



Ricerca di Sistema elettrico

## Analisi ed applicazione delle tecnologie IoT per la consapevolezza dei consumi negli edifici intelligenti

Marco Dell'Isola, Giorgio Ficco, Laura Canale, Marianna De Monaco



ANALISI ED APPLICAZIONE DELLE TECNOLOGIE IOT PER LA CONSAPEVOLEZZA DEI CONSUMI NEGLI EDIFICI INTELLIGENTI

Marco Dell'Isola, Giorgio Ficco, Laura Canale, Marianna De Monaco (DICEM, Dipartimento di Ingegneria Civile e Meccanica - Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale)

Con il contributo di: F. Arpino, G. Buonanno, L. Stabile

Aprile 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico (oggi Ministero della Transizione Ecologica) - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - II annualità

Obiettivo: *N. 1 - Tecnologie*

Progetto: *1.5 - Tecnologie, tecniche e materiali per l'efficienza energetica ed il risparmio di energia negli usi finali elettrici degli edifici nuovi ed esistenti*

Work package: *3 - Componenti e impianti innovativi per incrementare l'efficienza energetica e l'uso delle fonti rinnovabili negli edifici*

Linea di attività: *LA3.5 - Analisi ed applicazione delle tecnologie IoT per la consapevolezza dei consumi negli edifici intelligenti*

Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi, ENEA

Responsabile del Work package: Biagio Di Pietra, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Analisi delle tecnologie IoT abilitanti per la gestione dei consumi energetici"

Responsabile scientifico ENEA: Ing. Biagio Di Pietra



Responsabile scientifico DICEM - Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale: Prof. Marco Dell'Isola



# Indice

SOMMARIO.....	8
INTRODUZIONE.....	9
1 VALUTAZIONE DEL LIVELLO E DEL POTENZIALE DI “SMARTNESS” DEL COSTRUITO ESISTENTE (SMART READINESS INDICATOR, SRI).....	10
1.1 ANALISI DELLA LETTERATURA SCIENTIFICA DELLE STRATEGIE DI FEEDBACK .....	10
1.2 METODOLOGIA DI CALCOLO DELLO SRI .....	12
1.3 ANALISI DEL PARCO EDILIZIO ITALIANO .....	15
1.3.1 <i>Analisi dei dati statistici (ISTAT)</i> .....	15
1.3.2 <i>Impianti termici di riscaldamento, raffrescamento e produzione di acqua calda sanitaria</i> .....	16
1.3.3 <i>Evoluzione normativa rilevante ai fini della regolazione e della gestione dell’impianto termico</i> .....	18
1.4 DESCRIZIONE DEI CASI DI STUDIO .....	20
1.4.1 <i>Caso di studio A</i> .....	21
1.4.2 <i>Caso di studio B</i> .....	22
1.4.3 <i>Caso di studio C</i> .....	23
1.4.4 <i>Caso di studio D</i> .....	24
1.4.5 <i>Caso di studio E</i> .....	25
1.4.6 <i>Caso di studio F</i> .....	26
1.4.7 <i>Caso di studio G</i> .....	27
1.4.8 <i>Caso di studio H</i> .....	28
1.5 STIMA DELLO SRI MEDIO NAZIONALE.....	29
1.6 SIMULAZIONE INTERVENTI DI RETROFIT .....	31
1.6.1 <i>Analisi statistica degli interventi di riqualificazione energetica in ottica smart</i> .....	31
1.6.2 <i>Scenari di intervento di riqualificazione</i> .....	34
1.6.3 <i>Criticità nell’applicazione della metodologia SRI</i> .....	40
2 STUDIO ED OTTIMIZZAZIONE DELLE STRATEGIE DI COMUNICAZIONE E SCELTA DEGLI INDICATORI DI MONITORAGGIO DEI CONSUMI ENERGETICI.....	41
2.1 ANALISI DELLA LETTERATURA SCIENTIFICA DELLE STRATEGIE DI FEEDBACK .....	41
2.2 ELABORAZIONE DI INDICI PER IL BENCHMARK ENERGETICO ED AMBIENTALE .....	43
2.2.1 <i>Indici per il benchmark dei consumi energetici</i> .....	43
2.2.1.1 <i>Stima del fattore di attenuazione</i> .....	46
2.2.1.2 <i>Simulazione e confronto indici</i> .....	46
2.2.2 <i>Indici di monitoraggio ambientale</i> .....	49
2.3 ELABORAZIONE DI UN CRUSCOTTO PER IL FEEDBACK ENERGETICO ED AMBIENTALE .....	51
2.3.1 <i>Cruscotto principale</i> .....	51
2.3.2 <i>Cruscotto secondario</i> .....	55
3 PROGETTAZIONE DI STRATEGIE DI DIAGNOSI E FAULT-DETECTION DEI CONSUMI ENERGETICI.....	59
3.1 ANALISI DELLE TECNICHE DI FAULT DETECTION NEGLI EDIFICI .....	59
3.2 CASO DI STUDIO.....	63
3.2.1 <i>Descrizione del dataset</i> .....	68
3.2.1.1 <i>Serie storiche dei sensori installati nell’edificio</i> .....	69
3.2.1.2 <i>Serie storiche dei dati meteorologici</i> .....	72
3.2.2 <i>Descrizione del Software</i> .....	72
3.2.3 <i>Analisi dei consumi storici</i> .....	73
3.2.4 <i>Consumi giornalieri normalizzati</i> .....	74
3.3 INDIVIDUAZIONE DELLE SITUAZIONI DI FAULT .....	76
3.3.1 <i>Analisi delle serie storiche di consumi</i> .....	79
3.3.2 <i>Analisi della correlazione con i dati meteorologici</i> .....	80
3.3.2.1 <i>Correlazione con la temperatura massima giornaliera (fault #5)</i> .....	80
3.3.2.2 <i>Correlazione con la velocità del vento</i> .....	82
3.3.3 <i>Analisi dello scostamento rispetto ai consumi attesi (fault #6)</i> .....	83

3.3.4	<i>Analisi dello scostamento della temperatura interna dalle condizioni di comfort (fault #7)</i> .....	84
3.4	APPLICAZIONE DEL METODO ALLA STAGIONE DI RISCALDAMENTO 2020-21 .....	86
3.4.1	<i>Analisi dei fault della singola unità immobiliare</i> .....	89
3.4.2	<i>Analisi dei fault del singolo ripartitore</i> .....	92
3.4.3	<i>Analisi dello scostamento della temperatura interna dalle condizioni di comfort</i> .....	94
3.4.4	<i>Riepilogo dei fault individuati nella stagione 2020-21</i> .....	95
4	CONCLUSIONI.....	97
5	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....	99
	APPENDICE: CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO .....	104

## Indice delle Tabelle

Tabella 1 – Domini e criteri di impatto della metodologia SRI.....	12
Tabella 2 - Servizi e livelli di funzionalità del dominio ACS.....	13
Tabella 3 - Abitazioni italiane per epoca costruttiva (elaborazione UNICAS di dati ISTAT) .....	16
Tabella 4 – Caratteristiche impiantistiche degli edifici casi di studio.....	20
Tabella 5 – SRI dei casi di studio.....	29
Tabella 6 – Punteggi di impatto.....	29
Tabella 7 – Punteggi di dominio .....	29
Tabella 8 – Classificazione degli edifici del Parco edilizio nazionale .....	30
Tabella 9 – Analisi dello SRI del Parco edilizio nazionale.....	31
Tabella 10 - Numero e tipologia di intervento di riqualificazione nel periodo 2014-2019 .....	32
Tabella 11 - Funzionalità smart minime dei sistemi per lo scenario “energy” .....	35
Tabella 12 - Funzionalità smart minime dei sistemi per lo scenario “smart energy” .....	36
Tabella 13 – Impatto degli interventi di retrofit sull’SRI complessivo.....	37
Tabella 14 – Caratteristiche generali di uno strumento di feedback utente .....	43
Tabella 15 – Dati per il calcolo del fattore di attenuazione .....	46
Tabella 16 – Caratteristiche del cruscotto principale.....	51
Tabella 17 – Modalità di rappresentazione indice di potenza, cruscotto semplificato .....	52
Tabella 18 – Modalità di rappresentazione temperatura e indice di temperatura, cruscotto semplificato... ..	52
Tabella 19 – Modalità di rappresentazione umidità relativa e indici IUR, cruscotto semplificato .....	53
Tabella 20 – Modalità di rappresentazione concentrazione di CO <sub>2</sub> e indice ICO <sub>2</sub> , cruscotto semplificato .....	55
Tabella 21 – Caratteristiche del cruscotto secondario.....	55
Tabella 22 –Rappresentazione associata all’istogramma, scheda di confronto con media edificio .....	58
Tabella 23 – Contenuto e modalità di rappresentazione, scheda di monitoraggio ambientale .....	58
Tabella 24 – Potenza termica installata nei singoli appartamenti e numero di occupanti.....	65
Tabella 25 – Caratteristiche termofisiche dell’edificio caso di studio.....	65
Tabella 26 – Consumi normalizzati stimati dal modello e misurati.....	68
Tabella 27 – Stagioni di riscaldamento esaminate .....	70
Tabella 28 – Descrizione dei fault e delle metriche utilizzate .....	78
Tabella 29 - Ripartitori classificati come possibili fault 5 dal criterio di correlazione nei tre periodi .....	82
Tabella 30 - Anomalie rilevate dal confronto con il fabbisogno di ciascuna unità immobiliare .....	84
Tabella 31 - Fault #3 P4: Ripartitori che presentano consumi nulli per più di tre giorni successivi - P4.....	92
Tabella 32 – Fault #5, P4: Ripartitori classificati come possibili fault per correlazione con Temp ext .....	94
Tabella 33 – Periodo P4, riepilogo dei fault individuati.....	96

## Indice delle Figure

Figura 1 – Domini e criteri di impatto per la metodologia SRI .....	12
Figura 2 - Metodologia multilivello SRI.....	13
Figura 3 – Metodi di valutazione dello SRI .....	14
Figura 4 - Step di calcolo metodologia SRI [24].....	15
Figura 5 - Tipologie di impianti di riscaldamento in Italia .....	16
Figura 6 – Alimentazione degli impianti di riscaldamento in Italia .....	17
Figura 7 – Tipologie di impianti di raffrescamento in Italia.....	17
Figura 8 – Modalità di produzione di ACS .....	18
Figura 9 - Ripartizione % degli interventi di riqualificazione nel periodo 2014-2019 .....	32
Figura 10 - Quota parte di installazioni effettivamente smart per tipologia di sistema [36].....	33
Figura 11 - Quota parte di installazioni effettivamente smart per tipologia di sistema [36].....	34
Figura 12 – Punteggi di impatto scenario “energy” .....	38
Figura 13 – Punteggi di dominio scenario “energy” .....	38
Figura 14 – Punteggi di impatto scenario “smart energy” .....	39
Figura 15 – Punteggi di dominio scenario “smart energy” .....	39
Figura 16 – Indici di consumo globale 1° febbraio 2021, edificio ATER 18C .....	47
Figura 17 – Indici di consumo locale 1° febbraio 2021.....	48
Figura 18 – Rappresentazione schematica del cruscotto principale .....	52
Figura 19 – Flow chart attivazione suggerimenti consumo energetico .....	53
Figura 20 – Flow chart attivazione suggerimenti qualità dell’aria .....	55
Figura 21 – Scheda consumi disaggregati.....	56
Figura 22 – Scheda consumi storici .....	57
Figura 23 – Scheda di confronto con media edificio .....	57
Figura 24 – Scheda monitoraggio qualità aria: a) Indice temperatura; (b) Indice umidità; (c) Indice CO2.....	58
Figura 25 – Classificazione tecniche di Fault Detection negli edifici .....	60
Figura 26 – Diagramma a blocchi metodo dell’analisi degli outliers.....	60
Figura 27 – Metodologie di diagnosi ed analisi dei guasti [87] .....	61
Figura 28 – Edificio caso di studio Anagni ATER 18C.....	63
Figura 29 - Layout di piano dell’edificio caso di studio Anagni ATER 18C.....	64
Figura 30 – Sezione trasversale dell’edificio caso di studio Anagni ATER 18C .....	64
Figura 31 – Modello 3-D dell’edificio caso di studio .....	66
Figura 32 – Analisi dei carichi termici delle singole unità immobiliari .....	67
Figura 33 – Piattaforma dati ISTA.....	69
Figura 34 – Esempio report giornaliero temperature indoor.....	70
Figura 35 – Esempio acquisizione dati.....	71
Figura 36 - Meteo Anagni 2020 (source WeatherData): a) temperature, °C; b) velocità del vento, m/s .....	72
Figura 37 - Flow chart del software generato per l’analisi dei consumi .....	73
Figura 38 –UR cumulate radiatore D02 dell’unità immobiliare Ater 18C Int.02 .....	74
Figura 39 – UR giornaliera radiatore D02 dell’unità immobiliare Ater 18C Int.2 .....	74
Figura 40 - Consumi giornalieri Int.02: a) radiatore D02, b) intera unità immobiliare .....	74
Figura 41 - Consumi normalizzati rilevati nei tre periodi per ciascuna unità immobiliare .....	75
Figura 42- Consumi annui normalizzati per periodo di riferimento: a) P1, b) P2, c) P3.....	75
Figura 43 - Fault #1, Soglia 50%: a) P1, b) P2, c) P3.....	79
Figura 44 - Fault #2, Soglia 50%: a) P1, b) P2, c) P3.....	79
Figura 45 – Fault #3, Soglia: 3 giorni consecutivi.....	79
Figura 46 – Fault #5 Correlazione media tra consumi e temp. max esterna, periodo a) P1, b) P2, c) P3 .....	80
Figura 47 - Correlazione media stagionale tra i consumi rilevati e la temperatura massima esterna.....	81
Figura 48 – Fault #5, ripartitori identificati come possibili fault, Soglia = 30% .....	81

Figura 49 - Correlazione tra i consumi giornalieri rilevati e la velocità del vento – media sui periodi .....	83
Figura 50 – Fault #6 Analisi dei consumi annui normalizzati rispetto al fabbisogno stimato .....	84
Figura 51 – Fault #7, P1: Giorni con temp. indoor superiore al limite max di comfort (22°C).....	85
Figura 52 - Fault #7, P1: Giorni con temp. indoor inferiore al limite min di comfort (18°C).....	85
Figura 53 - Fascia di variabilità dei consumi giornalieri normalizzati Int.01.....	86
Figura 54 - Fascia di variabilità dei consumi giornalieri normalizzati per piano.....	87
Figura 55 - Fascia di variabilità dei consumi giornalieri normalizzati per esposizione.....	88
Figura 56 - Fascia di variabilità dei consumi giornalieri normalizzati nei tre periodi per l'intero edificio .....	89
Figura 57 – Analisi dei consumi, Periodo P4: a) Fault #1, soglia 50%, b) Fault #2, soglia 50%,.....	89
Figura 58- Fault #6, P4: Confronto dei consumi con il fabbisogno stimato .....	90
Figura 59 – Analisi dei consumi dell'unità immobiliare Int.01, periodo P4 rispetto ai dati storici .....	90
Figura 60 - Analisi dei consumi dell'unità immobiliare Int.01, periodo P4, cluster “primo piano” .....	91
Figura 61 - Analisi dei consumi dell'unità immobiliare Int.01, periodo P4, cluster “esposizione EST” .....	91
Figura 62 - Analisi dei consumi dell'unità immobiliare Int.01, periodo P4 rispetto alla media edificio.....	91
Figura 63 - Analisi dei consumi dell'unità immobiliare Int.01, periodo P4 rispetto all'intero edificio.....	92
Figura 64 – Fault #3 P4: Consumo normalizzato ripartitore D02 Int.02.....	92
Figura 65 – Fault #4, P4: Analisi dei consumi normalizzati rispetto ai consumi storici .....	93
Figura 66 – Fault #5, P4 Correlazione dei consumi nelle singole unità immobiliari.....	94
Figura 67 – Fault #7, P4: Giorni con temp. indoor superiore al limite max di comfort (22°C).....	95
Figura 68 - Fault #7, P4: Giorni con temp. indoor inferiore al limite min di comfort (18°C).....	95

## Sommario

Il presente rapporto dal titolo *“Analisi ed applicazione delle tecnologie IoT per la consapevolezza dei consumi negli edifici intelligenti”* descrive le attività di ricerca svolte ed i risultati ottenuti nell’ambito dall’accordo di collaborazione tra ENEA e DICEM (Dipartimento di Ingegneria Civile e Meccanica) dell’Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale.

In particolare:

- sono state individuate le principali tipologie edilizie e valutati i rispettivi livelli di smartness (in base ai dati del censimento ISTAT) e individuate 8 tipologie edilizie tipiche dei sistemi edificio-impianto presenti in Italia al fine di determinare il potenziale di smartness del Parco Edilizio residenziale nazionale;
- è stata effettuata un’analisi bibliografica delle strategie di progettazione delle interfacce di feedback (caratteristiche e componenti del sistema ottimale), sono stati individuati gli elementi distintivi dell’interfaccia, i contenuti e le modalità di visualizzazione; sono stati sviluppati opportuni indicatori di monitoraggio ambientale ed energetico, il cui utilizzo è stato simulato e validato in un edificio caso di studio;
- è stato analizzato il sistema edificio-impianto tipico residenziale ai fini dell’applicazione delle tecniche di Fault Detection energetiche (quest’ultima intesa anche come un sistema di suggerimenti di strategie comportamentali da adottarsi da parte dell’utente sulla base dei dati di consumo rilevati nell’abitazione oggetto di installazione) e, per un caso di studio rappresentato da un edificio di edilizia popolare, sono state acquisite serie storiche di consumi energetici per consentire, attraverso un software specificatamente sviluppato, l’analisi di possibili malfunzionamenti legati al comportamento dell’utente.

## Introduzione

Con la Direttiva Europea 2018/844/UE è stato introdotto lo Smart Readiness Indicator, un sistema comune per valutare la predisposizione degli edifici alla “smartness”, ovvero la capacità di integrare soluzioni di misura e controllo al fine di migliorare l’efficienza energetica e le performance dell’edificio.

Il progresso nei settori dell’informatica e delle telecomunicazioni consente lo sviluppo e la diffusione di nuove applicazioni “smart” per migliorare l’efficienza energetica nel settore residenziale, commerciale ed industriale: lo sviluppo di smart meter e sensori di controllo miniaturizzati e a basso costo di temperatura, presenza, CO<sub>2</sub>, luce, forniscono infatti uno strumento innovativo per rilevare e rispondere alle esigenze di comfort degli occupanti fornendo anche importanti “feedback” per incoraggiare virtuosi cambiamenti comportamentali. Questi sistemi di monitoraggio e controllo, pur contribuendo all’efficienza energetica, richiedono però investimenti significativi in infrastrutture intelligenti che combinano sensori e attuatori per controllare e modificare il consumo energetico complessivo. Il costo e la difficoltà legati all’implementazione di tali reti spesso ne limitano la redditività. I sistemi di gestione e controllo dell’energia negli edifici (i.e. i cosiddetti Building Energy Management Systems) dovrebbero pertanto non solo consentire la gestione ed il controllo dei sistemi installati in un edificio, ma anche essere preposti all’informazione dettagliata all’utente e alla sensibilizzazione dello stesso verso l’adozione di comportamenti energeticamente efficienti.

In tal senso, l’integrazione e lo sviluppo di sistemi basati sulle tecnologie dell’informazione e della comunicazione (ITC) negli edifici e, più specificamente, sull’Internet of Things (IoT), sono fattori abilitanti di un’ampia gamma di applicazioni dal punto di vista della comunicazione con l’utente finale. L’IoT consente l’interazione tra oggetti intelligenti e l’effettiva integrazione delle informazioni e delle conoscenze del mondo reale nel mondo digitale. Oggetti intelligenti dotati di capacità di rilevamento e interazione o tecnologie di identificazione forniscono i mezzi per acquisire informazioni sul mondo reale in modo estremamente dettagliato.

Rimangono tuttavia aperte una serie di problematiche che la comunità scientifica dovrà affrontare per incentivare la diffusione delle tecnologie smart nell’immediato futuro:

- qual è il reale potenziale degli edifici esistenti, non progettati con le attuali predisposizioni alla integrazione con le tecnologie intelligenti (e che rappresentano la stragrande maggioranza del costruito), di diventare smart?
- in che modo i sensori di monitoraggio energetico, ambientale e prestazionale dei dispositivi, aventi protocolli di comunicazione estremamente diversificati, potranno comunicare in un’unica infrastruttura efficace ed a basso impatto economico?
- quali saranno le strategie comunicative più efficaci per ottenere un coinvolgimento attivo e reale degli utenti nella gestione sostenibile e consapevole dell’energia negli edifici?

Nello scenario di riferimento sopra descritto, le attività di ricerca svolte sono consistite in:

- valutazione del livello e del potenziale di “smartness” del costruito esistente (Smart Readiness Indicator, SRI).
- studio ed ottimizzazione delle strategie di comunicazione e scelta degli indicatori di monitoraggio dei consumi energetici.
- progettazione di strategie di Diagnosi e Fault-Detection dei consumi energetici.

# 1 Valutazione del livello e del potenziale di “smartness” del costruito esistente (Smart Readiness Indicator, SRI)

## 1.1 *Analisi della letteratura scientifica delle strategie di feedback*

Nell'Unione Europea il settore residenziale è responsabile di circa il 40% del consumo energetico e il 36% delle emissioni di CO<sub>2</sub> [1]. Allo scopo di affrontare la problematica energetica e di ridurre i consumi del settore residenziale, negli ultimi anni l'Unione Europea ha emanato una serie di direttive e introdotto numerosi incentivi. In particolare, la Energy Performance of Building Directive (EPBD), a partire dal 2002 [2], ha introdotto una serie di misure per il potenziamento delle performance energetiche degli edifici. L'ultimo recente emendamento della EPBD (2018/844/UE) [3], ha integrato e modificato le precedenti versioni, introducendo alcuni obiettivi principali:

- promuovere la mobilità sostenibile (incrementando le possibilità di gestione sul fronte dei veicoli elettrici) [4,5];
- incoraggiare l'utilizzo di tecnologie smart per edifici esistenti e di nuova costruzione [6,7];
- sensibilizzare e accrescere la consapevolezza energetica degli utenti [8–10];
- incentivare alla decarbonizzazione, allo sviluppo di un parco edilizio NZEB (Nearly Zero Energy Building) e all'azzeramento delle emissioni di gas climalteranti entro il 2050 [11,12].

In particolare, è emersa sempre di più l'importanza di edifici che non solo rispettino stringenti requisiti prestazionali (i.e., NZEB) ma che associno a tale caratteristica la possibilità di interagire in maniera attiva con gli utenti e con le reti. In questa accezione, gli “Smart Buildings” presentano una serie di fattori migliorativi, in linea con gli obiettivi Europei [13], quali ad esempio:

- la possibilità per occupanti e operatori di interagire con l'edificio in modo agevole [14];
- la raccolta di informazioni utili da e per l'occupante;
- la comunicazione con la rete elettrica [15];
- l'applicabilità di sistemi per il controllo del carico sulla rete elettrica [16];
- la maggiore sicurezza [17,18];
- maggiore comfort [14,19];
- la riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> [20];
- la riduzione dei costi operativi di riscaldamento, raffrescamento e illuminazione [21].

La Energy Performance of Building Directive (EPBD) 2018/844/UE ha quindi confermato la primaria importanza degli Smart Buildings, introducendo lo Smart Readiness Indicator (SRI) al fine di fornire un quadro per valutare e promuovere la smartness degli edifici in Europa. Come previsto dall'articolo 8 della stessa Direttiva, la Commissione Europea ha emanato un regolamento delegato [22] e un regolamento esecutivo [23] con i quali vengono definiti, rispettivamente, un quadro metodologico di calcolo dello SRI e le modalità di attuazione dello stesso da parte dei singoli Stati Membri. Per fornire un supporto alla definizione della metodologia di calcolo dello SRI, la DG ENERGY della Commissione Europea ha promosso due studi tecnici condotti da un consorzio di ricerca [24,25], durante i quali è stata elaborata e proposta una metodologia di calcolo dell'indice e il relativo catalogo dei servizi intelligenti da valutare nell'edificio esaminato.

Tale indicatore ha l'obiettivo di misurare la capacità dell'edificio di adattare il proprio funzionamento alle esigenze sia dell'occupante sia della rete e di migliorarne l'efficienza e la prestazione energetica complessiva. Recentemente La Commissione Europea ha emanato un regolamento delegato e un regolamento esecutivo con i quali, rispettivamente, viene definito un quadro metodologico di calcolo dello

SRI e sono individuati diversi percorsi d'attuazione possibili per gli Stati Membri che decideranno di implementare lo schema comune europeo.

Per la valutazione dello SRI, vengono presi in considerazione nove domini di valutazione (riscaldamento, raffreddamento, acqua calda sanitaria, ventilazione controllata, illuminazione, involucro edilizio dinamico, generazione di energia rinnovabile in loco, gestione lato domanda, ricarica, monitoraggio e controllo di veicoli elettrici). A ciascun dominio, sono associati diversi livelli di funzionalità, per i quali valori più elevati indicano un'implementazione più intelligente del rispettivo servizio [26]. L'implementazione dello SRI conduce ad alcuni vantaggi, tra i quali: i) sostenere l'innovazione delle tecnologie smart negli edifici; ii) aumentare la consapevolezza degli occupanti nei confronti del consumo energetico; iii) migliorare l'efficienza energetica complessiva e la performance dell'edificio; iv) contribuire all'obiettivo di decarbonizzazione e sensibilizzazione nell'utilizzo di tecnologie da fonti rinnovabili

Pochi studi sono disponibili in letteratura che analizzano in maniera dettagliata lo SRI, in riferimento sia alla metodologia di calcolo che all'applicazione a diversi edifici caso di studio.

In particolare, Marzinger et al. [26] hanno proposto una metodologia per una valutazione quantitativa semplificata del potenziale di "shifting" del carico degli edifici, con lo scopo di fornire un approccio numerico che consenta di classificare gli edifici in base alla loro capacità di accumulo di energia, al potenziale di "shifting" del carico e alla loro successiva interazione con la rete. La metodologia è stata applicata e validata attraverso la simulazione di casi d'uso teorici. Aspetto rilevante del modello proposto dagli autori è l'applicabilità della metodologia all'interno dell'Energy Performance Certificate (EPC). I risultati mostrano che un modello semplificato può fornire un quadro adeguato a una valutazione quantitativa dello SRI.

In un lavoro successivo, gli stessi autori [27] hanno ulteriormente sviluppato la metodologia precedentemente proposta con l'obiettivo di fornire un approccio basato su modelli numerici sulla valutazione di interi distretti sulla base della loro capacità complessiva di accumulo di energia, del potenziale di spostamento del carico e della loro capacità di interagire attivamente con le reti energetiche. Nello stesso lavoro viene inoltre stimato un potenziale di risparmio di CO<sub>2</sub> equivalente rispetto a un sistema non interattivo.

Janhunen et al. [28] hanno sperimentato il calcolo dello SRI in alcuni edifici del nord Europa poiché questi rappresentano una condizione di prova interessante per il calcolo dell'indicatore grazie alla presenza di tecnologie avanzate di informazione e comunicazione e agli elevati profili di consumo energetico degli edifici. I risultati hanno dimostrato che, nella sua forma attuale, lo SRI non è in grado di riconoscere le caratteristiche specifiche degli edifici a clima freddo, in particolare quelli che impiegano sistemi avanzati di teleriscaldamento. Un'altra implicazione, più pratica, dello studio è stata che a causa della natura soggettiva del processo proposto per la selezione dei servizi di costruzione rilevanti per SRI, l'applicabilità dell'SRI come sistema di valutazione equo in tutti gli Stati membri dell'UE potrebbe risultare problematica.

Vigna et al. [29] hanno valutato l'impatto delle valutazioni soggettive sull'indicatore calcolato, adottando una valutazione in due fasi con il coinvolgimento di due team di esperti con l'obiettivo di analizzare l'impatto delle valutazioni soggettive sull'indicatore calcolato. Nel lavoro, è stata adottata una valutazione in due fasi: in una prima fase i due gruppi hanno lavorato separatamente, e solo in una seconda fase è stato permesso di confrontare i risultati, discutere le discrepanze e identificare le difficoltà nell'applicazione della metodologia. Come risultato principale della ricerca, viene presentata una serie di raccomandazioni per un'efficace e ampia implementazione dell'indicatore di predisposizione intelligente, in grado di aumentare la rilevanza della sua valutazione e la sua efficacia, nonché di migliorare la comparabilità della prontezza intelligente degli edifici attraverso la definizione di benchmark e da integrare con altri indicatori chiave misurabili, soprattutto per quanto riguarda la flessibilità energetica.

I risultati di uno studio condotto da Fokaides et al. [30] hanno evidenziato valori di SRI particolarmente penalizzanti in piccoli edifici dove non è presente un sistema BMS (Building Management Systems) concludendo anche che, sebbene l'indicatore sia promettente, diversi sono gli aspetti che devono essere migliorati.

Infine, Markoska et al. [31] hanno investigato l'applicazione dello SRI agli edifici australiani, considerando un edificio di studio di caso. L'analisi mostra che i servizi intelligenti presenti in un edificio devono essere

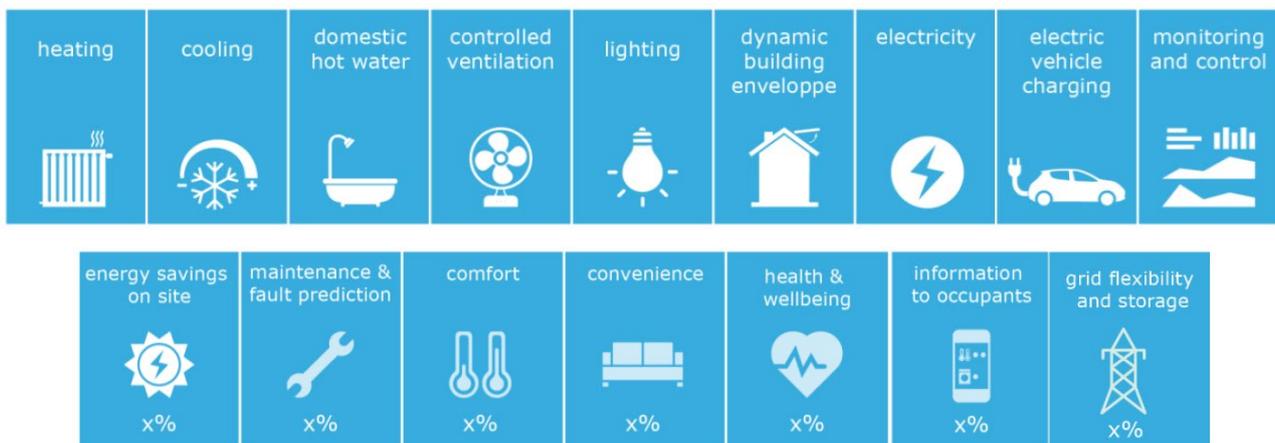
scelti con cura per garantire che siano rilevanti ai fini dell'incremento del livello di smartness e che l'adeguamento dei fattori di ponderazione, che considerino le condizioni climatiche e domini idonei come il riscaldamento o il raffreddamento, è indispensabile.

### 1.2 Metodologia di calcolo dello SRI

Il metodo di calcolo dello SRI è descritto nel Rapporto finale di uno studio commissionato dalla DG Energy della Commissione Europea [24]. La metodologia è di tipo multilivello e si basa su nove domini (i.e. servizi energetici) e sette criteri di impatto, come illustrato in Tabella 1 e Figura 1.

**Tabella 1 – Domini e criteri di impatto della metodologia SRI**

DOMINI	IMPATTI
1. Riscaldamento	1. Risparmio energetico
2. Raffrescamento	2. Manutenzione e fault detection
3. Acqua calda sanitaria	3. Comfort
4. Ventilazione meccanica controllata	4. Convenienza
5. Illuminazione	5. Informazione agli occupanti
6. Involucro dinamico	6. Salute e benessere
7. Generazione elettrica	7. Flessibilità della domanda energetica
8. Ricarica di veicoli elettrici	
9. Monitoraggio e controllo	



**Figura 1 – Domini e criteri di impatto per la metodologia SRI**

Per ciascun dominio, sono definiti diversi servizi intelligenti (smart ready services) in funzione dalle caratteristiche impiantistiche del servizio considerato. Ad ogni servizio sono assegnati diversi livelli di funzionalità, ognuno dei quali presenta un grado di smartness, in una scala crescente da 0 (i.e. servizio “non intelligente”) a un valore massimo (che può variare da 2 a 5 a seconda del servizio) per le funzionalità avanzate (vedi Figura 2). Poiché i punteggi massimi assegnati ai diversi livelli di funzionalità sono variabili, non è applicabile un confronto diretto tra i diversi servizi [29].

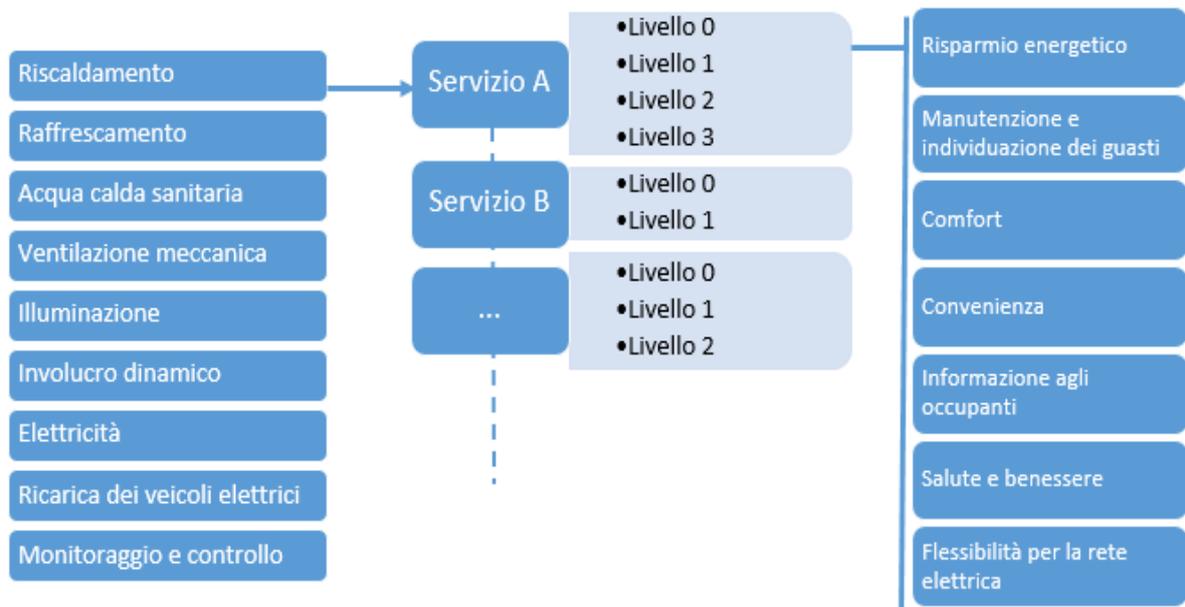


Figura 2 - Metodologia multilivello SRI

Ad esempio, per il dominio ACS sono previsti 4 servizi intelligenti e in Tabella 2 sono mostrati i livelli di funzionalità per due dei suddetti servizi, rispettivamente: *“Controllo della carica dell’accumulo di ACS con riscaldamento elettrico diretto o pompa di calore elettrica integrata”* e *“Informazioni relative alle prestazioni del servizio ACS”*.

Tabella 2 - Servizi e livelli di funzionalità del dominio ACS

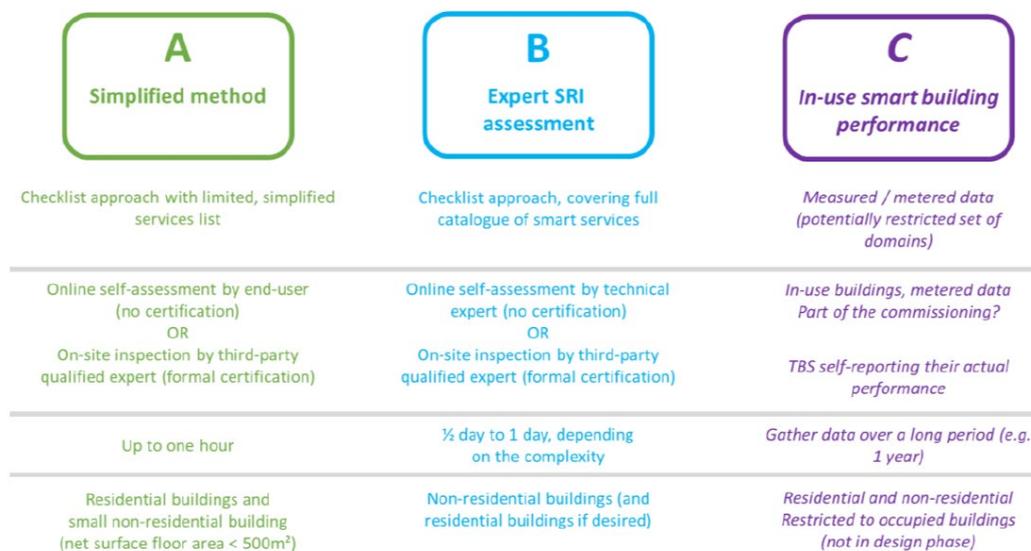
Servizio intelligente		Livello di funzionalità	
Controllo della carica dell'accumulo ACS	Con riscaldamento elettrico diretto o pompa di calore elettrica integrata	0	Controllo on/off
		1	Controllo automatico on/off e abilitazione della ricarica programmata
		2	Controllo automatico on/off e abilitazione della ricarica programmata, controllo e gestione dello storage multi-sensore
		3	Controllo automatico della carica basata sulla disponibilità locale di rinnovabili o informazioni dalla rete elettrica (DR, DSM)
Informazioni relative alle prestazioni del servizio ACS		0	Nessuno
		1	Indicazione dei valori attuali (e.g. temperature, consumi)
		2	Valori istantanei e dati storici
		3	Valutazione delle prestazioni incluso previsione futura e/o benchmark

I punteggi assegnati ai singoli servizi sono sommati per ciascuno dei domini e divisi per i punteggi individuali massimi teorici al fine di ottenere un punteggio di impatto del dominio. Per ogni criterio di impatto, è possibile calcolare il punteggio totale come somma ponderata dei punteggi di impatto del dominio. Lo SRI viene quindi determinato come somma ponderata dei punteggi di impatto totale ed esprime quanto è vicino (o lontano) l'edificio dalla sua massima intelligenza teorica (cioè 100%). Il valutatore è libero di scegliere il sistema di ponderazione predefinito oppure assegnare delle ponderazioni differenti sulla base delle caratteristiche proprie degli edifici oggetto di valutazione (condizioni climatiche,

caratteristiche del parco edilizio nazionale o regionale etc.). È possibile calcolare uno SRI totale di edificio, uno SRI per criterio di impatto, uno SRI relativo alle EPBD key capabilities, uno SRI per dominio.

