	0,000	0,000	0,045	0,02	0,181
delta_T1 [mm]	14,145	0,000	0,000	0,000	0,000	4,33	18,472
delta_T2 [mm]	15,000	18,612	0,000	0,000	0,000	10,60	44,211
delta_T3 [mm]	15,000	100,755	0,000	0,000	45,271	20,00	181,025

Le sollecitazioni più brevi interessano solo il cartongesso, mentre le sollecitazioni con periodo maggiore interessano anche la porzione in laterocemento del solaio.

Per quanto riguarda il pavimento, la ridotta diffusività termica della finitura in legno riduce la penetrazione dell'onda termica al solo strato superficiale per periodi non superiori all'ora.

Per i tramezzi, la valutazione deve essere svolta considerando entrambi i lati dello stesso che sono soggetti alla medesima sollecitazione. Il ridotto spessore di tali componenti edilizi determina l'interessamento dell'intero spessore per sollecitazioni diurne.

Tabella 10. Profondità di penetrazione per sollecitazione periodica (tramezzi)

Tramezzi	Intonaco calce e gesso	Mattone forato	Intonaco calce e gesso	Totale
Spessore [m]	0,015	0,08	0,015	0,11
T penetrazione [s]	1285	74775	1285	
Lambda [W/(m K)]	0,770	0,484	0,770	
c [J/(kg K)]	1000	1000	1000	
rho [kg/(m ³)]	1400	1800	1400	
delta_T1 [m]	0,010	0,000	0,000	0,010
delta_T2 [m]	0,015	0,014	0,000	0,029
delta_T3 [m]	0,015	0,085	0,015	0,100
delta_T1 [mm]	10,249	0,000	0,000	10,249
delta_T2 [mm]	15,000	14,076	0,000	29,076
delta_T3 [mm]	15,000	85,352	14,999	100,352

La copertura manifesta un comportamento equivalente a quello del solaio interpiano.

Tabella 11. Profondità di penetrazione per sollecitazione periodica (copertura)

Copertura	Intonaco calce e cemento	Soletta Cemento armato	Isolante	Piastrelle ceramica	Totale
Spessore [m]	0,015	0,24	0,067	0,015	0,255
T penetrazione [s]	1286	389256	18360	1555	
Lambda [W/(m K)]	0,9	0,900	0,053	0,720	
c [J/(kg K)]	910	880	2300	880	

rho [kg/(m ³)]	1800	2200	30	1800	
delta_T1 [m]	0,010	0,000	0,000	0,009	0,010
delta_T2 [m]	0,016	0,019	0,024	0,015	0,034
delta_T3 [m]	0,016	0,112	0,144	0,015	0,128
delta_T1 [mm]	10,244	0,000	0,000	9,317	10,244
delta_T2 [mm]	15,724	18,502	23,783	15,000	34,227
delta_T3 [mm]	15,724	112,226	144,257	15,000	127,950

3.8 Impianto elettrico, domotico e di building automation

Per quanto riguarda l'impianto elettrico delle aree residenziali, ciascuna unità è servita da una dorsale dedicata, con partenza da un locale tecnico situato al piano terra. Ogni appartamento è dotato di un quadro elettrico di appartamento per l'alimentazione dell'impianto di illuminazione, delle prese e della cucina con elementi ad induzione. In è rappresentato un esempio di quadro costituito da:

- Arrivo generale;
- Protezione magnetotermica differenziale per circuito luce;
- Protezione magnetotermica differenziale per circuito prese;
- Protezione magnetotermica differenziale per circuito cucina/elettrodomestici;
- Attuatore luci KNX
- Attuatore 8 canali



Figura 19. Quadro elettrico/domotico di unità.

I carichi elettrici prevedibili per ogni unità sono:

- apparecchi di illuminazione
- prese elettriche
- elettrodomestici per lavaggi (lavatrice e lavastoviglie)
- cucina a induzione
- forno elettrico

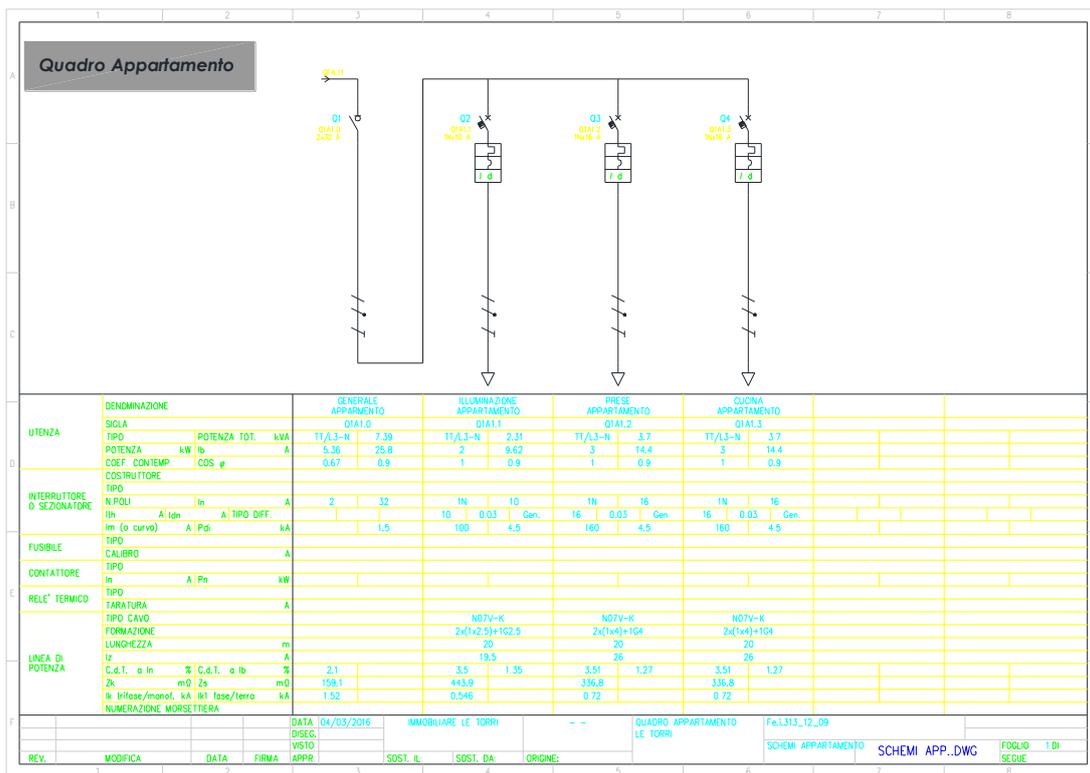


Figura 20. Schema del centralino d'appartamento

E' stata considerata una potenza massima di 6 kW per ciascuna unità, per tenere conto della presenza della cucina elettrica.

Uno dei vantaggi della rete elettrica proposta con fornitura unica e quadro generale di proprietà per la distribuzione ai singoli appartamenti è la flessibilità di esercizio con possibilità di esubero della potenza di 6 kW.

L'impianto elettrico di ogni unità è asservito a un sistema domotico di tipo BUS, realizzato mediante protocollo KNX, che gestisce l'illuminazione e la termoregolazione.

L'impianto di building automation HBES in protocollo KNX prevede numerose linee in partenza dal rack piano terra di edificio a 48 porte.

Ciascun piano di ciascuna torre è servita da una doppia linea KNX indipendente (Figura 21).

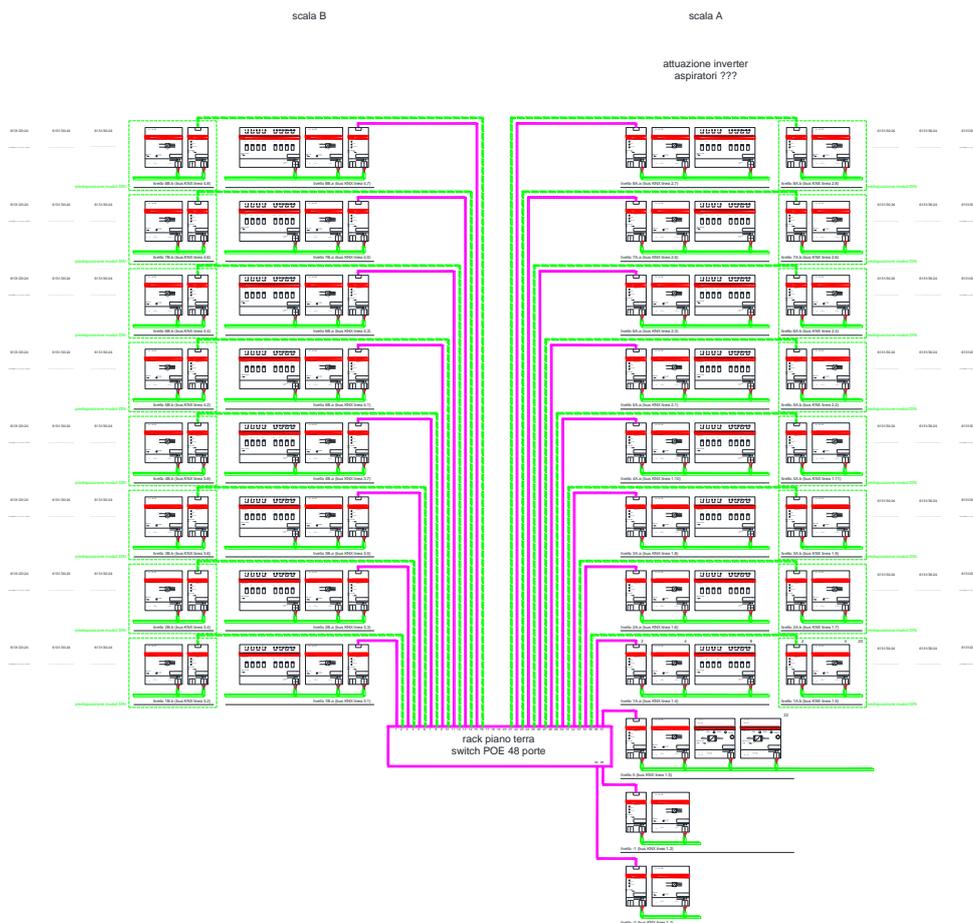


Figura 21. Architettura dell'impianto HBES

3.9 Impianto termico

Sistema di generazione del calore per riscaldamento e acqua calda sanitaria centralizzato con pompe di calore geotermiche

I sistemi di riscaldamento e di acqua calda sanitaria (ACS) sono organizzati a partire da un sistema di riscaldamento centralizzato accoppiato a un sistema a pompa di calore geotermica (PDC).

La distribuzione del calore è comune, a partire da un puffer per il riscaldamento e un boiler di elevata capacità per l'ACS.

La pompa di calore PDC è alimentata elettricamente direttamente dal quadro generale di bassa tensione MSB.



Figura 22. Pompa di calore installata nell'edificio.

Il sistema di riscaldamento è costituito dai seguenti circuiti:

- circuito primario di alimentazione del puffer;
- circuito secondario dal puffer ai satelliti di unità;
- circuito terziario dal satellite fino ai pannelli radianti.

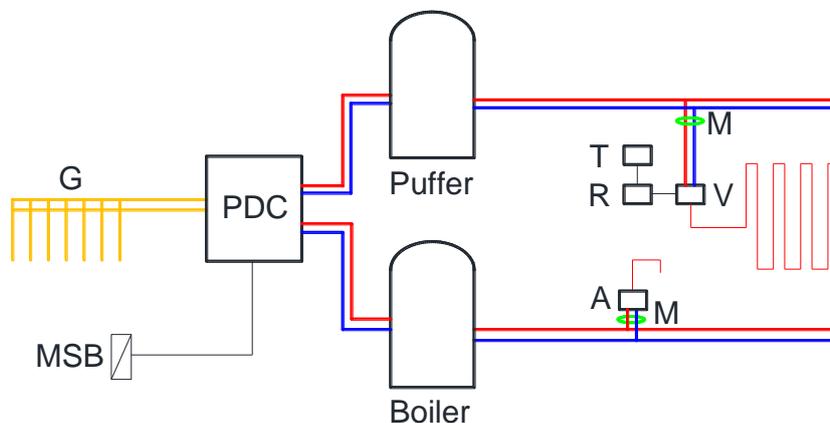


Figura 23. Schema d'impianto generale del sistema a pompaTT

La Figura 10 seguente riporta l'esempio di uno schema completo di impianti meccanici realizzati con una coppia di pompe di calore geotermiche.

Sistema di distribuzione del calore di edificio mediante centri satellite completi di misuratori di calore e acqua

Ogni unità dell'edificio è dotata di un modulo d'utenza satellitare o satellite center (SC), equipaggiato con le valvole di regolazione ed i sistemi di metering.

Uno schema di una tipologia di modulo satellitare è rappresentato nella Figura 11.

All'interno del modulo sono presenti:

- per il sistema di riscaldamento:
 - la valvola di regolazione a 2 vie o a 3 vie sulla mandata calda;
 - la valvola di bilanciamento sulla mandata calda;
 - il misuratore di portata sul ritorno freddo, combinato alle sonde di temperatura su mandata e ritorno per la determinazione dell'energia erogata.
- Per il sistema di acqua calda sanitaria:
 - il misuratore con relative valvole di intercettazione;
 - la tubazione di ricircolo.
- Per il sistema di acqua fredda:
 - il misuratore con relative valvole di intercettazione;

I SC contabilizzano il calore e il consumo di acqua calda o fredda, attraverso i misuratori M in figura, rendendo le singole unità immobiliari indipendenti nell'uso degli impianti tecnici come per esempio nella scelta della temperatura di setpoint per il riscaldamento, consentendo quindi una ripartizione delle spese equa e responsabilizzando gli utenti. Vengono installati a valle della centrale termica e possono essere collegati al termostato ambiente in modo da impostare la temperatura desiderata.

Il sistema di riscaldamento con pannelli radianti a pavimento è costituito da un collettore di distribuzione dal quale sono distribuiti i circuiti di riscaldamento di ciascun ambiente. Ogni circuito è regolato da una valvola che modula la portata d'acqua calda in modo da controllare la potenza termica erogata in relazione alle effettive esigenze dell'ambiente. Infatti, la potenza richiesta dipende, oltre che dalla temperatura esterna, pressoché identica per tutti gli ambienti, dagli apporti solari e termici delle apparecchiature elettriche presenti all'interno di ciascun ambiente.

Per unità abitative costituite da 1 o 2 ambienti con medesima esposizione la regolazione per singolo ambiente si sovrappone alla regolazione per unità e può essere omessa. In tal caso, la regolazione può essere limitata al controllo di tipo on-off della valvola sita nel satellite d'utenza, con interruzione della circolazione dell'acqua al raggiungimento della temperatura di set-point. Un elevato isolamento termico e un'elevata capacità termica della porzione riscaldata rendono ancora più efficace il sistema, riducendo ulteriormente le differenze possibili delle temperature nei diversi punti dei locali serviti.

L'impianto di riscaldamento/raffrescamento e di produzione di acqua calda sanitaria a servizio degli edifici è centralizzato con tecnologia a pompa di calore elettrica e geotermia.

Esso è costituito da due centrali termiche:

- CTA, a servizio della torre A e dell'utenza commerciale CA
- CTB, a servizio della torre B e dell'utenza commerciale CB.

La generazione del fluido vettore è affidata a un sistema a pompe di calore integrato con sistema di geotermia.

Per la centrale termica CTA sono previste un totale di 3 pompe di calore:

- due pompe di calore geotermiche, del tipo Idrosistemi HCS 120, aventi ciascuna una potenza termica pari a 86,4 kW e potenza frigorifera pari a 120 kW, per le utenze civili A;
- una pompa aggiuntiva per le utenze commerciali CA.

Il sistema di geotermia a servizio della centrale termica CTA è costituito da (Figura 24):

- 30 sonde a 4 tubi PE32, conficcati alla profondità di circa 100 metri a servizio delle due pompe di calore per il residenziale A;
- 6, sonde identiche alle precedenti, a servizio della pompa di calore per il commerciale A.

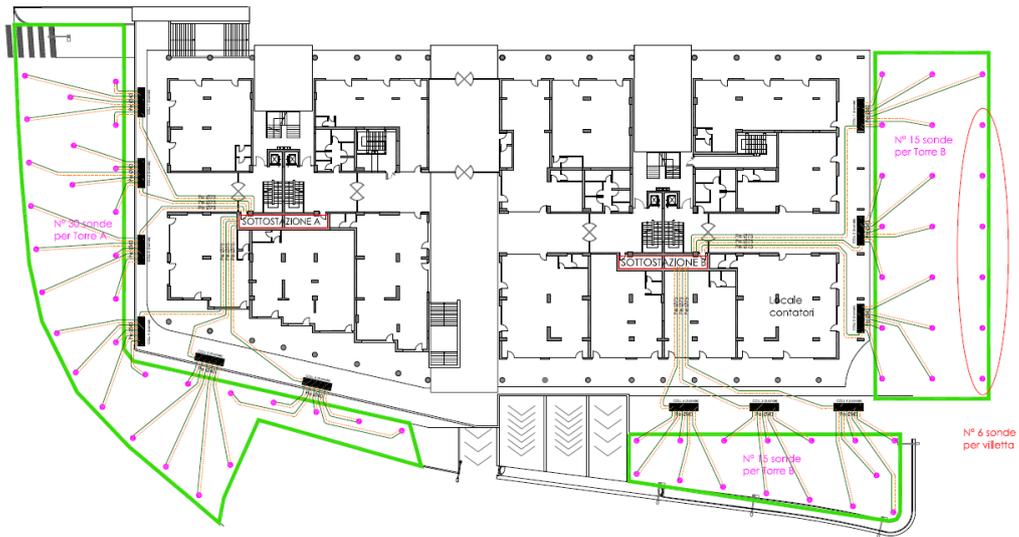


Figura 24. Schema delle sonde geotermiche



Figura 25. Fotografia dell'infilaggio di una sonda nel terreno.

E' stato effettuato un GRT (ground response test) che ha fornito il valore di 48 Wt/m equivalenti di potenza termica scambiata dalle sonde geotermiche. La potenza termica proveniente dalla geotermia è dell'ordine di 180 kW (pari a 48 Wt/m per 100 metri per 36 sonde).

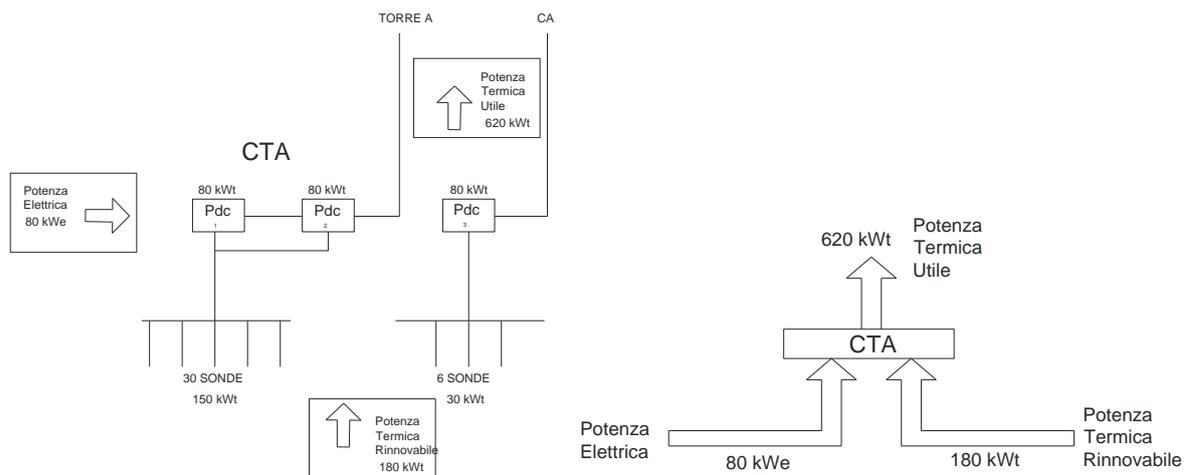


Figura 26. Schema dell'impianto termico riferito alla sola torre A oggetto di simulazioni

Il sistema di diffusione del calore per le unità residenziali A è a pannelli radianti, con un elemento a termoarredo per il bagno.

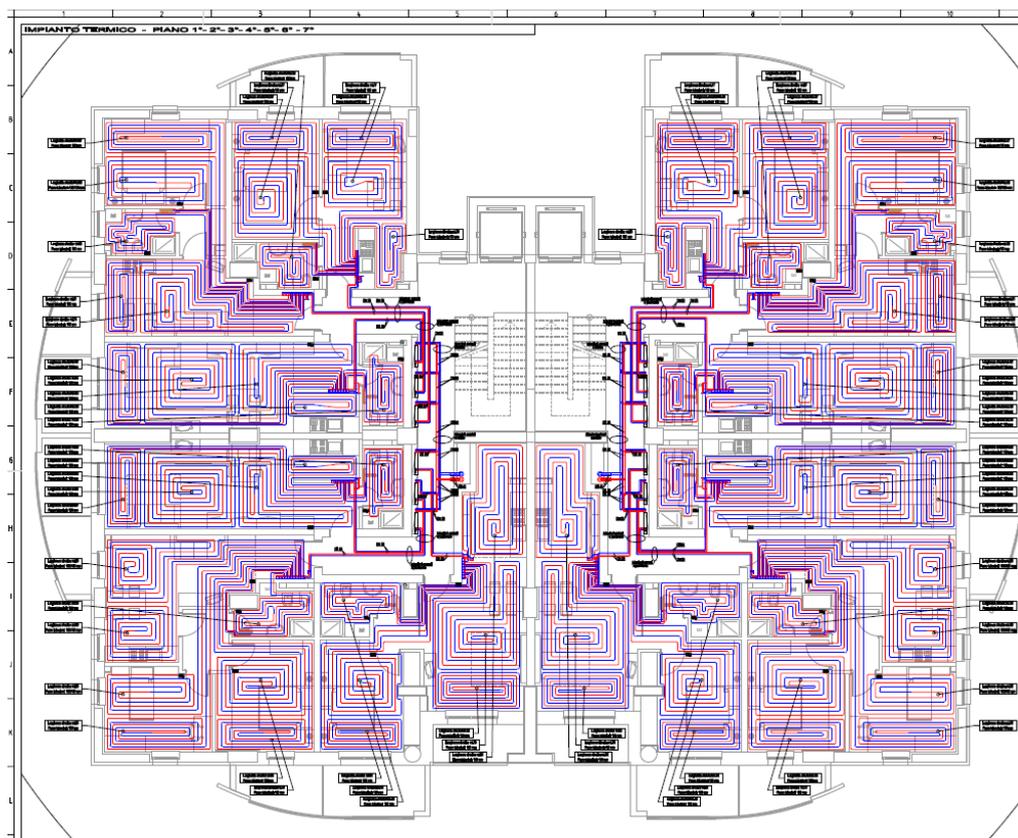


Figura 27. Schema dei pannelli radianti per la Torre A.

Per ogni unità residenziale è previsto un sistema di derivazioni per:

- il circuito unico dei pannelli radianti;
- l'acqua calda sanitaria caldo e freddo.

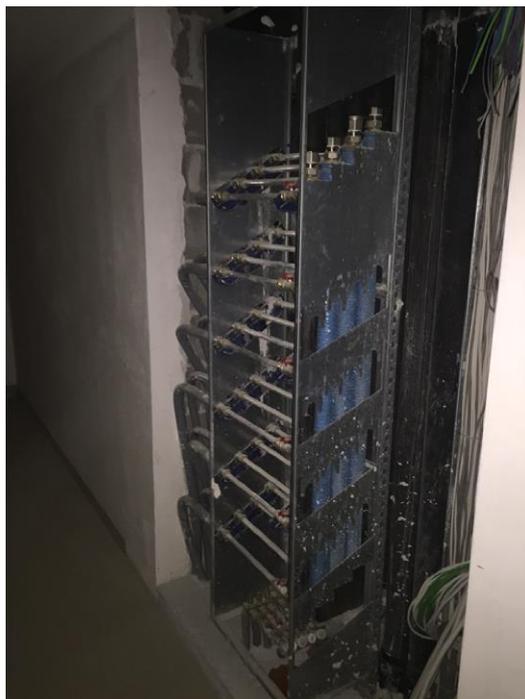


Figura 28. Fotografia del cenro satellite con le derivazioni per le unità

Le derivazioni sono collocate all'interno di un cenro satellite. E' presente un cenro satellite del tipo rappresentato in figura per ogni semipiano e quindi per 4 appartamenti (vedi Figura 28).

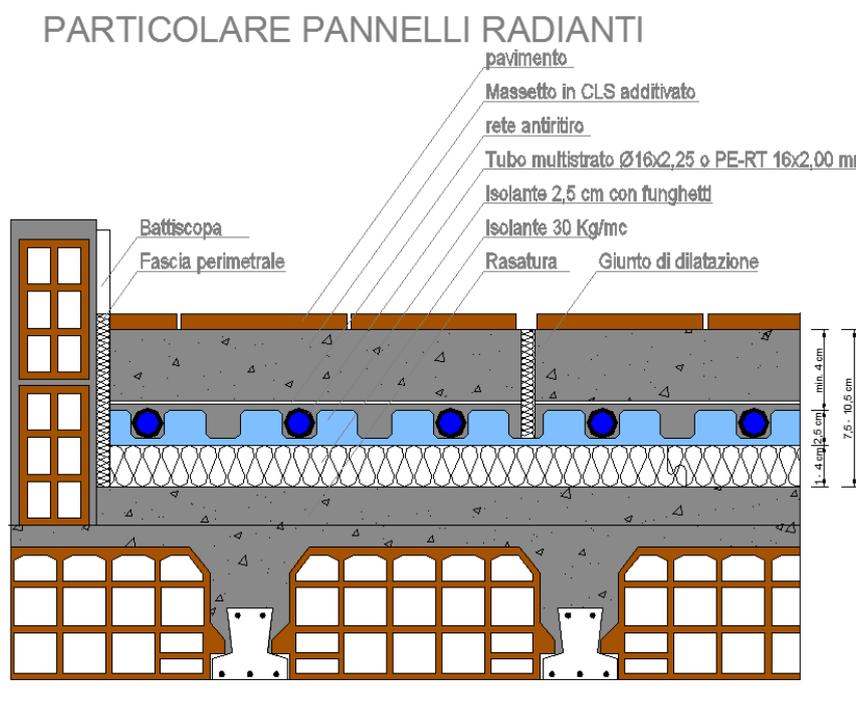


Figura 29. Particolare della realizzazione dei pannelli radianti

In Figura 29 è rappresentato il particolare del massetto con affogati i pannelli radianti. Il sistema di termoregolazione prevede un cronotermostato per ogni unità, collegato al sistema di supervisione e di building automation di edificio.

LEGENDA COIBENTAZIONI			
Tubo Ø	Spessore isolante tubazioni correnti nei controsoffitti e all'interno dei locali	Spessore isolante tubazioni correnti nei cavedi interni	Spessore isolante tubazioni correnti in area esterna e autorimesse
DN100	19 mm	30 mm	60 mm
DN80	19 mm	30 mm	55 mm
DN65	13 mm	25 mm	50 mm
DN50	13 mm	25 mm	50 mm
DN40	13 mm	20 mm	40 mm
DN32	13 mm	20 mm	40 mm
DN25	13 mm	20 mm	40 mm
DN20	9 mm	15 mm	30 mm
DN16	6 mm	10 mm	20 mm

N.B.: Gli spessori riportati sono riferiti ad un isolamento con conduttività termica utile pari a 0,040W/m°C alla temperatura media di + 40°C.

Figura 30. Coibentazioni utilizzate

In Figura 30 è riportato il dettaglio delle coibentazioni utilizzate nell'impianto. L'impianto consiste di tre circuiti, primario, secondario e terziario.

3.9.1 Circuito primario

Il circuito primario comprende le sonde geotermiche e la pompa di calore che produce acqua calda destinata al puffer d'accumulo. In Figura 31 riporta uno schema del circuito primario.

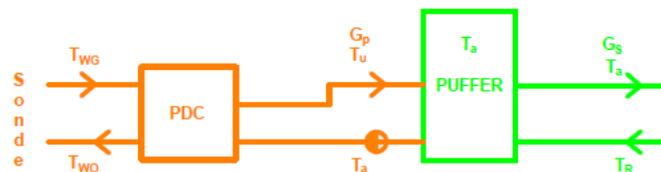


Figura 31. Schema del circuito primario

I simboli usati in figura sono così definiti:

T_{wg} Temperatura acqua proveniente dal campo geotermico

T_{wo} Temperatura acqua in uscita dallo scambiatore freddo

T_u Temperatura di uscita dell'acqua calda diretta al puffer

G_p Portata circuito primario

T_a Temperatura di accumulo del puffer e di ritorno alla pompa di calore

La potenza termica della pompa di calore, che corrisponde, secondo lo schema adottato, alla potenza del circuito primario, è:

$$P_t = P_p = G_p c_p (T_u - T_a)$$

A meno delle perdite nel puffer, essa è pari alla potenza associata al circuito secondario, come illustrato più avanti:

$$P_p = P_s + HS_{puff}(T_a(t) - T_{ac})$$

Da quest'ultima equazione si risale alla potenza nel circuito primario, avendo definito con T_{ac} la temperatura dell'ambiente dove è situato il puffer (temperatura ipotizzata pari a 30°C nella presente trattazione). Note la portata del primario, la potenza e la temperatura di accumulo, è possibile ricavare la temperatura di uscita dalla pompa di calore come:

$$T_u = T_a + \frac{P_p}{c_p G_p}$$

3.9.2 Circuito secondario

La porzione di impianto compresa tra il puffer e la valvola modulante che regola lo spillamento in appartamento costituisce il circuito secondario. L'equazione che esprime la potenza al circuito secondario è:

$$P_S = G_S c_p (T_a - T_R)$$

Per l'appartamento j-esimo, l'espressione della potenza al secondario è espressa come:

$$P_{appj} = P_{Sj} = G_{Sj} c_p (T_a - T_{Rappj})$$

In questa equazione l'unica incognita è la portata che arriva all'appartamento j-esimo, che può essere facilmente calcolata come:

$$G_{Sj} = \frac{P_{Sj}}{c_p (T_a - T_{Rappj})}$$

Si hanno ora tutti i dati per calcolare la portata totale del secondario, la potenza totale del secondario e la temperatura di ritorno al puffer.

$$G_S = \sum G_{Sj}$$

$$P_S = \sum P_{Sj}$$

$$T_R = \frac{\sum G_{Sj} T_{Rappj}}{\sum G_{Sj}}$$

Nelle sommatorie vanno tenuti in conto gli appartamenti inutilizzati. Inoltre, i parametri variano a seconda della presenza in ambiente delle persone e dell'orario: infatti, sia in caso di assenza che durante la notte la temperatura di setpoint in ambiente varierà da 20°C a 16°C. Bisogna fare inoltre una distinzione dipendente dal tipo di valvola adottata dal circuito, a tre vie o a due vie, che nel case study dipende dal piano in cui si trovano gli appartamenti.

In Figura 32 si riporta uno schema di circuito con valvola a tre vie.

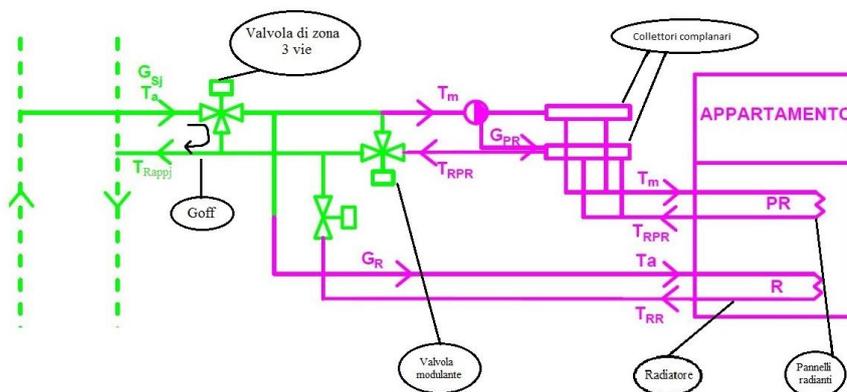


Figura 32. Schema di circuito con valvola a tre vie

3.9.3 Ventilazione meccanica dei locali

La ventilazione meccanica dei locali degli appartamenti per il ricambio d'aria è realizzata attraverso un sistema di 7 colonne di estrazione con bocchette di estrazione collocate nei servizi igienici e ripresa d'aria collocata nell'infisso principale di appartamento. Il sistema può essere ottimizzato mediante l'impiego di sistemi a recupero di calore.

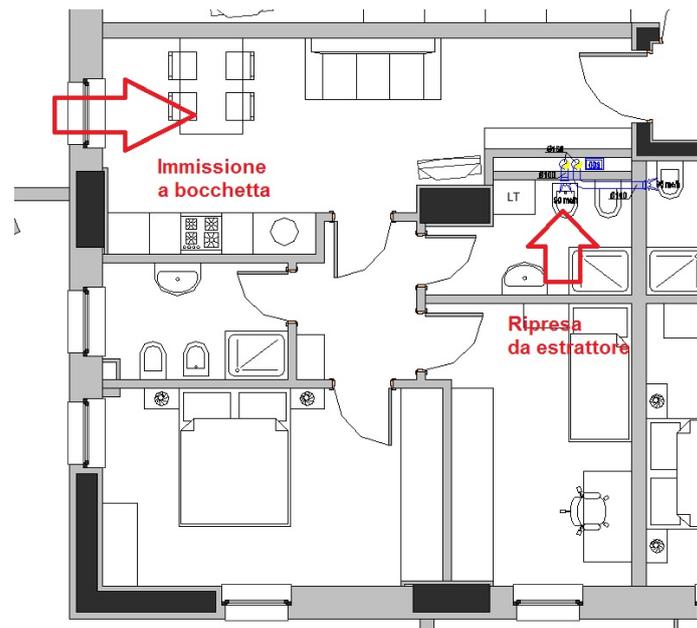


Figura 33. Ventilazione meccanica dei locali per ricambio d'aria

Ciascuna colonna è dotata di un estrattore di aria con portata 720 mc/h e prevalenza 230 Pa.

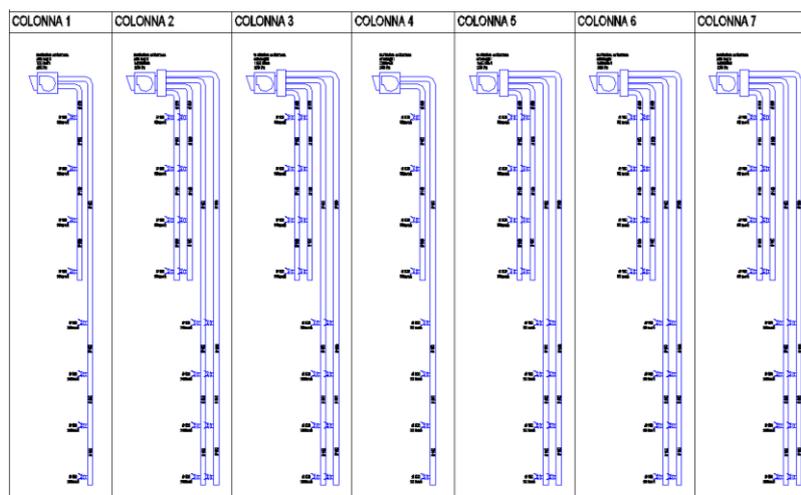


Figura 34. Sistema di ventilazione meccanica a 7 colonne

3.10 Allaccio unico alla rete elettrica

E' previsto un allaccio unico per le unità residenziali della torre A, per le unità commerciali CA e CB, per le centrali termiche e per tutte le utenze comuni come riportato in Figura 35. Restano escluse dall'allaccio le utenze indipendenti della torre B.

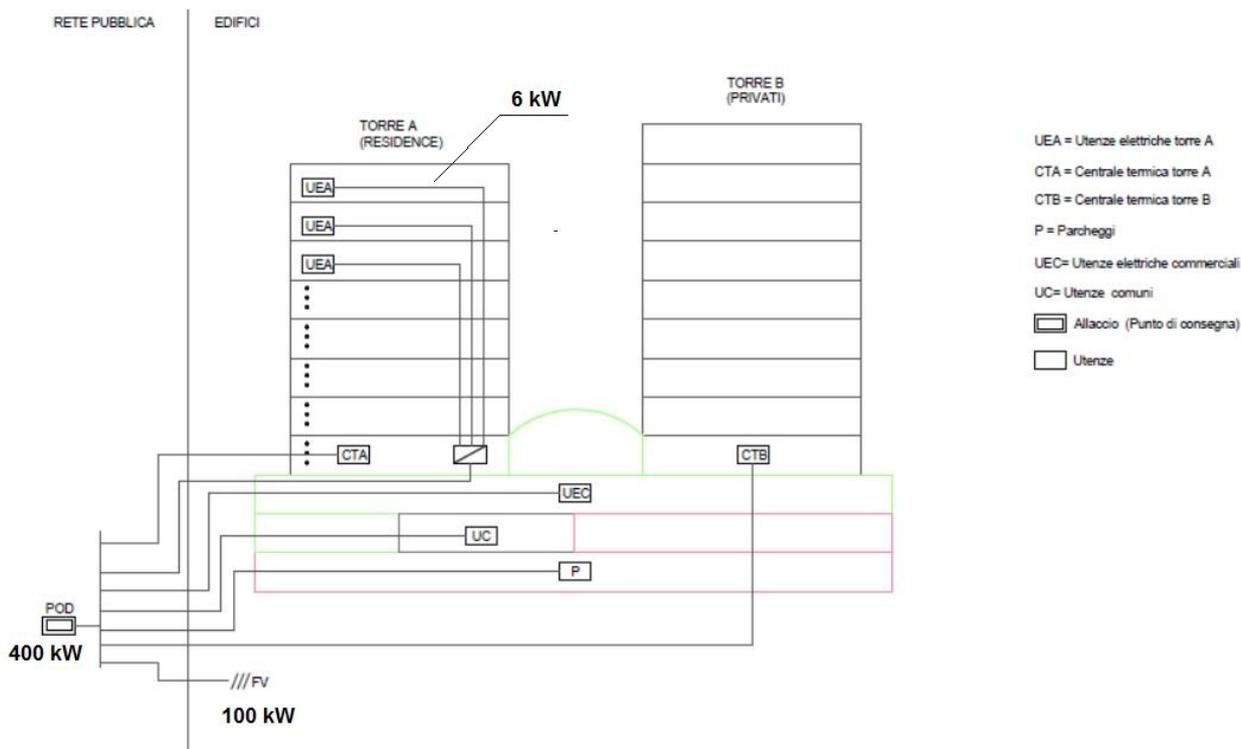


Figura 35. Schema di allaccio alla rete elettrica

Per la distribuzione fino alle unità si utilizzerà lo stesso quadro elettrico previsto nel caso di allacci indipendenti. In questo caso il quadro è alimentato non dai contatori singoli ma dal quadro generale di impianto di proprietà della società privata di gestione della torre.

Il punto di fornitura di energia dall'ente distributore in questo caso dovrà avere una potenza contrattuale maggiore di quella relativa ai soli servizi comuni per far fronte alla domanda di energia elettrica delle singole unità.

Considerando una potenza massima di unità pari a 6 kW, ed ipotizzando un coefficiente di contemporaneità pari a 0,25, si può stimare una potenza per le unità residenziali A pari a circa 140 kW.

Per le utenze commerciali, considerando una potenza media di 40 W/m², si può stimare una potenza complessiva per le unità commerciali pari a circa 80 kW.

L'assorbimento elettrico del complesso è stato stimato in circa 250 kW di potenza media con massimo assorbimento di 400 kW.

Nella stima sono escluse le sole utenze residenziali della torre B perché escluse dalla micro grid comune prevista per il complesso.

Tabella 12. Sinossi della potenza

	max kW	med kW
A (somma UEA)	140	80
CTA	80	50
CTB	80	50
CA e CB	80	60
P e UC	20	20
Totale	400	260

Tale fornitura è stata garantita dal distributore di zona (E-Distribuzione) attraverso un punto di fornitura in media tensione avente potenza di consegna pari a 400 kW.

E' stata realizzata quindi una cabina di trasformazione MT/BT, dotata di una macchina di potenza di targa pari a 400 kVA.

La cabina di trasformazione è stata collocata in prossimità dell'edificio entro manufatti prefabbricati.



Figura 36. Cabina di consegna e di trasformazione.



Figura 37. Particolare delle cabine. A sinistra vano trasformatore e quadro di media tensione di proprietà. A destra vano misura e vano di consegna del distributore.



Figura 38. Particolare del vano conil trasformatore da 400 kVA.

La presenza di un solo trasformatore non costituisce un problema dal punto di vista affidabilistico perché è presente un gruppo elettrogeno e un contratto con il manutentore con servizio H24 e sostituzione immediata del trasformatore.

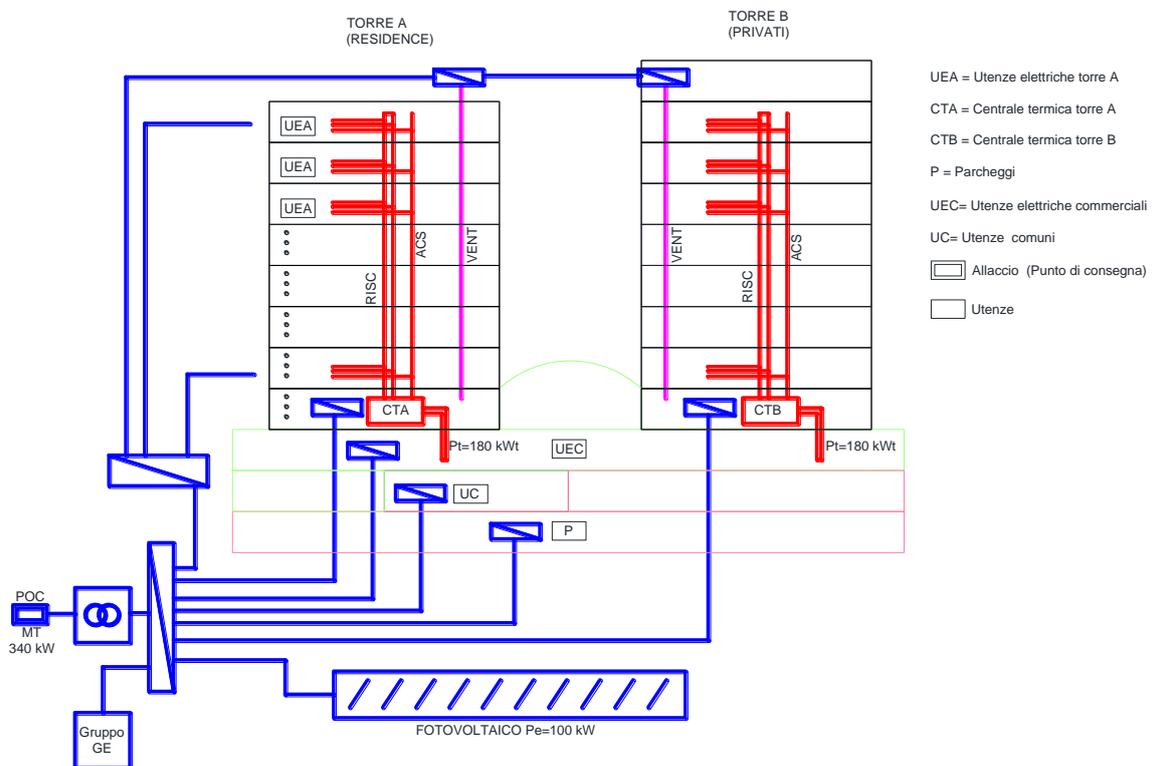


Figura 39. Schema della micro grid a servizio del complesso

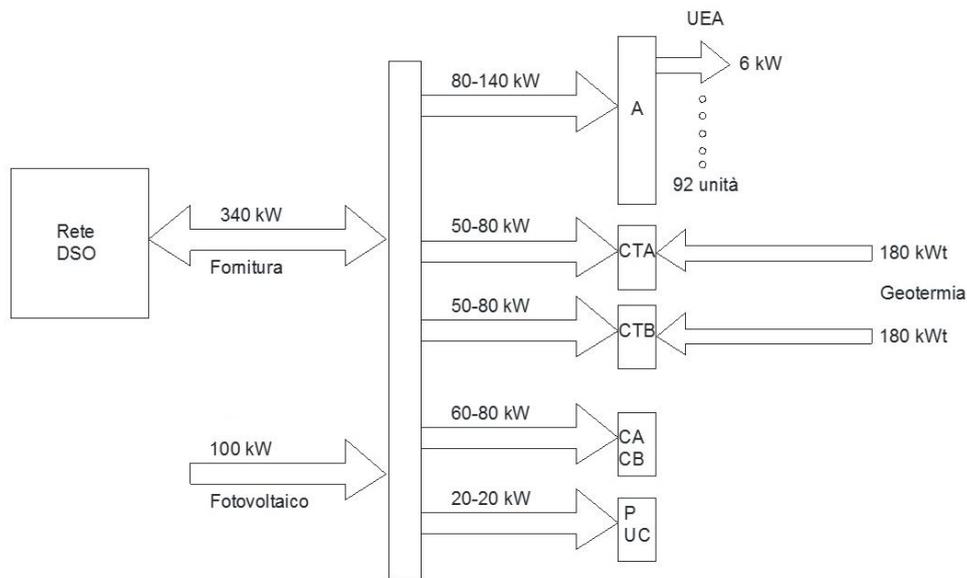


Figura 40. Schema dei flussi di potenza nella micro grid

Il quadro generale BT di cabina è costituito da:

- le protezioni a monte di tutto per le pompe antincendio;
- una protezione generale da 630 A per il collegamento con il quadro BT delle torri;
- la partenza per il quadro ausiliari di cabina completo di soccorritore;
- la partenza per gli aspiratori di cabina.

