

# L'Energia

luglio/agosto 2019  
numero 4 - volume 96

Poste Italiane Spa - Spedizione in Abbonamento  
Postale - Decreto Legge 353/2003 (convertito in  
Legge 27/02/2004 N. 46) Articolo 1, comma 1,  
DCB Milano - ISSN 1590-7651

# Elettrica

**AEIT - Associazione Italiana di Elettrotecnica, Elettronica,  
Automazione, Informatica e Telecomunicazioni**



Fonte: EF Solare Italia S.p.A.

-  **Storage elettrochimico:  
potenzialità e limiti regolatori**
-  **Nuove strutture tariffarie  
e impatto sul Fv**
-  **Energy Hub per sistemi energetici  
efficienti e sostenibili**

# in questo numero

**Proprietaria ed Editrice** © Associazione Italiana di Elettrotecnica, Elettronica, Automazione, Informatica e Telecomunicazioni - AEIT

**Direttore Resp.** Roberto Caldon - AEIT

**Comitato di Redazione**

- V. Balsamo - AICEP
- M. Benini - RSE
- E.M. Carlini - TERNA
- A. Clerici - WEC
- L. Colla - Prysmian
- B. Cova - CESI
- E. Dalpane - E2i
- E. Fumagalli - Edison
- R. Lama - ENEL
- M. Longo - Politecnico di Milano
- F. Luiso - ARERA
- M. Mauro - ENEL Italia
- G. Noviello - EF Solare Italia
- M. Rebolini - CIGRE
- E. Roggero - Gruppo IREN
- F. Zanellini - ANIE

**Redazione** AEIT  
Anna Lisa Fontana  
elettrica@aeit.it

**Progetto Grafico Copertina Impaginazione** Antonella Dodi

**Direzione e Amministrazione** AEIT Ufficio Centrale  
Via Mauro Macchi, 32  
20124 Milano  
Tel. 02/87389967  
Telefax 02/66989023

**Abbonamenti e Pubblicità** Tel. 02/87389967  
Fax 02/66989023  
E-mail: chiusi@aeit.it

**Sito internet** <http://www.aeit.it>

**Stampa** Arti Grafiche Murelli SNC  
**Fotoservice** Via Campania, 42  
**e Distribuzione** Fizzonasco di Pieve Emanuele MI

NUMERO 4 - LUGLIO/AGOSTO 2019



## articoli

- **Storage elettrochimico in italia: quale futuro?** 3  
*Giuseppe Noviello, Matteo Ricciari, Michela Demofonti, Andrea Marchisio, Salvatore Alessandro Casa*
- **Impatto delle nuove tariffe elettriche sulla diffusione del fotovoltaico in Italia** 11  
*G. Cipriani, V. Di Dio, G. Zizzo, F. Luiso, S. Midili*
- **Ottimizzazione energetica degli utenti finali: gli Energy Hub e il progetto GHOTEM** 21  
*A. Vian, F. Bignucolo, M. De Carli*
- **Oil recepimento dei Network Code europei RfG e DCC nelle norme di connessione CEI 0-16 e 0-21** 31  
*Ettore De Berardinis, Maurizio Delfanti, Francesco Iannello, Fabio Zanellini, Luca Ortolano, Margherita Palleschi*
- **La piattaforma GAUDI: una Best Practice italiana da valorizzare** 41  
*Rosa Cataldi*

I diritti di riproduzione anche parziale sono riservati

Gli scritti dei singoli autori non impegnano la Redazione; sia quelli degli autori sia quelli della Redazione non impegnano l'AEIT. I manoscritti non si restituiscono.

Registrazione Tribunale di Milano del 24 luglio 1948 N. 275. Iscrizione R.D.C. N. 5977 - 10 dicembre 2001. Poste Italiane SpA - Spedizione in abbonamento postale -D.L. 353/2003 (conv. in L. 27/02/2004 N. 46) Art.1, comma 1, DCB Milano. Abbonamento annuale (sei numeri) da versare sul conto corrente postale n. 274209.



Associato all'USPI Unione Stampa Periodica Italiana

# Ottimizzazione energetica degli utenti finali: gli Energy Hub e il progetto GHOTEM

A. Vian, F. Bignucolo, M. De Carli *Dipartimento di Ingegneria Industriale - Università degli Studi di Padova*

*Il progetto GHOTEM ha sviluppato l'approccio energy hub, ovvero sistemi energetici sostenibili in grado di contenere consumi e emissioni inquinanti degli utenti finali (residenziali e commerciali) interfacciati alle varie reti in modo integrato*

## Cos'è un Energy Hub?

La continua crescita della popolazione mondiale e il potenziamento delle economie in paesi in via di sviluppo comportano un continuo aumento della richiesta di energia per diversi usi, dall'industria al settore residenziale, in quanto l'accesso all'energia è un requisito necessario per la riduzione della povertà come affermato nell'Obiettivo 7 dell'agenda 2030 dell'ONU "Garantire l'accesso all'energia a prezzo accessibile, affidabile, sostenibile e moderna per tutti" [1]. Tale evoluzione è stata tradizionalmente accompagnata da un aumento delle emissioni inquinanti (CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, ecc.) [2], in contrasto con i piani d'azione formulati da diversi Paesi per la riduzione delle emissioni. Proprio in questo senso, un obiettivo che si sta perseguendo a livello internazionale riguarda la de-carbonizzazione nel settore della produzione dell'energia elettrica e termica. Il raggiungimento di questo obiettivo necessita un ripensamento degli impianti e delle infrastrutture che ad oggi sono utilizzate per la produzione di energia. Secondo il piano energia italiano [3], per raggiungere tale obiettivo nel settore elettrico si prevede, oltre che ad una gestione più efficiente del parco di generazione già installato, una crescita significativa di impianti eolici e fotovoltaici (la crescita media annua dal 2019 al 2030 per questi impianti è stimata pari, rispettivamente, a 3,2 GW e 3,8 GW, a fronte di

una crescita media annua di 700 MW complessivi negli ultimi anni). La continua installazione di questi impianti richiederà anche modifiche alle infrastrutture e l'utilizzo di sistemi di accumulo utili a compensare la variabilità della produzione di tali Fonti di Energia Rinnovabile (FER). Inoltre si deve tenere in considerazione che, ai fini della de-carbonizzazione, l'obiettivo italiano prevede la riduzione, al 2030, del 33% delle emissioni di CO<sub>2</sub> nei settori non ETS (*Emission Trading Schemes*) rispetto a quelle del 2005, risultato che può essere raggiunto attraverso diversi interventi, soprattutto in termini di efficienza energetica e integrazione delle FER.

Per soddisfare questa domanda sono necessari diversi vettori energetici, tra cui i principali sono l'elettrico e il termico (principalmente il gas). Tipicamente, questi vettori energetici non sono integrati in un unico sistema coordinato e questo comporta una riduzione dell'efficienza dell'intero sistema. Contrariamente, se si gestiscono varie sorgenti di energia per sopperire ad una determinata domanda finale è possibile rendere il sistema più efficiente. Questo approccio si riflette nel concetto di *Energy Hub* - EH, un sistema energetico integrato in cui vengono utilizzate diverse fonti di energia con una strategia di controllo finalizzata al soddisfacimento del fabbisogno energetico dell'utente finale. Nel fare questo, possono essere definiti uno o più obiettivi, come la minimizzazione delle emissioni

d'inquinanti e dei costi di sistema oppure la massimizzazione del comfort degli utenti [4].