Sono proposti tre metodi per la valutazione dello SRI (vedi Figura 3):

- **Metodo A (semplificato):**  
destinato a edifici residenziali o piccoli edifici non residenziali, consente oltre alla valutazione di terza parte anche l'autovalutazione;
- **Metodo B (dettagliato):**  
consiste in una valutazione più dettagliata e di default prevede la verifica in campo da parte di un operatore esperto indipendente;
- **Metodo C (avanzato):**  
consiste in una valutazione più avanzata basata sul monitoraggio diretto in campo (ad esempio attraverso l'auto-reporting da sistemi BACS).



**Figura 3 – Metodi di valutazione dello SRI**

L'applicazione del metodo A comprende un numero ristretto di servizi intelligenti (27 servizi), l'implementazione dei metodi B e C consente invece di valutare edifici più complessi e servizi più avanzati con un catalogo di 54 servizi [24].

In fase preliminare, è essenziale definire inizialmente i domini presenti nell'edificio oggetto di valutazione, mediante un processo di valutazione iniziale denominato "trriage process" [24]. In questa fase, viene redatto un inventario dei servizi intelligenti presenti nell'edificio analizzato mediante una semplice check-list. In una fase successiva sono invece assegnati i livelli di funzionalità a ciascuno dei servizi intelligenti individuati consentendo, in ultimo, di valutare l'SRI totale e gli SRI di dominio e di impatto, come mostrato nella flow chart in

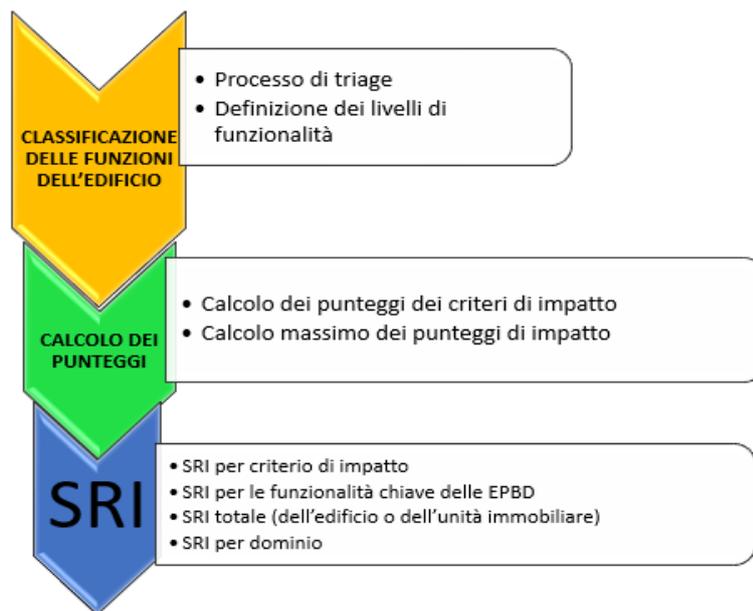


Figura 4 - Step di calcolo metodologia SRI [24]

Sempre nell'ambito dello studio "Support for setting up a Smart Readiness Indicator for buildings and related impact assessment" commissionato dalla DG Energy della Commissione Europea [32] sono stati messi a disposizione dei deliverable di progetto nella forma di fogli di calcolo excel. Questi fogli di calcolo consentono la determinazione dello SRI in applicazione dei sopra descritti metodi A (semplificato) e B (dettagliato).

### 1.3 Analisi del Parco Edilizio Italiano

Preliminarmente all'individuazione dei casi di studio, è stata eseguita un'analisi delle caratteristiche impiantistiche del parco edilizio nazionale. A tal fine, sono stati analizzati: i) i dati statistici sugli edifici e sugli alloggi derivanti dall'ultimo censimento ISTAT [16], ii) i dati statistici sugli impianti di riscaldamento, raffrescamento e produzione di acqua calda sanitaria (ACS) nonché le risultanze del progetto TABULA per la caratterizzazione delle tipologie edilizie/impiantistiche[33,34], iii) l'evoluzione normativa relativamente agli obblighi prestazionali e ai requisiti di regolazione degli impianti tecnici propri degli edifici appartenenti al settore residenziale.

#### 1.3.1 Analisi dei dati statistici (ISTAT)

Nel 2011 in Italia ISTAT ha censito 31,138,278 abitazioni. ISTAT divide le abitazioni italiane censite nel 2011 in 6 categorie occupazionali e 9 epoche costruttive (con riferimento agli anni 1918, 1945, 1960, 1970, 1980, 1990, 2000, 2005 e successivi).

Con esclusivo riferimento agli alloggi occupati da persone residenti, dai dati in Tabella 3 si evince che circa il 64% degli alloggi italiani rientra nella categoria di edificio multifamiliare, mentre la restante quota

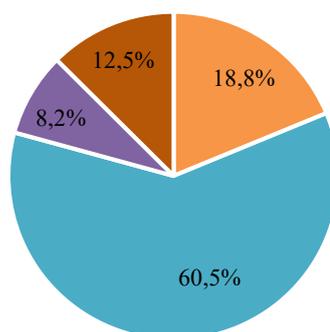
parte si divide equamente tra le restanti tipologie (mono/bi-familiare). Ai fini della presente analisi è utile osservare che circa il 70% delle abitazioni occupate da persone residenti è stata edificata prima del 1980, ovvero prima che venisse emanato qualsiasi obbligo legislativo relativamente all'efficienza energetica degli edifici (Legge 373 del 1976). Di questi, circa il 45% è rappresentato da edifici multifamiliari.

**Tabella 3 - Abitazioni italiane per epoca costruttiva (elaborazione UNICAS di dati ISTAT)**

Epoca costruttiva	Monofamiliare		Multifamiliare		Totale
	Unità	Share [%]	Unità	Share [%]	
≤ 1918	676748	28%	1776289	72%	2453037
1919-1945	530469	26%	1502969	74%	2033438
1946-1960	685258	20%	2696880	80%	3382138
1961-1970	765952	16%	4063971	84%	4829923
1971-1980	776695	17%	3717562	83%	4494257
1981-1990	562861	18%	2482013	82%	3044874
1991-2000	356827	19%	1513834	81%	1870661
2001-2005	190446	17%	908886	83%	1099332
≥ 2006	143716	17%	713918	83%	857634
Totale	4688972		19376322		24065294

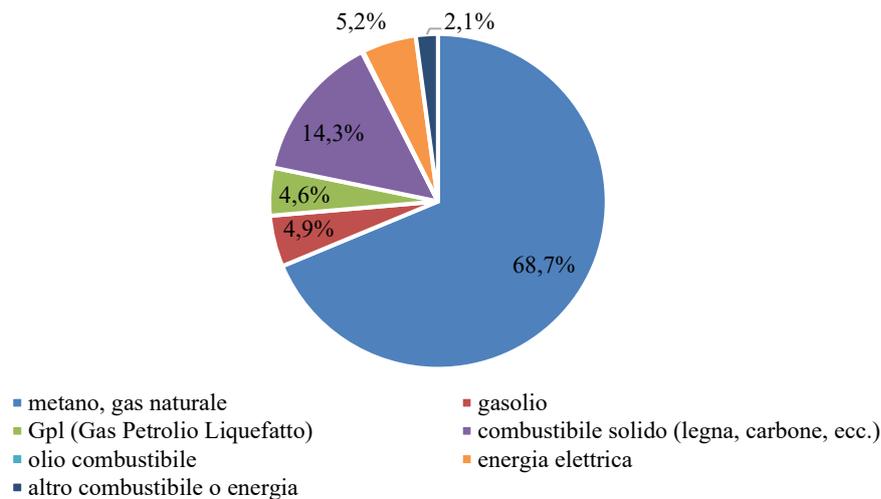
### 1.3.2 Impianti termici di riscaldamento, raffrescamento e produzione di acqua calda sanitaria

Relativamente al riscaldamento degli edifici, analisi preliminari dei dati ISTAT relativi al Censimento della Popolazione e delle Abitazioni del 2011 suggeriscono che, nel mercato italiano, gli impianti autonomi e centralizzati costituiscono l'80% della totalità degli impianti termici (Figura 5). Tali impianti sono alimentati per il 70% a gas metano, per un restante 5% a gasolio, un ulteriore 5% a GPL. Per le abitazioni riscaldate con apparecchi singoli fissi, le caldaie alimentate a combustibili solidi e gli apparecchi alimentati da energia elettrica occupano la restante quota parte (Figura 6).



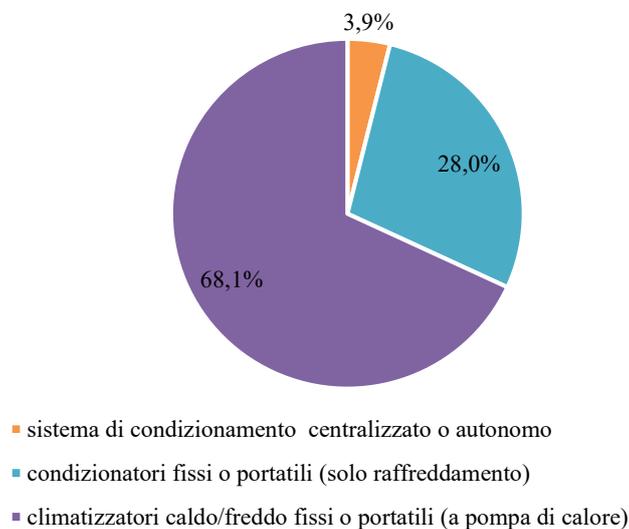
- impianto centralizzato ad uso di più abitazioni
- impianto autonomo ad uso esclusivo dell'abitazione
- apparecchi singoli fissi che riscaldano l'intera abitazione, o la maggior parte di essa
- apparecchi singoli fissi che riscaldano alcune parti dell'abitazione

**Figura 5 - Tipologie di impianti di riscaldamento in Italia**



**Figura 6 – Alimentazione degli impianti di riscaldamento in Italia**

Il 29.4% delle famiglie dispone di un impianto di raffrescamento dell'abitazione. Di questi, il 68.1% fa utilizzo di climatizzatori caldo/freddo fissi o portatili (a pompa di calore), il 28.0% di condizionatori fissi o portatili (solo raffreddamento), mentre solo il 3.9% delle abitazioni è alimentato da un impianto di raffrescamento autonomo o centralizzato (Figura 7).



**Figura 7 – Tipologie di impianti di raffrescamento in Italia**

Gli impianti di produzione di ACS costituiscono uno dei servizi fondamentali a servizio degli edifici sia per l'incidenza sui consumi energetici, sia per la criticità nel dimensionamento dell'impianto stesso. La produzione istantanea di acqua calda sanitaria richiede, infatti, una notevole potenza che, nel caso di generatore combinato (acqua calda sanitaria e riscaldamento), deve essere all'occorrenza totalmente impiegata per garantire il giusto fabbisogno di acqua calda sanitaria. I dati necessari per la determinazione del fabbisogno sono il quantitativo di acqua calda sanitaria giornaliero necessario e il fattore di contemporaneità che si vuole fornire. Tali valori possono variare notevolmente in funzione della tipologia di utenza (e.g. abitazione, palestra, hotel). Gli impianti di produzione di ACS possono essere suddivisi

fondamentalmente in due tipologie: a) produzione istantanea; b) produzione mediante accumulo. In Figura 8 si riportano le percentuali di diffusione delle diverse modalità impiantistiche di produzione di ACS.

Gli impianti di produzione istantanea, tipica delle caldaie a gas murali combinate e di produzione dedicata, sono generalmente costituite da uno scambiatore acqua-acqua, alimentato dallo scambiatore primario della caldaia. Il limite inferiore, tipico della produzione istantanea di acqua calda sanitaria, è rappresentato da circa 10 litri/min (produzione che corrisponde alla portata di una doccia) e dall'impiego di una notevole potenza pari a circa 25 kW (oggi certamente sovradimensionato rispetto alle necessità di riscaldamento di un piccolo appartamento). Pertanto, per ottenere una produzione di ACS maggiore, occorre sovradimensionare ulteriormente il generatore di calore o ricorrere ad una tipologia ad accumulo.

I sistemi ad accumulo consentono di ridurre la potenza termica prolungando il tempo di preparazione per l'acqua calda sanitaria. In tal caso, a parità di fabbisogno di acqua calda sanitaria richiesto, la potenza della caldaia potrà essere notevolmente ridotta. Un sistema ad accumulo (tipicamente da 50 a 500 litri) presenta anche una maggiore attitudine nella gestione del contributo termico dato da fonti energetiche rinnovabili. Il sistema di accumulo di ACS richiede pertanto un ulteriore scambiatore (solitamente posizionato nella parte inferiore del serbatoio) alimentato dal circuito solare, costituito da uno o più collettori solari installati in copertura. L'integrazione dell'acqua calda sanitaria al sistema di accumulo avviene quando le condizioni di temperatura del collettore solare sono favorevoli. L'integrazione del solare termico in un impianto di produzione di acqua calda sanitaria permette un notevole risparmio energetico specie laddove è necessaria una notevole richiesta di ACS (e.g. piscine, alberghi, palestre ecc.).

Gli impianti di produzione di ACS elettrici sono molto poco diffusi negli edifici di recente costruzione, sebbene un tempo fossero impiegati in moltissime abitazioni, a causa della modesta efficienza ed elevato consumo energetico.

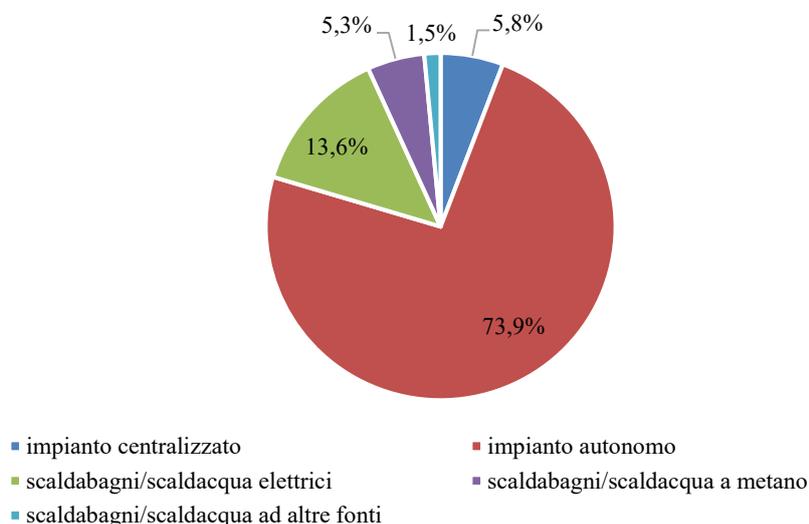


Figura 8 – Modalità di produzione di ACS

### 1.3.3 Evoluzione normativa rilevante ai fini della regolazione e della gestione dell'impianto termico

Per la definizione dei sistemi di gestione e controllo da applicarsi ai sistemi edificio-impianto caratterizzanti il parco edilizio nazionale esistente nello scenario di base, è stata necessaria un'analisi dettagliata dell'evoluzione normativa riguardante la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la

manutenzione degli impianti termici. Si ritiene infatti che la definizione dello SRI del parco edilizio nazionale sia sostanzialmente determinata dalle caratteristiche dell'impianto di riscaldamento, la cui gestione e regolazione è al momento l'unica soggetta a limitazioni dal punto di vista normativo. Si evidenziano inoltre, nel settore residenziale: i) la scarsa diffusione di sistemi di ventilazione meccanica controllata; ii) l'assenza di obblighi di installare sistemi di automazione centralizzata (i.e., sistemi BACS, obbligatoria a partire dal 2015 per gli edifici ad uso non residenziale); iii) la mancanza di un assetto normativo che regolamenti i requisiti minimi di intelligenza degli edifici residenziali (i.e., la mancanza di obblighi per la gestione automatizzata ed intelligente del sistema edificio-impianto). Si evidenzia inoltre come la diffusione di alcune tecnologie smart previste dal catalogo dei servizi e delle funzionalità della Guida della Commissione Europea, sia ancora limitata ad applicazioni di nicchia (frutto per lo più di una elevata sensibilità dei proprietari degli immobili) e la loro diffusione sul territorio nazionale non è attualmente quantificabile in termini statistici.

Si riportano di seguito i principali riferimenti normativi che sono stati utili per associare a ciascuna categoria edilizia il relativo sistema di regolazione dell'impianto termico:

- Legge 373 del 1976, emanata a seguito della crisi energetica degli anni '70, avente come finalità la riduzione dei consumi energetici degli edifici; tale legge introduce l'obbligo di installazione, per gli impianti di potenza termica al focolare uguale o superiore alle 50.000 kcal/h, di un sistema automatico di regolazione del calore fornito all'impianto di utilizzazione, funzionante in relazione alle variazioni della temperatura esterna;
- Legge 10 del 1991, che abroga la precedente 373/1976 e introduce un nuovo sistema di norme per il contenimento dei consumi di energia, riguardanti in particolare progettazione, installazione, esercizio e manutenzione degli impianti termici; in merito specifico alla termoregolazione degli impianti termici, la legge 10/91 dispone l'obbligo di adozione di sistemi di termoregolazione e di contabilizzazione del calore per ogni singola unità immobiliare per impianti asserviti ad edifici di nuova costruzione ed incentiva la trasformazione degli impianti centralizzati in impianti autonomi purché dotati di un sistema automatico di regolazione della temperatura;
- Decreto del Presidente della Repubblica n. 412 del 1993 (attuazione della legge 10 del 1991), stabilisce che i generatori di potenza nominale uguale o superiore ai 35 kW adibiti al riscaldamento di una pluralità di utenze devono essere dotati di "un gruppo termoregolatore dotato di programmatore che consenta la regolazione della temperatura ambiente almeno su due livelli a valori sigillabili nell'arco delle 24 ore. Il gruppo termoregolatore deve essere pilotato da una sonda termometrica di rilevamento della temperatura esterna. La temperatura esterna e le temperature di mandata e di ritorno del fluido termovettore devono essere misurate con una incertezza non superiore a  $\pm 2$  °C."; il DPR 412/1993 prevede inoltre che gli edifici la cui concessione edilizia fosse stata rilasciata dopo il 30 giugno 2000, debbano essere dotati di sistemi di termoregolazione e di contabilizzazione del consumo energetico per ogni singola unità immobiliare. In merito agli impianti autonomi si dispone infine che essi debbano "essere parimenti dotati di un sistema di termoregolazione pilotato da una o più sonde di misura della temperatura ambiente con programmatore che consenta la regolazione di questa temperatura su almeno due livelli di temperatura nell'arco delle 24 ore.", non è pertanto richiesta una sonda della temperatura esterna per i generatori autonomi.
- Decreto del Presidente della Repubblica n. 59 del 2009, a seguito del decreto legislativo 192 del 2005, viene stabilito che per ogni sostituzione del generatore di calore deve essere presente almeno "una centralina di termoregolazione programmabile per ogni generatore di calore e dispositivi modulanti per la regolazione automatica della temperatura ambiente nei singoli locali o nelle singole zone che, per le loro caratteristiche di uso ed esposizione possano godere, a differenza degli altri ambienti riscaldati, di apporti di calore solari o comunque gratuiti."; la centralina di termoregolazione si differenzia in relazione alla tipologia impiantistica, deve: i) essere pilotata da

sonde di rilevamento della temperatura interna, supportate eventualmente da una analogica centralina per la temperatura esterna, con programmatore che consenta la regolazione della temperatura ambiente su due livelli di temperatura nell’arco delle 24 ore, nel caso di impianti termici centralizzati; ii) consentire la programmazione e la regolazione della temperatura ambiente su due livelli di temperatura nell’arco delle 24 ore, nel caso di impianti termici per singole unità immobiliari.

- Decreto legislativo n. 102 del 2014, viene introdotto l’obbligo di installazione di sistemi di contabilizzazione dei consumi di energia termica per riscaldamento, raffrescamento e produzione di ACS, per tutti gli edifici alimentati da impianti di riscaldamento/raffrescamento centralizzati o da una rete di teleriscaldamento/teleraffrescamento, a condizione di verifica della fattibilità tecnico-economica dell’intervento, entro il 31 Dicembre 2016 (termine successivamente prorogato al 30 giugno 2017).

#### 1.4 Descrizione dei casi di studio

Sulla base delle risultanze dell’analisi del Parco edilizio nazionale presentate nel capitolo precedente, sono stati individuati 8 casi di studio in base ai seguenti criteri principali:

- Tipologia impiantistica: sono state individuate due tipologie impiantistiche caratteristiche: i) “impianto autonomo” ovvero “apparecchi singoli asserviti all’intera abitazione o a parti di essa”, che costituiscono rispettivamente il 60.5% e il 20.7% del parco edilizio residenziale; ii) “impianto centralizzato” (nel seguito “centralizzato”) che rappresenta il 18.8% del parco edilizio residenziale. Questa classificazione è stata introdotta principalmente per tenere conto dell’obbligo di installazione di dispositivi di contabilizzazione e termoregolazione introdotto dal D.Lgs 102/2014 e s.m.i [35], impattante sui sistemi di regolazione ed emissione;
- Epoca costruttiva: sono state individuate 4 epoche costruttive tenendo in considerazione l’evoluzione normativa in materia di regolazione degli impianti termici e le epoche costruttive derivanti dall’analisi del censimento degli edifici e delle abitazioni ISTAT; in particolare sono state considerate le seguenti epoche costruttive: i) precedenti al 1980; ii) tra il 1981 e il 1990; iii) tra il 1990 ed il 2005; iv) dopo il 2006.

Le caratteristiche impiantistiche degli edifici casi di studio ottenuti dall’analisi preliminare sono evidenziati in Tabella 4.

**Tabella 4 – Caratteristiche impiantistiche degli edifici casi di studio**

	Caso A	Caso B	Caso C	Caso D	Caso E	Caso F	Caso G	Caso H
Epoca costruttiva	< 1980	< 1980	1981-1990	1981-1990	1990-2005	1990-2005	> 2006	> 2006
Tipologia impiantistica	Auton.	Centr.	Auton.	Centr.	Auton.	Centr.	Auton.	Centr.
Impianti								
Riscaldamento	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
ACS	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Illuminazione	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Raffrescamento	NO	NO	NO	NO	SI	NO	SI	SI
Ventilazione meccanica	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Involucro dinamico	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI
Elettricità: rinnovabili e storage	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Ricarica veicoli elettrici	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Monitoraggio e controllo	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO

### 1.4.1 Caso di studio A

Tipo edificio	
Edificio	Monofamiliare
Epoca costruttiva	< 1980
Stato	Originale
	
Domini presenti e caratterizzazione degli impianti	
Riscaldamento	Generatori a resistenza elettrica asserviti al riscaldamento dei singoli ambienti. Assenti sistemi di controllo del sistema di generazione/emissione e di regolazione.
Raffrescamento	n.a.
ACS	Scaldabagno elettrico dedicato con sistema di accumulo senza controllo del livello termico.
Ventilazione meccanica	n.a.
Illuminazione	Controllo manuale con interruttore on/off
Involucro dinamico	n.a.
Elettricità: rinnovabili e storage	n.a.
Ricarica dei veicoli elettrici	n.a.
Monitoraggio e controllo	n.a.

1.4.2 Caso di studio B

Tipo edificio	
Edificio	Multifamiliare
Epoca costruttiva	< 1980
Stato	Originale
	
Domini presenti e caratterizzazione degli impianti	
Riscaldamento	<p>Impianto di riscaldamento centralizzato con generatore a gasolio per la produzione combinata di riscaldamento e ACS.</p> <p>Sistema di distribuzione a colonne montanti verticali idronico con terminali di emissione a radiatori e pompa di circolazione a giri variabili.</p> <p>Sistema di contabilizzazione indiretta e valvole termostatiche meccaniche su ogni radiatore.</p>
Raffrescamento	n.a.
ACS	<p>(Vedi riscaldamento)</p> <p>Sistema di contabilizzazione delle spese di ACS (contatori volumetrici di utenza).</p>
Ventilazione meccanica	n.a.
Illuminazione	Controllo manuale con interruttore on/off
Involucro dinamico	n.a.
Elettricità: rinnovabili e storage	n.a.
Ricarica dei veicoli elettrici	n.a.
Monitoraggio e controllo	n.a.

### 1.4.3 Caso di studio C

Tipo edificio	
Edificio	Monofamiliare
Epoca costruttiva	tra il 1981 e il 1990
Stato	Originale
	
Domini presenti e caratterizzazione degli impianti	
Riscaldamento	Impianto autonomo alimentato da caldaia monostadio a gas naturale con bruciatore atmosferico e regolazione climatica per la produzione combinata di riscaldamento e ACS. Termoregolazione attuata mediante termostato centrale di zona programmabile a orari.
Raffrescamento	n.a.
ACS	(vedi riscaldamento)
Ventilazione meccanica	n.a.
Illuminazione	Controllo manuale con interruttore on/off
Involucro dinamico	n.a.
Elettricità: rinnovabili e storage	n.a.
Ricarica dei veicoli elettrici	n.a.
Monitoraggio e controllo	n.a.

1.4.4 Caso di studio D

Tipo edificio	
Edificio	Multifamiliare
Epoca costruttiva	tra il 1981 e il 1990
Stato	Originale
	
Domini presenti e caratterizzazione degli impianti	
Riscaldamento	<p>Impianto centralizzato con caldaia tradizionale a gas naturale per il solo servizio di riscaldamento dotato di programmatore orario a impostazione manuale.</p> <p>Sistema di distribuzione a colonne montanti verticale idronico con terminali di emissione a radiatori e pompa di circolazione a giri variabili.</p> <p>Sistema di contabilizzazione indiretta con totalizzatori dei tempi di inserzione e valvole termostatiche elettroniche comandate da un termostato centrale su ogni radiatore.</p>
Raffrescamento	n.a.
ACS	Produzione di ACS di tipo autonomo con scaldabagni elettrici o caldaia murale alimentata a gas metano.
Ventilazione meccanica	n.a.
Illuminazione	Controllo manuale con interruttore on/off
Involucro dinamico	n.a.
Elettricità: rinnovabili e storage	n.a.
Ricarica dei veicoli elettrici	n.a.
Monitoraggio e controllo	n.a.

### 1.4.5 Caso di studio E

Tipo edificio	
<b>Edificio</b>	Monofamiliare
<b>Epoca costruttiva</b>	tra il 1990 e il 2005
<b>Stato</b>	Originale
	
Domini presenti e caratterizzazione degli impianti	
<b>Riscaldamento</b>	Impianto autonomo con caldaia alimentata a pellet per la produzione combinata di riscaldamento e ACS, regolazione climatica e termostato programmabile a orari con funzionalità di gestione remota della programmazione e del set-point. Sistema di distribuzione orizzontale idronico con emissione a termoconvettori.
<b>Raffrescamento</b>	Impianto di raffrescamento con chiller ad assorbimento elettrico, distribuzione idronica e terminali di emissione termoconvettori.
<b>ACS</b>	(Vedi riscaldamento). Impianto di produzione da FER (collettori solari termici) dotato di accumulo senza gestione del livello termico.
<b>Ventilazione meccanica</b>	n.a.
<b>Illuminazione</b>	Controllo manuale con interruttore on/off.
<b>Involucro dinamico</b>	n.a.
<b>Elettricità: rinnovabili e storage</b>	n.a.
<b>Ricarica dei veicoli elettrici</b>	n.a.
<b>Monitoraggio e controllo</b>	n.a.

1.4.6 Caso di studio F

Tipo edificio	
Edificio	Multifamiliare
Epoca costruttiva	tra il 1990 e il 2005
Stato	Originale
	
Domini presenti e caratterizzazione degli impianti	
Riscaldamento	<p>Impianto centralizzato fornito da caldaia a condensazione alimentata gas naturale per produzione combinata riscaldamento e ACS. Programmatore asservito al generatore principale che consente di regolare la temperatura su almeno due livelli, misura della temperatura del fluido termovettore e sonda termometrica esterna. Sistema di distribuzione idronico orizzontale emissione a radiatori e pompa di circolazione a giri variabili.</p> <p>Sistema di contabilizzazione diretta con contatori di energia termica installato nella cassetta di derivazione di ciascuna unità immobiliare. Termostato di zona programmabile a orari per la gestione dell'impianto termico.</p>
Raffrescamento	n.a.
ACS	(Vedi riscaldamento). Impianto di produzione da FER (collettori solari termici) dotato di accumulo senza gestione del livello termico.
Ventilazione meccanica	n.a.
Illuminazione	Controllo manuale con interruttore on/off.
Involucro dinamico	n.a.
Elettricità: rinnovabili e storage	n.a.
Ricarica dei veicoli elettrici	n.a.
Monitoraggio e controllo	n.a.

### 1.4.7 Caso di studio G

Tipo edificio	
Edificio	Monofamiliare
Epoca costruttiva	Dopo 2006
Stato	Originale
	
Domini presenti e caratterizzazione degli impianti	
Riscaldamento	<p>Caldia a condensazione a bassa temperatura intelligente alimentata a gas naturale per produzione combinata riscaldamento e ACS dotata di interfaccia WLAN e applicazione per gestione remota.</p> <p>Funzionalità applicazione: i) monitoraggio in tempo reale dello stato del sistema, dei consumi e dell'efficienza impianto solare (vedi ACS); ii) impostazione temperatura di set point e temperatura dell'acqua calda desiderate; iii) impostazione tempi di commutazione per il riscaldamento e l'acqua calda; iv) visualizzazione della temperatura esterna corrente e dello storico delle temperature degli ultimi giorni; v) funzione di geolocalizzazione per la gestione automatizzata dell'impianto termico.</p> <p>Sistema di distribuzione idronico con emissione a pannelli radianti annessi a pavimento.</p>
Raffrescamento	Impianto di raffrescamento a pompa di calore aria-aria (sistema ad espansione diretta multi-split).
ACS	(Vedi riscaldamento). Impianto di produzione da FER (collettori solari termici) dotato di accumulo senza gestione del livello termico.
Ventilazione meccanica	n.a.
Illuminazione	Controllo manuale con interruttore on/off.
Involucro dinamico	Schermature mobili motorizzate a controllo manuale
Elettricità: rinnovabili e storage	Impianto di produzione da FER (fotovoltaico) senza accumulo.
Ricarica dei veicoli elettrici	n.a.
Monitoraggio e controllo	n.a.

1.4.8 Caso di studio H

Tipo edificio	
Edificio	Multifamiliare
Epoca costruttiva	Dopo 2006
Stato	Originale
	
Domini presenti e caratterizzazione degli impianti	
Riscaldamento	<p>Impianto centralizzato fornito da tre generatori a pompa di calore aria-acqua per raffrescamento, riscaldamento e produzione di ACS. Programmatore asservito al generatore principale che consente di regolare la temperatura su almeno due livelli, misura della temperatura del fluido termovettore e sonda termometrica esterna. Controllo multistadio dei generatori in base al carico termico effettivo.</p> <p>Sistema di distribuzione idronico con emissione a pannelli radianti annegati a pavimento. Sistema di contabilizzazione diretta con contatori di energia termica e di ACS installati nella cassetta di derivazione di ciascuna unità immobiliare. Termostato di zona per la gestione dell'impianto termico.</p>
Raffrescamento	(Vedi riscaldamento)
ACS	(Vedi riscaldamento). Impianto di produzione da FER (collettori solari termici) dotato di accumulo senza gestione del livello termico.
Ventilazione meccanica	n.a.
Illuminazione	Controllo manuale con interruttore on/off.
Involucro dinamico	Schermature mobili motorizzate a controllo manuale
Elettricità: rinnovabili e storage	Impianto di produzione da FER (fotovoltaico) senza accumulo.
Ricarica dei veicoli elettrici	n.a.
Monitoraggio e controllo	n.a.

## 1.5 Stima dello SRI medio nazionale

I valori di SRI per gli edifici caso di studio individuati, stimati mediante i fogli di calcolo messi a disposizione dalla Commissione Europea per la sperimentazione della metodologia, sono riportati in Tabella 5, mentre i relativi punteggi di impatto e di dominio sono riportati in Tabella 6 e in Tabella 7.

**Tabella 5 – SRI dei casi di studio**

	<i>Impianto</i>	<i>Epoca costruttiva</i>	<i>SRI stimato</i>
Caso studio A	Autonomo	< 1980	0%
Caso studio B	Centralizzato		17%
Caso studio C	Autonomo	1981-1990	9%
Caso studio D	Centralizzato		17%
Caso studio E	Autonomo	1990-2005	12%
Caso studio F	Centralizzato		20%
Caso studio G	Autonomo	> 2006	23%
Caso studio H	Centralizzato		23%

**Tabella 6 – Punteggi di impatto**

<i>Punteggio di impatto</i>	<i>Caso di studio</i>							
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	<i>F</i>	<i>G</i>	<i>H</i>
Energy savings on site	0%	37%	18%	37%	25%	43%	44%	48%
Flexibility for the grid and storage	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Comfort	0%	34%	17%	34%	23%	43%	36%	45%
Convenience	0%	10%	8%	10%	8%	11%	16%	18%
Wellbeing and health	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Maintenance & fault prediction	0%	0%	0%	0%	0%	0%	21%	11%
Information to occupants	0%	4%	4%	4%	3%	4%	11%	6%

**Tabella 7 – Punteggi di dominio**

<i>Punteggio di dominio</i>	<i>Caso di studio</i>							
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	<i>F</i>	<i>G</i>	<i>H</i>
Heating system	0%	34%	18%	34%	26%	42%	48%	49%
Domestic Hot Water	0%	0%	0%	0%	0%	0%	16%	0%
Cooling system	0%	-	-	-	12%	-	36%	52%
Controlled ventilation	0%	-	-	-	-	-	-	-
Lighting	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Dynamic Envelope	0%	-	-	-	-	-	14%	14%
Electricity: renewables & storage	0%	-	-	-	-	-	13%	13%
Electric Vehicle Charging	0%	-	-	-	-	-	-	-
Monitoring & Control	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Come è possibile osservare dai dati in Tabella 5, lo SRI stimato varia in un range tra 0-23%, aumentando congruentemente con la definizione dei requisiti minimi di regolazione del sistema di generazione. Osservando i punteggi di impatto riportati in Tabella 6, è possibile evidenziare come gli impatti più rilevanti siano rappresentati da quelli dati rispettivamente dal risparmio energetico (0-48%),

comfort (0-45%) e convenienza (0-18%). Molto meno rilevanti risultano i contributi degli impatti informazione agli occupanti (0-11%) e manutenzione predittiva (11-21% solo nei casi G ed H).

Come prevedibile, il dominio più impattante è, quasi in tutti i casi, quello del riscaldamento (Tabella 7), con un impatto variabile tra 0 e 49% seguito, ove presente, dal dominio di raffrescamento (12-52%). È possibile inoltre evidenziare come, a parità di epoca costruttiva, lo SRI assuma valori sensibilmente differenti per gli edifici con impianti autonomi rispetto invece agli edifici dotati di impianto centralizzato. Ciò è essenzialmente dovuto agli effetti del D. Lgs 102/2014, che ha determinato l'obbligo di installazione di sistemi di ripartizione dei consumi di energia termica negli edifici alimentati da impianti centralizzati. Negli impianti a distribuzione idronica verticale (la quasi totalità degli impianti di distribuzione associati a generatori centralizzati prima del 1980), tale obbligo impatta infatti non solo sul sistema di regolazione dei terminali di emissione (introducendo termoregolazione per singolo ambiente, negli impianti con distribuzione idronica verticale), ma anche sull'adeguamento del sistema di distribuzione (installazione di pompa di circolazione a giri variabili per bilanciamento dell'impianto) e di generazione (regolazione del generatore).

La stima del valore di SRI nazionale è stata effettuata attraverso una media pesata per numero di edifici dell'SRI ottenuto dalla simulazione dei casi di studio (equazione 1) utilizzando i pesi riportati in Tabella 9.

$$SRI = \frac{\sum_{i=A}^H SRI_{\text{caso di studio } i} \cdot n^{\circ} \text{ edifici}_{\text{caso di studio } i}}{n_{\text{edifici totale}}} \quad (1.1)$$

Le occorrenze riportate in Tabella 8 sono state ricavate da una rielaborazione dei dati sugli edifici del censimento ISTAT, suddividendo il numero totale di edifici multifamiliari in due categorie: i) edifici multifamiliari alimentati da impianti autonomi (81% del totale); ii) i) edifici multifamiliari alimentati da impianti centralizzati (19% del totale).

**Tabella 8 – Classificazione degli edifici del Parco edilizio nazionale**

<i>Epoca costruttiva</i>	<i>Edifici monofamiliari (a)</i>	<i>Edifici multifamiliari (impianto autonomo) (b)</i>	<i>Edifici multifamiliari (impianto centralizzato) (c)</i>
≤ 1980	1887545	5801980	1339306
1981-1990	270400	968745	223621
1991-2005	246730	885126	204319
≥ 2006	60323	243458	56199

In Tabella 9 viene riportata la stima dello SRI medio nazionale secondo la metodologia così definita evidenziando come, sotto le ipotesi introdotte nel presente studio, al parco edilizio italiano non riqualificato possa essere associato un valore di SRI pari al 5.22%. È opportuno sottolineare come tale stima non consideri eventuali interventi di efficientamento già apportati agli edifici di epoca costruttiva precedente al 2005.