Il quadro BT delle torri è costituito da:

- un arrivo generale sezionatore da 800 A;
- una partenza per il quadro appartamenti torre A scala A da 200 A;
- una partenza per il quadro appartamenti torre A scala B da 200 A;
- un caposezione per la sezione utenze condominiali da 250 A che comprende la partenza da 200 A per la centrale termica;

3.11 Aspetti innovativi del complesso oggetto dello studio “Le Torri” di Campobasso

Il complesso costituito da due edifici residenziali ed una piastra comune, nel suo progetto originario presenta aspetti innovativi che lo inquadrano nel panorama degli smart building e degli edifici ad energia quasi zero.

Allaccio elettrico unico

La scelta di avere un allaccio elettrico unico rispetto alla soluzione con allacci indipendenti determina vantaggi sia di natura economica/energetica sia di natura tecnica.

I vantaggi di natura economica riguardano:

- uso di tariffa MT altri usi, invece della tariffa Bt usi residenziali;
- possibilità di sfruttare al meglio la generazione fotovoltaica incrementando la quota di autoconsumo;
- possibilità di ottimizzare la gestione dei carichi al fine di incrementare ulteriormente la quota di autoconsumo di energia generata localmente,
- possibilità di ottimizzare la gestione dei carichi al fine di ottimizzare gli oneri di acquisto dell’energia con contratti che tengano conto del profilo di assorbimento controllato;
- la gestione ottimizzata e di precisione del riscaldamento, potendo verificare ed impostare i setpoint delle unità;

- possibilità di implementare servizi innovativi di gestione dei carichi, quali in particolare la gestione ottimizzata del riscaldamento e la gestione ottimizzata dei lavaggi;
- la messa a punto di un sistema di supervisione e monitoraggio dei consumi consente un'ulteriore ottimizzazione energetica, poiché ciascun utente è a conoscenza dei propri consumi elettrici e termici e può di conseguenza ottimizzare le proprie abitudini.

I vantaggi di natura tecnica riguardano:

- la migliore qualità del servizio elettrico dovuto all'allaccio diretto in MT;
- la possibilità di migliorare ulteriormente la qualità del servizio prevedendo sistemi di generazione in emergenza;
- la sicurezza degli utenti per mezzo del sistema di distribuzione TN invece del sistema TT.

Generazione elettrica

La presenza di un impianto di generazione fotovoltaica di elevata potenza costituisce un servizio elettrico che se abbinato ad un sistema energetico coordinato costituisce una risorsa importante complesso energetico.

La potenza prevista è di 100 kW di punta.

L'assorbimento elettrico del complesso è stimato in circa 250 kW di potenza media con massimo assorbimento di 400 kW.

La potenza di generazione di 100 kW è una quota estremamente significativa dell'assorbimento medio di 250 kW che può determinare anche inversioni di flusso in giornate estive soleggiate con assorbimento scarico. Nel funzionamento estivo si può prevedere un assorbimento dell'edificio dell'ordine di 150 kW. E' prevedibile quindi che in alcune ore si possa avere un esubero di generazione.

Impianti domotici negli appartamenti

La dotazione impiantistica nelle unità residenziali di tipo domotico costituiscono un'innovazione importante.

Tale soluzione si presta ad un'integrazione di building automation a livello di edificio anche perché lo standard utilizzato consente un elevato livello di interoperabilità con sistemi di gestione energetica e di metering.

L'impianto domotico di appartamento consente:

- la gestione dell'illuminazione;
- la gestione della termoregolazione;
- la gestione di alcune utenze elettriche.

Energia rinnovabile dal sottosuolo

Gli impianti di riscaldamento e produzione e distribuzione di acqua calda sanitaria sono entrambi di tipo centralizzato.

Per la generazione dell'acqua calda sono previste pompe di calore a geotermia che sfruttano la temperatura costante del sottosuolo. Il contributo energetico della geotermia è rilevante.

Con i sistemi di regolazione avanzati proposti è possibile rendere l'edificio a ridotto consumo ed in alcuni momenti dell'anno ad assorbimento nullo di energia.

Edificio "full electric"

La soluzione adottata per gli impianti termici oltre ad avere elevati rendimenti per la presenza della fonte gratuita della geotermia presenta la caratteristica di essere alimentata completamente elettricamente.

Il vettore elettrico più nobile delle altre forme di energia, presenta indubbi vantaggi gestionali se abbinati ad una gestione comune con le altre utenze elettriche e con altri servizi di generazione e accumulo.

Non sono previste forniture di gas dalla rete pubblica.

Per la cottura sono previste cucine ad induzione.

Accumuli termici centralizzati

La presenza, per ogni torre, di un puffer di accumulo per la gestione del riscaldamento e tre boiler di accumulo per l'acqua calda sanitaria costituiscono sistemi di accumulo termico naturali.

Attraverso la gestione dei setpoint dei sistemi di accumulo è possibile sfruttare il sistema termico come volano energetico di elettricità.

Accumuli termici distribuiti

Le elevate prestazioni di isolamento dell'edificio abbinate al sistema di diffusione del calore a pavimento a bassa entalpia costituiscono di fatto un sistema di accumulo naturale interessante che si presta ad essere sfruttato nelle logiche gestionali.

4 Sistema di metering avanzato per il complesso "Le Torri" di Campobasso

4.1 Sistemi di smart metering

La Direttiva 2012/27/EC definisce un sistema di *smart metering* come un "sistema elettronico in grado di misurare il consumo di energia, fornendo maggiori informazioni rispetto ad un dispositivo convenzionale, e di trasmettere e ricevere dati utilizzando una forma di comunicazione elettronica".

Attualmente, i sistemi di *metering* stanno evolvendo sempre più in sistemi di *smart metering* di tipo distribuito. Un sistema di *smart metering* distribuito consiste in un'architettura di *meter* installati nell'impianto elettrico a vari livelli di distribuzione (punto di consegna, quadro principale, quadri secondari, singolo circuito o carico).

E' opportuno procedere ad una distinzione dei termini *metering* e *monitoraggio*:

Per *metering* si può intendere la registrazione e/o integrazione continua di grandezze misurate in funzione del tempo. La registrazione e/o l'integrazione può essere svolta su misure di potenza elettrica, portate di fluidi, volumi di produzione, temperature (gradi giorno), etc.

Per *monitoraggio* si intende l'osservazione in continuo e valutazione di grandezze e segnali con l'obiettivo di caratterizzare il funzionamento di un sistema.

E' evidente quindi che un sistema di monitoraggio comprende più funzionalità rispetto ad un sistema di metering inglobando aspetti di archiviazione ed elaborazione dati.

L'architettura più comune di un sistema di *smart metering* distribuito è composta da:

- Dispositivi *smart meter* (sistemi di misurazione elettronici locali)
- *Data concentrator* (dispositivi di elaborazione di dati da diversi meter)
- Protocolli di comunicazione (che consentono la comunicazione bidirezionale tra gli smart meter e i data concentrator, su *local* o *wide are network*)
- Sistema di monitoraggio (piattaforma IT in cui un programma acquisisce ed elabora i vari dati)

Il monitoraggio e la misura dei consumi energetici elettrici e di combustibile (*smart metering*) consente di avere coscienza degli effettivi impieghi di elettricità e di gas non solo a livello di contatore generale ma anche correlati ai vari utilizzi e alle diverse aree dell'edificio.

Generalmente, un sistema di *smart metering* si basa su contatori di energia e apparecchi di misura intelligenti, una rete di comunicazione e infine un microcontrollore per la supervisione dell'intero sistema. L'insieme degli smart meters, dell'intera rete di comunicazione e del data management formano il cosiddetto AMI (Advanced Metering Infrastructure). Tramite tale infrastruttura, il meter è connesso al fornitore e potrebbe essere connesso alle applicazioni domestiche tramite HAN (Home Area Network).

Si possono identificare due tipologie di Smart Meter, secondo il loro livello di connettività e automazione:

- AMR (Automated Meter Reading). Prevede uno scambio di dati unidirezionali tra il contatore e la rete locale (livello minimo di automazione)

- AMM (Automated Meter Management). Ammette uno scambio bidirezionale di informazioni tra il punto di misura e la rete locale, permettendo una più ampia gamma di funzioni. Un'ulteriore evoluzione di questo strumento è l'interval meter che permette la registrazione di dati nel periodo, per la comunicazione del consumo consuntivo.

Il piano di misura e monitoraggio è il documento che definisce scopi ed obiettivi, procedimenti e metodi di misura, validazione, presentazione e archiviazione dei dati, modalità di calcolo e il formato della documentazione da redigere a dimostrazione del miglioramento della prestazione energetica conseguita.

Nei sistemi di misura e monitoraggio, giocano quindi un ruolo chiave:

- tipo dei misuratori,
- distribuzione dei misuratori,
- presentazione e visualizzazione dei dati,
- archiviazione dei dati.

La norma CEI 64-8/8.1 di recente emanazione definisce alcuni aspetti relativi all'efficienza energetica degli impianti elettrici con particolare attenzione alla misura e monitoraggio, introducendo il concetto di "maglia".

La norma definisce come maglia "il gruppo di apparecchiature elettriche alimentate da uno o più circuiti dell'impianto elettrico per una o più zone comprendenti uno o più servizi ai fini dell'efficienza energetica".

Il processo di misurazione si può suddividere nelle seguenti fasi: raccolta dati, trasmissione, archivio ed elaborazione, visualizzazione, analisi.

Il primo passo in un processo di metering è la raccolta dei dati. I dati vengono rilevati tramite dispositivi di misura, che possono essere permanenti o temporanei, in funzione degli obiettivi del sistema di misura. Le soluzioni temporanee di tipo portatile sono disponibile in forma di 'clip-on-device'; non sono invasive, sono utili per siti che richiedono accesso rapido ai dati per un'analisi iniziale, facili da utilizzare e più economiche rispetto ai dispositivi permanenti, tuttavia danno misure meno accurate.

Una volta che la lettura è stata effettuata, i dati devono essere trasmessi ad un punto centrale dove vengono archiviati e analizzati. La trasmissione avviene sia attraverso una connessione diretta tra i dispositivi di misura e il server, sia tramite data logger.

L'informazione deve poi essere registrata da un dispositivo di archiviazione prima di poter essere analizzata. Tale dispositivo può essere un data logger, un server centrale o un BMS. Un Data logger riceve e archivia dati provenienti da più dispositivi di misura; ha uno o più canali di ingresso, ciascuno in grado di essere collegato ad un dispositivo di misura per raccogliere uscite ad impulsi. Un server centrale, d'altro canto, può ricevere i dati sia attraverso i data logger sia direttamente dai contatori (purché siano dotati di capacità AMR). Il BMS, infine, può essere utilizzato alla stregua di un server centrale per memorizzare i dati di misura acquisiti. Con tale soluzione si possono ottenere significativi risparmi, dal momento che l'infrastruttura di comunicazione e archiviazione dati è già presente; tuttavia, occorre tener presente che il BMS potrebbe non essere progettato per la continua acquisizione di dati da più dispositivi di misura.

Infine, per poter utilizzare i dati raccolti, è necessario visualizzarli per poterli analizzare. Le modalità di lettura possono essere e.g. display grafici per lettura locale, connessione a data logger, connessione a rete per trasmissione dei dati a EMS o BMS per successiva elaborazione. A tal fine i dispositivi devono essere dotati di uscite per comunicazione di tipo ad impulsi, RS-232/485, Fibra ottica, Wireless, Ethernet TCP/IP, Modbus, BACnet, KNX, etc.

Ai fini del presente lavoro, l'ambito di maggiore interesse è quello degli strumenti di misura per l'elettricità, a cui corrisponde anche il mercato più sviluppato e avanzato. Esiste una vasta gamma di dispositivi, da quelli più elementari – che indicano solo l'energia in kWh – a quelli più sofisticati che consentono di analizzare anche la qualità dell'alimentazione. I principali tipi di dispositivi di metering dell'energia elettrica sono illustrati in Tabella 13.

Tabella 13. Dispositivi di misura.

Contatori di energia	Misurano l'energia elettrica consumata in circuiti monofase o trifase. Visualizzazione del consumo di energia in kWh e altri valori quali corrente, energia attiva, energia reattiva.
Multimetri	Sono strumenti di misura che inglobano la funzione di voltimetri, amperometri, cosfimetri, wattmetri, varmetri, frequenzimetri, contatori di energia attiva e reattiva in un unico strumento. Visualizza le principali grandezze elettriche come : <ul style="list-style-type: none"> - tensione U [V]; - corrente I [A]; - potenza attiva [W]; - potenza apparente [VA]; - frequenza [Hz]; - energia attiva [kWh]; - energia reattiva [kVARh];
Analizzatori di rete	Gli analizzatori di rete sono strumenti che, oltre a consentire la misura dei principali parametri elettrici (U,I,W,VA, Hz, kWh, cosfi ecc.) misurano anche la distorsione armonica totale THD, sfarfallio, disimmetria .
Datalogger	Un datalogger (o registratore dati) è un dispositivo elettronico che viene utilizzato per misurare e registrare in un certo periodo di tempo una grandezza fisica o elettrica. I dati possono essere relativi a misure di temperatura, sforzo, posizione, flusso, pressione, tensione, corrente, resistenza, potenza, ecc.

Nella scelta dei dispositivi di misura si devono valutare l'accuratezza, il costo, la funzionalità, la sicurezza, l'integrazione in strutture già esistenti etc.

4.2 Energy Management Information System (EMIS).

L'architettura definita in questo modello è oggi nota come Energy Management Information System (EMIS). È noto che il controllo dei consumi energetici in un edificio consente di migliorare le prestazioni energetiche. Le norme relative alla gestione dell'energia fanno riferimento alla misurazione e al monitoraggio dell'energia come un fattore importante nel miglioramento delle prestazioni energetiche (EP) definito come i risultati misurabili relativi all'efficienza energetica, all'utilizzo di energia e al consumo di energia.

Nel campo dei sistemi di misurazione, gli standard più importanti sono ISO 50001, ISO 50004, ISO 50006. Gli standard definiscono un piano di misurazione come la procedura per la progettazione, l'implementazione, l'utilizzo, la manutenzione e il miglioramento di un sistema di misurazione e monitoraggio distribuito (DMS). Un DMS è in grado di misurare e analizzare l'EP dell'organizzazione in base a fattori che influenzano il funzionamento del sito.

Il DMS consiste in una complessa architettura di misuratori e dispositivi distribuiti con o senza un server centrale con un sistema di supervisione. Il DMS fornisce servizi come: lettura, elaborazione, visualizzazione, archiviazione. Il DMS può essere integrato in un sistema di supervisione. Più in dettaglio il DMS consente agli utenti di:

- (i) vedere in tempo reale le informazioni sull'energia e il consumo energetico,
- (ii) analizzare i loro consumi e le spese sull'energia,
- (iii) utilizzare diversi tipi di grafici, tabulati e manipolati dati.

Per i DMS elettrici i dispositivi possono essere:

- sensori di corrente e sensori di tensione,
- misuratori di potenza (profili),

- analizzatori di potenza (qualità e THD),
- sistemi di supervisione.

Il consumo di energia è definito come la quantità di energia applicata in un determinato periodo dell'anno, per un consumo energetico o per gli usi globali dell'edificio.

Il processo di misurazione consiste nel reperire fisicamente valori che possono essere ragionevolmente assegnati a una quantità. Il processo di misurazione consiste nella continua integrazione di grandezze misurate in funzione del tempo.

Un DMS deve essere in grado di monitorare anche i fattori di influenza definiti come parametri misurabili o quantificabili che possono avere un impatto su EP e sono soggetti a cambiamenti regolari. Un esempio di fattore di influenza è il livello di occupazione dell'edificio.

Il processo di monitoraggio è la valutazione continua di misure o segnali, con l'obiettivo multiplo di:

- l'analisi della performance energetica mediante il calcolo di indicatori anche in correlazione con i fattori di influenza;
- la segnalazione di potenziali malfunzionamenti del sistema;
- la fornitura di indicazioni di allarme.

L'efficacia del DMS dipende da diversi fattori, uno dei quali è il livello della copertura del DMS considerando gli usi energetici e le zone della struttura o delle strutture.

Un sistema di monitoraggio distribuito (DMS) è un sistema hardware installato per misurare e analizzare gli indicatori di prestazione energetica (EnPIs) della struttura / organizzazione. Il DMS è una rete di misuratori, sensori e dispositivi in grado di misurare sia gli usi energetici che i fattori che influenzano il sito.

I sistemi di misurazione e monitoraggio sono risorse chiave nel contesto della gestione energetica. Con specifico riferimento ai Sistemi di Gestione dell'Energia (EnMS) come nella norma ISO EN 50001, i sistemi di misurazione e monitoraggio possono essere visti come risorse di gestione dell'energia in grado di analizzare l'uso di energia e il consumo energetico dell'organizzazione (attività relativa alla fase di pianificazione energetica) e analizzare i risultati della politica energetica dell'organizzazione (attività relativa alla fase di verifica). Un EnMS supporta il controllo energetico e il benchmarking, ma consente anche di analizzare le prestazioni di affidabilità del sistema, in termini di disponibilità del sistema e supporto alla manutenzione.

4.3 Architettura del sistema di metering e monitoring

I criteri funzionali e architettonici da considerare per la costruzione di un EMIS, utilizzabile da qualsiasi tipo di organizzazione (indipendentemente dalle sue dimensioni o complessità) con un approccio modulare, scalabile e sostenibile.

Inoltre, l'approccio architettonico delineato richiede che EMIS debba essere:

- Orientato all'utente
- Orientato all'efficienza

È necessario prestare attenzione per identificare a fondo tutti i possibili utenti del sistema e scegliere una strategia per dare loro progressivamente accesso al sistema, in base alle priorità dell'organizzazione.

Infatti, ogni gruppo omogeneo di utenti richiederà di analizzare / visualizzare diversi tipi di informazioni. La progettazione del sistema deve consentire la possibilità di aggiungere funzioni con moduli separati, senza influenzare quelli precedentemente implementati.

Un EMIS ha una portata più ampia rispetto a un semplice DMS: il suo obiettivo principale è monitorare l'efficienza energetica. Pertanto, i fattori operativi e ambientali, che influenzano l'uso di energia, devono essere misurati e gestiti dal sistema per ottenere EnPI e altre informazioni utili per indagare sull'efficienza del sistema in termini di utilizzo di tutte le risorse necessarie (non solo energie ma, ad esempio, attrezzatura) e dell'impatto ambientale. In realtà, la modularità del sistema dovrebbe consentire di migliorare l'ambito del monitoraggio, compresi i dati relativi all'utilizzo dell'acqua, alle emissioni, all'inquinamento e ad altri campi che contribuiscono al controllo globale dell'efficienza dell'organizzazione. Alla fine, la scomposizione funzionale dell'architettura consente un'attuazione scalabile e sostenibile dell'EMIS, in linea con i vincoli economici e la profondità dell'analisi / monitoraggio identificati dal programma di audit energetico e di gestione dell'energia dell'organizzazione.

La configurazione dell'EMIS proposto è composta da quattro macro livelli:

A. Presentazione delle informazioni: è richiesto un livello software che fornisca e organizzi le informazioni per il personale coinvolto nell'organizzazione. L'idea è di fornire al personale informazioni appropriate e a valore aggiunto, considerando il loro livello di responsabilità. L'accesso e il privilegio a questo livello devono essere controllati per motivi di sicurezza.

B. Correlazione e analisi dei dati: il livello di presentazione delle informazioni è alimentato dal livello di correlazione e analisi dei dati. Per fornire informazioni a valore aggiunto, il livello di correlazione e analisi dei dati dovrebbe essere caratterizzato da modularità e scalabilità per consentire, se necessario, l'introduzione di funzioni relative alle nuove priorità dell'organizzazione. [1]

C. Classificazione dei dati, trasformazione e memorizzazione: le funzioni di correlazione e analisi richiedono una serie di dati di input caratterizzati da fonti diverse: quattro set principali possono essere descritti:

- Dati dinamici dal campo: (ad esempio misure, eventi, allarmi) raccolti in modo automatico o manuale
- Dati statici o quasi statici relativi alle apparecchiature: questi dati sono correlati, ad esempio, alla descrizione delle risorse (tipo, modello, dati di targa e parametri di lavoro di riferimento);
- Metadati (dove e come vengono utilizzati i dispositivi): Topologia, Inventario, Configurazione, Dati amministrativi;

- Altri dati operativi rilevanti per l'efficienza energetica (tipicamente importati da altri sistemi): ad es. previsioni di produzione, pianificazione della manutenzione, costi energetici, parametri tecnici (ad esempio dimensioni dell'edificio / forno e isolamento termico).

Questi dati richiedono la definizione e l'implementazione di modelli di dati, adattamento dei dati e virtualizzazione (per separare il software applicativo dall'acquisizione / input dei dati); Il Data Warehouse orientato agli oggetti (base dati relazionale + base dati multidimensionale) potrebbe essere utilizzato per ottimizzare l'organizzazione, l'utilizzo e la manutenzione dei dati.

D. Acquisizione, raccolta e adattamento dei dati:

Per implementare un sistema di monitoraggio dell'efficienza energetica conforme all'interesse dell'organizzazione, è necessario organizzare tutti i "dispositivi di misurazione" (misuratori, sensori, sonde, misuratori e interfacce dati sul campo) rilevanti per l'analisi. e selezionati in base alle loro caratteristiche metrologiche. La selezione deve essere valutata in base ai costi e agli oneri di installazione che possono verificarsi durante l'implementazione. Gli apparecchi di misurazione devono essere periodicamente valutati seguendo un piano di manutenzione appropriato.

Inoltre, vi è la possibilità di acquisizione e immissione manuale dei dati da parte di un operatore umano attraverso opportune interfacce di acquisizione dati manuali.

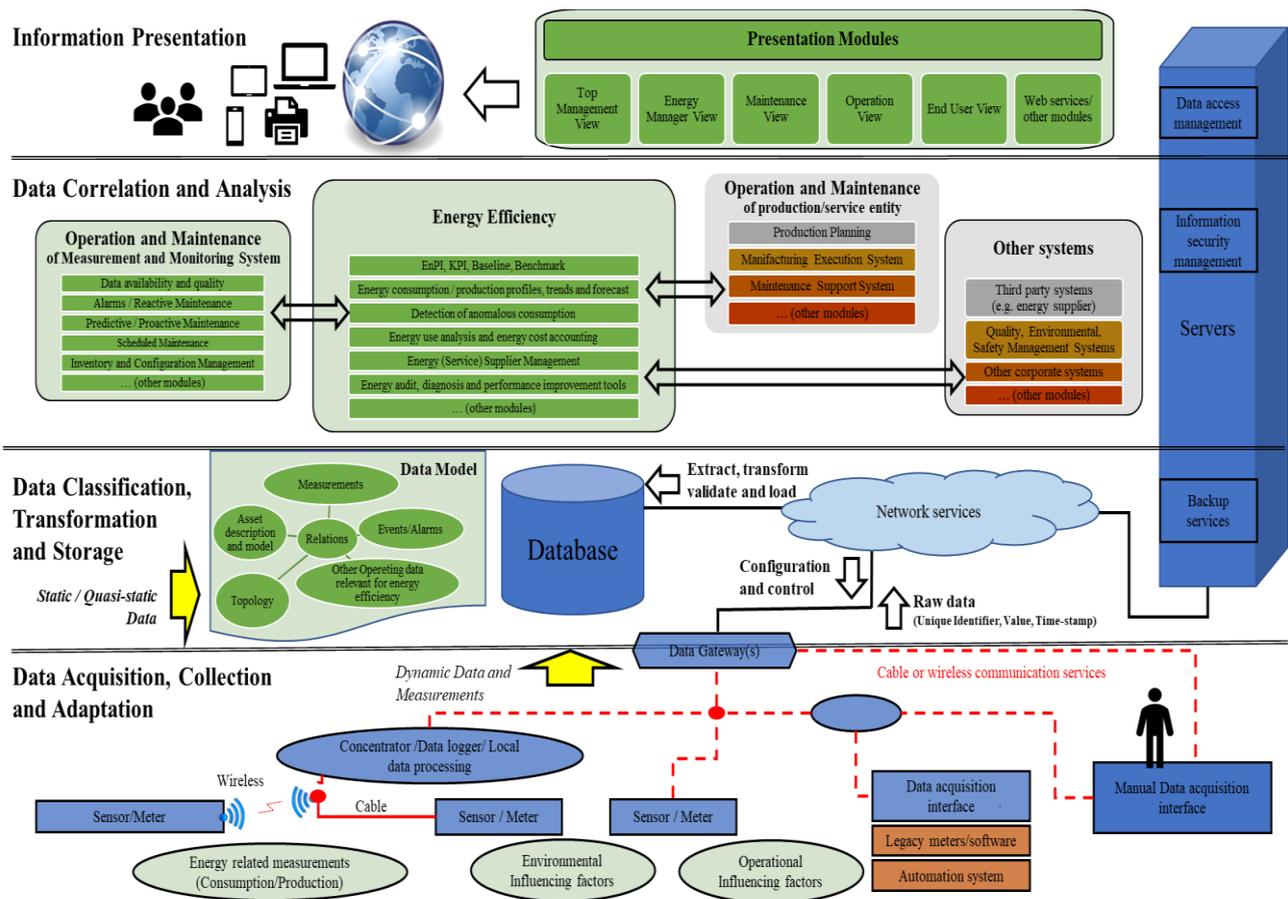


Figura 41. Architettura proposta per l'EMIS

Alla fine, al fine di ottenere una progettazione e uno sviluppo sostenibili, è necessario tenere conto di altre caratteristiche quali:

- Ridondanza HW e SW;
- Base dati e allocazione software (locale, cloud, ibrida);
- Topologia (stella, mesh, ibrido), tipo (cablato, wireless, ibrido) e protocolli di comunicazione della LAN / WAN per la raccolta e il trasferimento dei dati;
- Topologia e numero di livelli per l'acquisizione, la raccolta, l'adattamento e l'archiviazione dei dati;
- Interazione con altri sistemi operativi e di supporto alle imprese.

In ogni caso, l'architettura generale proposta è scalabile per consentire di ampliare l'ambito del sistema nelle successive fasi di implementazione sostenibile, aggiungendo componenti modulari nel livello appropriato.

Consente l'implementazione di sistemi puramente locali (ad esempio tutti i componenti HW e SW installati all'interno di un singolo sito) e sistemi distribuiti (ad esempio casi di multisite e / o casi con virtualizzazione delle funzioni di livello superiore in un'infrastruttura cloud).

4.4 Architettura del sistema EMIS per il complesso "le Torri"

L'architettura prevista in un sistema EMIS secondo l'architettura proposta, comprende un sistema di rilevamento fisico delle grandezze (metering) come rappresentato in figura, completo costituito da:

- un sistema di misura distribuita per l'energia elettrica;
- un sistema di misura dell'energia elettrica assorbita dalla pompa di calore (MTE nello schema);

- un sistema di misura distribuita per l'acqua calda sanitaria, per il riscaldamento e per l'acqua potabile (MT2 nello schema);
- un sistema di misura centralizzata del calore distribuito (MT1 nello schema)
- un sistema di misura dei parametri di influenza e ambientali (acquisiti mediante i sistemi HES e BES nello schema).

Tutti i misuratori sono previsti del tipo comunicante per realizzare un sistema di misura distribuita.

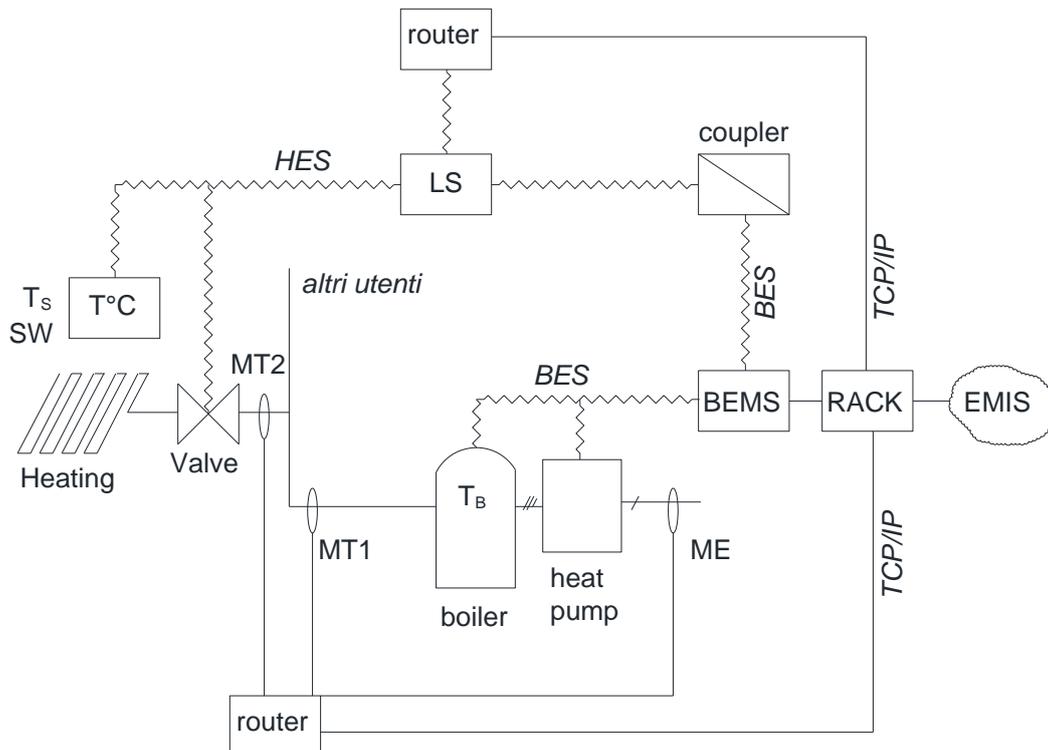


Figura 42. Architettura del sistema di metering proposto

L'archiviazione delle misure avviene sia a livello di misuratore, tramite il data logger presente, per le ultime misure (circa un anno), sia a livello centralizzato con archivio completo delle informazioni nel sistema SCADA di edificio.

La visualizzazione avviene sia interrogando il misuratore locale, sia a livello centralizzato tramite il sistema SCADA e sia attraverso un sistema di APP a disposizione di ogni utente.

4.4.1 Metering elettrico

Il progetto prevede la realizzazione di un sistema di misura distribuita per l'elettricità consumata dalle singole utenze capace di fornire misure orarie e profili giornalieri. Il sistema è dotato di:

- misuratori di energia elettrica per ogni utenza residenziale, allocati in partenza di ogni montante nel quadro generale di edificio;
- misuratori di energia elettrica per le utenze comuni accorpate (centrali termiche, illuminazione, ecc.);
- misuratore di energia elettrica per il fotovoltaico;
- misuratore di energia elettrico generale.

I misuratori sono previsti del tipo comunicante con standard tipo M-Bus o equivalente in modo da essere integrati nel sistema generale SCADA di edificio.

Si è fatto riferimento al dispositivo marca Electrex tipo Femto D4 RS485 230-240V ENERGY ANALYZER.

Lo strumento è un Contatore / Analizzatore di energia mono-trifase con display LCD grafico retroilluminato. Misura del THD su tensione e corrente, della corrente di neutro, tensione massima e minima, corrente e

potenza massima e dell'energia attiva di ogni fase. Interfaccia RS485. Dimensione guida DIN 4 moduli. Alimentazione 230-240Vac.



Figura 43. Electrex tipo Femto D4 RS485 230-240V ENERGY ANALYZER

I misuratori avranno la possibilità di memorizzare le informazioni nel dispositivo stesso per una consultazione da parte dell'utente e saranno integrati in un sistema di misura distribuito integrato nel sistema SCADA generale.

4.4.2 Metering acqua calda, calore e acqua potabile a livello di unità

Il progetto prevede la realizzazione di un sistema di misura per acqua calda, calore e acqua potabile costituito da misuratori allocati nelle cassette di smistamento al piano, del tipo:

- contatore acqua potabile
- contatore acqua calda sanitaria
- contacalorie riscaldamento

I misuratori sono tutti comunicanti con il sistema centralizzato.

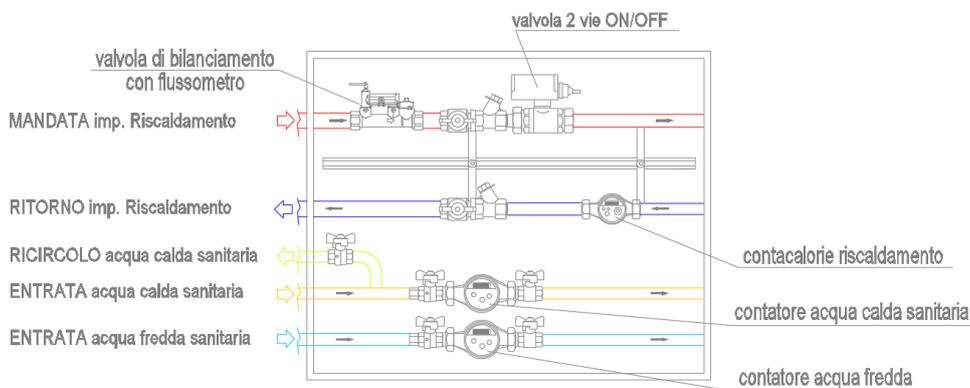


Figura 44. Schema di installazione metering acqua calda, calore e acqua potabile

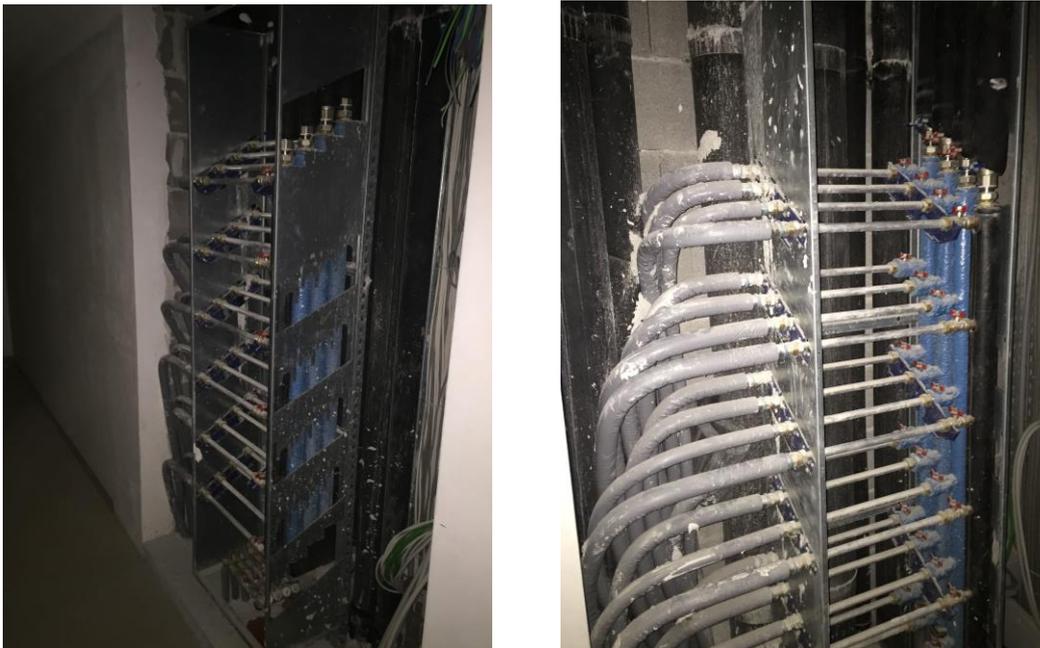


Figura 45. Sistema di distribuzione nelle unità. Punto di installazione dei misuratori termici.

In figura è riportato il punto di installazione dei misuratori termici.

Gli strumenti individuati per la misura della portata di acqua calda (heat meter) da installare nei centri satellite sono del tipo ad ultrasuoni, IFX-M4-03 della Soil Industria. In particolare è stato individuato il modello:

IFX-M04-03-2-2-3-3-5

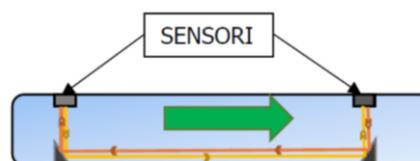


Figura 46. Misuratore heat meter del tipo IFX-M

I misuratori di portata ad ultrasuoni misurano la differenza del tempo di transito degli impulsi ad ultrasuoni che si propagano a favore e contro la direzione del flusso. Questa differenza di tempo determina la velocità media del fluido lungo il percorso del fascio ultrasonico.

Il modello impiegato è previsto:

- Classe 2
- Con installazione sul tubo di ritorno;
- Per la misura sia del riscaldamento che del raffreddamento
- Per ratio della portata di 100 qp/qi, limiti di differenza di temperatura di 3-150 K
- Modulo di comunicazione Modbus

Il misuratore è dotato di un data logger capace di memorizzare i seguenti dati:

- 1 Energia totale
- 2 Energia totale freddo

- 3 Energia totale tariffa 1
- 4 Energia totale tariffa 2
- 5 Volume totale
- 6 Valore totale dell'ingresso impulsivo 1
- 7 Valore totale dell'ingresso impulsivo 2
- 8 Valore Massimo della Potenza riscaldamento e data
- 9 Valore Massimo della Potenza raffrescamento e data
- 10 Valore Massimo di portata e data
- 11 Valore Massimo della temperature di mandata del fluido vettore e data
- 12 Valore Massimo della temperature di ritorno del fluido vettore e data
- 13 Valore minimo della temperature di mandata del fluido vettore e data
- 14 Valore minimo della temperature di ritorno del fluido vettore e data
- 15 Valore minimo della differenze delle temperature del fluido vettore e data
- 16 Valore medio della temperature di mandata del fluido vettore e data
- 17 Valore medio della temperature di ritorno del fluido vettore e data
- 18 Tempo di funzionamento senza errore della misura dell'energia termica
- 19 Codice di errore totale
- 20 Tempo in cui la portata ha superato 1.2 qs
- 21 Tempo in cui la portata era inferior a qi

La capacità del data logger è

- Fino a 1480 h – per memorizzazioni orarie;
- Fino a 1130 giorni – per memorizzazioni giornaliere;
- Fino a 36 mesi (gli ultimi) – per memorizzazioni mensili.

Tempo di archivio dei dati Non meno di 36 mesi

Tempo di archivio dei dati Non meno di 15 anni (anche se il misuratore è disconnesso dall'alimentazione)

Lo schema di collegamento è riportato nella figura seguente.

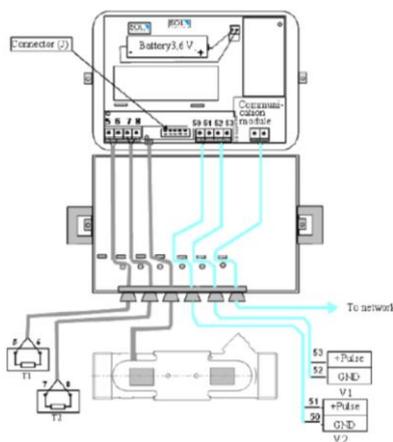


Figura 47. Schema elettrico del misuratore di portata del tipo IFX-M

Il sistema di monitoraggio prevede l'installazione di 6 misuratori per 6 unità indipendenti.

4.4.3 Metering acqua calda a livello di centrale

Il progetto prevede il monitoraggio delle grandezze principali di portate e temperatura in centrale termica. In particolare è previsto un heat meter a livello di mandata principale del tipo Nubis MWN 130-NC.



Figura 48. Misuratore heat meter del tipo MWN-130-C

Il msuratore è un sensore di flusso per contatori di calore con rotore ad asse orizzontale allineato parallelamente al centro della tubazione dell'acqua e una soglia di avvio bassa. Il diametro nominale è di 80 mm. Il misuratore è installato su un tronchetto nella tubazione di mandata principale.

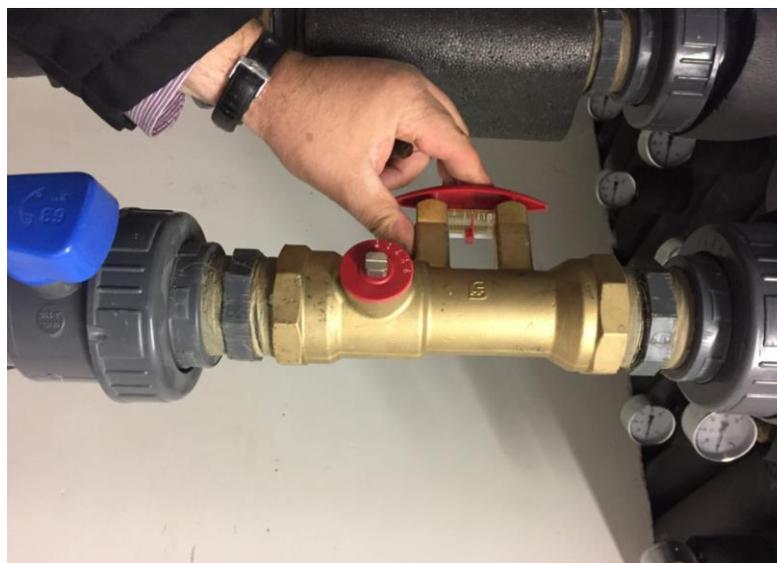


Figura 49. Punto di installazione del misuratore heat meter del tipo MWN-130-C

Per la trasmissione dei segnali nel sistema di monitoring, il misuratore necessita di un elemento elettronico comunicante come rappresentato in figura.

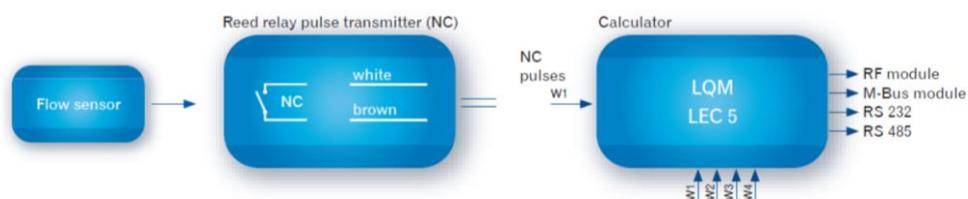


Figura 50. Sistema di comunicazione delle misure per il componente MWN-130-C

4.4.4 Metering parametri ambientali

Il progetto prevede la realizzazione di un sistema di misura dei parametri ambientali più importanti:

- temperatura dell'aria,
- velocità del vento,
- umidità,
- presenza pioggia.
- Sono previste poi sonde di temperatura per monitorare le centrali termiche.
- Le sonde sono da integrare nel sistema SCADA.

