Smart heating control nel nuovo distretto milanese REDO

Rossano Scoccia, Ettore Zanetti, Mario Motta Dipartimento di Energia, *Politecnico di Milano*
Giuseppe Dinnella *Fantini Cosmi* • Fabrizio Tortonese *Planet Idea* • Alessandro Bartolini *A2A Smart City*

Presentazione del sistema di controllo avanzato del sistema di riscaldamento del nuovo distretto REDO Milano, composto da: rete wireless LoRaWAN, app per il telecontrollo, controllore avanzato con logiche di *machine learning e model predictive control*

Ridurre il nostro impatto ambientale è forse la più grande sfida dei prossimi anni. In particolare, il settore residenziale, impatta in Italia ed Europa per circa il 25% del consumo totale di energia, di cui il 64% va per i sistemi di climatizzazione secondo dati EuroStat [1]. Di conseguenza il tema del controllo degli impianti di riscaldamento è diventato sempre più importante negli ultimi anni. Un sistema di controllo avanzato oltre a ridurre i consumi del sistema di climatizzazione, permette anche di migliorare il comfort termico degli utenti e sfruttare l'inerzia termica dell'edificio per una miglior gestione delle reti di teleriscadamento ed elettrica specialmente in presenza di fonti energetiche non programmabili come la maggior parte delle energie rinnovabili [2].

Questo lavoro rientra nell'ambito del progetto "Merezzate+: a living lab for the integration of clean energy, sustainable mobility" (www.merezzateplus.it) finanziato da EIT Climate-KIC. Il progetto mira a dimostrare un nuovo modello di città basato su un concetto di "ecosistema urbano intelligente". L'approccio proposto si concentra sulla città a livello distrettuale, affrontando le questioni di sostenibilità dal punto di vista sociale, ambientale ed economico in modo globale attraverso azioni riguardanti l'energia, la mobilità e l'economia circolare, che sono tra i settori più incisivi sui cambiamenti climatici. Tale approccio è applicato al nuovo distretto "REDO Milano" in via Cascina Merezzate (quartiere Rogoredo Santa Giulia, Milano), che intende diventare un *Living Lab* per lo sviluppo, la verifica e l'implementazione di un distretto inclusivo che sfrutti l'economia circolare e che sia a basse emissioni di CO_2. L'intervento prevede la costruzione di circa 800 appartamenti, di cui 600 circa di proprietà del Fondo Immobiliare Lombardia (FIL) gestito da Redo Sgr Spa - società benefit.
Nell'ambito del tema energia pulita una delle azioni previste da progetto è la messa a punto dell'*heating system smart control* oggetto di questa relazione. Questa attività è sinergica e integrata con un'altra attività del medesimo progetto, ovvero l'adozione di una rete di teleriscaldamento di quarta generazione a bassa temperatura, tecnologia abilitante all'integrazione di fonti energetiche rinnovabili, come il solare termico, grazie alla bassa temperatura a cui operano. La rete di teleriscaldamento a sua volta alimenta il sistema di riscaldamento a pavimento di cui sono dotati gli appartamenti.
Il sistema nervoso del distretto REDO Milano su cui si basa tutta la comunicazione tra sensori, attuatori e termostati è la rete wireless a basso consumo LoRaWAN sviluppata da A2A Smart City. Inoltre è presente un'app per il telecontrollo sviluppata da Planet Idea, che permette all'utente di cambiare le impostazioni dei propri termostati da remoto. Il cervello del sistema di controllo è costituito invece da un controllore avanzato per appartamento, che sfrutta i dati acquisiti tramite la rete per applicare logiche di *machine learning* per l'automatizzazione e il raffinamento dei modelli fisici

dell'edificio e utilizza questi ultimi per un controllo di tipo predittivo, con l'obiettivo di minimizzare il consumo energetico e massimizzare il comfort dell'utente. L'hardware e il firmware della centralina di controllo sono stati sviluppati da A2A Smart City e Fantini Cosmi, mentre gli algoritmi di controllo avanzato dal Politecnico di Milano.
La relazione è strutturata in due parti, nella prima si spiega nel dettaglio l'architettura del sistema del sistema da un punto di vista hardware, mentre nella seconda parte ci si concentra sulle logiche di controllo che verranno applicate.

Architettura del sistema

Tutti gli elementi presenti nel sistema di riscaldamento, sensori, attuattori e centraline di controllo, sono connessi a una rete wireless LoRaWAN a servizio del distretto. In questo modo tutte le parti del sistema possono essere monitorate e controllate in tempo reale, indipendentemente tra di loro, dando un'ampia flessibilità operativa utilizzabile ad esempio per: acquisizione misure da sensori, telecontrollo, creazione di web API *ad hoc* per visualizzazione e interazione con i dati.
Per esempio l'utente può controllare il suo termostato da remoto; cambiando la schedulazione oraria dell'impianto di riscaldamento, utile nel caso di rientri imprevisti e dando la facoltà di non tenere sempre acceso il riscaldamento per evitare di rientrare con l'appartamento freddo.