**Tabella 9 – Analisi dello SRI del Parco edilizio nazionale**

<i>Tipo</i>	<i>Caso studio</i>	<i>Numero edifici</i>	<i>Peso %</i>	<i>SRI stimato</i>	<i>SRI pesato</i>
<i>(a) + (b)</i>	A	7689525	63.1%	0%	0.00%
<i>(c)</i>	B	1339306	11.0%	17%	1.87%
<i>(a) + (b)</i>	C	1239146	10.2%	9%	0.92%
<i>(c)</i>	D	223621	1.8%	17%	0.31%
<i>(a) + (b)</i>	E	1131856	9.3%	12%	1.11%
<i>(c)</i>	F	204319	1.7%	20%	0.34%
<i>(a) + (b)</i>	G	303780	2.5%	23%	0.57%
<i>(c)</i>	H	56199	0.5%	23%	0.11%
<i>SRI medio nazionale stimato</i>					5.22%

Per tenere conto del possibile miglioramento indotto sullo SRI nazionale dall’attuazione di interventi di efficientamento, nel paragrafo successivo vengono dettagliati diversi scenari di retrofit e valutato l’impatto complessivo sul parco edilizio nazionale.

## 1.6 Simulazione interventi di retrofit

Al fine di valutare il potenziale miglioramento del punteggio SRI complessivo ottenuto da interventi di riqualificazione energetica del parco edilizio nazionale, sono stati valutati gli impatti di diversi interventi di retrofit applicati agli edifici caso di studio. In particolare, gli interventi di retrofit sono stati individuati tenendo presente i domini impattanti e i servizi più diffusi nel settore residenziale (i.e., riscaldamento, illuminazione, produzione di ACS, involucro dinamico e installazione di sistemi di produzione da FER).

Per la definizione degli scenari di efficientamento, è stata effettuata un’analisi statistica propedeutica degli interventi di riqualificazione effettuati nel periodo 2014-2019 in base alla tipologia di intervento e alla potenziale “smartness”. Sono stati allo scopo definiti due scenari di efficientamento [36] (“energy” e “smart-energy”) ai quali sono state associate ipotesi di riqualificazione a livello crescente di smartness.

### 1.6.1 Analisi statistica degli interventi di riqualificazione energetica in ottica smart

Da una recente analisi pubblicata da ENEA [37] emerge che, nel periodo 2014-2019, sono stati eseguiti 2,169,543 interventi di riqualificazione energetica. Nel 2019, gli investimenti per tali interventi, rispettivamente, hanno riguardato edifici delle seguenti epoche costruttive:

- tra il 1946 e il 1960 (17.6%);
- tra il 1961 e il 1970 (22.9%);
- tra il 1971 e il 1980 (18.1%);
- tra il 1981 e il 1990 (10.2%).

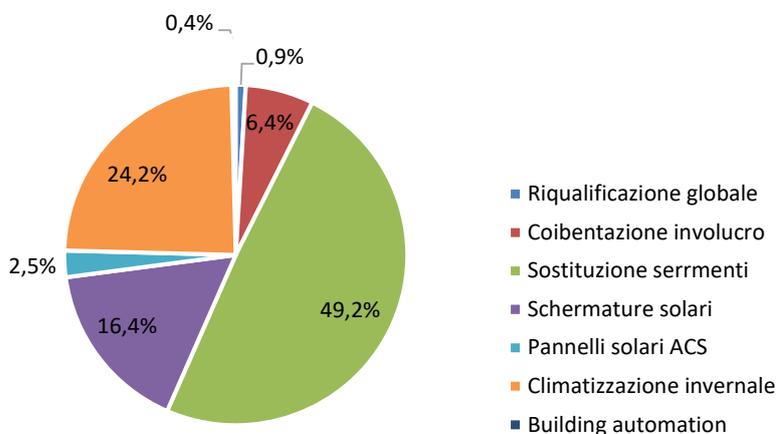
Come mostrato in Tabella 10 e Figura 9, di questi, la maggior quota parte ha riguardato la sostituzione dei serramenti (49.2%), mentre rispettivamente il 24.2% e il 16.4% degli interventi hanno riguardato i sistemi di climatizzazione invernale e le schermature solari. Lo studio ENEA ha evidenziato un trend

decescente molto pronunciato per il numero di richieste relative all’installazione di collettori solari termici con circa la metà degli investimenti riguardanti interventi su costruzioni isolate. Oltre i due terzi degli investimenti attivati sugli impianti di climatizzazione ha riguardato l’installazione di una caldaia a condensazione. In particolare, oltre un terzo delle risorse attivate complessivamente è stato destinato ad interventi per questa tecnologia in edifici costruiti nel periodo 1946-1980.

Si evidenzia, invece, come solo lo 0.4% degli interventi complessivi abbia riguardato l’installazione di sistemi di building automation, di particolare rilevanza per la valutazione dell’impatto statistico delle riqualificazioni energetiche in ottica smart<sup>1</sup> [38]. Tale osservazione evidenzia come, a fronte di un rapporto spesa/efficientamento energetico particolarmente favorevole per il consumatore, le potenzialità dei sistemi automatizzati per la gestione integrata degli impianti nel settore residenziale risulti ancora di fatto ancora inesplorata.

**Tabella 10 - Numero e tipologia di intervento di riqualificazione nel periodo 2014-2019**

Descrizione	2014-2018	2019	Intero periodo	Share [%]
Riqualificazione globale	17856	2436	20292	0.9%
Coibentazione involucro	122058	17237	139295	6.4%
Sostituzione serramenti	921759	145585	1067344	49.2%
Schermature solari	278527	76229	354756	16.4%
Pannelli solari ACS	49602	4982	54584	2.5%
Climatizzazione invernale	378714	145715	524429	24.2%
Building automation	6610	2233	8843	0.4%



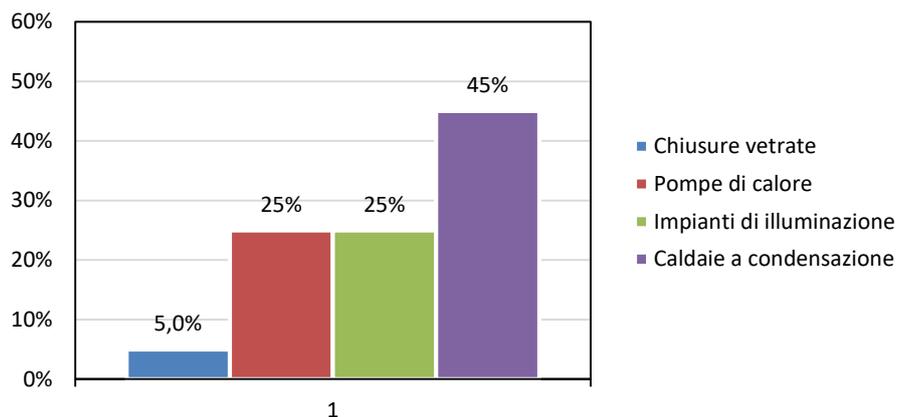
**Figura 9 - Ripartizione % degli interventi di riqualificazione nel periodo 2014-2019**

D’altro canto, lo Smart Building report 2021 [36] evidenzia come con il termine Smart Building si intenda un edificio in cui gli impianti e i sistemi siano gestiti “in maniera intelligente ed automatizzata, attraverso l’adozione di una infrastruttura di supervisione e controllo degli impianti stessi, al fine di minimizzare il consumo energetico e garantire il comfort, la sicurezza e la salute degli occupanti, assicurandone, inoltre, l’integrazione con il sistema elettrico di cui il building fa parte”. In tale contesto, perché un edificio sia classificabile come “intelligente”, esso deve essere dotato di [36]:

<sup>1</sup> I sistemi di building automation sono definiti dal comma 88, articolo 1, Legge 208/2015 come sistemi “che consentano la gestione automatica personalizzata degli impianti di riscaldamento o produzione di acqua calda sanitaria o di climatizzazione estiva, compreso il loro controllo da remoto attraverso canali multimediali”.

- diversi sistemi (i.e., tecnologie di generazione di energia, di efficienza energetica) ed impianti che garantiscano il comfort, la sicurezza e la salute degli occupanti;
- sensoristica connessa agli impianti e finalizzata alla raccolta dati in tempo reale, ed attuatori che eseguano i comandi elaborati dai sistemi di gestione e controllo;
- sistemi di gestione e controllo (e.g., software di raccolta, elaborazione e analisi dei dati acquisiti dalla sensoristica installata sugli impianti);
- connettività, comprendendo tutti i mezzi di comunicazione, wireless o cablati, che permettono la comunicazione tra sensori, attuatori e i sistemi di controllo e gestione.

È quindi chiaro che la semplice riqualificazione energetica di un edificio non sia sufficiente per ottenere un miglioramento del livello di smartness di un edificio. In questo senso, nello stesso documento è stata condotta un'analisi del volume di affari di operatori ed esperti attivi a vario titolo nel settore dello Smart Building, allo scopo di scorporare dalla quota totale di investimenti effettuati nel settore energetico quella relativa agli investimenti realizzati in ottica smart (ossia laddove le tecnologie installate siano state dotate della sensoristica e delle piattaforme di controllo e gestione necessarie ad operare in maniera automatica ed indipendente). Dall'analisi è emerso che la quota parte degli investimenti effettuati in ottica smart riferita ad impianti installati che risultano effettivamente integrati e interconnessi con altri sistemi in modo da poter essere gestiti in ottica intelligente è pari a: 5% per le chiusure vetrate, 25 % per pompe di calore e impianti di illuminazione e 45% per le caldaie a condensazione (Figura 10) [36].



**Figura 10 - Quota parte di installazioni effettivamente smart per tipologia di sistema [36]**

È stato evidenziato inoltre come, nel 2019, circa l'80% degli investimenti nel comparto delle tecnologie di generazione dell'energia derivi da investimenti in impianti fotovoltaici (somma degli impianti fotovoltaici installati in modalità stand-alone e di quelli accoppiati a sistemi di accumulo) [36]. Gli investimenti in impianti fotovoltaici dotati di sistemi di accumulo risultano ancora limitati. In Figura 11 sono riportate le quote di investimento di installazioni di sistemi di generazione di energia per tipo di intervento nell'anno 2019 con una stima del relativo livello di smartness effettivo raggiunto (la stima riferita ad impianti installati che risultano effettivamente integrati e interconnessi con altri sistemi in modo da poter essere gestiti in ottica intelligente) [36].

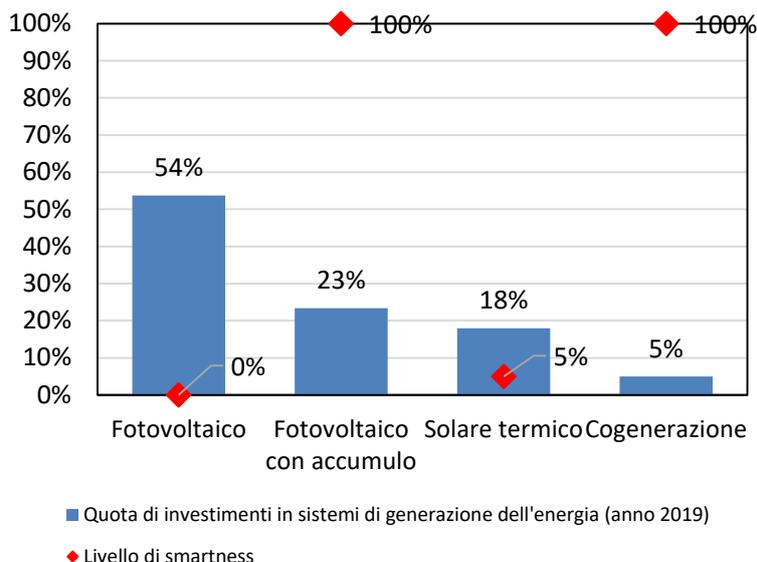


Figura 11 - Quota parte di installazioni effettivamente smart per tipologia di sistema [36]

È possibile evidenziare come allo stato attuale gli impianti fotovoltaici privi di accumulo possano essere considerati smartless, poichè non necessitano di una piattaforma per la gestione dell’energia prodotta [36]. Tuttavia, le linee guida della Direttiva Europea RED II [39] di prossimo recepimento (entro il 30 Giugno 2021) sanciscono l’obbligo di associare piattaforme di monitoraggio e gestione ottimizzate agli impianti fotovoltaici privi di accumulo, determinando di fatto una gestione integrata del sistema fotovoltaico con gli altri impianti dell’edificio ed un incremento del livello di smartness anche di tali sistemi [36].

### 1.6.2 Scenari di intervento di riqualificazione

Sulla base dell’analisi statistica effettuata sugli interventi di riqualificazione energetica sono stati individuati i seguenti scenari:

- scenario “energy”;
- scenario “smart energy”;

Lo scenario “energy” si basa sull’ipotesi di riqualificazione del parco edilizio basato sui trend delle riqualificazioni 2014-2019 le cui principali risultanze sono state descritte nel paragrafo precedente. Le funzionalità smart minime dei sistemi di nuova installazione/sostituzione per lo scenario “energy” sono riportate in Tabella 11. Ove il sistema pre-esistente ipotizzato già soddisfa i requisiti minimi stabiliti, non è stata considerata nessuna sostituzione/riqualificazione.

**Tabella 11 - Funzionalità smart minime dei sistemi per lo scenario “energy”**

<i>Dominio</i>	<i>Sistema</i>	<i>Funzionalità minime del nuovo sistema installato</i>	<i>Esempio</i>
<i>Riscaldamento</i>	Generazione	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rilevazione e controllo dei parametri ambientali (temperatura) e di sistema (temperatura di mandata, carico termico richiesto)</li> <li>Controllo basato sulla domanda (temperatura di mandata del fluido termovettore)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sostituzione della caldaia monostadio senza regolazioni con caldaia a condensazione</li> </ul>
	Distribuzione	<ul style="list-style-type: none"> <li>Controllo automatico basato sulla temperatura esterna della temperatura di distribuzione del fluido termovettore</li> </ul>	
	Emissione e regolazione	<ul style="list-style-type: none"> <li>Installazione sistemi di regolazione per singolo ambiente</li> </ul>	
<i>Raffrescamento</i>	Generazione	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rilevazione e controllo dei parametri ambientali (temperatura) e di sistema (temperatura di mandata, carico termico richiesto)</li> <li>Controllo basato sulla domanda (temperatura di mandata del fluido termovettore)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Installazione di un sistema di raffrescamento a pompa di calore (sistema ad espansione diretta mono-split o multi-split)</li> </ul>
	Distribuzione	<ul style="list-style-type: none"> <li>Controllo automatico basato sulla temperatura esterna della temperatura di distribuzione del fluido di raffrescamento</li> </ul>	
	Emissione e regolazione	<ul style="list-style-type: none"> <li>Regolazione temperatura per singolo ambiente</li> </ul>	
<i>Acqua calda sanitaria</i>	Generazione	<ul style="list-style-type: none"> <li>Produzione da FER</li> </ul>	Installazione di collettori solari termici e sistema di accumulo ACS
	Accumulo	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nessun controllo del livello termico</li> </ul>	
<i>Illuminazione</i>	Controllo	<ul style="list-style-type: none"> <li>Controllo della potenza assorbita (dimming manuale per stanza/ambiente)</li> </ul>	Installazione di un sistema di dimming manuale dell’impianto di illuminazione
<i>Involucro dinamico</i>	Controllo delle schermature	<ul style="list-style-type: none"> <li>Controllo motorizzato delle schermature</li> </ul>	Installazione di schermature mobili motorizzate a controllo manuale
<i>Produzione di energia elettrica da FER</i>	Generazione	<ul style="list-style-type: none"> <li>Produzione da FER</li> </ul>	Installazione di un sistema di produzione di energia elettrica da FER (pannelli fotovoltaici)
	Accumulo	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nessun accumulo</li> </ul>	

Per lo scenario “smart energy” sono stati ipotizzati una serie di interventi di efficientamento energetico in ottica smart degli edifici caso di studio agendo su singoli servizi e domini mediante installazioni che non comportino sostanziali modifiche del sistema impiantistico. Pertanto, gli interventi già ipotizzati per lo scenario “energy” sono stati rivisti in ottica “smart”, ipotizzando quindi per i sistemi di nuova installazione/sostituzione delle funzionalità minime aggiuntive comprendenti: connettività WLAN/Wireless, sistemi di gestione e controllo remoto, sensoristica connessa per la gestione, il controllo ed il monitoraggio. Le funzionalità smart minime dei sistemi di nuova installazione/sostituzione per lo scenario “smart energy” sono riportate in Tabella 12.

**Tabella 12 - Funzionalità smart minime dei sistemi per lo scenario “smart energy”**

<i>Dominio</i>	<i>Sistema</i>	<i>Funzionalità minime del nuovo sistema installato</i>	<i>Esempio</i>
<i>Riscaldamento</i>	Generazione	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Connettività WLAN/WiFi/etc.</li> <li>• Gestione e controllo remoto (accensione/spengimento/allarmi)</li> <li>• Rilevazione e controllo dei parametri ambientali (temperatura) e di sistema (temperatura di mandata, carico termico richiesto)</li> <li>• Smart metering (telelettura e telegestione del consumo di energia termica/gas/elettricità assorbita dal generatore)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sostituzione della caldaia monostadio senza regolazioni con caldaia a condensazione smart dotata di interfaccia WLAN e applicazione per gestione remota integrata di sistema di monitoraggio in tempo reale dello stato del sistema, dei consumi e dell'efficienza di impianto; impostazione temperature desiderate; impostazione tempi di commutazione per il riscaldamento e l'acqua calda.</li> <li>• Installazione di valvole termostatiche intelligenti con connettività wireless con controllo remoto tramite applicazione web</li> <li>• Installazione termostati intelligente con funzionalità di auto-apprendimento in base alle abitudini e alle preferenze dell'utente</li> </ul>
	Distribuzione	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Controllo automatico basato sulla temperatura esterna della temperatura di distribuzione del fluido termovettore</li> </ul>	
	Emissione e regolazione	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Connettività WLAN/WiFi/etc.</li> <li>• Gestione e controllo remoto (accensione/spengimento/allarmi)</li> <li>• Regolazione per singolo ambiente</li> <li>• Auto-apprendimento</li> </ul>	
	Informazione	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Report dei valori attuali e storici di temperatura/consumo</li> </ul>	
<i>Raffrescamento</i>	Generazione	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Connettività WLAN/WiFi/etc.</li> <li>• Gestione e controllo remoto (accensione/spengimento/allarmi)</li> <li>• Rilevazione e controllo dei parametri ambientali (temperatura) e di sistema (temperatura di mandata, carico termico richiesto)</li> <li>• Smart metering (telelettura e telegestione del consumo di energia termica/gas/elettricità assorbita dal generatore)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Installazione di un sistema di raffrescamento a pompa di calore (sistema ad espansione diretta multi-split) integrato di sistema di monitoraggio e controllo dei parametri ambientali, di sistema e sistema di monitoraggio energetico</li> </ul>
	Distribuzione	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Controllo automatico basato sulla temperatura esterna della temperatura di distribuzione del fluido di raffrescamento</li> </ul>	
	Emissione e regolazione	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Connettività WLAN/WiFi/etc.</li> <li>• Gestione e controllo remoto (accensione/spengimento/allarmi)</li> <li>• Interblocco per evitare il simultaneo riscaldamento e raffrescamento</li> <li>• Regolazione temperatura per singolo ambiente</li> </ul>	
	Informazione	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Report dei valori attuali e storici di temperatura/consumo</li> </ul>	
<i>Acqua calda sanitaria</i>	Generazione	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Connettività WLAN/WiFi/etc.</li> <li>• Gestione e controllo remoto (accensione/spengimento/allarmi)</li> <li>• Produzione da FER</li> </ul>	Installazione di collettori solari termici e accumulo con gestione del carico termico
	Accumulo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nessun controllo del carico termico</li> </ul>	
	Informazione	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Report dei valori attuali di temperatura/consumo</li> </ul>	
<i>Illuminazione</i>	Controllo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Controllo dell'occupazione (manuale con</li> </ul>	Installazione di un sistema di

<i>Dominio</i>	<i>Sistema</i>	<i>Funzionalità minime del nuovo sistema installato</i>	<i>Esempio</i>
		spegnimento automatico in caso di assenza) <ul style="list-style-type: none"> <li>Controllo della potenza assorbita (dimming manuale per stanza/ambiente)</li> </ul>	illuminazione efficiente con sensore di presenza e dimmer
<i>Involucro dinamico</i>	Controllo delle schermature	<ul style="list-style-type: none"> <li>Controllo motorizzato delle schermature</li> </ul>	Installazione di schermature mobili motorizzate a controllo manuale integrato di sistema informativo sullo stato delle chiusure e controllo remoto
	Informazione	<ul style="list-style-type: none"> <li>Monitoraggio stato delle chiusure e controllo remoto</li> </ul>	
<i>Produzione di energia elettrica da FER</i>	Generazione	<ul style="list-style-type: none"> <li>Connettività WLAN/WiFi/etc.</li> <li>Gestione e controllo remoto (accensione/spegnimento/allarmi)</li> <li>Produzione da FER</li> </ul>	Installazione di un sistema di produzione di energia elettrica da FER (pannelli fotovoltaici) con accumulo (batterie di piccola taglia) integrato di sistema di monitoraggio dello stato di carica
	Accumulo	<ul style="list-style-type: none"> <li>Controllo dello stato di carica</li> </ul>	
	Informazione	<ul style="list-style-type: none"> <li>Report dei valori attuali di consumo e SOC accumulo</li> </ul>	

In Tabella 13 vengono riportati i risultati dell'analisi condotta nei vari scenari sopra descritti e messi a confronto con lo scenario di base (parco edilizio non riqualificato) mentre nelle figure da 12 a 15 vengono riportati i punteggi di dominio e di impatto per ciascuno dei casi considerati nei tre diversi scenari. Si osservi che gli impatti riportati in Tabella 13 si fondano sull'ipotesi che gli interventi di riqualificazione "energy" e "smart energy" siano applicati in tutti gli edifici caso di studio (i.e., parco edilizio completamente retrofittato); pertanto, tali valori rappresentano un massimo SRI ottenibile per ciascuno scenario di riqualificazione.

**Tabella 13 – Impatto degli interventi di retrofit sull'SRI complessivo**

<i>Caso di studio</i>	<i>Scenario base</i>	<i>Scenario energy</i>	<i>Scenario smart energy</i>
<i>A</i>	0%	15%	27%
<i>C</i>	9%	15%	27%
<i>E</i>	12%	15%	27%
<i>G</i>	23%	23%	28%
<i>B</i>	17%	19%	31%
<i>D</i>	17%	19%	31%
<i>F</i>	20%	19%	30%
<i>H</i>	23%	23%	31%
<i>Impatto</i>	5.2%	15.8%	27.6%

### Punteggi di impatto

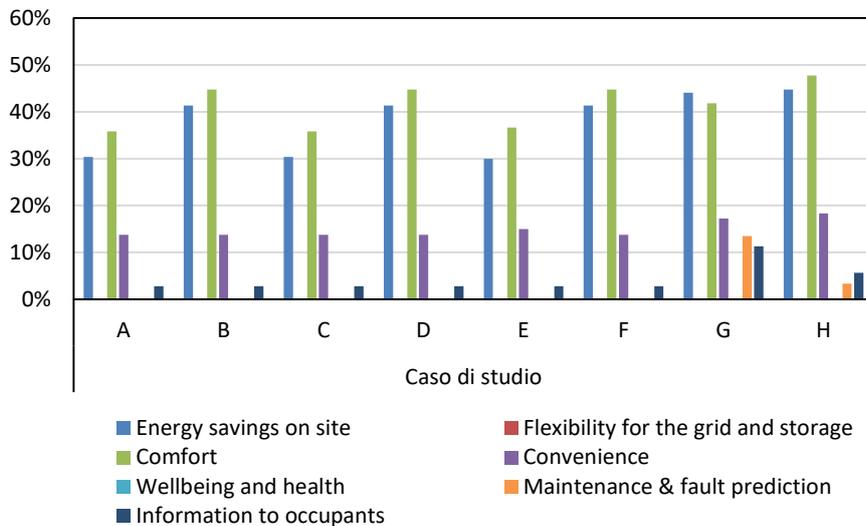


Figura 12 – Punteggi di impatto scenario "energy"

### Punteggi di dominio

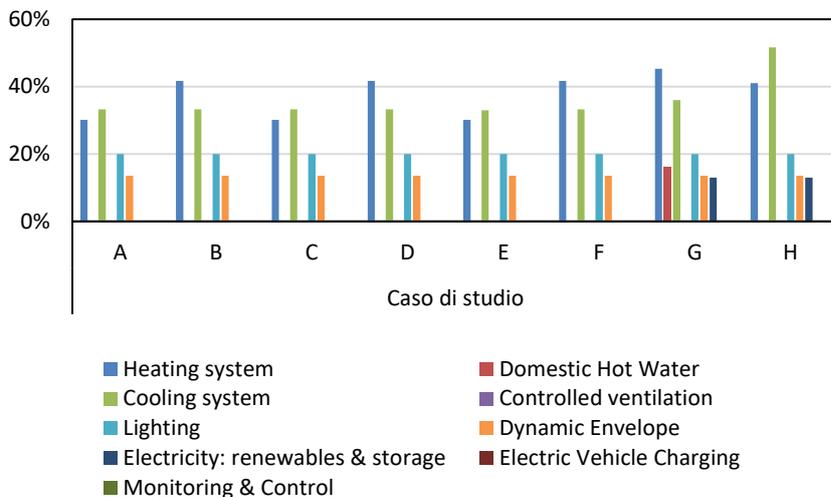


Figura 13 – Punteggi di dominio scenario "energy"

### Punteggi di impatto

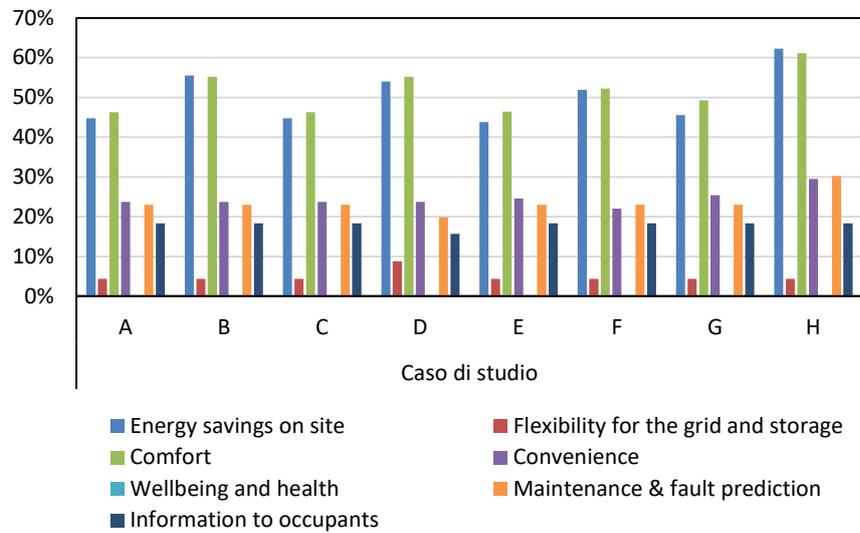


Figura 14 – Punteggi di impatto scenario "smart energy"

### Punteggi di dominio

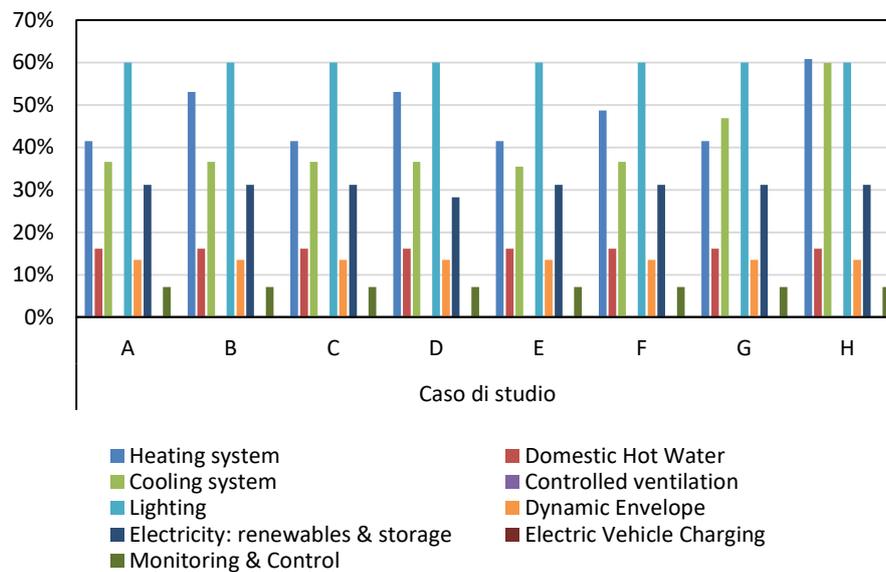


Figura 15 – Punteggi di dominio scenario "smart energy"

Come è possibile osservare in Tabella 13, il massimo valore raggiungibile dallo SRI del parco edilizio italiano è pari rispettivamente al 15.8% e 27.6% negli scenari "energy" e "smart energy".

L'incremento ottenuto nello scenario "energy" è prevalentemente imputabile al rollout dei sistemi di generazione dell'energia termica per il servizio di riscaldamento e all'attivazione del dominio di raffrescamento (avente gli stessi requisiti minimi prestazionali richiesti ai sistemi di generazione di energia per riscaldamento). Notevole anche l'impatto della semplice installazione di un sistema di controllo della potenza assorbita sul dominio dell'illuminazione (punteggio di dominio pari a circa il 20%). Come è possibile

osservare in Figura 12, gli impatti più rilevanti per lo scenario “energy” sono rappresentati da quelli dati rispettivamente dal risparmio energetico (30-45%), dal comfort (36-45%) e dalla convenienza (14-18%).

Nello scenario “smart energy”, oltre all’incremento dei punteggi di impatto del risparmio energetico (45-62%), del comfort (46-61%) e della convenienza (24-30%), assume una maggiore rilevanza l’impatto dell’informazione agli occupanti (16-18%) (ottenuta grazie all’installazione di sistemi di smart metering e alla reportistica semplice riguardante l’energia consumata dai singoli servizi) nonché quella dei punteggi di impatto relativi alla manutenzione predittiva (20-30%) e della flessibilità per la rete e per lo storage (4%). Tali incrementi sono principalmente imputabili a: i) l’installazione di un sistema di reportistica utente per la visualizzazione dei dati di consumo energetico e i dati storici per ciascun dominio presente; ii) l’installazione di termostati intelligenti con funzioni di auto-apprendimento; iii) l’installazione di un sistema di accumulo dell’energia elettrica prodotta on-site; iv) l’installazione di un sistema di monitoraggio dell’occupazione per la gestione del dominio illuminazione.

Come già menzionato, le stime riportate nel presente paragrafo si riferiscono ad uno scenario in cui la riqualificazione secondo gli interventi “energy” e “smart energy” sono applicati a tutti gli edifici del parco edilizio italiano. Tuttavia, è sicuramente plausibile ipotizzare che, in entrambi gli scenari ipotizzati, una quota parte di edifici sia impossibilitata, per cause di natura tecnico-economica, ad attuare tutti gli interventi necessari per l’ottenimento delle funzionalità minime previste dai diversi scenari.

Alcune cause di infattibilità tecnica potrebbero infatti essere rappresentate da: i) assenza di superfici utili per l’installazione della potenza necessaria per la produzione di energia elettrica rinnovabile e ACS (impianti fotovoltaici e collettori solari termici contemporaneamente); ii) impossibilità di intercettare le tubazioni di distribuzione dell’impianto di distribuzione senza interventi fortemente invasivi etc.

### 1.6.3 Criticità nell’applicazione della metodologia SRI

Dall’analisi effettuata sono emerse alcune criticità nell’applicazione dello SRI:

- *Metodologia di calcolo dello SRI:* i) la metodologia di analisi risulta legata alla soggettività del valutatore e all’assenza di una normativa di riferimento per alcuni servizi; ii) i livelli di funzionalità previsti non sempre corrispondono alle funzionalità dei dispositivi disponibili sul mercato; iii) il meccanismo di ponderazione dei livelli di funzionalità non è sempre facilmente interpretabile; iv) non è chiaro perché alcuni domini presentano un peso nullo (come quello dell’ACS sull’impatto sulla salute e sul benessere); v) nel processo di triage dovrebbe essere considerata anche l’attivazione del dominio “monitoraggio e controllo”;
- *Assegnazione dei punteggi:* i) la definizione dei sistemi/impianti connessi ai singoli domini non sempre è adeguata alla caratterizzazione degli stessi (e.g. per i sistemi di produzione di ACS la semplice distinzione in “elettrico” e “non elettrico” non rappresenta adeguatamente i molteplici dispositivi disponibili e, conseguentemente, gli impatti che gli stessi presentano sui consumi di energia, sui risparmi economici, sulla salute e sul benessere, sul comfort etc.); ii) nella valutazione dello SRI incide marginalmente l’installazione di eventuali sistemi di produzione da FER, ma esclusivamente il suo livello di automazione e controllo (i.e., smartness);
- *Definizione dei domini:* i) alcuni domini (e.g. “monitoraggio e controllo”) risultano essere trasversali, con la conseguente difficile valutazione delle diverse integrazioni tra sistemi di monitoraggio; ii) alcuni domini dovrebbero essere più generali e meno specifici (e.g. il dominio connesso alla mobilità dovrebbe includere non solo la ricarica dei veicoli elettrici ma anche gli aspetti legati alla mobilità e trasporto delle persone).

## 2 Studio ed ottimizzazione delle strategie di comunicazione e scelta degli indicatori di monitoraggio dei consumi energetici

### 2.1 *Analisi della letteratura scientifica delle strategie di feedback*

È ormai ben noto dalla letteratura scientifica che tutti gli interventi rivolti al miglioramento dell'efficienza energetica degli edifici dovrebbero essere combinati con azioni volte ad aumentare la consapevolezza e la partecipazione degli utenti finali, anche attraverso informazioni più frequenti e dettagliate sui consumi energetici [40]. Infatti, in assenza di informazioni frequenti, edifici con caratteristiche termo-fisiche e prestazioni energetiche simili, anche progettati secondo criteri N-ZEB (Net-Zero Energy Buildings), possono consumare il doppio dell'altro a seconda del comportamento degli occupanti [41]. Negli ultimi anni i dispositivi intelligenti e le tecnologie dell'informazione e della comunicazione (ICT) hanno permesso di realizzare sistemi integrati per la gestione intelligente sia a livello di singolo edificio, che di quartiere e città. Tali sistemi non sono però particolarmente diffusi a causa della loro complessità, della ridotta interoperabilità tra i diversi sistemi e dei costi elevati [42]. Inoltre, l'efficacia delle azioni di feedback degli utenti rivolte al risparmio energetico è un argomento ancora dibattuto nella letteratura scientifica.

In letteratura, sono state individuate due macro-categorie di feedback, a seconda del tipo di informazioni fornite alle famiglie [43]: (i) strategie “a priori”, che includono campagne informative, workshop, conferenze educative e audit energetici per informazioni mirate e personalizzate [44,45]; (ii) strategie “a posteriori”, che includono invece qualsiasi tipo di feedback, ad esempio feedback in tempo reale, informazioni presentate tramite display interni, app mobili o servizi online [46–48]. Le strategie “a posteriori” possono poi essere classificate in “dirette”, se le informazioni sui consumi sono apprese direttamente dal display dello strumento (contatore, contatore secondario e così via) o “indirette”, quando le informazioni sul consumo di dati vengono elaborate preliminarmente, prima di raggiungere l'utente.

Le incongruenze nei comportamenti legati all'uso di energia nelle famiglie sono il risultato dei seguenti motivi [49]: (i) coerenza temporale delle decisioni, (ii) difficoltà nell'elaborazione dei dati di consumo e nell'assunzione di decisioni semplici, e (iii) effetti di presentazione. Inoltre, la letteratura disponibile identifica tre problemi chiave relativi al feedback: (i) la scarsa evidenza di efficacia, (ii) la necessità di coinvolgere gli utenti e (iii) il potenziale verificarsi di conseguenze indesiderate. In una recente campagna sperimentale [50], molti utenti intervistati hanno segnalato difficoltà nell'interpretazione delle unità (kW, kWh) e scarsa capacità di confronto (e.g., mancanza del corrispondente valore economico). La stessa ricerca ha anche evidenziato l'utilità di presentare dati disaggregati per ogni dispositivo (sub-metering), almeno per i dispositivi a maggior consumo energetico (piano cottura, forno, lavastoviglie, lavatrice, asciugatrice, ecc.) e di benchmark con consumi storici.

Sebbene numerosi fattori possano essere attribuiti alla variabilità dei risparmi associati agli studi di feedback, il design dell'interfaccia utente è un fattore chiave per ottenere un impatto duraturo sul comportamento energetico [51]. Pertanto, una comprensione più approfondita dei componenti di progettazione delle possibili configurazioni di eco-feedback è fondamentale per sviluppare interfacce che ottengano riduzioni sostanziali e sostenibili dell'uso di energia.

Le prime ricerche sull'feedback si basavano su interfacce fisiche statiche [52,53], per passare poi all'utilizzo di display elettronici [54] quando i personal computer entrarono in uso anche nel settore residenziale. Studi più recenti [55–60] si sono basati sulla connettività Internet per fornire informazioni sui consumi tramite specifiche interfacce web. Un esame degli studi precedenti di feedback [55–67] ha rivelato una mancanza di coerenza tra i componenti delle interfacce di feedback e i risparmi osservati. I

risparmi osservati infatti variano dal 5% al 55% con caratteristiche del sistema che vanno dal semplice feedback con visualizzazioni grafiche [56,59,63] a strumenti molto più complessi [51,55,62] che consentono agli utenti di apprendere maggiori informazioni sui consumi e sulle possibilità di risparmio. Uno studio nel settore residenziale [65] ha dimostrato che è possibile ridurre il consumo di energia del 10% fornendo agli utenti informazioni storiche sui consumi, mentre un altro studio [57] ha osservato risparmi fino al 26% fornendo agli utenti informazioni sia storiche che confronti comparativi (i.e., benchmark) sui consumi. In [55] gli autori hanno fornito agli utenti informazioni storiche e dettagliate sui consumi specifici degli elettrodomestici installati e inducendo un risparmio del 5.8%. Questi tre studi illustrano la variabilità dei risparmi osservati e che costituiscono i componenti dell'interfaccia negli studi di eco-feedback. Una parte di questa variabilità è probabilmente dovuta a differenze idiosincratice nelle interfacce studiate. Tuttavia, data la gamma di componenti impiegati e le riduzioni del consumo energetico osservate ampiamente variabili tra gli studi, merita attenzione la questione di sé e come i componenti di un sistema di eco-feedback determinino il risparmio energetico degli utenti.