4.4.5 Trasparenza dei consumi e dei costi

Uno degli aspetti più importanti è la trasparenza dei consumi e dei costi.

Gli utenti dovrebbero conoscere in "near real time" i propri consumi ed i costi di approvvigionamento.

Così non avviene per mezzo dei "contatori intelligenti" del distributore.

In Italia, attualmente il near real time consiste in:

- 1) l'ora o il quarto d'ora, per quanto riguarda i kWh, con grande difficoltà da parte dell'utente ad interrogare il contatore;
- 2) il mese o il bimestre per quanto riguarda gli euro, con difficoltà da parte dell'utente ad interpretare la bolletta.

Un sistema di metering di proprietà consentirebbe di raggiungere elevati livelli di trasparenza e gestibilità dei dati, con possibilità di interrogazione semplice tramite device mobile.

E' possibile anche attivare allarmi e segnalazioni di esuberi di potenza.

Non c'è nessun sistema di controllo che funzioni meglio della verifica diretta e continua degli utenti sui costi. Alcuni studi statistici dimostrano che tale misura comporta risparmi dell'ordine del 10%.

Se l'utente conosce in near real time quanto sta spendendo, si regolerà di conseguenza, con un'efficacia migliore di qualunque raffinato sistema automatico.

E' possibile pensare anche a sistema di contabilizzazione con schede elettroniche prepagate (virtuali) per una migliore gestione economica delle forniture all'interno della micro grid.

5 Sistemi di controllo

5.1 Introduzione ai sistemi di controllo

Al fine di esercire un impianto o sistema in modo efficace, è necessario un sistema di controllo adeguato e accurato.

Si premette la definizione di controllo automatico: “un sistema che reagisce a variazioni o sbilanciamenti della variabile di controllo attraverso la regolazione di altre variabili al fine di ripristinare l’equilibrio desiderato nel sistema”.

I sistemi di controllo consistono dei seguenti componenti base:

- Variabile controllata
- Variabile misurata (può essere la stessa variabile controllata, o un’altra variabile che determini l’azione del controllore)
- Una variabile manipolata
- Un set point di controllo della variabile misurata
- Un controllore che coordina decisioni e azioni
- Un attuatore che mette in atto il controllo
- A controlled device

Variabili controllate tipiche nei sistemi HVAC sono temperature, umidità, pressione, portata d’aria, velocità dell’aria, entalpia, composizione edll’aria. Variabili manipolate possono essere portata d’aria (aria esterna, aria ricircolata, aria miscelata), portata d’acqua nei fan coil. Dispositivi di controllo comuni sono valvole, ammortizzatore, velocità dei rotori dei ventilatori.

I passi per la progettazione di un Sistema di controllo efficace sono I seguenti:



Figura 51. Processo di progettazione di un Sistema di controllo

Al fine di studiare e controllare dei processi, si assume che il comportamento del sistema sia lineare, i.e., il sistema si comporti in accordo col principio di sovrapposizione e sia lineare tempo-invariante. La variabile in input è convertita dal dominio del tempo al dominio della frequenza utilizzando delle trasformate. Le funzioni più comuni sono:

- Trasformata di Fourier: $F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt$
- Trasformata di Laplace: $F(s) = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt$ ($s = \sigma \pm i\omega$)

In tale rappresentazione, il valore in output può essere considerato proporzionale al valore in input. Tale ipotesi consente di usare equazioni differenziali lineare al fine di analizzare e controllare le variaizoni delle variabili del sistema.

I sistemi di controllo possono essere basati su differenti modalità di controllo. Le più comuni sono on-off, step, floating, lineare, logica fuzzy.

5.1.1 Loop di controllo

I loop di contorllo sono l'assieme di component del Sistema progettati al fine di mantenere una variabile in corrispondenza di un set-point desiderato.

Le operazioni di controllo possono essere basate su valori di ritorno dalla variabile misurata. In base a tale caratteristica, si possono implementare loop di controllo aperti o chiusi (open-loop o closed loop).

I sistemi di controllo open-loop operano sul dispositivo di regolazione in base al valore della variabile in input. Hanno un design semplice e sono meno costosi. La caratteristica principale è che non sono in grado di prendere in considerazione alcun tpo di feedback o informazione in ritorno dalla variabile misurata. Il sistema riesce solo a compensare i disturbi previsti, ma non riesce a ad apportare delle correzioni e non prende in considerazione disturbi esterni al sistema. Ciò porta a un controllo meno accurato rispetto al closed-loop.

D'altro canto, i controlli open-loop presentano una maggiore stabilità. In aggiunta, si dimostrano efficaci quando i valori in output sono difficili da minsurare

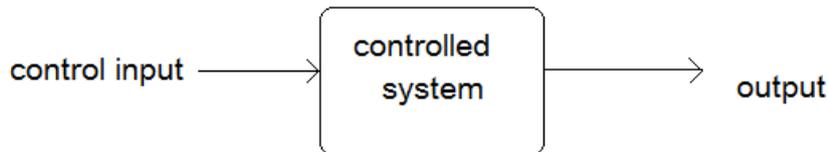


Figura 52. Sistema di controllo open-loop

I sistemi di controllo sono più accurate ma al contempo più complessi. I valori in output dal sistema sono misurati e utilizzati come feedback nel loop per regolare le azioni di controllo. Il comparatore ha la funzione di confrontare il segnale feedback e la variabile in input., calcolando la differenza tra i due e dando una misura dell'errore del sistema. In base a tale errore, il sistema determina l'azione di controllo opportuna. Conseguentemente, il sistema è in grado di filtrare rumore e disturbi esterni, implementando un controllo più accurato.

D'altro canto, può succedere che il guadagno nel sistema complessivo aumenti in modo incontrollabile e che pertanto il sistema inizi a oscillare. Come contromisura, la sensibilità del sistema può essere diminuita di conseguenza. In riferimento a tale fenomeno, si può affermare che il controllo closed-loop sia meno stabile del controllo open-loop.

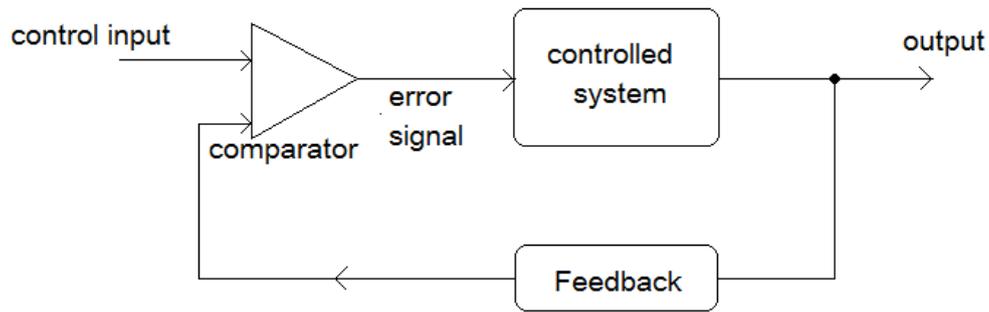


Figura 53. Sistema di controllo Closed-loop

La procedura di misurazione, calcolo e azione è ripetuta a ogni campione di tempo del sistema di controllo.

5.2 Sistemi di controllo lineari

I sistemi di controllo lineari possono essere usati per analizzare e operare su variabili di processo al fine di assicurare un controllo automatico efficace in grado di mantenere tutte le variabili in corrispondenza dei set point desiderati.

Le azioni di controllo possono essere:

- Proporzionali
- Integrali
- derivate

Le azioni proporzionali aumentano la velocità della regolazione per raggiungere il set point, poiché l'azione è proporzionale in ampiezza all'ampiezza dell'errore. Ciononostante, tale metodo di controllo presenta un errore a regime che non può essere del tutto cancellato.

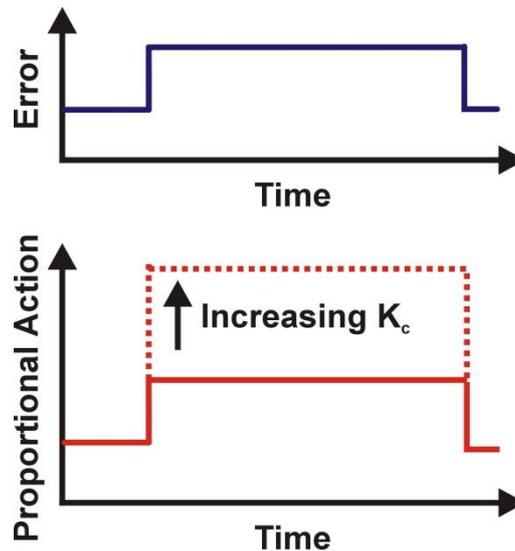


Figura 54. Azione proporzionale

L'azione integrale è utile al fine di correggere l'errore a regime, ma rende il Sistema di controllo meno stabile e i transienti più lunghi. I controllori integrali sono anche detti "a reset" poiché sono in grado di riportare la variabile controllata al set point a seguito di rumore o disturbi.

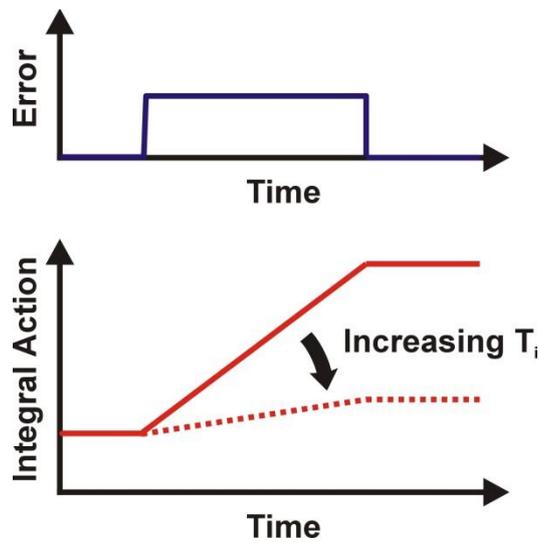


Figura 55. Azione integrale

L'azione derivativa ha la funzione di apportare maggiore stabilità, ma, al pari dell'azione proporzionale, è affetta da un errore a regime.

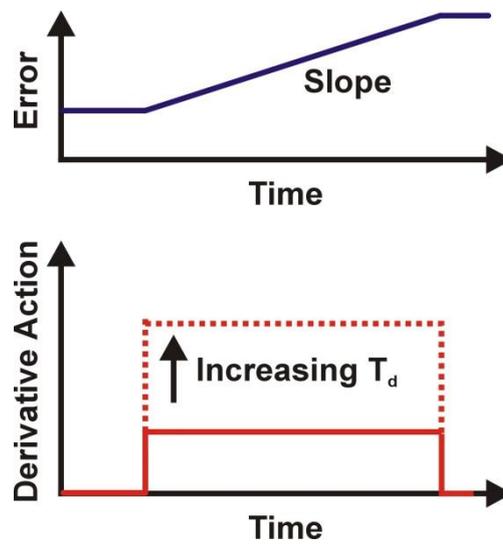
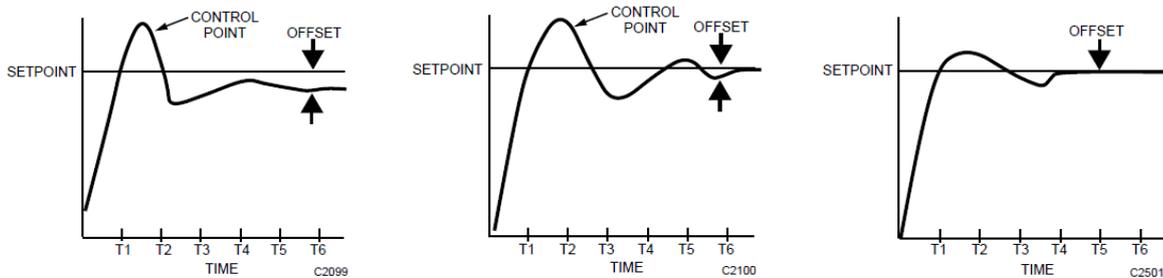


Figura 56. Azione derivativa

Tali modalità di controllo possono essere combinate in una configurazione adatta alle varie applicazioni, in accordo con la tipologia di variabile controllata; la combinazione di due o tre modalità definisce la tempistica e la caratteristica della risposta del sistema a disturbi.



(a)

(b)

(c)

Figura 57. Risposta del Sistema con controllore P (a), PI (b), PID (c)

5.2.1 Sistema di controllo proporzionale (P)

Il controllo proporzionale viene definito come “un algoritmo o metodo in cui l’organo di regolazione finale si porta in una posizione proporzionale alla deviazione del valore della variabile controllata rispetto al set point”.

Ciò è descritto dall’equazione:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + M$$

In cui:

- $u(t)$ È il segnale in output
- K_p È il guadagno proporzionale
- $e(t)$ È la deviazione, ossia lo scarto istantaneo tra il set point e la variabile di controllo
- M È il bias del controllore, ossia l’output residuo ad errore nullo

Ciò è rappresentato dal diagramma a blocchi seguente.

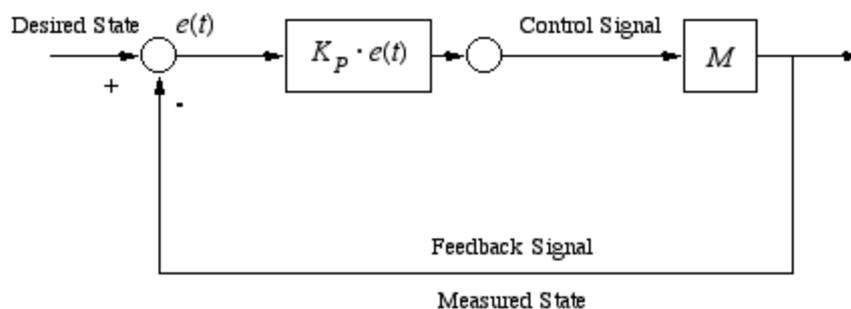


Figura 58. Diagramma a blocchi di controllore proporzionale

In caso di controllo proporzionale, maggiore è la distanza del punto di controllo dal set point, maggiore è lo spostamento del valore in output. Ciò risulta in una funzione lineare tra il valore della variabile controllata e la posizione dell’organo di controllo finale.

A fini della stabilità del Sistema, il Guadagno può essere messo a punto in modo da determinare il livello di efficacia del loop di controllo. Può essere positivo o negativo. Solitamente si tratta di feedback negativo, in cui l’azione di regolazione è opposta alla causa che ha ingenerato la deviazione.

La problematica principale di tale modalità è l’errore residuo a regime che non può essere cancellato e che è dovuto al bias (anche detto “reset manuale”) che permane a errore nullo. Esso è presente fino all’intervento di un operatore, il quale, in modalità manuale, deve manipolare l’output al fine di resettare il controllo.

Tale problematica, unita alla ulteriore problematica che il rumore risulta amplificato, rende questa modalità non adatta a molte applicazioni; si dimostra utile solo in caso in cui la deviazione non sia improvvisa e che sia di entità contenuta.

5.2.2 Sistema di controllo proporzionale-integrale (PI)

È definito come “un algoritmo di controllo che combini algoritmi a risposta proporzionale e integrale (a reset)”.

L’aggiunta della componente integrale consente di cancellare il bias del controllore P; il controllore PI è pertanto spesso detto “proportional-plus-reset” (proporzionale con reset) o “two-mode” (a due modalità).

Ciò è descritto dall’equazione:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_p \cdot \frac{1}{T_I} \int e(t) dt + M$$

In cui:

- $u(t)$ Segnale output
- K_p Guadagno proporzionale
- $e(t)$ Deviazione (errore istantaneo dal set point)
- T_I Tempo di reset

- $K_P \cdot \frac{1}{T}$ Guadagno di reset, anche definito K_I
- dt Tempo differenziale (incremento temporale)
- M Bias del controllore

Ciò è rappresentato dal diagramma a blocchi seguente.

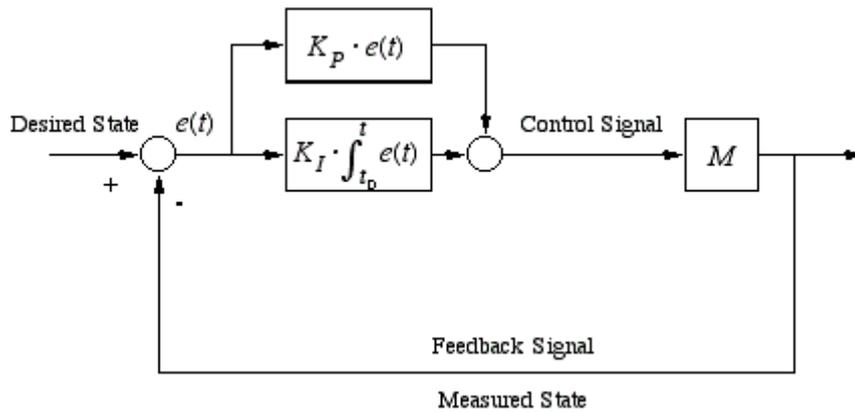


Figura 59. Diagramma a blocchi di controllore proporzionale-integrale

L'offset viene cancellato spostando la banda proporzionale in modo automatico in base alla deviazione della variabile controllata.

The elimination of the offset is achieved by shifting the proportional band automatically according to the deviation of the controlled variable.

La problematica di tale modalità è che la risposta ha una tempistica più lunga e la stabilità complessiva è inficiata, in quanto il controllore non è in grado di prevedere l'errore futuro.

5.2.3 Sistema di controllo proporzionale-integrale-derivativo (PID)

È definito come “un algoritmo di controllo che migliora l'algoritmo PI introducendo una componente proporzionale al tasso di variazione (derivata) della deviazione della variabile controllata”.

La componente introdotta è utile per compensare le oscillazioni e velocizzare la risposta. Il controllore siffatto è spesso definita come “rate-reset” o “three-mode” (a tre modalità).

È descritto dall'equazione

$$u(t) = K_P \cdot e(t) + K_P \cdot \frac{1}{T_I} \int e(t) dt + K_P \cdot T_D \frac{d}{dt} e(t) + M$$

Con:

- $u(t)$ Segnale output
- K_P Guadagno proporzionale
- $e(t)$ Deviazione
- T_I Tempo di reset
- $K_P \cdot \frac{1}{T_I}$ Guadagno di reset, anche detto K_I
- dt Differenziale di tempo (incremento temporale)
- T_D Tempo differenziale (intervallo di tempo in cui la l'azione derivata sopravanza gli effetti dell'azione proporzionale)
- $K_P \cdot T_D$ Costante di guadagno differenziale
- $\frac{d}{dt} e(t)$ Derivata temporale della deviazione (tasso di variazione dell'errore nel tempo)

- M Bias

Ciò è rappresentato nello schema a blocchi seguente.

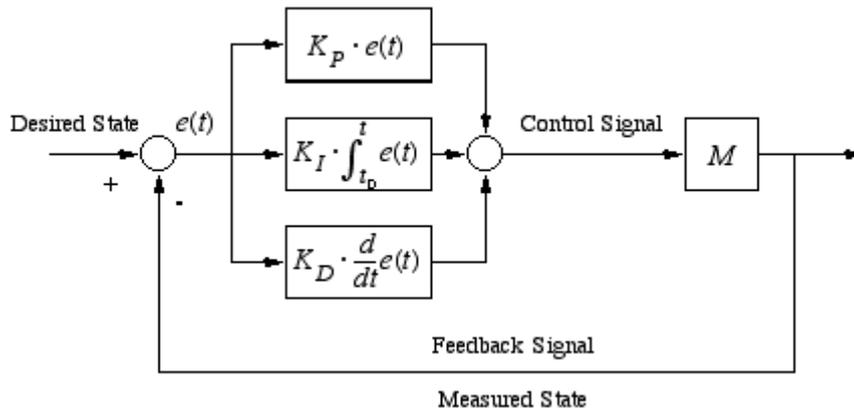


Figura 60. Schema a blocchi di controllore proporzionale-integrale-derivativo

La componente derivativa è proporzionale al tasso di variazione, talché la risposta è più rapida quando la variabile di controllo varia rapidamente. La possibilità di regolare la velocità della risposta si dimostra molto utile nel momento in cui la variabile di controllo si porta nei pressi del set point: in questo caso l'azione derivativa rallenta la risposta per migliorare l'accuratezza.

5.2.4 Sistema di controllo Enhanced Proportional-Integral-Derivative (EPID)

Il controllo EPID è un particolare controllo PID caratterizzato dalla presenza di un Sistema esterno di gestione dell'errore; è composto da un controllore PID digitale standard e da un compensatore addizionale. Gli elementi fondamentali che lo contraddistinguono dal PID standard sono un valore output iniziale e una durata di una rampa di errore.

È definito come "un algoritmo di controllo che migliora l'algoritmo PID standard consentendo l'immissione di un valore output iniziale e una durata di rampa di errore in aggiunta ai guadagni e ai setpoint".

Inizialmente, il set point iniziale impone il raggiungimento di un output fisso. Successivamente, viene introdotta la durata di rampa d'errore, pari al tempo in cui l'errore PID è fornito al controllore PID.

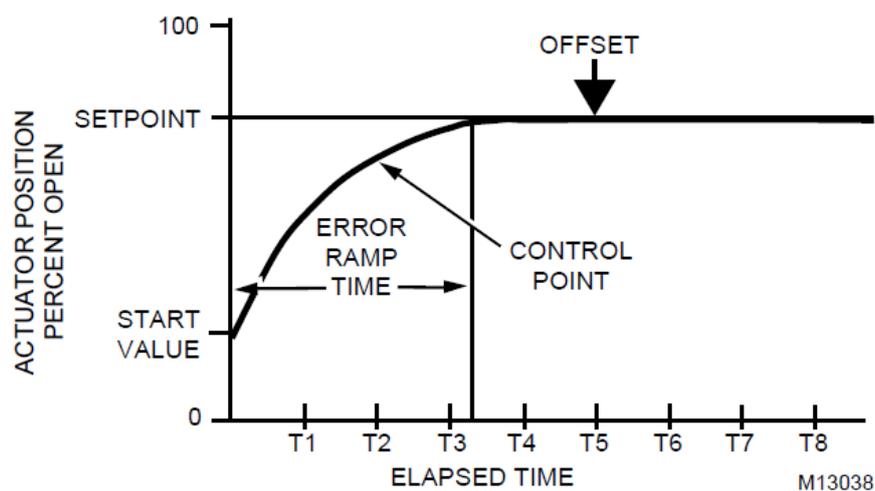


Figura 61. Enhanced Proportional-Integral-Derivative (EPID)

Viene usato soprattutto per rallentare il raggiungimento del set point al fine di migliorare l'accuratezza ed evitare oscillazioni, con la particolarità che la tempistica è impostata.

5.3 Sistemi di controllo a logica fuzzy

La logica fuzzy (fuzzy logic) è un modello di logica diverso, opposto alla logica booleana, proposto nel ventesimo secolo. Mentre la logica tradizionale booleana è basata su una visione dualistica ("tertium non

atur”), la logica fuzzy introduce la possibilità di dare risposte ulteriori rispetto a “vero” o “falso”, essendo una logica di tipo multivariabile. Il concetto ispiratore sta nel replicare il ragionamento tipico di un operatore umano per controllare in modo efficace un sistema complesso laddove il modello descrittivo non è disponibile o è eccessivamente complesso e le modalità tradizionali (e.g. PID) mostrano le loro limitazioni. I passi fondamentali con cui opera un sistema fuzzy sono descritti di seguito.



Figura 62. Passi fondamentali dell’elaborazione fuzzy

La fase di fuzzificazione converte i segnali dai sensori in variabili fuzzy (costituite da variabili linguistiche cui è associato il relativo valore di appartenenza). I vari input fuzzificati sono poi combinati nella fase di combinazione dei valori degli antecedenti. La fase di inferenza fuzzy attiva quindi dei conseguenti, a partire dagli antecedenti attivi, in base a regola fuzzy, di tipo if-then, preventivamente redatte dal programmatore. I valori dei conseguenti sono quindi combinati tra loro. Infine, nella fase di defuzzificazione, si ritorna a valori numerici utilizzabili dagli attuatori per agire sugli organi finali di controllo. Tutte le fasi sono basate su operatori matematici opportuni, tipici dell’implementazione fuzzy.

Un esempio è costituito dal seguente sistema per ottimizzare la prestazione energetica di un ufficio utilizzando un sistema domotico regolato in base alla radiazione solare. Gli antecedenti sono costituiti dall’irraggiamento solare e dall’occupazione; il conseguente, calcolato in base alle regole fuzzy, è costituito dalla posizione della schermatura solare.

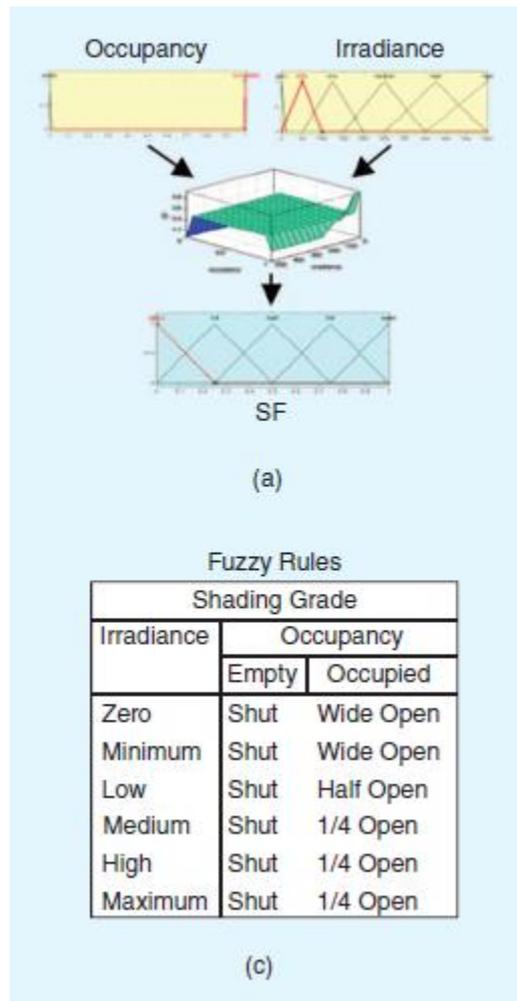


Figura 63. Esempio di processo fuzzy per il controllo di una schermatura solare

5.4 Controllo HVAC

I possibili controlli che è possibile implementare in un Sistema HVAC centralizzato sono illustrati nella tabella seguente.

Control Loop	Classification	Description
Ventilation	Basic	Coordinates operation of the outdoor, return, and exhaust air dampers to maintain the proper amount of ventilation air. Low-temperature protection is often required.
	Better	Measures and controls the volume of outdoor air to provide the proper mix of outdoor and return air under varying indoor conditions (essential in variable air volume systems). Low-temperature protection may be required.
Cooling	Chiller control	Maintains chiller discharge water at preset temperature or resets temperature according to demand.
	Cooling tower control	Controls cooling tower fans to provide the coolest water practical under existing wet bulb temperature conditions.
	Water coil control	Adjusts chilled water flow to maintain temperature.
	Direct expansion (DX) system control	Cycles compressor or DX coil solenoid valves to maintain temperature. If compressor is unloading type, cylinders are unloaded as required to maintain temperature.
Fan	Basic	Turns on supply and return fans during occupied periods and cycles them as required during unoccupied periods.
	Better	Adjusts fan volumes to maintain proper duct and space pressures. Reduces system operating cost and improves performance (essential for variable air volume systems).
Heating	Coil control	Adjusts water or steam flow or electric heat to maintain temperature.
	Boiler control	Operates burner to maintain proper discharge steam pressure or water temperature. For maximum efficiency in a hot water system, water temperature should be reset as a function of demand or outdoor temperature.

Figura 64. Principali funzioni dei loop di controllo per sistemi HVAC

Ogni elemento del sistema HVAC è controllato da un loop specifico e in base a specifiche variabili di controllo. Nella maggior parte dei sistemi, si usano i loop di controllo raccomandati, illustrati nella tabella seguente.

Control Application	Recommended Control Mode ^a
Space Temperature	P, PID
Mixed Air Temperature	PI, EPID
Coil Discharge Temperature	PI, EPID
Chiller Discharge Temperature	PI, EPID
Hot Water Converter Discharge Temperature	PI, EPID
Airflow	PI Use a wide proportional band and a fast reset rate. For some applications, PID may be required.
Fan Static Pressure	PI, EPID
Humidity	P, or if very tight control is required, PI
Dewpoint Temperature	P, or if very tight control is required, PI

^a PID, EPID control is used in digital systems.

Figura 65. Applicazioni di controllo e modalità di controllo raccomandate per ogni applicazione

I criteri di progetto di un Sistema HVAC definiscono temperature e umidità relativa in base alla stagione, come segue:

Design values	Winter period	Summer period	Tolerances
Indoor air temperature [°C]	18-20°C	24-26°C	±1°C
Indoor air relative humidity (RH)	45-55%	40-60%	±5%

Ai fini del benessere termoigrometrico, i valori di comfort vanno rispettati in ogni ambiente di un edificio residenziale quando occupato da utenti; i componenti del sistema HVAC sono controllati al fine di raggiungere e mantenere tali condizioni.

5.5 *Sensori e controlli per i sistemi HVAC*

5.5.1 *Sensori di temperatura*

Poiché la temperatura è uno dei principali parametri da rispettare, i sistemi HVAC comprendono numerosi sensori di temperatura. Sono sempre presenti all'interno dei locali; tali sensori forniscono la prima indicazione di malfunzionamento del sistema. Altri sono collocati nell'unità di trattamento aria (UTA; Air handling unit, AHU), per la protezione dei componenti e l'esercizio ottimale.

5.5.1.1 *Temperatura dell'aria esterna*

I sensori di temperatura dell'aria esterna (Outside air temperature, OAT) sono collocati esternamente alla UTA e misurano la temperatura dell'aria esterna, variabile che controlla la portata di acqua calda o fredda da fornire alle batterie di scambio termico.

5.5.1.2 *Temperatura dell'aria di ritorno*

L'aria di ritorno (Return air, RA) è fondamentale nei sistemi HVAC, in quanto viene miscelata con l'aria esterna. In base alla temperatura dell'aria di ritorno, il sistema di controllo regola la miscelazione.

5.5.1.3 *Termostato antigelo*

I termostati antigelo servono a evitare il congelamento degli scambiatori di calore quando, in inverno, l'aria esterna scende sotto 0°C. Nella UTA, una batteria di preriscaldamento innalza la temperatura dell'aria per portarla alla temperatura dell'imbocco dell'umidificatore; se il preriscaldamento non dovesse essere in funzione, l'aria fredda investirebbe la batteria di raffreddamento e l'umidificatore causando il congelamento.

Il termostato antigelo, impostato a 4-5°C, è collocato a valle della batteria di preriscaldamento; al rilevamento di una temperatura al di sotto di detto set point, disattiva il ventilatore e chiudendo la serranda aria esterna, escludendo l'aria esterna dalla UTA. Il termostato in questione deve essere opportunamente schermato dalla batteria di preriscaldamento, al fine di ottenere una corretta misura. Qualora il circuito acqua a servizio delle batterie e dell'umidificatore fosse stato un circuito aperto, una soluzione sarebbe stata l'attivazione di pompe di circolazione; cosa che in realtà è inefficace trattandosi di un circuito chiuso.

5.5.1.4 *Temperatura di punto fisso*

Un sensore di temperatura è collocato a valle del separatore di gocce dell'umidificatore. Il termostato è impostato al valore di punto fisso. Tale valore è l'input della regolazione della batteria di preriscaldamento (in inverno) o di raffreddamento (in estate). Se la temperatura misurata è al di sotto o al di sopra di tale valore, il controllore comanda un attuatore per aumentare o ridurre la portata d'acqua nella batteria di preriscaldamento.

5.5.1.5 *Temperatura ambiente*

Tale sensore è il più importante nei sistemi HVAC, essendo l'indicatore principale delle condizioni a cui sono sottoposti gli utenti.

Per raggiungere la temperatura ambiente di progetto, possono essere usati vari tipi di controllori, a seconda del sistema HVAC in uso.

Nei sistemi a tutt'aria a volume costante (All-air constant air volume, CAV), la temperatura ambiente è regolata tramite la portata d'acqua alle batterie della UTA. Il termostato ambiente misura la temperatura,

la confronta col set point e regola la portata d'acqua alle batterie di conseguenza. Alternativamente si può agire sulla serranda di ricircolo, se prevista

Nei sistemi a tutt'aria a volume variabile (All-air variable air volume, VAV) la temperatura ambiente è regolata tramite la portata d'aria immessa negli ambienti. Il termostato comanda gli attuatori delle serrande di zona, variando la portata d'aria agli ambienti. In questi sistemi il controllo è solitamente individuale per ogni locale, talché ogni locale è usualmente dotata di sensori o termostati.

Nei sistemi ad aria primaria e fan coil,) la temperatura ambiente è regolata tramite la portata d'acqua alle batterie dei fan coil. I termostati ambiente inviano la temperatura rilevata a un controllore, il quale regola la portata d'acqua alle batterie dei fan coil. La regolazione tramite valvole è differente a seconda della configurazione dei fan coil, come illustrato di seguito.

Nei fan coil a due tubi, c'è una sola batteria, commutate in modalità estiva o invernale. Una valvola a tre vie di bypass (quindi installata sul tubo di ritorno, per evitare perdite di carico sulla mandata). Il termostato ambiente controlla la valvola talché l'acqua affluisce alla batteria o è ricircolata.

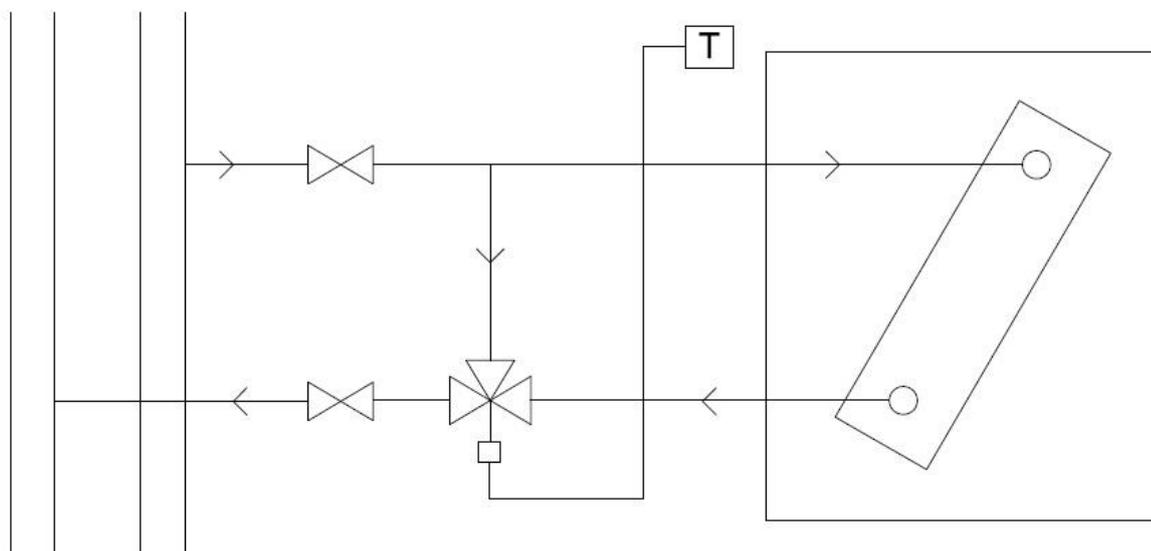


Figura 66. Configurazione di fan coil a due tubi

Nei fan coil a quattor tubi, ci sono due batterie, dedicate rispettivamente al condizionamento invernale e a quello estivo. Il funzionamento è lo stesso del fan coil a due tubi, senonché le due batterie sono distinte. Le batterie non possono però operare in contemporanea. Tale soluzione è più costosa, tuttavia si previene lo stress termico dovuto alla commutazione tra acqua calda e fredda.

In four-pipe fan coil units, there are two batteries dedicated respectively at winter conditioning and summer conditioning. The functioning is the same as two-pipe FCU, with the difference that hot and cold coils are separated devices. The batteries must not operate at the same time. With respect to the three-pipe FCU, this solution is more expensive because of the presence of one additional pipe and an additional battery inside the fan coil. Nevertheless, four-pipe systems have not the thermal stress from switching the batteries from hot/cold water supply.

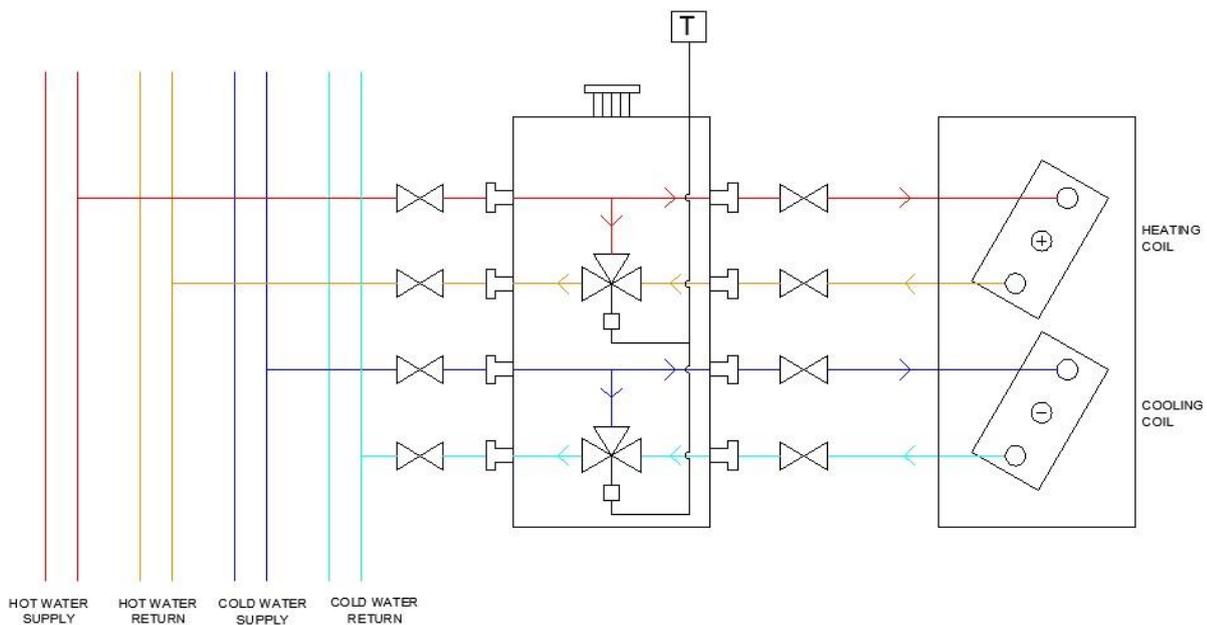


Figura 67. Configurazione di fan coil a quattro tubi

Un metodo ulteriore di regolazione della temperatura ambiente consiste nella variazione della ventola dei fan coil. Il termostato agisce sulla velocità (giri al minuto) della ventola.

5.5.1.6 Temperature dell'acqua di mandata ai fan coil

La temperatura dell'acqua di mandata ai fan coil varia in base alla domanda nei locali condizionati. La temperatura dell'acqua di alimentazione risulta dalla combinazione tra l'acqua calda proveniente dalla caldaia centrale e l'acqua fredda proveniente dal gruppo frigorifero centrale. Il sistema di approvvigionamento idrico è a circuito chiuso ed è composto da una portata d'acqua primaria più una portata d'acqua secondaria. La portata d'acqua primaria proviene direttamente dalla caldaia e dal gruppo frigorifero, dopo una adeguata miscelazione. La portata d'acqua secondaria è composta da acqua di ritorno del fan coil, eventualmente miscelata con acqua spillata dal circuito primario.

A seconda dell'esercizio del condizionamento, la temperatura media del collettore viene impostata su un valore specifico desiderato. Questo valore di temperatura viene utilizzato per controllare la posizione della valvola a tre vie, al fine di miscelare adeguate quantità di acqua primaria e acqua di ritorno.

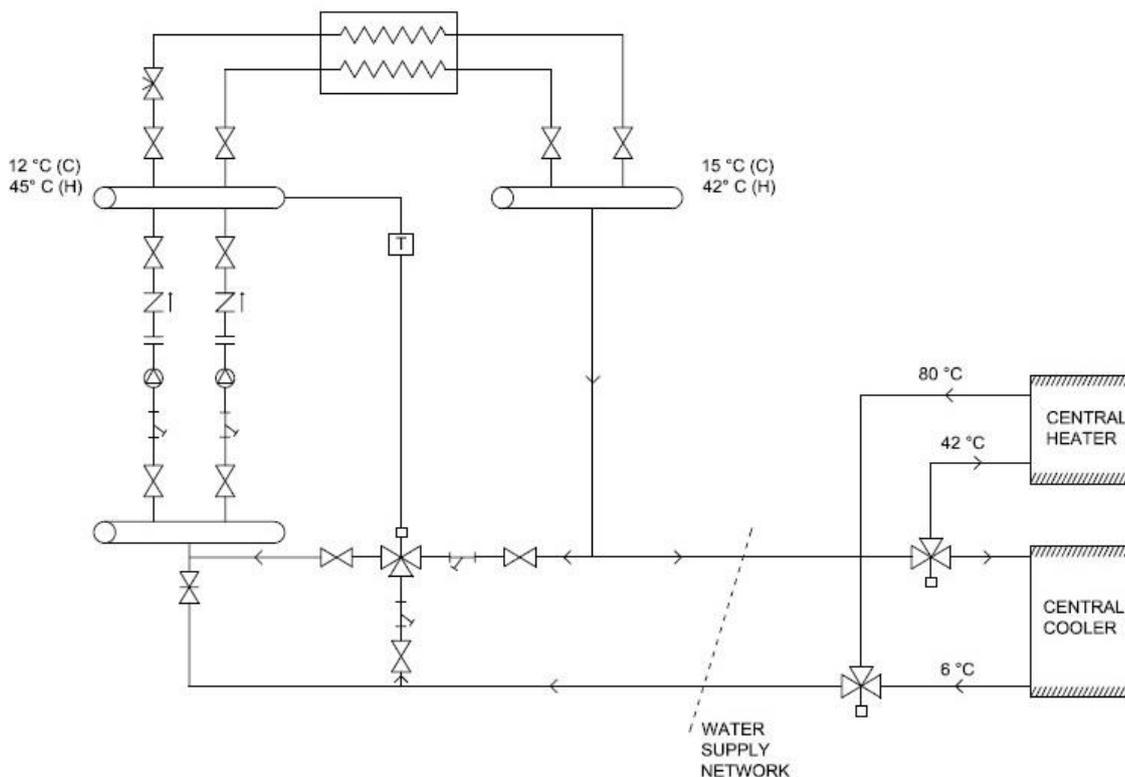


Figura 68. Temperature water supply to a fan coil unit

5.5.2 Sensori di pressione

I sensori di pressione sono cruciali ai fini delle perdite di carico nel sistema. La pressione è una variabile controllata tipica per i loop di controllo che agiscono sulle serrande e sulle valvole.

5.5.2.1 Sensori di pressione differenziale delle serrande

I Sensori di pressione differenziale controllano il grado di apertura delle serrande. Se il sensore rileva una perdita di carico anomala a valle della serranda, significa che questa è soggetta a sporcamento ed è quindi richiesta manutenzione.

Al fine di evitare malfunzionamenti imputabili alle perdite di carico (e.g. pressione dell'aria insufficiente a raggiungere i locali) il controllore interviene in apertura sulle serrante. Anche se una serranda è completamente aperta, può avvenire che la perdita di carico rimanga importante. La resistenza opposta da una serranda completamente aperta è espressa in percentuale alla resistenza dell'intero sistema ed è denominata autorità o caratteristica della serranda.