Questo tipo di approccio viene sfruttato anche dal sistema di controllo intelligente, che ottimizza in tempo reale il consumo dell'impianto e il comfort termico utilizzando l'input e il feedback dell'utente, i dati provenienti dai sensori interni ed esterni, da centralina meteo di distretto, e le previsioni meteo. Questi input vengono usati per calcolare tramite un modello pseudo-fisico dell'edificio un profilo di temperatura previsto e confrontandolo con il set-point richiesto dall'utente si controlla il sistema di emissione a pannelli radianti per minimizzare l'errore tra la temperatura prevista e il *set-point* richiesto dall'utente, evitando quindi sia sottoraffraddamento sia il sovrariscaldamento. Si risolve così il problema del sovrariscaldamento in edifici ben isolati e con sistemi di emissione ad alta inerzia come i pannelli radianti, in cui di solito è molto difficile stimare l'ora di preaccensione in quanto funzione delle condizioni esterne e del set-point dell'utente. Inoltre col passare del tempo, grazie allo storico dati, il modello pseudo-fisico e il profilo di comfort richiesto dall'utente saranno raffinati utilizzando analisi *machine learning* per minimizzare ulteriormente il consumo energetico e massimizzare il comfort dell'utente.
Un ulteriore vantaggio della disponibilità dei dati e del fabbisogno di energia stimato degli appartamenti si ha a livello di distretto, in quanto il gestore del teleriscaldamento, A2A Calore & Servizi, potrà stimare il carico termico del distretto for-

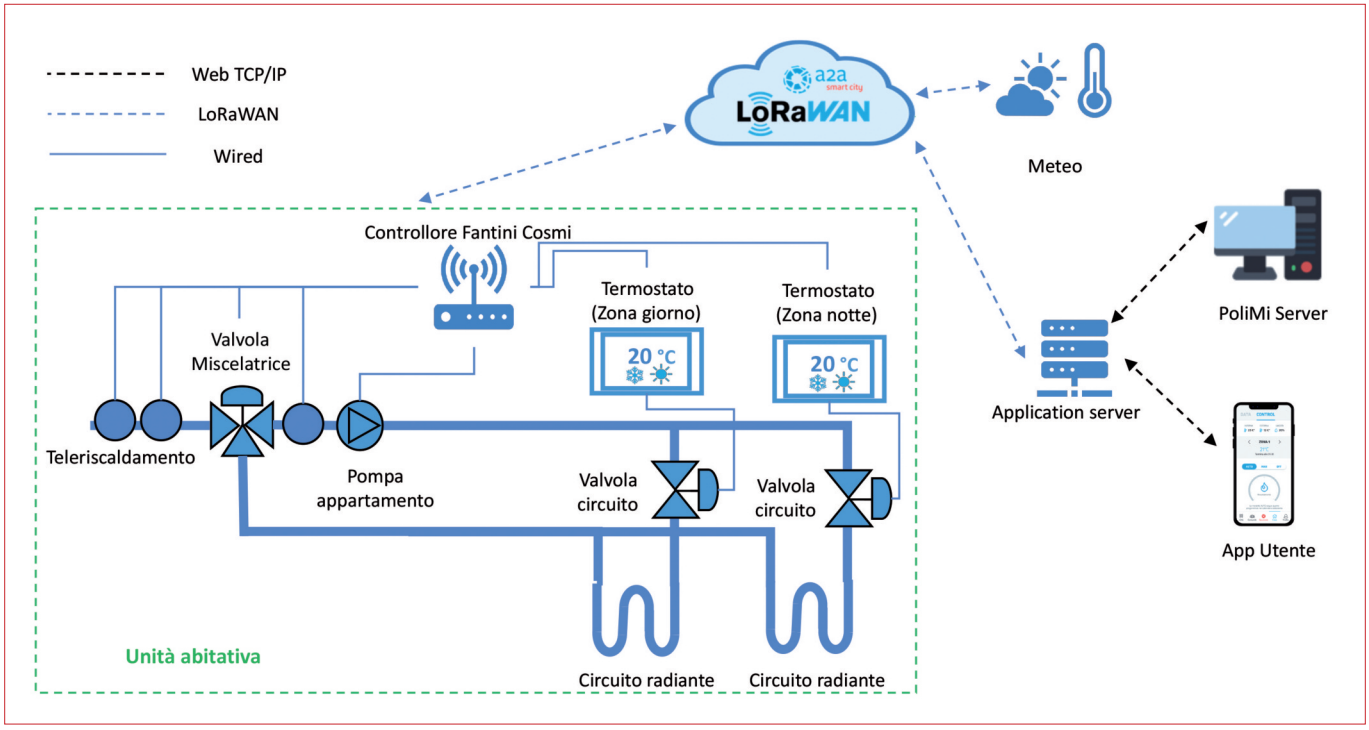


Figura 1
Schema generale del sistema di comunicazione e controllo per unità abitativa coordinato da A2A Smart City