La definizione più ampia di EH è quella di un sistema energetico che permette di acquisire, convertire, distribuire e utilizzare diverse risorse energetiche, al fine di massimizzare contestualmente i benefici economici ed ambientali (figura 1). Lo scopo principale dell'EH è quindi quello di permettere una transizione verso sistemi multi-energetici per beneficiare della sinergia di diversi vettori energetici, di una struttura non gerarchica e di una gestione simultanea di diverse infrastrutture. Tale visione si inserisce perfettamente nell'ambito dell'Obiettivo 12 dell'agenda 2030 dell'ONU "Garantire modelli sostenibili di produzione e di consumo", nel quale si chiede agli stati firmatari, di raggiungere alcuni target molto rilevanti per la transizione verso l'economia circolare tra cui, entro il 2030, raggiungere la gestione sostenibile e l'utilizzo efficiente delle risorse naturali [1]. Infatti, nella maggioranza dei casi, l'economia lineare è predominante: in essa le risorse utilizzate dal sistema sono prelevate dalla natura per essere impiegate nei processi produttivi, consumate e infine dissipate come scarti nell'ambiente. Al contrario, nell'economia circolare il valore delle risorse, dei prodotti e degli asset si mantiene lungo il loro intero ciclo di vita, minimizzando così sia i prelievi che gli scarti [5].

Una delle soluzioni maggiormente adottate per la riduzione dei consumi di energia primaria fossile e, di conseguenza, delle emissioni di gas inquinanti, consiste nell'utilizzo di sistemi di generazione da FER. In aggiunta, sta riscontrando interesse la produzione di gas tramite il Power to Gas (P2G), un processo che consiste nell'utilizzo di catalizzatori che combinano ossido di carbonio (ricavato dalla CO<sub>2</sub>) e idrogeno (ricavato dall'acqua) per produrre metano. Sebbene questo processo non possa ritenersi una fonte energetica, in quanto la catalizzazione consuma più energia di quanto ne produca (anche considerando gli attuali rendimenti di processo), esso potrebbe risultare molto interessante nella fase di immagazzinamento dell'energia rinnovabile intermittente sotto forma di un combustibile largamente utilizzato, senza immettere ulteriore CO<sub>2</sub> in atmosfera [6].

L'adozione di sistemi EH comporta una modifica della struttura degli impianti, sia internamente all'edificio che nella rete locale di distribuzione, dovendo gestire flussi di potenza potenzialmente bidirezionali. In particolare, per il settore residenziale, si osserva una grande trasformazione nella struttura della rete dovuta allo sviluppo e alla diffusione dei sistemi fotovoltaici che comportano forti peculiarità di genera-

zione di punta nelle ore diurne, spesso a fronte di un basso carico locale [7]. L'elevata diffusione delle FER sta portando a un ripensamento delle infrastrutture, sia per connettere i vari generatori distribuiti in tutto il territorio, per i quali si richiede a volte la costruzione di nuove linee di collegamento, sia per la gestione di flussi di potenza che variano in funzione della producibilità degli impianti FER. Di conseguenza, i gestori delle reti di distribuzione si trovano a dover fronteggiare un aumento delle congestioni e dell'instabilità di rete con possibili disservizi per gli utenti finali. In un prossimo futuro, per migliorare la qualità del servizio offerto e garantire il bilanciamento di energia, i gestori potranno fare affidamento su impianti che offrono i cosiddetti "servizi di rete", ovvero siano in grado di modificare le loro condizioni di lavoro in risposta a esigenze di rete a fronte di una remunerazione. In questo approccio, l'approccio EH consente di aumentare in modo significativo la flessibilità degli utenti finali grazie alla possibilità di veicolare su vari vettori le domande energetiche degli edifici [8].

Per raggiungere gli obiettivi preposti, oltre all'utilizzo di sistemi rinnovabili, si rende necessario adottare altre soluzioni che permettano di soddisfare la domanda di energia minimizzando le emissioni di gas inquinanti. Una scelta può essere quella di aumentare e diversificare i sistemi energetici e le infrastrutture per garantire un servizio adeguato agli utenti finali anche grazie all'avvento di nuove tecnologie efficienti, come i cogeneratori di piccola taglia (*Combined Heat and Power*, CHP), i sistemi di accumulo dell'energia (*Energy Storage System*, ESS) ed i veicoli elettrici. Inoltre, all'interno di un EH possono essere gestiti i trasferimenti di energia tra vari vettori (elettrico, termico, gas, in futuro idrogeno o altro), al fine di massimizzare il beneficio complessivo e l'integrazione delle FER, senza impattare in maniera incontrollata sulle reti cui l'EH è interfacciato. Ad esempio, un eccesso diurno di generazione elettrica locale rispetto al carico, tipico di un impianto fotovoltaico in contesti residenziali, potrebbe essere convertito in un accumulo termico, talvolta sfruttando l'edificio stesso come accumulatore (riscaldamento o raffrescamento a seconda della stagione). Negli EH si trova un mix di queste soluzioni, in modo tale da ottenere un sistema energetico ad alta efficienza [9].

L'ottimizzazione degli EH richiede un'opportuna fase di studio e modellizzazione, in relazione ai vincoli iniziali ed a quelli di esercizio, tenendo in considerazione la monetizzazione

degli scambi energetici tra l'EH e le reti (ad esempio, struttura delle bollette in prelievo, valorizzazione delle immissioni energetiche nelle reti, ecc.). La prima configurazione di un EH parte dal considerare le risorse disponibili nel sito di installazione, la richiesta di energia finale su ciascun vettore (domanda elettrica, domanda termica di caldo e freddo), gli spazi a disposizione, sia esterni che interni agli edifici, e la tipologia di impianti che si vogliono utilizzare, congiuntamente con i costi dei componenti e la propensione degli utenti agli investimenti in ambito energetico. I vincoli di esercizio riguardano invece le condizioni di lavoro ammesse dai singoli componenti, in termini istantanei ed integrali (ad esempio la gestione dello stato di carica dei sistemi di accumulo, con l'obiettivo di ottimizzare i benefici conseguibili con la loro adozione, ma al contempo di preservarne la durata di vita) e la flessibilità concessa dalla domanda finale, ripartita sui diversi vettori energetici. Le FER possono essere la soluzione più immediata, ma non va sottovalutato l'uso efficiente e coordinato di vettori energetici più classici come il gas e le reti di teleriscaldamento.

Lo scopo degli EH è proprio quello di interfacciare diversi input al fine di garantire il soddisfacimento della domanda nel modo più efficiente possibile. Questo viene effettuato tramite l'ottimizzazione del sistema, mirando a capire quali tecnologie sono le migliori per un uso specifico e definendone le dimensioni e i metodi di gestione appropriati. Inoltre, l'approccio EH consente di analizzare eventuali investimenti futuri in nuove tecnologie o sistemi di gestione, consentendo di stimarne i benefici economici ed ambientali, in funzione delle caratteristiche tecniche ed economiche degli investimenti stessi.