5.5.2.2 Sensori di pressione differenziale per filtri

I Sensori di pressione differenziale per filtri servono a scopo di manutenzione. Se il sensore rileva una perdita di carico eccessiva a valle di un filtro, è necessaria manutenzione causa sporcamento. La pulizia dei filtri è essenziale sia per ragioni di risparmio energetico (E quindi economico), sia per ragioni di garanzia della qualità dell'aria interna.

5.5.2.3 Sensori di pressione differenziale per ventilatori

Anche in questo caso, il sensore indica l'eventuale necessità di manutenzione.

5.5.2.4 Sensori di pressione differenziale per i locali

I locali serviti da sistemi HVAC sono mantenti a livelli di pressione diversi, così da favorire l'efflusso dell'aria dalle zone occupate alle zone da cui l'aria è aspirata (e.g. servizi igienici). I sensori di pressione differenziale dei locali verificano che sussista la sovrappressione di progetto.

5.5.2.5 Sensori di pressione differenziale per liquidi per i componenti idrici

Tali sensori sono installati lungo il circuito idrico. Il loro scopo è monitorare il differenziale di pressione di pompe, filtri, refrigeratori, caldaie, scambiatori di calore etc., facenti parte del circuito idrico.

5.5.2.6 Sensori di pressione differenziale per pompe

Tali sensori sono installati a intervalli lungo il circuito idrico e sono essenziali al fine di individuare eventuali perdite od ostruzioni.

5.5.2.7 Sensori di pressione dei condotti

È essenziale monitorare la pressione all'interno dei condotti di mandata e ritorno dell'aria, al fine di garantire che l'aria sia correttamente distribuita nelle zone condizionate con una sufficiente sovrappressione.

L'aumento delle perdite di carico può essere sintomo di perdite, dovute a imperfetta sigillatura dei condotti. Le problematiche derivanti sono una insufficiente affluenza d'aria nei locali, con conseguente discomfort, e un aumento dei consumi energetici per mantenere una corretta ventilazione.

5.5.3 Sensori di portata

5.5.3.1 Sensori di portata per le tubazioni idriche

I sensori di portata a pressione differenziale misurano la portata di fluido in una tubazione, in base al principio di Bernulli.

5.5.3.2 Sensori di portata d'aria

Tali sensori misurano la portata d'aria all'interno di un condotto. Una eventuale riduzione di portata può essere sintomatica di una perdita, e.g. a causa, come detto, di imperfetta sigillatura, che si ripercuote sull'afflusso d'aria e sui consumi per ventilazione.

5.5.4 Humidity sensors

L'umidità relativa (Relative humidity, RH) interna è un parametron fondamentale, assieme alla temperatura, per il controllo del sistema HVAC. In ogni locale è installato un sensore di umidità relativa. Qualora il valore misurato non corrisponda al set point, viene regolato l'umidificatore nella UTA, variando la quantità di vapore o di acqua liquida (a seconda del tipo di umidificatore) immessi nell'aria primaria.

5.5.5 Altri sensori ambiente

Vengono infine illustrati ulteriori utili sensori ambiente.

5.5.5.1 Sensore di occupazione

I sensori di occupazione sono molto utili in edifici con sistemi domotici, specialmente nel caso di installazione di sistemi HVAC zonizzati a livello di stanze. Sistemi di controllo intelligenti sono in grado di disattivare il condizionamento a servizio di una stanza nel caso in cui non sia occupata. Se non disattivato del tutto, il sistema HVAC può essere programmato di modo da mantenere una temperatura minima di stand-by in una stanza vuota, fino al momento di cui c'è nuovamente presenza, così da facilitare la riattivazione del condizionamento come tempistica e come prestazione energetica.

In sistemi avanzati, le rilevazioni dei sensori di occupazione vanno a operare sulla mandata d'acqua ai fan coil, sulle serrande e sui ventilatori.

5.5.5.2 Sensori di qualità dell'aria interna

I sensori di qualità dell'aria interna (Indoor air quality, IAQ) possono rilevare la concentrazione di CO₂ e la presenza di fumi, odori, inquinanti esterni, composti organici volatili (Volatile organic compounds, VOCs). Le rilevazioni intervengono sulla mandata d'aria ai locali. Se presente un sistema di ricircolo, il quantitativo di aria ricircolata può essere regolato a seconda della quantità di aria esterna richiesta ai fini della qualità dell'aria interna. Se invece il ricircolo è assente, è necessario aumentare la quantità di aria prelevata. Una cattiva qualità dell'aria è però anche imputabile al malfunzionamento dei filtri; in tal caso i sensori in questione risultano utili ai fini della manutenzione.

5.5.5.3 Sensori di velocità dell'aria

La velocità dell'aria negli spazi con presenza di persone deve essere controllata al fine di non causare discomfort. Un sensore di velocità dell'aria è installato presso gli elementi terminali di erogazione nei locali. Se la velocità risulta eccessiva, si agisce sulla velocità dei ventilatori.

5.6 Introduzione ai Building Automation Control System (BACS)

Il controllo dei sistemi HVAC è essenziale negli edifici residenziali e commerciali per garantire il comfort degli utenti e la prestazione energetica. La domotica, o building automation, rappresenta uno strumento molto utile per l'efficientamento di impianti e sistemi.

I sistemi detti Building Automation and Control System (BACS) costituiscono l'infrastruttura che permette agli utenti di gestire e controllare un edificio utilizzando strumenti altamente tecnologici, al fine di conseguire obiettivi in termini di sicurezza, comfort, manutenzione, efficienza e risparmio energetico. I sistemi in questione sono anche chiamati Building Management System (BMS), Building Control System (BCS) o Building Automation System (BAS). Nel seguito si userà il termine BACS in quanto è quello riconosciuto come standard dalla normativa EN ISO 16484-2:2004 Building automation and control systems (BACS) -- Part 2: Hardware, 3.31.

Una rete intelligente, che connetta sensori avanzati (smart meter), è in grado di monitorare differenti sistemi e impianti nell'edificio ed esercirli in maniera coordinata. Esempi di tali sistemi possono essere impianto HVAC, impianto elettrico, illuminazione, impianto di sicurezza, impianto antincendio. L'interconnessione della rete è costituita da bus primari e secondari. I bus sono costituiti da dispositivi hardware, sistemi software e dall'interconnessione stessa. Uno schema generale di un BACS è il seguente.

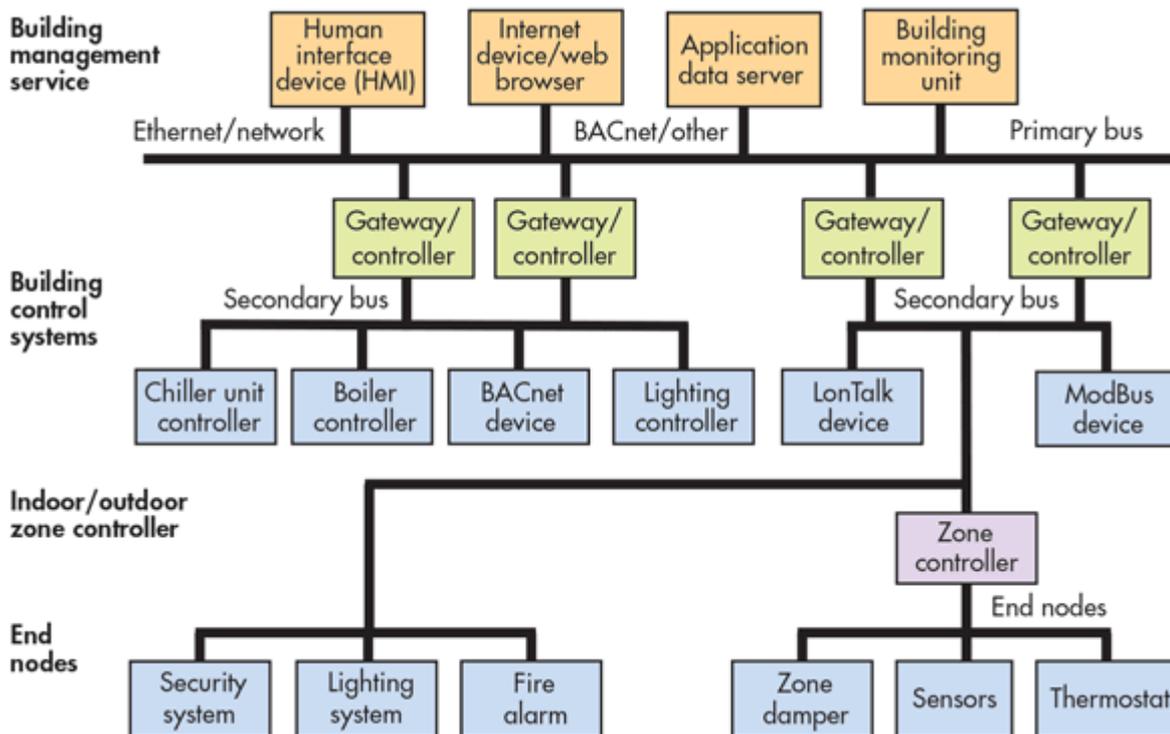


Figura 69. Esempio di struttura di un BACS

I nodi finali (end nodes) sono una parte cruciale di qualsiasi sistema BACS; questo perché un controllo efficace non può ovviamente fare a meno di sensori e misuratori. L'esigenza fondamentale è conoscere l'esatto stato del sistema, attraverso quanti più indicatori possibile, poiché ciò che è non è conosciuto non può essere controllato. A seconda del dispositivo oggetto di regolazione, è necessario utilizzare sensori e misuratori appropriati.

I nodi finali possono essere organizzati in zone soggette a un controller di zona. Le zone possono essere divise in base al loro posizionamento spaziale o raggruppando i sensori utilizzati per la stessa funzione.

I sistemi BACS hanno la funzione di controllare tutti gli attuatori, i sensori e i controllori all'interno dell'edificio. I controller agiscono direttamente sui dispositivi, regolando le azioni in base ai processi del sistema di controllo. I gateway hanno la funzione di interconnettere i controllori con la gestione dell'edificio. I segnali sono bidirezionali: i servizi di gestione degli edifici, quali l'interfaccia uomo-macchina (HMI), i dispositivi connessi a internet e i browser web consentono agli utenti di impostare i parametri desiderati per il sistema e inviare comandi ai controllori. I controllori, da parte loro, inviano messaggi al server dati delle applicazioni e all'unità di monitoraggio dell'edificio per comunicare lo stato delle variabili controllate.

La gestione dell'edificio comprende tutti quei componenti che consentono agli utenti di monitorare il sistema, modificare manualmente lo stato desiderato, pianificare le operazioni, ricevere avvisi di malfunzionamento e manutenzione. I dispositivi HMI costituiscono la parte tramite cui gli esseri umani possono interagire con il sistema e impostare lo stato desiderato dell'edificio, di solito tramite PC, tablet o smartphone.

Come mostrato nell'esempio di architettura del sistema, il BACS può essere composto da controllori che utilizzano protocolli di rete diversi tra loro. Ogni dispositivo è collegato al gateway corrispondente e invia un messaggio in base al proprio protocollo di rete. Le comunicazioni attraverso il bus secondario possono utilizzare protocolli differenti. I gateway sono quindi incaricati di convertire i dati in un unico standard che può essere utilizzato da HMI, applicazioni Web, server dati delle applicazioni o unità di monitoraggio degli edifici. I gateway possono infatti essere considerati come interfacce tra i nodi finali e il software di gestione, ma anche tra i dispositivi che utilizzano protocolli di comunicazione diversi.

Sul mercato sono disponibili numerosi protocolli di comunicazione per l'automazione degli edifici e i sistemi di controllo. I più significativi sono:

- BACnet, impiegato per sistemi BACS con molteplici dispositivi.
- LonWorks, impiegato per sistemi a bassa larghezza di banda via power line, fibre ottiche etc.
- Modbus, impiegato tipicamente nell'automazione industrial.
- Konnex, impiegato tipicamente nell'automazione residenziale e commerciale.

5.7 Communication protocols

5.7.1 Il protocollo BACnet

BACnet è uno standard creato dalla ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) nel 1987. La denominazione originaria era "Energy Monitoring Control Systems Message Protocol", poi modificata nel 1990 in BACnet col significato di "Building Automation and Control networking". I sistemi BACnet comprendono software, dispositivi e interface LAN che implementano un DDC (Direct Digital Control) centralizzato di tutti i sistemi nell'edificio. L'architettura tipica è illustrata di seguito.

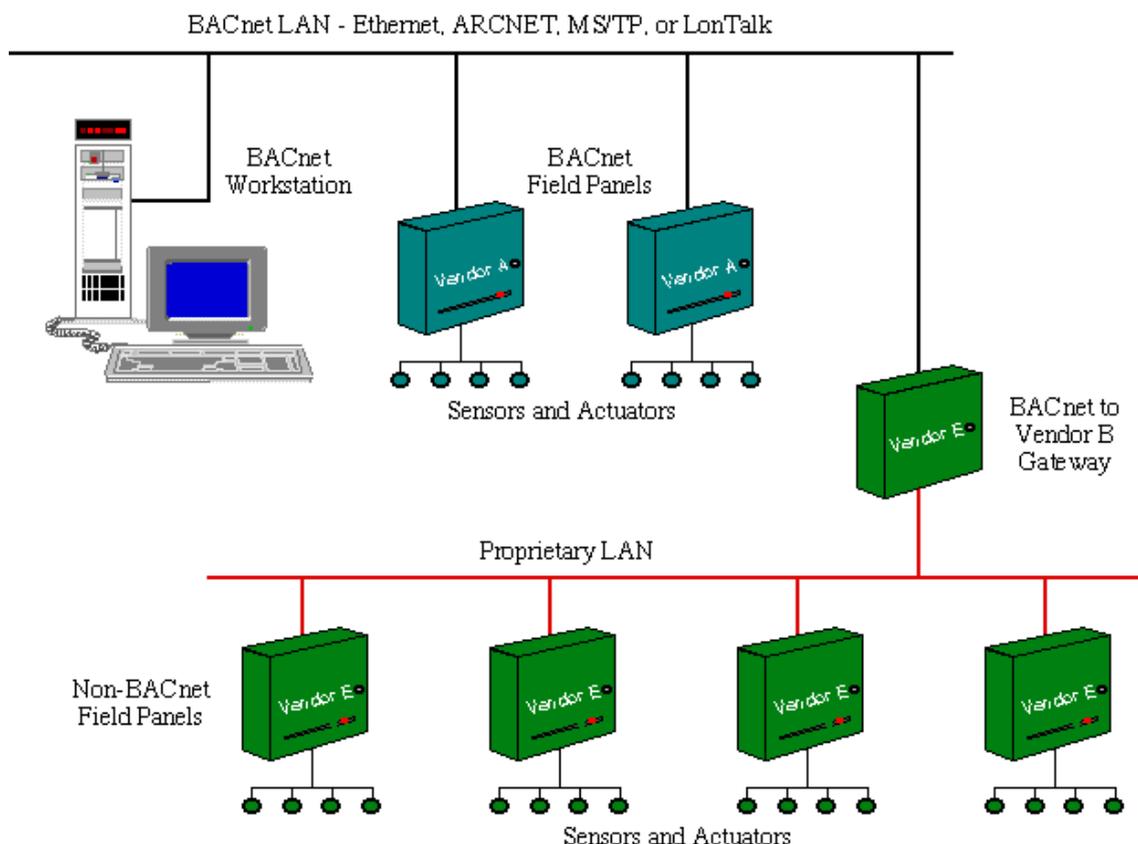


Figura 70. Architettura BACnet

Anche nel caso di rete BACnet si possono utilizzare dispositivi che comunicano attraverso diversi protocolli di comunicazione (non-BACnet). In tal caso, come detto precedentemente, devono essere installati dei gateway.

BACnet è improntato alla programmazione a oggetti ("object oriented programming"). Un "oggetto" è un set di informazioni che definisce proprietà associate a uno specifico dispositivo BACS. Il numero di tipi di oggetti è passato da 18 agli inizi fino agli attuali 54.

Basic Device Object Types Device Analog Input Analog Output Analog Value Binary Input Binary Output Binary Value Multi-state Input Multi-state Output Multi-state Value File	Logging Object Types Event Log Trend Log Trend Log Multiple
Process-related Object Types Averaging Loop Program	Life Safety and Security Object Types Life Safety Point Life Safety Zone Network Security
Control-related Object Types Command Load Control	Physical Access Control Object Types Access Zone Access Point Access Door Access User Access Rights Access Credential Credential Data Input
Meter-related Object Types Accumulator Pulse Converter	Simple Value Object Types CharacterString Value DateTime Value Large Analog Value BitString Value OctetString Value Time Value Integer Value Positive Integer Value Date Value DateTime Pattern Value Time Pattern Value Date Pattern Value
Presentation-related Object Types Group Global Group Structured View	Lighting Control Object Types Channel Lighting Output
Schedule-related Object Types Calendar Schedule	
Notification-related Object Types Event Enrollment Notification Class Notification Forwarder Alert Enrollment	

Figura 71. Tipologie di oggetti BACnet

I dispositivi BACnet comunicano l'un l'altro mediante un meccanismo di tipo client-server. I dispositivi inviano al server delle richieste (server request) e il server invia le risposte (service response). Le informazioni scambiate possono essere file dati, allarmi, segnali orari per sincronizzazione etc. esistono 38 tipi di servizi all'interno del protocollo BACnet.

Service Class	Purpose	Number of Services
Alarm and Event	Services used to manage communication related to alarms and events.	11
File Access	Services used to access and manipulate files.	2
Object Access	Services used to access and manipulate the properties of BACnet objects.	10
Remote Device Management	Services used for a variety of miscellaneous, but important, functions such as time synchronization, starting and stopping communication, reinitializing processes, transferring proprietary messages and dynamic binding.	12
Virtual Terminal	Services that are now rarely used because of the advent of the web. These services provided for the establishment of the "bidirectional exchange of character-oriented data," according to the standard, for use by an operator interface program.	3

Figura 72. Servizi BACnet

Alarm and Event Services	ReadRange
AcknowledgeAlarm	WriteProperty
ConfirmedCOVNotification	WritePropertyMultiple
UnconfirmedCOVNotification	WriteGroup
ConfirmedEventNotification	
UnconfirmedEventNotification	Remote Device Management Services
GetAlarmSummary	DeviceCommunicationControl
GetEnrollmentSummary	ConfirmedPrivateTransfer
GetEventInformation	UnconfirmedPrivateTransfer
LifeSafetyOperation	ReinitializeDevice
SubscribeCOV	ConfirmedTextMessage
SubscribeCOVProperty	UnconfirmedTextMessage
	TimeSynchronization
File Access Services	UTCTimeSynchronization
AtomicReadFile	Who-Has
AtomicWriteFile	I-Have
	Who-Is
Object Access Services	I-Am
AddListElement	
RemoveListElement	Virtual Terminal Services
CreateObject	VT-Open
DeleteObject	VT-Close
ReadProperty	VT-Data
ReadPropertyMultiple	

Figura 73. Servizi BACnet

5.7.2 Protocollo KNX

KNX, abbreviazione di Konnex, è uno standard di building automation impiegato principalmente nelle applicazioni residenziali e commerciali. Nel 1999 la Konnex Association ha sviluppato la tecnologia KNX a partire da protocolli preesistenti: European Installation Bus (EIB), European Home Systems (EHS) and BatiBUS. Successivamente KNX è divenuto uno standard approvato in Europa e America.

Può essere configurato in due modalità:

- S-Mode (System Mode): modalità professionale, usata da professionisti certificate tramite il software ETS® Professional;
- E-Mode (Easy Mode): modalità facilitate, attraverso dispositivi pre-programmati con parametri preimpostati.

I messaggi KNX possono viaggiare sui seguenti mezzi di comunicazione:

- TP (twisted pair ossia doppino intrecciato)
- PL (Powerline ossia circuito di potenza)
- RF (Radiofrequenza)
- IP (Ethernet/WiFi)

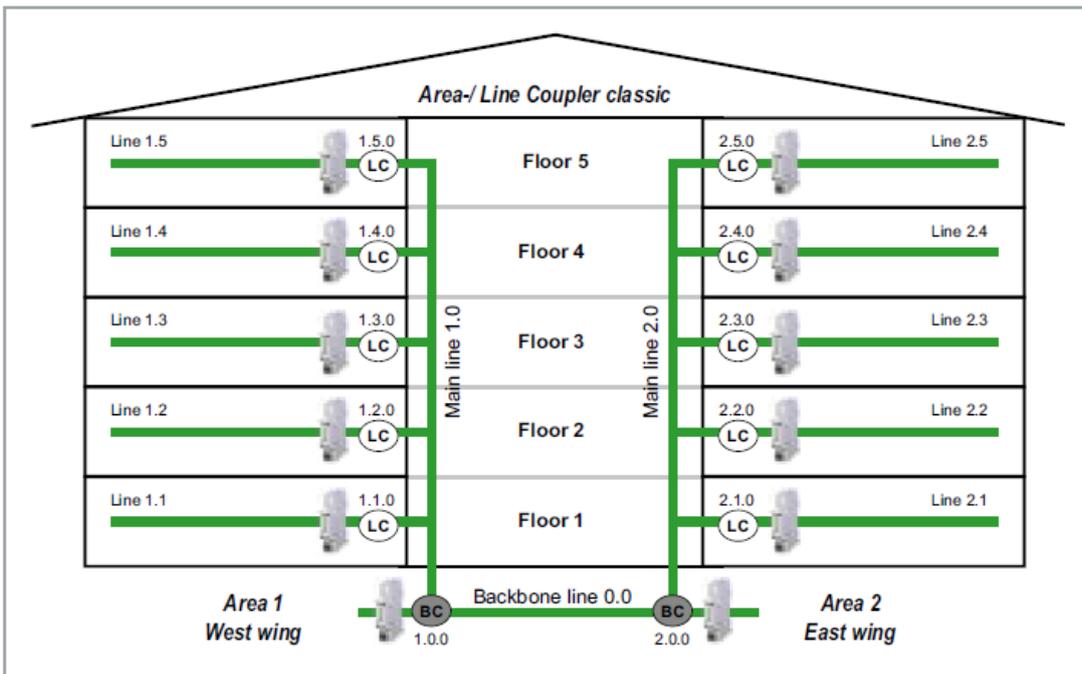


Figura 74. Topologia KNX basata su doppino

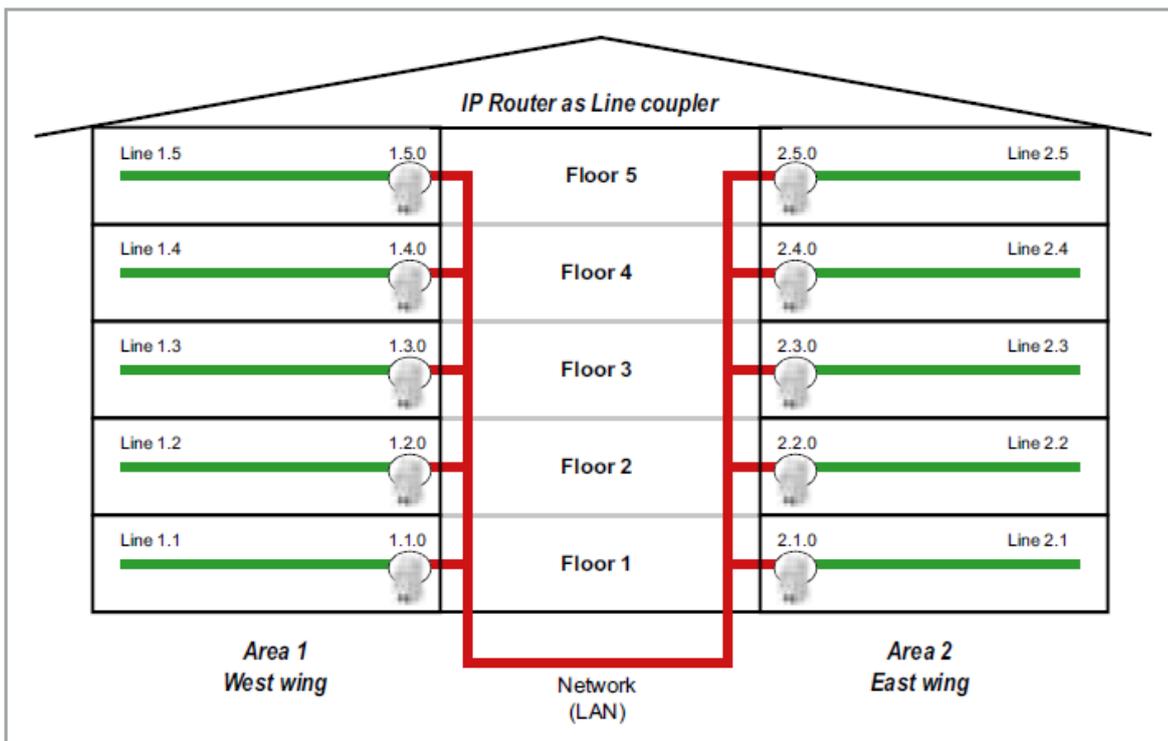


Figura 75. Topologia KNX basata su protocollo IP

Gli elementi necessari all'implementazione di una rete KNX sono i seguenti.

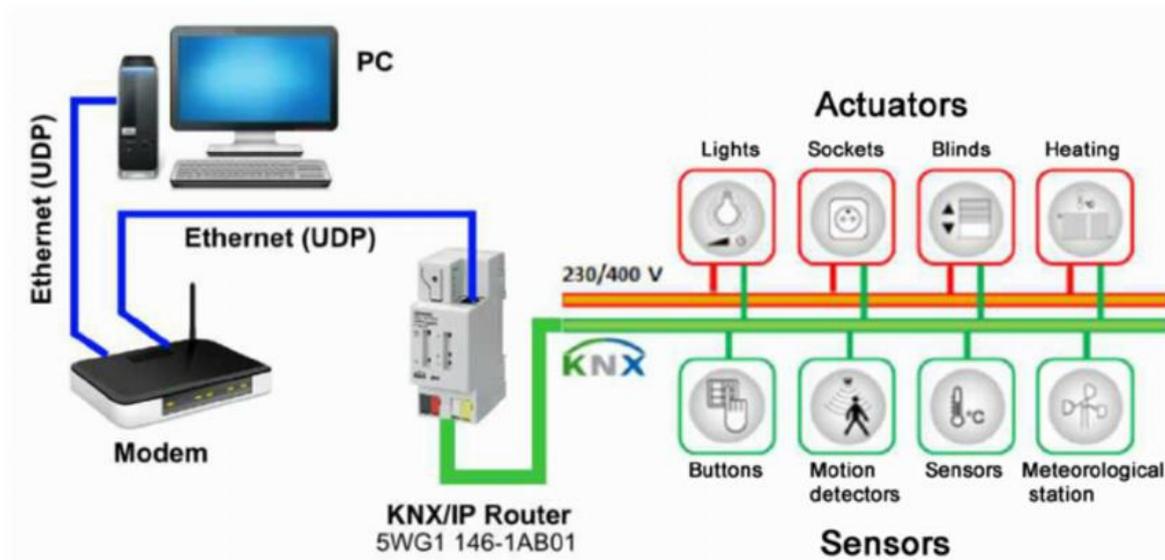


Figura 76. Schema di architettura di Sistema KNX

Come detto e come anche per BACnet, anche in KNX possono essere usati dispositivi basati su protocolli differenti, ricorrendo a gateway. Sono ad esempio disponibili gateway per la comunicazione tra KNX e BACnet, oppure tra KNX e DALI (uno standard molto importante nel campo dell'illuminazione).

La differenza principale tra BACnet e KNX è che in BACnet l'intelligenza del sistema è centralizzata mentre in KNX è distribuita tra i vari componenti.

I dispositivi possono essere suddivisi i:

- Dispositivi di sistema (interfacce, alimentatori etc.);
- Sensori;
- Attuatori.

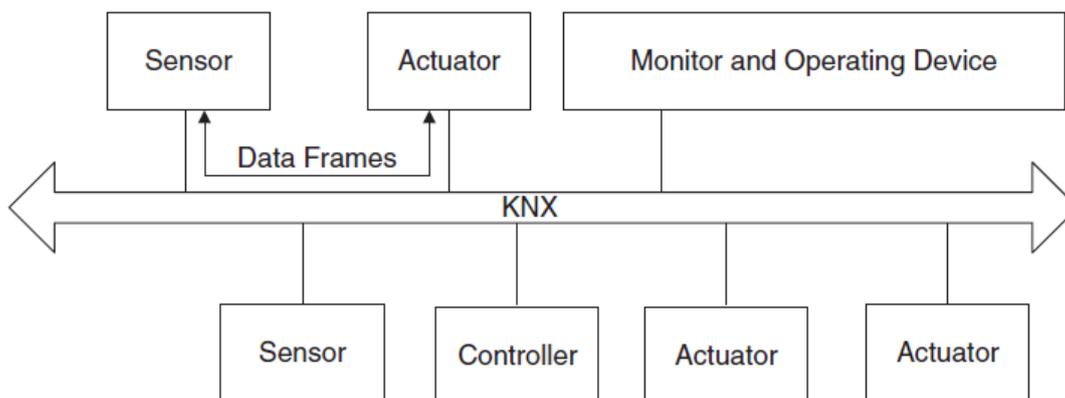


Figura 77. Esempio di dispositivi KNX e loro connessione

I sensori hanno il compito di rilevare eventi e variazioni di determinate variabili. I dati sono convertiti in telegrammi e tali pacchetti di dati sono inviati via la rete bus. Gli attuatori, invece, ricevono i messaggi, li decodificano e li convertono in comandi a organi di regolazione.

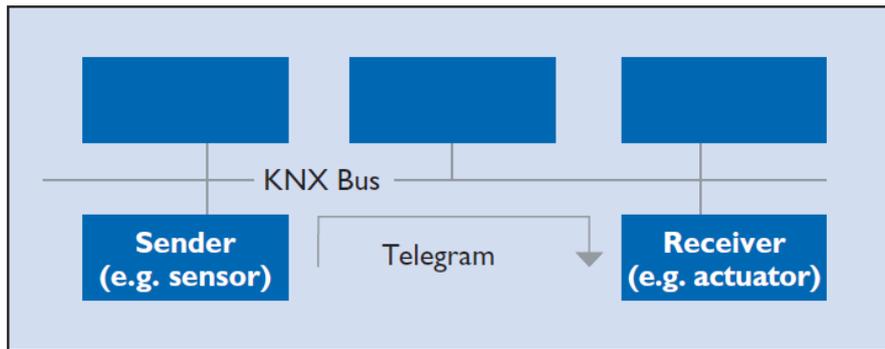


Figura 78. Schema di comunicazione tra sensori e attuatori in KNX.

5.8 Sistemi Supervisory Control & Data Acquisition (SCADA)

L'acronimo SCADA, col significato di "Supervisory Control and Data Acquisition", contraddistingue quei sistemi che raccolgono e processano tutte le informazioni provenienti dai sensori al fine di esercire un sistema e descriverne lo stato a un operatore. I componenti tipici di un sistema SCADA sono:

- Una HMI (human-machine interface, interfaccia uomo-macchina), che consente a un operatore di interagire con il sistema di controllo;
- Un computer che acquisisce i dati e comanda gli attuatori;
- Unità terminali remote (RTU, remote terminal units) che trasmettono i dati dai sensori ai sistemi di spervisione;
- Programmable logic controller (PLC) connessi ai dispositivi;
- Un'infrastruttura o rete di comunicazione.

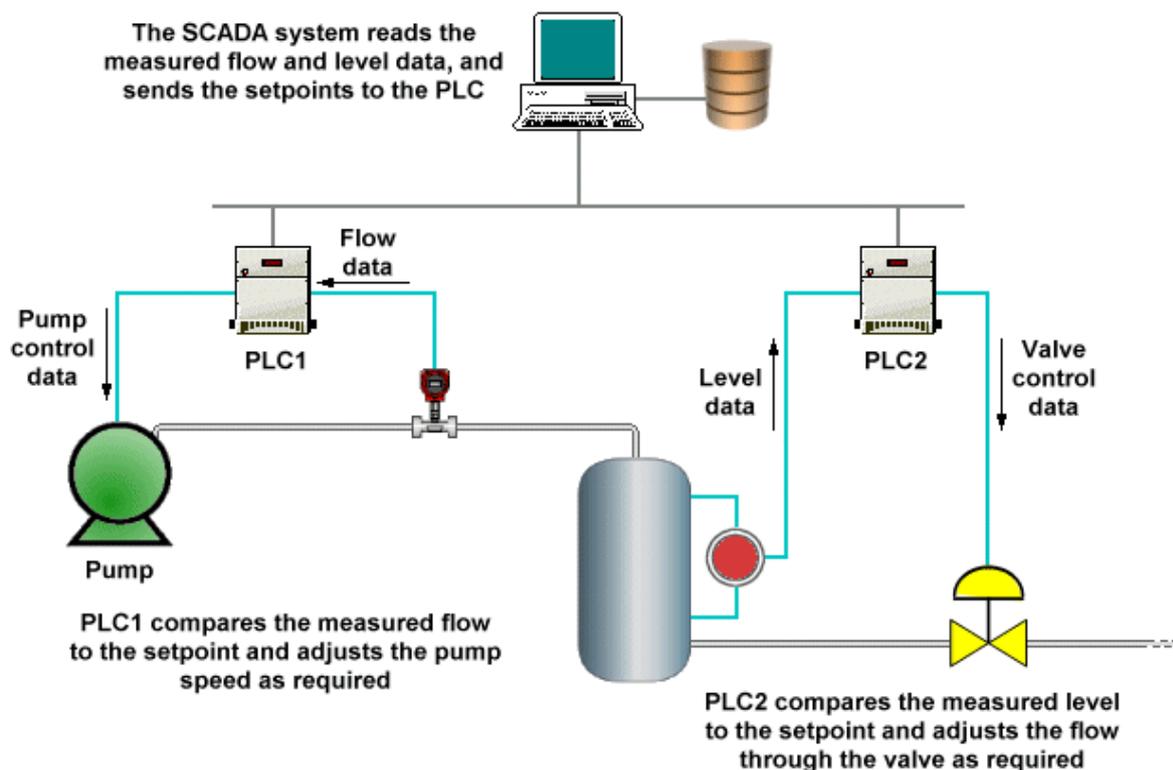


Figura 79. Esempio di Sistema SCADA

I sistemi SCADA possono essere usati non solo per il controllo in tempo reale di un Sistema, ma anche per l'archiviazione di dati storici. Ciò è di particolare importanza al fine di analizzare il funzionamento del sistema e programmarne la manutenzione.

5.9 Interfaccia uomo-macchina (HMI)

L'interfaccia uomo-macchina è un componente essenziale di un Sistema SCADA, in quanto consente agli utenti di interagire con il Sistema di controllo. L'interfaccia deve poter essere il più possibile user-friendly e interattiva, al fine di semplificarne l'utilizzo. Essa mostra lo stato del sistema in tempo reale in un approccio grafico, evidenziando lo stato delle variabili misurate nel sistema.

La complessità dell'interfaccia varia a seconda del campo di applicazione. In campo industriale può essere solitamente meno intuitiva e graficamente gradevole ma rappresenta in modo funzionale sistemi complessi; sono tipicamente adoperate da operatori addetti alla manutenzione.

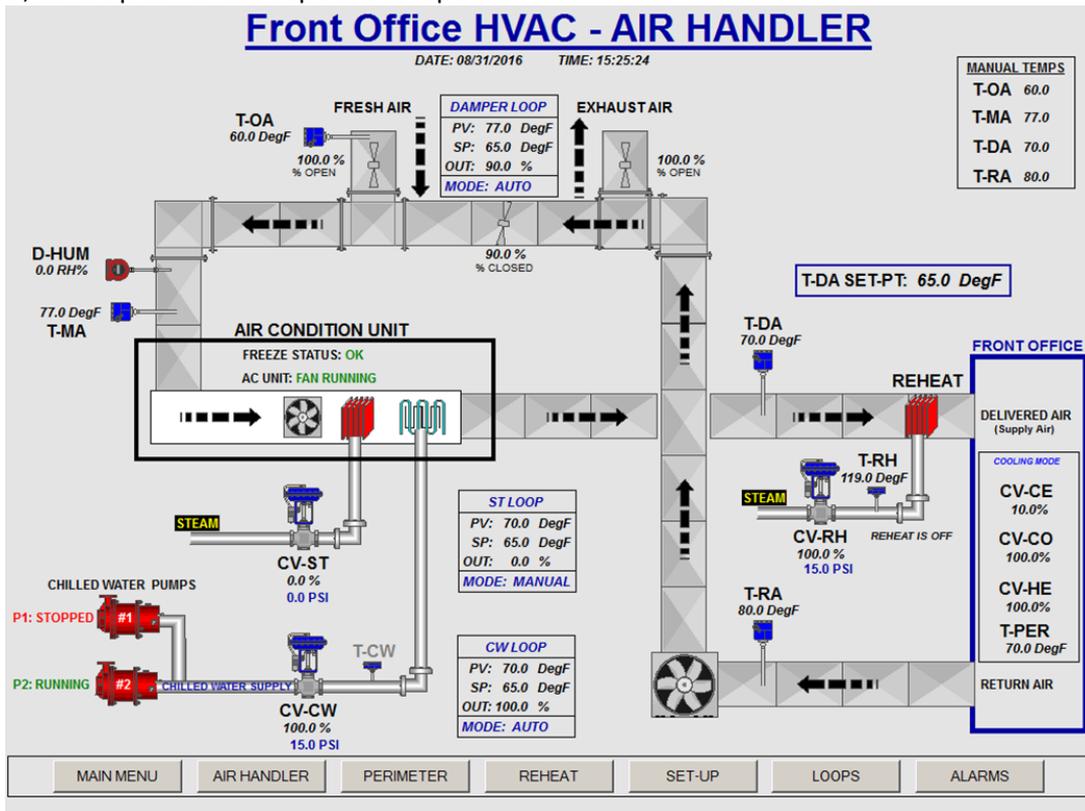


Figura 80. Esempio di HMI per operatori

Le interfacce per utenti residenziali sono spesso disponibili per tablet o smartphone, al fine di consentire all'utente di gestire il proprio sistema di automazione e impostare i propri parametri.



Figura 81. Example of HMI for home automation

6 Impatto della building automatio nella prestazione energetica degli edifici

Come si evince da quanto esposto in precedenza, la prestazione energetica degli edifici è uno degli elementi chiave per il contenimento dei consumi energetici. la regolamentazione di questi ultimi attraverso delle politiche energetiche è sempre stata tra le attività della Commissione Europea.

Il Manifesto europeo sull'energia afferma che "l'Unione Europea ha i poteri e gli strumenti necessari per implementare politiche energetiche rivolte all'assicurarsi le forniture energetiche, garantire che i prezzi non compromettano la competitività europea, proteggere l'ambiente in particolare contrastando i cambiamenti climatici e migliorare le reti energetiche; i Paesi membri hanno facoltà di sviluppare liberamente le risorse energetiche che ritengono, purché tengano conto degli obiettivi europei in materia di energie rinnovabili".

Europe's goals

The European Union has the powers and instruments that it needs to implement an energy policy geared towards:

- *securing Europe's energy supplies;*
- *ensuring that energy prices do not make Europe less competitive;*
- *protecting the environment and in particular combating climate change;*
- *improving energy grids.*

EU countries are free to develop whichever energy sources they want. They must, however, take account of European renewable energy objectives.

Figura 82. Estratto dal Manifesto europeo sull'energia

Gli intenti dell’Unione Europea si esprimono principalmente in due direttive:

- “Energy Performance of Buildings Directive (EPBD): Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings”;
- “Energy Efficiency Directive: Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012 on energy efficiency”, che modifica le Direttive 2009/125/EC e 2010/30/EU e abroga le Direttive 2004/8/EC e 2006/32/EC.

Obiettivo di tali direttive è migliorare la prestazione energetica degli edifici all’interno dei Paesi UE. Le direttive devono essere recepite dagli Stati membri mediante opportune leggi nazionali. La legislazione europea che mette in relazione la building automation con l’efficienza energetica è costituita dalla norma EN 15232-1:2017 – “Energy Performance of Buildings - Part 1: Impact of Building Automation, Controls and Building Management - Modules M10-4,5,6,7,8,9,10”.

6.1 EN 15232-1:2017 “Energy performance of buildings - Part 1: Impact of Building Automation, Controls and Building Management - Modules M10-4,5,6,7,8,9,10”

Lo standard europeo in questione specifica:

- Una lista di sistemi di controllo e funzioni di building automation e technical building management che interessano l’efficienza energetica dell’edificio;
- Un metodo per definire i minimi requisiti per i sistemi di controllo;
- Metodi dettagliati per calcolare l’effetto delle funzioni dette su un dato edificio.

Quattro “classi BAC” (da D ad A in ordine crescente di efficienza) vengono definite.

- La Classe D corrisponde ad edifici non efficienti. Ciò include il caso in cui l’edificio sia sprovvisto di sistemi di controllo; può essere il caso di edifici esistenti, ma non di nuovi edifici.
- La Classe C è associata a edifici provvisti di sistemi BACS standard.
- La Classe B è associata ad edifici con sistemi BACS e TMS (Technical Management System).
- La Classe A corrisponde alla massima efficienza raggiungibile e costituisce un miglioramento rispetto alla Classe B.

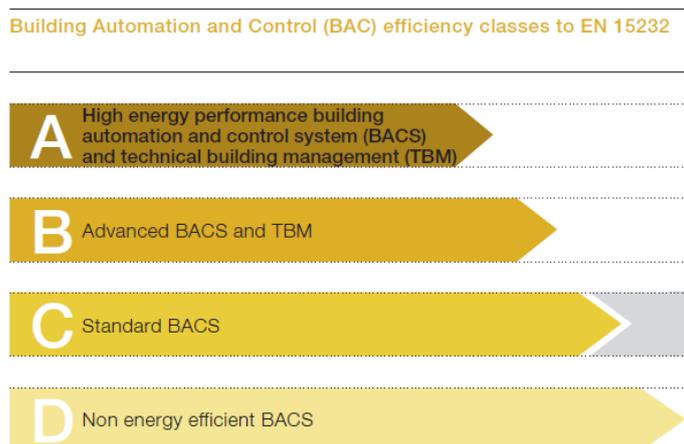


Figura 83. Classi BACS ai sensi della norma EN 15232

Ogni classe è definita da specifici sistemi, funzioni e dispositivi.

	Heating / Cooling control	Ventilation / Air conditioning control	Lighting	Sun protection
A	<ul style="list-style-type: none"> - Individual room control with communication between controllers - Indoor temperature control of distribution network water temperature - Total interlock between heating and cooling control 	<ul style="list-style-type: none"> - Demand or presence dependent air flow control at room level - Variable set point with load dependant compensation of supply temperature control - Room or exhaust or supply air humidity control 	<ul style="list-style-type: none"> - Automatic daylight control - Automatic occupancy detection manual on / auto off - Automatic occupancy detection manual on / dimmed - Automatic occupancy detection auto on / auto off - Automatic occupancy detection auto on / dimmed 	<ul style="list-style-type: none"> - Combined light/blind/ HVAC control
B	<ul style="list-style-type: none"> - Individual room control with communication between controllers - Indoor temperature control of distribution network water temperature - Partial interlock between heating and cooling control (dependent on HVAC system) 	<ul style="list-style-type: none"> - Time dependent air flow control at room level - Variable set point with outdoor temperature compensation of supply temperature control - Room or exhaust or supply air humidity control 	<ul style="list-style-type: none"> - Manual daylight control - Automatic occupancy detection manual on / auto off - Automatic occupancy detection manual on / dimmed - Automatic occupancy detection auto on / auto off - Automatic occupancy detection auto on / dimmed 	<ul style="list-style-type: none"> - Motorized operation with automatic blind control
C	<ul style="list-style-type: none"> - Individual room automatic control by thermostatic valves or electronic controller - Outside temperature compensated control of distribution network water temperature - Partial interlock between heating and cooling control (dependent on HVAC system) 	<ul style="list-style-type: none"> - Time dependent air flow control at room level - Constant set point of supply temperature control - Supply air humidity limitation 	<ul style="list-style-type: none"> - Manual daylight control - Manual on/off switch + additional sweeping extinction signal - Manual on/off switch 	<ul style="list-style-type: none"> - Motorized operation with manual blind control
D	<ul style="list-style-type: none"> - No automatic control - No control of distribution network water temperature - No interlock between heating and cooling control 	<ul style="list-style-type: none"> - No air flow control at room level - No supply temperature control - No air humidity control 	<ul style="list-style-type: none"> - Manual daylight control - Manual on/off switch + additional sweeping extinction signal - Manual on/off switch 	<ul style="list-style-type: none"> - Manual operation for blinds

Figura 84. Definizione delle varie Classi BACS secondo le specifiche caratteristiche

Ai fini della classificazione interessa anche se l'edificio è residenziale o meno.