nendo soltato il calore necessario e riducendo le perdite di rete. Inoltre in ottica di implementazione di rinnovabili sulla rete di riscaldamento ci può essere un'interazione tra il gestore della rete e i controllori dei singoli appartamenti, dando la possibilità di spostare la domanda e accomando la produzione da fonti rinnovabili. Questo porta benefici sia in termini di risparmio energetico ed emissioni di CO_2 sia economico per gli utenti.
Non ultimo un'architettura di comunicazione di questo tipo è a basso consumo energetico e non richiedere la stesura di chilometri di cavi di comunicazione ad una centralina di acquisizione.
Una rappresentazione generale del sistema lato appartamento è presente in figura 1.
All'interno dell'unità abitativa i termostati, i misuratori e gli attuatori idraulici sono connessi al controllore di Fantini Cosmi, che è collegato con la rete LoRaWAN, la quale si interfaccia tramite un'*application server* a un server del Politecnico di Milano e all'app utente.
Controllo intelligente del sistema di riscaldamento. Utilizza un controllo di tipo predittivo grazie a: previsione dati meteo, *set-point* impostato dall'utente, modelli adattivi. Queste informazioni vengono utilizzate per predirre il comportamento desiderato dell'edificio e regolare il sistema di controllo di conseguenza. L'obiettivo del Controllo intelligente del sistema di riscaldamento è di massimizzare il comfort dei residenti e minimizzare i consumi energetici.

Componenti hardware

Il sistema è composto da una serie di dispositivi. La descrizione dei dispositivi principali è fornita di seguito.

Infrastruttura di comunicazione

Sebbene non direttamente coinvolta nella termoregolazione, l'infrastruttura di rete rappresenta un elemento chiave per il corretto comportamento di tutti i dispositivi. La sua funzione è mettere in comunicazione i dispositivi in campo e l'*application server*.
La scelta è ricaduta su una rete di tipo LoRaWAN, cioè una rete a bassa potenza ad ampio raggio (*Low Power Wide Area Network* - LPWAN) che richiede poche risorse per la trasmissione dati (in termini di consumi elettrici e banda radio) avendo comunque un'ampia copertura, queste qualità la rendono ideale per l'applicazione in campo IoT (*Internet of Things*).
I dati raccolti dai dispositivi in campo vengono trasmessi all'application server e da lì resi disponibili all'app utente e al server di calcolo del Politecnico di Milano.

Controllore

Tutti i dispositivi presenti nell'unità abitativa sono cablati con il controllore di Fantini Cosmi. Questo è l'elemento chiave per la termoregolazione dell'appartamento. Infatti, fungerà da ponte tra il controllo di alto livello dato dal controllore predittivo, che cambierà il *set-point* della temperatura di mandata ai pannelli radianti (Figura 1), e l'attuazione degli elementi idraulici (apertura/chiusura valvole, accensione e spegnimento circolatore).
Il controllore (Figura 2) è installato in uno spazio dedicato all'interno dell'appartamento, per essere cablato con misuratori, attuattori e termostati.
Inoltre fungerà da centralina di acquisizione e trasmissione dati verso la rete LoRaWAN per tutti i dispositivi presenti nell'appartamento.

Pannello cronotermostato

Vi saranno due pannelli cronotermostato istallati negli appartamenti (Figura 2), uno per la zona giorno e uno per la zona notte, che rappresentano l'interfaccia utente oltre alla Planet App con

Figura 2 *Controllore (a sinistra) e termostato (a destra) sviluppati ad hoc per REDO Milano e progetto Merezzate+ da parte di A2A Smart City e Fantini Cosmi*

cui si possono stabilire i *set-points* e le schedule orarie dell'impianto di riscaldamento. I pannelli sono inoltre equipaggiati con sensori di temperatura e umidità per rilevare le condizioni operative di ciascuna zona termica. Tutte le azioni di controllo sono invece svolte da parte del controllore.

