

# Ricerca di Sistema elettrico



**Analisi ed ottimizzazione dei sistemi di monitoraggio,  
controllo e feedback dei consumi di energia e di  
acqua calda sanitaria, del comfort e della qualità  
dell'aria negli edifici (LA4.3)**

Marco Dell'Isola, Giorgio Ficco, Laura Canale



ANALISI ED OTTIMIZZAZIONE DEI SISTEMI DI MONITORAGGIO, CONTROLLO E FEEDBACK DEI  
CONSUMI DI ENERGIA E DI ACQUA CALDA SANITARIA, DEL COMFORT E DELLA QUALITÀ DELL'ARIA  
NEGLI EDIFICI (LA4.3)

Marco Dell'Isola, Giorgio Ficco, Laura Canale, Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale

Giugno 2023

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica - ENEA  
Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024

Obiettivo: Decarbonizzazione

Progetto: 1.5 - Edifici ad alta efficienza per la transizione energetica

Linea di attività: 4.3

Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi, ENEA

Responsabile del Work Package: Biagio Di Pietra, ENEA

Responsabile Linea di Attività: UNICAS\_DICEM

Mese inizio previsto: gennaio 2022

Mese inizio effettivo: giugno 2023

Mese fine previsto: gennaio 2022

Mese fine effettivo: giugno 2023

*Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Analisi ed ottimizzazione dei sistemi di monitoraggio, controllo e feedback dei consumi di energia e di acqua calda sanitaria, del comfort e della qualità dell'aria negli edifici / Analisi, sperimentazione e validazione della metodologia di calcolo dello Smart Readiness Indicator nel contesto edilizio italiano"*

Responsabile scientifico ENEA: Biagio Di Pietra

Responsabile scientifico Co-beneficiario: Marco Dell'Isola

## Indice

1	RISULTATI ATTESI .....	3
2	RISULTATI OTTENUTI.....	4
3	PRODOTTI ATTESI.....	7
4	PRODOTTI SVILUPPATI .....	8
5	ANALISI DEGLI SCOSTAMENTI SU ATTIVITÀ E RISULTATI.....	9
6	SINTESI DELLE ATTIVITÀ SVOLTE.....	10
7	DETTAGLIO DELLE ATTIVITÀ SVOLTE.....	11
8	CONTRIBUTO DELLE EVENTUALI CONSULENZE ALLE ATTIVITÀ SOPRA DESCRITTE .....	15
9	PUBBLICAZIONI SCIENTIFICHE .....	16
10	EVENTI DI DISSEMINAZIONE.....	17

## 1 Risultati attesi

Le attività sviluppate nell'ambito della LA 4.3 hanno l'obiettivo di analizzare e sperimentare le tecnologie smart di misura, gestione e controllo, ricavando indicazioni qualitative e quantitative per l'ottimizzazione della piattaforma web EMPOWER, sviluppata da ENEA con l'obiettivo di aumentare la consapevolezza degli utenti finali sulla corretta gestione dei consumi energetici e la riduzione dell'impatto ambientale.

Si riportano di seguito, nella forma di elenco puntato sintetico, i risultati attesi dalle attività della LA4.3, distinti per singola fase:

- Fase 1: la caratterizzazione dei parametri di ottimizzazione dei sistemi di feedback energetico ed ambientale, utili ad integrare le informazioni qualitative a disposizione di ENEA per la fase di ottimizzazione della piattaforma EMPOWER, ai fini della massimizzazione del risparmio energetico, del miglioramento del comfort e della qualità dell'aria indoor.
- Fase 2: la quantificazione del risparmio energetico e di ACS nonché del miglioramento del comfort e dell'IAQ potenzialmente ottenibile attraverso l'informazione e la maggiore consapevolezza degli utenti finali, con uno sguardo agli effetti di breve termine e/o lungo termine, al fine di ricavare nuovi contenuti, quali e.g., benchmark statistici di risparmio e casi di studio esemplificativi di buone pratiche per il successivo sviluppo di materiale informativo e divulgativo.
- Fase 3: lo sviluppo e l'analisi di nuovi contenuti implementabili nella piattaforma EMPOWER per incrementare il livello di comprensione e consapevolezza degli utenti, con riferimento a indicatori nuovi e ottimizzati per l'acqua calda sanitaria (ACS) e la Qualità dell'Aria Indoor (IAQ), non già inclusi nel primo prototipo di piattaforma, e un algoritmo per l'individuazione dei consumi anomali atto a fornire agli utenti, e.g., una mini diagnosi personalizzata, consigli per il miglioramento degli stili di consumo/ventilazione etc..
- Fase 4: l'individuazione di un ulteriore condominio ad alta efficienza energetica, ai fini dell'ampliamento dei casi di studio coinvolti nell'utilizzo della piattaforma e della successiva sperimentazione in campo della piattaforma ottimizzata.