Dall'inizio degli anni 2000 sono stati condotti numerosi studi sugli EH. Ad esempio in [10] si presenta una panoramica degli strumenti di modellazione attualmente disponibili, mentre in [11] si identificano delle caratteristiche tipologiche utili ad analizzare gli EH, ponendo particolare enfasi sullo studio dell'influenza delle dimensioni spazio-temporali di analisi. In [12] è riportata un'indagine dettagliata sulle diverse architetture di EH presenti in letteratura, definendo quali sono i componenti ed i vettori energetici. Sono inoltre considerati i vari aspetti caratterizzanti di tali sistemi e sono discussi gli obiettivi di gestione, intesi sia come erogazione del servizio agli utenti finali che come efficienza complessiva di sistema (ad esempio, puntando al contenimento delle emissioni di gas climalteranti), come schematicamente riportato in figura 2. Questi studi

continuano a ricevere particolare attenzione perché gli EH, soprattutto a livello residenziale, consentono di raggiungere elevati standard di efficienza soddisfacendo così gli obiettivi definiti negli accordi internazionali, come il COP21 sotto-

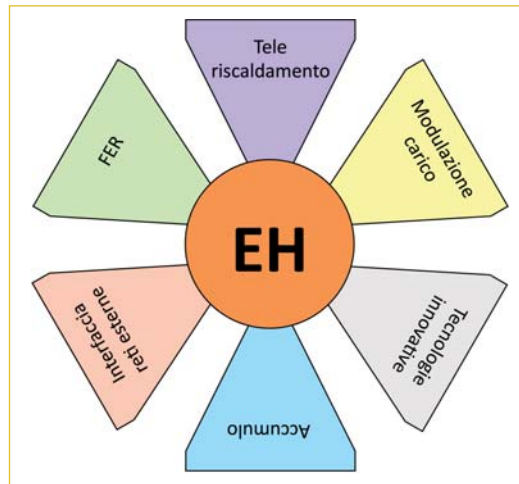


Figura 1 Elementi caratterizzanti di un Energy Hub

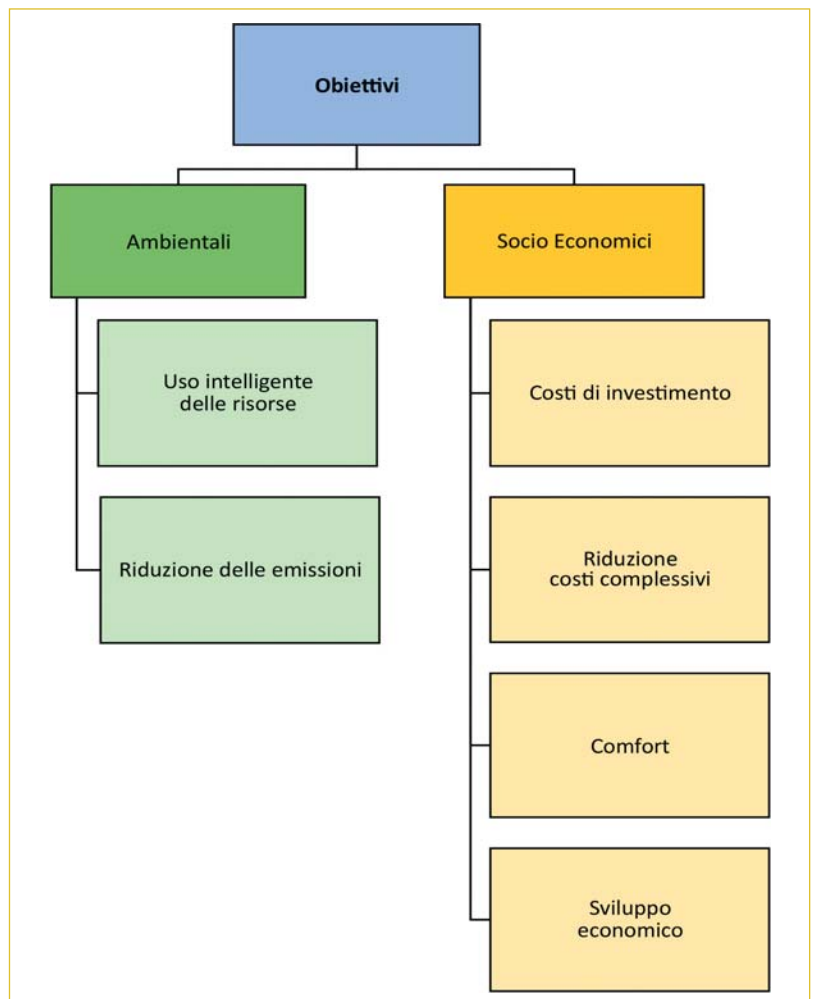


Figura 2 Obiettivi ambientali e socio-economici perseguibili nella configurazione e gestione di un Energy Hub

scritto a Parigi nel 2015. Inoltre, l'utilizzo sempre più frequente di macchine di recente introduzione sul mercato di piccola taglia, come CHP, microturbine ed ESS, rende possibile una gestione ancora più ottimizzata e flessibile degli EH, favorendo indirettamente uno sviluppo sistemico su larga scala. Più nello specifico, i sistemi di cogenerazione hanno visto un notevole sviluppo tecnologico e oggi, grazie alla loro compattezza, sono disponibili anche per piccole utenze, senza richiedere attenzioni eccessivamente impattanti o onerose in fase di installazione.

Il concetto di EH trova un'implementazione naturale soprattutto nei settori commerciale e residenziale, tipici dei contesti urbani e metropolitani, nei quali si possono adottare diverse soluzioni per migliorare l'efficienza complessiva. Nel caso di vecchi edifici, che non possono essere sottoposti a particolari interventi di manutenzione, il retrofit garantisce il raggiungimento degli standard previsti dalla nuova normativa sul rendimento energetico [12-14]. Diversamente, nel caso di edifici di nuova costruzione, l'EH permette un più facile raggiungimento dei vincoli imposti dalla normativa per le nuove costruzioni nell'Unione Europea dopo il 2021, con particolare interesse rivolto all'applicazione del concetto di EH agli edifici a energia quasi zero (*Near Zero Energy Building* - NZEB).

Il vettore elettrico ricopre un ruolo primario negli EH, considerato che garantisce delle conversioni con efficienza più elevata rispetto ad altri vettori (in primis la combustione in caldaie o motori) e che, oggi, la quasi totalità delle apparecchiature all'interno delle abitazioni sfrutta il vettore elettrico. Tale tendenza all'elettrificazione crescente dei consumi in contesti domestici/commerciali è anche incoraggiata dalla volontà di contenere l'emissione di inquinanti in aree urbane, allo scopo di migliorare localmente la qualità dell'aria. Per di più, si attende nel prossimo futuro una progressiva transizione verso questo dominio da parte di settori tradizionalmente fossili, come quello dei trasporti. Assume quindi primaria importanza la gestione e la riqualificazione del vettore elettrico, sfruttando le sue caratteristiche di flessibilità tecnica (livelli di tensione, sistemi AC o DC, ecc.) e gestendo i suoi limiti, come i costi ancora mediamente elevati per l'accumulo di tipo elettrochimico. Inoltre, considerando l'utilizzo delle FER disponibili in ambito urbano/metropolitano, al momento principalmente limitate al settore fotovoltaico, si aggiunge il tema della prevedibilità della generazione locale e della gestione dell'intermittenza della fonte primaria

nelle giornate non completamente soleggiate.