Componenti software

Acquisizione e rielaborazione dati

Tutti i dispositivi tramte l'interfaccia del controllore Fantini Cosmi e la rete LoRaWAN, saranno connessi all'*application server*. I cui compiti principali sono:

- raccogliere i dati dai dispositivi in campo e renderli disponibili per analisi successive registrandole in un database;
- mettere a disposizione API *ad hoc* per la connessione con l'applicativo mobile dell'utente per agire sulla regolazione;
- trasmettere ai controllori Fantini Cosmi le modifiche apportate dal controllore di alto livello e le condizioni meteo.

Implementazione lato utente

Un apposita app per la gestione e il monitoraggio del proprio impianto di riscaldamento è stata realizzata da Planet Lab. L'applicativo permette il controllo del proprio impianto da remoto, controllando sia i *set-point* che la schedula oraria e dà all'utente un feedback sui consumi del proprio impianto confrontandoli anche con quelli dei propri vicini in possesso della stessa app.

Controllo intelligente del sistema di riscaldamento

Questa sezione si divide in due paragrafi principali, nel primo è illustrato l'approccio tradizionale per la logica di regolazione degli impianti di riscaldamento casalinghi. Nel secondo paragrafo invece si approfondisce la logica di controllo avanzato di tipo predittivo.

Logica di termoregolazione

Climatica semplice

Lo standard per il controllo di impianti casalinghi è l'implementazione di una curva climatica, che mette in relazione la temperatura di mandata ai pannelli radianti con la temperatura esterna. In generale questa curva è una spezzata, esempio in figura 3, e viene tarata una sola volta dal tecnico che installa il sistema di controllo in funzione della fascia climatica.

In questo particolare impianto, la temperatura di mandata desiderata si raggiunge miscelando, con i dovuti rapporti, la mandata della rete di teleriscaldamento con l'acqua tecnica di ritorno dai circuiti dei pannelli radianti. Il controllore prenderà come input la temperatura esterna e regolerà la posizione della valvola miscelatrice inseguendo il *set-point* dato dalla curva climatica.

Termoregolazione tramite algoritmo predittivo

Principio di funzionamento: i dati di monitoraggio e i dati meteo vengono inviati al server; le informazioni vengono elaborate tramite un algoritmo; il segnale di feedback viene inviato al controllore dell'appartmento.

Nell'approccio predittivo, è necessario un modello fisico semplificato del sistema di riscaldamento e dell'appartamento partendo dai dati disponibili sulla geometria e le proprietà termofisiche dell'appartamento e del suo sistema di riscaldamento. Partendo dalle previsioni meteo, i *set-point* desiderati dall'utente, e il feedback delle misure, si può stimare il profilo di temperatura dell'appartamento nelle ore o giorni successivi. L'output del modello dinamico viene poi usato da algortmi di ottimizzazione che in funzione di un obiettivo esempio in Equazione 1, al fine di mini-

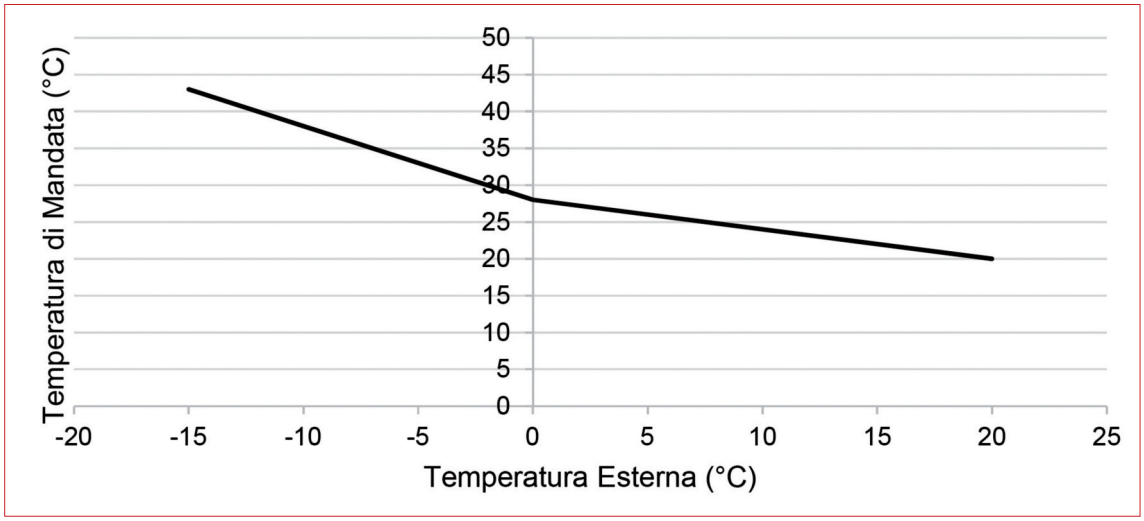


Figura 3
Esempio di una curva climatica

mizzare il consumo e l'errore tra la temperatura simulata e il *set-point*, variano la temperatura di mandata della valvola miscelatrice e l'accensione/spegnimento del circolatore fino a trovare la miglior traiettoria di controllo che minimizzi la funzione obiettivo.