Tutte le attività sviluppate vogliono fornire elementi progettuali condivisibili per lo sviluppo di applicativi di feedback energetico ed ambientale.

## 2 Risultati ottenuti

Di seguito si riporta una sintesi dei principali risultati ottenuti nell'ambito del progetto, descritti per esteso nel deliverable "LA4.3 Analisi ed ottimizzazione dei sistemi di monitoraggio, controllo e feedback dei consumi di energia e di acqua calda sanitaria, del comfort e della qualità dell'aria negli edifici" (Report di dettaglio).

### 2.1 Fase 1

- L'analisi congiunta della letteratura scientifica e dei risultati dell'indagine conoscitiva ha evidenziato i punti chiave da tenere in considerazione nello sviluppo e nella progettazione dei sistemi di feedback;
- Il questionario sviluppato per l'indagine è disponibile al link: <https://forms.gle/KR7YrY2tCwYgK4dCA>
- Sono stati individuati i possibili fattori di ottimizzazione dei sistemi di feedback energetico ed ambientale in termini di i) mezzo e modalità di comunicazione; ii) contenuti; iii) frequenza; iv) disaggregazione; v) visualizzazione; vi) benchmark.
- Per ciascun fattore, sono stati descritti i consigli e le raccomandazioni, derivate dall'analisi della letteratura e dell'indagine conoscitiva, per il miglioramento della piattaforma EMPOWER (Tabella 1).

**Tabella 1 - Suggerimenti utili al miglioramento della piattaforma EMPOWER**

	<b>Suggerimento</b>
<b>Mezzo e modalità di comunicazione</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Sviluppo di applicazione per tablet/smartphone;</li><li>• Invio di notifiche push periodiche (frequenza settimanale) e/o all'accadimento di un evento di fault;</li></ul>
<b>Contenuto</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Implementare in piattaforma una stima del costo associato al consumo giornaliero (€):</li><li>• Al fine di evitare il "licensing effect", il costo dovrebbe essere fornito come proiezione di risparmio annuo (e.g., "continuando con questo stile di consumo potresti risparmiare 100€ sulla bolletta del gas quest'anno/questo mese");</li><li>• Implementare in piattaforma una misura di impatto ambientale, sottoforma di "alberi piantati";</li><li>• Fornire una proiezione stagionale dell'impatto ambientale (e.g., "continuando con questo stile di consumo raggiungi l'equivalente di 100 alberi quest'anno/questo mese").</li></ul>
<b>Frequenza</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Fornire flessibilità nella visualizzazione dei dati di monitoraggio energetico ed ambientale;</li><li>• L'utente dovrebbe essere in grado di visualizzare: i) il dato istantaneo (ove possibile); ii) il dato storico giornaliero dall'inizio della stagione di riscaldamento in corso; iii) il dato storico mensile e stagionale a partire dall'inizio del monitoraggio.</li></ul>
<b>Disaggregazione dei dati</b>	Ove tecnicamente ed economicamente fattibile: <ul style="list-style-type: none"><li>• fornire la disaggregazione dei consumi di energia elettrica per dispositivo (necessaria installazione di smart-plug);</li><li>• fornire la disaggregazione dei consumi di energia termica per servizio (necessaria installazione di CET divisionali).</li></ul>
<b>Visualizzazione</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Implementare il grafico "tachimetro" per la visualizzazione dei consumi istantanei;</li><li>• Implementare una visualizzazione con grafici a linee o a barre per i consumi storici;</li><li>• Implementare una visualizzazione per ideogrammi degli indicatori di benchmarking.</li></ul>
<b>Benchmark</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Implementare il benchmarking storico su tutti i dati visualizzati in piattaforma (riferirsi alle indicazioni sulla "frequenza" per la determinazione del periodo di riferimento);</li><li>• Implementare il benchmarking statistico e/o per obiettivo su tutti i dati visualizzati in piattaforma.</li></ul>

### 2.2 Fase 2

- Dall'analisi dei risultati dei casi di studio, è stato stimato il risparmio atteso nel consumo destagionalizzato di gas naturale ottenibile attraverso una campagna di feedback personalizzato sui consumi di energia termica mediamente pari al 14.8%.

- Dall'analisi dei consumi dopo l'introduzione di sistemi di contabilizzazione individuale e della fatturazione a consumo dell'ACS (feedback indiretto) di 137 edifici residenziali alimentati da una rete di teleriscaldamento in Polonia, è stato stimato un risparmio medio del 14% del consumo di energia termica e del 32% dei volumi di acqua prelevata per la produzione di ACS .
- È stata condotta un'indagine sperimentale in campo per valutare l'efficacia di una campagna informativa sulla IAQ (eco-feedback) in termini di esposizione a diversi parametri di particelle aerodisperse, registrando una diminuzione dell'esposizione mediamente pari al 47% e 59% rispettivamente per PM10 e PNC;
- È stata sviluppata una scheda esemplificativa di una buona pratica di risparmio energetico , ricavata dall'analisi del caso di studio 1 e direttamente implementabile nella piattaforma EMPOWER come contenuto informativo accessibile al link: <https://efficienza-e-consapevolezza.my.canva.site/>.