Le incertezze introdotte nello studio dei sistemi energetici sono dovute a un elevato tasso di variabilità (specialmente dovute al comportamento degli utenti e alla variabilità nella produzione da FER), quindi sono necessari maggiori sforzi per una adeguata caratterizzazione del problema [15]. A oggi sono in fase di sviluppo diversi progetti pilota elaborati da centri di ricerca con l'obiettivo di colmare questa lacuna. Ad esempio, ehub è un centro dimostrativo di ricerca dove vengono proposte alcune soluzioni energetiche per sistemi residenziali associati alla mobilità sostenibile (MOVE, NEST) [16]. In linea con questo progetto, ci sono altri centri di ricerca che si dedicano a obiettivi specifici, cioè che mirano a soddisfare esigenze particolari, sviluppando software dedicati e applicandoli a casi reali per la loro validazione [17, 18]. Un aspetto che richiede ancora uno studio approfondito è l'ottimizzazione multi-periodo di tali sistemi e la successiva validazione in contesti applicativi reali, dove è possibile comprendere in termini assoluti la robustezza della rappresentazione elaborata.

Il passaggio successivo da compiere sarà il trasferimento di questi metodi e soluzioni innovative al mercato reale. In questo, le aziende specializzate inizieranno a proporre il loro sistema EH ai clienti finali, in forma di fornitura di componenti/sistemi oppure con contratti energetici nei quali il beneficio dell'azienda fornitrice è correlato al miglioramento energetico dei propri clienti (fornitura di un servizio-energia con approccio *Energy Service Company* - ESCO). Una chiave di successo sarà costituita dalla abilità delle aziende nel caratterizzare dettagliatamente le soluzioni proposte, oltre che nell'interfacciamento reciproco tra prodotti, modalità operative di gestione, sensoristiche ed algoritmi di gestione, in relazione alla domanda degli utenti. A tal proposito, un'iniziativa interessante è quella proposta con il progetto (Energy) Lab program, promosso in Australia, che è orientato a fornire le competenze tecniche necessarie a coloro che dovranno operare nel settore EH [19].

## La struttura di un Energy Hub

Dall'introduzione del concetto di EH sono stati condotti molti studi nei quali vengono proposti metodi e soluzioni inerenti a particolari problemi relativi ad una o più parti essenziali dell'EH. In modo schematico, un EH è costituito da quattro elementi:

□ *input*, che nella interpretazione più tradizionale sono costituiti dalle connessioni alle reti

elettrica e gas. A queste, è possibile aggiungere altre sorgenti come l'energia termica da teleriscaldamento, particolarmente diffusa in alcune aree urbane o prossime a contesti industriali, nei quali è possibile sfruttare ad esempio il calore residuo derivante dai processi produttivi di tipo termico;

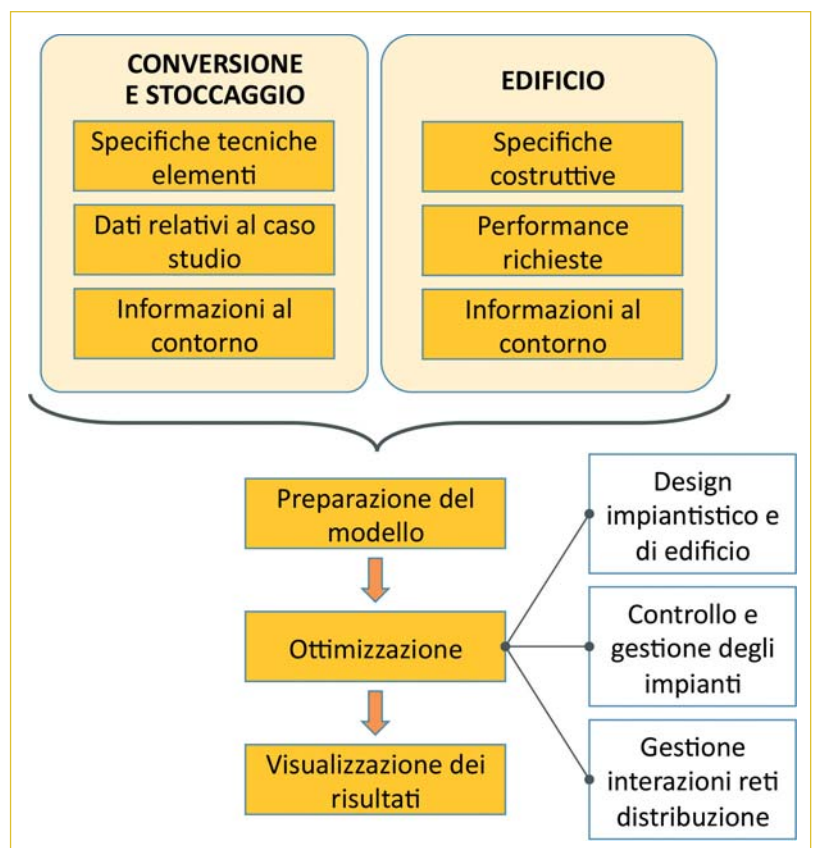
- *stadi di conversione*, che trasformano e/o immagazzinano i vettori energetici in ingresso in altre forme di energia. Questo processo è caratterizzato da un coefficiente che determina l'efficienza finale dello stadio. Inoltre, alcune tecnologie consentono di convertire un vettore di input in più vettori di output. Un esempio tipico sono i sistemi CHP, che mettono a disposizione congiuntamente energia elettrica ed energia termica a partire da un combustibile (tipicamente il gas);
- *sistemi di puro accumulo* (elettrico, termico, meccanico, ecc.), che permettono di immagazzinare l'energia, ad esempio prodotta localmente dalle FER quando la domanda è molto inferiore alla disponibilità rinnovabile locale. Questo aspetto è di particolare interesse per i veicoli elettrici dotati di accumulo a bordo, che possono rappresentare un elemento di novità da integrare nel sistema EH in quanto mettono a disposizione capacità molto significative disponibili, pur se in modo discontinuo, presso le utenze. Inoltre, è possibile adottare sistemi di accumulo per massimizzare l'approvvigionamento energetico nei momenti di minor costo oppure per massimizzare il beneficio economico del sistema in presenza di valorizzazione fortemente dissimetrica dello stesso vettore energetico in ingresso o in uscita. L'esempio tipico è quello elettrico, in quanto le immissioni in rete sono attualmente valorizzate al prezzo di mercato, mentre i prelievi sono gravati da varie componenti tariffarie e forme di tassazione;
- *uscite*, ovvero le richieste degli utenti in termini di profilo energetico. Queste vengono tipicamente studiate attraverso dati storici o previsti da algoritmi ad hoc. In questo, una corretta modellazione e previsione dei profili di carico elettrici e termici è di fondamentale importanza. Ad esempio, studi inerenti la profilazione di utenti-tipo sono stati effettuati con riferimento ai carichi elettrici in [20, 21].

Tali elementi sono relazionati matematicamente al fine di elaborare i flussi di potenza all'interno dell'EH [22]. Inoltre, grazie ai canali di comunicazione, l'EH può monitorare in modo capillare il sistema e implementare diverse logiche di controllo che permettano la corretta gestione de-

gli impianti, sia in locale che da remoto.