In base alla norma EN 15232 si passano in rassegna tutti i sistemi oggetto di controllo nel BAS; la norma prescrive i livelli minimi di controllo di ogni funzione di ognuno dei sistemi al fine di stabilire la Classe. Nei paragrafi seguenti si illustrano tali livelli per ogni sistema presente.

6.1.1 Classificazione dei sistemi di controllo del riscaldamento

		Definition of classes							
		Residential				Non residential			
		D	C	B	A	D	C	B	A
AUTOMATIC CONTROL									
HEATING CONTROL									
Emission control									
		<i>The control system is installed at the emitter or room level, for case 1 one system can control several rooms</i>							
0	No automatic control								
1	Central automatic control								
2	Individual room automatic control by thermostatic or electronic controller								
3	Individual room control with communication between controllers and to BACS								
4	Integrated individual room control including demand control (by occupancy, air quality, etc.)								
Control of distribution network hot water temperature (supply or return)									
		<i>Similar function can be applied to the control of direct electric heating networks</i>							
0	No automatic control								
1	Outside temperature compensated control								
2	Indoor temperature control								
Control of distribution pumps									
		<i>The controlled pumps can be installed at different levels in the network</i>							
0	No control								
1	On off control								
2	Variable speed pump control with constant Δp								
3	Variable speed pump control with proportional Δp								
Intermittent control of emission and/or distribution									
		<i>One controller can control different rooms/zone having same occupancy patterns</i>							
0	No automatic control								
1	Automatic control with fixed time program								
2	Automatic control with optimum start/stop								
Generator control									
0	Constant temperature								
1	Variable temperature depending on outdoor temperature								
2	Variable temperature depending on the load								
Sequencing of different generators									
0	Priorities only based on loads								
1	Priorities based on loads and generator capacities								
2	Priorities based on generator efficiency (check other standard)								

6.1.2 Classificazione dei sistemi di controllo del raffrescamento

		Definition of classes							
		Residential				Non residential			
		D	C	B	A	D	C	B	A
AUTOMATIC CONTROL									
COOLING CONTROL									
Emission control									
<i>The control system is installed at the emitter or room level, for case 1 one system can control several rooms</i>									
0	No automatic control								
1	Central automatic control								
2	Individual room automatic control by thermostatic valves or electronic controller								
3	Individual room control with communication between controllers and to BACS								
4	Integrated individual room control including demand control (by occupancy, air quality, etc.)								
Control of distribution network cold water temperature (supply or return)									
<i>Similar function can be applied to the control of direct electric heating networks</i>									
0	No automatic control								
1	Outside temperature compensated control								
2	Indoor temperature control								
Control of distribution pumps									
<i>The controlled pumps can be installed at different levels in the network</i>									
0	No control								
1	On off control								
2	Variable speed pump control with constant Δp								
3	Variable speed pump control with proportional Δp								
Intermittent control of emission and/or distribution									
<i>One controller can control different rooms/zone having same occupancy patterns</i>									
0	No automatic control								
1	Automatic control with fixed time program								
2	Automatic control with optimum start/stop								
Interlock between heating and cooling control of emission and/or distribution									
0	No interlock								
1	Partial interlock (dependant of the HVAC system)								
2	Total interlock								
Generator control									
0	Constant temperature								
1	Variable temperature depending on outdoor temperature								
2	Variable temperature depending on the load								
Sequencing of different generators									
0	Priorities only based on loads								
1	Priorities based on loads and generator capacities								
2	Priorities based on generator efficiency (check other standard)								

6.1.3 Classificazione dei sistemi di controllo della ventilazione e del condizionamento

		Definition of classes							
		Residential				Non residential			
		D	C	B	A	D	C	B	A
AUTOMATIC CONTROL									
VENTILATION AND AIR CONDITIONING CONTROL									
Air flow control at the room level									
0	No control	■				■			
1	Manual control	■				■			
2	Time control	■	■	■		■	■		
3	Presence control	■	■	■	■	■	■	■	
4	Demand control	■	■	■	■	■	■	■	■
Air flow control at the air handler level									
0	No control	■	■			■			
1	On off time control	■	■	■	■	■	■		
2	Automatic flow or pressure control with or without pressure reset	■	■	■	■	■	■	■	■
Heat exchanger defrost control									
0	Without defrost control	■				■			
1	With defrost control	■	■	■	■	■	■	■	■
Heat exchanger overheating control									
0	Without overheating control	■				■			
1	With overheating control	■	■	■	■	■	■	■	■
Free mechanical cooling									
0	No control	■				■			
1	Night cooling	■	■			■	■		
2	Free cooling	■	■	■	■	■	■		
3	H,x- directed control	■	■	■	■	■	■	■	■
Supply Temperature control									
0	No control	■				■			
1	Constant set point	■	■			■	■		
2	Variable set point with outdoor temperature compensation	■	■	■		■	■	■	
3	Variable set point with load dependant compensation	■	■	■	■	■	■	■	■
Humidity control									
0	No control	■				■			
1	Supply air humidity limitation	■	■			■	■		
2	Supply air humidity control	■	■	■	■	■	■	■	■
3	Room or exhaust air humidity control	■	■	■	■	■	■	■	■

6.1.4 Classificazione dei sistemi di controllo dell'illuminazione

		Definition of classes							
		Residential				Non residential			
		D	C	B	A	D	C	B	A
AUTOMATIC CONTROL									
LIGHTING CONTROL									
Occupancy control									
0	Manual on/off switch								
1	Manual on/off switch + additional sweeping extinction signal								
2	Automatic detection Auto On / Dimmed								
3	Automatic detection Auto On / Auto Off								
4	Automatic detection Manual On / Dimmed								
5	Automatic detection Manual On / Auto Off								
Daylight control									
0	Manual								
1	Automatic								

6.1.5 Classificazione dei sistemi di controllo della schermatura solare

		Definition of classes							
		Residential				Non residential			
		D	C	B	A	D	C	B	A
AUTOMATIC CONTROL									
BLIND CONTROL									
0	Manual operation								
1	Motorized operation with manual control								
2	Motorized operation with automatic control								
3	Combined light/blind/HVAC control (also mentioned above)								

6.1.6 Classificazione dei sistemi di controllo dei sistemi BACS

		Definition of classes							
		Residential				Non residential			
		D	C	B	A	D	C	B	A
AUTOMATIC CONTROL									
HOME AUTOMATION SYSTEM									
BUILDING AUTOMATION AND CONTROL SYSTEM									
0	No home automation No building automation and control system								
1	Centralized adapting of the home & building automation and control system to users needs: e.g. time schedule, set points...								
2	Centralized optimizing of the home and building automation and control system: e.g. tuning controllers, set points...								

6.1.7 Classificazione dei sistemi Technical Home and Building Management

		Definition of classes							
		Residential				Non residential			
		D	C	B	A	D	C	B	A
AUTOMATIC CONTROL									
TECHNICAL HOME AND BUILDING MANAGEMENT									
Detecting faults of home and building systems and providing support to the diagnosis of these faults									
0	No								
1	Yes								
Reporting information regarding energy consumption, indoor conditions and possibilities for improvement									
0	No								
1	Yes								

6.2 Procedura di calcolo dell'efficienza del sistema BACS

6.2.1 Procedura di calcolo dettagliata

Quando tutte le caratteristiche del Sistema e dell'edificio sono conosciute nel dettaglio, si può eseguire un calcolo dettagliato. La norma propone cinque approcci distinti:

- Approccio diretto: consiste nella simulation oraria del funzionameno del Sistema. Tale metodo non può però essere usato quando l'effetto del Sistema di controllo introduce variazioni temporali più rapide del passo temporale di simulazione.
- Approccio in modalità operativa: consiste nella valutazione di ogni singola modalità operative e nella somma finale del consumo energetico calcolato.
- Approccio temporale: usata quanto i sistemi di controllo hanno un impatto importante e diretto sul tempo di funzionamento dei dispositivi.
- Approccio termico: usato quando i sistemi di controllo hanno un impatto importante sulla temperatura nei locali.
- Approccio con coefficienti correttivi: impiegato quando i sistemi di controllo hanno un impatto complesso su varie caratteristiche (e.g. temperatura, tempo).

6.2.2 Metodo dei fattori BAC (BAC Factors)

Il metodo dei BAC factors trae origine da rilevazioni statistiche. È utile sia per la pianificazione che per il test dei sistemi. È basato su fattori di efficienza che esprimono il risparmio energetico conseguibile a seconda del tipo di edificio e di sistemi usati. I fattori in questione sono stati precalcolati su vari tipi di edifici. Sono stati prodotti due set di fattori, che si riferiscono rispettivamente ai sistemi di riscaldamento e agli impianti elettrici.

Ogni edificio, che sia di nuova costruzione od oggetto di ristrutturazione, è associato a una data classe. Assumendo che la Classe C corrisponda a un sistema BACS di base, questa può essere assunta a standard di riferimento. La norma mostra quindi come il consumo energetico possa essere ridotto mediante l'efficientamento del sistema di building automation, con riferimento al riscaldamento e all'energia elettrica.

BAC/TBM Efficiency factors $f_{BAC,HC}$ – Non-residential buildings				
Non-residential building types	BAC efficiency factors $f_{BAC,HC}$			
	D	C (reference)	B	A
	Non energy efficient	Standard	Advanced	High energy performance
Offices	1,51	1	0,80	0,70
Lecture hall	1,24	1	0,75	0,50 ^a
Education buildings (schools)	1,20	1	0,88	0,80
Hospitals	1,31	1	0,91	0,86
Hotels	1,31	1	0,85	0,68
Restaurants	1,23	1	0,77	0,68
Wholesale and retail trade service buildings	1,56	1	0,73	0,60 ^a
Other types: - sport facilities - storage - industrial buildings - etc.		1		

^a These values highly depend on heating / cooling demand for ventilation)

Figura 85. BAC factors per riscaldamento per edifici non residenziali

BACS/TBM Efficiency factors $f_{BAC,HC}$ – Residential buildings				
Residential building types	BAC efficiency factors $f_{BAC,HC}$			
	D	C (reference)	B	A
	Non energy efficient	Standard	Advanced	High energy performance
Single family houses Apartment block Other residential buildings or similar residential buildings	1,10	1	0,88	0,81

Figura 86. BAC factors per riscaldamento per edifici residenziali

BAC/TBM Efficiency factors $f_{BAC,el}$ – Non-residential buildings				
Non-residential building types	BAC efficiency factors $f_{BAC,el}$			
	D	C (reference)	B	A
	Non energy efficient	Standard	Advanced	High energy performance
Offices	1,10	1	0,93	0,87
Lecture hall	1,06	1	0,94	0,89
Education buildings (schools)	1,07	1	0,93	0,86
Hospitals	1,05	1	0,98	0,96
Hotels	1,07	1	0,95	0,90
Restaurants	1,04	1	0,96	0,92
Wholesale and retail trade service	1,08	1	0,95	0,91
Other types: - sport facilities - storage - industrial buildings - etc.		1		

Figura 87. BAC factors per energia elettrica per edifici non residenziali

BACS/TBM Efficiency factors $f_{BAC,el}$ – Residential buildings				
Residential building types	BAC efficiency factors $f_{BAC,el}$			
	D	C (reference)	B	A
	Non energy efficient	Standard	Advanced	High energy performance
Single family houses Multi family houses Apartment block Other residential buildings or similar residential buildings	1,08	1	0,93	0,92

Figura 88. BAC factors per energia elettrica per edifici residenziali

7 Sistemi di gestione ottimizzata di impianti a servizio di edifici di tipo multifamigliare mediante building automation

In virtù dell'opportunità di adottare sistemi di controllo, gli edifici entrano a fare a parte delle risorse per il Demand Side Management (DSM), come sarà illustrato di seguito.

Uno degli obiettivi della ricerca è la messa a punto di un sistema di controllo tramite PLC degli impianti termici e elettrici di un edificio di tipo multifamigliare dotato di microgrid evoluta con generazione locale di energia.

Il modello di controllore BEMS (Building Energy Management System) prevede la possibilità di implementazione sia nel caso di aggregazione virtuale degli utenti con forniture separate sia nel caso di aggregazione fisica degli impianti con punti di fornitura unici e subfornitura contabilizzata tra gli utenti finali.

Il controllore PLC così concepito è stato collegato ad una piattaforma simulativa di ingressi e uscite per simulare l'edificio reale. Il sistema costituisce un modello fisico con PLC reale sul quale applicare in periodi successivi le logiche di controllo ed è dotato di un sistema di metering simulato capace di rilevare le variazioni delle grandezze di stato rilevanti.

L'obiettivo della ricerca è stato di verificare attraverso un controllore fisico (PLC) in laboratorio l'impatto energetico ed economico delle logiche di controllo proposte e sviluppate nelle precedenti annualità, in modo da essere pronti alla effettiva implementazione in campo.

7.1 Introduzione al demand side management

La prima definizione di DSM è stata proposta negli anni Ottanta del Novecento dall'Electric Power Research Institute (EPRI). A seguito della crisi energetica degli anni Settanta, c'è stata una maggiore attenzione non soltanto sulla potenza elettrica richiesta dai carichi ma anche sugli orari e sulle modalità di richiesta. Un esempio di tale attenzione è dato dall'editoriale pubblicato sull'argomento nell'EPRI Journal nel dicembre 1984. Il DSM viene definito come "la pianificazione, l'implementazione e il monitoraggio delle attività destinate a intervenire sull'utilizzo dell'energia elettrica da parte dei consumatori tali da produrre modificazioni favorevoli nella curva di carico, i.e., profilo e ampiezza del carico". Il DSM può essere attuato secondo quattro diverse operazioni:

1. Uso di dispositivi ad alta efficienza;
2. Modulazione del carico attraverso sensori e dispositivi smart;
3. Uso di sistemi di controllo standard per attivare o disattivare i dispositivi utilizzatori al bisogno;
4. Implementare sistemi di comunicazione tra gli utenti finali e terze parti.

Le tecniche di DSM conferiscono al consumatore la possibilità di essere attore nel processo energetico, tramutandosi nella figura più correttamente definita come "prosumer", in quanto è anche in grado di produrre ed immettere energia in relazione alla propria dotazione di sistemi di generazione locale. Un edificio o gruppo di edifici può essere connesso a sistemi di generazione da fonte rinnovabile situati in loco mediante una smart grid. Una microgrid di potenza di tipo avanzato risulta tipicamente composta dai seguenti elementi:

- Edificio di tipo full electric (gas-free)
- Singolo punto di connessione con la rete tradizionale (con cabina MT/BT di proprietà)
- Sistema di riscaldamento e acqua calda sanitaria centralizzato, e.g. via pompe di calore geotermiche e avvalendosi di riscaldamento a pavimento
- Sistemi BACS e HBES di monitoraggio e controllo delle utenze domestiche, con dati raccolti da un sistema comune

- Sistema BEMS a gestione dell'impianto termico a seconda della disponibilità energetica.

Ai fini del DSM, i carichi elettrici presenti in un edificio possono essere distinti in tre categorie:

- Carichi non controllabili: non possono essere traslati nel tempo, poiché eventuali modifiche arrecherebbero discomfort agli utenti (e.g. illuminazione, cucina, multimedia)
- Carichi programmabili: possono essere traslati nel tempo (e.g. elettrodomestici quali lavatrici e lavastoviglie)
- Carichi controllabili: possono essere traslati nel tempo a patto di limitazioni su una scala temporale inferiore al quarto d'ora (e.g. frigoriferi, pompe di calore).

Il termine *demand side management* (DSM) si riferisce all'implementazione di programmi che modificano la domanda di energia del sistema, ossia, ogni attività che influenza il carico dal lato dell'utenza. Le attività di DSM possono essere dirette ad applicazioni di carico base, intermedio o di picco. Con riferimento alla curva di carico giornaliera, gli obiettivi delle azioni di DSM possono essere:

- *Flexible load shape*: flessibilità della forma della curva di carico;
- *Peak clipping*: riduzione dei picchi di carico;
- *Strategic conservation*: riduzione complessiva della curva di carico (in modo pressoché equamente ripartito);
- *Strategic load growth*: incremento complessivo della curva di carico (in modo equamente ripartito);
- *Valley filling*: incremento delle valli di carico;
- *Load shifting*: spostamento del carico dai picchi alle valli, con riduzione dei picchi e incremento delle valli (in modo da rendere la curva di carico più piatta).

Vi sono varie strategie di intervento sulla curva di carico. L'EPRI definisce sei metodi base.

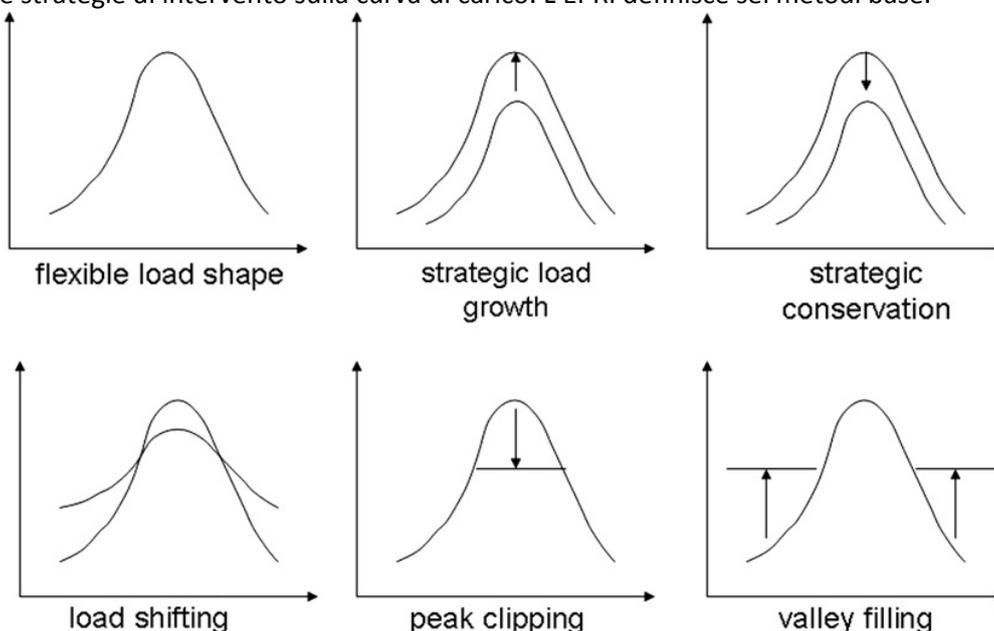


Figura 89. Categorie di interventi tipici di DSM

- L'approccio Flexible Load Shape (FLS) viene utilizzato per carichi controllabili. Se i carichi non sono soggetti alle limitazioni di uso a orari prestabiliti, possono essere ridistribuiti in orari diversi al fine di attenuare la curva di carico.
- L'approccio Strategic Load Growth (SLG) si basa sulla gestione intelligente di incrementi del consumo energetico. I carichi elettrici hanno facoltà di crescere, in modo controllato e limitato, verso un obiettivo di crescita definito.

- L'approccio Strategic Conservation (SC), ossia riduzione del carico, si basa sulla progettazione e l'uso di apparecchiature efficienti. I carichi saranno inferiori rispetto all'utilizzo di apparecchiature convenzionali, a parità di servizio erogato.
- L'approccio Load Shifting (LS) è impiegato in caso di flessibilità delle abitudini degli utenti. consiste nella pianificazione della domanda di energia così che corrisponda alla disponibilità di energia in tempo reale, andando a livellare la curva di carico.
- L'approccio Peak Clipping (PC), chiamato anche peak shaving, riduce il consumo di energia nelle ore di punta. I motivi per ridurre i picchi possono essere collegati alle clausole contrattuali che impongono di non superare certi valori di picco. I metodi di riduzione dei picchi vanno a ignorare determinati carichi o si avvalgono impianti di generazione di energia in loco durante i periodi di punta.
- L'approccio Valley Filling (VF) è un altro metodo di gestione che porta a una curva di consumo energetico più omogenea. La domanda di base aumenta così da spostare alcuni dei picchi di carico in periodi di bassa domanda.

Gli utenti possono essere partecipi di tale sistema variando le loro abitudini energetiche, anche a fronte di benefici per se stessi. Diversi programmi possono essere offerti agli utenti. I programmi più rilevanti sono basati sui prezzi energetici o su incentivi. Implicano, rispettivamente, variazioni dei prezzi dell'energia in base ai cambiamenti nel consumo di elettricità o erogazione di crediti o incentivi indipendentemente dal costo energetico.

7.2 HVAC role in demand side management

I sistemi HVAC sono cruciali per la modulazione dei carichi serviti da smart grid. Il loro consumo energetico è infatti una parte rilevante sia nel residenziale che nel terziario. L' Institute for Energy del Joint Research Centre (JRC) europeo, monitorando il comportamento energetico dei cittadini, identifica tendenze e definisce strategie per il futuro. Si riportano le osservazioni salienti per il residenziale e per il terziario.

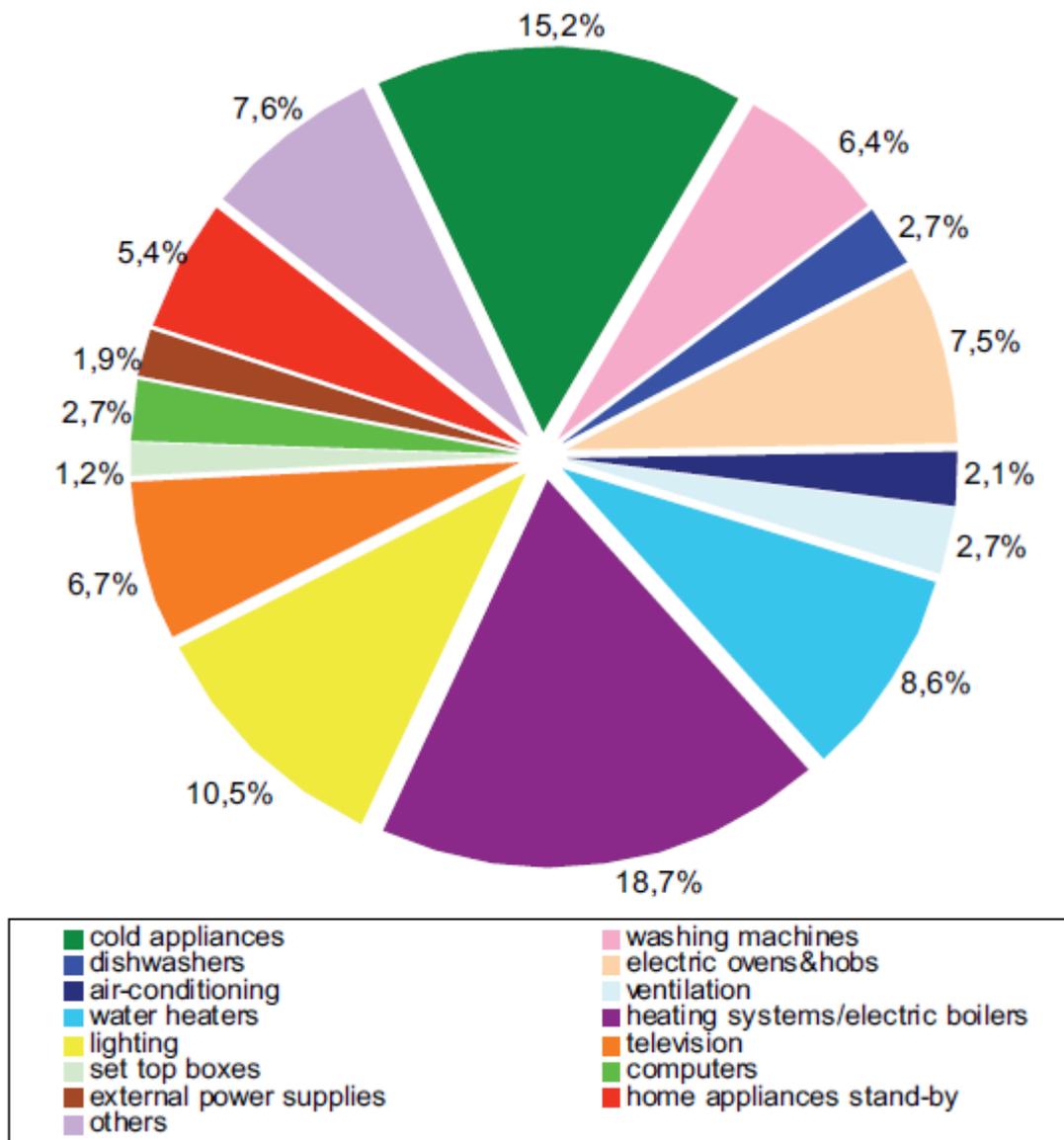


Figura 90. BAC Decomposizione degli utilizzi elettrici residenziali, EU-27 2007 (da JRC)

La percentuale di consumo energetico che può essere oggetto di modulazione ammonta al 51.7% andando a includere dispositivi quali lavastoviglie, condizionatori, riscaldatori d'acqua, apparecchi di illuminazione, lavatrici, apparecchi di ventilazione, apparecchi di riscaldamento, nelle percentuali mostrate. Quindi più della metà dei carichi possono essere in qualche modo controllati per finalità di DSM. Soprattutto, i sistemi HVAC da soli ammontano al il 32.1% dei consumi elettrici.

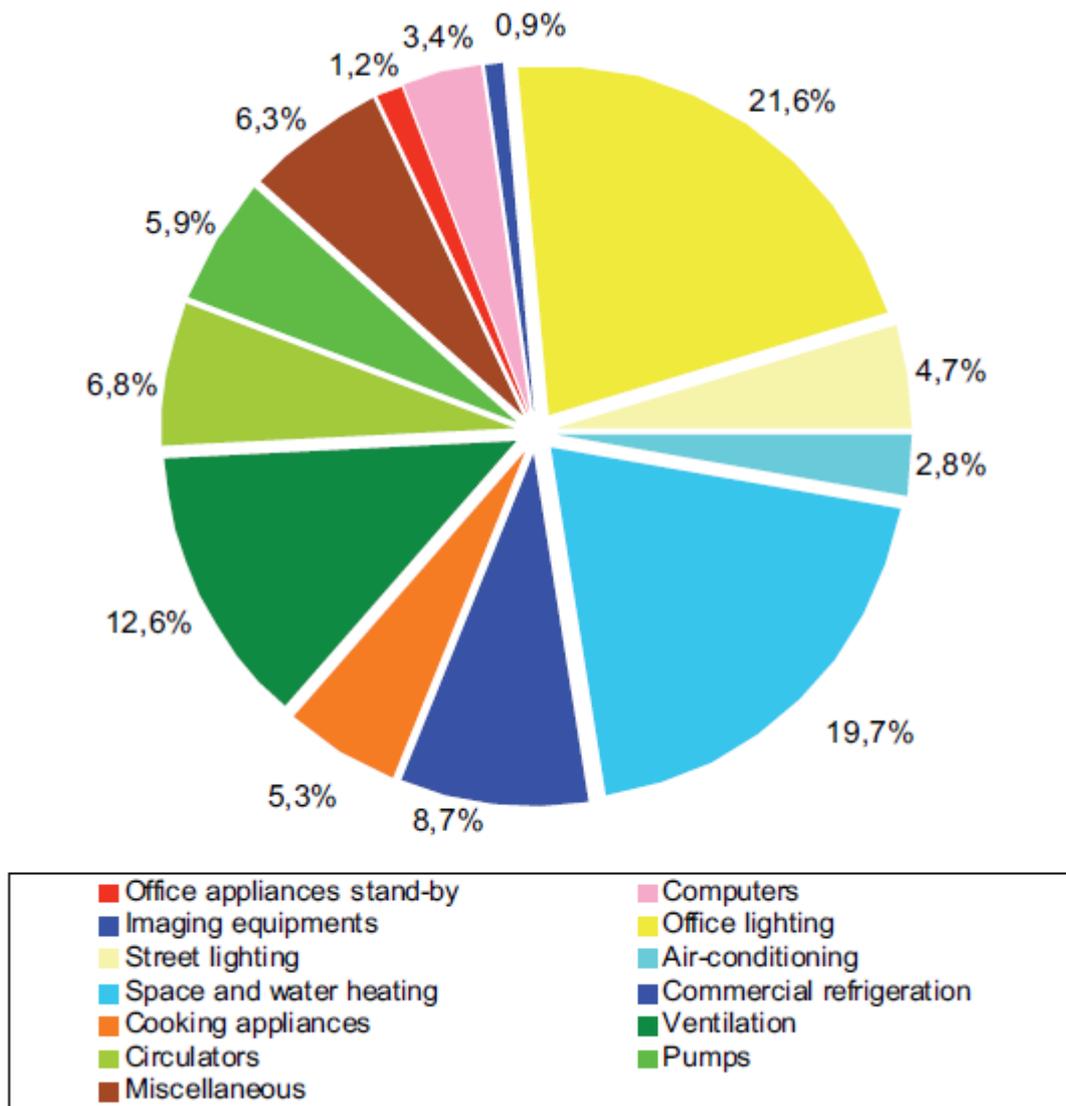


Figura 91. Breakdown of the tertiary sector consumption, EU-27 2007 (source JRC)

Nel terziario, ancor di più, risulta che quasi tutti i consumi possono essere oggetto di DSM (92.8%), comprendendo riscaldamento d’acqua e degli ambienti, condizionamento, illuminazione interna ed esterna, pompe e ventilatori, apparecchi di riscaldamento. HVAC, riscaldamento e raffrescamento ammontano al 66.5%.

Esaminando i dati nell’arco degli ultimi dieci anni, si possono evidenziare delle tendenze nel tempo. Secondo recenti studi del JRC relativi ai Paesi EU-28 nell’arco 2000-2014, si nota che il carico più rilevante risulta relativo al riscaldamento dei locali, mentre il consumo per illuminazione è notevolmente diminuito, grazie alle politiche europee di efficientamento;

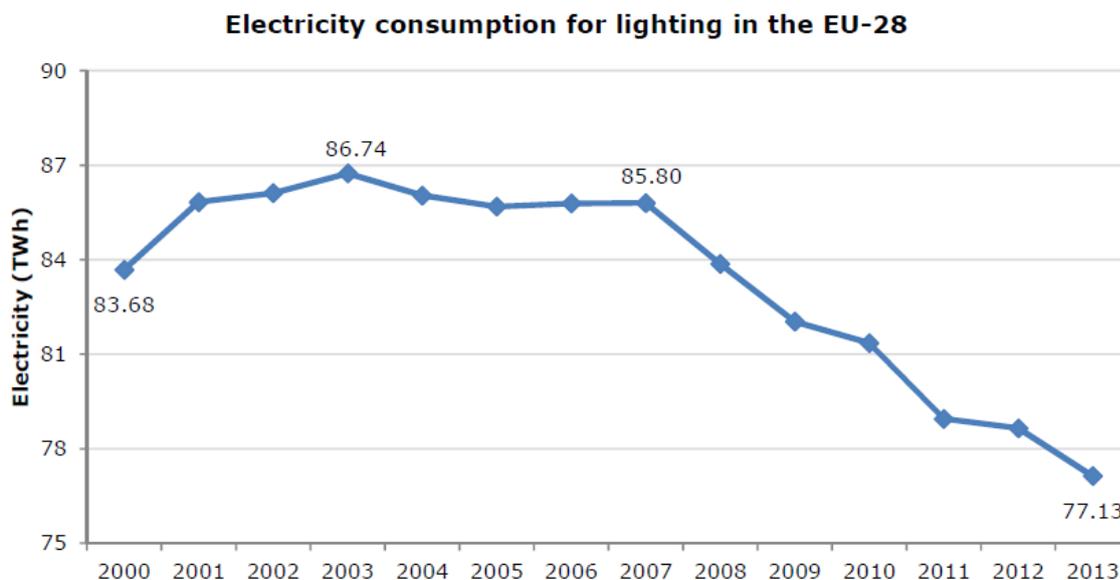


Figura 92. Residential average electricity consumption for lighting purposes in the EU-28, 2000-2013. Source: Odyssee

Alla luce di tali conclusioni, la scelta di intervenire sui sistemi HVAC e sulla produzione di acqua calda e fredda a servizio di questi si rivela la più strategica.

7.3 Thermal energy storage (TES) per DSM

Lo stoccaggio di energia termica ossia Thermal energy storage (TES) è uno degli strumenti più efficaci per applicare il DSM, data l'importanza dei sistemi HVAC poc'anzi illustrata. L'effetto è quello di tagliare i picchi di potenza omogeneizzando il profilo di carico, dato che lo stoccaggio consente di differire produzione e utilizzazione nel tempo. Il principio di funzionamento è il seguente: l'energia prodotta (ad esempio tramite fotovoltaico) è trasmessa ad una massa, che la immagazzina per usi successivi. L'energia è così sempre disponibile quando richiesta. All'utilizzo, la massa viene depauperata di energia e verrà successivamente rifornita.

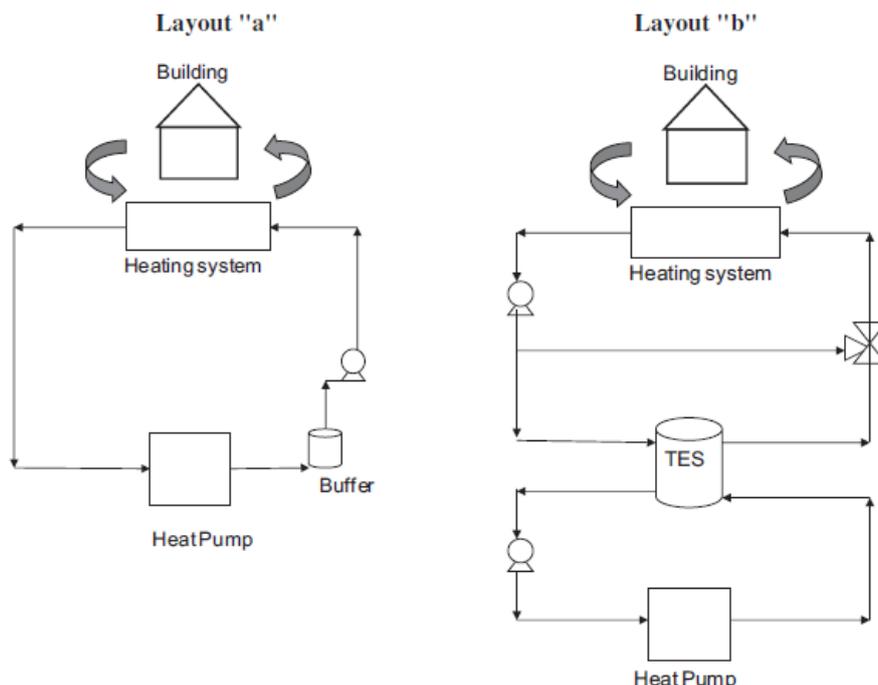


Figura 93. Schema di Sistema di riscaldamento con senza (a) e con (b) stoccaggio termico

Vari tipi di sistemi TES possono essere usati:

- TES a calore sensibile: serbatoi stratificati, sistemi a rocce, sistemi a rocce e acqua
- TES a calore latente
- TES freddi (Cold thermal energy storage, CTES)
- Sistemi termochimici.

I sistemi TES possono poi essere impiegati in diverse applicazioni quali riscaldamento, condizionamento e pompe di calore, ai fini del DSM.

7.4 Demand side management in edifici residenziali

Una evoluzione della definizione originaria di DSM è il concetto più complesso di *demand response resources* (DRR) che ha come obiettivo principale quello di trasformare l'utenza da utenza passiva a utenza partecipante e attiva nel sistema elettrico.

Le finalità del DRR sono:

- Favorire il bilancio istante per istante tra generazione e carico;
- Fornire servizi ancillari alla rete;
- Favorire benefici economici, ad esempio in caso di prezzi dinamici dell'energia.

Le attività di DRR sono delle alternative interessanti alla gestione dal lato della generazione ai fini del bilanciamento tra generazione e carico e dell'erogazione dei servizi ancillari (ad esempio, possono essere delle alternative economicamente vantaggiose rispetto alla riserva rotante).

Una opportunità di applicazione delle attività di DRR è costituita dall'incremento della penetrazione della generazione da fonti rinnovabili nella rete. Il profilo di generazione da fonti rinnovabili può essere disallineato rispetto alla curva di carico (tipicamente per quanto riguarda la generazione eolica). Ciò introduce nella curva di carico delle ripide rampe di carico in aumento e in diminuzione che influiscono sull'esercizio degli impianti convenzionali. L'applicazione di azioni di DRR consente di mitigare tali rampe e quindi i loro effetti sugli impianti convenzionali e sulla rete.

Nell'ambito dell'uso razionale dell'energia, l'obiettivo delle azioni di DSM o DRR non è necessariamente una diminuzione del quantitativo di energia consumata, bensì una migliore utilizzazione dell'energia stessa, da cui una riduzione dei costi di investimento e di gestione degli impianti di generazione e delle reti elettriche. Ad esempio, si consideri che i picchi dei consumi vengono soddisfatti da impianti di generazione di picco, mantenuti in stand-by allo scopo di seguire immediatamente la variazione del carico. Tali impianti sono caratterizzati da un basso rendimento e da alti costi operativi ed è quindi auspicabile contenere il loro uso. D'altro canto, il consumo di base è soddisfatto da impianti di generazione di base, di grande taglia, ad alta efficienza e bassi costi operativi, che poco si prestano al funzionamento in regolazione. Una curva di carico più piatta consente quindi un risparmio per i produttori di energia e per i gestori delle reti. Inoltre comporta opportunità di risparmio anche per il cliente, che può ottenere condizioni contrattuali economicamente più vantaggiose.

Per raggiungere una domanda di energia più efficiente, tradizionalmente sono stati identificati alcuni strumenti chiave quali ad esempio:

- Un sistema tariffario che deve incoraggiare un comportamento più responsabile da parte dell'utenza, modificando il programma dei prezzi tenendo conto della possibilità di un consumatore di partecipare al mercato;
- Incentivi per rendere interessante la partecipazione nei programmi di demand side management, ricompensando la partecipazione;
- Accesso alle informazioni che possano permettere l'accesso da parte dei consumatori alle informazioni in tempo reale sul proprio comportamento;
- Educazione dei consumatori cercando di sensibilizzare maggiormente le abitudini riguardo il proprio utilizzo dell'energia elettrica;

- Verifica e visualizzazione che risulta un fattore importante nello sviluppo dei programmi di demand response è la possibilità di valutare e verificare i risultati ottenuti con programmi dei demand side management, quindi la realizzazione di infrastrutture di comunicazione.

Il DSM può assumere un ruolo fondamentale anche nella gestione della generazione elettrica da fonti rinnovabili.

L'aggiunta di grandi quantitativi di energia rinnovabile nella rete nazionale infatti, può portare a disturbi sulla rete stessa. Attraverso una gestione programmata della domanda si può bilanciare la produzione da fonti rinnovabili con la richiesta, cercando di far coincidere domanda e produzione.

Un esempio di demand side management, già presente in Italia in ambito residenziale è la tariffazione bioraria. Grazie all'utilizzo di una fascia oraria in cui il costo dell'energia è inferiore rispetto a quella di picco, si tenta di modificare le abitudini degli utenti finali, incentivandoli a spostare i carichi elettrici nelle ore notturne, in cambio di un ritorno economico. Sfruttando tutte queste azioni, la domanda elettrica non viene più gestita in maniera passiva, adattando la produzione alla richiesta, ma in maniera attiva, cercando di bilanciare la domanda ad una produzione sempre più efficiente. Diventa quindi protagonista l'utente finale, a cui spetta il compito di variare la modalità d'uso dell'energia, in modo da aumentarne l'efficienza. E' fondamentale quindi un sistema di controllo che permetta di monitorare in tempo reale i consumi e la produzione di energia, in modo da permettere ai clienti di contribuire attivamente alla riduzione dei picchi di domanda.

La tariffazione bioraria non sembra fornire stimoli importanti negli utenti residenziali, soprattutto a causa dello scarto ridotto in termini di centesimi di euro tra la tariffa di punta e la tariffa serale. Inoltre negli ultimi periodi l'eccessiva generazione da fonti rinnovabili sta creando fenomeni caotici anche nella tariffazione multioraria.

Sono già diffuse varie modalità di incentivazione per l'utente privato e per il prossimo futuro si prevede che nel libero mercato energetico i fornitori di energia elettrica andranno a proporre ai loro clienti contratti sempre più innovativi basati sul real time pricing in modo da poter ottimizzare sempre di più il comportamento dei clienti.

In questo scenario diventa sempre più importante prevedere modelli gestionali che consentano agli utenti finali di poter ottimizzare i loro profili. A tal fine appare necessario una ristrutturazione del sistema elettrico prevedendo il modello di microsistema aggregato sul nodo di carico a livello di edifici. Nella micro grid di edificio svolge un ruolo fondamentale la presenza di un sistema di metering capillare, che tenga sotto controllo istante per istante, consumi e produzione, e sia in grado di indirizzare i consumi del cliente al momento di massima efficienza.

In conclusione sembra che le tecnologie siano ormai mature per completare quel complesso processo di smartizzazione delle reti. L'ultimo tassello è la responsabilizzazione degli utenti finali che aggregandosi in centri di assorbimento a livello di edificio diventeranno i prosumer delle reti del futuro [RIFERIMENTO ECODESIGN OF EVER NET LOAD].

7.5 Obiettivi del DSM

Nella visione proposta dal modello di "micro grid completa" per gli edifici NZEB/MURB, la presenza di generazione locale combinata con la gestibilità e flessibilità della domanda aggregata a livello di edificio, favoriscono l'implementazione di strategie di DSM finalizzate all'ottimizzazione dei flussi energetici, in un'ottica fortemente innovativa poiché gestita dal punto di vista dell'utenza.

In uno scenario futuribile di prezzo dinamico dell'energia, tali strategie potranno perseguire ulteriori funzioni obiettivo legate alla economicità dell'approvvigionamento energetico.

In generale, i diversi attori del sistema elettrico, in particolare il distributore, il fornitore ed il cliente finale hanno alcuni obiettivi da perseguire con le logiche di DSM, che sono riassunti nella Tabella 14.