### 2.3 Fase 3

- Dall'analisi della letteratura tecnico-scientifica, sono stati individuati una serie di indicatori di benchmark dei consumi di acqua calda sanitaria e dei parametri di comfort e qualità dell'aria, facilmente implementabili nella piattaforma per fornire ulteriori servizi informativi e di confronto;
- Per il benchmarking dell'ACS sono state fornite le indicazioni per la determinazione/il calcolo di: i) il consumo storico ed il rispettivo periodo di calcolo (benchmark storico) , ii) i consumi statistici di riferimento (benchmark statistico); iii) il consumo ideale di ACS (benchmark ideale), basandosi sull'approccio definito dalla UNI TS 11300-2 (Tabella 2):

**Tabella 2 – Indicatori di benchmark per l'ACS**

Tipo di indicatore	Valore/Indicazione di calcolo	Esempio di implementazione
Consumo statistico (Benchmark statistico)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Range consumo statistico giornaliero, pari a:               <ul style="list-style-type: none"> <li>• 50-60 litri/giorno/pp per l'ACS</li> <li>• 88-105 litri/giorno/pp per ACS + AFS</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dato numerico da fornire come informazione complementare al consumo giornaliero misurato (e.g., "Il consumo medio statistico di ACS è...")</li> <li>• Scala di colori (verde/rosso) da implementare su tachimetro a seconda che il consumo giornaliero ricada/non ricada nel range statistico di riferimento</li> </ul> <p>N.B. Al fine di implementare tale indicatore nella modalità "scala di colori", è necessario conoscere il numero di componenti del nucleo familiare (da prevedere in piattaforma).</p>
Consumo storico (Benchmark storico)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Differenza tra il consumo di ACS dell'anno in corso e il consumo medio dell'anno precedente</li> <li>• Differenza tra il consumo di ACS del mese in corso e il consumo medio mensile dall'inizio del monitoraggio</li> <li>• Differenza tra il consumo giornaliero di ACS (AFS) e il consumo medio giornaliero dall'inizio del monitoraggio</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• "Quest'anno hai consumato 180 m<sup>3</sup>, 10 m<sup>3</sup> in più rispetto allo scorso anno"</li> <li>• "Questo mese hai consumato 20 m<sup>3</sup>, 3 m<sup>3</sup> in meno rispetto al tuo consumo medio mensile"</li> <li>• "Oggi hai consumato 400 litri di ACS, 50 litri in più rispetto al tuo consumo medio giornaliero"</li> </ul>
Consumo ideale (Benchmark ideale)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Volume di ACS calcolato secondo le indicazioni contenute nella UNI TS 11300-2</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dato numerico da fornire come informazione complementare al consumo giornaliero misurato (e.g., "Il consumo ideale di ACS è...")</li> <li>• Scala di colori (verde/rosso) da implementare su tachimetro a seconda che il consumo giornaliero ricada/non ricada in un range <math>\pm 15\%</math> rispetto al consumo ideale</li> </ul> <p>N.B. Al fine di implementare tale indicatore, è necessario conoscere la superficie utile dell'abitazione</p>

- Per la valutazione ed il benchmarking della qualità dell'aria e del comfort ambientale sono stati analizzati: i) i parametri di riferimento utilizzabili per il benchmark della temperatura dell'aria indoor, dell'umidità relativa, della concentrazione di CO<sub>2</sub>, degli inquinanti atmosferici indoor ed outdoor; ii) alcuni indicatori globali (Soddisfazione complessiva, Indice di IEQ complessivo, Dwelling Environmental Quality Index, Indice di comfort combinato); gli indicatori individuati e le relative informazioni per l'implementazione sono riportate in Tabella 3:

**Tabella 3 – Indicatori di benchmark per i parametri di monitoraggio ambientale**

Parametro	Valore/Indicazione di calcolo	Esempio di implementazione
Temperatura dell'aria (T)	Temperatura minima: 16°C Temperatura massima: 25°C N.B. Valori riferiti alla stagione invernale	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Scala di colori (verde/arancio/rosso) da implementare su tachimetro, a seconda che la T misurata ricada nei range (stagione invernale): <ul style="list-style-type: none"> <li>• T&lt;16 °C: rosso</li> <li>• 16≤T&lt;18°C: arancio</li> <li>• 18≤T&lt;22°C: verde</li> <li>• 22≤T&lt;25°C: arancio</li> <li>• T≥25 °C: rosso</li> </ul> </li> </ul>
Umidità relativa (UR)	UR minima: 20% UR massima: 70%	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Scala di colori (verde/arancio/rosso) da implementare su tachimetro, a seconda che la UR misurata ricada nei range: <ul style="list-style-type: none"> <li>• UR≤20%: rosso</li> <li>• 20%&lt;UR≤40%: arancio</li> <li>• 40%&lt;UR≤60%: verde</li> <li>• 60%&lt;UR≤70%: arancio</li> <li>• UR&gt;70%: rosso</li> </ul> </li> </ul>
Concentrazione di CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> minima: pari alla concentrazione esterna CO <sub>2</sub> massima: 1350 ppm	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Scala di colori (verde/arancio/rosso) da implementare su tachimetro, a seconda che la CO<sub>2</sub> misurata ricada nei range: <ul style="list-style-type: none"> <li>• CO<sub>2</sub>≤800 ppm: verde</li> <li>• 800 ppm &lt;CO<sub>2</sub>≤1350 ppm: arancio</li> <li>• CO<sub>2</sub>&gt;1350 ppm: rosso</li> </ul> </li> </ul>
DEQI	Si veda paragrafo 3.1.1.2 del report esteso di dettaglio	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dato numerico, cui associare una "qualità" o una scala di colori su tachimetro, e.g.: <ul style="list-style-type: none"> <li>• DEQI&lt;15 "Pessima" (colore rosso scuro)</li> <li>• 15≤DEQI&lt;30 "Cattiva" (colore rosso)</li> <li>• 30≤DEQI&lt;45 "Scarsa" (colore arancio)</li> <li>• 45≤DEQI&lt;60 "Accettabile" (colore giallo)</li> <li>• 60≤DEQI&lt;75 "Buona" (colore verde chiaro)</li> <li>• 75≤DEQI&lt;90 "Molto buona" (colore verde)</li> <li>• 90≤DEQI≤100 "Eccellente" (colore verde scuro)</li> </ul> </li> </ul>

- È stato sviluppato e testato un algoritmo, implementabile nella piattaforma EMPOWER per il rilevamento dei consumi anomali; la fase di validazione dell'algoritmo ha fornito risultati soddisfacenti negli edifici utilizzati per lo sviluppo ed il testing .
- Il foglio di calcolo applicativo dell'algoritmo è disponibile al seguente link: [https://drive.google.com/drive/folders/1YYQdp7z1s9C8ZRTDFZc6gmzxl6aslUKz?usp=drive\\_link](https://drive.google.com/drive/folders/1YYQdp7z1s9C8ZRTDFZc6gmzxl6aslUKz?usp=drive_link)

## 2.4 Fase 4

- È stata verificata di fattibilità tecnica dell'installazione di un sistema di monitoraggio remoto dei consumi di energia termica ed elettrica, della produzione di energia rinnovabile, del comfort ambientale e/o della IAQ di un ulteriore condominio ad alta efficienza energetica individuato nel territorio di Cassino (FR);
- È stato definito il progetto preliminare del sistema di misura e monitoraggio remoto da installare.

### 3 Prodotti attesi

Si elencano di seguito i prodotti software previsti per la LA4.3, come da capitolato:

- Report di dettaglio contenente la descrizione delle attività condotte nella LA 4.3 e dei risultati ottenuti;
- Foglio di calcolo applicativo con algoritmo per l'individuazione dei consumi anomali nei condomini dotati di contabilizzazione termica individuale

## 4 Prodotti sviluppati

Si elencano di seguito i prodotti software sviluppati e resi accessibili per la LA4.3, come da capitolato:

- Report esteso di dettaglio intitolato “LA4.3 Analisi ed ottimizzazione dei sistemi di monitoraggio, controllo e feedback dei consumi di energia e di acqua calda sanitaria, del comfort e della qualità dell’aria negli edifici”, contenente la descrizione delle attività condotte nella LA 4.3 e dei risultati ottenuti (nome file “ENEA22\_24-PR 1.5\_LA4.3\_085 \_ALLEGATO” *inserito come allegato aggiuntivo*)
- Foglio di calcolo applicativo con algoritmo per l’individuazione dei consumi anomali nei condomini dotati di contabilizzazione termica individuale, disponibile al seguente link: [https://drive.google.com/drive/folders/1YYQdp7z1s9C8ZRTDFZc6gmzxl6aslUKz?usp=drive\\_link](https://drive.google.com/drive/folders/1YYQdp7z1s9C8ZRTDFZc6gmzxl6aslUKz?usp=drive_link)

Il foglio di calcolo sarà reso liberamente disponibile a tutti gli utenti tramite il link indicato nel presente rapporto tecnico e nel rapporto allegato (nome file “ENEA22\_24-PR 1.5\_LA4.3\_085 \_ALLEGATO”)

Si osservi che il “Foglio di calcolo applicativo con algoritmo per l’individuazione dei consumi anomali nei condomini dotati di contabilizzazione termica individuale” è un foglio di calcolo progettuale, specificamente predisposto per aiutare gli sviluppatori di applicativi di feedback digitali nell’implementazione dell’algoritmo di calcolo nelle logiche del sistema.