Diversi studi recenti hanno iniziato ad affrontare l'impatto della progettazione di sistemi di feedback. Wood e Newborough [68] hanno concluso che la progettazione ottimale di un sistema di feedback è un elemento chiave per la massimizzazione del beneficio energetico. Gli studi empirici di eco-feedback riguardanti la progettazione si sono limitati a indagini qualitative sugli utenti [51,69,70] e focus group [58,59]. Karjalainen [71] ha ampliato questi studi qualitativi esaminando le caratteristiche chiave dei prototipi di interfaccia di feedback nelle interviste con gli utenti. Questo studio ha fornito informazioni sulle preferenze degli utenti del sistema di feedback, ma la relazione tra i componenti del sistema e le prestazioni previste o effettive di un sistema di eco-feedback non è stata stabilita empiricamente. Uno studio sulle interfacce utente [71] ha introdotto i seguenti componenti chiave di progettazione del feedback: i) confronto storico; ii) confronto normalizzato (rispetto a un gruppo omogeneo di utenti); iii) incentivi; iv) disaggregazione. A questi quattro componenti è stato poi ulteriormente aggiunto [51], l'item "ricompense e penalizzazioni".

Come dimostrato da molti studi pilota e sondaggi, un feedback energetico appropriatamente progettato richiede l'utilizzo di approcci "user-centered". In generale, le differenti metodologie di feedback possono indurre cambiamenti nelle abitudini energetiche degli abitanti di casa o anche essere completamente ignorate a seconda di molti fattori, tra cui l'attenzione verso l'impatto ambientale degli utenti, l'aspetto visivo dell'informazione, la comprensibilità dei dati esposti, ecc. Tra i meccanismi e le diverse soluzioni visive, la comunità scientifica ha attualmente raggiunto un consenso parziale su una serie di interazioni di base che generalmente hanno successo nel promuovere la riduzione del consumo di energia. Queste soluzioni includono:

- interfacce "goal-setting", cioè interfacce basate sul desiderio degli utenti di soddisfare un determinato obiettivo (energetico), indotto dall'interfaccia o autoimposto dagli abitanti di casa;
- feedback diretto, ad esempio, display in-house aggiornati tempestivamente (IHD) che mostrano il consumo di energia domestica;
- andamento storico dei consumi, che mostra come il consumo domestico evolve nel tempo ed evidenzia le correlazioni temporali;
- device non invadenti, ovvero display e/o dispositivi di comunicazione progettati per integrarsi nell'ambiente domestico, attirando l'attenzione dell'utente solo quando necessario, ma evitando impostazioni e interazioni intrusive che possono favorire l'abbandono dello strumento.

È quindi chiaro che, per ottenere un risparmio energetico attraverso informazioni più frequenti e dettagliate all'utente tramite dispositivi di misurazione individuali e tecnologie intelligenti, è necessario un design di feedback strategico. In generale, il feedback dei dati monitorati dovrebbe raggiungere gli utenti finali nel tempo e il modo più adeguato a consentire la piena comprensione del fenomeno, prima che sia irreversibile o non più visibile, collegandolo a specifiche azioni di retrofit. Sulla base delle risultanze dell'analisi della letteratura scientifica del precedente paragrafo, gli autori hanno analizzato e riassunto le

caratteristiche più rilevanti della strategia di comunicazione la cui progettazione è oggetto del presente capitolo in Tabella 14.

**Tabella 14 – Caratteristiche generali di uno strumento di feedback utente**

<i>Caratteristica</i>	<i>Descrizione</i>
<i>Contenuto</i>	Consumo, kWh (assoluto), % (relativo) Potenza, W (assoluta) Costo, € (assoluto), % (relativo) Impatto ambientale, CO2 (assoluto), % (relativo) Indicatori
<i>Frequenza</i>	Feedback continuo (quartorario, orario, giornaliero) Feedback differito (settimanale, bimestrale, semestrale, annuale)
<i>Aggregazione dei dati</i>	Per localizzazione (e.g. stanza, zona giorno/notte, appartamento) Per uso (e.g. riscaldamento, raffrescamento, ventilazione, ...) Per impianto o dispositivo (e.g. frigorifero, lavatrice etc.) Per vettore energetico (e.g. elettricità, riscaldamento, gas)
<i>Rappresentazione</i>	Dato analogico (e.g. dashboard) Dato numerico (e.g. display) Semafori, colori, ideogrammi Trend storici (e.g. trend, istogrammi) Diagrammi (e.g. torta, barre, anello etc.)
<i>Benchmark</i>	Consumo storico Consumo di altri utenti (e.g. media dell'edificio) Consumo atteso teorico (modelli bottom-up)
<i>Informazioni aggiuntive</i>	Diagnosi (e.g. guasti e malfunzionamenti) Retrofit possibili Consigli comportamentali (e.g. indicazioni per un uso efficiente e razionale dell'energia)

## 2.2 Elaborazione di indici per il benchmark energetico ed ambientale

### 2.2.1 Indici per il benchmark dei consumi energetici

La valutazione delle prestazioni dei dispositivi energetici e il benchmark dei consumi sono argomenti molto dibattuti, in quanto rappresentano sicuramente strumenti efficaci per aiutare gli utenti nella gestione dei propri comportamenti energetici. In un'interessante guida sui benchmark di consumo energetico sui clienti residenziali dell'Australian Energy Regulator [72], vengono fornite indicazioni sulla visualizzazione dei benchmark di consumo più appropriati di energia elettrica. Nello stesso documento, si suggerisce che, nel benchmark dei consumi di energia elettrica, i parametri di riferimento come: la dimensione della famiglia, la zona climatica, il tipo di sistema di riscaldamento, i fattori stagionali etc. siano più efficaci e spieghino meglio la variabilità del consumo energetico degli utenti.

Le metodologie di benchmark possono essere classificate in quattro diverse categorie:

- (i) basata su modelli di regressione, che richiedono ampi set di dati di edifici con caratteristiche simili;
- (ii) basata su punti, che confronta il consumo energetico misurato con gli standard delle best practice di consumo energetico;

- (iii) basato su modelli di simulazione/previsione dei consumi energetici, in cui il consumo energetico è modellato in un ambiente di simulazione energetica dell'edificio;
- (iv) metriche gerarchiche e di uso finale, in cui viene sviluppato un insieme di metriche delle prestazioni dei vari sottosistemi energetici presenti nell'abitazione.

In letteratura è disponibile un lavoro di review sui metodi di benchmark energetici e sui relativi livelli di prestazione [73]. In questo lavoro dodici metodi per il benchmark del consumo energetico degli edifici (inclusi sei metodi *black box*, due metodi *gray box* e quattro metodi *white box*) vengono analizzati, evidenziando che molti metodi, sebbene semplici, possono comunque ottenere prestazioni soddisfacenti.

Nel presente rapporto di ricerca, è stata applicata la metodologia basata su modelli di simulazione/previsione dei consumi energetici. In tal senso, l'indice di monitoraggio energetico viene ricavato confrontando il consumo reale dell'utente in un dato arco temporale (giorno, settimana, mese, anno) normalizzato rispetto alle condizioni climatiche ( $C_{mis,norm}$ ) con il cosiddetto "consumo atteso" calcolato sulla base della metodologia prescelta (e.g. calcolo del fabbisogno di energia primaria con il metodo quasi stazionario adattato all'utenza, simulazione dinamica etc.) anch'esso normalizzato rispetto alle condizioni climatiche di riferimento ( $C_{atteso,norm}$ ) secondo la relazione (2.1).

$$Indice = \frac{C_{mis,norm} - C_{atteso,norm}}{C_{atteso,norm}} \quad (2.1)$$

Tale metodologia risulta essere congruente con le risultanze delle attività di ricerca sviluppate nell'ambito di Ricerca di Sistema Elettrico da Unicas ed ENEA nel Piano Annuale di Realizzazione 2016, nell'ambito del quale erano stati definiti e valutati gli indici di risparmio globale (i.e. dell'edificio), parziale (i.e. di ogni singolo appartamento) e locale (i.e. di ciascun ambiente riscaldato). In particolare:

- globale, pari alla differenza tra il consumo di energia primaria stimato nel periodo di riferimento adattato alle condizioni di utilizzo dell'utenza e alle condizioni climatiche effettive (*tailored rating*) e il corrispondente consumo di energia dell'intero edificio nelle condizioni di effettivo utilizzo (*operational rating*);
- parziale, pari alla differenza tra il consumo di energia primaria stimato nel periodo di riferimento adattato alle condizioni di utilizzo dell'utenza e alle condizioni climatiche effettive (*tailored rating*) e il corrispondente consumo di energia dei singoli appartamenti nelle condizioni di effettivo utilizzo (*operational rating*);
- locale, pari alla differenza tra il consumo di energia primaria stimato nel periodo di riferimento adattato alle condizioni di utilizzo dell'utenza e alle condizioni climatiche effettive (*tailored rating*) e il corrispondente consumo di energia dei singoli locali riscaldati nelle condizioni di effettivo utilizzo (*operational rating*).

Per il calcolo degli indici di risparmio, i consumi energetici vengono destagionalizzati riferendoli alle condizioni climatiche convenzionali, attraverso la misura dei gradi giorno effettivi. Inoltre, i consumi di energia primaria nelle condizioni di utilizzo adattate all'utenza sono stati invece calcolati adattando i consumi nelle condizioni standard (*asset rating*) in funzione del grado di occupazione e dell'inerzia termica dell'edificio (*tailored rating*).

Tale metodologia, sebbene molto accurata in presenza di dati attendibili riguardanti le caratteristiche termofisiche ed impiantistiche dell'edificio oggetto di valutazione, presenta alcuni svantaggi che possono impattare significativamente sulla fattibilità di applicazione in una più ampia e diffusa implementazione della strategia di feedback sul territorio nazionale. Infatti, per la determinazione dei summenzionati indici, occorre effettuare il calcolo del fabbisogno di energia primaria per riscaldamento per singolo locale dell'abitazione. Tale operazione, effettuata su ampia scala (i.e., su un numero consistenti di edifici), non solo richiede l'impiego di un tecnico specializzato, ma risulta essere anche particolarmente time-

consuming. Pertanto, nella presente attività di ricerca sono stati progettati e sperimentati indici di monitoraggio energetico “semplificato” che si basano su poche semplici informazioni generalmente reperibili in fase di installazione di sistemi di contabilizzazione indiretta dell’energia termica (ripartitori di calore/totalizzatori).

Più nello specifico, la metodologia definita nella presente annualità di ricerca effettua una stima del consumo atteso valutando la potenza termica installata nei singoli locali dell’abitazione acquisita in fase di mappatura dei radiatori ed il numero di ore di accensione dell’impianto termico. L’energia stimata attraverso il prodotto della potenza dei radiatori per il tempo di accensione dell’impianto viene poi opportunamente attenuata di un fattore di riduzione, ricavato sperimentalmente confrontando l’energia misurata in un determinato intervallo di tempo (i.e., una stagione di riscaldamento) con l’energia totale stimata sulla base della potenza effettivamente installata come da equazione (2.2).

$$C_{atteso,norm} = f_a \cdot \dot{Q}_{installata} \cdot h \quad [kWh] \quad (2.2)$$

dove: i)  $\dot{Q}_{installata}$  è la potenza termica installata espressa in kW; ii)  $h_{stagione}$  è il tempo di accensione dell’impianto adattato all’utenza espresso in ore nella stagione di riscaldamento; iii)  $f_a$  è la quota parte di potenza totale installata necessaria per soddisfare il fabbisogno energetico calcolato (adimensionale).

Il fattore  $f_a$  è calcolato come indicato nell’equazione (2.3) come media dei fattori di attenuazione stagionali calcolati per mezzo dell’equazione (2.4).

$$f_a = \frac{1}{n} \sum_{stagione=1}^n f_{a,stagione} \quad (2.3)$$

$$f_{a,stagione} = \frac{\frac{Q_{misurata,stagione}}{GG_{stagione}} \cdot 1911}{h_{stagione} \cdot \dot{Q}_{installata}} \quad (2.4)$$

dove: i)  $Q_{misurata}$  è l’energia termica misurata nel periodo di analisi espressa in kWh; ii)  $GG_{stagione}$  sono i gradi giorno effettivi della stagione di riferimento considerata e 1911 i gradi giorno della stagione di riferimento presso la località considerata (Anagni, zona climatica D); iii)  $n$  è il numero di stagioni di riscaldamento su cui si effettua la stima del fattore  $f_a$ .

Analogamente agli indici precedentemente sviluppati, la presente metodologia consente di determinare: i) indice di risparmio globale, pari alla differenza tra il consumo atteso nel periodo di riferimento calcolato per l’intero edificio e il corrispondente consumo di energia dell’intero edificio nelle condizioni di effettivo utilizzo (*operational rating*); ii) indice di risparmio parziale, pari alla differenza tra il consumo atteso di uno specifico appartamento e il corrispondente consumo di energia dei singoli appartamenti nelle condizioni di effettivo utilizzo (*operational rating*); iii) indice di risparmio locale, pari alla differenza tra il consumo atteso di uno specifico locale e il corrispondente consumo di energia dei singoli locali riscaldati nelle condizioni di effettivo utilizzo (*operational rating*).

Gli indici di consumo così definiti, sono stati simulati ed applicati all’edificio caso di studio ATER 18C di edilizia popolare situato in Anagni (FR) descritto nel presente report al paragrafo 3.2. In particolare, per il calcolo degli indici sono stati analizzati i consumi energetici della stagione di riscaldamento 2020/21 e confrontate le metodologie di calcolo basate sulla stima del fabbisogno di energia primaria per riscaldamento sviluppata nelle precedenti annualità di Ricerca di Sistema (di seguito per brevità “metodo del fabbisogno”) e quella basata sulla potenza termica dei radiatori descritta nel presente paragrafo (di seguito per brevità “metodo delle potenze”). Tali indici sono stati confrontati utilizzando i dati di consumo

reale su diverse scale temporali, ovvero su base giornaliera, settimanale, mensile e stagionale, al fine di verificare l'efficacia degli indici scelti nell'effettuare una diagnosi light da presentare agli utenti.

#### 2.2.1.1 Stima del fattore di attenuazione

In Tabella 15 sono riportati i dati di calcolo del fattore di attenuazione per le stagioni 2018/19 e 2019/20. Si evidenzia che, poiché due degli appartamenti (interno 1 e interno 5) non risultano occupati in maniera continuativa nelle due stagioni, sono stati esclusi dal calcolo del fattore. Sono altresì state escluse dal calcolo le stagioni 2017/18 e 2020/21 perché incomplete.

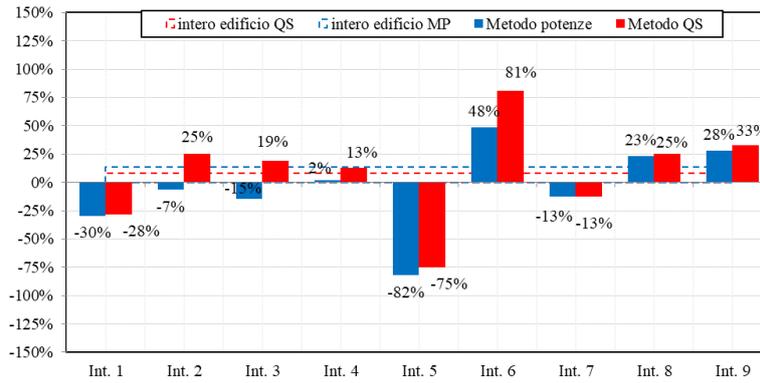
**Tabella 15 – Dati per il calcolo del fattore di attenuazione**

	Stagione 2018/19	Stagione 2019/20	u.m.
Potenza totale installata (a)	76.59	76.56	kW
Numero di ore (b)	1503	1503	h
Consumo stimato (c)= (a) x (b)	115107	115107	KWh
Consumo misurato (d)	71600	65660	kWh
Gradi giorno (e)	1950	1830	°C
$f_{a,stagione} (d)*1911/(e)/(c)$	0.61	0.60	-
$f_a$	0.60		

#### 2.2.1.2 Simulazione e confronto indici

La simulazione ed il confronto degli indici è stata effettuata su scala giornaliera, ma la medesima metodologia di calcolo può essere applicata a più scale temporali (settimanale, mensile, stagionale) avendo cura di stimare accuratamente le ore di accensione dell'impianto nel periodo considerato. A titolo di esempio, si riportano di seguito gli indici giornalieri calcolati in un giorno rappresentativo della stagione 2020/21 per poter apprezzare le differenze tra i due metodi utilizzati. In particolare, in Figura 16 sono riportati, rispettivamente, gli indici di consumo parziale (i.e., di appartamento) e globale (i.e., di edificio) determinati con il "metodo del fabbisogno" (QS) e con il "metodo delle potenze" (MP), mentre in Figura 25 sono riportati i rispettivi indici di consumo locale.

**Edificio ATER 18C - Riepilogo**



**Figura 16 – Indici di consumo globale 1° febbraio 2021, edificio ATER 18C**



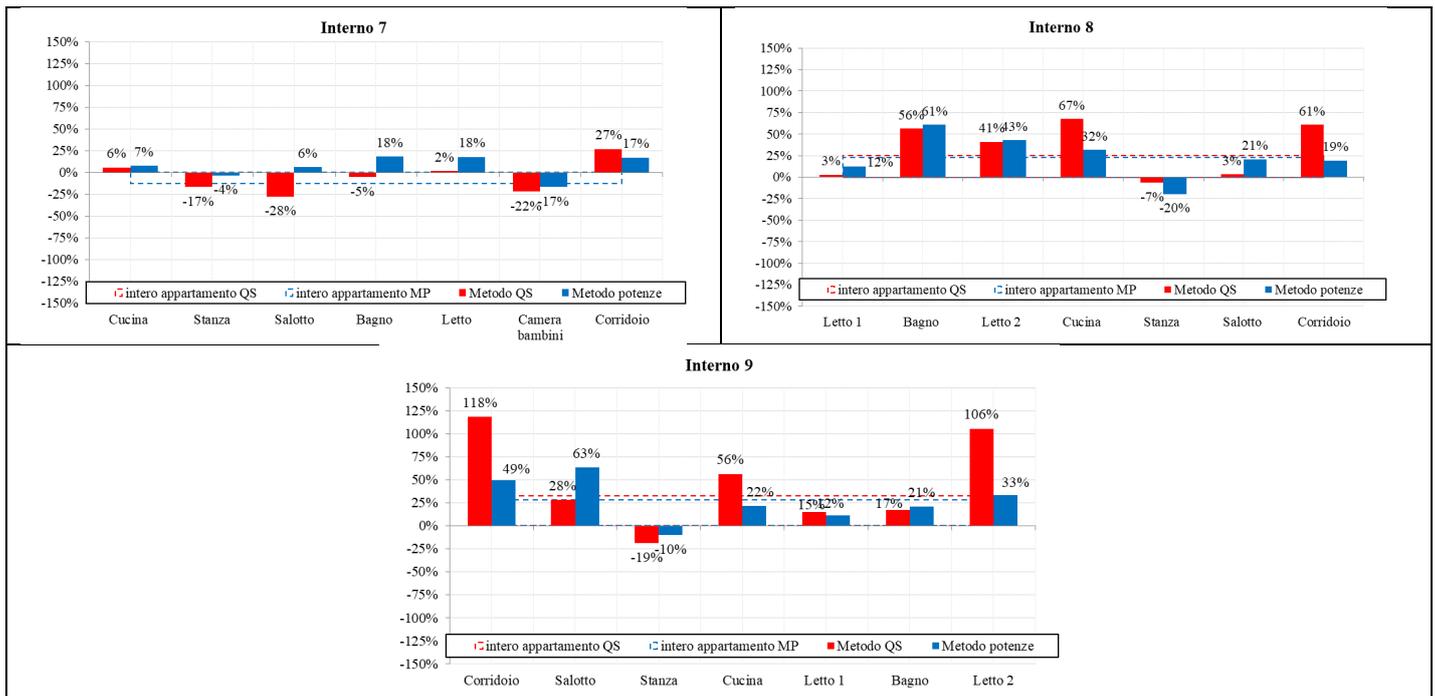


Figura 17 – Indici di consumo locale 1° febbraio 2021

È possibile osservare come a livello parziale e locale (Figura 16) entrambi gli indici restituiscano valori molto simili, tranne in alcuni interni (interni 2, 3 e 6), per i quali le differenze tra le due metodologie di calcolo diventano più significative. In particolare, è rilevante come, negli interni 2 e 3, i due metodi forniscano indici di segno opposto. Tale problematica è attribuibile alle incertezze di calcolo degli indici imputabili alle due metodologie e andrà tenuta in debito conto nella eventuale segnalazione di “fault” all’utente, prevedendo delle soglie di incertezza all’interno delle quali si stima che il consumo sia comunque approssimabile a quello atteso.

Osservando gli indici di consumo locale riportati in Figura 25, è possibile osservare come gli indici assumano valori significativamente differenti in alcune stanze, con specifico riferimento a: corridoio, bagno e una stanza normalmente deputata a funzioni di studio o camera per bambini. Tali locali presentano simili caratteristiche (i.e., poche superfici disperdenti verso l’ambiente esterno, piccole superfici calpestabili utili etc.), pertanto è possibile che valori elevati dell’indice calcolato con il metodo del fabbisogno siano attribuibili ad una probabile sovrastima del consumo energetico della stanza.

Sulla base delle risultanze dell’analisi effettuata, è comunque possibile affermare che l’utilizzo del metodo delle potenze per il calcolo degli indici di monitoraggio energetico è applicabile come alternativa al metodo del fabbisogno. L’applicazione della metodologia proposta, risulta in particolare avere i seguenti vantaggi rispetto a quella precedente sviluppata:

- **maggiore stabilità:** essendo basati sulla reale potenza installata nei locali, gli indici calcolati con il metodo delle potenze non restituiscono in nessun caso valori superiori al +100%, al contrario del metodo del fabbisogno che, in alcuni casi limite, determina importanti sovrastime;
- **immediatezza di applicazione:** il metodo proposto si basa sulla conoscenza di pochi, semplici dati (i.e., potenza installata, ore di accensione dell’impianto) per la determinazione dell’indice; pertanto, risulta particolarmente indicato nel caso di un’applicazione su ampia scala di campagne di monitoraggio in cui tali indici siano implementati.

D’altro canto, tale metodologia risulta avere alcuni svantaggi, principalmente attribuibili alla stima delle potenze termiche installate che, nella maggior parte dei casi, viene effettuata attraverso il metodo dimensionale per la stima della potenza termica dei radiatori. Inoltre, tale metodologia non tiene conto di eventuali errori nel dimensionamento dell’impianto di emissione.

## 2.2.2 Indici di monitoraggio ambientale

Per fornire all'utente delle indicazioni aggiuntive in merito alle possibili strategie non solo di gestione dell'impianto termico (i.e., regolazione valvole termostatiche), ma anche di apertura dei serramenti, è stata valutata la possibilità di progettare specifici indici di monitoraggio ambientale da integrarsi agli indici di monitoraggio energetico in un unico sistema informativo.

È stato infatti dimostrato come dotare gli utenti di strumenti di feedback per il monitoraggio ambientale sia uno strumento molto efficace per la corretta gestione, ad esempio, della ventilazione naturale dell'edificio (che rappresenta uno dei maggiori contributi al consumo di energia termica degli edifici) [74].

Storicamente, l'umidità e la CO<sub>2</sub> sono state utilizzate come indicatori di qualità dell'aria interna (IAQ) [75], non solo perché il loro monitoraggio può essere utile a tenere sotto controllo altri parametri (come le concentrazioni di bioeffluenti [75] e le portate di ventilazione) ma anche perché i sensori di umidità, temperatura e CO<sub>2</sub> sono facilmente disponibili ad un prezzo contenuto. Un esempio di comportamento di riscaldamento efficiente è rappresentato dalla "ventilazione d'urto" (ovvero aprire completamente le finestre per 5 minuti da due a quattro volte al giorno), che consente di risparmiare fino a circa il 25% di energia per il riscaldamento, con una media di circa 8% - rispetto alla ventilazione più comunemente praticata (cioè ventilazione a basso flusso d'aria, ad esempio aprendo solo leggermente le finestre) [74]. Studi precedenti hanno dimostrato che questi risparmi si basano sia sulla velocità di ventilazione più rapida sia sulla prevenzione dei tempi di ventilazione troppo lunghi [76].

I misuratori di CO<sub>2</sub> e di umidità relativa (UR) possono essere pertanto utilizzati come traccianti di qualità dell'aria interna [77], ad esempio, sfruttando rappresentazioni di tipo a semaforo o altre rappresentazioni user-friendly. Questo feedback si è dimostrato efficace nel persuadere i suoi utenti a mettere in pratica il comportamento ventilazione d'urto e a risparmiare energia per il riscaldamento.

Pertanto, si ritiene che la conoscenza delle temperature interne, dei livelli di umidità relativa e delle concentrazioni di CO<sub>2</sub> dell'ambiente indoor, possano contribuire a sensibilizzare l'utente non solo verso il risparmio energetico ma anche verso il mantenimento di una corretta qualità dell'aria nella propria abitazione.

Considerando che il sistema di feedback sviluppato nella presente attività di ricerca ha come obiettivo l'implementazione di sistemi di feedback utente in contesti residenziali, sono stati sviluppati tre indici specifici (in forma semplificata) per il monitoraggio di base dell'IAQ: indice di temperatura, indice di umidità relativa e indice di CO<sub>2</sub>. Tali parametri sono di fatto quelli più semplicemente implementabili in un sistema di monitoraggio a basso impatto economico in contesti residenziali. Di seguito si riportano le specifiche degli indici sviluppati:

- Indice di temperatura (IT): differenza tra il valore di concentrazione di temperatura misurato dallo specifico sensore installato all'interno dell'abitazione e il valore di soglia scelto come riferimento per l'attivazione di segnali d'allarme posta pari a  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ :

$$IT = T_{\text{misurata}} - T_{\text{soglia}} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (2.5)$$

- Indice di umidità (IUR): differenza tra il valore di umidità relativa misurato dallo specifico sensore installato all'interno dell'abitazione e il valore di soglia scelto come riferimento per l'attivazione di segnali d'allarme posto pari a  $50 \pm 20\%$ :

$$IU = UR_{\text{misurata}} - UR_{\text{soglia}} \text{ [%]} \quad (2.6)$$

- Indice CO<sub>2</sub> (ICO<sub>2</sub>): differenza tra il valore di concentrazione di CO<sub>2</sub> misurato dallo specifico sensore installato all'interno dell'abitazione e il valore di soglia scelto come riferimento per l'attivazione di segnali d'allarme (pari a 1200 PPM), normalizzata rispetto allo stesso valore di soglia (ed espresso in percentuale) [77]:

$$ICO_2 = \frac{CO_{2misurata} - CO_{2soglia}}{CO_{2soglia}} [\%] \quad (2.7)$$

Sotto l'ipotesi di un campionamento orario dei parametri di monitoraggio scelti, sono stati poi sviluppati tre indici aggiuntivi per il benchmark storico dei parametri di IAQ basati su un approccio prestazionale per la ventilazione intelligente negli edifici residenziali, rispettivamente [78]:

- $t_{ITfuori\ soglia,max}$ , ovvero la percentuale di tempo in cui il sensore ha registrato valori di temperatura al di sopra del valore di soglia superiore posto pari a 22 °C in un determinato periodo di riferimento:

$$t_{ITfuori\ soglia,max} = \frac{1}{h_{tot}} \sum_{i=1}^n h_i \quad (2.8)$$

dove  $n$  è il numero di occorrenze in cui l'incide IT assume valori al di sopra del valore di soglia superiore,  $h_i$  è l'ora  $i$ -esima in cui si è verificato un valore sopra-soglia e  $h_{tot}$  il numero di ore complessivo di monitoraggio;

- $t_{ITfuori\ soglia,min}$ , ovvero la percentuale di tempo in cui il sensore ha registrato valori di temperatura al di sopra del valore di soglia inferiore posto pari a 18 °C in un determinato periodo di riferimento:

$$t_{ITfuori\ soglia,min} = \frac{1}{h_{tot}} \sum_{i=1}^m h_i \quad (2.8)$$

dove  $m$  è il numero di occorrenze in cui l'incide IT assume valori al di sotto del valore di soglia inferiore,  $h_i$  è l'ora  $i$ -esima in cui si è verificato un valore sopra-soglia e  $h_{tot}$  il numero di ore complessivo di monitoraggio;

- $t_{IURfuori\ soglia,max}$  vero la percentuale di tempo in cui il sensore ha registrato valori di umidità relativa al di sopra del valore di soglia superiore posto pari a 70% in un determinato periodo di riferimento:

$$t_{IURfuori\ soglia,max} = \frac{1}{h_{tot}} \sum_{i=1}^q h_i \quad (2.9)$$

dove  $p$  è il numero di occorrenze in cui l'incide IUR assume valori al di sopra del valore di soglia superiore;

- $t_{IURfuori\ soglia,min}$ , vero la percentuale di tempo in cui il sensore ha registrato valori di umidità relativa al di sopra del valore di soglia inferiore posto pari a 30% in un determinato periodo di riferimento:

$$t_{IURfuori\ soglia,min} = \frac{1}{h_{tot}} \sum_{i=1}^q h_i \quad (2.9)$$

dove  $q$  è il numero di occorrenze in cui l'incide IUR assume valori al di sopra del valore di soglia inferiore;

- $t_{ICO_2 \text{ fuori soglia}}$ , ovvero la percentuale di tempo in cui il sensore ha registrato valori di CO<sub>2</sub> al di sopra del valore di soglia posto pari a 1200 ppm in un determinato periodo di riferimento:

$$t_{ICO_2 \text{ fuori soglia}} = \frac{1}{h_{tot}} \sum_{i=1}^k h_i \quad (2.10)$$

dove  $k$  è il numero di occorrenze in cui l'indice  $ICO_2$  assume valori al di sopra o dei valori di soglia.

Tutti gli indici sviluppati nel presente rapporto di ricerca sono stati implementati nel cruscotto di monitoraggio energetico descritto a seguire.

### 2.3 Elaborazione di un cruscotto per il feedback energetico ed ambientale

Per rispondere sia alle esigenze di semplicità e di immediatezza nella rappresentazione del dato che anche a quelle di consentire un'analisi accurata e approfondita per una migliore comprensione del proprio comportamento energetico, il cruscotto è stato suddiviso in: i) cruscotto principale, contenente poche e semplici informazioni sui consumi energetici e sui parametri di monitoraggio ambientale giornalieri, e ii) cruscotto secondario, all'interno del quale sono inserite informazioni più dettagliate per l'analisi dei consumi e di IAQ (confronti storici, benchmark etc.). Di seguito vengono dettagliate le caratteristiche dei cruscotti principale e secondario.

#### 2.3.1 Cruscotto principale

Il cruscotto principale è preposto alla comunicazione diretta ed immediata del consumo energetico e dei parametri di monitoraggio ambientale all'utente finale. Il contenuto e le caratteristiche del cruscotto principale sono dettagliati in Tabella 16, mentre Figura 18 è riportata una rappresentazione schematica del cruscotto.

**Tabella 16 – Caratteristiche del cruscotto principale**

<i>Caratteristica</i>	<i>Descrizione</i>
<i>Contenuto</i>	Indicatori di monitoraggio energetico (indici di potenza) Parametri di monitoraggio ambientale (temperatura indoor, umidità relativa, concentrazione di CO <sub>2</sub> ) Indici di monitoraggio ambientale (IT, IUR, ICO <sub>2</sub> )
<i>Frequenza</i>	Feedback continuo (orario/giornaliero a seconda della frequenza minima di campionamento dei sensori)
<i>Aggregazione dei dati</i>	Per localizzazione (appartamento)
<i>Rappresentazione</i>	Dato numerico (e.g. display) Semafori, colori, ideogrammi
<i>Benchmark</i>	Consumo atteso teorico (modelli bottom-up)
<i>Informazioni aggiuntive</i>	Consigli comportamentali (e.g. indicazioni per un uso efficiente e razionale dell'energia)

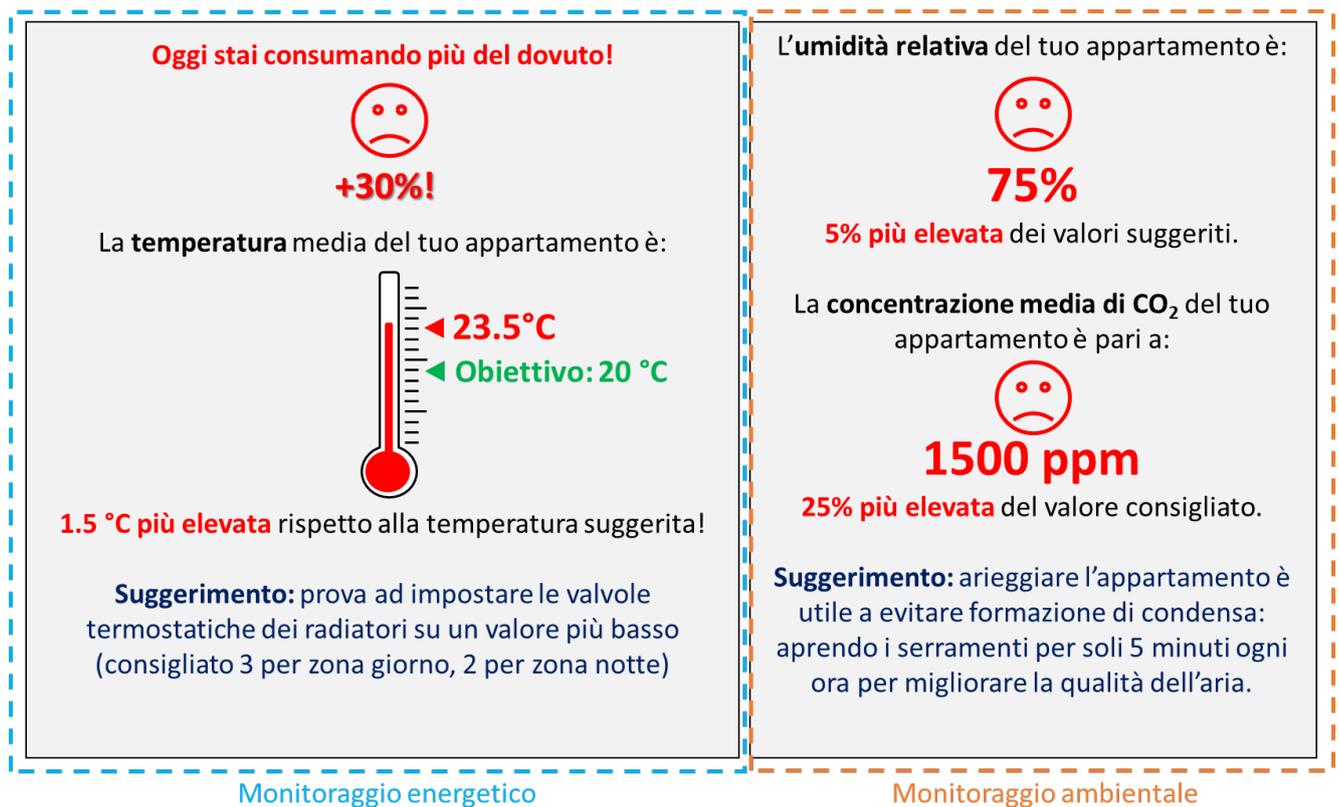


Figura 18 – Rappresentazione schematica del cruscotto principale

Come rappresentato in Figura 18, il cruscotto è suddiviso in due sezioni:

- i. Sezione di **monitoraggio energetico** (a sinistra in Figura 18), in cui sono forniti i seguenti contenuti:
  - a) l'indice di consumo parziale calcolato con il "metodo delle potenze" (in alto);
  - b) la temperatura media dell'appartamento al momento dell'interrogazione (zona centrale);
  - c) l'indice di temperatura IT;
  - d) possibili suggerimenti di risparmio. Le modalità di rappresentazione prescelte da associare al contenuto sopra menzionato sono rappresentate in Tabella 17 e Tabella 18 insieme alle indicazioni sulle modalità di attivazione delle diverse rappresentazioni, mentre in Figura 19 è rappresentato il diagramma di flusso per l'attivazione del campo "Suggerimenti".