Tabella 14. Obiettivi del DSM per i vari attori del sistema elettrico

Obiettivi del DSM	Fornitore	Distributore	Utente finale

Aumentare il numero di utenti (inteso come valore di potenza complessivo) collegabili a una linea elettrica	X	X	
Risparmiare sul costo di acquisto/produzione dell'energia elettrica senza diminuire la quantità di energia venduta	X		
Ritardare gli investimenti sulla propria rete di distribuzione		X	
Avere la possibilità di controllare il carico in caso di emergenza		X	
Incrementare il livello di qualità che gli può permettere di rispettare i limiti imposti dall'autorità e differenziare il servizio offerto ai clienti finali		X	
Risparmiare sul costo della bolletta elettrica			X
Non vuole alterare troppo le proprie abitudini e se lo fa questo deve in qualche modo essergli riconosciuto economicamente			X
Desidera essere alimentato sempre anche quando la rete ha dei problemi (black-out)			X
Ridurre le emissioni inquinanti	X	X	X
Aumentare la sicurezza degli utenti e degli operatoti	X	X	X

Il fornitore desidera risparmiare sul costo di acquisto/produzione dell'energia elettrica senza diminuire la quantità di energia venduta e per raggiungere questo obiettivo cerca di avere dei carichi elettrici che siano coerenti con le risorse produttive. Senza considerare le fonti rinnovabili fotovoltaiche e eoliche che possono modificare sensibilmente il diagramma di carico che il distributore desidera avere, si può affermare che una centrale elettrica di produzione dell'energia, indipendentemente dalla tecnologia impiegata, funziona meglio con profili di generazione costanti o comunque poco variabili al fine di massimizzare il rendimento del processo produttivo. Detto ciò il miglior profilo di carico può essere coerente con un profilo di generazione costante o poco variabile. Nel breve periodo e considerando che non tutti i clienti possono alterare il loro profilo di assorbimento, si potrebbe pensare a un profilo ideale associato esclusivamente a parametri economici di acquisto dell'energia elettrica da parte del distributore. Inviando all'utente un profilo ideale e avendo la certezza che il cliente rispetti tale profilo i costi di fornitura sarebbero minori e tale risparmio si rifletterebbe anche sull'utente finale come vantaggio economico.

Il distributore desidera aumentare il numero di utenti (inteso come valore di potenza complessivo) collegabili a una linea elettricacercando di avere dei clienti che limitino la potenza massima assorbita dalla rete del distributore. Ciò può essere ottenuto producendo localmente la potenza in eccesso che l'utente finale desidera, non alimentando alcuni carichi del cliente oppure controllando la potenza elettrica assorbita dai differenti carichi del cliente. Indipendentemente dalla strategia utilizzata dal cliente, che in funzione dello stato tecnologico utilizzato può essere più o meno sofisticata, quello che il distributore desidera è sostanzialmente una funzione di *pick shaving*.

Questo aspetto è importante al fine di evitare di dover incrementare la potenza di linee esistenti (centri urbani) dove l'aumento di carico di picco richiesto dal cliente finale si può scontrare con la potenza trasportabile dalla linea elettrica esistente che talvolta può aver già raggiunto il suo limite termico.

Il distributore desidera ritardare gli investimenti sulla propria rete di distribuzione con campagne di DSMcercando di avere dei carichi elettrici che limitino la potenza assorbita dalla rete del distributore. Anche in questo caso quello che il distributore desidera è sostanzialmente una funzione di *pick shaving*, però anche una funzione di *load shedding* o di *load shifting* potrebbero essere utili allo scopo. Il DSM è infatti un programma che mira al miglior sfruttamento delle risorse esistenti.

Questo aspetto è importante per poter sfruttare maggiormente le risorse esistenti. Attualmente il distributore realizza le proprie reti (linee elettriche, trasformatori ecc...) progettando i diversi componenti al valore di potenza che esiste per almeno 100 ore (progetto della linea a 100 ore), questo vuol dire che per la maggior parte del tempo la linea trasporta una potenza inferiore a questo valore. Avere dei diagrammi di carico più costanti o comunque variabili in modo desiderato permette di sfruttare le reti elettriche esistenti

in prossimità del loro limite termico e permettere di eguagliare il carico elettrico alla potenza elettrica disponibile.

Il distributore desidera avere la possibilità di controllare il carico in caso di emergenza. Questa funzione è molto simile alla funzione precedente, la differenza è associata che questa funzione viene svolta in emergenza e quindi in seguito alla verifica di una criticità nella rete e prima di andare nella condizione di black-out. Si ottiene sempre limitando la potenza elettrica assorbita dalla rete del distributore e questa funzione è prevalentemente una funzione di *load shedding* di *pick shaving*, non è di *load shifting* in quanto situazione transitoria e momentanea. Questo aspetto è importante per poter sfruttare migliorare il livello di qualità dell'utente, in particolare la continuità del servizio.

Il distributore desidera incrementare il livello di qualità che gli può permettere di rispettare i limiti imposti dall'autorità e differenziare il servizio offerto ai clienti finali. Questa è una funzione necessaria per rispettare i limiti imposti e nuova per quanto riguarda la proposta commerciale che il distributore potrebbe proporre ai clienti finali.

Al fine di incrementare il livello di qualità attualmente il distributore è costretto a modificare la struttura di rete (es. doppia alimentazione del carico). Se il livello raggiunto non soddisfa il cliente si hanno poi delle situazioni di contenzioso dalle quali non sempre lo stesso esce senza colpe, in ogni caso la soddisfazione del cliente finale non viene raggiunta.

Avere la possibilità di migliorare notevolmente il livello di qualità a costi ridotti può essere quindi un plus che può portare a maggiori introiti da parte del distributore e maggiori soddisfazioni da parte del cliente finale.

Il cliente finale desidera risparmiare sul costo della bolletta elettrica. Ovviamente al fine di diffondere qualunque soluzione tecnica gli attori in gioco devono vedere dei vantaggi.

Se questi sono anche economici è facile valutare i tempi di ritorno degli investimenti.

La realizzazione di micro grid con fornitura unica in MT e sistema di generazione locale allacciata alla fornitura consente di ottenere importanti risparmi economici. L'implementazione di un sistema di controllo avanzato per la gestione dei carichi termici ed elettrici consente di ottenere ulteriori risparmi economici con il correlato miglioramento del comfort delle varie utenze.

Il cliente finale non vuole alterare troppo le proprie abitudini e se lo fa questo deve in qualche modo essergli riconosciuto economicamente. La modifica delle abitudini del cliente finale deve in qualche modo portare a dei vantaggi (se economici è meglio). In linea di massima si può affermare che se il cliente potrebbe essere poco interessato a partecipare al programma di DSM nel caso in cui non abbia dei riconoscimenti economici che siano di incentivazione.

Il cliente finale desidera essere alimentato sempre anche quando la rete ha dei problemi (black-out). Al fine di svolgere questa funzione è necessario un sistema di generazione locale eventualmente abbinato ad un sistema di accumulo locale (DDES Domestic Distributed Energy Storage).

Per l'ambiente si devono ridurre le emissioni inquinanti. Ciò è possibile integrando maggiormente le fonti rinnovabili e permettendo alle centrali tradizionali di produrre con profili di carico più costanti e con rendimenti alti.

8 Sistemi di controllo avanzati per edificio

8.1 Demand side management mediante gestione del sistema HVAC

Come dimostrato da studi precedenti, l'acquisto e la fatturazione di energia aggregata è economicamente vantaggiosa. I benefici possono essere classificati come segue:

- Uso di tariffe più convenienti, non residenziali;
- Migliore sfruttamento della generazione in loco;
- attività DSM;
- Prezzi dinamici.

L'obiettivo principale della presente ricerca è realizzare un sistema di controllo avanzato degli impianti HVAC presenti in un edificio multifamiliare, con l'obiettivo di ottenere politiche di demand side management (DSM) del carico elettrico globale di edificio.

In un edificio del tipo di quello considerato nella presente attività ovvero dotato di sistema di riscaldamento/raffrescamento elettrico e di generazione locale da fonti rinnovabili, è possibile perseguire strategie di gestione del sistema HVAC per ottenere impatti significativi sui flussi energetici mediante controlli di tipo tradizionale.

Il sistema di gestione degli impianti HVAC può essere suddiviso in due aree di azione:

- Gestione ordinaria degli apparati HVAC finalizzata al comfort degli utenti, con obiettivo ottenere parametri di temperatura e umidità prefissati;
- Gestione avanzata degli apparati HVAC finalizzata al DSM, con obiettivo ottimizzare aspetti energetici e economici complessivi di edificio.

Per la gestione avanzata occorre avere una visione energetica complessiva di edificio che deve essere visto come unico polo energetico, che gode di alcune risorse energetiche condivise a livello di edificio.

In questa ottica, le attività di DSM sono efficaci sia nell'ottimizzazione dei profili di carico rispetto alla rete che nell'ottimizzazione economica per gli utenti.

L'acquisto aggregato di energia prevede la presenza di un'entità che agisce come aggregatore di energia, secondo vari modelli come evidenziato in studi precedenti.

8.2 Indicatori di prestazione energetica dei controlli proposti

Al fine di valutare l'impatto energetico e quindi economico delle strategie di controllo proposto, per un edificio generico, si possono definire alcuni indicatori prestazionali (EnPI) :

- ΔP_a : variazione della potenza media giornaliera rispetto al profilo non controllato;
- ΔP_p : variazione della potenza di picco (su intervalli di 15 minuti) rispetto al profilo non controllato;
- P_a/P_p : rapporto tra potenza media e potenza di picco;
- ΔE_G : variazione dello scambio di energia con la rete rispetto al profilo non controllato;
- EH : ore equivalenti, pari al rapporto tra l'energia giornaliera assorbita dalla rete e la potenza di picco;
- SCR: quota di autoconsumo, pari al rapporto tra l'energia giornaliera autoconsumata e l'energia generata;
- ES%: massimo valore di energia differibile in un giorno.

8.3 Gestione HVAC avanzata mediante controlli di tipo tradizionale

In un edificio del tipo di quello considerato nella presente attività dotato di sistema di riscaldamento/raffrescamento elettrico e di generazione locale da fonti rinnovabili, sono proposte le seguenti possibili strategie di gestione del sistema avanzato HVAC con conseguente impatto sui flussi energetici mediante controlli di tipo tradizionale.

Il serbatoio di accumulo termico accoppiato al generatore termico e i boiler di preparazione e accumulo dell'acqua calda sanitaria costituiscono sistemi di accumulo di energia sotto forma di energia termica. Allo stesso modo, la capacità termica dell'edificio e l'inerzia termica dei pannelli radianti, abbinati alla elevata resistenza termica dell'edificio, offrono ulteriori opportunità di accumulo di energia termica, consentendo notevoli margini di controllo dell'impianto a parità di comfort.

L'obiettivo generale di un building management system (BMS) è la gestione dei sistemi HVAC in modo da garantire un livello di comfort accettabile per gli occupanti e un esercizio corretto dei sistemi [16]. Un BMS diviene BEMS se è in grado di ottimizzare la domanda di energia [17,18,19]. Nell'approccio proposto, si tratta di BEMS avanzato in quanto punta a ottimizzare la domanda di energia elettrica al punto d'interfaccia col DSO, tenendo in considerazione la generazione locale. Gli obiettivi del BEMS sono:

- Ottimizzare il profilo globale netto al POC;
- Ottimizzare SCR;
- Minimizzare Pp;
- Minimizzare il costo dell'energia;
- Ottimizzare la prestazione di una stazione di ricarica di veicoli elettrici, in uno scenario futuro.

Il BEMS può agire su:

- Scheduling degli elettrodomestici smart;
- Sistemi di riscaldamento (sfruttando l'inerzia termica dovuta all'edificio e al sistema stesso)

I controlli attuabili sono i seguenti:

- T1) Controllo delle temperature di setpoint a livello di centrale termica operando forzature sulla temperatura del boiler di accumulo (controllo T1, accumuli termici centralizzati).
- T2) Controllo del riscaldamento a livello di singole unità o di gruppi di unità, operando forzature sui setpoint dell'ordine di $\frac{1}{2}$ o 1 grado (controllo T2, accumuli termici distribuiti).
- T3) Controllo del riscaldamento a livello di singole unità o di gruppi di unità, operando preriscaldamenti passando dalla temperatura economy alla temperatura di comfort o precomfort. Tale misura oltre ad avere benefici nella gestione del profilo elettrico, offre benefici in termini di comfort generando preriscaldamenti degli ambienti.

La Figura 94 illustra il flusso logico delle informazioni gestite dal BEMS.

Il sistema di metering SMS monitora in tempo reale la potenza elettrica assorbita dall'edificio $p(t)$.

Il sistema HES monitora in tempo reale la temperatura interna e la presenza di utenti in ciascuna unità.

Il sistema BES monitora in tempo reale la temperatura esterna e le previsioni meteo riferite in particolare alla temperatura prevista e alle condizioni di soleggiamento.

Il sistema HBES di edificio è capace di controllare in tempo reale i valori di:

- T_B set point di ciascun boiler, del riscaldamento e dell'acqua calda sanitaria
- T_C set point in modalità comfort di ciascuna unità immobiliare;
- T_E set point in modalità economy di ciascuna unità immobiliare;
- T_S effettivo set point di ambiente di ciascuna unità, uguale a economy ($T_S=T_E$) o comfort ($T_S=T_C$)

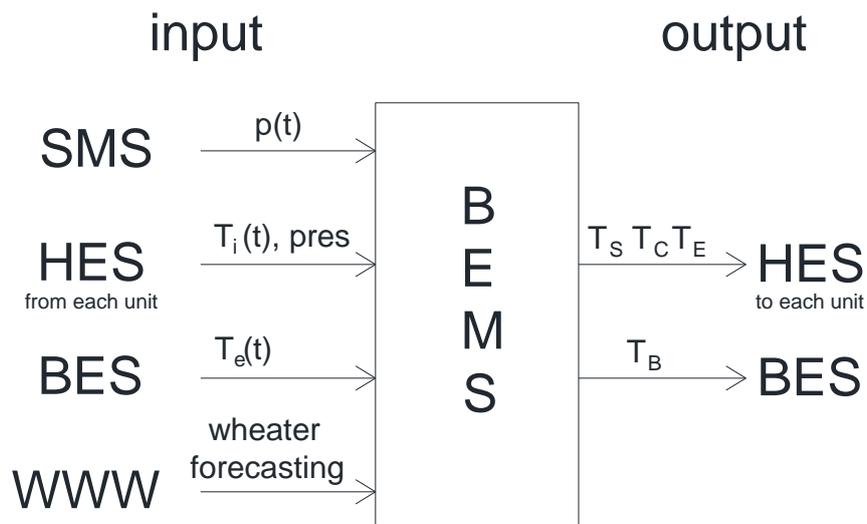


Figura 94. Schema a blocchi dei flussi di informazioni e forzature del BEMS.

Il sistema HES è capace di gestire anche in modo remoto attraverso l'interfaccia utente HIS:

- I valori di setpoint economy e comfort di ciascuna unità, mediante la forzatura in un range di +/- 2 °C;
- Il valore di setpoint T_s di ogni unità uguale a economy ($T_s=T_e$) o comfort ($T_s=T_c$).

Un sistema di gestione BEMS tradizionale opera settando:

T_{BN} temperatura di funzionamento normale del boiler/puffer;

T_{CN} temperatura di setpoint negli ambienti in caso di presenza nell'unità immobiliare (comfort mode);

T_{EN} temperatura di setpoint negli ambienti in caso di assenza nell'unità immobiliare o in orario notturno (economy mode).

8.3.1 Accumulo termico centralizzato – Controllo T1

Attraverso la gestione dei setpoint dei sistemi di accumulo è possibile sfruttare il sistema termico come volano energetico di elettricità.

Il sistema di metering M rileva i valori di assorbimento e generazione elettrica di edificio.

Su richiesta del BMS (Building Management System) è possibile modificare i setpoint dei serbatoi di accumulo per modulare la potenza elettrica assorbita dal sistema termico.

In questo modo il sistema termico si comporta come un volano di elettricità:

- Consuma energia elettrica in caso di esubero di generazione o in caso di basso carico proveniente dalla rete del DSO (setpoint boiler elevato),
- Accumula energia elettrica, scaricando l'energia termica in caso di elevato carico proveniente dalla rete del DSO (setpoint boiler ridotto).

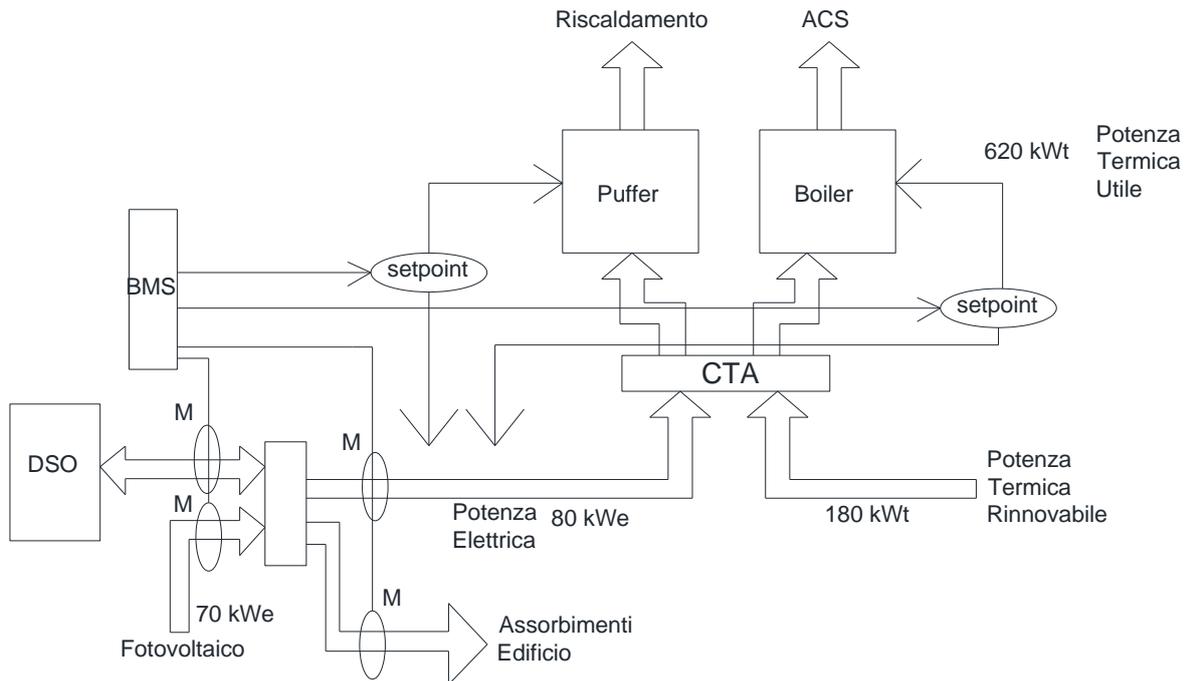


Figura 95. Schema del flusso di informazioni per il controllo T1.

È possibile ridurre il picco di carico elettrico in caso di carico globale elevato, o accumulare energia in caso di carico globale ridotto o negativo, forzando i set point T_B dei boiler centrali. Ossia:

$$\begin{aligned} \text{se } p(t) > P_{M1} &\rightarrow \text{BEMS forza } T_B \text{ da } T_{BN} \text{ a } T_{BL} \\ \text{se } p(t) < P_{m1} &\rightarrow \text{BEMS forza } T_B \text{ da } T_{BN} \text{ a } T_{BH} \end{aligned}$$

con:

- $p(t)$ carico dell'edificio al POC;
- P_{M1} valore soglia di massima potenza;
- P_{m1} valore soglia di minima potenza;
- T_{BL} valore inferiore di temperatura del boiler;
- T_{BH} valore superiore di temperatura del boiler.

8.3.2 Accumuli termici distribuiti. Controllo T2

Le elevate prestazioni di isolamento dell'edificio abbinate al sistema di diffusione del calore a pavimento a bassa entalpia costituiscono di fatto un sistema di accumulo naturale che si presta ad essere sfruttato nelle logiche gestionali.

Un sistema di metering M rileva i valori di assorbimento e generazione elettrica di edificio.

Su richiesta del BMS (Building Management System) è possibile modificare i setpoint di temperatura delle singole unità, sfruttando l'inerzia termica del sistema.

In questo modo il sistema termico si comporta come un volano di energia:

- Consuma energia in caso di esubero di generazione elettrica o in caso di basso carico proveniente dalla rete del DSO (setpoint temperatura ambiente elevato),
- Accumula energia, scaricando l'energia termica in caso di elevato carico proveniente dalla rete del DSO (setpoint temperatura ambiente ridotto).

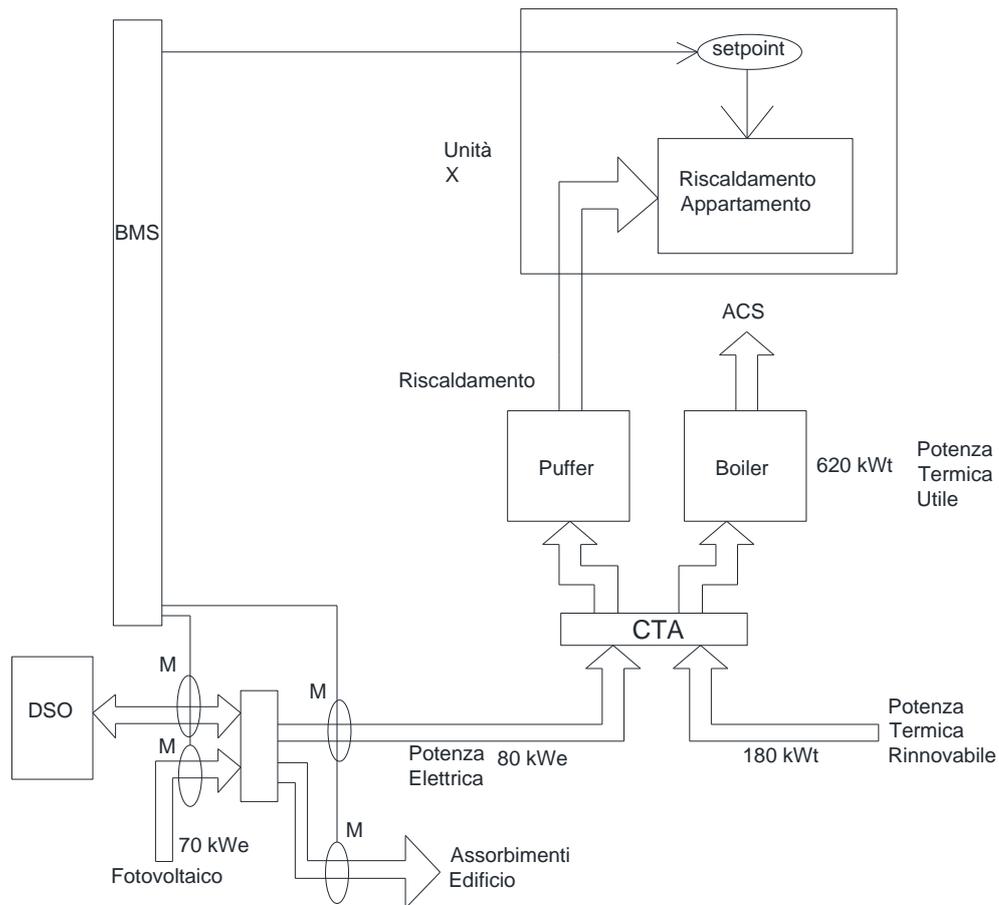


Figura 96. Schema del controllo T2.

Tale metodo di accumulo energetico è possibile per gli NZEB e per tutti gli edifici ad elevato isolamento termico. Negli edifici tradizionali, l'accumulo di energia termica in genere comporta un incremento del fabbisogno energetico complessivo che dovrebbe essere considerato nella valutazione energetica globale. È possibile ridurre il fabbisogno energetico in caso di carico globale elevato, o accumulare energia in caso di carico globale basso (o negative) forzando i set point T_c dei termostati locali:

$$\text{se } p(t) > P_{M2} \rightarrow \text{BEMS forza } T_c \text{ da } T_{cN} \text{ a } T_{cL}$$

$$\text{se } p(t) < P_{m2} \rightarrow \text{BEMS forza } T_c \text{ da } T_{cN} \text{ a } T_{cH}$$

con:

P_{M2} valore soglia di massima potenza;

P_{m2} valore soglia di minima potenza;

T_{cL} valore inferiore di setpoint in modalità comfort;

T_{cH} valore superiore di setpoint in modalità comfort.

T_{cL} e T_{cH} possono variare da 0.5 a 1 °C, in base alla temperatura esterna T_e e alla stagione, in modo da evitare un impatto negativo sul comfort dell'utente.

8.3.3 Preriscaldamento. Controllo T3

L'inerzia termica degli ambienti, il livello di isolamento e le caratteristiche del sistema di diffusione del calore a pavimento, favoriscono l'impiego di logiche di controllo correlate ai tempi di accensione e spegnimento.

È possibile ridurre il carico globale, attraverso una programmazione (scheduling) della commutazione della modalità di esercizio dell'ambiente, da economy (T_{EN}) a pre-comfort (T_{PN}) di prima mattina e in caso di unità non occupate prima dell'orario di rientro serale presunto.

Le simulazioni hanno mostrato che tale controllo è particolarmente efficiente negli orari dei pasti, in modo da evitare contemporaneità tra l'elevato carico della cucina e gli altri carichi.

Inoltre, tale controllo migliora il comfort degli utenti in quanto riduce il tempo di riscaldamento da T_{EN} a T_{CN} in corrispondenza del rientro serale.

L'efficacia del controllo può essere migliorata nel corso della durata di vita dell'edificio, utilizzando dati misurati resi disponibili dal BEMS stesso. Il BM può valutare gli effettivi profili di carico e migliorare i controlli basandosi sui dati effettivamente misurati.

T_{PN} è il setpoint di temperatura operativa di pre-comfort, inferiore a T_{CN} ma superiore a T_{EN} . T_{PN} può variare in base alla temperatura esterna T_e , in modo da ottimizzare il comfort e la gestione energetica.

8.4 Gestione avanzata del sistema HVAC mediante Model Predictive Control

8.4.1 Generalità

Uno dei metodi recentemente impiegati nel campo dei sistemi di controllo a servizio di sistemi elettrici è il Model Predictive Control (MPC).

Il MPC è uno dei metodi solitamente usati per il controllo di sistemi dinamici complessi, per cui si dimostra efficace. Il controllo di sistemi semplici, invece, non richiede una tale complessità ed è ben svolto da metodi di controllo più semplici quali il Proporzionale-Integrale-Derivativo (PID).

8.4.2 Cenni storici

Il MPC è stato inizialmente impiegato nel controllo di sistemi nell'industria di processo, campo in cui è in uso da decenni. Successivamente, il suo impiego è stato esteso ad altri settori quali l'elettronica di potenza, i sistemi elettrici per l'energia e gli impianti tecnici degli edifici.

I sistemi MPC di prima generazione sono stati sviluppati indipendentemente negli anni Settanta del ventesimo secolo da due gruppi di ricerca industriali: tali sistemi sono il Dynamic Matrix Control (DMC) della Shell Oil e un analogo sistema sviluppato da ADERSA. Un ulteriore sistema degno di nota è poi il Generalized Predictive Control (GPC) degli anni Ottanta.

Il MPC è stato oggetto di intensa trattazione.

8.4.3 Obiettivi e punti di forza

Gli obiettivi generali di un controllore MPC possono essere formulati come segue:

- Evitare violazioni dei vincoli su input e output
- Portare determinate variabili di output in corrispondenza dei loro set point ottimali, al contempo preservando i valori delle restanti variabili output all'interno di intervalli specifici
- Evitare eccessive variazioni delle variabili input
- Controllare quante più variabili di processo è possibile nel momento in cui un sensore o un attuatore si rende fuori servizio.

I punti di forza di un controllo di tipo MPC possono essere sintetizzati come segue:

- Il modello di processo descrive le interazioni statiche e dinamiche tra input, output e disturbi;
- I vincoli sugli input e gli output sono presi in considerazione in maniera sistematica;
- Le operazioni di calcolo del controllo possono essere coordinate con le operazioni di calcolo dei set point ottimi;
- Le previsioni possono fornire avvisi preventivi di possibili problemi nel funzionamento del sistema controllato.

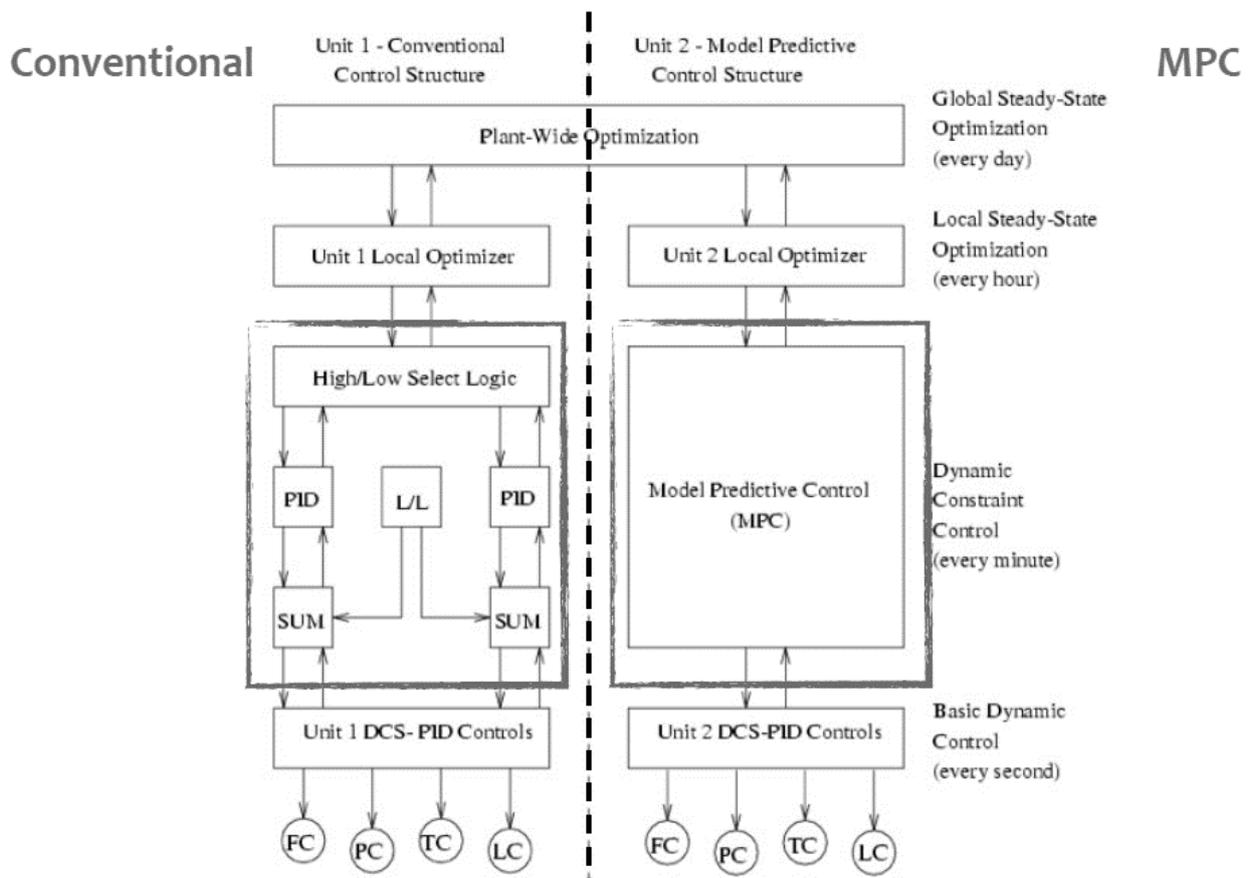


Figura 97. Schema della gerarchia di sistemi di controllo convenzionale e MPC

8.4.4 Principi di funzionamento

Il MPC è un algoritmo di controllo multivariabile basato su:

- Un modello dinamico del processo o del sistema oggetto del controllo
- Uno storico delle azioni di controllo precedenti
- Una funzione costo relativa all'orizzonte temporale di riferimento

Su queste basi, il MPC calcola volta per volta le successive azioni di controllo ottime.

Una schematizzazione del processo eseguito da un controllore MPC è rappresentata nella figura seguente.

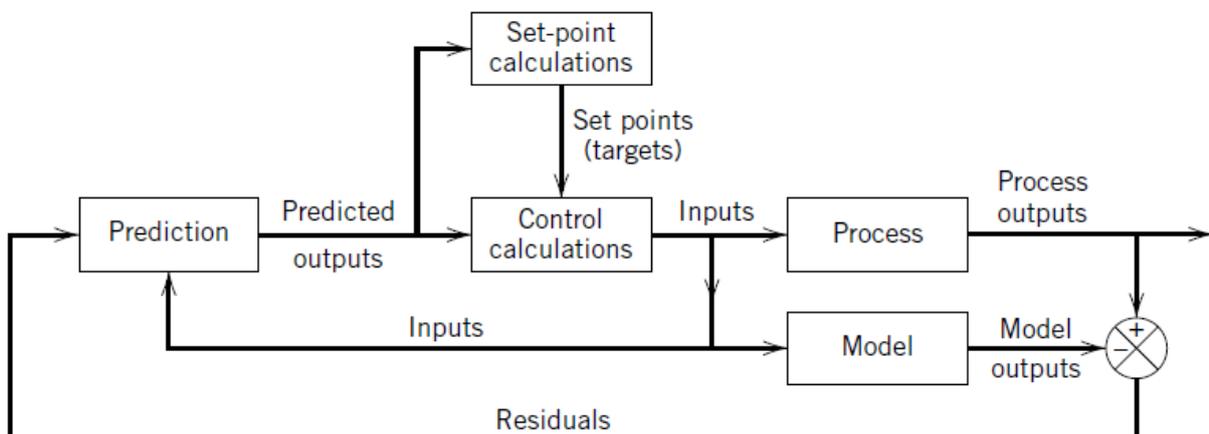


Figura 98. Schema a blocchi del funzionamento di un controllore MPC

Il modello del processo viene usato per prevedere i valori delle variabili di output al passo temporale corrente. I residui, ossia gli scarti tra i valori misurati sul processo fisico e i valori previsti dal modello, vengono reintrodotti come feedback all'interno del blocco di previsione, al fine di generare i valori di

output previsti. Questi vengono utilizzati in due blocchi: il blocco di calcolo dei set point (ossia degli obiettivi) e il blocco di calcolo del controllo. In ambo i blocchi è possibile introdurre i vincoli. Gli obiettivi o set point vengono calcolati mediante il processo di ottimizzazione. Gli input, calcolati dal blocco di calcolo del controllo, sono quindi immessi a controllo del processo fisico e in ingresso al modello, a chiusura del loop.

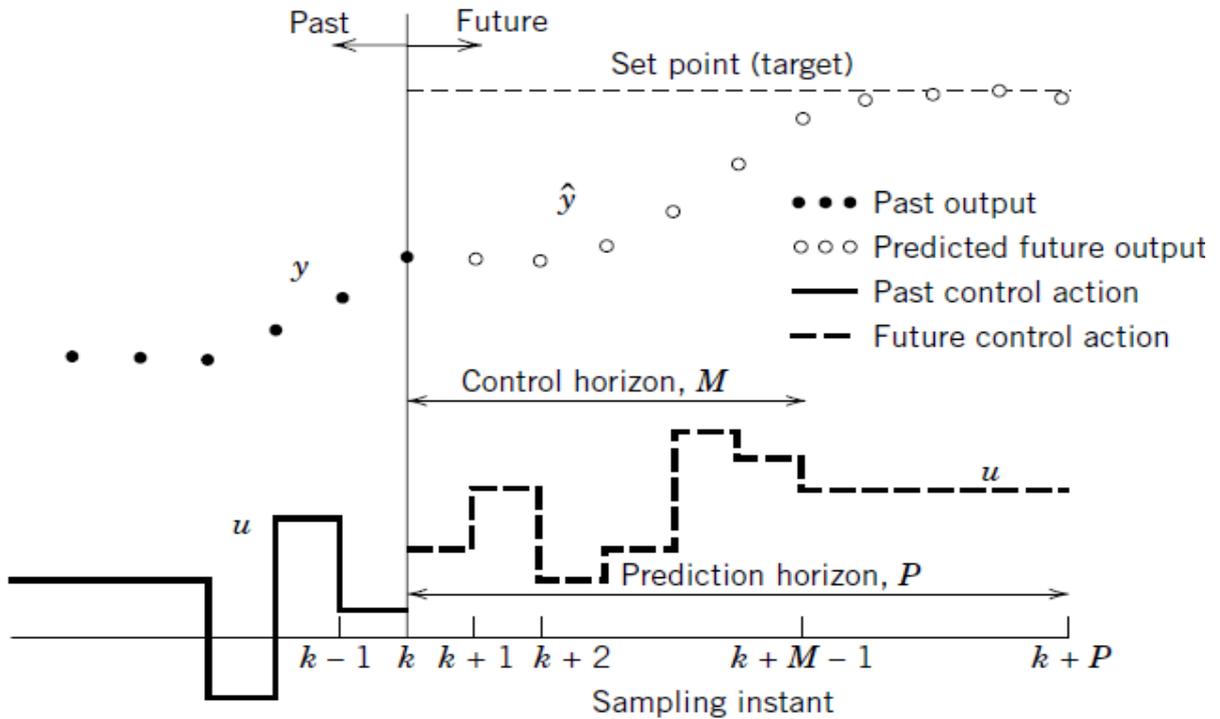


Figura 99. Esempio di funzionamento di controllo MPC

La formulazione della funzione costo, essenziale nell'algoritmo, può essere e.g. del seguente tipo:

$$J = \sum_{i=1}^N w_i^{(x)} [x_i^{(r)}(t) - x_i(t)]^2 + \sum_{i=1}^N w_i^{(u)} [u_i^{(r)}(t) - u_i(t)]^2$$

In cui:

- $w_i^{(x)}$ sono i pesi delle variabili;
- x_i sono le variabili;
- $x_i^{(r)}$ sono i set-point;
- $w_i^{(u)}$ sono i pesi degli output;
- u_i sono gli output;
- $u_i^{(r)}$ sono i valori di riferimento degli output.

Ad ogni timestep, viene risolto un problema di controllo ottimo su un orizzonte temporale finito (composto da un dato numero di timestep), minimizzando la funzione costo sotto dati vincoli.

Un algoritmo MPC lineare opera nel modo seguente. Al timestep corrente:

- Acquisisce (tramite misurazioni o stime) lo stato del sistema;
- Risolve il problema di programmazione quadratica (QP) minimizzando la funzione costo sotto vincoli;
- Applica la soluzione implementando le azioni di controllo ottime riferite al timestep corrente;
- Passa al timestep successivo.

In assenza di vincoli, il MPC lineare si riduce a un controllo a feedback.

L'algoritmo MPC può essere schematizzato dallo schema a blocchi seguente.

La complessità computazionale e la stabilità dipendono dalla scelta del modello, degli obiettivi e dei vincoli; i modelli ottimali costituiscono un compromesso, ossia sono abbastanza descrittivi da rappresentare bene le dinamiche più significative del sistema e al contempo abbastanza semplici ai fini della soluzione del problema di ottimizzazione.

8.4.5 Confronto con metodi di controllo tradizionali (e.g. PID)

Nel caso di un controllo a singolo input e singolo output soggetto a vincoli, metodi di controllo più semplici hanno prestazioni equivalenti al MPC, e.g., un metodo PID con correzione anti-windup; tuttavia, in linea di principio è caratterizzato da uniformità, ossia, tecniche similari sono impiegabili per ampie categorie di problemi, efficientando l'addestramento, i costi e la manutenzione.

8.4.6 Varianti

Varianti del MPC possono essere:

- MPC non-lineare (NMPC), in cui i modelli di previsione usati sono di tipo non-lineare, richiedendo una soluzione iterativa; ciò introduce problematiche numeriche e di stabilità;
- MPC esplicito (EMPC), che consente una valutazione rapida delle leggi di controllo per taluni sistemi, basandosi sulla programmazione parametrica.

8.4.7 Implementazioni

Il MPC è stato implementato in numerosi pacchetti software; una rassegna è stata presentata e.g. da Qin e Badgewell.

Attualmente, tra gli altri, è ad esempio disponibile il toolbox dedicato Model Predictive Control Toolbox facente parte dei pacchetti MATLAB®.

8.4.8 Controlli predittivi applicati all'HVAC

I meccanismi di controllo predittivo sono una valida alternativa ai tradizionali schemi di controllo basati puramente sul feedback, quali controllori a soglia o PID, che negli ultimi anni si sta diffondendo rapidamente in vari settori industriali.

Un controllore predittivo è caratterizzato da una legge di controllo che prende in considerazione anche delle previsioni sull'andamento di alcuni segnali del sistema, potenzialmente esogeni, e guida quindi il sistema in un'ottica preventiva. Tale principio di funzionamento mira ad attuare delle strategie di controllo in modo di intervenire prima ancora che si verifichi un determinato fenomeno non gradito (e.s. superamento di una soglia di sicurezza da parte di una variabile di stato) nel sistema.

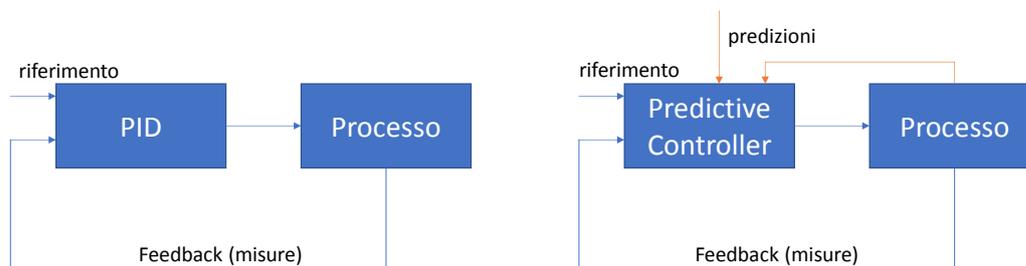


Figura 100. Controllore basato su feedback e controllore predittivo

Tra i vari possibili schemi di controllo predittivi il Model Predictive Control (MPC) si sta dimostrando uno dei più flessibili e facilmente implementabili. La caratteristica più importante dell'MPC è l'utilizzo che fa di un modello matematico del sistema controllato: utilizzando questo modello dinamico l'MPC propaga nel futuro, in particolare in un arco temporale chiamato *orizzonte o finestra di previsione*, gli effetti delle sue strategie di controllo e prende quindi le sue decisioni basandosi su un'ottimizzazione nel lungo termine.

Altra importantissima caratteristica dell'MPC è il così detto "Orizzonte Resiliente": ad ogni passo di campionamento il controllore valuta di nuovo, e quindi riottimizza, la sua strategia di controllo lungo l'orizzonte di predizione, che si è spostato in avanti di un passo di campionamento, considerando lo stato attuale in cui si trova. Questo processo iterativo di ottimizzazione continua dota l'MPC di una intrinseca robustezza, in quanto ad ogni passo corregge la propria scelta di controllo, nonché di performance vicine a quelle ottime, visto che la finestra di predizione si sposta sempre in avanti.

Per questi motivi l'MPC può essere visto come l'anello di collegamento tra il controllo ottimo, tipicamente *open-loop* (e.g. un controllo che assume una conoscenza perfetta del sistema e dei suoi segnali esogeni) ed il controllo basato su feedback, o *closed-loop*.

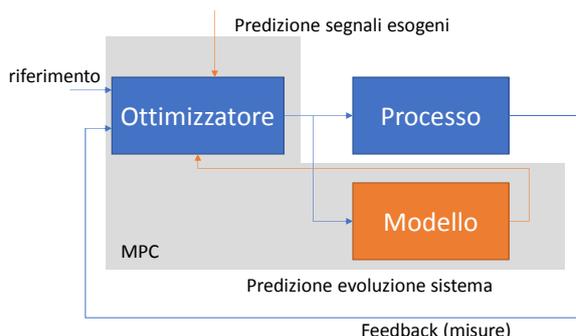


Figura 101. Schema MPC

Dovendo compiere un processo di ottimizzazione, una delle componenti più importanti dell'MPC è la funzione obiettivo, un indice in grado di quantificare le performance che il controllore sta ottenendo nel gestire il sistema, eventualmente in maniera multi-obiettivo. L'MPC inoltre è uno dei metodi di controllo più adatti alla gestione di vincoli, in quanto l'ottimizzazione avviene solo relativamente all'orizzonte di controllo e non è quindi necessario far ricorso alle tecniche di ottimizzazione ad orizzonte infinito.

Nell'ambito dell'automazione dei TBS l'MPC potrebbe sostituire i controllori, ben più elementari, impiegati al momento per gestire aspetti quali la pianificazione degli elettrodomestici smart e il sistema di climatizzazione in un'ottica di ottimizzazione del fabbisogno energetico finalizzata all'impiego ottimale di energia proveniente da fonti rinnovabili e all'utilizzo di risorse a minore costo.