$$min J_{tot}(t) = \int_{t0}^{tf} [kJ_{en}(t) + (1 - k)J_{err}(t)]dt \quad 0 \leq k \leq 1$$

Equazione 1

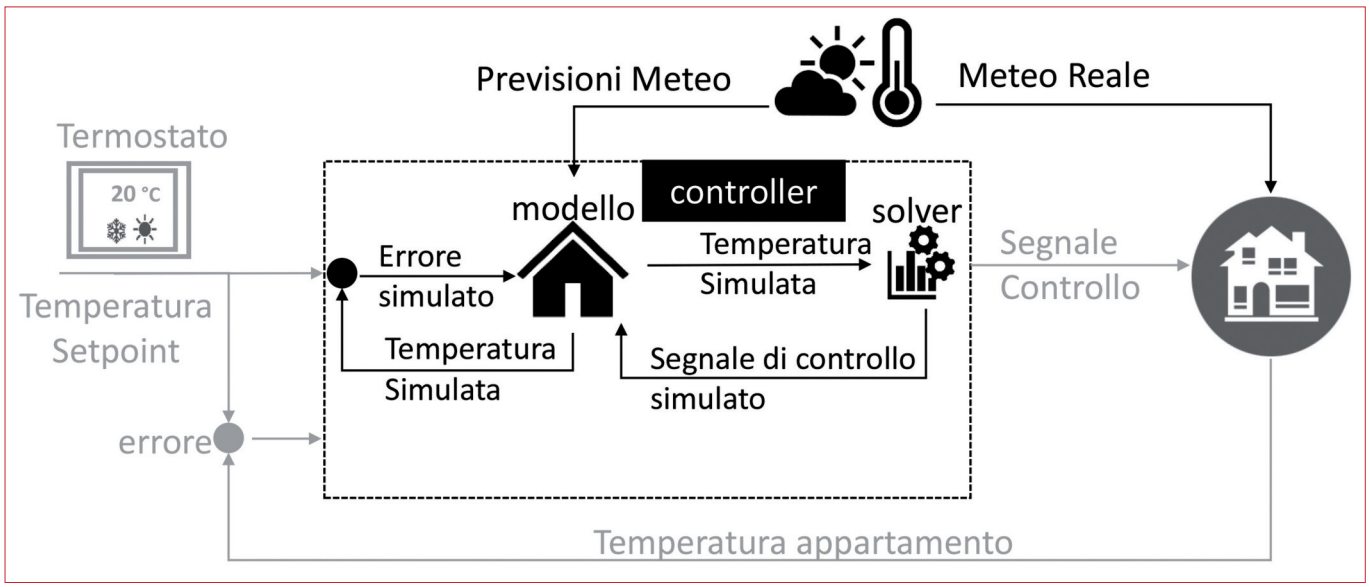
Dove J_{tot} è il valore totale della funzione di costo, che può essere espresso in termini di energia (kWh) o euro per esempio (€). I tempi t_0 e t_f sono l'instante iniziale e finale dell'orizzonte temporale considerato per l'ottimizzazione. Il parametro k è un valore adimensionale che va da 0 e 1 e funzione da peso per i due contributi principali del costo. In partcolare, J_{en} racchiude il costo in termini energetici per il funzionamento dell'impianto di riscaldamento, per esempio il calore o spesa economca totale, mentre J_{err} tiene conto dell'errore tra il *set-point* di temperatura desiderato dall'utente e la temperatura stimata dal modello dinamico dell'edificio. Per una trattazione più dettagliata sull'impostazione del problema di ottimizzazione si può consultare [3].

I calcoli di ottimizzazione sono eseguiti su server del Politecnico e i risultati trasmessi ai controllori di ciascun appartamento. Uno schema logico del controllo è presentato in figura 4.
Dalla soluzione del problema di ottimizzazione otteniamo la schedulazione per l'accensione dell'impianto e la temperatura di mandata desiderata da impostare nel controllore Fantini Cosmi tramite rete LoRaWan. Se impostata direttamente si utilizza un controllo a punto fisso della temperatura di mandata della valvola miscelatrice, cambiando il *set-point* secondo la curva fornita dall'algoritmo di ottimizzazione.Questo aggiornamento può essere fatto da una volta ogni minuto a una volta ogni ora. Vista la grande inerzia termica del circuito a pannelli radianti, non è necessario aggiornarla più di una volta l'ora. Un altro approccio parallelo e consequenziale è quello di utilizzare le traiettorie ottenute e tramite un metodo di regressione, trovare dei nuovi coefficienti per la curva climatica, che vengno tarati quindi con cadenza giornaliera o settmanale. L'accensione e lo spegnimento della pompa invece viene governato tramite la schedulazione ottenuta dall'ottimizzazione. In figura 5 è presente un esempio.