Tabella 17 – Modalità di rappresentazione indice di potenza, cruscotto semplificato

Valore indice potenza	Commento	Rappresentazione	Scala cromatica
IP > +20%	«Oggi stai consumando più del dovuto!»		Red
-20% ≤ IP ≤ +20%	«Il tuo consumo è nella norma»		Light Green
IP < -20%	«Oggi stai consumando meno del dovuto»		Green

Tabella 18 – Modalità di rappresentazione temperatura e indice di temperatura, cruscotto semplificato

Valore indice IT	Commento	Rappresentazione	Scala cromatica
------------------	----------	------------------	-----------------

IT > +2 °C	«La temperatura media del tuo appartamento è:» <b>rappresentazione</b> «&valore indice IT& più elevata rispetto alla temperatura suggerita di 20 °C!»	 ◀ Temperatura misurata ◀ Obiettivo: 20 °C	
-2 °C ≤ IT ≤ +2 °C	«La temperatura media del tuo appartamento è:» <b>rappresentazione</b> «nella norma»	 ◀ Obiettivo: 20 °C	
IT < -2 °C	«La temperatura media del tuo appartamento è:» <b>rappresentazione</b> «&valore indice IT& più bassa rispetto alla temperatura suggerita di 20 °C!»	 ◀ Obiettivo: 20 °C ◀ Temperatura misurata	

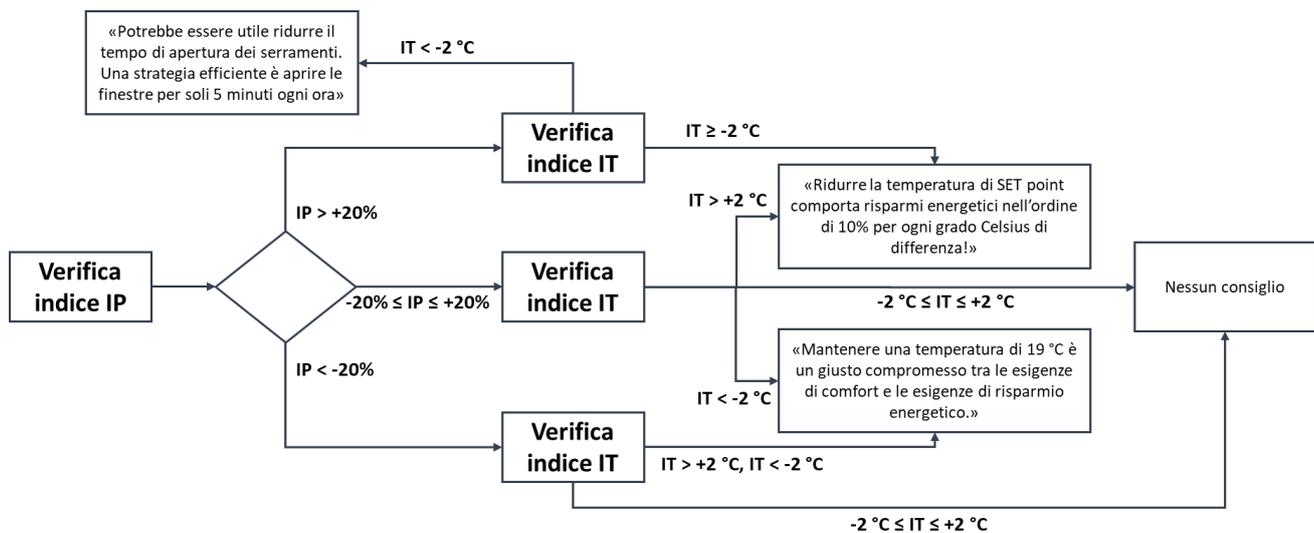


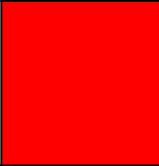
Figura 19 – Flow chart attivazione suggerimenti consumo energetico

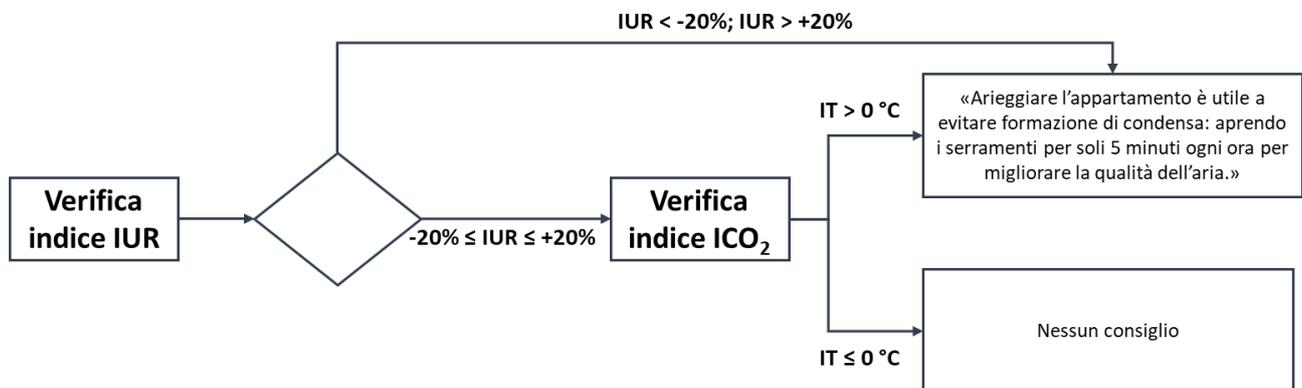
- ii. Sezione di **monitoraggio ambientale** (a destra in Figura 18), in cui sono forniti: a) il valore di umidità relativa (in alto); b) l'indice IUR; c) la concentrazione di CO<sub>2</sub> al momento dell'interrogazione; l'indice di CO<sub>2</sub>; d) possibili suggerimenti di gestione della ventilazione. Le modalità di rappresentazione prescelte da associare al contenuto sopra menzionato sono rappresentate in Tabella 19 e Tabella 20 insieme con le indicazioni sulle modalità di attivazione delle diverse rappresentazioni, mentre in Figura 20 è rappresentato il diagramma di flusso per l'attivazione del campo "Suggerimenti".

Tabella 19 – Modalità di rappresentazione umidità relativa e indici IUR, cruscotto semplificato

<i>Valore indice IUR</i>	<i>Commento</i>	<i>Rappresentazione</i>	<i>Scala cromatica</i>
IUR > +20%	«L'umidità relativa del tuo appartamento è: &valore umidità relativa&» <b>rappresentazione</b> «&valore indice IUR& più elevata rispetto al valore consigliato di 30-70%!»		
-20% ≤ IUR ≤ +20%	«L'umidità relativa del tuo appartamento è:» <b>rappresentazione</b> «nella norma»		
IUR < -20%	«L'umidità relativa del tuo appartamento è: &valore umidità relativa&» <b>rappresentazione</b> «&valore indice IUR& più bassa rispetto al valore consigliato di 30-70%!»		

**Tabella 20 – Modalità di rappresentazione concentrazione di CO<sub>2</sub> e indice ICO<sub>2</sub>, cruscotto semplificato**

Valore indice IUR	Commento	Rappresentazione	Scala cromatica
ICO <sub>2</sub> > 0%	«La concentrazione di CO <sub>2</sub> del tuo appartamento è: &valore concentrazione di CO <sub>2</sub> &» <b>rappresentazione</b> «&valore indice ICO <sub>2</sub> & più elevata rispetto al valore di soglia pari a 1200 ppm!»		
ICO <sub>2</sub> ≤ 0%	«La concentrazione di CO <sub>2</sub> del tuo appartamento è:» <b>rappresentazione</b> «buona»		



**Figura 20 – Flow chart attivazione suggerimenti qualità dell'aria**

### 2.3.2 Cruscotto secondario

Il cruscotto secondario è preposto alla comunicazione dettagliata del consumo energetico e dei parametri di monitoraggio ambientale all'utente finale. Il contenuto e le caratteristiche del cruscotto principale sono dettagliati in Tabella 21.

**Tabella 21 – Caratteristiche del cruscotto secondario**

Caratteristica	Descrizione
Contenuto	Indicatori di monitoraggio energetico (indici di potenza IP) Indici di monitoraggio ambientale ( $t_{IT}$ fuori soglia, min/max, $t_{IUR}$ fuori soglia, min/max, $t_{ICO_2}$ fuori soglia)
Frequenza	Feedback differito (giornaliero, settimanale)
Aggregazione dei dati	Per localizzazione (e.g. stanza, appartamento)
Rappresentazione	Trend storici (e.g. trend, istogrammi)
Benchmark	Consumo storico Consumo di altri utenti (e.g. media dell'edificio) Consumo atteso teorico (modelli bottom-up)

Il cruscotto secondario è progettato per fornire un’informazione più dettagliata riguardo ai consumi energetici e si distingue dal cruscotto principale sia per contenuti che per modalità di rappresentazione e aggregazione del dato. Particolare rilevanza viene data: i) alla disaggregazione del dato di consumo energetico per singola stanza; ii) alla presentazione dei consumi storici dell’utente.

Di seguito si riportano le caratteristiche delle schede di visualizzazione costituenti il cruscotto secondario, con particolare riferimento a:

- i. Scheda consumi disaggregati (illustrata a titolo esemplificativo in Figura 21): in tale scheda vengono rappresentati gli indici di potenza IP di locale (i.e., di singola stanza) mediante una modalità di rappresentazione a istogramma; la scala cromatica associata alle barre dell’istogramma, variabile a seconda del valore assunto dall’indice locale, è la medesima già precedentemente illustrata;

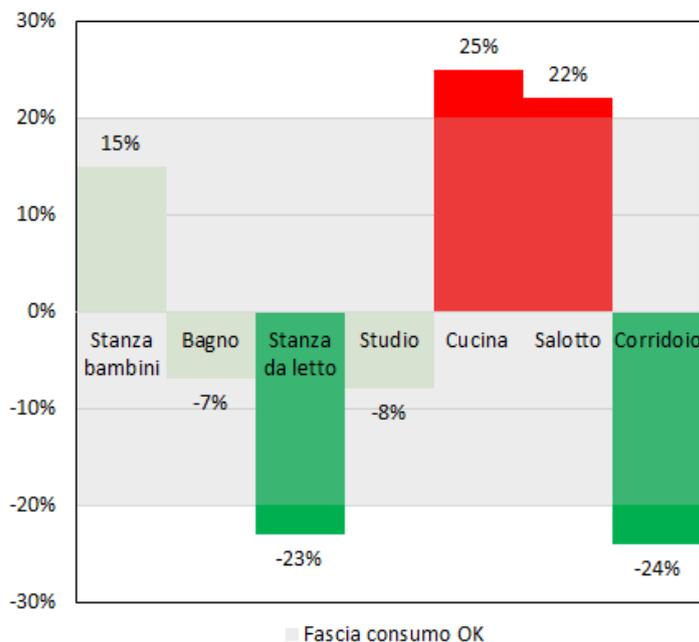
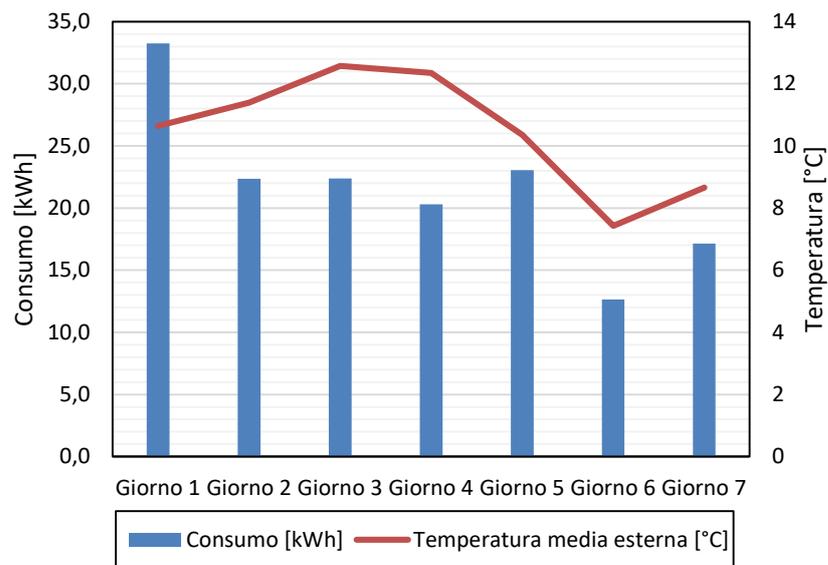


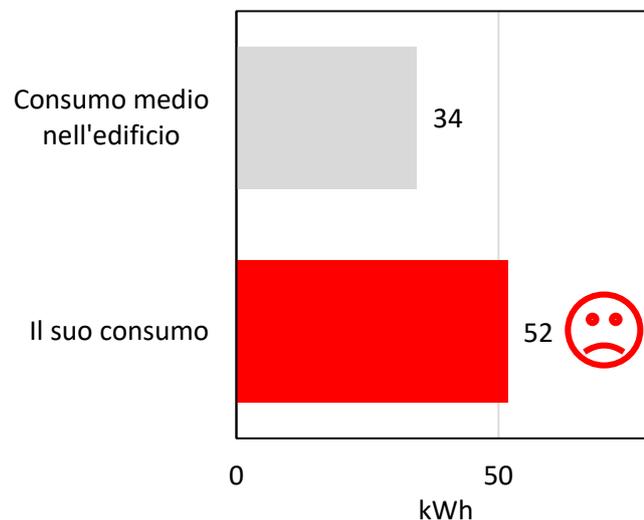
Figura 21 – Scheda consumi disaggregati

- ii. Scheda consumi storici (illustrata a titolo esemplificativo in Figura 22): in tale scheda viene rappresentato l’andamento degli ultimi sette giorni del consumo totale di energia termica dell’appartamento con una modalità di rappresentazione a istogramma, nonché la temperatura media esterna degli ultimi sette giorni con una modalità di rappresentazione a linea continua;



**Figura 22 – Scheda consumi storici**

- i. Scheda di confronto con media edificio (illustrata a titolo esemplificativo in Figura 23): in tale scheda vengono rappresentati il consumo medio di energia termica dell'intero edificio (esclusi i consumi degli appartamenti non occupati/riscaldati) ed il consumo dello specifico utente (entrambi espressi in kWh), con una modalità di rappresentazione a istogramma; le modalità di rappresentazione sono descritte in Tabella 22;

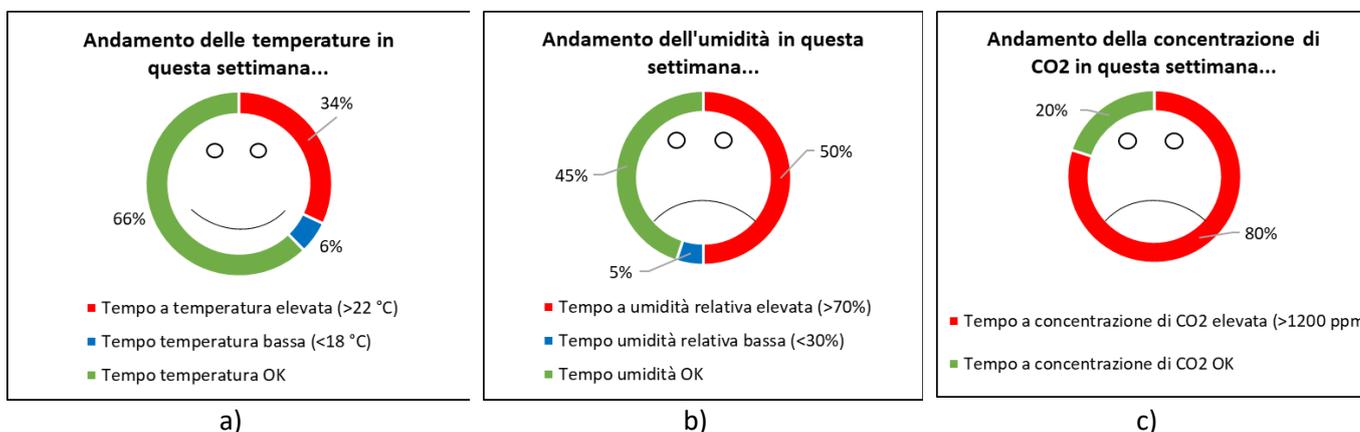


**Figura 23 – Scheda di confronto con media edificio**

**Tabella 22 –Rappresentazione associata all’istogramma, scheda di confronto con media edificio**

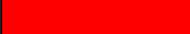
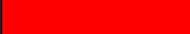
Condizione	Rappresentazione	Scala cromatica
Consumo appartamento > Consumo medio edificio		
Consumo appartamento ≤ Consumo medio edificio		

iii. Scheda di monitoraggio qualità dell’aria: in tale scheda vengono presentati gli Indici di monitoraggio ambientale ( $t_{ITfuori\ soglia,min/max}$ ,  $t_{IURfuori\ soglia,min/max}$ ,  $t_{ICO_2fuori\ soglia}$ ) secondo le modalità illustrate a titolo esemplificativo in Figura 24 con una modalità di rappresentazione di tipo “diagramma a torta”, altre informazioni in merito alla modalità di rappresentazione adottata sono fornite in Tabella 23;



**Figura 24 – Scheda monitoraggio qualità aria: a) Indice temperatura; (b) Indice umidità; (c) Indice CO2**

**Tabella 23 – Contenuto e modalità di rappresentazione, scheda di monitoraggio ambientale**

	Contenuto	Scala cromatica	Condizione	Ideogramma
(a)	$t_{ITfuori\ soglia,min}$		$t_{ITfuori\ soglia,min} + t_{ITfuori\ soglia,max} \geq 50\%$	
	$t_{ITfuori\ soglia,max}$			
	$1 - (t_{ITfuori\ soglia,min} + t_{ITfuori\ soglia,max})$		$t_{ITfuori\ soglia,min} + t_{ITfuori\ soglia,max} < 50\%$	
(b)	$t_{IURfuori\ soglia,min}$		$t_{IURfuori\ soglia,min} + t_{IURfuori\ soglia,max} \geq 50\%$	
	$t_{IURfuori\ soglia,max}$			
	$1 - (t_{IURfuori\ soglia,min} + t_{IURfuori\ soglia,max})$		$t_{IURfuori\ soglia,min} + t_{IURfuori\ soglia,max} < 50\%$	
(c)	$t_{ICO_2fuori\ soglia}$		$t_{ICO_2fuori\ soglia} \geq 50\%$	
	$1-t_{ICO_2fuori\ soglia}$		$t_{ICO_2fuori\ soglia} < 50\%$	

## 3 Progettazione di strategie di Diagnosi e Fault-Detection dei consumi energetici

### 3.1 Analisi delle tecniche di Fault Detection negli edifici

L'obiettivo principale di un sistema di Fault Detection and Diagnosis (FDD) è la individuazione dei guasti di un sistema e della loro causa, consentendone la correzione prima che il guasto stesso sia causa di ulteriori danni o di una ingente perdita di efficienza del servizio. Come noto, tale tecnica si basa sul monitoraggio continuo dello stato di un sistema.

La tecnica FFD può essere utilizzata per effettuare una “manutenzione automatizzata”. Il primo passo è quello di “monitorare il sistema fisico o il dispositivo” rilevando le eventuali condizioni anomale. Questa fase viene generalmente definita come “rilevamento dei guasti”. Quando viene rilevata una condizione anomala, la diagnosi viene utilizzata per valutare il guasto e, successivamente, determinarne le cause. La valutazione del guasto valuta la dimensione e la significatività dell'impatto sulle prestazioni del sistema (in termini di consumo di energia, costo, disponibilità o effetti su altri indicatori di prestazione). Su tale valutazione, viene quindi presa una decisione su come rispondere al guasto (ad esempio attraverso un'azione correttiva o nessuna azione).

L'efficienza energetica e la sicurezza degli edifici non possono essere raggiunte senza applicare metodi FDD, ad esempio ai sistemi HVAC. La ridondanza hardware può essere un approccio per una FDD di elevato livello, tuttavia, la duplicazione di sensori e altri componenti all'interno di ogni unità aumenta i costi di installazione e manutenzione, le necessità di spazio e la complessità del sistema [79].

Kim e Katipamula [80] classificano i metodi FDD per gli edifici in tre gruppi, come di seguito dettagliato:

1. ***data driven***: un modello del sistema viene addestrato con dati storici e utilizzato per convalidare i dati correnti. Esistono diverse tecniche, come l'apprendimento automatico, la rete neurale artificiale (ANN) o la macchina vettoriale di supporto (SVM). È richiesta poca o nessuna conoscenza fisica del sistema e i modelli risultanti possono essere trattati come componenti “black-box”. Per questo motivo, i metodi basati sui dati sono facilmente applicabili a diversi tipi di sistemi con un piccolo sforzo. Tuttavia, è necessaria una robusta serie di dati storici, il che esclude la possibilità di applicare queste tecniche ai sistemi di recente implementazione.
2. ***model-based***: un modello fisico del sistema viene creato utilizzato per convalidare i dati correnti dal sistema. Questo approccio non richiede dati di addestramento e spesso le previsioni sono più accurate dei modelli black-box. Tuttavia, i modelli accurati possono essere complessi e richiedono una conoscenza approfondita del sistema e un grande sforzo per essere creati.
3. ***rule-based***: la conoscenza approfondita raccolta da esperti sul campo viene utilizzata per progettare una serie di regole che descrivono il comportamento del sistema. Non sono necessari dati storici e nessuna conoscenza fisica dettagliata del sistema. Tuttavia, le regole possono descrivere solo comportamenti fino a una certa complessità e possono coprire solo casi semplici. Con l'aumentare del numero di regole, aumenta la possibilità di regole in conflitto, così come lo sforzo per mantenere l'insieme di regole.

Yu et al. [81] classificano le tecniche FDD in quattro gruppi: ridondanza hardware, ridondanza software, analisi del segnale e test di plausibilità, come mostrato Figura 25. Sensori e attuatori fisici ridondanti sono alla base della ridondanza hardware, che consente un'elevata accuratezza e precisione, ma anche maggiori costi di implementazione e manutenzione. Nella ridondanza software, invece, i sensori fisici vengono sostituiti da modelli ottenuti tramite software. I sensori virtuali sono utilizzati sia per l'osservazione di quantità non misurate che per convalidare lo stato del sistema. In genere, si sviluppano

sensori virtuali per controllare parametri per i quali sarebbe troppo costoso implementare un sensore fisico, o troppo lento nella raccolta dei dati [82].

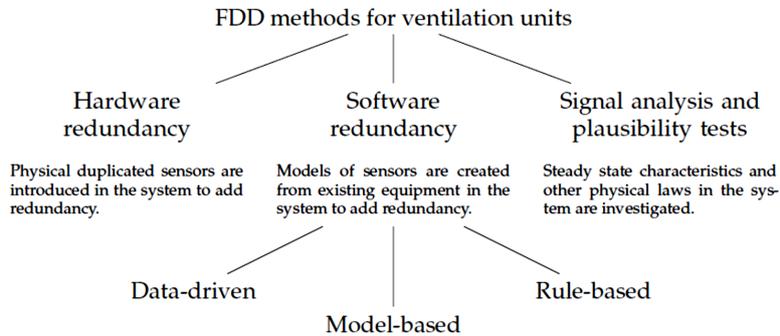


Figura 25 – Classificazione tecniche di Fault Detection negli edifici

In [83] viene proposta una classificazione delle tecniche di Fault Detection basata su conoscenza esperta (A) e dati misurati (B) e successivamente in base all’applicazione di tecniche basate su modelli predittivi (tipo i), modelli di classificazione (tipo ii) e analisi degli outlier (tipo iii). In particolare, il rilevamento dei valori anomali (outlier) può essere utilizzato per determinare se il consumo di energia per un determinato giorno è significativamente diverso dal consumo di energia precedente. Per gli edifici con un consumo energetico anormale, la quantità di variazione dal valore “atteso” viene determinata utilizzando stime affidabili della deviazione media e standard. In Figura 26 viene riportato un diagramma a blocchi per la rilevazione di consumi anomali proposto in [84].

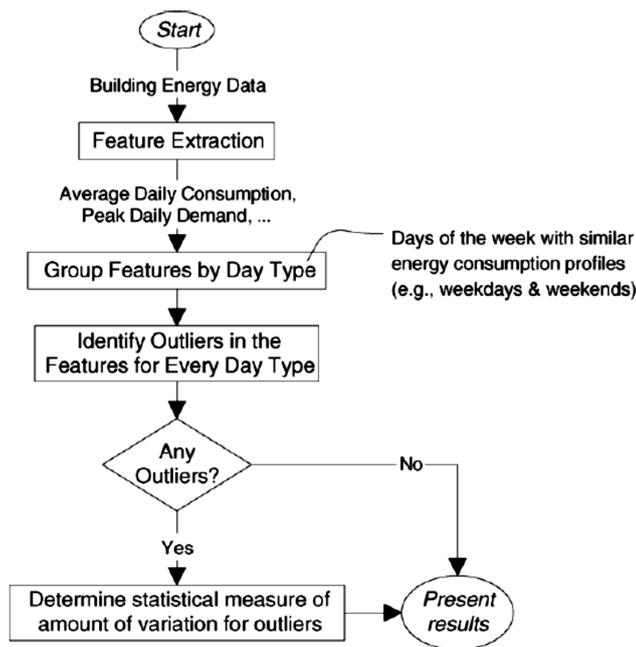


Figura 26 – Diagramma a blocchi metodo dell’analisi degli outliers

In [85] si opera invece una classificazione in base a condizioni, comportamento e risultati del sistema. In particolare la definizione di guasto è:

- basata sulla condizione in presenza di una condizione fisica impropria o indesiderata (e.g. valvole bloccate, filtri intasati e attuatori rotti);
- basata sul comportamento in presenza di un comportamento improprio o indesiderato durante il funzionamento di un sistema (e.g. riscaldamento e raffreddamento simultanei e cicli brevi);
- basata sui risultati quando un risultato quantificabile o una metrica delle prestazioni si discosta da un risultato corretto o di riferimento atteso (e.g. aumento del consumo di acqua calda o refrigerata, rendimento ridotto e temperatura della zona al di fuori dei limiti di comfort, etc.)

Nella maggior parte dei casi, il rilevamento dei guasti è relativamente più semplice della diagnosi o della valutazione degli impatti che derivano dal guasto stesso. La stessa FDD è spesso descritta come costituita da tre processi chiave:

- rilevamento, necessario per determinare che si è verificato un “fault” nel sistema
- isolamento, consiste nell'isolare il guasto e comprende la determinazione del tipo e della posizione del guasto e del tempo di rilevamento e
- Identificazione, include la determinazione della dimensione e della variante temporale del comportamento dell'effetto

L'insieme, dell'isolamento e dell'identificazione del guasto sono comunemente anche definiti “diagnosi del guasto”.

Come mostrato, l'analisi della letteratura rivela una vasta tipologia di approcci utilizzati per rilevare e diagnosticare i guasti in cui varia la sequenza del rilevamento e della diagnosi. In alcuni casi, il rilevamento funziona continuamente, mentre il sistema diagnostico viene attivato solo al rilevamento di un guasto. In altre applicazioni, le fasi di rilevamento e diagnostica vengono eseguiti in parallelo e in alcune istanze, il rilevamento e la diagnostica vengono eseguiti in un unico passaggio. Gli approcci alla FDD variano inoltre in funzione del metodo [86]. In primo luogo possiamo distinguere tra i metodi basati su modelli fisici e/o analitici e quelli guidati dai dati, ovvero che utilizzano l'intelligenza artificiale o tecniche statistiche (in Figura 27 sono riportate schematicamente una classificazione dei metodi di Fault Detection per gli edifici).

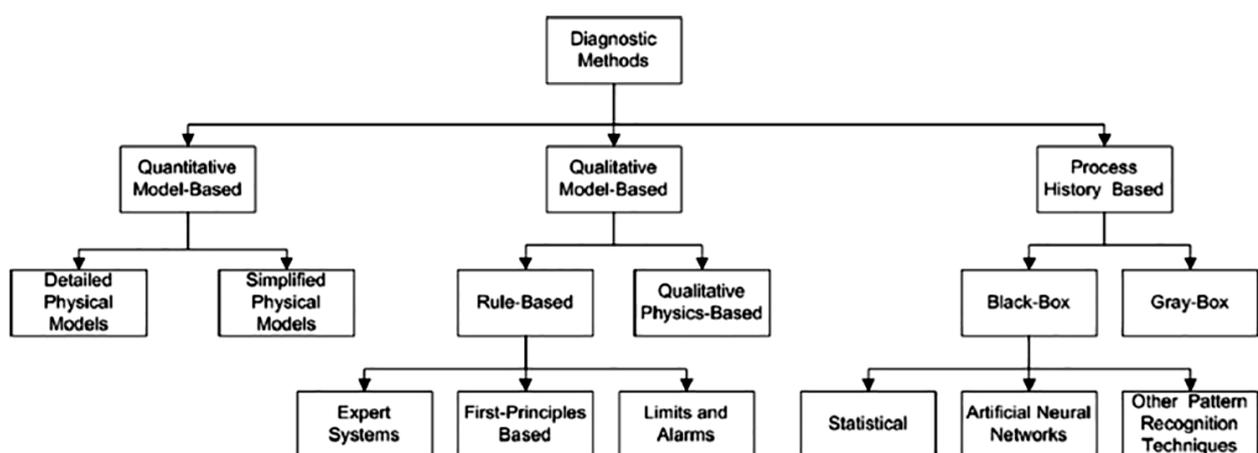


Figura 27 – Metodologie di diagnosi ed analisi dei guasti [87]

La principale differenza tra questi diversi approcci è data dalla conoscenza utilizzata per la formulazione della diagnostica. La diagnostica può essere infatti completamente basata su una conoscenza a priori (come ad esempio nei modelli basati interamente su principi fisici) oppure guidata completamente

dal dato (come ad esempio nei cosiddetti modelli black-box). Tutti e due gli approcci utilizzano modelli logico-matematici ed entrambi utilizzano dati, ma l'approccio alla formulazione della diagnostica è fondamentalmente diverso. Gli approcci basati sul modello "fisico" utilizzano la conoscenza a priori del sistema analizzato come base per identificare e valutare le differenze (residui) tra gli stati operativi effettivi (determinati dalle misurazioni) ed i valori operativi previsti dal modello fisico teorico. Gli approcci basati sui dati, invece, non utilizzano le conoscenze a priori del processo ma, invece, derivano modelli comportamentali solo dai dati stessi di misurazione del processo. In quest'ultimo caso, i modelli di diagnosi potrebbero non avere alcun significato fisico diretto.

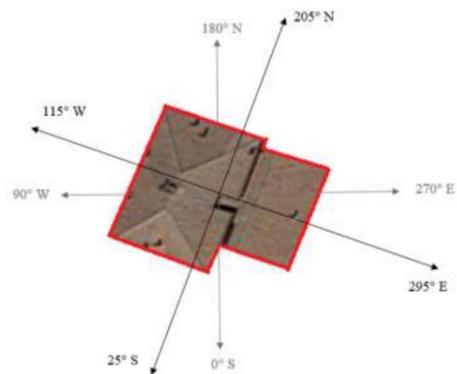
I metodi a priori possono utilizzare modelli quantitativi o qualitativi. I modelli "quantitativi" possono essere implementati con insiemi di relazioni matematiche quantitative basate sulla fisica sottostante i processi analizzati. I modelli "qualitativi" sono invece costituiti da relazioni qualitative (e.g. relazioni d'ordine) derivate dalla conoscenza della fisica sottostante (e.g. entropia generata maggiore di zero, energia in ingresso maggiore o uguale dell'energia in uscita). I metodi quantitativi possono poi essere distinti in quelli basati su modelli fisici dettagliati oppure su modelli semplificati dei processi fisici (questi modelli possono essere infatti stazionari, dinamici lineari o non lineari). Gli approcci qualitativi basati sui modelli includono quelli basati su regole e sulla fisica qualitativa. I primi si basano su regole derivate dall'esperienza a priori del processo analizzato, cioè sia i cosiddetti "sistemi esperti" in cui non vi sono principi fisici in senso stretto, oppure regole derivate dai principi fisici, o infine semplici limiti di controllo (che servono come base per gli allarmi).

In alternativa ai metodi quantitativi e qualitativi (in cui si presume una conoscenza a priori del processo) i metodi a posteriori si basano esclusivamente sulle serie storiche ovvero sulla cronologia del processo, e necessitano di una grande quantità di dati storici. Questi modelli includono i metodi black box (input-output) che analizzano esclusivamente i dati ed i modelli "gray-box" che utilizzano i principi fisici di conoscenza (solo per specificare la forma matematica dei termini nel modello), ma per i quali i parametri (come i coefficienti nel modello) sono determinati dai soli dati di processo. I metodi black box includono i modelli derivati statisticamente (ad esempio, i metodi regressivi), reti neurali artificiali (ANN) e le altre tecniche di riconoscimento (machine learning).

Nell'ambito specifico della Fault Detection and Diagnosis Energetica (FDDE) i parametri fondamentali che è necessario acquisire ed analizzare ai fini di una corretta e completa diagnosi sono sia quelli che determinano i consumi energetici (ovvero la domanda di energia e la sua profilatura), sia quelli che riguardano il comportamento dei sistemi energetici incluso sia quelli che producono, trasportano ed utilizzano l'energia termica ed elettrica (ovvero l'efficienza dei sistemi di generazione, trasporto ed utilizzo), sia infine l'impatto dei sistemi sull'ambiente in termini di inquinamento ambientale locale e di impatto ambientale in senso lato (e.g. effetto serra). Un aspetto non marginale è, infine, quello economico dal momento che le tariffe multi-orarie e gli incentivi energetici associati ai sistemi di produzione ed utilizzo delle rinnovabili necessitano di analisi specifiche tempo-varianti. La complessità della problematica richiede pertanto il monitoraggio di numerosi parametri in cui le tecnologie dello smart metering e del sub-metering si rivelano fondamentali.

### 3.2 Caso di Studio

Figura 28, Figura 29 e Figura 30 sono raffigurate alcune immagini, gli schemi di layout e la sezione trasversale dell'edificio oggetto del caso di studio.



**Figura 28 – Edificio caso di studio Anagni ATER 18C**



Figura 30 – Sezione trasversale dell’edificio caso di studio Anagni ATER 18C

Nell'edificio, costruito nel 1979, è stato installato un sistema indiretto di ripartizione del calore con ripartitori conformi alla UNI EN 834:2013 e valvole termostatiche. Il controllo della temperatura dei singoli ambienti è ottenuto tramite valvole termostatiche regolabili meccanicamente su ciascun radiatore. In ciascun appartamento sono inoltre stati installati un termostato e due sensori di temperatura ambiente per la misura del comfort indoor

Ciascun appartamento è dotato di 7 radiatori, ad esclusione di un appartamento che presenta 8 radiatori. Le potenze termiche installate sono state stimate con il metodo dimensionale [88], previa mappatura delle dimensioni dei radiatori, anche al fine di programmare i ripartitori (vedi Tabella 24).

**Tabella 24 – Potenza termica installata nei singoli appartamenti e numero di occupanti**

Appartamento e tipo	Potenza installata[kW]	Numero di occupanti
1C	12 963	1
2A	10 173	2
3B	10 633	3
4C	9 781	2
5A	9 047	2
6B	8 665	7
7C	13 805	4
8A	11 534	1
9B	11 994	2

L'impianto di riscaldamento è di tipo centralizzato alimentato da una caldaia a gas naturale i cui consumi sono misurati da un contatore del gas a membrana di taglia G16, teleletto dall'azienda di distribuzione. In uscita dalla caldaia è presente un contatore di calore per la misura diretta dei consumi di riscaldamento dell'intero edificio con frequenza di lettura giornaliera. L'impianto per la produzione di acqua calda sanitaria è invece di tipo autonomo in ciascun appartamento. Attualmente l'edificio presenta un sistema di contabilizzazione delle spese di riscaldamento con ripartitori di calore con sistema di lettura radio. La termoregolazione è effettuata per mezzo di valvole termostatiche a regolazione meccanica. Sono inoltre presenti due T-logger installati in ciascun appartamento per la misura della temperatura indoor nella zona notte e nella zona giorno.

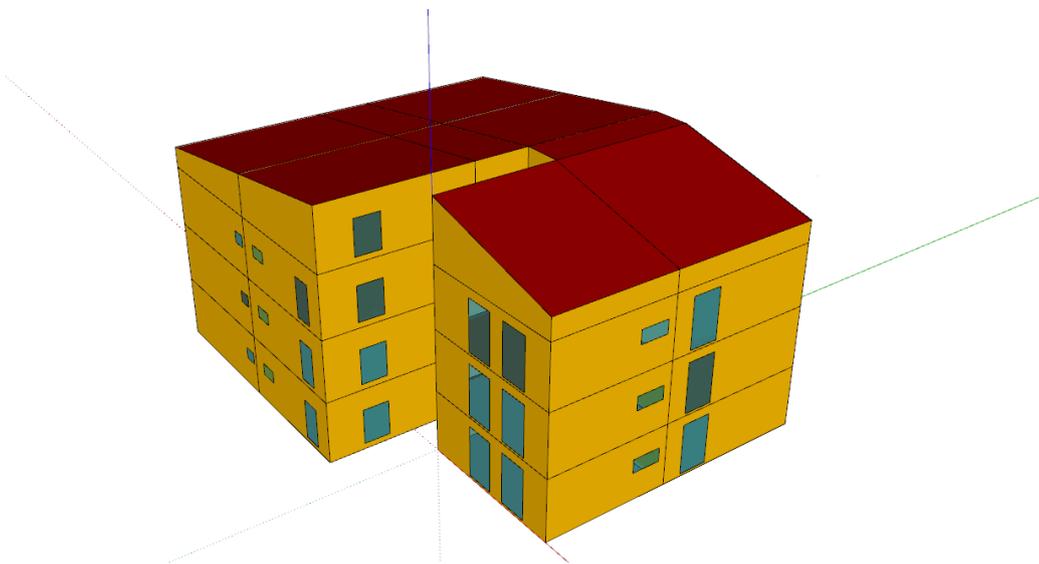
Si sottolinea che la quasi totalità della superficie di calpestio del primo piano, che si trova sopra i garage e il portico, è esposto all'ambiente esterno e che il locale sottotetto non è riscaldato. Le principali caratteristiche termofisiche dell'edificio investigato, raccolte tramite sopralluoghi in loco e analisi storica e documentale, sono riportate in Tabella 25. Si è operata una distinzione tra due differenti tipologie di solaio, in quanto il pavimento esterno dell'unità immobiliare posta sopra il portico (a differenza delle altre unità immobiliari del primo piano poste sopra i garage) è stato recentemente rinnovato con l'aggiunta di uno strato esterno isolante di polistirene espanso di spessore 0,05 m.

**Tabella 25 – Caratteristiche termofisiche dell'edificio caso di studio**

Elemento	Descrizione	Strati (da interno a esterno)	Spessore [m]	Trasmittanza stimata [ $Wm^{-2}K$ ]	Trasmittanza di riferimento* [ $Wm^{-2}K$ ]
Copertura	Tetto a spiovente non isolato con locale sottostante non riscaldato	Intonaco calce e gesso	0.02	1.67	0.26
		Cemento	0.20		
		Strato impermeabilizzante (bitume)	0.004		
		Tegole	0.015		
Muri perimetrali	Cemento/mattoni forati, non isolato, con intercapedine d'aria	Intonaco calce e gesso	0.02	1.12	0.32
		Mattoni forati	0.10		
		Intercapedine d'aria	0.08		
		Mattoni forati	0.10		
Muri interni	Muro in mattoni forati, non isolato	Intonaco calce e gesso	0.01	1.77	-
		Mattoni forati	0.10		
		Intonaco calce e gesso	0.01		
Soffitti interni e pavimenti	Solaio in latero-cemento e mattonelle in ceramica	Intonaco calce e gesso	0.02	1.30	0.32
		Mattoni pieni di cemento	0.18		
		Cemento magro	0.05		
		Mattonelle in ceramica	0.01		
Finestre	Legno, singolo vetro	-	-	4.90	1.80

\* Zona climatica D, allegato 1 Decreto 26 giugno 2015

Gli autori hanno effettuato una simulazione dinamica dell'edificio caso studio mediante il software TRNSYS-17 [89], sulla base di un bilancio termico (tipicamente su base oraria) tenendo conto degli effetti dell'accumulo e del rilascio termico dell'involucro edilizio opaco [90,91]. Sia l'involucro edilizio che l'impianto di riscaldamento sono stati modellati numericamente ed i risultati sono stati validati in base ai consumi reali misurati sia a livello di edificio (attraverso il contatore di energia termica in caldaia) che a livello di unità immobiliare (attraverso i dati dei singoli ripartitori). Il modello 3-D dell'edificio caso di studio è stato sviluppato tramite il plug-in di Google SketchUp "Trnsys3d" [92], come mostrato in Figura 31, considerando le proprietà termo-fisiche di Tabella 25. Per motivi tecnici (in Trnsys3d le zone termiche devono essere convesse), per modellare gli appartamenti sono state utilizzate 24 zone termiche, ovvero: 3 per abitazioni di tipo B e di tipo C e 2 per abitazioni di tipo A. Per il sottotetto sono state realizzate 8 zone termiche con tetto a falde. Il vano scala è stato rappresentato con una zona termica per ogni piano.