La determinazione della configurazione ottimale porta a significativi miglioramenti dell'intero sistema, sia in termini economici che ambientali. Questi studi sono suddivisi principalmente in due classi: la prima mira a trovare il corretto dimensionamento dei dispositivi installati nell'EH, mentre l'altra è focalizzata sulle tecniche di controllo e funzionamento del sistema. Come introdotto, nell'EH ci sono molti elementi collegati tra loro per soddisfare un obiettivo comune, ad esempio la riduzione del costo complessivo del sistema e delle emissioni nocive. Pertanto, devono essere prese in considerazione diverse variabili e il processo di modellazione può risultare complesso. In primo luogo, al fine di modellare un EH che deve soddisfare obiettivi specifici, lo sviluppatore deve analizzare le fonti di energia primaria disponibili nell'area esaminata, le caratteristiche degli edifici coinvolti e gli spazi dove i componenti saranno installati. L'esistenza di particolari restrizioni normative o servizi che devono essere forniti possono costituire dei vincoli da implementare nella preparazione del modello (figura 3).

Analizzando in dettaglio la struttura interna di un EH, è possibile rappresentare ogni elemento



**Figura 3** Informazioni e processo necessari per l'ottimizzazione di un EH

(ad esempio un convertitore) come un elemento *black block*, cioè un componente di cui non si conosce la costituzione interna, ma solo le principali relazioni che ne regolano il funzionamento. Esso può essere descritto da alcune informazioni riguardanti il rendimento, fattori di dispacciamento, modalità di funzionamento e qualsiasi altra relazione che ne descriva il comportamento verso l'esterno, trascurando ogni specifica conoscenza interna. In questo modo, la trasformazione tra input e output viene descritta attraverso formulazioni matematiche, che di solito rappresentano i flussi energetici, considerando l'efficienza e i vincoli tecnici del componente installato. In forma sintetica, l'equazione (1) rappresenta la correlazione tra un vettore energetico  $\alpha$  in ingresso ( $P_\alpha$  rappresenta uno stato stazionario di un vettore in input) e un vettore energetico  $\beta$  in uscita (stato stazionario  $L_\beta$ ). Il fattore di accoppiamento  $C_{\alpha\beta}$  rappresenta la correlazione input-output creata dal dispositivo, ovvero modella le conversioni e/o riconversioni interne al dispositivo.

$$L_\beta = C_{\alpha\beta} P_\alpha, \quad (1)$$

Considerato che un EH è tipicamente un sistema multi-vettore e multi-conversione, la relazione diventa generalmente a struttura matriciale, di conseguenza la sua risoluzione può risultare più complessa e richiedere algoritmi più robusti o formulazioni specifiche. Volendo rendere il modello più dettagliato, è possibile inserire nella relazione appena introdotta altre informazioni, come la dipendenza del fattore di accoppiamento dalla potenza prodotta istantaneamente, ovvero l'andamento del rendimento delle macchine alle frazioni di carico. Assume inoltre rilievo la definizione del fattore di dispacciamento per convertitori multi-vettore, ovvero è necessario definire in che modo uno o più vettori di ingresso sono convogliabili nei vettori energetici in uscita.

Per l'ottenimento di una soluzione ottimale, ovvero l'identificazione di un punto di minimo assoluto (o di massimo assoluto) della funzione obiettivo, è opportuno capire quali informazioni risultano essenziali per raggiungere lo scopo, al fine di evitare informazioni dubbie che potrebbero far crescere in modo significativo lo sforzo computazionale. Due caratteristiche di fondamentale importanza per la determinazione di una soluzione ottimale sono le dimensioni spaziali del progetto (singola utenza, quartiere o città) e la risoluzione temporale scelta per l'elaborazione dei dati (dai secondi alle ore), in quan-

to entrambi questi aspetti influenzano pesantemente le tecniche di modellazione [11]. I due aspetti sono reciprocamente correlati: per reti di piccole dimensioni è possibile analizzare il sistema con relativa facilità, adottando passi temporali brevi; diversamente, quando la rete ha dimensioni maggiori e include molti elementi è necessario effettuare una elaborazione con intervalli di tempo più lunghi e/o con un grado di dettaglio inferiore.

Una volta completata l'intera fase di definizione del sistema, in modo da considerare gli ingressi, le uscite, i componenti interni di conversione e stoccaggio e tutti i vincoli relativi al sistema energetico (ad esempio, massima potenza producibile o consumabile, possibilità di prelievo/immissione verso le reti cui l'utente è connesso, profili di carica e scarica dei sistemi di accumulo, temperature desiderate negli ambienti e negli impianti), deve essere formulato il problema di ottimizzazione. L'equazione (2) riportata una semplice formulazione del problema con l'obiettivo di ridurre i costi totali [22].

$$Cost(P) = \sum_{\alpha \in \mathcal{E}} C_\alpha(P_\alpha) \text{ soggetta a } \begin{cases} L = CP \\ P_{min} \leq P \leq P_{max} \\ 0 \leq v_{\alpha,i} \leq 1 \\ \sum_i v_{\alpha,i} = 1 \end{cases} \quad (2)$$

Dove  $\alpha$  è un vettore energetico specifico,  $\mathcal{E}$  sono tutti i vettori energetici considerati nel sistema,  $C_\alpha$  e  $Cost(P)$  sono rispettivamente il costo individuale per singolo vettore energetico e il costo totale per la domanda di energia e  $i$  è il numero di hub considerati (qualora si consideri l'aggregazione di più edifici contigui). Concludendo,  $P$  e  $L$  sono i vettori che rappresentano rispettivamente input e output.

La risoluzione di questi problemi di ottimizzazione è ottenibile con software commerciali o open source (soprattutto in contesti semplificati). Questi sistemi di modellazione sono scelti in base al tipo di problema formulato e al livello di dettaglio dei risultati ricercati. Essi forniscono alcune soluzioni adottabili, lasciando al progettista una puntuale valutazione delle configurazioni possibili in relazione ai vincoli specifici del sito [23]. Un caso particolarmente semplice si verifica quando il problema è convesso (la funzione che descrive il problema presenta solo un minimo globale) e le condizioni al contorno sono lineari (ad esempio l'efficienza degli elementi interni ai *black block* è costante per tutto l'intervallo di lavoro ammesso). Queste ipotesi consentono di utilizzare metodi di risoluzione matematica piuttosto semplici, come il LP - *Linear Programming* o, quando vengono definite condizioni che prevedono l'utilizzo di variabili di-



scrite (ad esempio per definire lo stato operativo di una macchina da spenta ad accesa), è possibile adottare il MILP - *Mixed Integer Linear Programming*. Il problema diventa più difficile da ottimizzare quando il problema non è convesso, ovvero ad esempio quando le condizioni al contorno non sono lineari. In questi casi devono essere utilizzati metodi speciali che non sempre forniscono la soluzione corretta. Ad esempio, se il problema è descritto da funzioni non lineari, è possibile utilizzare approcci come il MINLP (*Mixed Integer Non Linear Programming*), il MIQP (*Mixed Integer Quadratic Programming*) o il MISP (*Mixed Integer Sequential Programming*) [15-24]. Un modo semplificato ma talvolta efficace per affrontare questi problemi è quello di linearizzare le formulazioni attorno al punto di lavoro stimato per ridurre il problema matematico e poter quindi tornare ad utilizzare metodi di ottimizzazione più tradizionali.