Aggiornamento dinamico dei parametri del modello

Tutti I parametri presenti nel modello pseudo-dinamico dell'algoritmo predittivo, Come i dati relativi all'inerzia termica dell'appartamento dell'impianto, allo scambio convettivo interno e alle perdite verso l'ambiente, vengono inizialmente calibrati sui dati geometrici e termofisici disponibili. Con il passare del tempo e l'acquisizione di un maggior numero di dati sull'effettivo funzionameno del sistema edificio-impianto, basandosi sull'errore tra il modello e il funzionamento reale è possibile andare a modificare questi parametri tramite metodi di regressione multi variata o *machine learning*, per aver maggior accuratezza nella predizione nel profilo di temperatura dell'appartamento, un diagramma

Figura 4
Schema logico del controllore predittivo, in colore grigio un controllore tradizionale, in colore nero la parte innovativa riguardante il controllore predittivo - Fonte: Politecnico di Milano



di flusso è presente in figura 6. In questo modo l'ottimo stimato dall'algoritmo di ottimizzazione si avvicina ad un otttimo reale, in quanto il profilo di temperatura stimato dal modello su cui si fanno i calcoli di ottimizzazione risulta essere più accurato [4]. È inoltre possible prevedere con anticipo un malfunzionamento dell'impianto basandosi sullo storico dati di corretto funzionamento dell'impianto (ad es., sporcamento scambiatori, rottura valvole, ecc.) [5].

Gestione del sistema di rete

Sebbene il sistema di controllo avanzato per funzionare al meglio del suo potenziale richieda tutte le funzionalità della rete LoRaWAN, in caso di problemi di connettività wireless il sistema di controllo essendo localizzato rimane robusto. In particolare, il controllore una volta verificato il malfunzionamento della rete wireless, mantiene l'ultima configurazione utente e si mette in modalità funzionamento climatica, utilizzando gli ultimi parametri ricevuti. Il problema principale a livello locale rimane l'assenza della misura di temperatura esterna, di cui verrà utilizzato l'ultimo valore utile prima della mancata connessione. In questo il controllo non sarà ottimizzato, ma si minimizza il discomfort per l'utente.

App per smartphone

L'efficienza energetica passa anche attraverso la Planet app un'applicazione mobile per smartphone sviluppata da Planet Idea.
L'obiettivo principale di questo strumento digitale consiste nel responsabilizzare i suoi utenti sul tema dei consumi energetici, affinché siano stimolati a ottimizzarli attraverso un comportamento consapevole.
L'app può dettagliare in *real-time* l'avanzamento progressivo dei consumi di energia (per la produzione di elettricità, riscaldamento/raffrescamento, acqua calda sanitaria) e di volumi d'acqua dome-

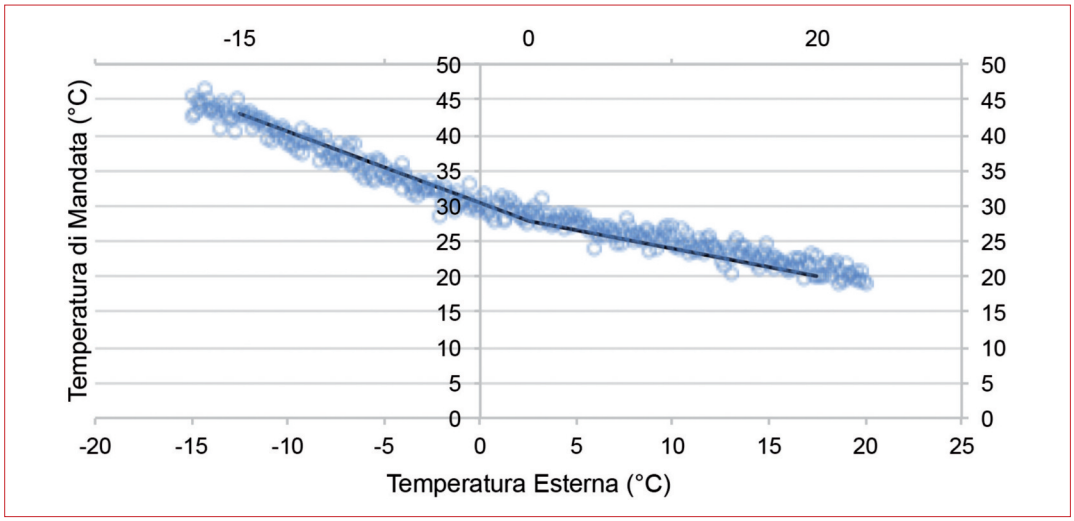


Figura 5
Esempio di curva climatica ricalcolata. In nero la curva climatica ricalcolata, in blue chiaro tutte le temperature di mandata calcolate dal controllore predittivo nel periodo considerato