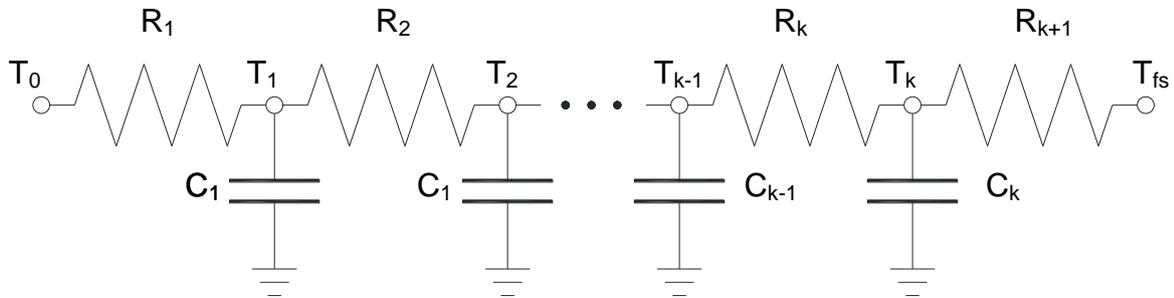
I concetti dietro l'MPC si sposano con un prezzo dell'energia elettrica altamente variabile, in quanto una sua predizione a breve termine potrebbe essere il fattore determinante per un'ottimizzazione energetica di precisione. L'MPC ben si adatta inoltre alle tipiche previsioni relative all'andamento della generazione di potenza dalle fonti energetiche distribuite (e.g. pannelli solari, piccole turbine eoliche, ...) nonché al controllo dei nuovi device che si stanno diffondendo nelle abitazioni moderne (storage energetico, controllore remoto di temperatura, elettrodomestici intelligenti e connessi, ...).

In questa fase è stata valutata la prestazione di un MPC per il controllo del sistema di climatizzazione dell'edificio.

Il modello necessario è costituito dal sistema edificio-impianto di climatizzazione di cui deve essere fornita una descrizione completa. Nel caso di edificio costituito da più unità/zone termiche, è necessaria una descrizione dettagliata dei componenti edilizi che svolgono la doppia funzione di elementi di accumulo e di sorgenti di disturbo del sistema di controllo per effetto delle sollecitazioni climatiche trasmesse. Inoltre, i carichi interni, derivanti dall'utilizzo degli ambienti, ed i carichi solari diretti, provenienti dalle superfici fenestrate, interagiscono contemporaneamente con l'involucro edilizio e con gli impianti. La molteplicità degli elementi presenti e la necessità di ottenere una formulazione in forma differenziale del sistema che consenta la formalizzazione matematica necessaria per la definizione dell'MPC ha determinato la selezione dei modelli utilizzati.

8.4.9 Modello dell'involucro

L'involucro edilizio è descritto mediante un modello 1-dimensionale di una rete elettrica equivalente:



La numerosità e la posizione dei nodi di temperatura è determinata in relazione alle caratteristiche di risposta termica delle pareti. Le posizioni sono determinate in modo non uniforme, ma proporzionale alle risposte ai diversi periodi delle sollecitazioni termiche, come illustrato nel paragrafo 3.9. Ciò consente di ridurre il numero di nodi senza perdita di fedeltà di risposta.

La temperatura esterna è data dalla temperatura fittizia al sole.

La temperatura interna T_0 , è data dalla temperatura fittizia interna, determinata analogamente alla temperatura fittizia al sole ma con riferimento ai carichi radiativi interni, sia in onda corta - radiazione solare diretta - che in onda lunga - radiazione nell'infrarosso dovuta alla componente radiativa del carico interno e allo scambio radiativo con le altre pareti costituenti l'involucro. Le equazioni descrittive del modello sono riportate qui di seguito:

$$C_{i,j,k} \frac{dT_{i,j,k}}{dt} = \frac{T_{i,j,k-1} - T_{i,j,k}}{R_{i,j,k}} - \frac{T_{i,j,k+1} - T_{i,j,k}}{R_{i,j,k+1}}$$

$$T_{i,j,N+1} = T_{fs} = T_e + \frac{G_s \cdot \alpha_s}{h_e}$$

$$T_{i,j,0} = \frac{h_{c,i,j} T_{A,i} + h_{r,i,j} T_{mr,i} + Q_{Ri,j}}{h_{c,i,j} + h_{R,i,j}}$$

Nelle espressioni, il primo pedice (i) si riferisce alla zona termica, il secondo pedice (j) si riferisce al componente edilizio. $Q_{Ri,i}$ è la quota del carico radiativo, sia in onda lunga che in onda corta, nell'ambiente attribuibile alla specifica superficie.

Per i tramezzi ed i divisori, al fine della semplificazione del calcolo, onde evitare l'introduzione di termini interdipendenti da zone termiche adiacenti (non essendo l'ipotesi di diverso utilizzo delle zone termiche significativo rispetto alle finalità del modello), ciascun componente è modellizzato una volta per la zona adiacente, introducendo un nodo fittizio di mezzera, isoterma al nodo adiacente, ossia ipotizzando che il piano di mezzera sia adiabatico.

8.4.10 Modello del pavimento radiante

Il pavimento radiante è descritto mediante un modello 0-dimensionale con 1 solo nodo di temperatura interno al massetto. La verifica di fedeltà ha evidenziato scostamenti accettabili nell'ambito dei periodi significativi per il modello in esame. Le equazioni descrittive del modello sono riportate qui di seguito:

$$C_{floor,i} \frac{dT_{floor,i}}{dt} = \frac{T_{i,floor,0} - T_{floor,i}}{R_{floor,i}} + \frac{T_c + T_{L,i} - 2 \cdot T_{floor,i}}{2 \cdot R_w}$$

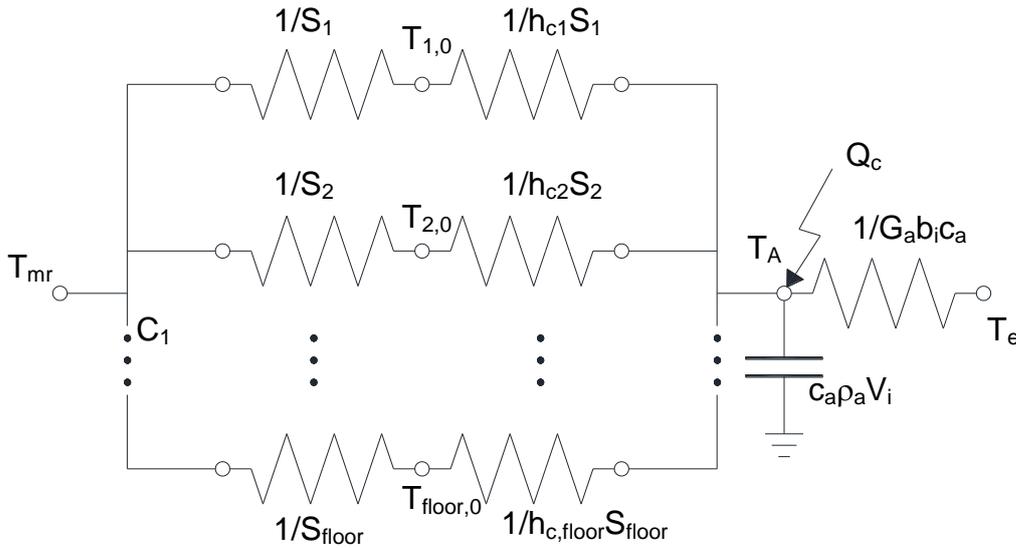
$$G_i c_w (T_c - T_{L,i}) = \frac{T_c + T_{L,i} - 2 \cdot T_{floor,i}}{2 \cdot R_w}$$

$$T_{i,floor,0} = \frac{h_{c,i,floor} T_{A,i} + h_{r,i,floor} T_{mr,i} + Q_{Ri,floor}}{h_{c,i,floor} + h_{R,i,floor}}$$

In cui G è la portata d'acqua. Il modello assume una variazione lineare della temperatura dell'acqua nel pavimento radiante.

8.4.11 Modello dell'ambiente

Ciascun ambiente è descritto mediante un modello 0-dimensionale a due nodi, uno per la temperatura dell'aria ambiente, l'altro per la temperatura media radiante.



Le equazioni descrittive del modello sono riportate qui di seguito:

$$c_a \rho_a V_i \frac{dT_{A,i}}{dt} = \sum_j h_{c,i,j} S_{i,j} (T_{i,j,0} - T_{A,i}) + h_{c,i,floor} S_{i,floor} (T_{i,floor,0} - T_{A,i}) + G_{a,i} b_i c_a (T_e - T_{A,i}) + Q_{c,i}$$

$$T_{mr,i} = \frac{\sum_j S_{i,j} T_{i,j,0} + S_{i,floor} T_{i,floor}}{\sum_j S_{i,j} + S_{i,floor}}$$

In cui V è il volume dell'ambiente, G_a è la portata d'aria e b è l'efficienza di recupero di calore. Q_c è la quota convettiva dei carichi interni.

8.4.12 Modello dell'impianto

L'impianto è descritto mediante un modello 0-dimensionale. L'equazione descrittiva del modello è:

$$M c_w \frac{dT_c}{dt} = \gamma P - \sum_j G_j c_w (T_c - T_{L,i}) - \alpha (T_c - T_r)$$

In cui M è la massa d'acqua nel serbatoio inerziale, γ è il coefficiente di prestazione della pompa di calore con assorbimento elettrico P. La perdita termica in centrale è modellizzata mediante il coefficiente di accoppiamento termico α. Poiché il sistema di distribuzione è interno all'involucro edilizio sono state trascurate le perdite di tale porzione d'impianto.

8.4.13 Modello dell'MPC

Il modello dell'MPC utilizzato è dato quindi dalla combinazione delle equazioni proposte:

$$\begin{aligned}
 C_{i,j,k} \frac{dT_{i,j,k}}{dt} &= \frac{T_{i,j,k-1} - T_{i,j,k}}{R_{i,j,k}} \frac{T_{i,j,k+1} - T_{i,j,k}}{R_{i,j,k+1}} \\
 T_{i,j,N+1} &= T_{fs} = T_e + \frac{G_s \cdot \alpha_s}{h_e} \\
 T_{i,j,0} &= \frac{h_{c,i,j} T_{A,i} + h_{r,i,j} T_{mr,i} + Q_{Ri,j}}{h_{c,i,j} + h_{R,i,j}} \\
 C_{floor,i} \frac{dT_{floor,i}}{dt} &= \frac{T_{i,floor,0} - T_{floor,i}}{R_{floor,i}} + \frac{T_c + T_{L,i} - 2 \cdot T_{floor,i}}{2 \cdot R_w} \\
 G_i c_w (T_c - T_{L,i}) &= \frac{T_c + T_{L,i} - 2 \cdot T_{floor,i}}{2 \cdot R_w} \\
 T_{i,floor,0} &= \frac{h_{c,i,floor} T_{A,i} + h_{r,i,floor} T_{mr,i} + Q_{Ri,floor}}{h_{c,i,floor} + h_{R,i,floor}} \\
 c_a \rho_a V_i \frac{dT_{A,i}}{dt} &= \sum_j h_{c,i,j} S_{i,j} (T_{i,j,0} - T_{A,i}) + h_{c,i,floor} S_{i,floor} (T_{i,floor,0} - T_{A,i}) + G_{a,i} b_i c_a (T_e - T_{A,i}) + Q_{c,i} \\
 T_{mr,i} &= \frac{\sum_j S_{i,j} T_{i,j,0} + S_{i,floor} T_{i,floor}}{\sum_j S_{i,j} + S_{i,floor}} \\
 M c_w \frac{dT_c}{dt} &= \gamma P - \sum_j G_i c_w (T_c - T_{L,i}) - \alpha (T_c - T_r)
 \end{aligned}$$

Avendo questo modello al suo interno, ripetuto per il numero di appartamenti, il controllore MPC è in grado di scegliere i profili delle variabili di controllo (potenza elettrica assorbita dal sistema di riscaldamento centrale P , portata d'acqua G_i e d'aria G_{ai} per ciascun appartamento) prevedendo come la temperatura dell'ambiente interno agli appartamenti ne sarà influenzato con anticipo.

La funzione obiettivo, che cattura le performance del controllore, è stata definita come funzione di penalità con valore monotono crescente con lo scostamento dalle condizioni di set-point e con il costo dell'energia.

$$J = \sum_h^N \sum_i \beta_i(h) (T_{A,i}(h) - T_{A,i}^{ref,i}(h))^2 + \delta \sum_h^N (T_c(h) - T_c^{ref}(h))^2 + \sigma \sum_h^N P(h) C(h)$$

Il primo termine rappresenta il tracking della temperatura di comfort. Nei periodi in cui non è richiesta la climatizzazione (ambiente non utilizzato), il coefficiente di peso β è assegnato pari a 0. Assegnano a β un valore più elevato è assegnata una priorità alle condizioni di comfort.

Il secondo termine rappresenta il tracking della temperatura per quanto riguarda la temperatura dell'accumulo di acqua calda nel sistema centrale.

Il terzo termine è quello relativo all'ottimizzazione del costo energetico. Il termine $C(h)$ rappresenta il costo unitario, tempo-variante. La produzione di energia dell'impianto fotovoltaico concorre a determinare il costo unitario.

Tutti gli obiettivi sono caratterizzati da una sommatoria tra l'istante di tempo corrente $h = 0$ e l'ultimo istante in finestra di predizione $h = N$, fornendo dunque un indice di performance nel medio periodo.

Sono state condotte delle prime simulazioni per la verifica dell'approccio, valutando l'efficacia del controllore con orizzonte temporale di 3 ore.

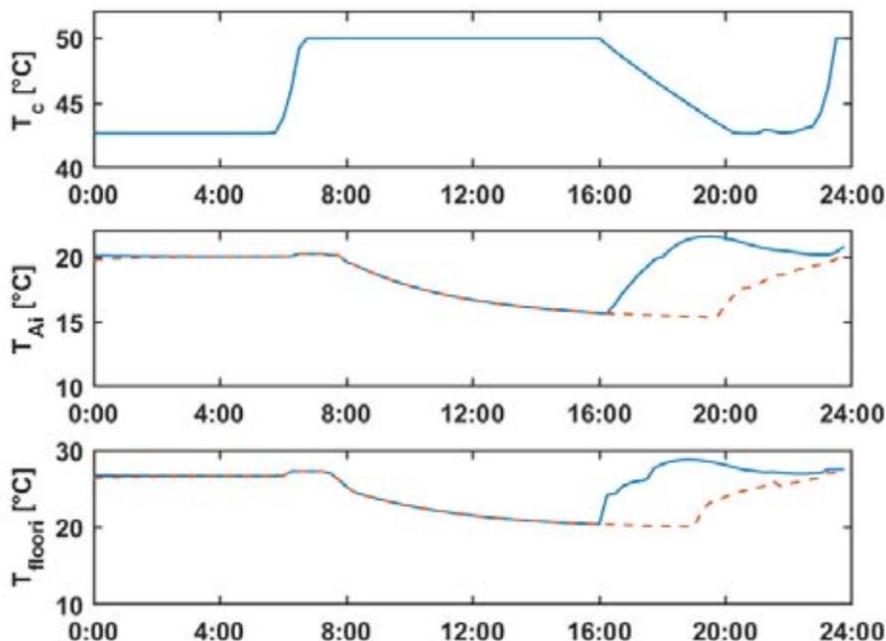


Figura 102. Temperature del boiler centrale, dell'ambiente (mediata)1 nei due cluster di appartamenti e dei rispettivi pavimenti (mediata).

La figura riporta l'andamento di alcune temperature di interesse (centrale, ambiente e pavimento) per due cluster da 24 appartamenti l'uno. I cluster sono stati differenziati in base agli orari di occupazione dell'appartamento da parte dei proprietari: entrambi i cluster sono abitati dalle 0:00 alle 8:00, ma il primo cluster (blu) torna ad essere abitato alle 19:00, mentre il secondo alle 21:00 (arancione). Il giorno di riferimento è una tipica giornata di gennaio con temperatura massima di 8 gradi ed una minima di 0.

Da questo setup di validazione si vede la natura predittiva del controllo: il cluster blu inizia il riscaldamento alcune ore prima della sua effettiva occupazione, applicando de facto un pre-riscaldamento, in modo tale che la temperatura d'ambiente supera la soglia desiderata (20°) il tanto che basta per far in modo che all'arrivo del proprietario l'appartamento abbia la temperatura desiderata.

Un simile comportamento è presente anche per il cluster arancione, ma in questo caso, per via della domanda energetica degli appartamenti del cluster blu, già abitati, il sistema non è in grado di riscaldare il secondo cluster adeguatamente e nonostante il pre-riscaldamento la temperatura target è raggiunta solo dopo circa mezz'ora rispetto alla richiesta.

8.5 Esempio di controllo BACS per applicazioni di Demand Side Management

Come visto, i sistemi di Building Automation and Control System per il monitoraggio e il controllo degli edifici possono essere utilizzati per attuare politiche di Demand Side Management.

Al fine di proporre un esempio pratico, per testare le logiche di controllo proposto, si sono progettate logiche DSM da integrare nel sistema BACS del laboratorio universitario. Si prende in esame un ambiente all'interno del dipartimento DIAEE dell'Università degli studi La Sapienza di Roma, che è stato adibito a laboratorio domotico. L'ambiente, ristrutturato di recente, è dotato di sistemi BACS per l'automazione ed il controllo dei dispositivi e delle funzioni quali HVAC, illuminazione, controllo accessi, impianto elettrico.

L'obiettivo del progetto è quello di controllare e limitare l'assorbimento di corrente dalla rete elettrica per finalità di riscaldamento dell'ambiente interno in funzione della disponibilità di energia elettrica prodotta dal sistema fotovoltaico, dello stato di carica della batteria di accumulo e delle esigenze di condizionamento nell'ambiente.

Si vuole ottimizzare l'utilizzo dell'energia prodotta localmente dal sistema fotovoltaico poiché non risulta conveniente né remunerativo immetterla in rete dopo il termine del quinto conto energia.

Nel panorama delle tecniche per la demand side management, questo tipo di intervento è definito come "peak clipping", anche detto "peak shaving".

Poiché l'infrastruttura BACS è già presente nell'ambiente del laboratorio, il progetto risulta interessante poiché non necessita dell'installazione di hardware aggiuntivi. Si determina così un'ottimizzazione energetica del sistema, orientata all'autoconsumo di energia da fonti rinnovabili localmente prodotta, a fronte di nessuna spesa aggiuntiva per adeguamenti sull'impianto.

Il sistema BACS è basato su protocollo Konnex. Il sistema di supervisione che gestisce tutte le funzioni domotiche dell'ambiente utilizzato nel laboratorio è ThinKnx. Il sistema SCADA è composto da una rete bus che interconnette i sensori e gli attuatori del sistema a un'intelligenza in grado di elaborare funzioni logiche complesse sui dati provenienti dal bus KNX. L'intelligenza del sistema è Micro Z-Wave, un server che controlla tutti i sistemi collegati al bus KNX e, allo stesso tempo, in grado di inviare comandi tramite protocollo wireless Z-Wave con comunicazione radio a 868.4 MHz, utilizzato nel caso specifico per la comunicazione con la valvola di regolazione del radiatore.

8.5.1 Generalità

In attesa della realizzazione del sistema di controllo BEMS effettivo operativo all'interno dell'edificio case study, si è deciso di realizzare un test bed all'interno del laboratorio di impianti elettrici e domotici del dipartimento di ingegneria elettrica dell'Università Sapienza di Roma.

L'ambiente oggetto di questo esempio di pianificazione è uno spazio all'interno del dipartimento DIAEE, provvisto di tecnologie avanzate per il monitoraggio ed il controllo dei parametri ambientali.

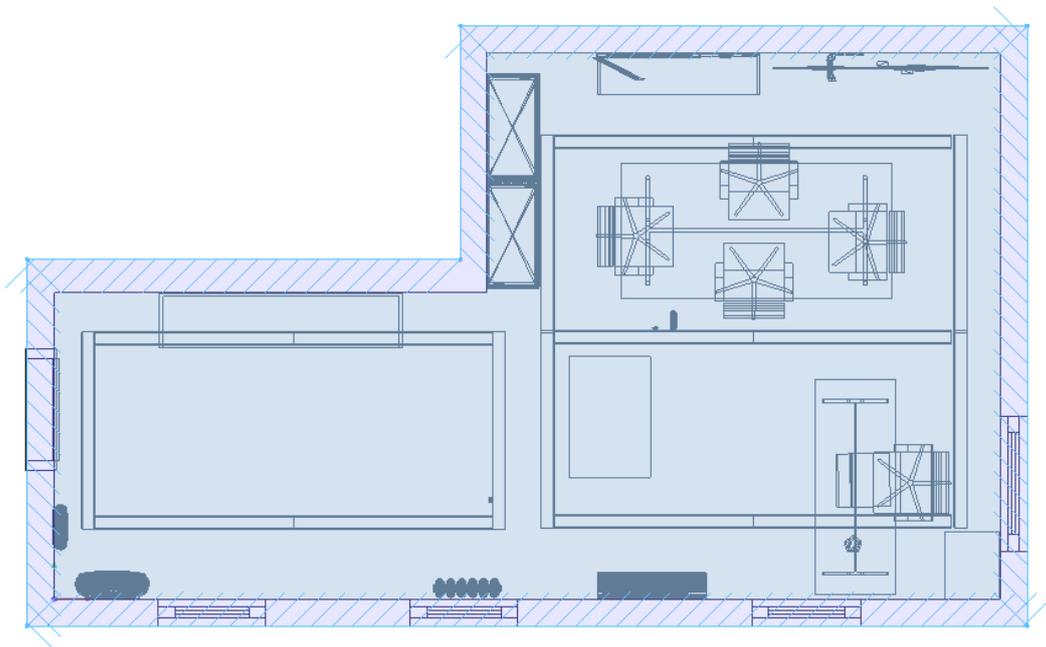


Figura 103. Planimetria del laboratorio domotico

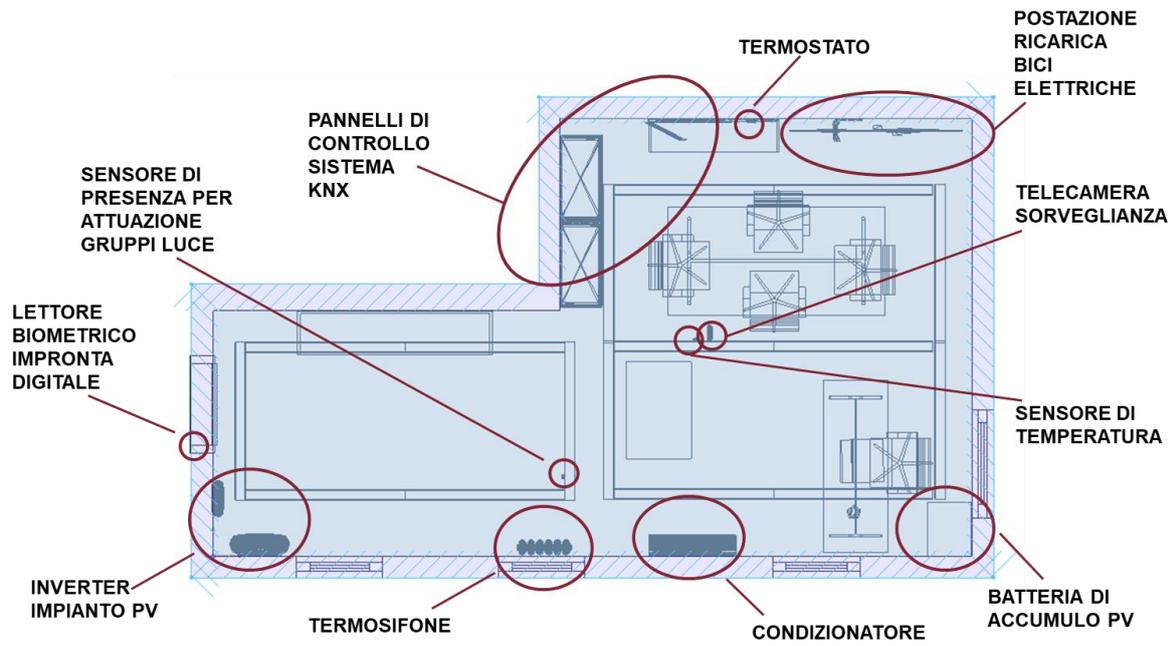


Figura 104. Sensori ed elementi terminali all'interno del laboratorio domotico



Figura 105. Render 3D del laboratorio domotico



Figura 106. Vista 3D particolare del laboratorio domotico



Figura 107. Particolare del laboratorio con pannello di controllo sistema KONNEX

L'accesso all'ambiente è controllato da lettore biometrico di impronta digitale.

I sensori per il monitoraggio delle variabili ambientali presenti nella smart room sono:

- sensori di presenza, che gestiscono i gruppi luce al neon;
- termostato e sensori di temperatura, per il controllo dell'impianto di condizionamento;
- telecamera di sorveglianza.

L'ambiente è servito da una smart microgrid. Oltre alla tradizionale connessione alla rete elettrica, localmente è presente un sistema di generazione elettrica da pannelli fotovoltaici. Inoltre, è presente una batteria di accumulo che è direttamente ricaricata all'impianto fotovoltaico.



Figura 108. Inverter dell'impianto fotovoltaico (a sinistra) e batteria d'accumulo fotovoltaico (a destra) presenti nel laboratorio domotico.

Il sistema di condizionamento dell'aria in ambiente è composto da due diversi sistemi:

- un radiatore tubolare dotato di valvola termostatica a 5 posizioni;
- un condizionatore da parete.

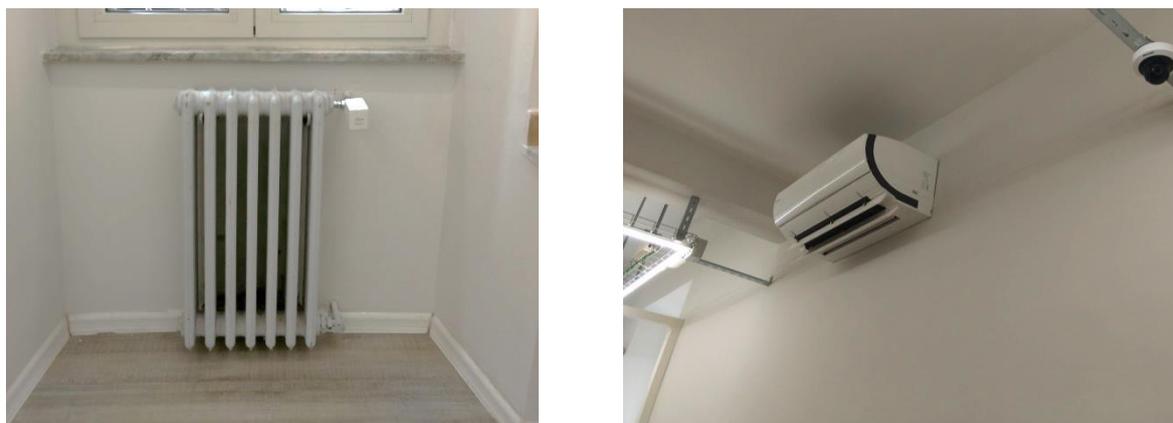


Figura 109. Radiatore tubolare con valvola di regolazione (a sinistra) e condizionatore da parete (a destra)

Le esigenze di riscaldamento durante il periodo invernale possono essere quindi soddisfatte utilizzando energia elettrica oppure gas. La scelta di azionare l'uno o l'altro sistema dipende, secondo la logica proposta, dalla disponibilità di energia prodotta localmente o accumulata nella batteria.

Altri carichi del sistema, trascurabili al momento rispetto al condizionamento, sono:

- illuminazione, composta da tre gruppi luce led attuati separatamente ed automaticamente sulla base del sensore di presenza;
- PC e videoterminali;
- ricarica biciclette elettriche.



Figura 110. Postazione PC (a sinistra) e bicicletta elettrica (a destra)

Il laboratorio è organizzato in tre sezioni di attività: impianti, microgrid e domotica.

Nella sezione impianti vengono svolte attività di ricerca riguardanti, in generale, i temi di ricerca afferenti al settore scientifico disciplinare dei sistemi elettrici per l'energia. Sono presenti banchi attrezzati e strumenti di misura e verifica degli impianti elettrici.

La sezione microgrid ospita una rete elettrica evoluta sperimentale "LAMBDA" costituita da un quadro elettrico supervisionato e telecontrollato, un generatore fotovoltaico da 12 kW posto in copertura, un microgeneratore fotovoltaico da 1,5 kW posto in copertura dotato di inverter comunicante, un accumulo elettrico completo di inverter, un gruppo elettrogeno da 5 kVA per il funzionamento in isola della microrete, un sistema di building automation per la gestione dell'illuminazione, della climatizzazione e dei carichi elettrici del laboratorio, un sistema SCADA per la gestione, la supervisione ed il telecontrollo della microgrid.

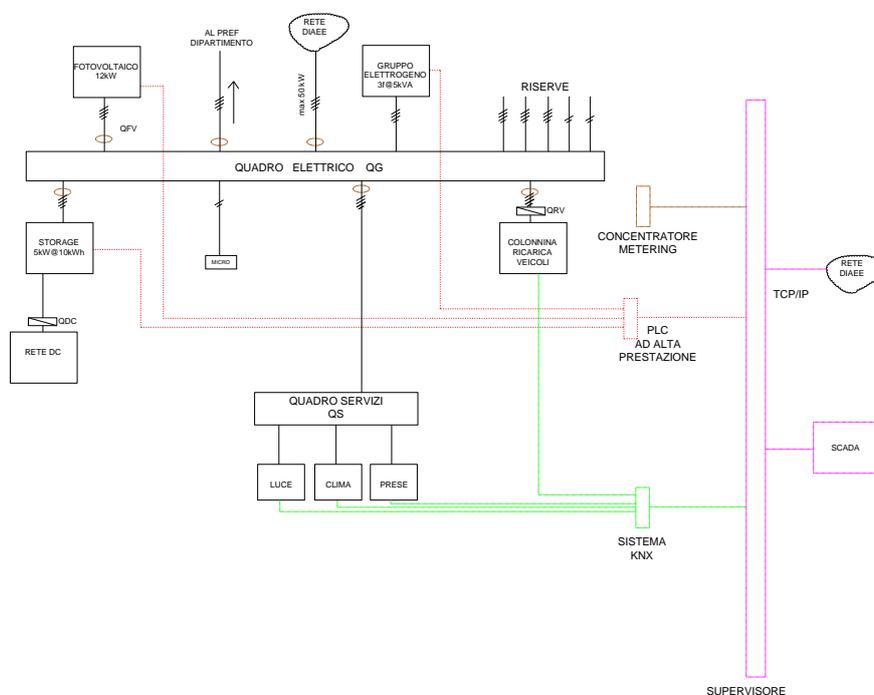


Figura 111. Schema a blocchi della micro grid LAMBDA.



Figura 112. Quadro elettrico della micro grid LAMBDA.

La sezione domotica ospita una serie di apparecchiature e sottosistemi di home e building automation che consentono l'implementazione e la modellazione di sistemi di diversi standard (Konnex, Modbus, DALI, Zwave, Arduino, ecc.) e integrati in un supervisore centralizzato e comunicante. La sezione domotica ospita il progetto "domotic remote lab" di Ateneo costituito da un impianto di building automation programmabile e gestibile integralmente da remoto anche attraverso una telecamera per realizzare attività di ricerca e didattica da remoto.



Figura 113. Domotic Remote Lab LAMBDA.

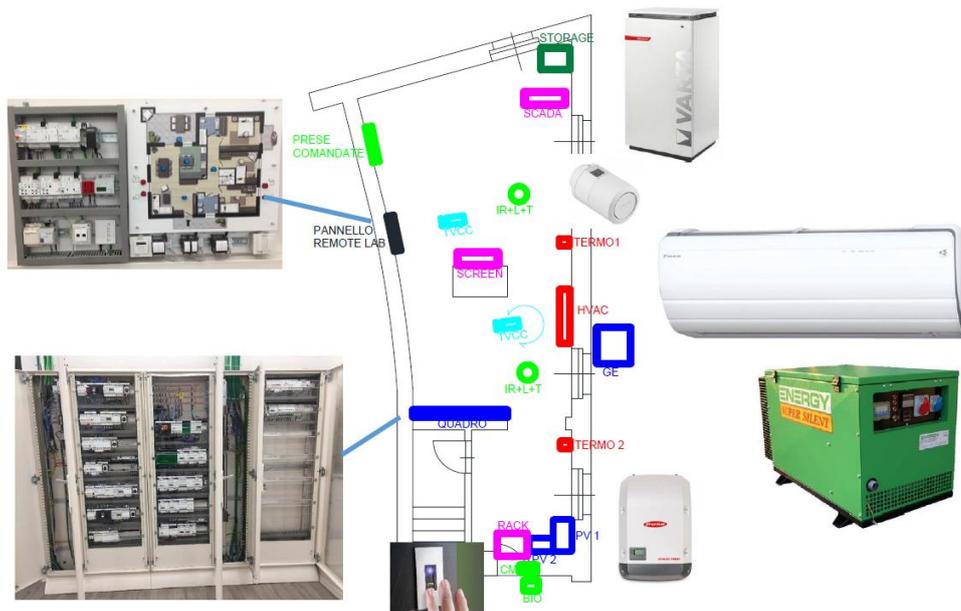


Figura 114. Schema dei componenti e delle risorse presentinella micro grid LAMBDA.

Le sezioni interoperano per consentire la modellazione di reti elettriche evolute per edifici residenziali e terziari, dotate di sorgenti, carichi e apparati comunicanti e gestiti da sistemi intelligenti.

Il sistema BACS è basato su protocollo Konnex. Il sistema di supervisione che gestisce tutte le funzioni domotiche dell'ambiente utilizzato nel laboratorio è ThinKnx. Il sistema SCADA è composto da una rete bus che interconnette i sensori e gli attuatori del sistema a un'intelligenza in grado di elaborare funzioni logiche complesse sui dati provenienti dal bus KNX e, allo stesso tempo, in grado di inviare comandi tramite protocollo wireless Z-Wave con comunicazione radio a 868.4 MHz, utilizzato nel caso specifico per la comunicazione con la valvola di regolazione del radiatore.



Figura 115. ThinKnx Micro Z-Wave

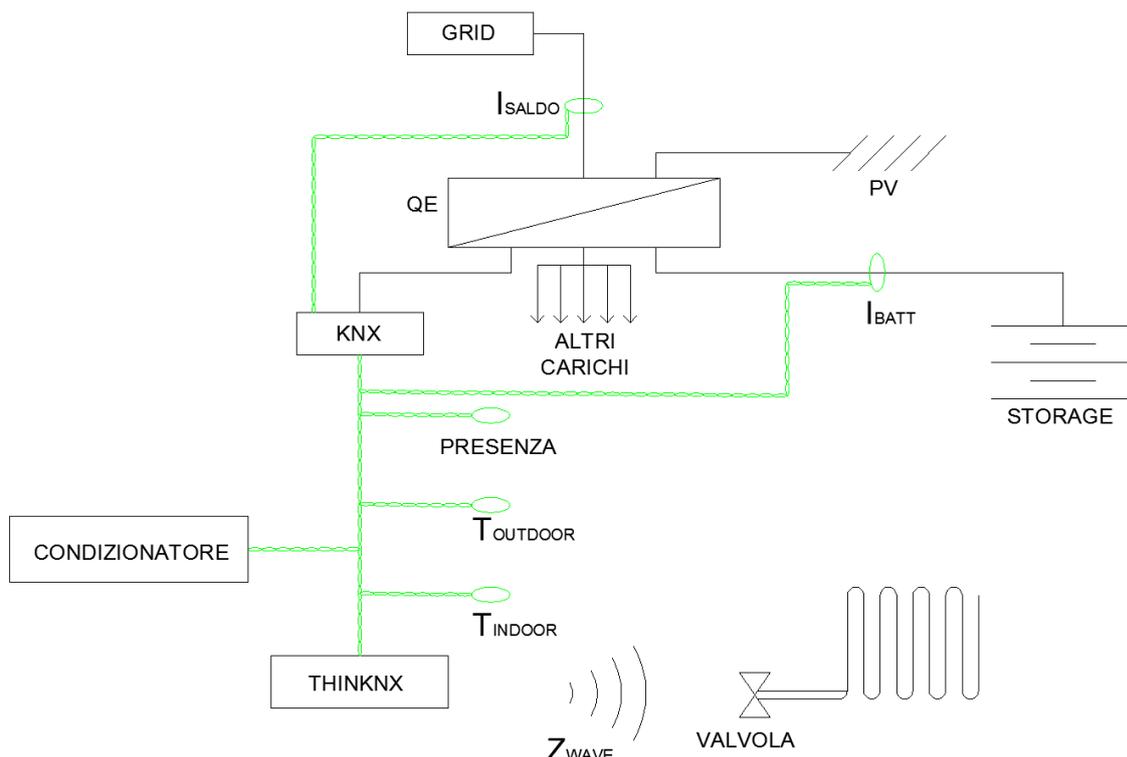


Figura 116. Architettura della rete di alimentazione elettrica e del sistema BACS

Il laboratorio si presta a simulazioni di edificio sugli impianti termici anche se non dotato di geotermia poiché è dotato di doppio sistema di riscaldamento:

- un sistema di climatizzazione a pompa di calore con percentuale di aria primaria, gestito per intero dal sistema Konnex;
- un sistema di riscaldamento a termosifoni con valvole termostatiche, gestito per intero dal sistema Zwave interconnesso con il sistema Konnex.

8.5.2 Sistema di controlli implementato

Il sistema di controllo implementato realizza una simulazione di ambiente residenziale alimentato da rete elettrica evoluta con risorse energetiche multiple.

Le sorgenti sono:

- la rete pubblica
- il generatore fotovoltaico
- lo storage elettrico
- il gruppo elettrogeno di emergenza

I sistemi di riscaldamento sono:

- due valvole termostatiche Zwave che agiscono su due termosifoni
- una interfaccia intesis boc che agisce sul climatizzatore a pompa di calore

La rete dati è costituita da:

- una rete LAN
- un server connesso alla rete LAN dotato di supervisore centrale SCADA su piattaforma Movicon (MS main supervisor) sul quale sono allocate le logiche BEMS
- una rete Konnex dotata di supervisore locale (LS local supervisor) sul quale sono allocati i controlli semplici

- una rete Wifi Zwave per le valvole termostatiche collegata al local supervisor LS.
- Una rete modbus per i segnali dei quadri elettrici e degli impianti elettrici di servizio al laboratorio collegata alla rete LAN in modbus/TC/PIP.

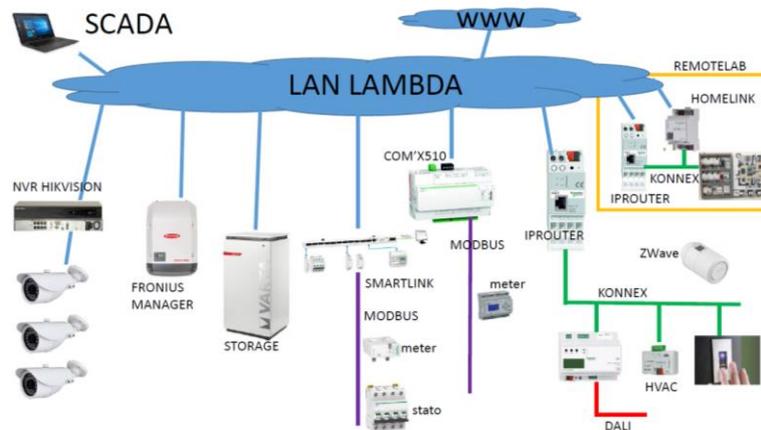


Figura 117. Schema a blocchi della rete dati della micro grid LAMBDA.

Il controllo acquisisce i seguenti segnali di ingresso:

- corrente di saldo della microgrid
- corrente di batteria dello storage
- livello SOC batteria
- temperatura indoor
- temperatura outdoor
- presenza persona
- data e ora

Il controllo agisce sui seguenti output:

- on/off climatizzatore
- setpoint climatizzatore
- fan speed climatizzatore
- posizione valvola

Il sistema BACS deve essere programmato per seguire le logiche di demand side management. Come detto, la logica proposta si concentra sulla scelta di operare il riscaldamento dell'aria ambiente tramite il condizionatore elettrico o il termosifone, sulla base delle risorse energetiche disponibili e delle necessità di condizionamento.

Per prima cosa, è necessario definire quali sono le grandezze variabili in ingresso al sistema, che sono monitorate da sensori in ambiente e determinano le azioni di output.

Nell'esempio proposto ci si riferisce al sistema sopra descritto durante il periodo di funzionamento invernale. In questo caso, la temperatura esterna è sempre inferiore della temperatura interna dell'ambiente laboratorio, per cui il segno della differenza tra ambiente interno ed esterno non si configura come una grandezza variabile. La temperatura di set point all'interno della stanza è impostata a 20°C.

In input all'intelligenza del sistema BACS è necessario conoscere le seguenti grandezze:

- disponibilità di potenza da impianto fotovoltaico;
- segno della corrente di saldo I_s : se la corrente di saldo è minore o uguale a zero è indice del fatto che nel sistema c'è un esubero della potenza prodotta da fotovoltaico;
- valore della temperatura interna all'ambiente condizionato rispetto al set point: ciò indica se è necessaria potenza per il riscaldamento o se, al contrario, non è necessario attivare l'impianto;
- livello percentuale della batteria di accumulo: la carica della batteria è prevista fino all'80%. Non si intende superare questo livello per mantenere un margine da dedicare ad altre politiche energetiche;
- occupazione dell'ambiente: anche se l'aria ambiente si trovasse al di sotto della temperatura di set point invernale, è necessario sapere se sono presenti persone nell'ambiente per determinare l'accensione dell'impianto di riscaldamento.

In base al valore degli input, l'intelligenza ThinkKnx decide i comandi in uscita da impostare.

I comandi in output al sistema sono:

- apertura/chiusura della valvola del termosifone: il comando viene impartito tramite connessione radio Z-Wave;
- on/off del condizionatore: collegato all'intelligenza tramite bus KNX;
- utilizzo della batteria di accumulo: è possibile stabilire se e quando la batteria di accumulo deve essere utilizzata per alimentare i carichi elettrici (condizionatore) oppure è a un livello di scarica tale da dover essere ricaricata.

I possibili stati del sistema individuati sono 24.