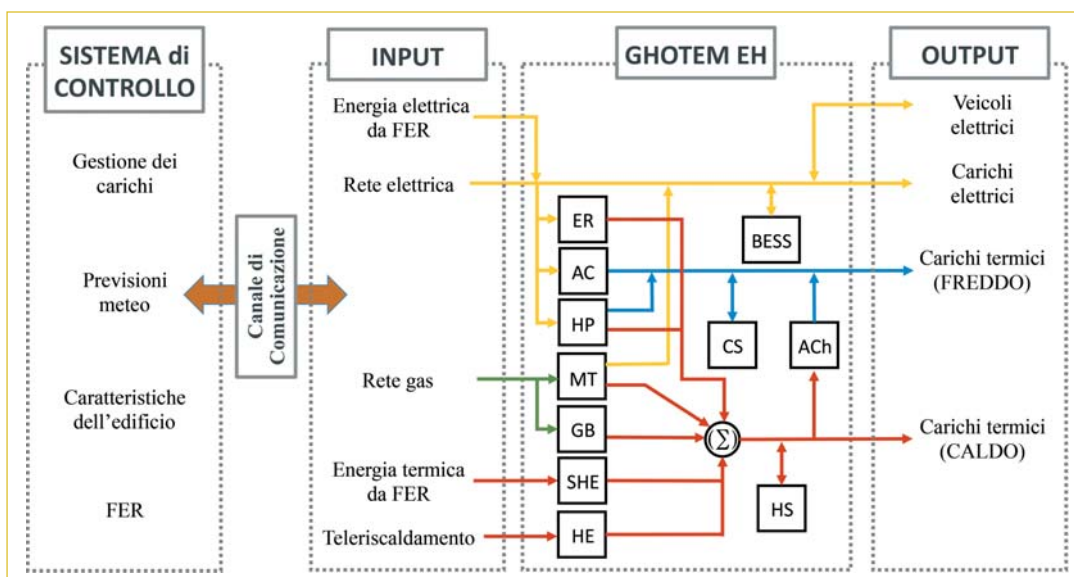
## Il progetto GHOTEM

Nell'ottica dell'applicazione del concetto EH, il progetto di ricerca GHOTEM (*Global House Thermal & Electrical energy Management for efficiency, lower emission and renewables*), finanziato dalla Regione Veneto, mira ad integrare diverse tecnologie proposte da aziende specializzate per migliorare l'efficienza energetica e il comfort degli utenti nel settore residenziale. Gli obiettivi economici e ambientali tipici di un approccio EH sono in questo caso perseguiti anche attraverso una gestione ottimizzata e integrata degli accessi alle reti, includendo anche il sistema di teleriscaldamento, oltre alla rete elettrica e alla rete gas. Tali approvvigionamenti

energetici sono abbinati alla produzione locale tramite FER (di tipo fotovoltaico) e/o CHP.

Il progetto GHOTEM riguarda sia gli edifici residenziali nuovi che quelli di costruzione meno recente, con l'obiettivo finale di migliorarne l'efficienza complessiva. I risultati saranno misurati attraverso diversi Key Performance Indicator (KPI) proposti dalle aziende e dagli organi di ricerca partner del progetto. Il settore residenziale richiede particolare attenzione dal punto di vista progettuale, anche in riferimento ai piani regolatori localmente applicati, in quanto è uno dei più energivori (in Europa comporta il 40% del consumo energetico e circa il 38% della produzione di CO<sub>2</sub>). In questo, diventa imprescindibile tenere in considerazione che, a partire dal 2021, i nuovi edifici dovranno rispettare i vincoli tecnici NZEB nell'intero continente. Tale vincolo dovrà essere rispettato tenendo conto delle differenze di ubicazione, delle disponibilità locali di risorse energetiche primarie, ecc. È infine prioritario rappresentare anche aspetti emergenti come le *energy community* locali, in grado di armonizzare l'interazione energetica tra i vari utenti in una data area geograficamente confinata, al fine di perseguire un miglioramento dell'efficienza energetica globale del sistema [25].

Lo schema più generale dell'EH sviluppato nell'ambito del progetto GHOTEM è riportato in figura 4. La rappresentazione complessiva è orientata a includere tutte le possibili tecnologie affini alla dimensione del contesto applicativo residenziale, mentre l'implementazione di specifici casi studi considererà rappresentazione semplificate composte dai soli dispositivi effettivamente installati. Sul lato input, l'EH è alimentato da energia elettrica, gas naturale, teleriscaldamento



**Figura 4** Struttura interna dell'Energy Hub sviluppato nel progetto GHOTEM, con dettaglio di input, output e stadi interni di conversione ed accumulo

mento e impianti FER, di natura elettrica e/o termica. Le uscite alimentano i carichi elettrici, cui si collega il sistema di ricarica del veicolo elettrico, e i carichi termici (caldo e freddo). All'interno del sistema sono presenti:

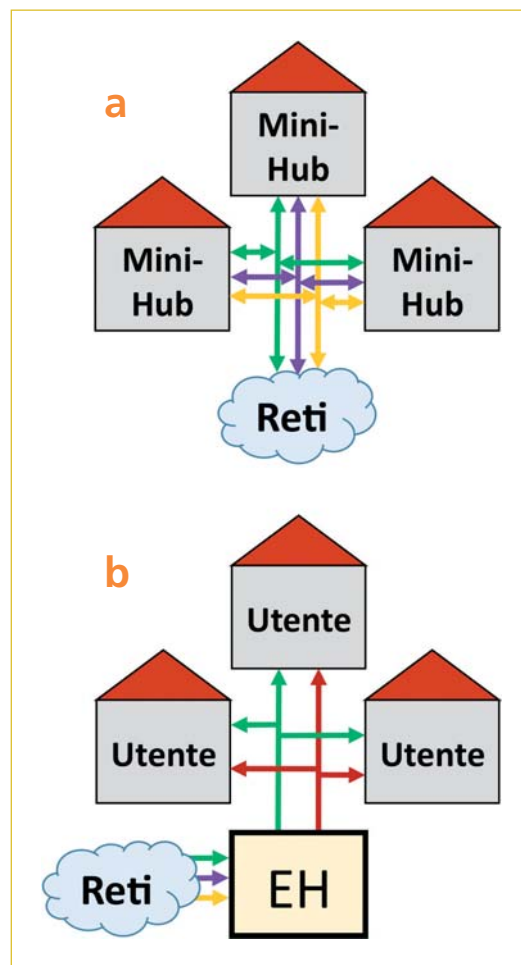
- Conversione elettrico → caldo (resistenza elettrica ER);
- Conversione elettrico → freddo (condizionatore d'aria AC);
- Conversione elettrico → caldo/freddo (pompa di calore HP);
- Conversione gas → elettrico/caldo (microturbina MT e/o CHP);
- Conversione gas → caldo (caldaia a gas GB);
- Conversione solare → caldo (scambiatore di calore solare SHE);
- Conversione elettrico/caldo → freddo (raffreddatore ad assorbimento ACh);
- Scambiatore di calore dalla rete di teleriscaldamento (HE);
- Sistema di accumulo di energia elettrica (*Battery Energy Storage System*, BESS);
- Sistema di accumulo di freddo (CS);
- Sistema di accumulo di caldo (HS).