## 5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Non sono stati riscontrati scostamenti tecnici/economici rilevanti rispetto al capitolato.

## 6 Sintesi delle attività svolte

Fase 1: sono state sviluppate e condotte un'indagine di letteratura ed un'indagine conoscitiva mediante questionari per determinare i fattori di ottimizzazione dei sistemi di feedback energetico basati su applicativi digitali.

Fase 2: è stato valutato l'effetto del feedback in tre casi di studio: i) sui consumi energetici e sulla temperatura misurata in 27 abitazioni; ii) sui consumi di ACS in 137 edifici; iii) sulla IAQ e la riduzione nell'esposizione agli inquinanti in 10 abitazioni.

Fase 3: sono stati analizzati i principali indicatori di benchmarking dei consumi di ACS e dei parametri di comfort e IAQ; è stato inoltre sviluppato e sperimentato un algoritmo per il rilevamento dei consumi anomali in due edifici.

Fase 4: è stata effettuata la verifica di fattibilità tecnica dell'installazione di un sistema di monitoraggio remoto dei consumi di energia termica ed elettrica, della produzione di energia rinnovabile, del comfort e/o della IAQ di un condominio ad alta efficienza energetica.

## 7 Dettaglio delle attività svolte

### 7.1 Fase 1

È stata, dapprima, sviluppato uno studio della letteratura scientifica riguardante la progettazione e lo sviluppo dei sistemi di feedback energetico ed ambientale; successivamente, si è proceduto allo sviluppo di un'indagine conoscitiva basata sull'erogazione di un questionario ad un campione di utenti nel settore residenziale.

Per lo studio di letteratura è stato selezionato un set ristretto di lavori scientifici pertinenti, la cui analisi ha consentito di individuare indicazioni per l'ottimizzazione della piattaforma EMPOWER. La ricerca è stata focalizzata sulle cosiddette "consequent strategies", ovvero quelle strategie e quegli strumenti attraverso i quali l'informazione viene fornita all'utente con l'obiettivo di influenzare il comportamento dell'utente sulla base delle conseguenze, positive o negative, sui consumi energetici e sulla qualità dell'ambiente indoor. Il focus specifico è stato rivolto a quei lavori in cui il feedback energetico e/o ambientale fosse fornito attraverso un'interfaccia digitale. Sono stati esclusi dall'analisi i lavori riguardanti le cosiddette "antecedent strategies", quali le campagne tramite mass media, i workshop e i convegni divulgativi, gli audit energetici etc.

L'attenzione è stata focalizzata sugli aspetti progettuali del feedback (e.g., caratteristiche, contenuti, aspettative utenti) più che sulla valutazione in campo della loro efficacia. Pertanto, sono stati esclusi dall'analisi i numerosi studi sperimentali in cui è stato valutato l'impatto di una determinata strategia di feedback, senza riguardo agli aspetti più sistemici del design.

Per l'individuazione degli articoli scientifici rilevanti, è stata condotta una prima ricerca estesa sui principali database scientifici online (i.e., Scopus, Google Scholar, ResearchGate, ScienceDirect e Web of Science). Al fine di ricomprendere nella ricerca lavori che investigassero ad ampio spettro i criteri di progettazione e i fattori di ottimizzazione dei sistemi di feedback energetico ed ambientale, i termini "energy feedback" ed "eco feedback" sono stati utilizzati in combinazione con le seguenti parole chiave: "review"; "visualization"; "design"; "display"; "interaction"; "user experience"; "user interface"; "disaggregation".

Sono stati utilizzati i seguenti criteri di ricerca e selezione degli studi: i) essere sottoposti a "peer review"; ii) avere focus sugli elementi progettuali del feedback energetico e/o ambientale fornito attraverso un'interfaccia digitale; iii) presentare una chiara definizione dei metodi di ricerca, della metodologia e dell'analisi; iv) essere in lingua inglese.

I lavori risultanti dal primo screening ( $n > 1000$ ) hanno subito un successivo screening basato sul titolo dell'articolo e, successivamente, sui contenuti dell'abstract. A valle dello screening per titolo ed abstract, sono stati selezionati per la lettura e l'analisi dettagliata dei contenuti 45 lavori scientifici. Sulla base dell'analisi dei lavori selezionati, gli autori hanno analizzato e riassunto le caratteristiche progettuali più rilevanti di un sistema di feedback energetico e/o ambientale in: i) mezzo e modalità di comunicazione; ii) contenuti; iii) frequenza; iii) disaggregazione; iv) modalità di visualizzazione; v) modalità di benchmark, individuando, per ciascuna di esse, i principali consigli e raccomandazioni da adottare in fase di progettazione. È stato successivamente progettato, validato e diffuso un questionario per ricavare informazioni aggiuntive utili alla progettazione di sistemi di feedback basati su supporti digitali. Si è scelto di erogare un questionario per raggiungere un pubblico più ampio in breve tempo e in modo efficiente, in maniera congrua rispetto a quanto fatto in lavori di letteratura simili.