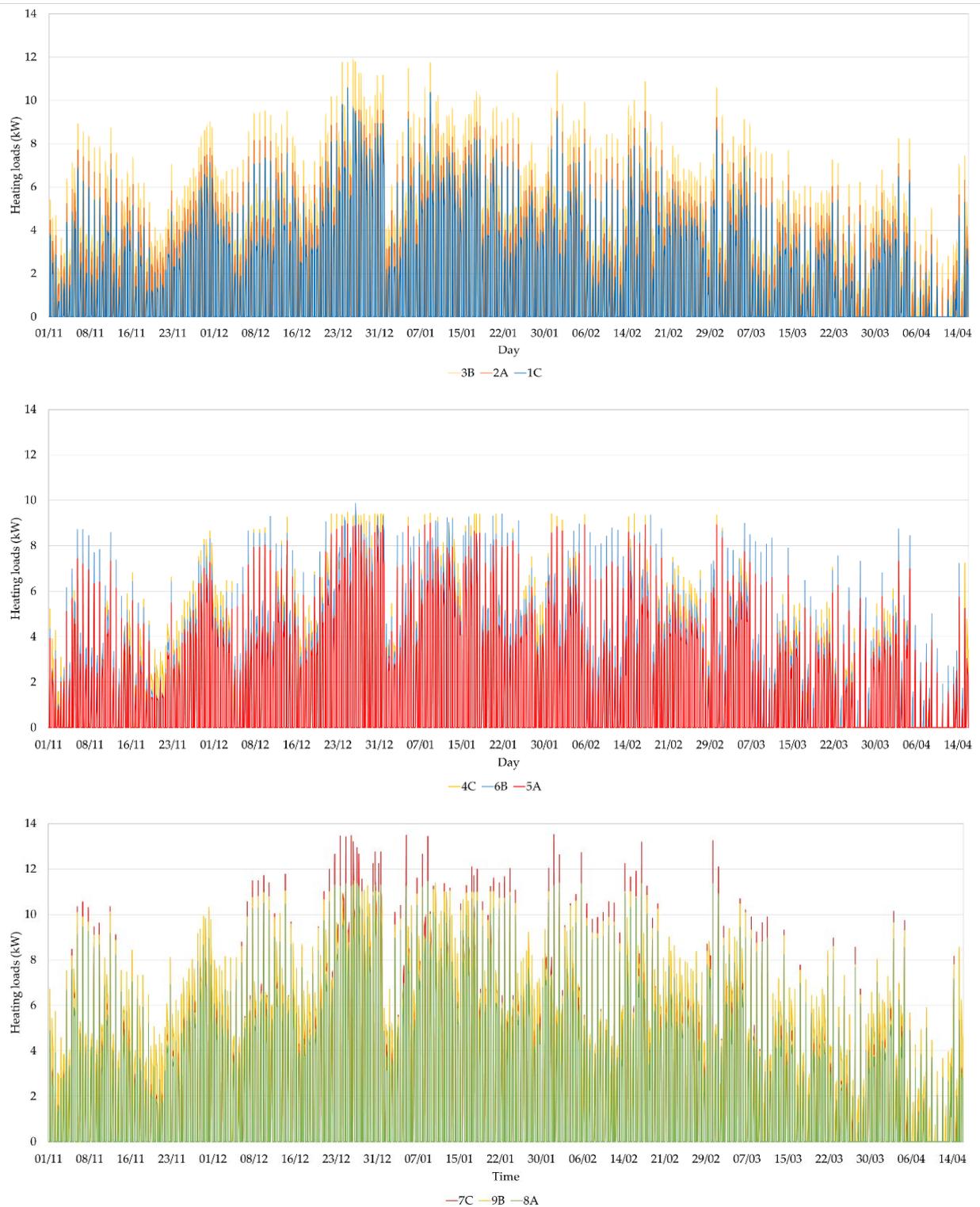
**Figura 31 – Modello 3-D dell'edificio caso di studio**

Il tasso di infiltrazione (ovvero il numero di volumi d'aria nell'unità di tempo che entra nell'edificio dall'esterno attraverso le finestre a causa della loro inadeguata tenuta) è stato fissato secondo i valori convenzionali per edifici residenziali [93], in funzione della tenuta e della velocità del vento. L'unico apporto gratuito interno considerato è stato quello legato agli occupanti, dal momento che nelle unità immobiliari non sono presenti apparecchiature elettriche ad alto consumo energetico e solo pochi ambienti sono permanentemente occupati.

Il sistema di riscaldamento è stato modellato considerando quattro componenti: i) il sistema di emissione, la cui potenza termica rappresenta un input (vedi Tabella 24); ii) il sistema di generazione, la cui efficienza è un parametro di input ed è stata calcolata come l'efficienza media di generazione di due anni consecutivi misurata durante la campagna sperimentale (ovvero il rapporto tra il consumo di energia termica misurato dal contatore installato a valle della caldaia e il consumo di gas naturale espresso in kWh e contabilizzato mediante contatore del gas naturale dell'edificio); iii) i circolatori dell'impianto; iv) i sistemi di distribuzione e miscelazione.

Data la presenza di valvole termostatiche meccaniche sui terminali di emissione, ad ogni zona termica è stata associata una temperatura variabile di set-point (questo valore è stato assunto pari alla temperatura media misurata dai T-logger). L'impianto di generazione è funzionante dalle 6 alle 8 e dalle 15 alle 22) nel periodo di riscaldamento dal 1° novembre al 15 aprile (il comune di Anagni è in zona climatica D, 1911 gradi-giorno). Per ogni zona termica è stata determinata la domanda di energia per lo scenario di base, ovvero la simulazione del pieno funzionamento dell'edificio. In Figura 32 viene riportato il risultato della

simulazione dinamica in termini di carico termico orario per le singole unità immobiliari dell'edificio caso di studio.



**Figura 32 – Analisi dei carichi termici delle singole unità immobiliari**

Il consumo annuo di riscaldamento è stato calcolato come l'area al di sotto della curva di consumo ottenuta dalla simulazione. Sia i consumi energetici stimati che quelli misurati sono stati normalizzati rispetto ai Gradi Giorno di riferimento (i.e. GG=1911) come riportato nelle equazioni (3.1) e (3.2), in cui: i)  $CN_{SW}^*$  e  $CN_{mis}^*$  sono i consumi normalizzati stimati attraverso la simulazione e quelli misurati, rispettivamente; ii)  $C_{SW}$  e  $C_{mis}$  sono i Consumi stimati attraverso il SW e quelli misurati (attraverso i sistemi di metering e sub-metering installati), rispettivamente; iii)  $GG_{SW}$  e  $GG_{mis}$  sono i Gradi Giorno stimati attraverso il tool meteo del SW e quelli misurati (attraverso la sonda esterna di temperatura), rispettivamente

$$CN_{SW}^* = \frac{C_{SW}}{GG_{SW}} \cdot 1911 \quad (3.1)$$

$$CN_{mis}^* = \frac{C_{mis}}{GG_{mis}} \cdot 1911 \quad (3.2)$$

È stata quindi eseguita una calibrazione del modello dinamico finalizzata a diminuire l'errore di simulazione nelle singole unità immobiliari. Infatti, dopo la prima simulazione, gli appartamenti 5A, 6B, 7C e 8A hanno mostrato gli errori di simulazione più elevati (vedi tabella 3). Sulla base di alcune informazioni recuperate dagli autori sul campo, è stato riscontrato ad esempio che alcuni occupanti erano soliti aprire le finestre durante le ore di riscaldamento, invece di regolare le valvole termostatiche, per diminuire la temperatura interna. In Tabella 26 sono riportati i risultati della simulazione dinamica prima e dopo la calibrazione del modello in termini di consumi normalizzati per singola unità abitativa.

**Tabella 26 – Consumi normalizzati stimati dal modello e misurati**

Unità e tipo	$CN_{SW}^*$ , [kWh] Pre-calibrazione	$CN_{SW}^*$ , [kWh] Post-calibrazione	$CN_{mis}^*$ [kWh]
1C	4918	5424	5673
2A	6578	6847	6796
3B	7686	7704	7334
4C	6600	7351	7685
5A	4552	5934	5578
6B	4470	7151	7386
7C	5846	9015	9617
8A	5206	7885	8919
9B	8042	9882	9460
Totale	53897	67193	68449

### 3.2.1 Descrizione del dataset

Il dataset è suddiviso in tre gruppi:

- dati stimati a priori: quelli più propriamente legati alle caratteristiche strutturali dell'edificio e degli impianti in esso presenti (es. potenza termica installata nei singoli appartamenti, numero di occupanti, piano ed esposizione di ciascun appartamento) e quelli relativi ad una stima dei consumi attesi di ciascuna unità immobiliare e dell'edificio (fabbisogno energetico) basata sulle caratteristiche termofisiche dell'edificio;
- serie storiche dei sensori installati: e.g. ripartitori di calore su ciascun corpo scaldante, contatore di energia termica in uscita dalla caldaia, T-logger per la misura delle temperature in due zone di

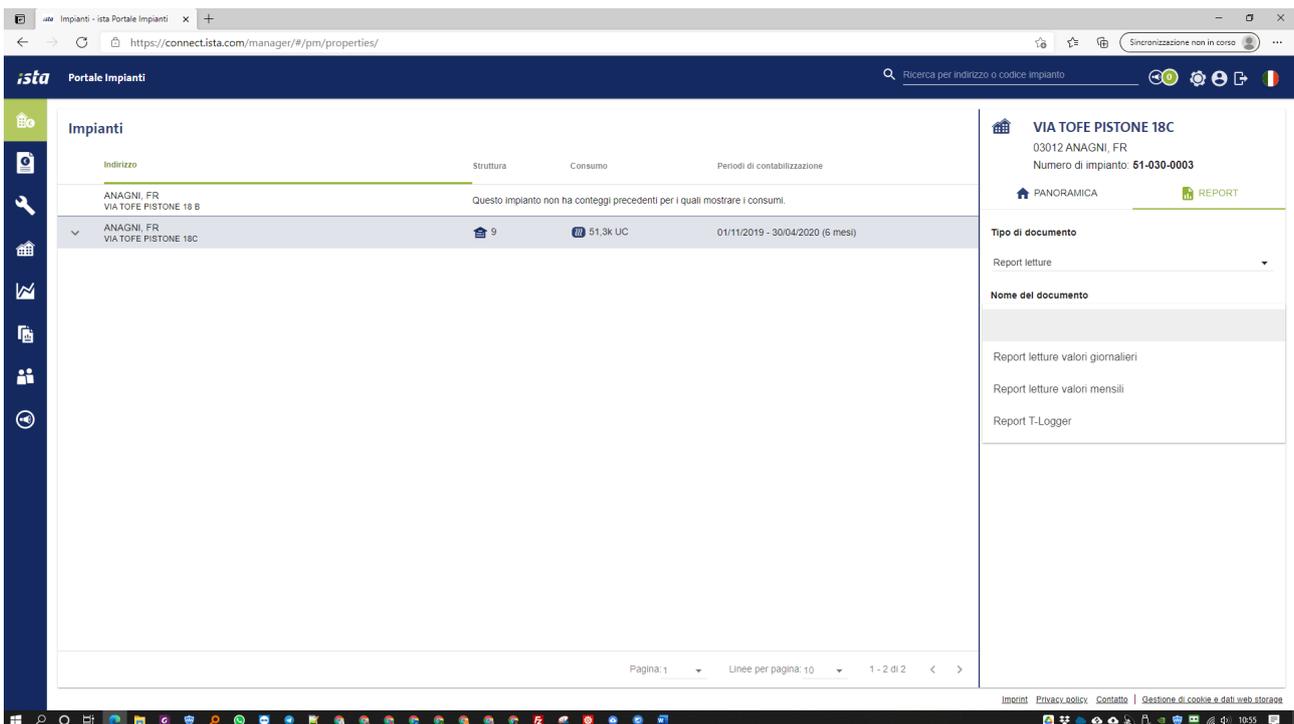
ciascun appartamento, disponibili per tutti i giorni della stagione di riscaldamento nel periodo di tempo della sperimentazione;

- serie storiche dei dati meteorologici: e.g. temperatura esterna minima media e massima, velocità del vento, pioggia, umidità; questi dati sono acquisiti direttamente da database disponibili nell’ambiente di calcolo utilizzato per la realizzazione del SW.

La prima categoria di dati non necessita di particolari elaborazioni e pre-processing, mentre per le altre due categorie sono state sviluppate routine di acquisizione e pre-processing al fine di rendere i dati disponibili in maniera strutturata e sistematica nel modello di calcolo impiegato dagli algoritmi di analisi e diagnosi.

### 3.2.1.1 Serie storiche dei sensori installati nell’edificio

Il sistema di sensori installati nell’edificio (i.e. ripartitori di calore su ciascun corpo scaldante, contatore di energia termica nel locale caldaia, due T-logger installati in zona notte e zona giorno di ciascun appartamento) consente di raccogliere i dati e convogliarli sulla piattaforma del service provider<sup>2</sup> dell’edificio, da cui è possibile estrarre i report dei dati registrati in formati standard (e.g. PDF, Excel, CSV) per i periodi temporali in cui la sperimentazione è stata condotta (vedi Figura 33).



The screenshot shows the 'Portale Impianti' interface. The main table lists buildings with columns for 'Indirizzo', 'Struttura', 'Consumo', and 'Periodi di contabilizzazione'. The selected building is 'VIA TOFE PISTONE 18C' with a consumption of 51.3k UC and a period from 01/11/2019 to 30/04/2020 (6 mesi). The sidebar on the right shows the 'REPORT' section with options for 'Report letture', 'Report letture valori giornalieri', 'Report letture valori mensili', and 'Report T-Logger'.

Figura 33 – Piattaforma dati ISTA

La sperimentazione effettuata si basa sulle stagioni di riscaldamento indicate in Tabella 27 e per le quali sono disponibili (sul portale o in altra piattaforma) i dati relativi alle temperature interne ed esterna, ai consumi (per singola unità immobiliare e per singolo corpo scaldante) ed alla velocità del vento.

<sup>2</sup> <https://connect.ista.com/manager/#/system/login>

**Tabella 27 – Stagioni di riscaldamento esaminate**

Id. periodo	Data inizio	Data fine	GG effettivi
P1	07/12/2017	15/04/2018	1607*
P2	01/11/2018	15/04/2019	1950
P3	01/11/2019	15/04/2020	1830
P4	01/11/2020	15/04/2021	1928

\* Inizio del campionamento il 07/12/2017

Le temperature interne sono misurate dai due dispositivi (T-logger) installati in ciascuna unità immobiliare (generalmente camera letto e sala pranzo). I dati rilevati sono i seguenti: i) temperatura minima; ii) temperatura massima; iii) temperatura media; iv) percentuale di ore (sul periodo considerato) in cui la temperatura resta sotto 19°C. In Figura 34 è riportato un esempio di report giornaliero per le temperature indoor.



## REPORT T-LOGGER

*I vostri dati di riferimento*

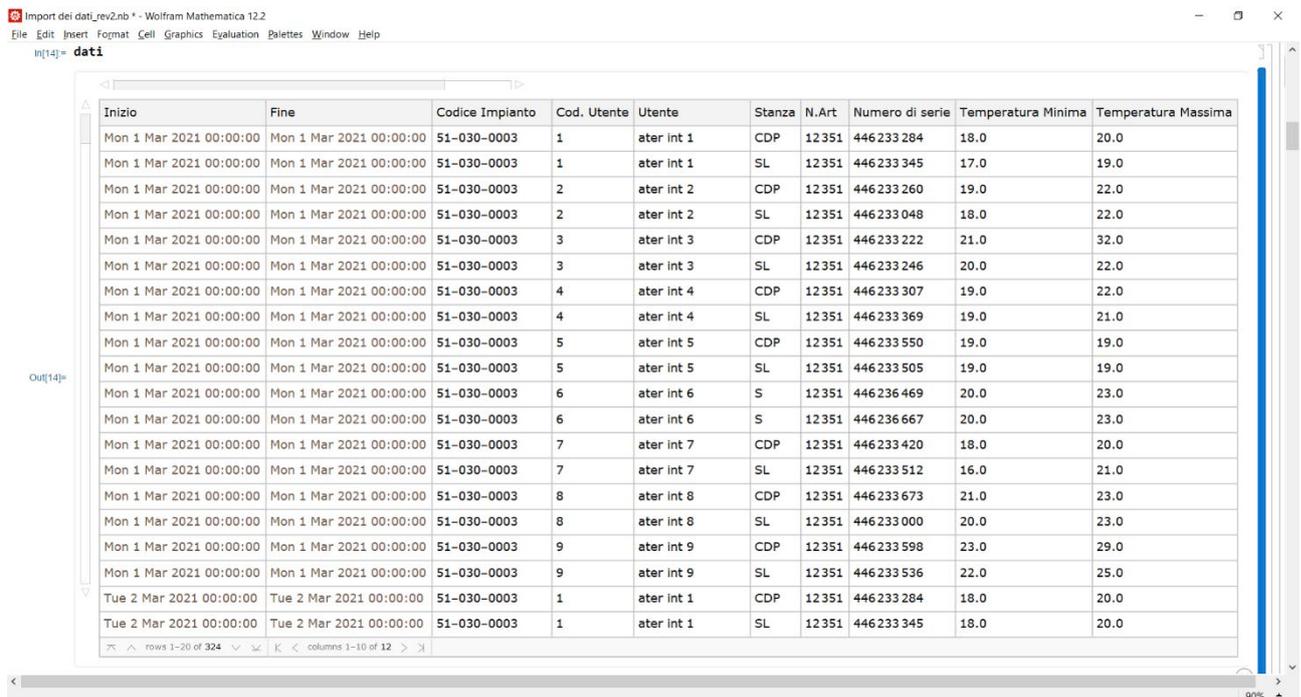
Codice impianto 51-030-0003  
 Codice interno impianto  
 Nome cliente Cond. Tofe Pistone 18c  
 Indirizzo impianto VIA TOFEPISTONE 18C  
 03012 Anagni  
 Frosinone  
 Lazio  
 Periodo considerato nel report 01.03.2021 - 01.03.2021  
 Data report 23.03.2021  
 Per maggiori informazioni potete contattare  
 Indirizzo ista Italia SRL  
 Viale Carlo Marx 135/2  
 00137 Roma  
 Roma, Lazio  
 06-59474130  
 Telefono / Fax  
 Email as.sistenzaconteggi.roma@ista.com

Codice Impianto	Cod. Utente	Utente	Stanza	N.Art	Numero di serie	Temperatura Minima	Temperatura Massima	Temperatura Media	tempo < 19°C
51-030-0003	0001	ater int 1	SL	12351	446233345	17.0	19.0	18.0	87.92%
51-030-0003	0001	ater int 1	CDP	12351	446233284	18.0	20.0	19.0	53.33%
51-030-0003	0002	ater int 2	CDP	12351	446233260	19.0	22.0	21.0	0.00%
51-030-0003	0002	ater int 2	SL	12351	446233048	18.0	22.0	21.0	7.50%
51-030-0003	0003	ater int 3	CDP	12351	446233222	21.0	32.0	26.0	0.00%
51-030-0003	0003	ater int 3	SL	12351	446233246	20.0	22.0	21.0	0.00%
51-030-0003	0004	ater int 4	CDP	12351	446233307	19.0	22.0	21.0	0.00%
51-030-0003	0004	ater int 4	SL	12351	446233369	19.0	21.0	20.0	0.83%
51-030-0003	0005	ater int 5	CDP	12351	446233550	19.0	19.0	19.0	0.00%
51-030-0003	0005	ater int 5	SL	12351	446233505	19.0	19.0	19.0	87.92%
51-030-0003	0006	ater int 6	S	12351	446236469	20.0	23.0	21.0	0.00%
51-030-0003	0006	ater int 6	S	12351	446236667	20.0	23.0	21.0	0.00%
51-030-0003	0007	ater int 7	CDP	12351	446233420	18.0	20.0	19.0	78.75%
51-030-0003	0007	ater int 7	SL	12351	446233512	16.0	21.0	19.0	26.25%
51-030-0003	0008	ater int 8	CDP	12351	446233673	21.0	23.0	22.0	0.00%
51-030-0003	0008	ater int 8	SL	12351	446233000	20.0	23.0	22.0	0.00%
51-030-0003	0009	ater int 9	SL	12351	446233536	22.0	25.0	23.0	0.00%
51-030-0003	0009	ater int 9	CDP	12351	446233598	23.0	29.0	24.0	0.00%

**Figura 34 – Esempio report giornaliero temperature indoor**

Al fine di agevolare l'acquisizione automatica dei dati da parte delle funzioni di analisi e minimizzare l'intervento dell'operatore nell'aggregazione dei dati provenienti dai vari report (giornalieri, mensili, ecc.) è stata strutturata una funzione di import automatico dei file Excel generati dalla piattaforma ISTA. A titolo di esempio in Figura 35 si mostra il risultato di una importazione dei dati sulle temperature giornaliere del mese di marzo 2021 con applicazione della funzione automatica di import dati implementata.

A titolo di esempio in Figura 35 si mostra il risultato di un'importazione dei dati sulle temperature giornaliere del mese di marzo 2021 con applicazione della funzione automatica di import dati implementata.



Inizio	Fine	Codice Impianto	Cod. Utente	Utente	Stanza	N.Art	Numero di serie	Temperatura Minima	Temperatura Massima
Mon 1 Mar 2021 00:00:00	Mon 1 Mar 2021 00:00:00	51-030-0003	1	ater int 1	CDP	12351	446233284	18.0	20.0
Mon 1 Mar 2021 00:00:00	Mon 1 Mar 2021 00:00:00	51-030-0003	1	ater int 1	SL	12351	446233345	17.0	19.0
Mon 1 Mar 2021 00:00:00	Mon 1 Mar 2021 00:00:00	51-030-0003	2	ater int 2	CDP	12351	446233260	19.0	22.0
Mon 1 Mar 2021 00:00:00	Mon 1 Mar 2021 00:00:00	51-030-0003	2	ater int 2	SL	12351	446233048	18.0	22.0
Mon 1 Mar 2021 00:00:00	Mon 1 Mar 2021 00:00:00	51-030-0003	3	ater int 3	CDP	12351	446233222	21.0	32.0
Mon 1 Mar 2021 00:00:00	Mon 1 Mar 2021 00:00:00	51-030-0003	3	ater int 3	SL	12351	446233246	20.0	22.0
Mon 1 Mar 2021 00:00:00	Mon 1 Mar 2021 00:00:00	51-030-0003	4	ater int 4	CDP	12351	446233307	19.0	22.0
Mon 1 Mar 2021 00:00:00	Mon 1 Mar 2021 00:00:00	51-030-0003	4	ater int 4	SL	12351	446233369	19.0	21.0
Mon 1 Mar 2021 00:00:00	Mon 1 Mar 2021 00:00:00	51-030-0003	5	ater int 5	CDP	12351	446233550	19.0	19.0
Mon 1 Mar 2021 00:00:00	Mon 1 Mar 2021 00:00:00	51-030-0003	5	ater int 5	SL	12351	446233505	19.0	19.0
Mon 1 Mar 2021 00:00:00	Mon 1 Mar 2021 00:00:00	51-030-0003	6	ater int 6	S	12351	446236469	20.0	23.0
Mon 1 Mar 2021 00:00:00	Mon 1 Mar 2021 00:00:00	51-030-0003	6	ater int 6	S	12351	446236667	20.0	23.0
Mon 1 Mar 2021 00:00:00	Mon 1 Mar 2021 00:00:00	51-030-0003	7	ater int 7	CDP	12351	446233420	18.0	20.0
Mon 1 Mar 2021 00:00:00	Mon 1 Mar 2021 00:00:00	51-030-0003	7	ater int 7	SL	12351	446233512	16.0	21.0
Mon 1 Mar 2021 00:00:00	Mon 1 Mar 2021 00:00:00	51-030-0003	8	ater int 8	CDP	12351	446233673	21.0	23.0
Mon 1 Mar 2021 00:00:00	Mon 1 Mar 2021 00:00:00	51-030-0003	8	ater int 8	SL	12351	446233000	20.0	23.0
Mon 1 Mar 2021 00:00:00	Mon 1 Mar 2021 00:00:00	51-030-0003	9	ater int 9	CDP	12351	446233598	23.0	29.0
Mon 1 Mar 2021 00:00:00	Mon 1 Mar 2021 00:00:00	51-030-0003	9	ater int 9	SL	12351	446233536	22.0	25.0
Tue 2 Mar 2021 00:00:00	Tue 2 Mar 2021 00:00:00	51-030-0003	1	ater int 1	CDP	12351	446233284	18.0	20.0
Tue 2 Mar 2021 00:00:00	Tue 2 Mar 2021 00:00:00	51-030-0003	1	ater int 1	SL	12351	446233345	18.0	20.0

Figura 35 – Esempio acquisizione dati

Il dataset dei consumi contiene le rilevazioni effettuate dai ripartitori di calore montati sui singoli radiatori nelle unità immobiliari. Il dato è rilevato in unità di conteggio adimensionali ( $UC$ ) e successivamente moltiplicato per un coefficiente dimensionale che tiene conto della potenza termica del radiatore su cui è installato (dato certificato o ottenuto mediante sopralluogo in campo) e delle modalità di installazione (dato del fabbricante) rilevato è una grandezza adimensionale che viene convertita in unità di ripartizione ( $UR$ ) proporzionali al consumo. Per l'edificio caso di studio, i dati sono scaricati dalla piattaforma ISTA in formato Excel. Nel locale caldaia è presente un contatore di energia termica diretto, per la misura dei consumi dell'intero edificio.

Anche per il dataset dei consumi è stato sviluppato un apposito *parser* per importare i dati in maniera automatica direttamente dai report generati dalla piattaforma, limitando così il pre-processing manuale da parte dell'operatore. I file sono stati successivamente elaborati con una procedura del SW per creare un unico file nell'intero periodo.

### 3.2.1.2 Serie storiche dei dati meteorologici

I dati meteorologici relativi alle temperature minima, media e massima, umidità e piovosità su base giornaliera per il comune di Anagni sono stati acquisiti tramite sistema Wolfram Mathematica, che dispone di diverse banche dati per il meteo, tra cui WeatherData e WindSpeedData. È stato quindi possibile inserire direttamente nel modello di calcolo le serie storiche dei valori relativi a pioggia, umidità, intensità del vento, temperature esterne minime, massime e medie. A titolo di esempio in Figura 36 viene riportato l'andamento delle temperature registrate nel 2020.

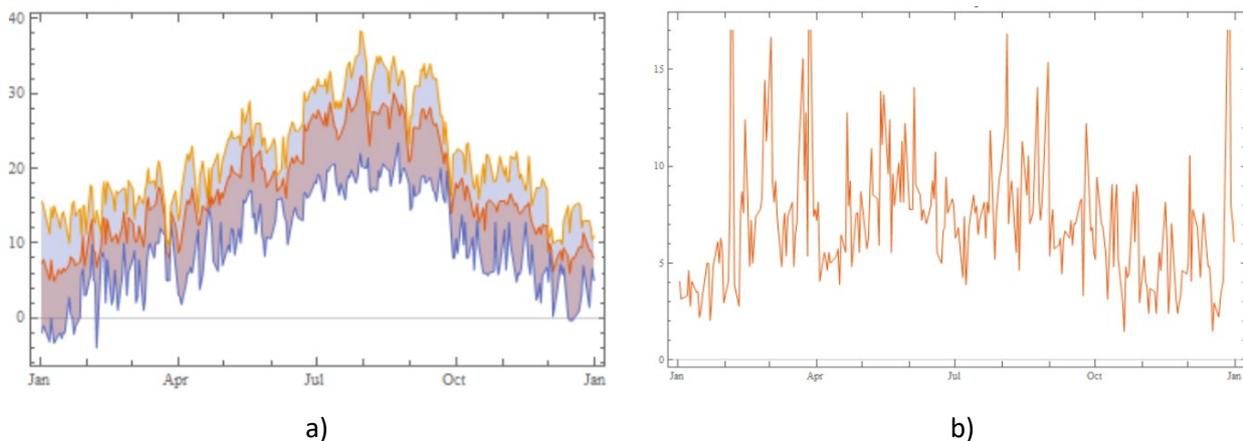


Figura 36 - Meteo Anagni 2020 (source WeatherData): a) temperature, °C; b) velocità del vento, m/s

In aggiunta ai dati iniziali ed alle funzioni scritte per semplificazione dell'import dei dati grezzi, è stata impostata una funzione di calcolo del Grado Giorno, ovvero la somma estesa a tutti i giorni di un periodo annuale convenzionale di riscaldamento, delle sole differenze positive giornaliere tra la temperatura ambiente indoor, convenzionalmente fissata a 20°C, e la temperatura media esterna giornaliera

$$GG = \sum_{e=1}^n (T_0 - T_e) \quad (3.3)$$

dove: i) n è il numero di giorni del periodo convenzionale di riscaldamento; ii)  $T_0$  è la temperatura di ambiente convenzionale (20° in Italia); iii)  $T_e$  è la temperatura media esterna giornaliera.

### 3.2.2 Descrizione del Software

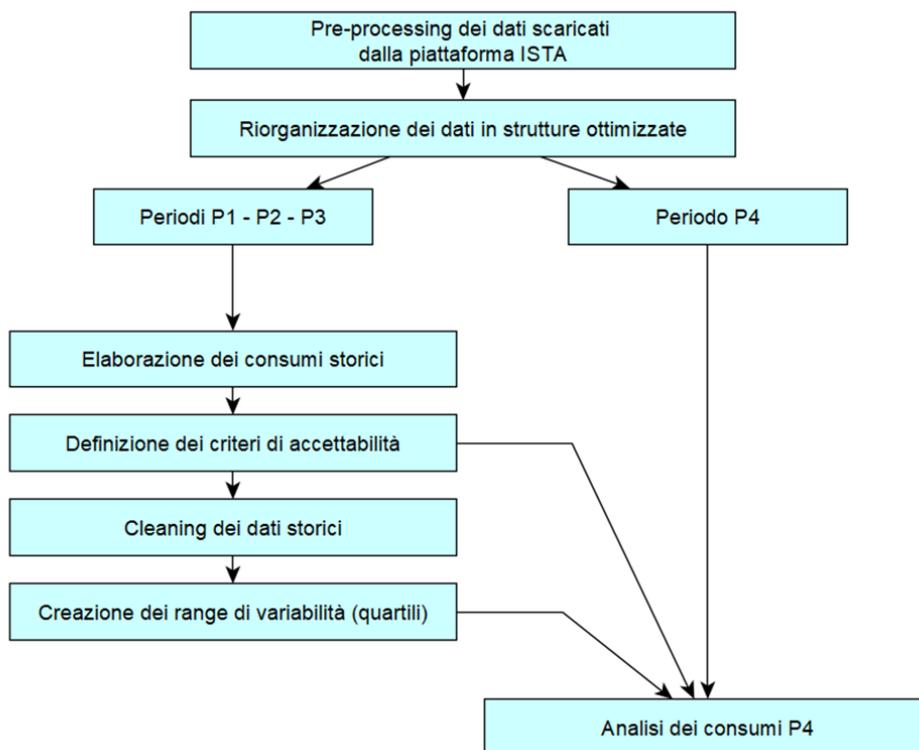
Ai fini del rilevamento dei fault, della loro localizzazione e della relativa diagnostica vengono analizzati i dataset disponibili e le rispettive interazioni. Le serie storiche importate nel software di calcolo sono state oggetto di una prima fase di elaborazione formale per ottenere un insieme di dati ottimizzato per la successiva manipolazione. Sono pertanto state implementate tecniche di data "cleaning" e "manipulation" su ciascuna delle grandezze disponibili. Successivamente le serie storiche dei consumi sono state suddivise in due insiemi:

- i dati delle stagioni 2017/18, 2018/19, 2019/20 (periodi P1, P2 e P3), utilizzati per creare l'insieme dei dati storici dell'edificio, con i quali vengono studiate le caratteristiche dei comportamenti degli

utenti, definiti i criteri di classificazione dei malfunzionamenti, identificati gli intervalli di variabilità dei consumi;

- i dati della stagione 2020/21 (periodo P4), utilizzati come insieme di prova per simulare l'applicazione della metodologia.

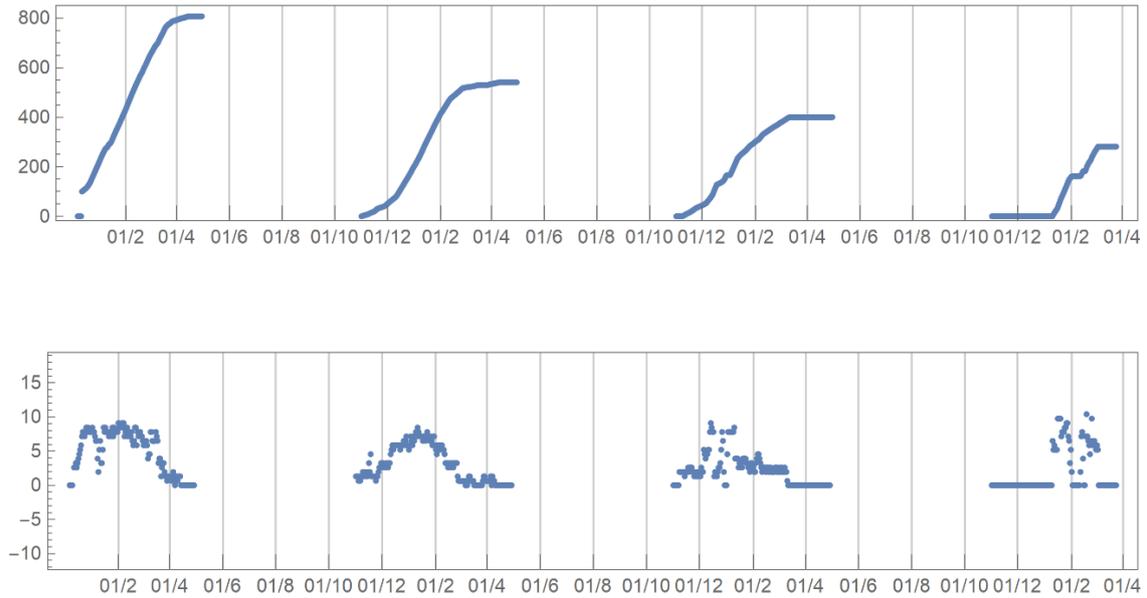
Il software per l'elaborazione dei dati e l'identificazione dei fault è stato creato utilizzando il linguaggio Wolfram Mathematica®. Il software acquisisce in ingresso i dati relativi ai consumi ed alle condizioni meteo e restituisce grafici ed elaborazioni per ciascuna unità immobiliare. In Figura 37 viene riportata una flow chart del Software sviluppato (il cui listato è riportato in appendice al presente rapporto).