Grazie alla genericità di questa rappresentazione, è possibile ottimizzare l'intero sistema e raggiungere una profonda comprensione di quali di questi elementi siano effettivamente essenziali, ovvero quali siano i dispositivi la cui assenza potrebbe comportare una riduzione significativa dei benefici economici e/o ambientali conseguibili [26].

Un aspetto molto importante da tenere in considerazione per gli EH è inerente al canale di comunicazione che permette uno scambio bidirezionale d'informazioni tra il sistema energetico e un sistema di controllo [27]. L'architettura flessibile degli EH consente di studiare sia sistemi di piccola dimensione strettamente correlati a un utente specifico dotato di proprie interconnessioni con le reti (figura 5a) che sistemi più complessi che fungono da organo di controllo e coordinamento per architetture multi-utente, nelle quali l'EH funge da unica interfaccia verso le reti (*energy community*, figura 5b). La prima configurazione permette lo studio ottimizzato di singoli utenti, mentre nella seconda è possibile sfruttare la scalabilità dell'approccio EH per massimizzare il beneficio energetico su scala locale. I benefici di un approccio multi-utente si manifestano anche dal punto di vista economico, potendo sfruttare piccole economie di scala e aggregando funzioni altrimenti disperse (ad esempio realizzando un impianto di accumulo di quartiere/condominio). In quest'ottica, è possibile fornire indicazioni significative in merito

alla pianificazione e alla gestione di sistemi energetici urbani in modo sostenibile, su un orizzonte temporale esteso. In questo, i Sistemi Informativi Geografici (GIS) offrono molti vantaggi e possono svolgere un ruolo significativo nell'integrazione delle FER su scala urbana, in quanto una rappresentazione realistica e multi-livello del territorio facilita la definizione e l'implementazione delle politiche locali, anche in ambito energetico [28].

Il sistema di controllo può implementare diverse logiche che si basano su particolari condizioni al contorno, quali previsioni meteo, caratteristiche tecniche dell'edificio, previsioni di produzione delle FER e abitudini degli utenti. Un'ulteriore evoluzione è costituita dall'integrazione dei sistemi predittivi negli algoritmi di controllo, con lo scopo di gestire informazioni previsionali e massimizzare i benefici conseguibili dai sistemi controllati su un orizzonte temporale futuro. In particolare, l'implementazione di algoritmi



**Figura 5** Possibili configurazioni di EH:   
**a** tutti gli edifici dispongono di un set di impianti per la conversione e riqualificazione dell'energia;   
**b** gli edifici presenti in un'area sono coordinati e interfacciati alle reti da un unico EH

predittivi si abbina molto efficacemente con la gestione di dispositivi caratterizzati da vincoli integrali, come i sistemi di accumulo (lo stato di carica futuro dipende dai profili di carica/scarica che verranno pianificati anche negli istanti successivi). Inoltre si possono implementare nel sistema altre strategie di controllo, come il *Demand Response* - DR, che possono svolgere un ruolo vitale nel trasferimento del carico di punta, ovvero nella limitazione delle potenze nominali delle connessioni alle reti. Infine, ottimizzare un sistema significa anche considerare eventuali limitazioni legate ad agenti esterni (come la mancanza di spazio all'interno dell'edificio o la ridotta superficie di copertura per l'installazione di convertitori solari e/o impianti fotovoltaici) e a politiche stringenti che impongono l'uso di particolari elementi.

Considerato l'ambiente d'intervento del progetto, dove sono presenti diverse tipologie di utenze residenziali, è opportuno definire delle classi caratteristiche e scenari di studio, legati alle dimensioni geometriche, all'epoca di costruzione, alla posizione geografica e alla destinazione d'uso finale degli edifici. In questo modo, una volta elaborato un piano di riqualificazione per una classe sarà possibile adottare tale soluzione su tutti gli edifici simili per caratteristiche, con piccole modifiche correlate alle peculiarità dei singoli interventi, riducendo così i tempi di progettazione e quindi anche i costi complessivi.

Tipicamente, al fine di aumentare l'efficienza dell'intero sistema e rispettare gli standard normativi, saranno necessari anche dei cambiamenti strutturali. In questo caso i maggiori problemi derivano dagli edifici esistenti, in quanto esistono diversi vincoli che limitano l'azione di riqualificazione, quali ad esempio la disponibilità di spazio interno o la possibilità di realizzare camini. In tali situazioni sarà necessario applicare una logica di intervento ad hoc.

Quando si attuano azioni di retrofitting e quindi modifiche ai sistemi costruttivi, oltre all'efficienza energetica devono essere considerati altri fattori, quali il comfort interno e le prestazioni idro-termiche e acustiche, che possono essere fattori decisivi per l'utente finale. Il problema del controllo del comfort termico interno agli edifici dotati di impianti di riscaldamento, ventilazione e condizionamento è sostanziale nel settore residenziale e terziario (come locali commerciali e ospedali). La sensazione di comfort termico degli occupanti è un fattore soggettivo e per questo motivo, ai fini della determinazione di una strategia di controllo base, ci si affida ad indici di comfort definiti dalle normati-

ve, come il noto *Predicted Mean Vote* - PMV, e da valori definiti in una tabella psicrometrica. Ad esempio, in [29] si propongono diverse strategie per gli algoritmi di controllo associati a un sistema di raffreddamento e/o riscaldamento. La prima serie di strategie è legata all'ottimizzazione del comfort termico e la seconda prevede la minimizzazione dei consumi energetici, mantenendo il criterio del comfort termico interno ad un livello adeguato. I metodi si basano sullo schema di controllo predittivo e i risultati dell'elaborazione sono utilizzati per definire il comando ai dispositivi attuatori. In relazione al retrofitting, in [30] si riportano delle analisi di ottimizzazione sia energetica che di comfort termico, eseguite per un hotel, modellato seguendo i principi della Direttiva EPBD recast. L'indagine ha verificato che i diversi scenari di retrofitting previsti fossero in grado di garantire agli occupanti le condizioni di comfort termico di categoria I secondo la norma EN 15251, che definisce tra gli altri i valori per l'indice PMV.

Per questo motivo, in fase di progettazione si deve tenere conto di tali informazioni, seppur considerabili come secondarie, in quanto possono avere influenza sulla soddisfazione finale dell'utente. Infatti, la riduzione dei consumi energetici nel settore residenziale potrebbe portare a risultati significativi anche tramite alcune modifiche nelle abitudini dell'utente (corrispondenti a modifiche negli andamenti temporali degli output), ma è importante che le nuove condizioni non creino insoddisfazione. In quest'ottica, il progetto GHOTEM prenderà in considerazione le misurazioni dell'indice di comfort all'interno delle case così come l'efficienza energetica e le emissioni pre- e post-intervento di riqualificazione. In abbinamento a questo, è prevista l'installazione di un sistema di controllo e raccolta dati per la normale gestione delle macchine (irraggiamento solare, temperatura, prezzo dell'energia, eventuali programmi impostati dall'utente), mentre altri dati verranno salvati ed elaborati in un secondo momento per comprendere la bontà della soluzione proposta. Dal punto di vista tecnico, i sensori disposti nell'abitazione test per effettuare il controllo e la raccolta dati sfrutteranno la tecnologia LORA (*Long Range*), che consente di rilevare i dati anche in assenza di connessioni alla rete elettrica per un lungo periodo. Questa tecnologia si adatta bene anche alla necessità di limitare gli interventi strutturali negli edifici storici. L'installazione di questi dispositivi è semplice, non invasiva e la gestione delle misure può essere effettuata in base alle esigenze dell'utente.