Il questionario è stato sviluppato attraverso l'applicativo "Google Moduli", che consente la diffusione tramite un indirizzo elettronico e abilita la compilazione agli utenti dotati di un account di posta elettronica Google mail<sup>1</sup>. Per garantire un maggiore tasso di risposta del questionario, è stata abilitata la compilazione anonima, anche a garanzia della tutela della privacy degli utenti. Il questionario è stato diffuso utilizzando principalmente canali social ed inviti personali inviati a mezzo e-mail o applicazioni di messaggistica istantanea.

---

<sup>1</sup> requisito quest'ultimo verificato per la maggior parte degli utenti dotati di smartphone

Le domande chiave dell'indagine ruotano attorno ai temi individuati nella letteratura, ed in particolare: familiarità con le ITC e i sistemi digitali, caratteristiche e funzionalità dei sistemi di feedback. Sono state incluse alcune domande sulla situazione reddituale, livello di istruzione ed altre per meglio caratterizzare il campione di utenti e abilitare come sviluppo futuro della presente analisi la valutazione di eventuali variazioni nelle risposte tra diversi sottogruppi.

Si è cercato di garantire un campionamento eterogeneo (e.g., utenti esperti e non esperti, età e sesso differente etc.), utilizzando una tecnica di campionamento non probabilistico che consente di raccogliere prospettive di diversi partecipanti. Sono stati inviati più di 100 inviti personali, mentre non è stato possibile stabilire quanti utenti siano stati raggiunti dall'invito divulgato per mezzo dei canali social. Il numero di compilazioni totali acquisite è pari a 59.

## 7.2 Fase 2

In questa fase, sono stati analizzati i dati di campagne sperimentali ove i sistemi di misura, feedback ed informazione siano stati utilizzati con lo scopo di aumentare la consapevolezza degli utenti sui consumi energetici e/o di acqua calda sanitaria (ACS), il comfort e la qualità dell'aria (IAQ). L'obiettivo è stato quello di ottenere indicazioni qualitative e quantitative (e.g., benchmark statistici di risparmio, casi di studio esemplificativi di buone pratiche etc.) da fornire ad ENEA per l'ottimizzazione dei contenuti della piattaforma EMPOWER, ampliando al contempo la sfera di indagine sull'informazione derivante dai dispositivi di misura e feedback anche ai consumi di ACS e alla IAQ, che non sono stati investigati nelle precedenti annualità. Sono stati in particolare analizzati 3 casi di studio, per i quali nel prosieguo si riporta una sintesi delle attività svolte.

### 7.2.1 Caso 1

Sono stati analizzati i dati di una campagna di monitoraggio sperimentale pluriennale in 27 alloggi di edilizia sociale, in cui è presente un sistema di contabilizzazione indiretta del calore e dove è stata realizzata una campagna di feedback energetico personalizzato, per migliorare la comprensione dei residenti sul proprio comportamento energetico e indurre un risparmio energetico. I dati analizzati provengono dalla campagna sperimentale avviata nel 2017 dall'Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale ed ENEA, nell'ambito del Piano di Realizzazione Triennale di Ricerca di Sistema 2016-2018 in tre edifici di edilizia sociale di proprietà dell'Agenzia Territoriale Italiana per l'Edilizia Sociale (ATER) della provincia di Frosinone (Centro Italia) e tutt'ora ancora in corso al fine di monitorare gli effetti di lungo periodo (rif. Report RdS/PAR2017/091 e RdS/PTR2019/047).

Nello specifico, per un totale di quattro stagioni di riscaldamento, sono state ricavate le variazioni riscontrate prima e dopo l'erogazione della campagna di feedback personalizzato per i seguenti parametri di monitoraggio energetico ed ambientale: i) consumi giornalieri di energia termica delle singole abitazioni; ii) consumi stagionali di gas naturale dei tre edifici; iii) temperature dell'aria interna delle abitazioni,.

In particolare, è stata verificata la significatività statistica delle differenze riscontrate a monte e a valle dell'erogazione del feedback personalizzato e sono state successivamente analizzate le variazioni nelle interazioni degli utenti con le valvole termostatiche (variazione del numero di spegnimenti dei radiatori a monte e a valle della campagna di feedback).

### 7.2.2 Caso 2

Sono stati analizzati i dati di una campagna di monitoraggio sperimentale condotta presso 16 sottostazioni di scambio termico a servizio di 137 edifici plurifamiliari residenziali e 2 edifici non residenziali alimentati da una rete di teleriscaldamento ad alta temperatura in Polonia, nel Voivodato di Lublino, per un periodo di 14 anni (dal 1° giugno 2005 - 31 maggio 2019). Tra il 2007 e il 2012, nelle singole abitazioni dei 137 edifici investigati sono stati installati contatori individuali di ACS al fine di passare da un criterio di ripartizione dei costi non basato sui consumi, ad un criterio basato sui consumi individuali, in cui i costi sono ripartiti in base agli effettivi prelievi di ACS delle utenze.