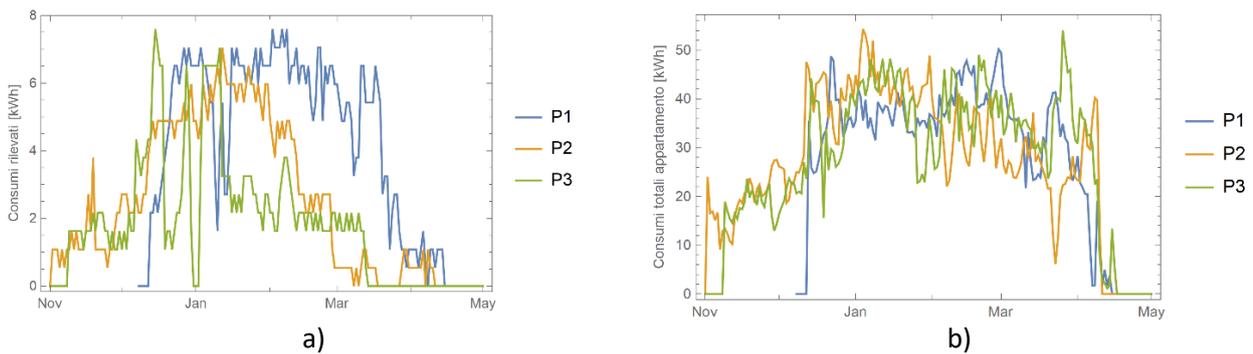
**Figura 37 - Flow chart del software generato per l'analisi dei consumi**

### 3.2.3 Analisi dei consumi storici

Come detto, il dataset dei consumi contiene le rilevazioni effettuate dai ripartitori di calore montati sui singoli radiatori nelle unità immobiliari. Il dato è rilevato in unità di conteggio adimensionali ( $UC$ ) cumulate, ovvero ogni giorno viene restituito il numero di  $UC$  conteggiate dal ripartitore. Per ricondurre il dato da unità conteggio adimensionali ( $UC$ ) ad unità di ripartizione adimensionali ( $UR$ ), il dato adimensionale viene dapprima moltiplicato per un coefficiente  $K$  che tiene conto sia della potenza termica del radiatore su cui è installato il dispositivo (attraverso un fattore  $K_Q$ , determinato dalla certificazione del radiatore o ottenuto mediante sopralluogo in campo) che delle modalità di accoppiamento del ripartitore con il corpo scaldante (attraverso un fattore  $K_C$ , fornito dal fabbricante). Le unità di ripartizione risultano così proporzionali al consumo e per ottenere una stima dell'energia effettivamente misurata è possibile moltiplicare l'energia consumata dall'intero edificio per il rapporto tra le  $UR$  misurate e la somma di tutte le  $UR$  nell'edificio



**Figura 39 – UR giornaliera radiatore D02 dell’unità immobiliare Ater 18C Int.2**



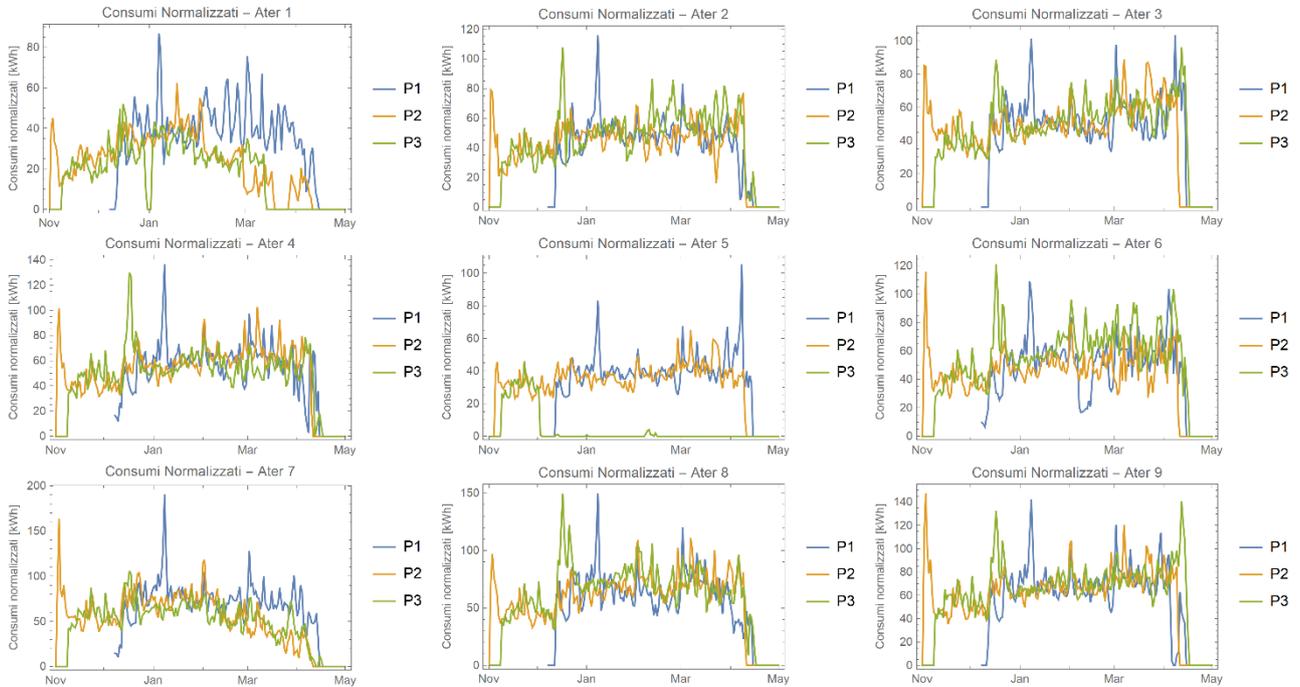
**Figura 40 - Consumi giornalieri Int.02: a) radiatore D02, b) intera unità immobiliare**

### 3.2.4 Consumi giornalieri normalizzati

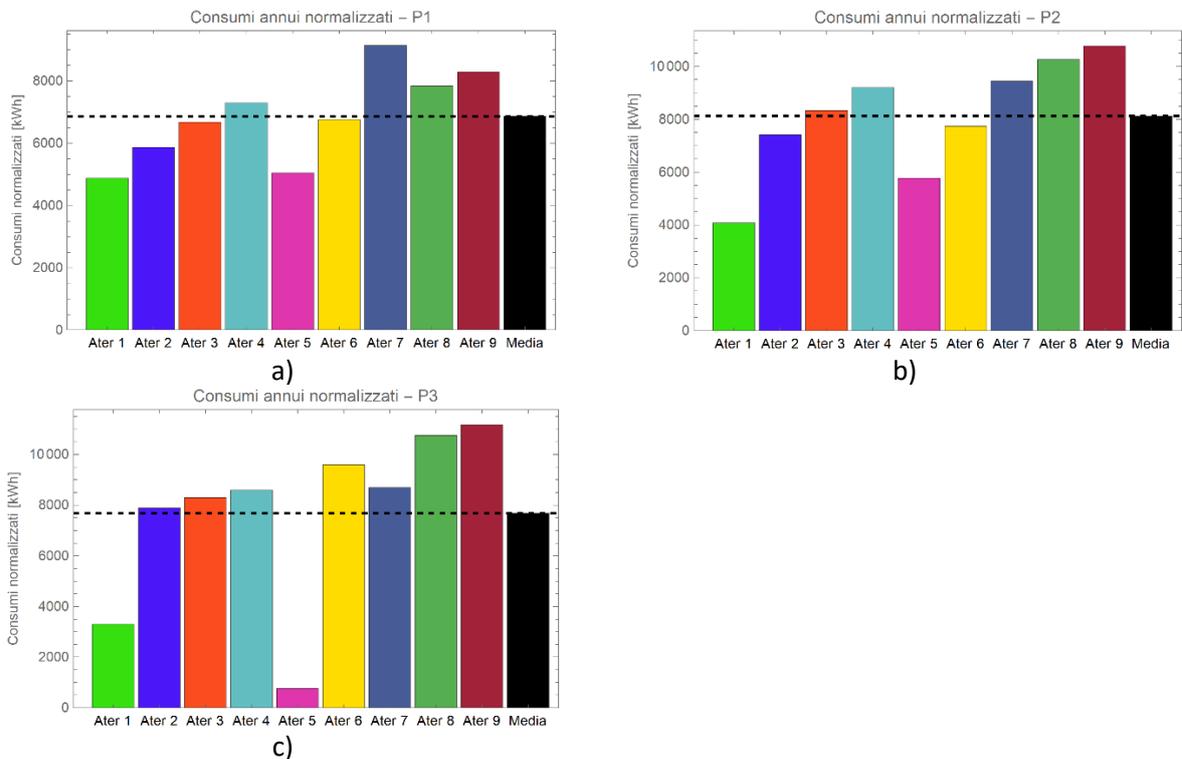
Al fine di confrontare i dati di consumo tra stagioni di riscaldamento diverse (e per questo soggette a condizioni meteo stagionali diverse, più fredde o più calde rispetto ad una stagione di riferimento<sup>3</sup>) i

<sup>3</sup> Comune di Anagni GG=1911 (zona climatica D)

consumi sono stati normalizzati rispetto ai Gradi Giorno registrati nella stagione considerata (vedi Tabella 27). In Figura 41 è riportato l'andamento giornaliero dei consumi normalizzati, mentre in Figura 42 si riporta il consumo totale annuo per le singole unità immobiliari nei periodi considerati (la linea tratteggiata rappresenta la media dei consumi normalizzati nell'edificio).



**Figura 41 - Consumi normalizzati rilevati nei tre periodi per ciascuna unità immobiliare**



### 3.3 Individuazione delle situazioni di fault

Ciascuna unità immobiliare presenta un consumo atteso che può essere determinato: i) per mezzo del modello di simulazione basato sulle caratteristiche termo-fisiche ed impiantistiche dell'edificio (e.g., modello dinamico descritto al paragrafo 3.2) ii) per mezzo di dati storici di consumo (operational rating). Quando il consumo normalizzato misurato presenta scostamenti anomali rispetto al consumo atteso, è possibile associare un comportamento "non virtuoso" dell'utente e/o la presenza di un fault di impianto/edificio.

Dall'analisi delle serie storiche è possibile identificare dati anomali indicativi di un possibile malfunzionamento. Sono di seguito proposti alcuni esempi di criteri e metriche che consentano di operare una prima distinzione tra fault di impianto/edificio e fault per utilizzo "non virtuoso" dell'impianto da parte degli utenti.

#### Fault di Impianto/Edificio

- Identificazione di un fault dei sensori installati (interruzione segnale di misura): sull'impianto si verifica un evento compatibile con un guasto quando il rilevatore non registra variazione di consumi tra due o più giorni successivi. La rilevazione nulla viene identificata e tracciata monitorando il consumo giornaliero rilevato; il sistema di monitoraggio riporta la data del primo rilevamento e il numero di giorni consecutivi in cui la rilevazione è nulla.
- Scostamento del profilo di consumo normalizzato rilevato rispetto al consumo storico: si verifica un evento compatibile con un guasto quando il consumo normalizzato misurato è disallineato rispetto ai consumi storici considerata anche la variabilità tipica registrata.
- Correlazione tra temperature esterne e velocità del vento rispetto ai consumi normalizzati: l'analisi dello storico della correlazione tra consumi normalizzati rilevati e la temperatura giornaliera per ciascuna unità immobiliare può essere monitorata per intercettare dei valori anomali rispetto allo storico dell'appartamento o del dispositivo oppure rispetto agli altri appartamenti o dispositivi nello stesso periodo. L'analisi dello storico della correlazione tra consumi normalizzati rilevati e la velocità del vento per ciascuna unità immobiliare può essere indicatore di un decadimento delle prestazioni energetiche dell'edificio (e.g. scarsa tenuta dei serramenti, distacco dell'intonaco esterno, etc.)

#### Fault per utilizzo "non virtuoso"

- Consumo eccessivo: valore di consumo superiore al consumo medio normalizzato dell'edificio o delle altre unità immobiliari con caratteristiche simili (e.g. superficie, piano, esposizione, etc.);
- Scostamento tra temperatura indoor e temperature di comfort: per ciascuna unità immobiliare viene elaborato il conteggio del numero di giorni in cui la temperatura interna è disallineata rispetto alle temperature massime e minime di comfort (e.g. fuori dell'intervallo tra 18°C e 22°C);
- Disallineamento tra temperatura esterna e consumo normalizzato: quando il valore di correlazione si discosta dagli intervalli di variabilità rilevati è ipotizzabile un comportamento non virtuoso da parte dell'utente;

Sulla base delle considerazioni sopra esposte e al fine di sperimentare il Software sviluppato, nel presente rapporto di ricerca sono stati considerati i fault e le rispettive metriche descritti in Tabella 28.

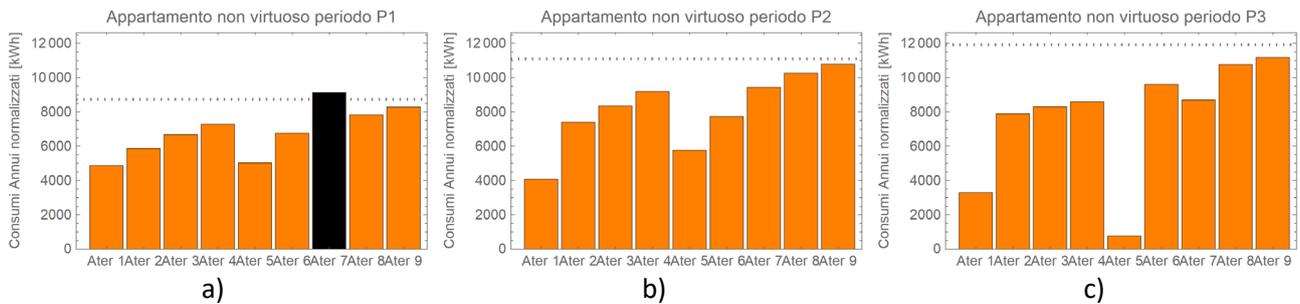


**Tabella 28 – Descrizione dei fault e delle metriche utilizzate**

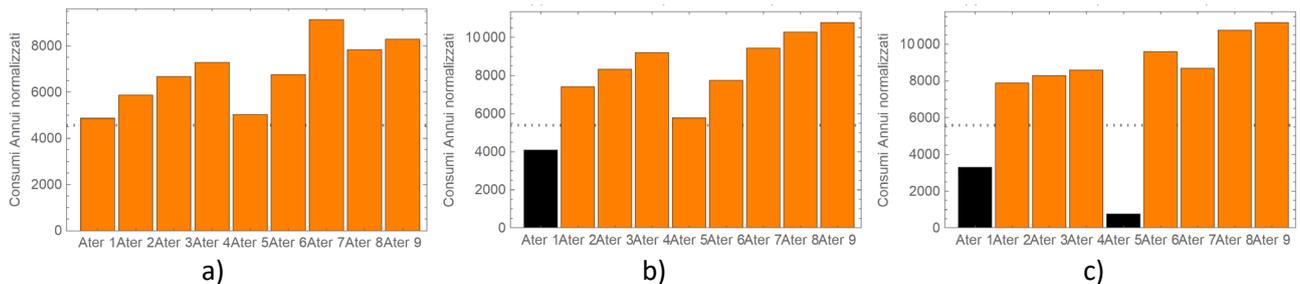
<i>Descrizione del fault</i>		<i>Metrica</i>	<i>Soglia</i>
1	Consumo troppo alto di una unità immobiliare rispetto alle altre unità immobiliari	Ordinati in senso decrescente i consumi annui normalizzati, la differenza tra il consumo annuo normalizzato di una unità immobiliare rispetto alla precedente è superiore alla differenza rispetto alla successiva moltiplicata per un valore di soglia percentuale	50 %
2	Consumo troppo basso di una unità immobiliare rispetto alle altre unità immobiliari	Quando il consumo normalizzato di una unità immobiliare è inferiore di un valore di soglia percentuale rispetto al consumo massimo delle altre unità immobiliari nello stesso periodo	50%
3	Fault ripartitore	Quando il ripartitore registra consumi nulli per più giorni consecutivi	3 gg
4	Variabilità dei consumi rispetto alla media mobile delle tre stagioni precedenti	Quando una unità immobiliare registra consumi normalizzati che si discostano in più o in meno dal valore medio registrato nei tre periodi di riscaldamento precedenti per un fissato valore di soglia percentuale	± 30%
5	Correlazione dei consumi con la temperatura esterna	Quando un ripartitore registra un valore di correlazione che si discosta oltre un valore di soglia dal valore di correlazione massimo tra i ripartitori della stessa unità immobiliare	30%
6	Scostamento dal fabbisogno atteso	Quando il consumo normalizzato rilevato è superiore/inferiore per un valore di soglia al fabbisogno atteso;	± 500 kWh
7	Superamento della temperatura di comfort	Quando il numero di giorni in cui la temperatura indoor si discosta dai valori di comfort (intervallo 18-22 °C) supera una soglia predefinita	16 gg

### 3.3.1 Analisi delle serie storiche di consumi

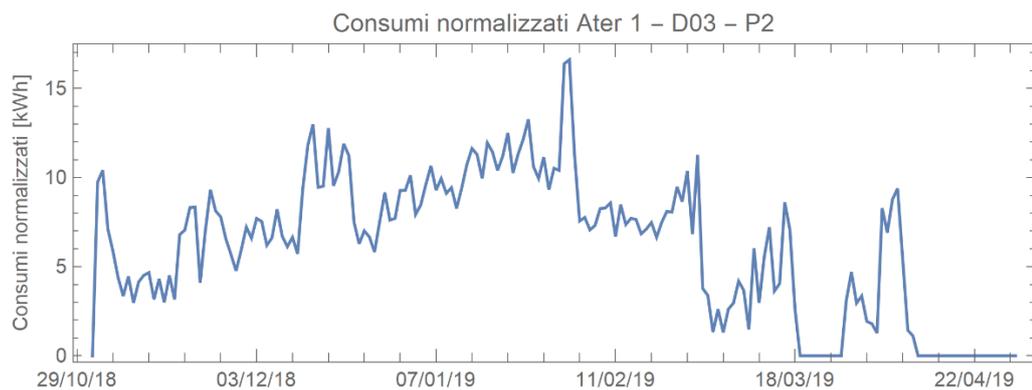
Nelle successive Figura 43, Figura 44 e Figura 45 sono riportati in maniera grafica a titolo di esempio i risultati dell'analisi effettuata per la ricerca dei fault indicati. Per il fault #4 si può considerare direttamente la Figura 65 che riporta l'analisi del periodo P4 rispetto ai tre periodi precedenti.



**Figura 43 - Fault #1, Soglia 50%: a) P1, b) P2, c) P3**



**Figura 44 - Fault #2, Soglia 50%: a) P1, b) P2, c) P3**



**Figura 45 - Fault #3, Soglia: 3 giorni consecutivi**

La successiva analisi dei fault dei ripartitori prevede le seguenti considerazioni:

- **fault isolato**: può essere dovuto ad un malfunzionamento o ad uno spegnimento volontario (e.g. valvola termostatica su posizione 0); in questo caso le rilevazioni non conformi alterano il set di training del modello, e pertanto non possono essere utilizzate per i fini del modello di classificazione (per mantenere la continuità dell'insieme di dati, al rilevamento identificato come fault verrà sostituita una serie storica costruita come media dei rilevamenti dei restanti dispositivi nell'unità immobiliare);

- fault di più (o tutti) dispositivi: è possibile che l'unità immobiliare non sia stata occupata per un periodo più o meno lungo della stagione (e.g. unità immobiliare 5, periodo P3); in questo caso l'intera serie storica del periodo di interesse viene esclusa dalle analisi.

### 3.3.2 Analisi della correlazione con i dati meteorologici

La normalizzazione delle serie storiche dei consumi con i dati meteorologici viene sviluppata allo scopo di tenere conto delle variazioni ai profili di consumo legati alle condizioni climatiche (in particolare temperatura esterna e velocità del vento). Un ulteriore criterio consiste nello stimare la correlazione tra i consumi giornalieri e le corrispondenti temperature esterne registrate.

Le serie storiche dei consumi sono confrontate con le serie storiche dei parametri climatici, nel presupposto che un consumo "virtuoso" sia coerente con l'andamento delle temperature esterne. Nel caso di studio in esame, lo studio della correlazione sulle tre annualità viene svolto sulle diverse variabili meteorologiche disponibili, con l'obiettivo di identificare i parametri da monitorare. A tale scopo, l'indice di correlazione tra due serie si basa sulla distanza euclidea tra i valori delle serie temporali e determina il grado di similitudine tra le due serie considerate.

#### 3.3.2.1 Correlazione con la temperatura massima giornaliera (fault #5)

La Figura 46 mostra la correlazione stimata tra consumi registrati nelle singole unità immobiliari e la temperatura massima giornaliera esterna (fault 5), mentre la Figura 47 mostra la correlazione media stagionale tra i consumi rilevati e la temperatura massima esterna. La temperatura esterna ed i consumi sono in relazione negativa. I grafici riportano pertanto la correlazione con segno inverso.

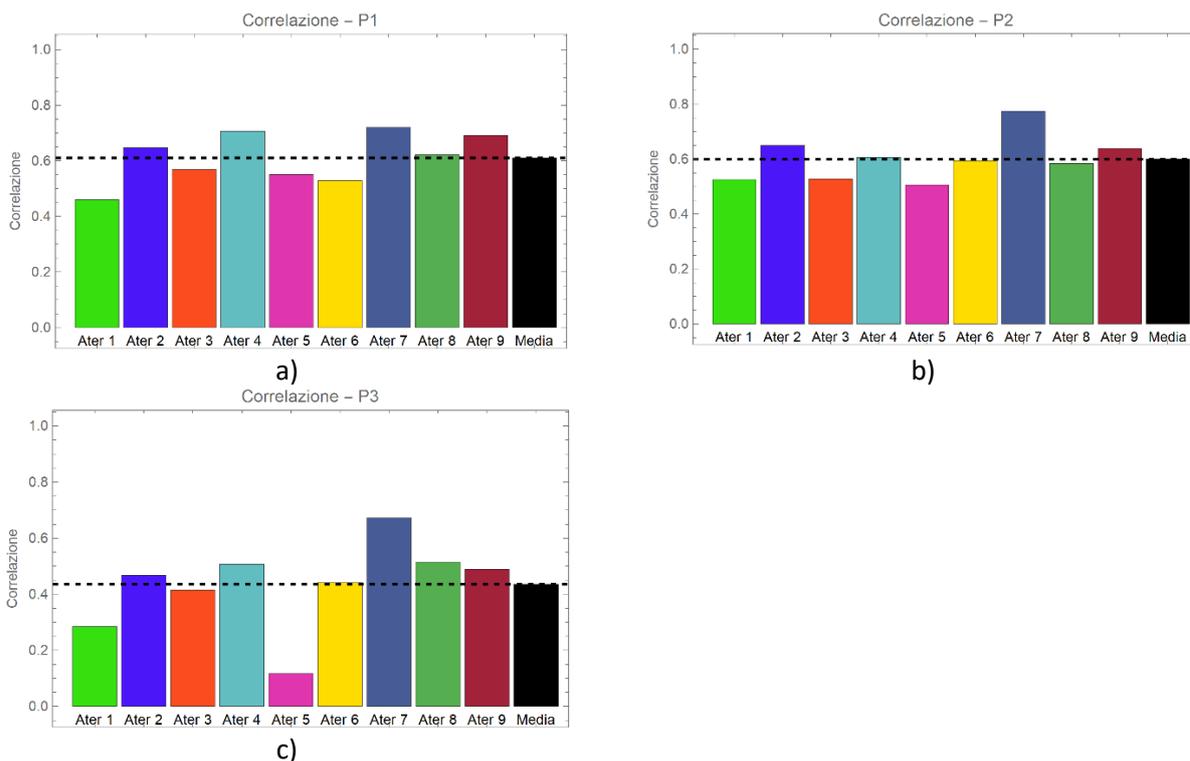
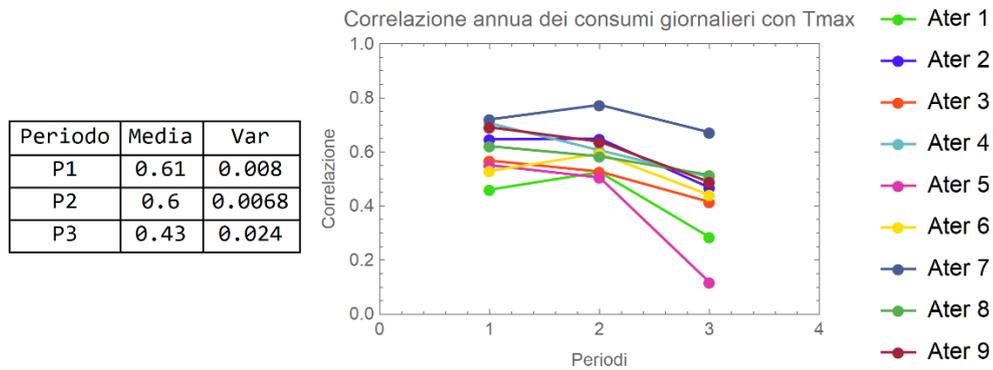
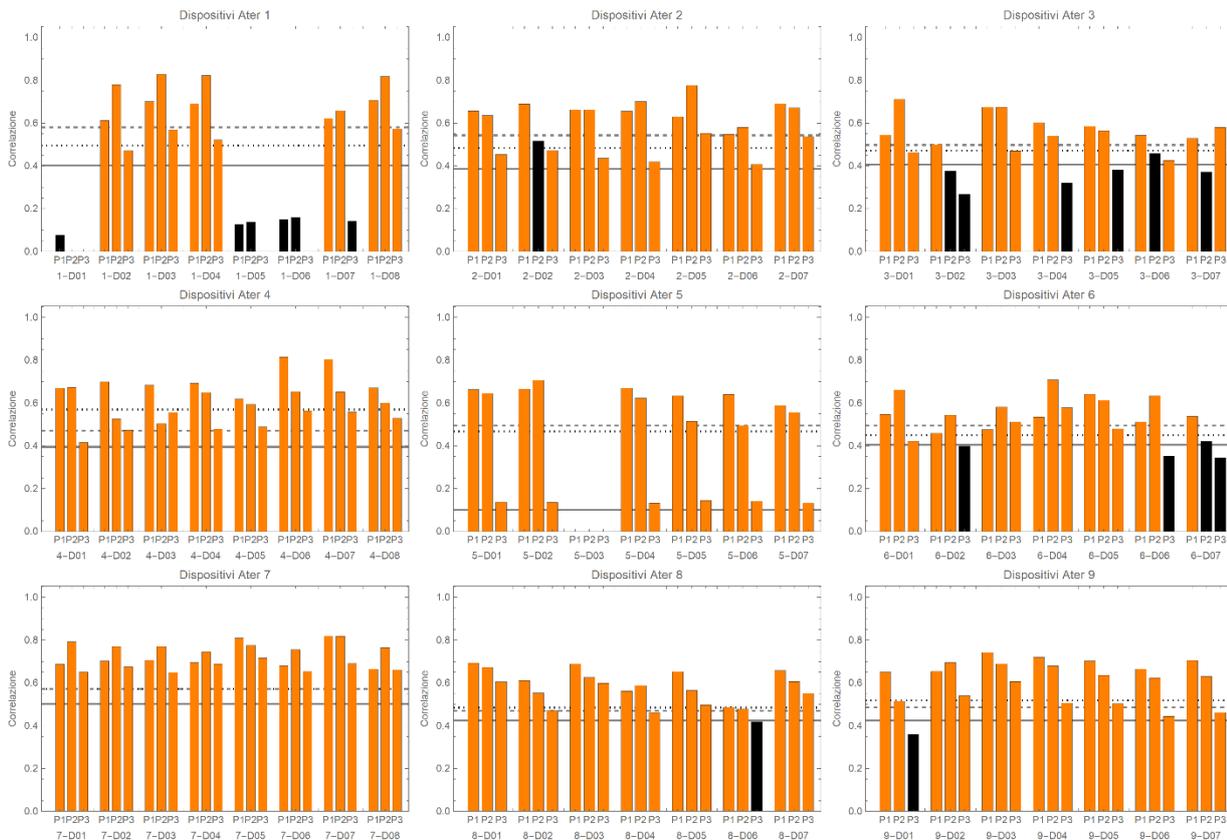


Figura 46 – Fault #5 Correlazione media tra consumi e temp. max esterna, periodo a) P1, b) P2, c) P3



**Figura 47 - Correlazione media stagionale tra i consumi rilevati e la temperatura massima esterna**

In analogia a quanto descritto per il rilevamento di un fault a partire dai consumi normalizzati, in questo paragrafo viene analizzato se la correlazione calcolata per i consumi registrati da un ripartitore si discosta oltre un valore di soglia dal valore di correlazione massimo tra i dispositivi della stessa unità immobiliare. In Figura 48 si riporta l'andamento delle correlazioni tra i ripartitori nei tre periodi investigati avendo considerato un valore di soglia del 30%. La Tabella 29 riassume i fault individuati con questo criterio.



**Figura 48 – Fault #5, ripartitori identificati come possibili fault, Soglia = 30%**

**Tabella 29 - Ripartitori classificati come possibili fault 5 dal criterio di correlazione nei tre periodi**

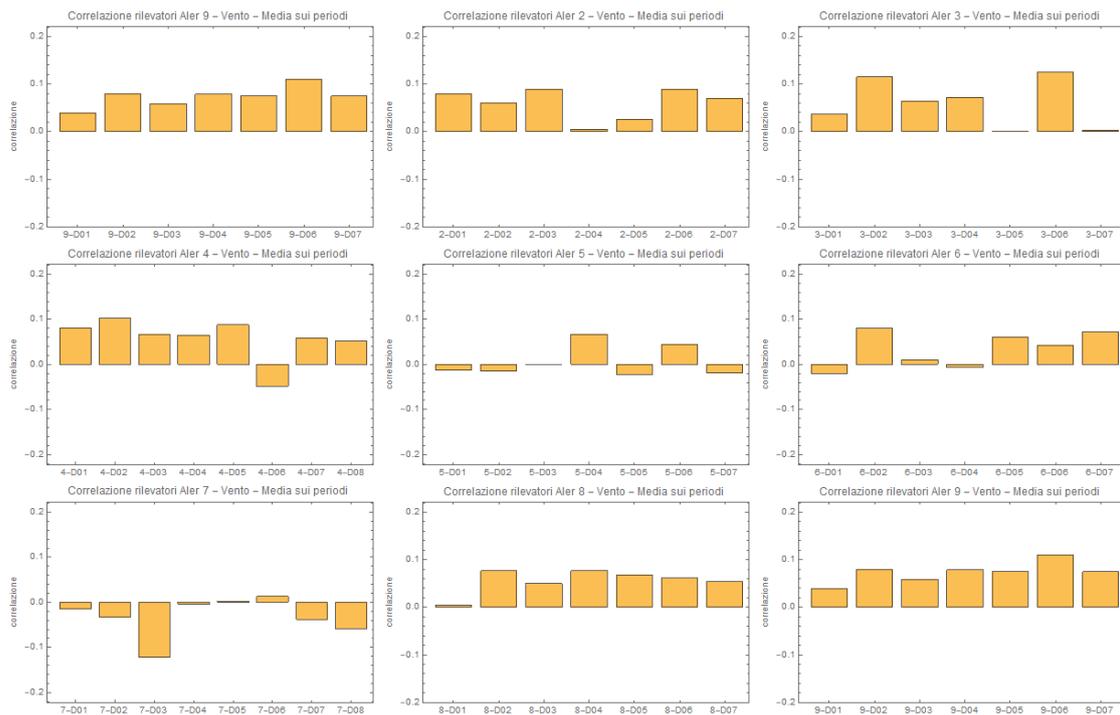
<i>Unità immobiliare</i>	<i>Periodo P1</i>	<i>Periodo P2</i>	<i>Periodo P3</i>
<i>Interno 1</i>	R01 – R05 – R06	R05 – R06	R07
<i>Interno 2</i>		R02	
<i>Interno 3</i>		R02 – R06 – R07	R02 – R04 – R05
<i>Interno 4</i>			
<i>Interno 5</i>			
<i>Interno 6</i>		R07	R02 – R06 – R07
<i>Interno 7</i>			
<i>Interno 8</i>			R06
<i>Interno 9</i>			R01

Dall’analisi della correlazione dei consumi registrati dai ripartitori si osserva che il valore di correlazione medio tra i consumi e la temperatura massima esterna è pari a circa 0.6. Sono inoltre evidenti alcuni ripartitori che presentano un valore di correlazione molto basso (e.g. D01, D05 e D06 dell’Int.01 nel P1 e D03 dell’Int.05 nel P2) e questo può essere imputato: i) a un malfunzionamento del ripartitore; ii) alla chiusura volontaria della valvola termostatica da parte dell’utente; iii) ad un’apertura sempre massima della valvola termostatica (comportamento improprio). In Figura 47 sono riportate le correlazioni medie stagionali per ciascuna unità immobiliare nei tre periodi considerati. Dall’analisi dei dati si osserva come l’indice di correlazione sia sostanzialmente coerente nei periodi P1 e P2, mentre nel periodo P3 si evidenziano una generale diminuzione della correlazione e valori anomali per le unità immobiliari Int.01 e Int.05.

### 3.3.2.2 Correlazione con la velocità del vento

Un ulteriore parametro climatico significativo per l’analisi dei consumi è la velocità del vento. Infatti, in presenza di serramenti a scarsa tenuta le infiltrazioni di aria dall’esterno risultano significative e sono quindi causa di sprechi di energia. A questo scopo, sono analizzati i valori di correlazione tra la serie storica dei consumi giornalieri rilevati dal singolo sensore e la velocità del vento massima giornaliera di ciascun periodo<sup>4</sup>. Viene poi elaborata la media delle correlazioni su tutti i periodi rilevati (Figura 49). Dai risultati ottenuti non si evidenziano correlazioni significative tra i consumi e la velocità del vento massima giornaliera, pertanto non verrà utilizzata per l’identificazione di fault.

<sup>4</sup> I dati relativi alla velocità del vento sono scaricati dal repository di Wolfram Language (*WeatherData Source Information—Wolfram Language Documentation*). Non essendo disponibili dati relativi al comune di Anagni, per gli scopi di questa ricerca sono stati utilizzati i valori registrati dalla stazione meteo di Frosinone (distante circa 15 km).



**Figura 49 - Correlazione tra i consumi giornalieri rilevati e la velocità del vento – media sui periodi**

### 3.3.3 Analisi dello scostamento rispetto ai consumi attesi (fault #6)

I dati di consumo normalizzati rilevati nelle diverse stagioni di riscaldamento nelle singole unità immobiliari consentono la possibilità di effettuare un confronto con i valori di fabbisogno stimati mediante una diagnosi energetica. A tale scopo occorre definire un valore di soglia dello scostamento dal fabbisogno stimato (comportamento non virtuoso dell'utente). In Figura 50 si riporta il confronto dei consumi annui normalizzati con il fabbisogno stimato per ciascuna unità immobiliare, avendo considerato un valore soglia di scostamento pari a  $\pm 500$  kWh.

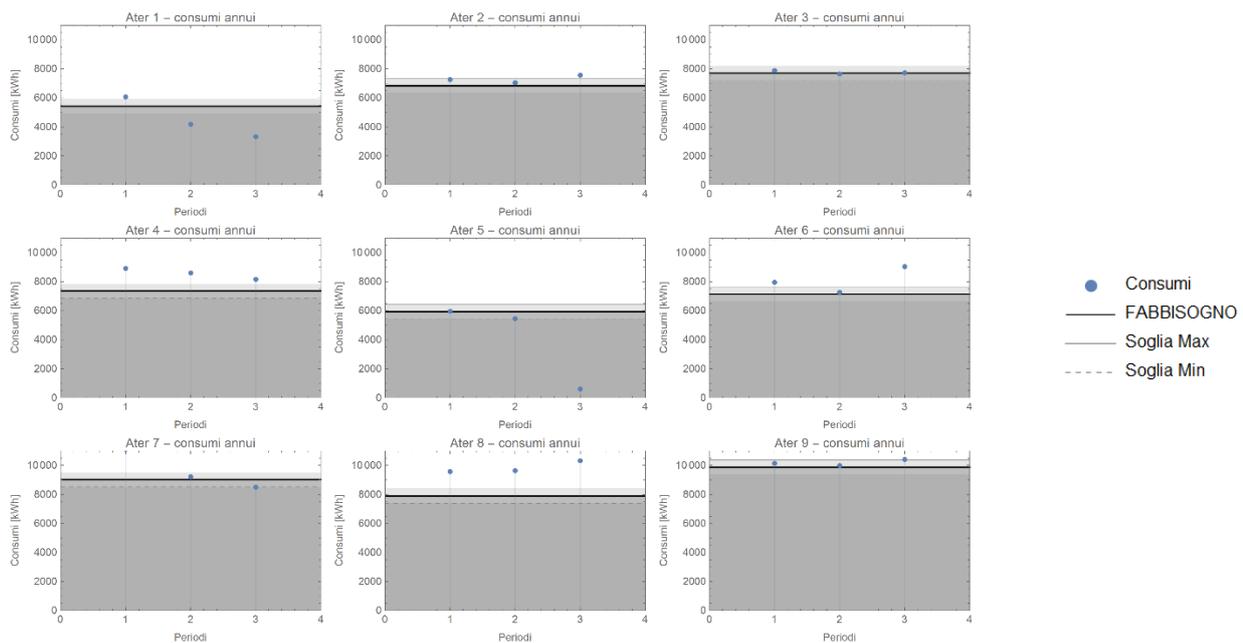


Figura 50 – Fault #6 Analisi dei consumi annui normalizzati rispetto al fabbisogno stimato

La Tabella 30 riporta i risultati dell’analisi dello scostamento dal fabbisogno atteso per le unità immobiliari nei tre periodi:

Tabella 30 - Anomalie rilevate dal confronto con il fabbisogno di ciascuna unità immobiliare

Unità immobiliare	Periodo P1	Periodo P2	Periodo P3	Note
Interno 1	C>>	C<<	C<<	tendenza alla diminuzione dei consumi
Interno 2	==	==	C>>	consumi tendenzialmente in linea con il fabbisogno
Interno 3	==	==	==	utenza “virtuosa”
Interno 4	C>>	C>>	C>>	consumi sempre maggiori del fabbisogno
Interno 5	==	C<<	C<<	consumi tendenzialmente inferiori al fabbisogno
Interno 6	C>>	==	C>>	consumi tendenzialmente maggiori del fabbisogno
Interno 7	==	==	==	utenza “virtuosa”
Interno 8	C>>	C>>	C>>	consumi sempre maggiori del fabbisogno
Interno 9	==	==	==	utenza “virtuosa”

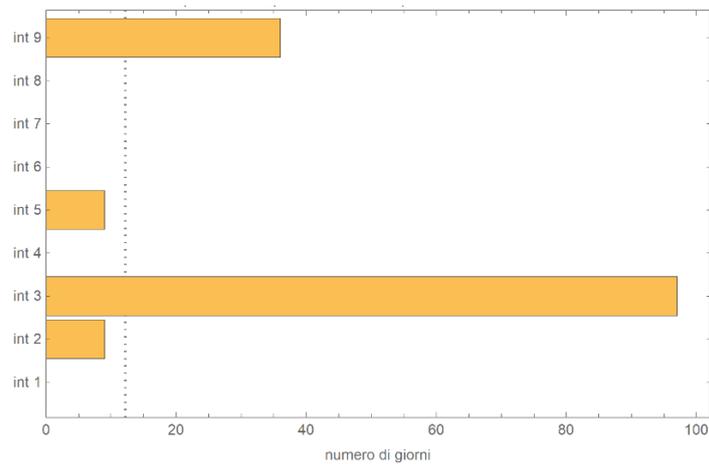
### 3.3.4 Analisi dello scostamento della temperatura interna dalle condizioni di comfort (fault #7)

L’analisi delle temperature interne misurate dai due T-logger installati nella zona notte e nella zona giorno di ciascuna unità immobiliare consente di identificare comportamenti potenzialmente “non virtuosi” dell’utente. Il criterio per stabilire se l’utente mantiene un comportamento virtuoso prevede la valutazione del numero di giorni in cui la temperatura indoor si discosta dai valori di comfort (e.g. tra 18°C e 22°C). Per identificare un comportamento “non virtuoso” si considera un valore di soglia pari a 16 giorni (i.e. circa il 10% del periodo di riscaldamento dal 01/11 al 15/04 per la zona climatica D, quindi in totale 165 giorni).