## Conclusioni

Nell'ottica di un paradigma energetico sostenibile, è necessario adottare soluzioni tecnologiche che consentano di ridurre le emissioni nocive e permettano un migliore sfruttamento dell'energia a disposizione, assicurando al contempo agli utenti finali un servizio di qualità aumentata e meno oneroso rispetto all'attuale. L'Energy Hub è uno strumento utile per raggiungere questo target, in quanto consente sia una adeguata pianificazione dei sistemi che una loro gestione otti-

mizzata, in relazione agli obiettivi che il sistema punta a perseguire. In particolare, con il progetto GHOTEM si vuole creare uno strumento di studio in grado di analizzare con un approccio semplificato ogni EH, al fine di poterlo proporre ai soggetti operanti nel settore, in particolare alle aziende, che partecipano e contribuiscono al progetto.

Il presente lavoro è stato sviluppato nell'ambito di un progetto realizzato avvalendosi del finanziamento POR - Obiettivo "Investimenti a favore della crescita e dell'occupazione" Parte FESR fondo europeo di sviluppo regionale 2014-2020, Asse 1 Azione 1.1.4

## bibliografia

[1] UNRIC: *Agenda 2030*, 2015. <https://www.unric.org/it/agenda-2030>

[2] CO<sub>2</sub> emissions per capita vs GDP per capita, 2016. <https://ourworldindata.org/grapher/co-emissions-per-capita-vs-gdp-per-capita-international>

[3] MISE, MATTM e MIT: *Proposta di Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima*, 2018. <https://energiaclima2030.mise.gov.it/index.php/il-piano>

[4] M. Geidl, G. Koeppl, P. Favre-Perrod, B. Klöckl, G. Andersson, K. Fröhlich: Energy hubs for the future, *IEEE Power & Energy Magazine*, vol. 5, pp. 24-30, 2007.

[5] M. Geissdoerfer, P. Savaget, N. M. P. Bocken, E. J. Hultink: The Circular Economy-A new sustainability paradigm?, *Journal of Cleaner Production*, vol. 143, pp. 757-768, 2017.

[6] C. Wulf, J. Linben, P. Zapp: Review of Power-to-Gas Projects in Europe, *Energy Procedia*, vol. 155, pp. 367-378, 2018.

[7] F. Bignucolo, M. Coppo, G. Crugnola, A. Savio: Application of a simplified thermal-electric model of a sodium-nickel chloride battery energy storage system to a real case residential prosumer, *Energies*, vol. 10 (10), art. n. 1497.

[8] European Commission: *Supply and Demand Side Innovation Policies*, 2016. <https://rio.jrc.ec.europa.eu/en/library/supply-and-demand-side-innovation-policies>

[9] L. Carradone, F. Bignucolo: Distributed multi-generation and application of the energy hub concept in future networks, in *43<sup>rd</sup> International Universities Power Engineering Conference*, Padova, 2008.

[10] K. H. Ringkjøb, P. M. Haugan, I. M. Solbrenke: A review of modelling tools for energy and electricity systems with large shares of variable renewables, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 96, pp. 440-459, 2018.

[11] L. Kriechbaum, G. Scheiber, T. Kienberger: Grid-based multi-energy systems - modelling, assessment, open source modelling frameworks and challenges, *Energy, Sustainability and Society*, pp. 8-35, 2018.

[12] M. Mohammadi, Y. Noorollahi, B. Mohammadi-ivatloo, H. Yousefi: Energy hub: From a model to a concept - A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 80, pp. 1512-1527, 2017.

[13] EUR-LEX: *Commission Recommendation (EU) 2016/1318*, 29 July 2016. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32016H1318&qid=1551199874378&from=IT>

[14] Building Performance Institute Europe BPIE: *New Building*. <http://bpie.eu/focus-areas/new-buildings/>

[15] M. Mohammadi, Y. Noorollahi, B. Mohammadi-ivatloo, H. Yousefi, S. Jalilinasabady: Optimal scheduling of energy hubs in the presence of uncertainty - A review, *Journal of energy management and technology*, n. JEMT 1701-1009, 2017.

[16] EMPA: *ehub - The Energy Hub Demonstrator*. <https://www.empa.ch/web/energy-hub>

[17] Fratean, P. Dobra: Control strategies for decreasing energy costs and in-

creasing self-consumption in nearly zero-energy buildings, *Sustainable Cities and Society*, vol. 39, pp. 459-475, 2018.

[18] S. Ma, D. Zhou, H. Zhang, S. Weng, T. Shao: Modeling and operational optimization based on energy hubs for complex energy networks with distributed energy resources, *Journal of Energy Resources Technology*, vol. 141, 2019.

[19] (Energy)Lab: <https://energylab.org.au/>

[20] N. Natale, F. Pilo, G. Pisano, M. Troncia, F. Bignucolo, M. Coppo, R. Turri: Assessment of typical residential customers load profiles by using clustering techniques, *Conferenza annuale AEIT*, Cagliari, 2017.

[21] S. Mocchi, F. Pilo, G. Pisano, M. Troncia: Two-stage Clustering for Profiling Residential Customer Demand, *2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, Palermo, 2018.

[22] Eladi, M. El-Affifi, M. El-Saadawi: Optimal Power Dispatch of Multiple Energy Sources in Energy Hubs, in *Nineteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*, Menoufia University, Egypt, 2017

[23] K. H. Ringkjøb, P. M. Haugan, I. M. Solbrenke: A review of modelling tools for energy and electricity systems with large shares of variable renewables, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 96, pp. 440-459, 2018.

[24] R. Evins, K. Orehounig, V. Dorer, J. Carmelet: New formulations of the 'energy hub' model to address operational constraints, *Energy*, n. 73, pp. 387-398, 2014.

[25] J. Wang, H. Zhong, Z. Ma, Q. Xia, C. Kang: Review and prospect of integrated demand response in the multi-energy system, *Applied Energy*, n. 202, pp. 772-782, 2017.

[26] A. Vian, F. Bignucolo, M. De Carli: Modelling and optimization Approach of Residential energy Hub: the GHOTEM Project, in *1<sup>st</sup> International Conference on Energy Transition in the Mediterranean Area SyNERGY MED 2019*, Cagliari, 2019.

[27] I. Pukite, I. Geipele: Different Approaches to Building Management and Maintenance Meaning Explanation, *Procedia Engineering*, vol. 172, pp. 905-912, 2017.

[28] A. Alhamwi, W. Medjroubi, T. Vogt, C. Agert: GIS-based urban energy systems models and tools: Introducing a model for the optimization of flexibilisation technologies in urban areas, *Applied Energy*, vol. 191, pp. 1-9, 2017.

[29] R. Z. Freire, G. H. C. Oliveira, N. Mendes: Predictive controllers for thermal comfort optimization and energy savings, *Energy and Buildings*, vol. 40, pp. 1353-1365, 2008.

[30] T. Buso, C. Becchio, S. P. Corgnati: NZEB, cost-and comfort-optimal retrofit solution for an Italian Reference Hotel, *Energy Procedia*, vol. 140, pp. 217-230, 2017.