L'analisi è stata condotta suddividendo l'intero periodo di riferimento in tre sottoperiodi, rispettivamente: i) "prima", ovvero gli anni 2005 e 2006, nei quali è certo che i contatori di ACS non fossero stati installati; ii) "dopo", che si riferisce al periodo successivo all'installazione dei sistemi di contabilizzazione (dal 2013 al 2019) e iii) "intermedio," cioè, gli anni in cui è avvenuta l'installazione dei contatori di ACS. Per ciascun periodo sono state effettuate sia l'analisi di dettaglio delle serie storiche delle misure giornaliere, sia l'analisi statistica dei dati medi. Ciò è stato utile per caratterizzare l'effetto dell'installazione dei sistemi di misura in ogni sottostazione. Al fine di caratterizzare meglio l'effetto del feedback indiretto nel periodo di riferimento, sono stati analizzati i possibili effetti concomitanti (i.e., variazione prezzi dell'energia, variazione reddito medio in Polonia).

### 7.2.3 Caso 3

Al fine di analizzare gli effetti di una maggiore consapevolezza sulla qualità dell'aria interna degli edifici residenziali sono state condotte: i) un'indagine conoscitiva mediante questionari sulla IAQ erogati a 100 famiglie nel settore residenziale e ii) una campagna sperimentale in campo, per valutare i possibili cambiamenti comportamentali a breve termine di 10 famiglie (selezionate tra le 100 partecipanti all'indagine iniziale) e la loro capacità di ridurre la loro esposizione ai principali inquinanti indoor (analisi qualitativa) dopo essere state informate riguardo alla IAQ. Lo studio ha permesso di quantificare per la prima volta l'efficacia di una strategia di eco-feedback sulla IAQ in termini di esposizione a diversi parametri di particelle aerodisperse, inclusa la concentrazione in numero di particelle.

## 7.3 Fase 3

Nella Fase 3, sono stati: i) analizzati i principali indicatori di benchmarking dei consumi di ACS e dei parametri di comfort e qualità dell'aria (che contribuiscono a determinare la cosiddetta Indoor Environmental Quality IEQ), attraverso lo studio della letteratura scientifica e della normativa tecnica esistente; ii) è stata sviluppata e sperimentata una metodologia semplificata di rilevamento dei consumi anomali e diagnosi in due edifici caso di studio. L'analisi delle metodologie di benchmarking dei consumi di ACS e dei parametri di qualità dell'aria ha consentito di individuare una serie di nuovi indicatori (statistici, storici, ideali) facilmente implementabili nella piattaforma EMPOWER al fine di fornire ulteriori servizi informativi e di confronto. In particolare, per l'ACS sono stati individuati: i) indicatori di consumo storico con le rispettive indicazioni per il calcolo del periodo di riferimento, ii) indicatori di consumo statistico, ricavati dall'analisi della letteratura scientifica); iii) indicatori di consumo ideale, basati sull'approccio definito dalla UNI TS 11300-2. Per la IAQ, infine, sono stati individuati: i) i parametri di riferimento utilizzabili per il benchmark della temperatura dell'aria indoor, dell'umidità relativa, della concentrazione di CO<sub>2</sub>, degli inquinanti atmosferici indoor ed outdoor, attraverso l'analisi della norma tecnica EN 16798:2019; ii) alcuni indicatori globali (Soddisfazione complessiva, Indice di IEQ complessivo, Dwelling Environmental Quality Index, Indice di comfort combinato) implementabili nella piattaforma EMPOWER per la valutazione della qualità dell'ambiente interno, attraverso l'analisi della letteratura scientifica.

Infine, è stata sviluppato e testato un algoritmo per il rilevamento dei consumi anomali che combina gli approcci *rule-based* e *data-driven* per rilevare e diagnosticare consumi anomali di energia termica in edifici residenziali con infrastrutture di misura limitate, basandosi sulle risultanze delle attività sviluppate e descritte nel report RdS/PTR2020/130.