STATO DEL SISTEMA	VALORI INPUT					AZIONI OUTPUT		
	Disponibilità Potenza PV	Potenza PV in esubero oltre CDZ (Isaldo ≤ 0)	Ti < Tsetpoint (20°C) (1/0)	Livello storage %	Occupazione (1/0)	Valvola termosifone (1/0)	Condizionatore (1/0)	IBATTERIA [A]
1	1	1	1	= 80	1	0	1	= 0
2	1	1	1	= 80	0	0	1	= 0
3	1	1	1	< 80	1	0	1	> 0
4	1	1	1	< 80	0	0	1	> 0
5	1	1	0	= 80	1	0	0	= 0
6	1	1	0	= 80	0	0	0	= 0
7	1	1	0	< 80	1	0	0	> 0
8	1	1	0	< 80	0	0	0	> 0
9	1	0	1	= 80	1	0	1	= 0
10	1	0	1	= 80	0	0	1	= 0
11	1	0	1	< 80	1	0	1	= 0
12	1	0	1	< 80	0	0	0	> 0
13	1	0	0	= 80	1	0	0	= 0
14	1	0	0	= 80	0	0	0	= 0
15	1	0	0	< 80	1	0	0	> 0
16	1	0	0	< 80	0	0	0	> 0
17	0	0	1	20 ÷ 80	1	0	1	< 0
18	0	0	1	20 ÷ 80	0	0	0	= 0
19	0	0	1	< 20	1	1	0	= 0
20	0	0	1	< 20	0	0	0	= 0
21	0	0	0	20 ÷ 80	1	0	0	= 0
22	0	0	0	20 ÷ 80	0	0	0	= 0
23	0	0	0	< 20	1	0	0	= 0
24	0	0	0	< 20	0	0	0	= 0

Figura 118. Stati possibili del sistema di controllo

Gli stati da 1 a 8 rappresentano una situazione nella quale c'è abbondante produzione di energia elettrica da fotovoltaico. In questi casi si predilige il riscaldamento della stanza tramite condizionatore elettrico, quando necessario. Se la batteria di accumulo risulta scarica, c'è sufficiente energia per ricaricarla. È possibile che l'ambiente si trovi ad una temperatura diversa dalla temperatura di set point, ma nel momento di produzione fotovoltaica risulti libero da persone. In questi casi, se la batteria di accumulo è carica, potrebbe risultare conveniente preriscaldare l'ambiente nell'attesa dell'arrivo degli occupanti. Questo sistema è tanto più efficiente quanto più la progettazione dell'ambiente è stata orientata a limitare dispersioni termiche. Per sfruttare al meglio il preriscaldamento sarebbe opportuno inserire nell'intelligenza del sistema una pianificazione degli orari in cui l'ambiente sarà occupato, in modo da prepararlo termicamente quando ce ne fosse reale necessità. Qualora la batteria fosse pienamente carica e non ci fosse esigenza di climatizzazione/condizionamento pur avendo presenza di persone nell'ambiente, ad esempio se l'ambiente è ben coibentato e raggiunge e mantiene facilmente la temperatura oppure nel caso di giornate con una temperatura mite, l'energia prodotta dall'impianto fotovoltaico sarebbe sprecata. È importante monitorare se questo fenomeno si ripete frequentemente. L'impianto fotovoltaico in questo caso potrebbe essere sovradimensionato per le reali esigenze termiche dell'ambiente, tuttavia è possibile sfruttare la potenza installata prevedendo l'inserimento di altri carichi in ambiente "programmabili", cioè che non necessitano obbligatoriamente di essere alimentati in un certo istante. Un esempio può essere l'installazione di una stazione di ricarica per biciclette elettriche, il cui assorbimento risulta essere all'incirca di 100 W per veicolo e che tendenzialmente risulta parcheggiata presso l'ambiente di studio/lavoro per un tempo sufficiente a ricaricarsi nel momento in cui sia maggiormente disponibile energia da fonte rinnovabile.

Gli stati da 9 a 16 rappresentano una situazione nella quale c'è produzione di energia elettrica dall'impianto fotovoltaico ma non sovrabbondante, anzi appena sufficiente a coprire le esigenze di climatizzazione con l'utilizzo del condizionatore. Nel caso in cui non ci fosse esigenza di climatizzare l'ambiente, la seconda funzione in ordine di priorità è sempre la carica della batteria di accumulo. Solo quando la batteria di accumulo ha raggiunto la piena carica è possibile pensare al preriscaldamento dell'ambiente vuoto in attesa

dell’arrivo degli occupanti. Anche in questo caso, nei periodi in cui le giornate sono miti, gli ambienti vuoti e la batteria carica, l’energia prodotta dal sistema fotovoltaico andrebbe sprecata, seppur in misura minore rispetto al caso precedente. Per ovviare a ciò è sempre conveniente pensare di inserire nell’ambiente dei carichi programmabili.

Gli stati da 17 a 24 rappresentano una situazione in cui la produzione di energia elettrica da fotovoltaico è assente. In questo caso, se la batteria di accumulo risulta carica (SOC > 20%), si pianifica di riscaldare l’ambiente interno utilizzando il condizionatore alimentato dallo storage. Quando la carica della batteria scende ad un valore al di sotto del 20%, l’intelligenza del sistema spegne il condizionatore ed aziona l’apertura della valvola del termosifone. Da quel momento in poi, le esigenze di riscaldamento espletate dal termosifone.

Prima di mettere in opera il sistema con la regolazione degli impianti sulla base di politiche di Demand Side Management, le logiche impostate saranno testate tramite un sistema di simulazione costruito con Arduino. Si utilizzerà una scheda Arduino Mega 2560, un microcontrollore basato sul microchip ATmega2560.

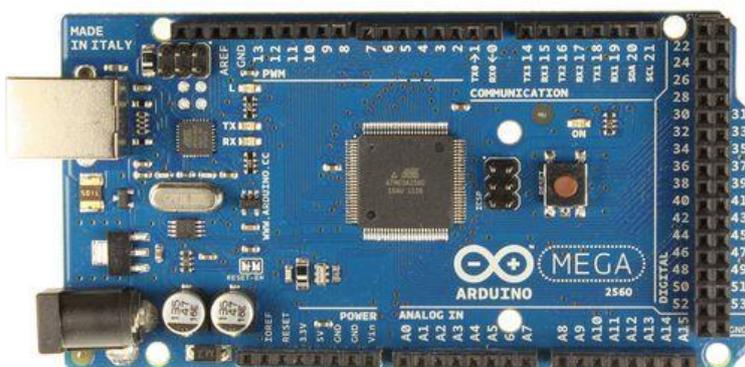


Figura 119. Arduino Mega 2560

La scheda sarà programmata con il software IDE (software ufficiale di programmazione per Arduino). La scheda è dotata di pin che consentono input analogici e pin digitali.

Le variabili scelte per il controllo del sistema sono le seguenti.

Input / Output	Variabili	Analogico / Digitale	Valori
I	Corrente nel nodo di saldo	A	4-20 mA, 0-10 V
I	Corrente batteria	A	4-20 mA, 0-10 V
I	Temperatura indoor	A	4-20 mA, 0-10 V
I	Temperatura outdoor	A	4-20 mA, 0-10 V
I	Presenza	D	1/0
I	Controllo automatico	D	ON/OFF
I	Livello batteria (SOC)	A	%
O	Accensione condizionatore	D	1/0
O	Temperatura di set point condizionatore	D	18°C – 22°C
O	Fan condizionatore	D	0/1/2/3
O	Posizione valvola termosifone	D	0/1/2/3/4/5

Le variabili utilizzate in questa seconda fase mostrano la possibilità di costruire un sistema di regolazione più sofisticato rispetto all’esempio proposto. Infatti, per quanto riguarda il riscaldamento dell’ambiente, si nota che il condizionatore ed il termosifone possono essere regolati non solo per lo stato on/off, ma è anche possibile settare la potenza di ventilazione del condizionatore o l’apertura della valvola di

regolazione del radiatore a differenti livelli intermedi, sulla base delle necessità di climatizzazione/condizionamento.

La sequenza di test prevede che la scheda Arduino simuli il comportamento dei sensori nell'ambiente che restituiscono complessivamente lo stato di input. Attraverso il bus KNX, gli input sono elaborati dall'intelligenza ThinkKnx la quale, sulla base della programmazione DSM, restituisce in output i comandi da impartire agli attuatori.

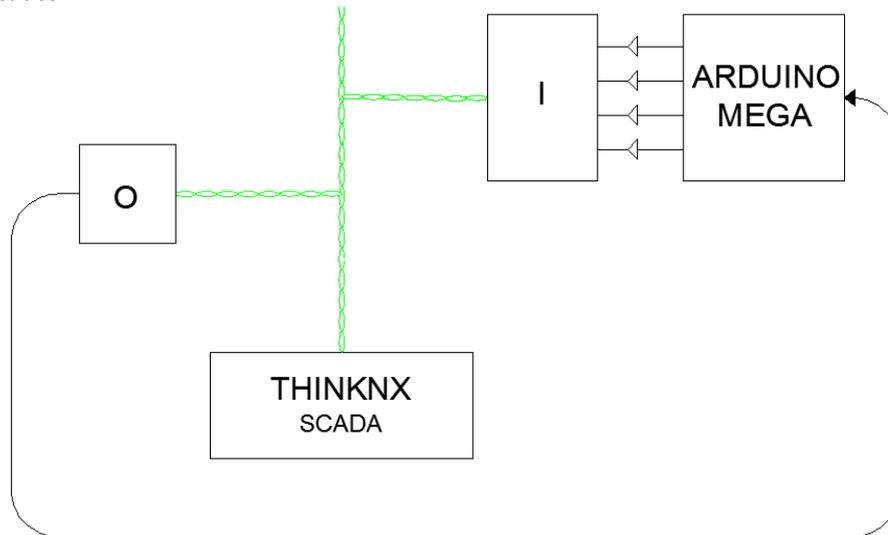


Figura 120. Architettura del sistema di test

9 Campagna di analisi svolta per l'edificio

9.1 Descrizione del sito oggetto di analisi

Il case study considerato è riportato schematizzato nella figura seguente.

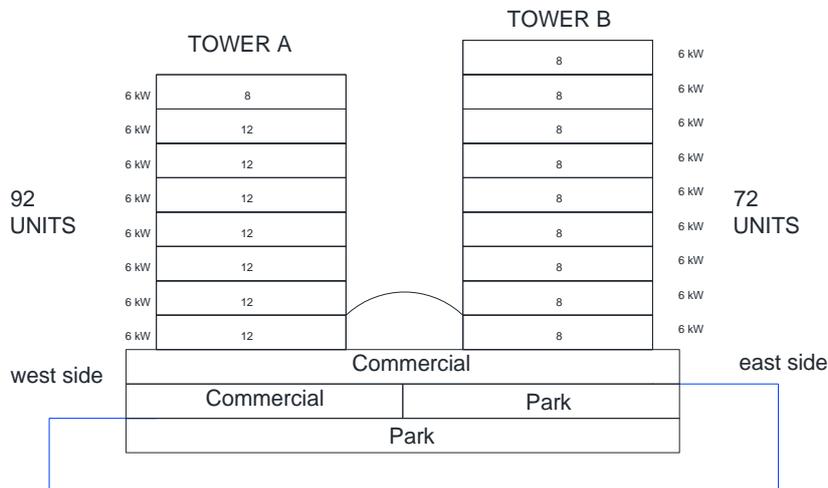


Figura 121. Schema semplificato del case study.

Il complesso è classificato nZEB in quanto l'isolamento termico soddisfa i requisiti e l'energia annuale consumata dai sistemi tecnici fissi è coperta dalla generazione di PV locale. Per quanto riguarda gli impianti tecnici fissi, l'edificio è privo di gas e completamente elettrico. L'alimentazione è fornita da un unico punto di connessione con la rete e una sottostazione privata MT / BT. Il riscaldamento e il raffreddamento sono forniti da una stazione comune dotata di tre pompe di calore geotermiche reversibili (GSHP) con una potenza elettrica nominale di 70 kW ciascuna. Nelle abitazioni vengono utilizzati sistemi di riscaldamento a pavimento. ACS è centralizzata. Un sistema fotovoltaico (PV) è utilizzato come generazione locale.

Carichi elettrici della Torre A. La microrete elettrica privata fornisce anche le unità residenziali della Torre A. La potenza massima di ogni appartamento è di 6 kW, principalmente a causa della stufa elettrica.

Carichi elettrici della torre B. I carichi elettrici della torre B e le unità commerciali sono forniti direttamente dalla rete pubblica da Point of Connections indipendenti, uno per ogni unità.

BACS. Un sistema centrale di controllo dell'automazione degli edifici (BACS) collegato a un computer centrale gestisce e gestisce tutti i sistemi tramite un software SCADA.

Alla fine, la microgrid privata fornisce:

- il sistema tecnico fisso per tutto il complesso di due torri;
- l'illuminazione comune e altri carichi comuni
- le singole unità residenziali della sola torre A.

I carichi elettrici considerati sono riportati nella tabella seguente.

Tabella 15. Carichi elettrici considerati

	max	average
	kW	kW
Tower A	100	60
Tower B	100	60
Commercial	80	50
GSHPs A	70	40
GSHPs B	70	40
GSHPs C	70	40
Parking and other	10	10
Global	500	300

Lo schema sinottico degli impianti è riportato nella figura seguente.

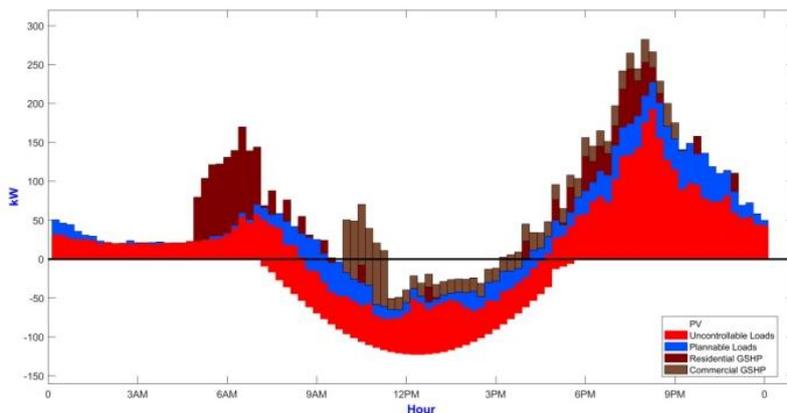


Figura 123. Profilo di carico senza controllo.

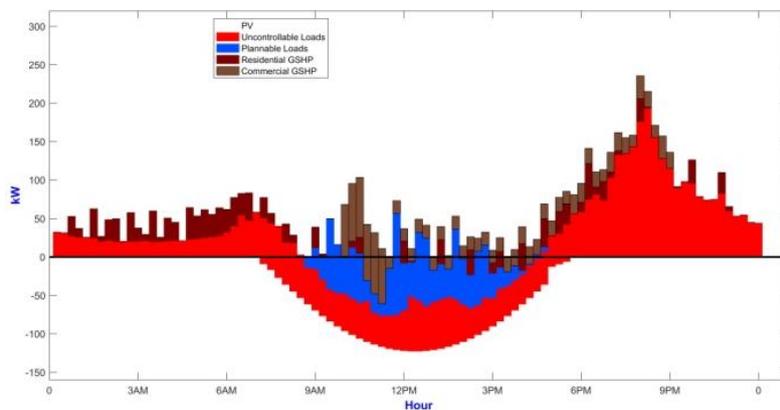


Figura 124. Profilo di carico con controllo.

Tabella 16. Impatto dei controlli nel comportamento energetico dell’edificio senza controllo (N) e con controllo (C).

		November		December		January		February		March	
		N	C	N	C	N	C	N	C	N	C
Peak Power Pp	kW	285	215	277	208	302	246	282	205	291	206
Peak Reduction ratio	p.u.	-	0.76	-	0.75	-	0.81	-	0.72	-	0.71
Daily energy consumption	kWh	2260	2148	2548	2316	2927	2737	2530	2298	2512	2467
Daily Energy Reduction ratio	p.u.	-	0.95	-	0.91	-	0.94	-	0.91	-	0.98
Residential GSHP Energy	kWh	221	127	421	303	661	547	414	298	371	270
Commercial GSHP Energy	kWh	199	198	312	314	458	458	307	307	305	305
Daily Energy from grid	kWh	1509	1358	1980	1744	2245	2051	1724	1458	15175	1448
Grid Energy Reduction ratio	p.u.	-	0.9	-	0.88	-	0.91	-	0.85	-	0.95
Equivalent hours	h	7.9	10	9.18	11.12	9.69	11.11	8.9	11.2	8.61	11.95
Self-Consumption	kWh	752	791	568	571	682	685	806	840	994	1019
Grid Feeding	kWh	39	0	3	0	3	0	35	0	25	0
SCR	p.u.	0.95	1.00	0.99	1.00	0.99	1.00	0.96	1.00	0.97	1.00

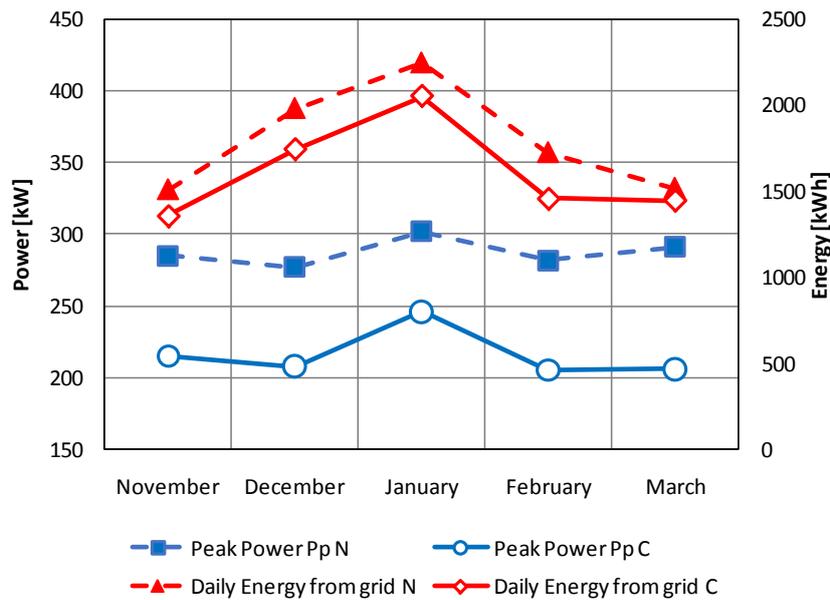


Figura 125. Potenza massima ed energia prelevata dalla rete per i giorni di esempio durante il periodo di riscaldamento.

Come descritto in una precedente ricerca è stato sviluppato un modello bottom-up completo dei sistemi. I dispositivi elettrici sono definiti in base al carico di picco, al ciclo di lavoro e alla richiesta di energia in un periodo di quindici minuti. Il loro carico effettivo viene simulato con un approccio statistico che simula la presenza e le abitudini degli utenti. Questi sono usati anche come parametri di input per il modello di riscaldamento e raffreddamento dell'edificio, insieme ai dati climatici. I carichi di riscaldamento sono utilizzati per simulare la temperatura del deposito di energia termica centrale e il funzionamento delle pompe di calore. La temperatura ambiente locale è controllata da PI. Il funzionamento delle pompe di calore è on-off controllato in più passaggi del numero di compressori di ciascuna unità.

Nella attività di ricerca svolta sono stati simulati 4 diversi scenari:

Scenario 1. Solo sistemi fissi (GSHP) con PV

In primo luogo, è stato simulato l'utilizzo del sistema convenzionale con una microgrid che forniva solo i GSHP e senza BEMS. Il modello genera un profilo di carico residenziale di unità singola di riferimento. L'energia annuale spesa è di circa 123 MWh. L'energia annua generata dal fotovoltaico è di circa 130 MWh. Durante i mesi estivi:

- la potenza immessa in rete può raggiungere valori di circa 100 kW, l'intera quantità di energia generata dall'impianto fotovoltaico, anche se la domanda di edifici è positiva.
- Il rapporto di autoconsumo dell'energia generata dal PV è molto basso.

La figura mostra l'energia mensile spesa dal TBS (12 barre positive) e l'energia mensile generata dal sistema fotovoltaico (12 barre negative). La linea nera è il saldo mensile. Notiamo che durante il periodo estivo la linea nera è negativa, quindi l'energia generata è più consumata localmente.

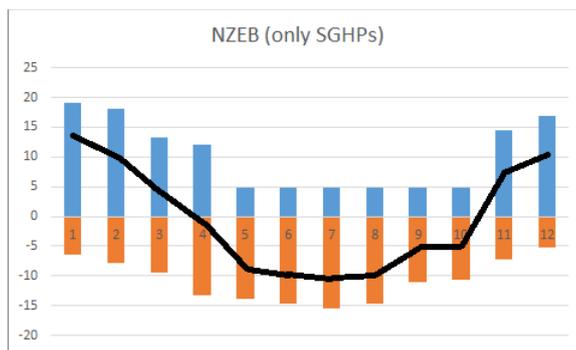


Figura 126. Scenario 1. Energia mensile consumata dai TBS (valori positivi) vs energia generata dal PV.

Scenario 2. Microgrid privato (GSHP e Tower A) con PV.

In un secondo scenario, la microgrid viene simulata con le unità residenziali di Tower A. Il modello suggerito consente di ottenere un'aggregazione di molte abitazioni con occupazione stocastica e utilizzo che è il profilo di carico dell'edificio al POC. L'energia spesa annualmente viene valutata circa 240 MWh.

La Figura mostra l'energia mensile spesa dalla microgrid tra cui la Torre A e la TBS e l'energia mensile generata dal sistema fotovoltaico. La linea nera è il saldo mensile. Notiamo che durante il periodo estivo la linea nera è abbastanza uguale a zero e negativa solo per agosto. Tuttavia, poiché non vi è alcun controllo, il fabbisogno energetico medio zero del sistema deriva da periodi di media in cui la generazione di PV è molto più elevata rispetto ai carichi locali e ai periodi in cui l'intero carico è positivo.

In questo scenario durante i mesi estivi: - la potenza immessa in rete può raggiungere valori di circa 50 kW; - il rapporto di autoconsumo dell'energia generata dal fotovoltaico è di circa il 50%. La Figura 8 e la Figura 9 mostrano un esempio di profilo giornaliero in agosto e marzo, rispettosamente

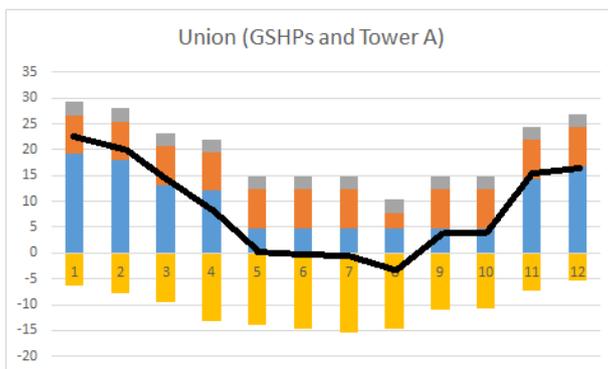


Figura 127. Scenario 2. Risultati.

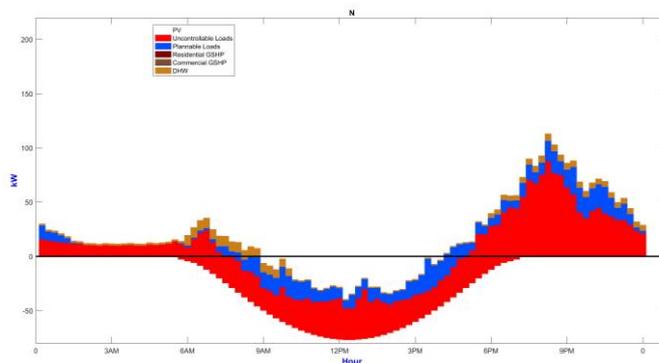


Figura 128. Scenario 2. Profilo giornaliero di agosto.

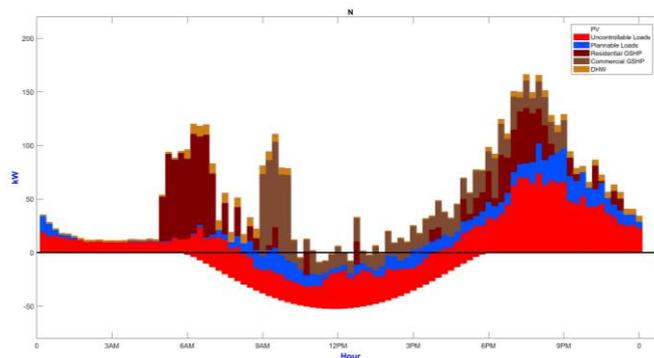


Figura 129. Scenario 2. Profilo giornaliero di marzo.

Scenario 3. Microgrid privata con PV e BEMS

La microrete è la stessa dello scenario 2 ma è stato simulato un DSM gestito dal BEMS. Gli ambiti del DSM sono:

- minimizzare i picchi di potenza;
- massimizzare l'autoconsumo dell'elettricità fotovoltaica;
- controllare la domanda globale netta nel punto di connessione;
- minimizzare il conto in uno scenario con un costo più dinamico dell'elettricità;
- in uno scenario futuro, ottimizzando le prestazioni di una stazione di ricarica per veicoli elettrici.

I controlli BEMS simulati:

- temperature di setpoint di riscaldamento e raffreddamento,
- funzionamento dei frigoriferi per evitare picchi;
- programmazione di apparecchi intelligenti (lavastoviglie DWs e lavatrici WM);

La regola generale per il BEMS è preservare il comportamento degli utenti, libero di usare i servizi e le apparecchiature a piacimento. Il sistema HBES è in grado di controllare in tempo reale:

- temperatura di set-point delle caldaie e dei puffer;
- temperatura di set-point di comfort ed economia di ogni unità;
- temperatura ambiente nominale effettiva TS di ciascuna unità.
- attivazione di riscaldamento e raffreddamento nell'unità commerciale.

Le quantità mensili di energia sono le stesse dello scenario 2, ma il profilo di potenza istantaneo è ottimizzato con una riduzione del picco e un aumento dell'autoconsumo.

Le figure mostrano il profilo di potenza dello Scenario 3 nello stesso giorno di agosto e il giorno di marzo. Durante l'estate, la potenza immessa nella rete è inferiore allo Scenario 2, con un valore di circa 20 kW. Nel giorno di marzo la potenza è sempre positiva con un comportamento di carico.

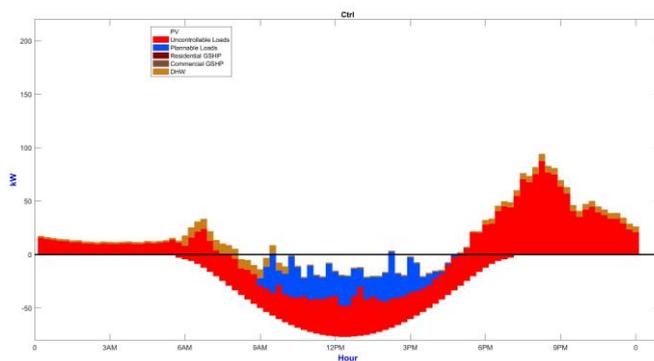


Figura 130. Scenario 3. Profilo giornaliero di agosto.

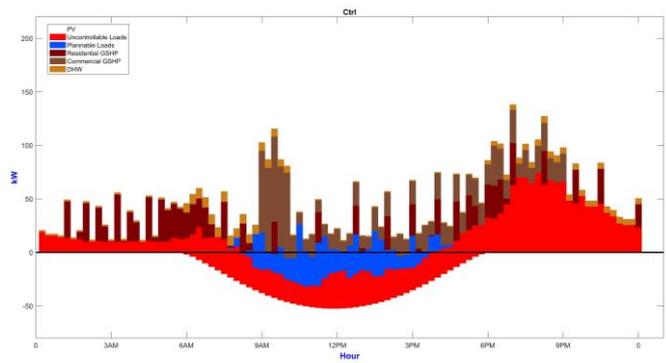


Figura 131. Scenario 3. Profilo giornaliero di marzo.

Scenario 4. Aggregatore (GSHP, Torre A, Torre B e Commerciale) con PV e BEMS

Il profilo di carico dell'unità commerciale è caratterizzato da un carico elevato, durante le ore di apertura e un carico molto basso per il resto della giornata (i negozi standard sono stati considerati come altri, come ristorazione e artigianato, hanno profili di carico molto diversi che ridurrebbero il natura generale della ricerca). Inoltre, non ci sono carichi spostabili poiché l'elettricità viene utilizzata principalmente per l'illuminazione, ad eccezione dell'HVAC. Si noti che il profilo di carico POC combinato effettivo dipende dall'estensione relativa delle unità commerciali e residenziali della Torre B.

La Figura mostra l'energia mensile spesa dall'intera aggregazione (Torre A, Torre B, Commerciale e TBS). In questo scenario l'energia è sempre positiva con il comportamento del carico anche ad agosto.

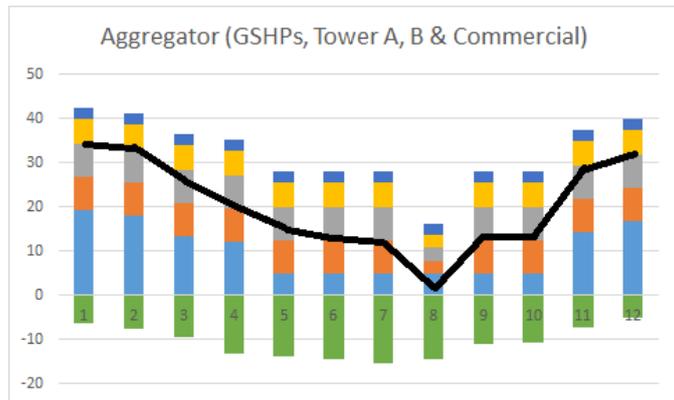


Figura 132. Scenario 4. Risultati.

Tutti i risultati sono inseriti in una pubblicazione dal titolo: Aggregation of users in a residential/commercial building managed by a building energy management system (BEMS), IEEE IAS Transactions on Industry Applications.

10 Conclusioni

L'approccio suggerito nella presente ricerca, consistente nell'aggregazione dei piccoli utenti di un edificio o di un gruppo di edifici in un grande utente fornito da una microgrid comune con un singolo punto di connessione, si è dimostrato estremamente efficace per consentire una gestione ottimale dell'energia attraverso il controllo del sistema HVAC utilizzato come volano energetico per attuare politiche di demand side management.

Il modello suggerito trasforma un gruppo di molti piccoli utenti indipendenti con pochi carichi poco flessibili, di basso valore e con un comportamento caotico cumulativo, a un singolo utente di grandi dimensioni con un profilo flessibile e controllato e un alto valore di potenza.

È stato analizzato il contributo dovuto all'aggregazione di carichi residenziali e commerciali.

È stato analizzato e simulato in particolare un sistema di controllo avanzato dei sistemi HVAC pronto per essere implementato in un caso reale sotto osservazione.

I risultati mostrano che il vantaggio di questo approccio è principalmente riferito all'aumento del carico generale che consente il pieno autoconsumo della potenza generata localmente. Nel caso di esempio di aggregazione considerato nelle simulazioni, l'impatto del controllo è più importante sulla riduzione della potenza di picco rispetto all'autoconsumo. I risultati mostrano che l'aggregazione consente di ottenere un rapporto di autoconsumo SCR di quasi il 100% anche senza controllo. Il controllo è molto efficace nella riduzione della potenza di picco con valori del 25-30%. Ciò è dovuto alla maggiore potenza di picco derivante dalla combinazione del carico commerciale con quelli residenziali che può essere efficacemente ridotta dalla gestione collaborativa dell'energia tramite BEMS.

Lo studio presentato in questo documento è un ulteriore step a un ampio problema che dovrebbe essere ulteriormente studiato e applicato in casi reali per monitorarne l'effettiva efficacia di funzionamento.

I risultati ottenuti nella ricerca sono estremamente importanti poiché consentono di sviluppare modelli migliorabili per garantire un comportamento più realistico che deve essere convalidato con operazioni in tempo reale, non appena il case study sarà pienamente operativo.

In sintesi, i risultati raggiunti possono essere descritti in:

- analisi di architetture impiantistiche innovative a servizio di edifici multi unità a prevalente destinazione abitativa (Multi Unit Residential Building MURB) costituiti dal palazzo/condominio con unità immobiliari (appartamenti, uffici e negozi) dislocate verticalmente su più piani, e con servizi comuni di connettività e parcheggi.
- Modellazione degli impianti tecnici (elettrici e termici HVAC) a servizio di edifici MURB.
- Sviluppo di controlli avanzati per la gestione di sistemi HVAC mediante controllori PID e di tipo predittivi (MPC) al fine di perseguire logiche di demand side management della potenza elettrica sfruttando l'inerzia termica dell'edificio e dell'impianto meccanico.
- Simulazioni di calcolo dei controlli PID e MPC attraverso indicatori energetici e prestazionali.
- Sviluppo di un modello di sistema di monitoraggio energetico avanzato innovativo definito EMIS Energy Management Information System per il monitoraggio continuativo della prestazione energetica dell'edificio.
- Predisposizione all'implementazione in campo dei controlli progettati, in un edificio di tipo MURB disponibile e predisposto ad ospitare i controlli realizzati.
- Predisposizione, nello stesso edificio MURB del punto precedente, di un sistema di monitoraggio energetico elettrico e termico.
- Realizzazione di un ambiente simulativo di edificio all'interno di un laboratorio universitario.

L'attività di monitoraggio energetico elettrico e termico dell'edificio multifamiliare dotato di impianti ad elevato contenuto tecnologico e sistemi di gestione ottimizzata mediante building automation, è stata avviata mediante installazione del sistema di metering elettrico e termico ed è in corso di attuazione.

I risultati saranno disponibili a fine stagione. In attesa delle rilevazioni in campo, è stata analizzata la prestazione del sistema mediante simulazione del comportamento termico e controllistico. L'esito ha

confermato le attese illustrando la capacità del sistema proposto di sfruttare la capacità termica dell'edificio per introdurre una flessibilità del carico elettrico, consentendo la riduzione dei picchi di assorbimento di potenza elettrica e un incremento significativo dell'autoconsumo della produzione locale da rinnovabile. Le analisi preliminari illustrano la capacità del controllo BEMS di edifici "gas-free" di realizzare un'utenza flessibile, capace quindi di reagire con un feedback positivo ad eventuali riduzioni del prezzo dell'energia a fronte di incremento della produzione della rete, semplicemente includendo il costo dell'energia nella funzione obiettivo di controllo.

11 Riferimenti bibliografici

- [1] Direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica degli edifici
- [2] Legge 90/2013, Conversione, con modificazioni, del decreto-legge 4 giugno 2013, n. 63. Disposizioni urgenti per il recepimento della Direttiva 2010/31/UE del Parlamento europeo e del Consiglio del 19 maggio 2010, sulla prestazione energetica nell'edilizia per la definizione delle procedure d'infrazione avviate dalla Commissione europea, nonché altre disposizioni in materia di coesione sociale
- [3] UNI/TS 11300-1 Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale
- [4] UNI CEI EN ISO 50001, Sistemi di gestione dell'energia - Requisiti e linee guida per l'uso
- [5] UNI CEI EN 16247-1:2012 "Diagnosi energetiche - Parte 1: Requisiti generali".
- [6] UNI EN 15232 Efficienza Energetica: impatto dell'automazione sulle prestazioni energetiche degli edifici
- [7] UNI 13786 Caratteristiche termiche dinamiche. Metodi di calcolo
- [8] Norma CEI EN 50090 del CLC/CT 205;
- [9] Norme EN ISO 16484 del CEN/TC 247;
- [10] CEI 64-8/8.1 Efficienza energetica degli impianti elettrici
- [11] CEI 205-2 Guida ai sistemi BUS su doppino per l'automazione della casa e negli edifici, secondo le norme CEI EN 50090
- [12] CEI 205-14 Guida alla progettazione, installazione e collaudo degli impianti HBES
- [13] CEI 205-18 Guida all'impiego dei sistemi di automazione degli impianti tecnici negli edifici
- [14] Fascicule de documentation AFNOR X30-147«Energy Measurement plan – Design and implementation”
- [15] L. Martirano, “Domotica e building automation per l'efficienza energetica degli edifici”, Rivista AEIT, N.9, Settembre 2009.
- [16] Parise, G.; Martirano, L., "Impact of building automation, controls and building management on energy performance of lighting systems," Industrial & Commercial Power Systems Technical Conference - Conference Record 2009 IEEE , vol., no., pp.1,5, 3-7 May 2009
- [17] Brenna, M.; Falvo, M.C.; Foadelli, F.; Martirano, L.; Poli, D., Sustainable Energy Microsystem (SEM): preliminary energy analysis, Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), Washington DC, USA, 16-20 Jan. 2012, 2012 IEEE PES
- [18] M. Brenna, M.C. Falvo, F. Foadelli, L. Martirano, F. Massaro, D. Poli, A. Vaccaro, Challenges in Energy Systems for the Smart-Cities of the Future, 2nd ENERGYCON Conference & Exhibition, 2012 (Future Energy Grids and Systems Symposium, Firenze, 9-12 Settembre 2012
- [19] G. Parise, L. Martirano, L. Parise, M. Mitolo, Safety Evolution of Residential Microsystems, 2nd ENERGYCON Conference & Exhibition, 2012 (Future Energy Grids and Systems Symposium, Firenze, 9-12 Settembre 2012
- [20] G. Parise, L. Martirano, L. Parise, Evoluted Architectures for Smart Micro Grids, 2013 IEEE IAS Annual Meeting, Orlando (USA), 6-11 October 2103
- [21] L. Martirano, S. Fornari, A. Di Giorgio, and F. Liberati, “A case study of a commercial/residential microgrid integrating cogeneration and electrical local users,” in Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2013 12th International Conference on, 2013, pp. 363–368.
- [22] G. Parise, L. Martirano, L. Parise, Ecodesign of Ever Net-Load Microgrids, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 50 Issue 1, 2014
- [23] R. Lamedica, A. Capasso, A Bottom-Up approach to residential load modeling", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, n.2, Maggio 1994.
- [24] I. A. Sajjad, M. Manganelli, L. Martirano, R. Napoli, G. Chicco, G. Parise “Net Metering Benefits for Residential Buildings: A Case Study in Italy”, Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2015 15th International Conference on, 2015
- [25] G. Gross, “Key issues and challenges in the deepening penetration of demand response resources”, *Summer School on Smart Grid*, Salerno, July 2015.

- [26] M. Coppo, “Controllo coordinato e distribuito di reti elettriche di distribuzione attive”
- [27] G. Graditi, M.G. Ippolito, R. Lamedica, A. Piccolo, A. Ruvio, E. Santini, P. Siano, G. Zizzo, Innovative control logics for a rational utilization of electric loads and air-conditioning systems in a residential building, *Energy and Buildings*, Volume 102, 1 September 2015, Pages 1-17, ISSN 0378-7788
- [28] M.G. Ippolito, E. Riva Sanseverino, G. Zizzo, Impact of building automation control systems and technical building management systems on the energy performance class of residential buildings: An Italian case study, *Energy and Buildings*, Volume 69, February 2014, Pages 33-40, ISSN 0378-7788
- [29] Intisar A. Sajjad; Roberto Napoli; Gianfranco Chicco; Luigi Martirano, A conceptual framework for the business model of smart grids, 2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)
- [30] J.L. Enos, *Petroleum Progress and Profits: A History of Process Innovation, 1962*, MIT Press, Cambridge, MA.
- [31] M. Brenna; M. C. Falvo; F. Foadelli; L. Martirano; D. Poli, From Virtual Power Plant (VPP) to Sustainable Energy Microsystem (SEM): An opportunity for buildings energy management, *Industry Applications Society Annual Meeting, 2015 IEEE*
- [32] Luigi Martirano; Roberto Marrocco; Francesco Liberati; Alessandro Di Giorgio, KNX protocol compliant load shifting and storage control in residential buildings, *Industry Applications Society Annual Meeting, 2015 IEEE*
- [33] Edwin Xavier Domínguez; Pablo Arboleya; Felix Manuel Lorenzo, Computer tool for assessing the selection of distributed generation systems in NZEB, *2015 IEEE-EEEIC*
- [34] Oscar Hernandez Uribe; Matilde Santos; Maria C. Garcia-Alegre; Domingo Guinea , A context-awareness architecture for managing thermal energy in an nZEB building, *2015 IEEE First International Smart Cities Conference (ISC2)*
- [35] Tarek Samarji; Adnan Jouni; Ali Karaki, Net zero energy buildings: Application in Lebanon on a typical residential building, *2012 International Conference on Renewable Energies for Developing Countries (REDEC)*
- [36] L. Martirano; G. Parise; M. C. Falvo; U. Grasselli; A. Di Giorgio, On the integration of small scale storage at home: Electrical and control design, *2015 IEEE/IAS 51st Industrial & Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS)*
- [37] E. Currà; E. Habib, Riqualficazione energetica dell’architettura residenziale bellica in Italia, *Colloqui.AT.e 2016, Convegno Ar.Tec – Matera*
- [38] L. Martirano ; G. Parise ; G. Greco ; M. Manganelli ; F. Massarella ; M. Cianfrini ; L. Parise ; P. di Laura Frattura ; E. Habib Aggregation of users in a residential/commercial building managed by a building energy management system (BEMS), *IEEE Transactions on Industry Applications, 2018*
- [39] Luigi Martirano; Emanuele Habib; Giuseppe Parise; Giacomo Greco; Matteo Manganelli; Ferdinando Massarella; Luigi Parise; Demand Side Management in Micro-grids for Load Control in Nearly Zero Energy Buildings, *IEEE Transactions on Industry Applications, Year: 2017, Volume: 53, Issue: 3, Pages: 1769 – 1779*
- [40] Luigi Martirano; Emanuele Habib; Giacomo Greco; Matteo Manganelli; Alessandro Ruvio; Biagio di Pietra; Alessandro Pannicelli; Sara Piccinelli; Giovanni Puglisi; Pasquale Regina, An example of smart building with a km zero energy performance, *2017 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Cincinnati (Ohio, USA), 1-5- Oct. 2017*
- [41] Luigi Martirano, Emanuele Habib, Alessandro Giuseppi, Alessandro Di Giorgio, Nearly Zero Energy Building Model Predictive Control for efficient heating, *IEEE IAS Annual Meeting, 2018 September, Portland, USA*
- [42] *Engineering Manual of Automatic Control”, Honeywell Inc., Copyright 1989, 1995 and 1997, printed in USA.*
- [43] B.N. Newman, “BACnet explained”, *BACnet today and the smart grid – a supplement to ASHRAE journal, November 2013*
- [44] P. Domingues, P. Carreira, R. Vieira, W. Kastner. “Building automation systems: Concepts and technology review”, *11 November 2015*

- [45] “Smart home and building solutions. Global. Secure. Connected. Introduction”, available at www.knx.org
- [46] T. Sato, D.M. Kammen, et. al., “Smart Grid Standards: Specifications, Requirements and Technologies”, first edition, 2015.
- [47] Electric Power Research Institute, “EPRI Journal”, volume 9, number 10, December 1984.
- [48] C. W. Gellings, “Demand side management, vol. 1”. Palo Alto, CA: EPRI; 1984.
- [49] C. W. Gellings, “The Smart Grid. Enabling Energy Efficiency and Demand Response,” The Fairmont Press Inc., Lilburn, 2009.
- [50] A. Arteconi, N.J. Hewitt, F. Polonara. “State of the art of thermal storage for demand-side management”, Applied Energy 93 (2012) 371–389.
- [51] P. Bertoldi, B. Atanasiu. “Electricity consumption and efficiency trends in the European Union – Status report 2009”, JRC Scientific and Technical Reports, EUR 24005 EN, ISBN 978-92-79-13614-6. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2009.
- [52] Franco Bua; Luigi Martirano; Loredana Cristaldi; Luca Mongiovì; Cristina Lavecchia; Michele Liziero; Standardization framework on energy efficiency measuring and monitoring; 2017 IEEE IEEEIC / I&CPS Europe; Milan 6-9 June 2017; DOI: 10.1109/IEEEIC.2017.7977814
- [53] Luigi Martirano; Luigi Borghi; Franco Bua; Loredana Cristaldi; Daniele Forni; Giulia Frattini; Giacomo Grigis; Cristina Lavecchia; Michele Liziero; Luca Mongiovì; Emanuele Nistri; Enrico Tironi, Assessment criteria for a distributed energy measurement and monitoring system; 2017 IEEE IEEEIC / I&CPS Europe; Milan 6-9 June 2017; DOI: 10.1109/IEEEIC.2017.7977816.
- [54] D. L. Carni; D. Grimaldi; P. F. Sciammarella; F. Lamonaca; L. Martirano; Towards a unified approach for Distributed Measurement System technologies; 2017 IEEE IEEEIC / I&CPS Europe; Milan 6-9 June 2017; DOI: 10.1109/IEEEIC.2017.7977530
- [55] Luigi Martirano ; Luigi Borghi ; Franco Bua ; Loredana Cristaldi ; Giacomo Grigis ; Cristina Lavecchia ; Michele Liziero ; Luca Mongiovì ; Emanuele Nistri ; Enrico Tironi, Energy Management Information Systems for Energy Efficiency, 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (IEEEIC / I&CPS Europe)