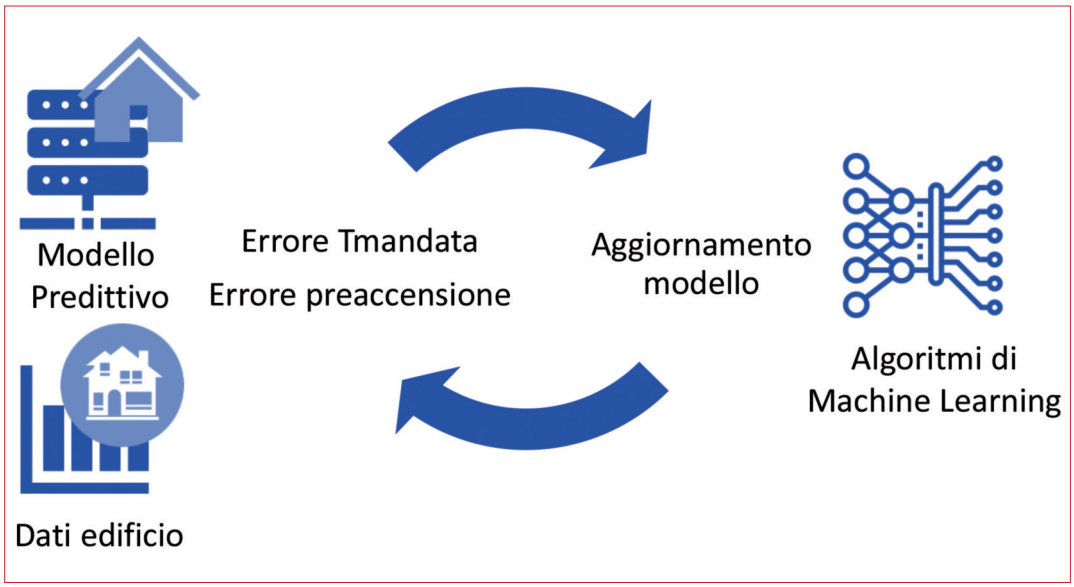


Figura 6
Processo di aggiornamento dei parametri del controllore predittivo

stici (Figura 7). La relativa valorizzazione economica, unitamente alla loro comparazione con la media del vicinato e alle logiche di *gamification* che premieranno gli utenti più virtuosi, stimolerà ogni utente a modificare il proprio comportamento per evitare sprechi energetici e contenere le spese conseguenti.
Per fornire uno strumento adatto ad attuare i cambiamenti comportamentali che si vogliono stimolare, l'app mette a disposizione dei propri utenti un cronotermostato digitale che consente di gestire da remoto il sistema di termoregolazione domestico, tramite dispositivi e sensori collegati alla rete LoRaWAN di quartiere (Figura 8).
Ovunque ci si trovi, sarà quindi possibile accendere, spegnere e modificare il calendario e le tempe-