Per lo sviluppo dell'algoritmo è stato preso a riferimento un edificio popolare di 9 appartamenti con infrastruttura di monitoraggio costituita da ripartitori di calore e sonde di temperatura dell'aria indoor. È stato estratto un dataset costituito dai dati giornalieri di consumo e temperatura dell'aria dei singoli appartamenti di quattro stagioni di riscaldamento, che ha subito un'operazione di pre-elaborazione e, successivamente, una riorganizzazione in due strutture (periodo di training e periodo di testing). Sono state quindi ricavate le statistiche descrittive, sulla base delle quali sono stati definiti i criteri di accettabilità dei consumi di energia termica e delle temperature dell'aria. È stata infine sviluppata e testata una logica di

rilevamento del guasto e di diagnosi, combinando le informazioni acquisite sull'analisi dei consumi e delle temperature. L'applicazione della metodologia è stata replicata in un ulteriore edificio residenziale di 10 appartamenti, dotato di diverse caratteristiche tipologiche (morfologia, rapporto di forma etc.) e costruttive (stratigrafie), ma simili caratteristiche impiantistiche (stessa tipologia di impianto termico e sistema di monitoraggio installato), al fine di validare e testare dell'algoritmo in condizioni diverse da quelle di sviluppo.

#### 7.4 Fase 4

È stata effettuata la verifica di fattibilità tecnica dell'installazione di un sistema di monitoraggio remoto dei consumi di energia termica ed elettrica, della produzione di energia rinnovabile, del comfort ambientale e/o della IAQ in un ulteriore condominio ad alta efficienza energetica individuato dall'Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale nel territorio di Cassino (FR). È stato effettuato un sopralluogo tecnico in data 13/12/2022 e, successivamente, si è interagito con i tecnici installatori del sistema di contabilizzazione attualmente presente nell'edificio per ricavare ulteriori informazioni non direttamente deducibili dal sopralluogo. L'edificio in oggetto è costituito da 19 unità immobiliari distribuite su 4 piani fuori terra. L'energia termica per il riscaldamento ed il raffrescamento è prodotta in una centrale termica costituita da 3 pompe di calore aria-acqua collegate in parallelo; l'ACS è prodotta da una pompa di calore dedicata. L'energia termica e frigorifera presentano distribuzione orizzontale con satelliti di utenza e sistema di contabilizzazione diretta. L'edificio è dotato di un impianto fotovoltaico ( $\approx 10$  kW) per la produzione di energia elettrica e di n. 8 collettori solari piani per la produzione di ACS.

## 8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Non sono state utilizzate consulenze per l'esecuzione delle attività di ricerca della LA4.3.

## 9 Pubblicazioni scientifiche

- L. Canale, G. Ficco, M. Dell'Isola, B. Di Pietra, G. Puglisi, I. Bertini. Effect of end-user awareness and individual heat metering in a social housing building in Mediterranean climate. Proceedings of the 7th International Conference on Smart and Sustainable Technologies 2022. 5-7 July 2022, Split (Croatia).
- L. Canale, G. Ficco, I. Bertini, M. Dell'Isola. About the effect of tailored energy feedback on space heating consumption and indoor air temperature in social housing buildings: An experimental investigation, *Energy and Buildings*, Volume 292, 2023, 113149, ISSN 0378-7788, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113149>.
- L. Canale, T. Cholewa, G. Ficco, A. Siuta-Olcha, B. Di Pietra, P. Kołodziej, M. Dell'Isola. The role of individual metering in reducing domestic hot water consumption in residential buildings: A long-term evaluation, *Journal of Building Engineering*, Volume 73, 2023, 106734, ISSN 2352-7102, <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2023.106734>.
- E. Caracci, L. Canale, G. Buonanno, L. Stabile. Effectiveness of eco-feedback in improving the indoor air quality in residential buildings: Mitigation of the exposure to airborne particles, *Building and Environment*, Volume 226, 2022, 109706, ISSN 0360-1323, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109706>.

## 10 Eventi di disseminazione

- Presentazione della memoria “L. Canale, G. Ficco, M. Dell'Isola, B. Di Pietra, G. Puglisi, I. Bertini. Effect of end-user awareness and individual heat metering in a social housing building in Mediterranean climate” nell’ambito della 7ima edizione della conferenza internazionale “SpliTech 2022” (5-7 luglio 2022, Spalato Croazia).
- Presentazione del poster “E. Caracci, L. Canale, G. Buonanno, L. Stabile. Effectiveness of eco-feedback in improving the IAQ in residential buildings: mitigation of the exposure to the different airborne particle metrics” nell’ambito della 11esima edizione della conferenza internazionale “IAC 2022” (4-9 settembre 2022, Atene, Grecia).
- PCTO “Energeticamente” presso il Liceo Scientifico e Linguistico Statale di Ceccano (FR) (aprile 2023-giugno 2023). “Energeticamente” è un percorso formativo progettato per aumentare la conoscenza da parte degli studenti delle scuole superiori sui principi della corretta gestione dell’energia e dell’impatto ambientale degli edifici.
- Intervento “Individual metering e strumenti IoT per l'efficienza energetica negli edifici” nell’ambito del seminario “METERING E SMART METERING NEGLI IMPIANTI ENERGETICI” tenutosi presso il Centro Congressi Stella Polare - Sala Aquarius, 1° piano, Mostra Convegno Expocomfort, 28 giugno, 2022.