Figura 7
Esempi visualizzazione consumi e statistiche

Figura 8
Esempio visualizzazione cronotermostato digitale

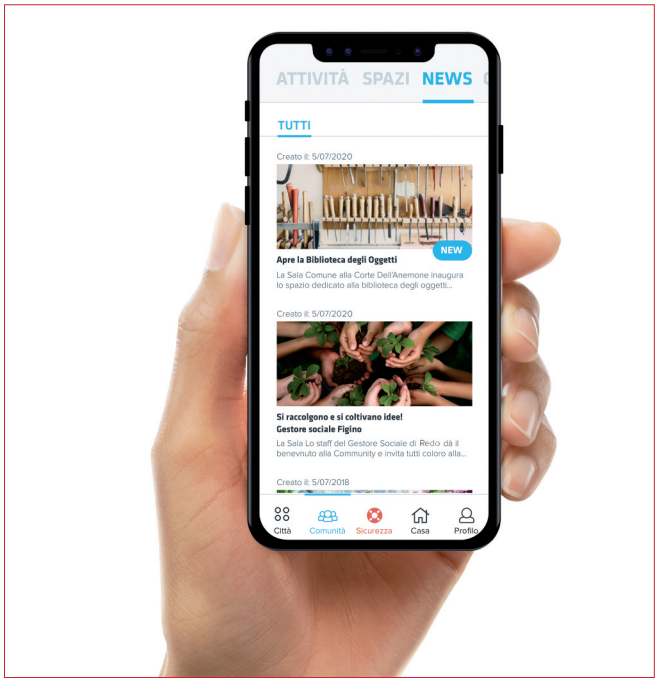


Figura 9
Esempio visualizzazione sezione Comunità dell'App

rature pre-impostate del proprio termostato domestico, ottimizzandone i consumi e, contestualmente, migliorando il confort conseguente ad una programmazione più dinamica del dispositivo.
La Planet App integra inoltre diverse funzioni per i cittadini di una Smart City, consentendo agli abitanti di accedere digitalmente ai servizi e alle informazioni del quartiere smart REDO Milano (Figura 9). La sezione Comunità dell'App consente infatti ai propri utenti di essere costantemente aggiornati in merito a: notizie relative al quartiere, spazi condivisi da prenotare e condividere, attività organizzate per la comunità, biblioteca degli oggetti per prendere in prestito attrezzature di vario genere, attività di gruppi di persone che condividono interessi comuni. Anche in questo caso, l'applicazione di specifiche logiche di gamification garantirà sia la fidelizzazione dei residenti di REDO allo strumento digitale realizzato per accedere facilmente ai suddetti servizi per la comunità sia il coinvolgimento sociale necessario per valorizzarli e renderli sempre più indispensabili nella vita quotidiana in un quartiere *smart*.

Conclusioni

In questo articolo è stato presentato uno degli aspetti connotanti il progetto Merezzate+, ovvero il controllo avanzato del sistema di riscaldamento degli appartamenti e la gestione via remoto dell'app appositamente sviluppata, tutto ciò grazie anche all'istallazione di una rete wireless LoRaWAN a basso consumo. Il sistema di controllo qui presentato inizierà a essere testato in campo non appena avverrà l'occupazione degli appartamenti prevista per la primavera 2020. Il controllo avanzato sarà dunque applicato inizialmente a un sottoinsieme ristretto di appartamenti. In termini di risultati si stima una riduzione dei consumi maggiore del 10%, abbinato a un aumento del comfort termico degli utenti.

Si ringrazia infine per il supporto EIT Climate-KIC, co-finanziatore del progetto Merezzate+, e Redo Sgr Spa - società benefit che gestisce REDO Milano di proprietà del Fondo Immobiliare Lombardia (FIL).

BIBLIOGRAFIA

[1] Eurostat: *Eurostat:Consumption of energy*, 2016, disponibile online su: http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Consumption_of_energy.

[2] R. G. Junker et al.: Characterizing the energy flexibility of buildings and districts, *Appl. Energy*, vol. 225, settembre 2018, pp. 175-182.

[3] E. Zanetti, M. Aprile, D. Kum, R. Scoccia, M. Motta: Energy saving potentials of a photovoltaic assisted heat pump for hybrid building heating system via optimal control, *J. Build. Eng.*, vol. 27, gennaio 2020, p. 100854.

[4] E. Zavaglio, R. Scoccia, M. Motta: RC building modelling for control purposes: a case study, in *BSA 2017 Proceeding Book*, 2017.

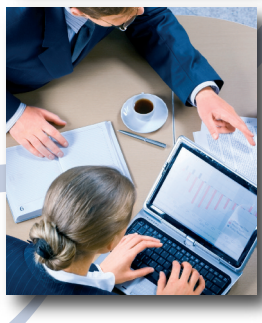
[5] Z. Du, B. Fan, X. Jin, J. Chi: Fault detection and diagnosis for buildings and HVAC systems using combined neural networks and subtractive clustering analysis, *Build. Environ.*, vol. 73, marzo 2014, pp. 1-11.

AEIT 1897

Dal 1896 l'AEIT promuove e diffonde in ambito nazionale lo studio dell'elettricità e lo sviluppo delle sue applicazioni nei campi dell'energia, delle telecomunicazioni, dell'automazione e del trattamento dell'informazione.

Tale missione si concretizza in numerose attività culturali, tra le quali l'organizzazione di conferenze, giornate di studio, seminari e visite tecniche, nonché attraverso l'assegnazione di premi e borse di studio rivolte ai giovani.

Ogni anno AEIT, con le sue 19 Sezioni e 4 Societies, organizza su tutto il territorio nazionale oltre 100 incontri rivolti ai propri Soci, Aziende e a tutti gli operatori del settore sui temi più attuali e rilevanti del sistema energetico italiano con particolare riferimento alle nuove tecnologie emergenti



Per ulteriori informazioni e iscrizioni:
AEIT - Ufficio Centrale - Via Mauro Macchi, 32 - 20124 Milano
tel. 02.87389960 • fax 02.66989023 e-mail: soci@aeit.it • web: www.aeit.it