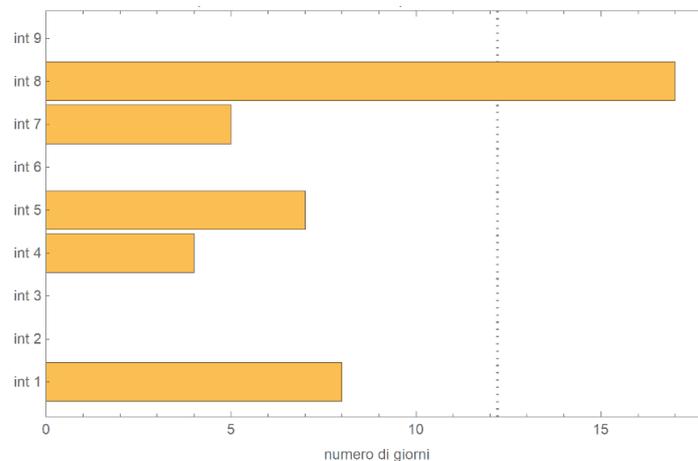
In Figura 51 e Figura 52 sono riportati rispettivamente il numero di giorni in cui nella singola unità immobiliare nel periodo P1 è stata registrata una temperatura interna media superiore alla temperatura

massima di comfort (i.e. 22°C) e quelli con temperatura interna media inferiore alla temperatura minima di comfort (i.e. 18°C). Dall'analisi delle figure si riscontra che le unità immobiliari con comportamento "non virtuoso" sono:

- Int.03 e Int.09 in quanto superano la soglia di 16 giorni con temperature superiori alla temperatura massima di comfort (22°C);
- Int.08, in quanto supera la soglia di 16 giorni con temperature interne al di sotto della temperatura minima di comfort (18°C).



**Figura 51 – Fault #7, P1: Giorni con temp. indoor superiore al limite max di comfort (22°C)**



**Figura 52 - Fault #7, P1: Giorni con temp. indoor inferiore al limite min di comfort (18°C)**

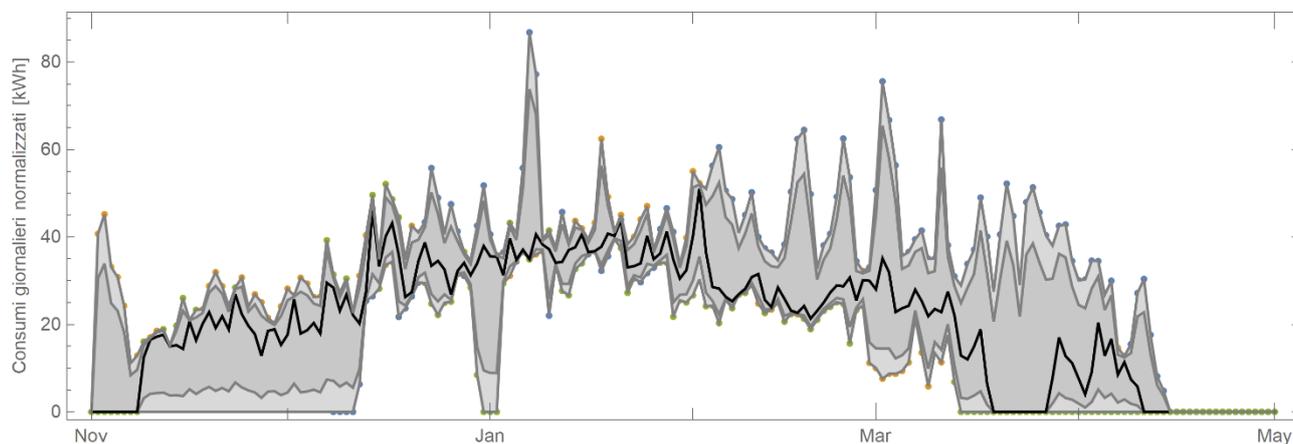
### 3.4 Applicazione del metodo alla stagione di riscaldamento 2020-21

In questo paragrafo viene descritta l'applicazione del metodo sviluppato al caso dell'edificio ATER di Anagni nella stagione di riscaldamento 2020-2021 (periodo P4), operando un confronto con i dati storici delle stagioni precedenti (stagioni 2017-18, 2018-19 e 2019-20, rispettivamente periodi P1, P2 e P3). A tale scopo, i dati di consumo delle stagioni P1, P2 e P3 sono stati ulteriormente elaborati escludendo le serie storiche dei ripartitori e delle unità immobiliari che hanno evidenziato possibili fault, come evidenziato dall'analisi dei precedenti paragrafi:

- le serie dei ripartitori che hanno mostrato fault sono escluse dal dataset;
- per mantenere la continuità dell'insieme di dati, al rilevamento identificato come non conforme viene sostituita una serie storica costruita come media dei rilevamenti dei restanti ripartitori dell'unità immobiliare

Inoltre, la definizione degli intervalli di variabilità dei consumi viene generata escludendo i rilevamenti nulli o con fault individuato di ciascun periodo. Sono pertanto esclusi dal dataset dei consumi storici i consumi dell'unità immobiliare Int.05 in tutti e tre i periodi e quelli dell'unità immobiliare Int.04 nei periodi P1 e P2. Una volta calibrato il dataset è possibile elaborare i valori delle serie storiche dei consumi per determinare le fasce di variabilità dei consumi normalizzati. Vengono elaborati i seguenti cluster di valori: i) per unità immobiliare; ii) per piano; iii) per esposizione (Est, Nord, Ovest); iv) per l'intero edificio.

Per ciascun appartamento vengono ricavate le fasce di variabilità dei consumi giornalieri normalizzati nei tre periodi. In Figura 53 si riporta a titolo di esempio la fascia di variabilità (sono riportati i valori massimi, minimi, medi ed i due quartili di ciascun giorno) relative all'unità immobiliare Int.01.



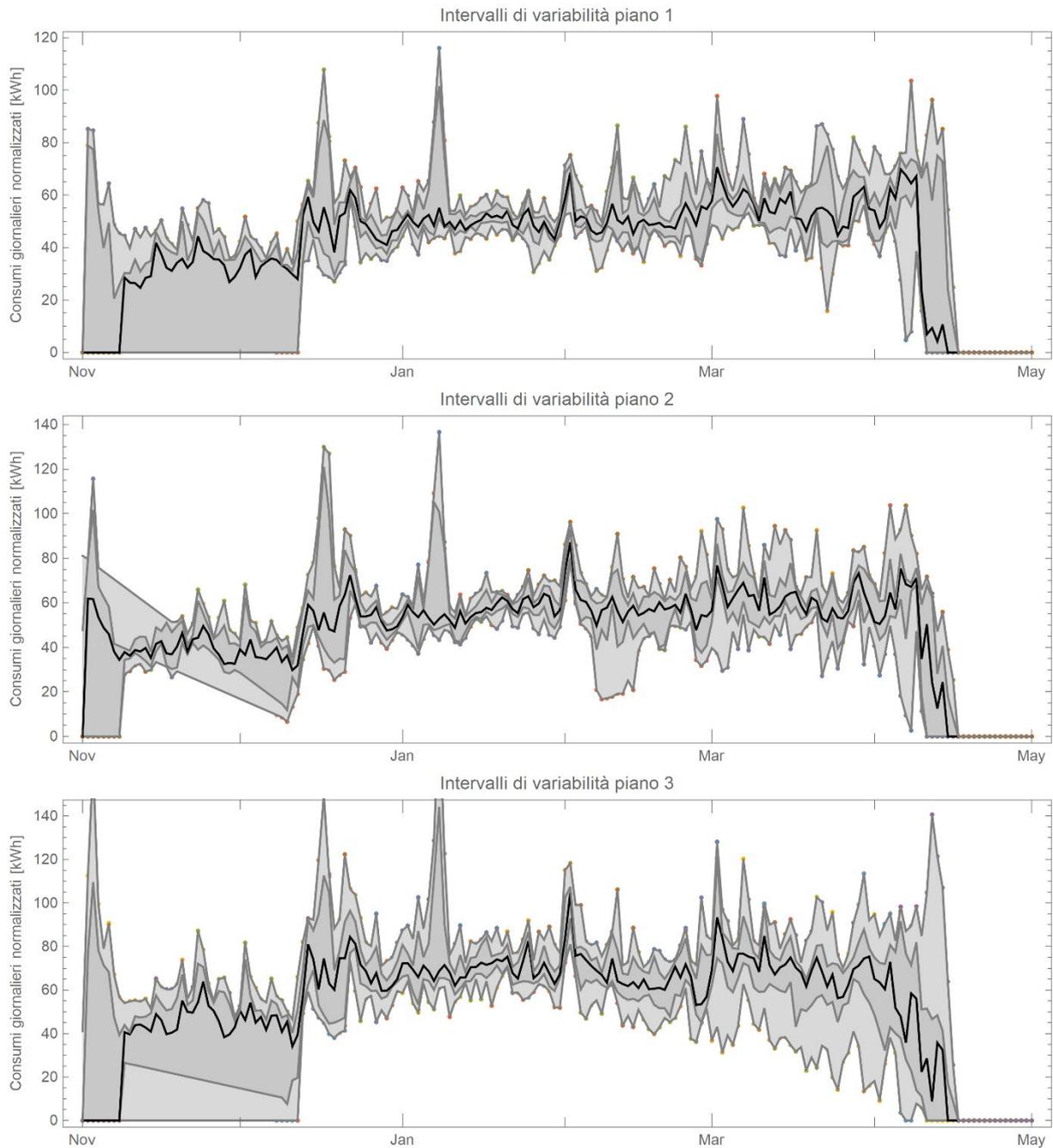
**Figura 53 - Fascia di variabilità dei consumi giornalieri normalizzati Int.01**

Come detto, l'insieme di dati disponibili su tre stagioni di riscaldamento è stato utilizzato come dataset di riferimento. È quindi possibile effettuare una simulazione finalizzata alla individuazione di possibili fault nella stagione di riscaldamento 2020-21. A questo scopo, il software sviluppato verifica il dato puntuale di consumo rispetto ai valori di soglia individuati e, eventualmente, identifica un fault. Il controllo viene svolto a due livelli:

- singolo ripartitore (i.e. rilevazioni nulle per un numero di giorni successivi superiore a tre, distanza dalla serie storica);

- singola unità immobiliare (i.e. rispetto ai dati storici dell’edificio; rispetto ai dati storici dell’unità immobiliare e rispetto ai dati storici del cluster di piano e di esposizione);

In Figura 54 si riporta l’analisi relativa al cluster “piano”.



**Figura 54 - Fascia di variabilità dei consumi giornalieri normalizzati per piano**

In Figura 55 si riporta l'analisi relativa al cluster "esposizione".

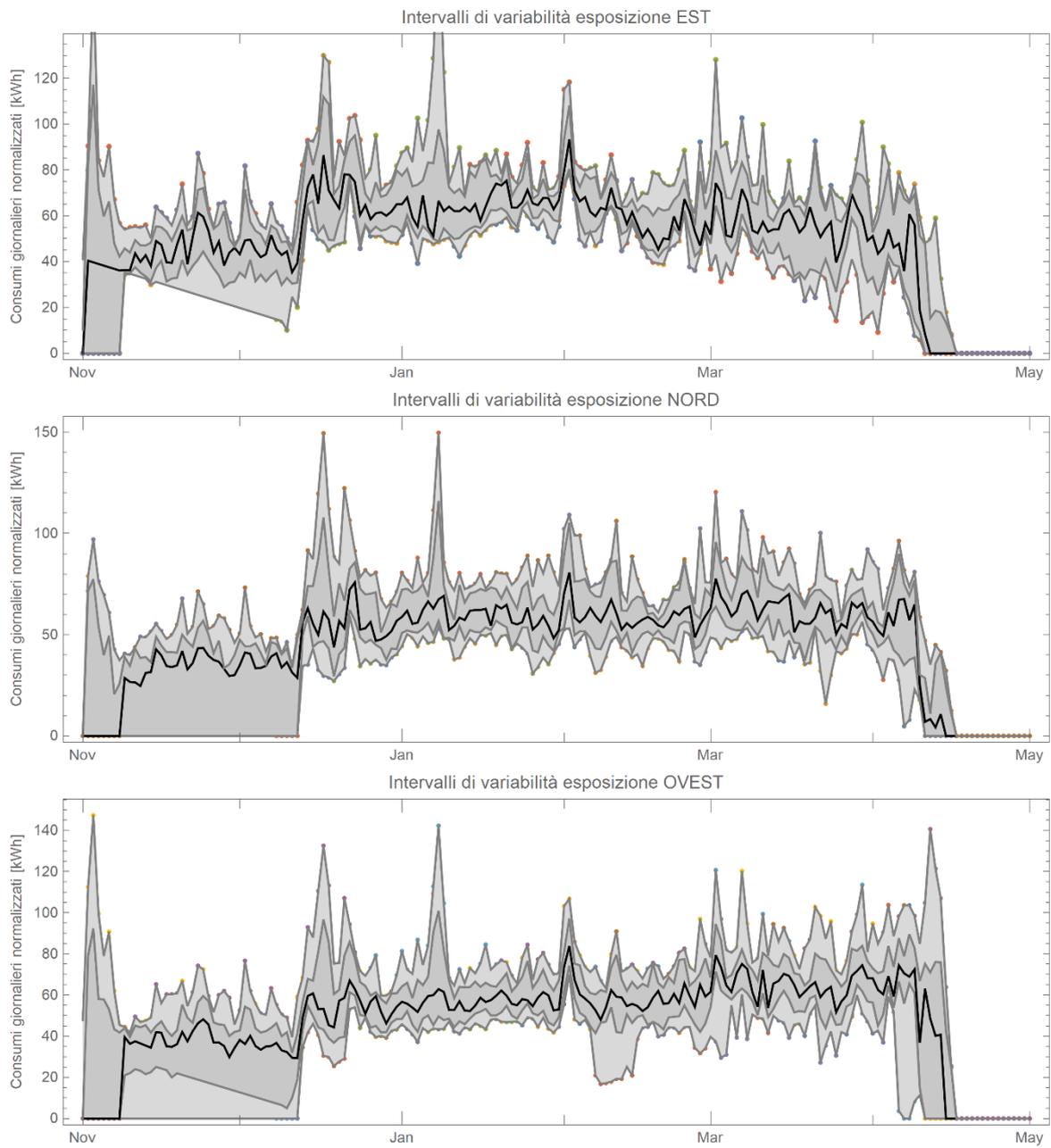
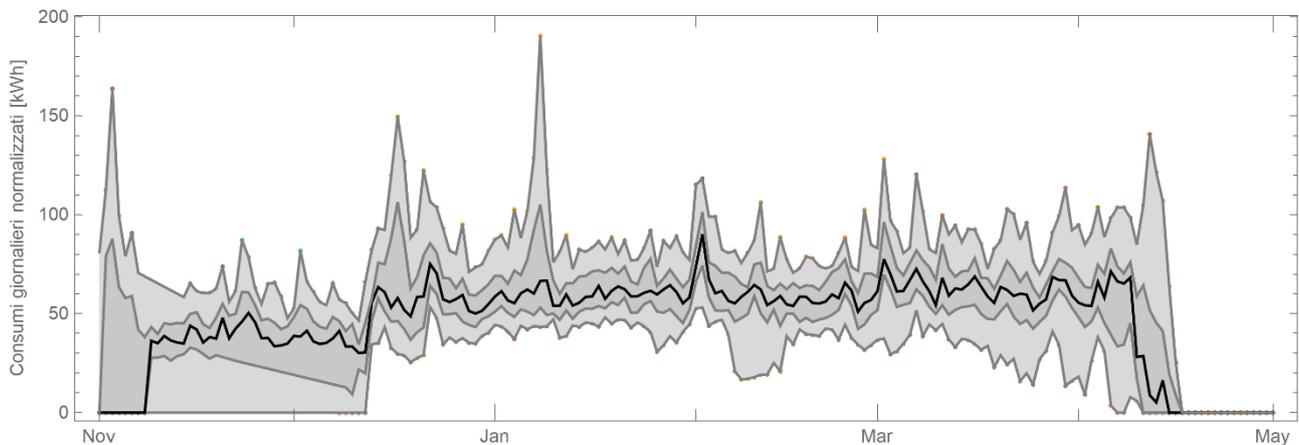


Figura 55 - Fascia di variabilità dei consumi giornalieri normalizzati per esposizione

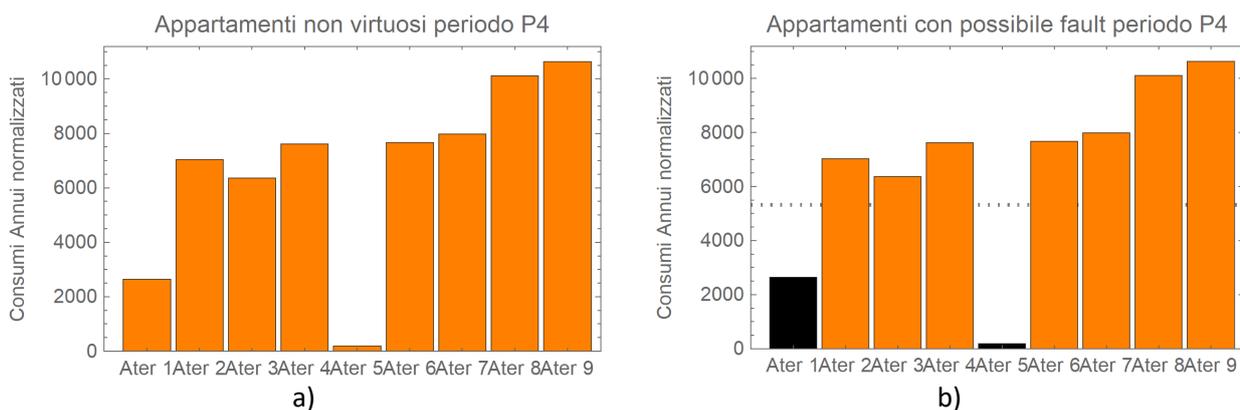
In Figura 56 si riporta l'analisi relativa al cluster "intero edificio".



**Figura 56 - Fascia di variabilità dei consumi giornalieri normalizzati nei tre periodi per l'intero edificio**

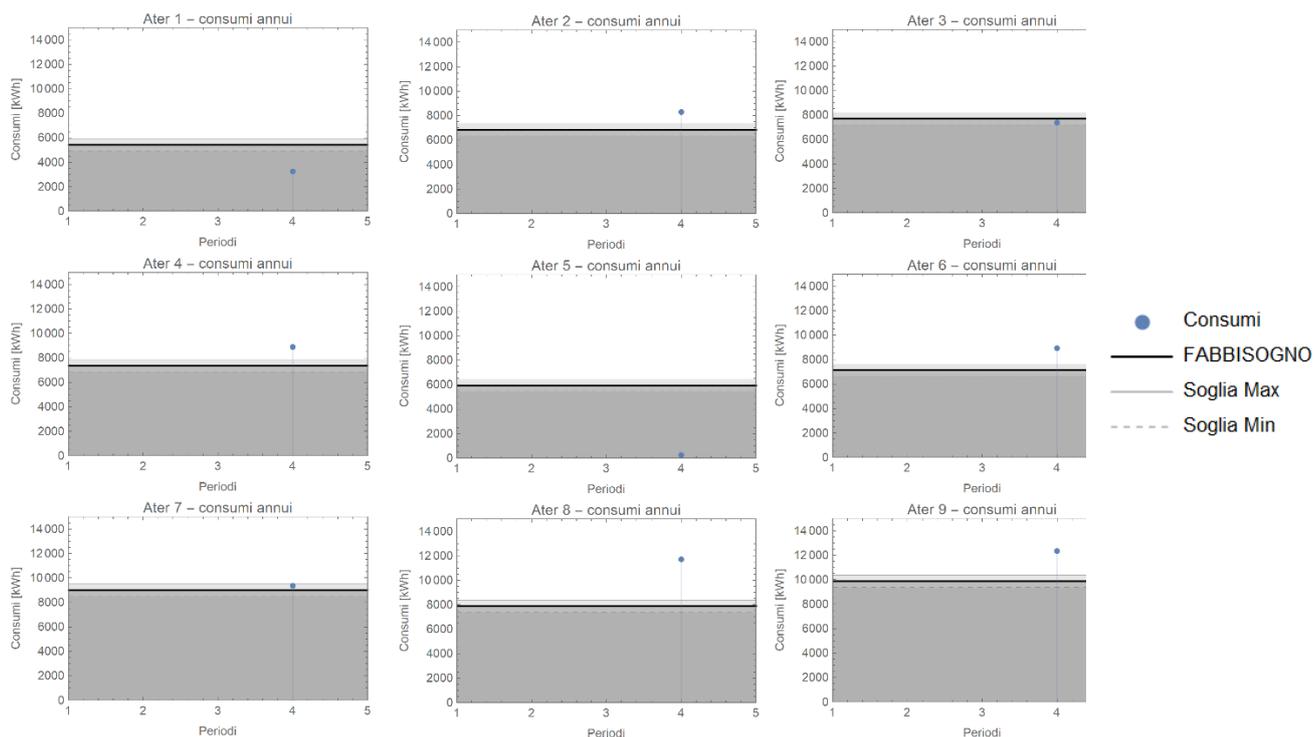
### 3.4.1 Analisi dei fault della singola unità immobiliare

I consumi normalizzati delle singole unità immobiliari sono valutati rispetto ai dati storici dell'edificio, dell'unità immobiliare e del cluster (di piano e di esposizione). In Figura 57 si riportano i risultati dell'analisi di fault 1 e 2 in Tabella 28, effettuata considerando una soglia pari al 50%. Dall'analisi dei risultati emerge il fault per Int.01 che presenta consumi eccessivamente bassi. Int.05 non è classificato come fault dal momento che non è risultato abitato nel periodo P4.



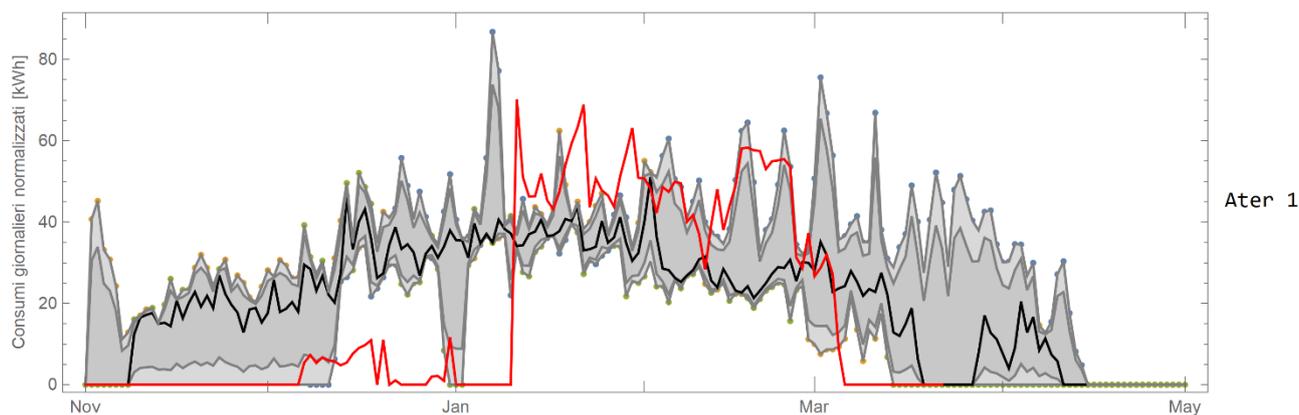
**Figura 57 – Analisi dei consumi, Periodo P4: a) Fault #1, soglia 50%, b) Fault #2, soglia 50%,**

Il consumo normalizzato rispetto ai gradi giorno per il periodo P4 (i.e. GG=1928 °C) viene confrontato con il fabbisogno atteso di riferimento di ciascuna unità immobiliare. In Figura 58 si riporta l'analisi effettuata assumendo un valore soglia ammissibile pari a  $\pm 500$  kWh. Dall'analisi effettuata risultano identificati possibili fault per superamento della soglia massima per le unità immobiliari Int.02, Int.04, Int.06, Int.08 e Int.09 mentre nell'unità immobiliare 01 si registrano consumi inferiori alla soglia minima. L'Int.05 ha presentato consumi nulli non essendo stato occupato nel periodo P4 (informazione acquisita sul posto).

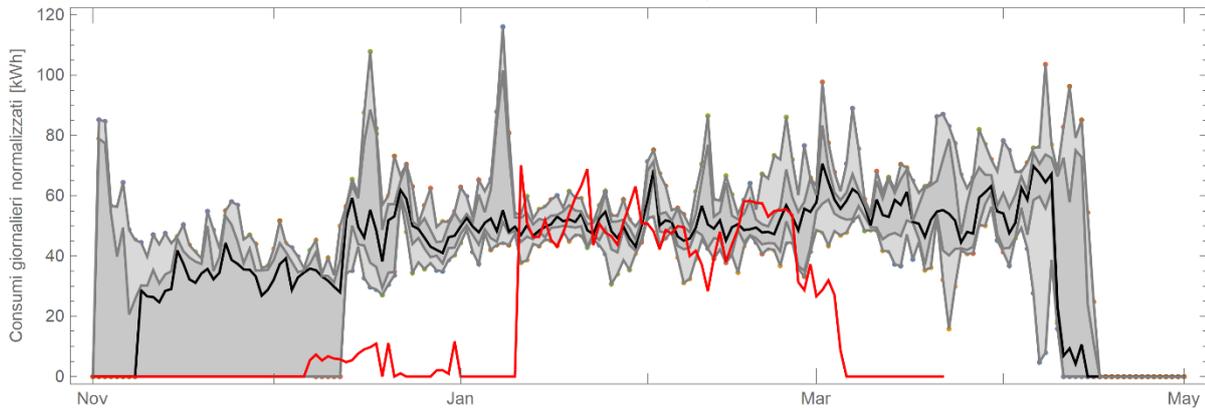


**Figura 58- Fault #6, P4: Confronto dei consumi con il fabbisogno stimato**

L’analisi del consumo normalizzato nel periodo P4 viene effettuata secondo i criteri precedentemente esposti. A titolo di esempio, sono presentati i risultati dell’analisi effettuata per l’unità immobiliare Int.01 rispetto a: ii) i dati storici dell’appartamento (vedi Figura 59), ii) al cluster “piano” (vedi Figura 60), iii) al cluster “esposizione” (vedi Figura 61), iv) all’intero edificio (vedi Figura 62).

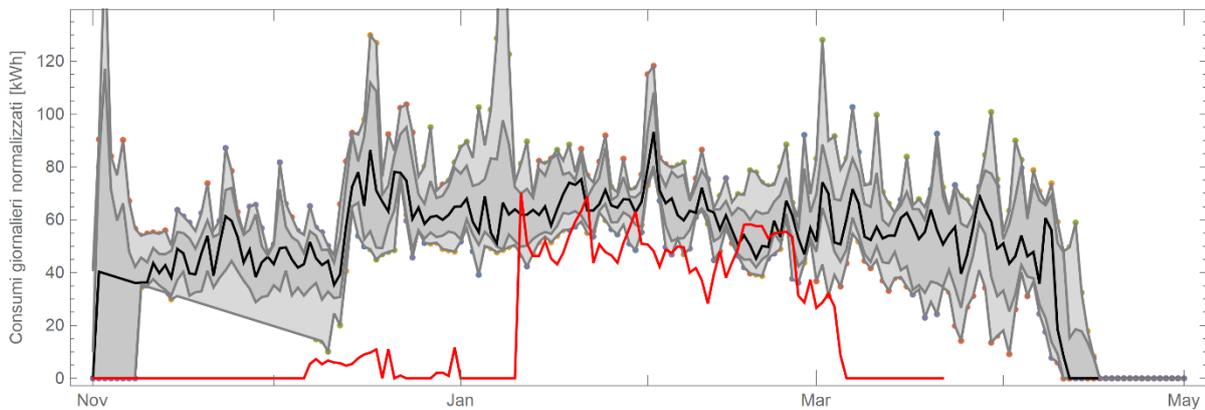


**Figura 59 – Analisi dei consumi dell’unità immobiliare Int.01, periodo P4 rispetto ai dati storici**



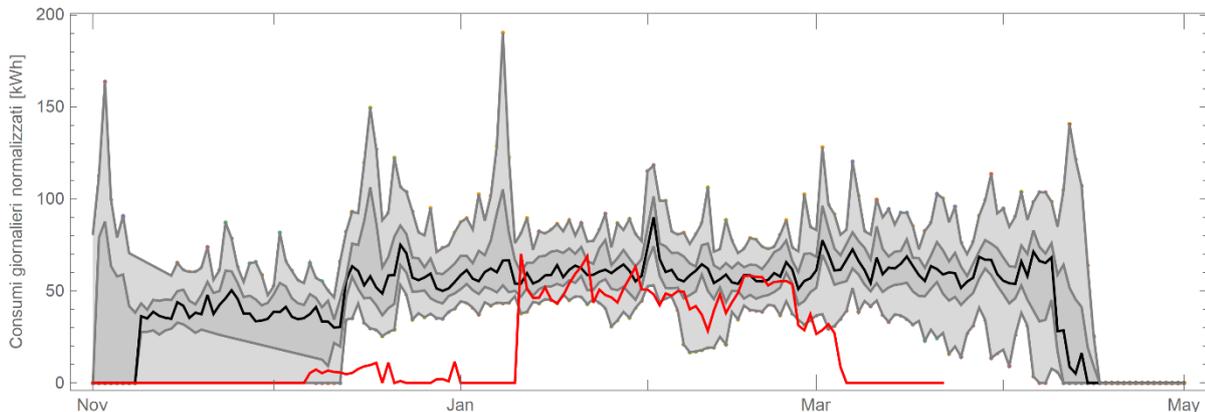
Ater 1

**Figura 60 - Analisi dei consumi dell'unità immobiliare Int.01, periodo P4, cluster "primo piano"**



Ater 1

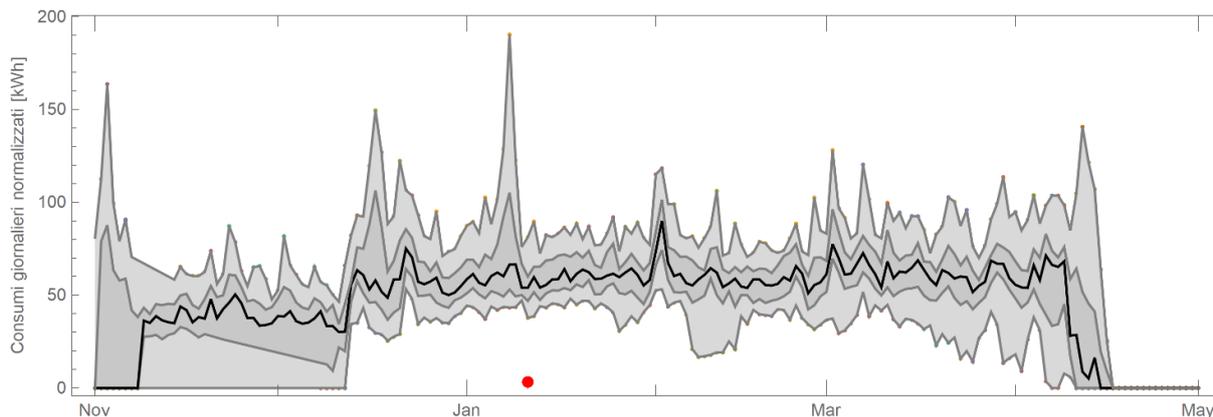
**Figura 61 - Analisi dei consumi dell'unità immobiliare Int.01, periodo P4, cluster "esposizione EST"**



Ater 1

**Figura 62 - Analisi dei consumi dell'unità immobiliare Int.01, periodo P4 rispetto alla media edificio**

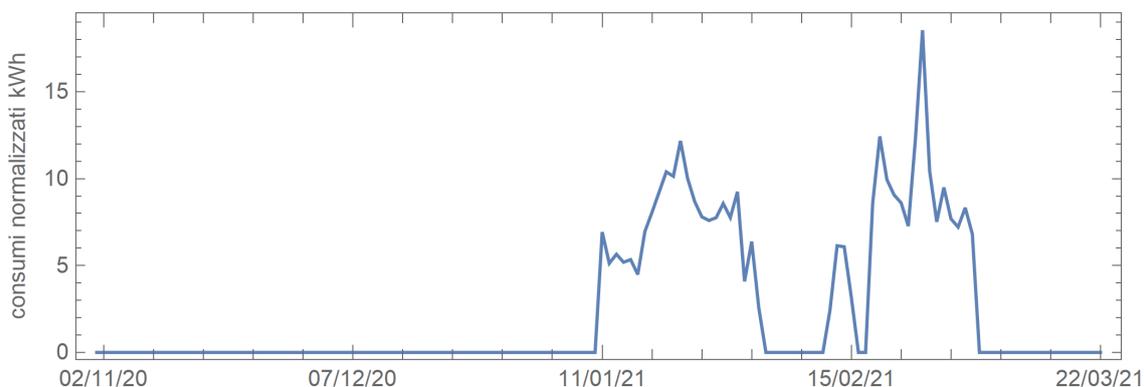
Il confronto può essere inoltre operato anche sul singolo valore di consumo giornaliero opportunamente normalizzato. Anche in questo caso il controllo classifica se il dato misurato nel singolo giorno è in linea con i dati storici di consumo nei diversi gruppi di analisi e fornisce un report sui criteri che sono soddisfatti. In Figura 63 si riporta infine la verifica sul consumo normalizzato registrato in un singolo giorno.



**Figura 63 - Analisi dei consumi dell'unità immobiliare Int.01, periodo P4 rispetto all'intero edificio**

### 3.4.2 Analisi dei fault del singolo ripartitore

L'elaborazione delle serie dei consumi sul nuovo periodo identifica i periodi di rilevamento nullo superiori a tre giorni consecutivi. La Figura 64 riporta la serie storica del consumo rilevato per il ripartitore D02 dell'unità immobiliare Int.01.



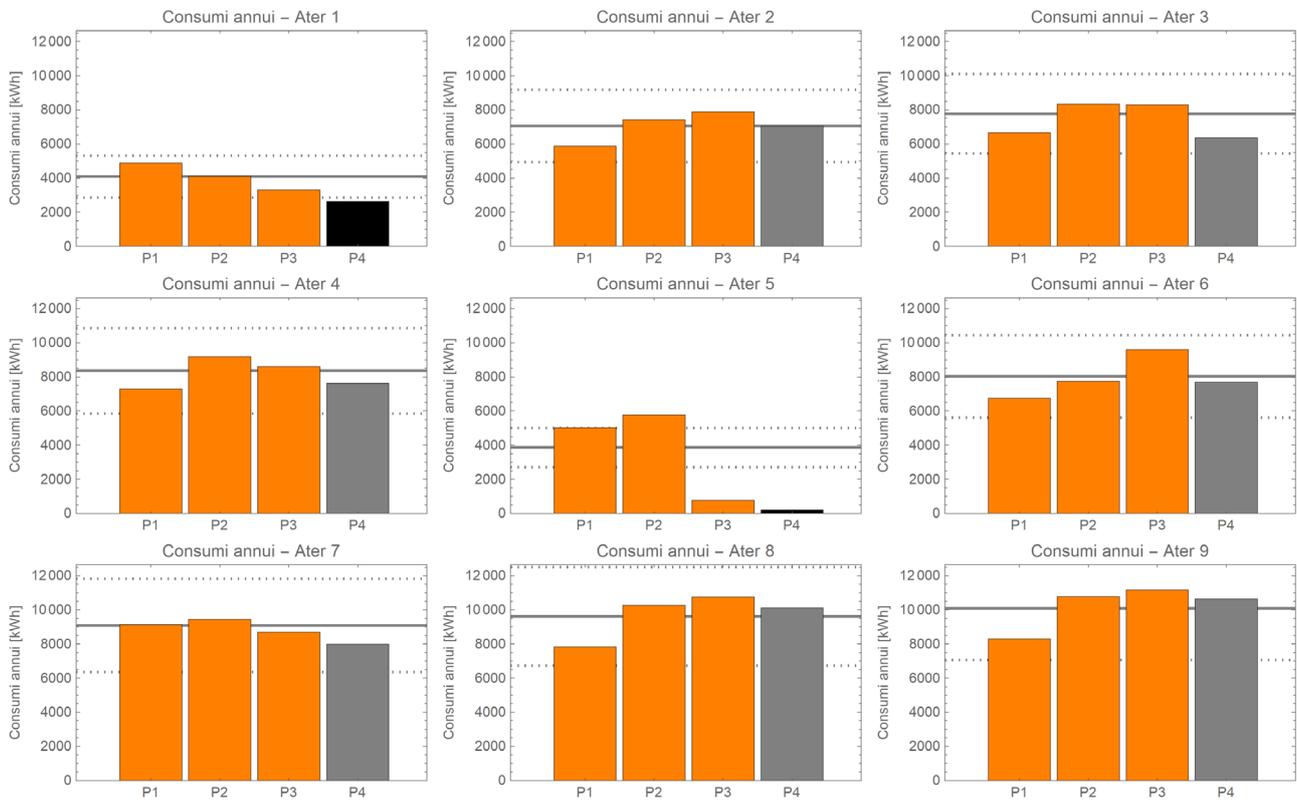
**Figura 64 – Fault #3 P4: Consumo normalizzato ripartitore D02 Int.02**

La Tabella 31 riporta i ripartitori che presentano consumi nulli per più di tre giorni successivi:

**Tabella 31 - Fault #3 P4: Ripartitori che presentano consumi nulli per più di tre giorni successivi - P4**

<i>Unità immobiliare</i>	<i>Periodo P4</i>
<i>Interno 1</i>	R01 – R03 – R06
<i>Interno 2</i>	R05 – R07
<i>Interno 3</i>	R05 – R07
<i>Interno 4</i>	R06
<i>Interno 5</i>	Non occupato
<i>Interno 6</i>	R03 – R04
<i>Interno 7</i>	R03
<i>Interno 8</i>	
<i>Interno 9</i>	

In Figura 65 si riporta l'analisi relativa al periodo P4 rispetto al fault n.4 precedentemente descritto in Tabella 28. Si riscontra che unicamente l'unità immobiliare Int.01 presenta consumi significativamente inferiori alla media dei consumi storici.



**Figura 65 – Fault #4, P4: Analisi dei consumi normalizzati rispetto ai consumi storici**

In Figura 66 si riporta l'analisi effettuata per la correlazione dei consumi registrati dai ripartitori nelle singole unità immobiliari (fault #5), mentre in Tabella 32 viene riportato un riepilogo dei possibili fault individuati.

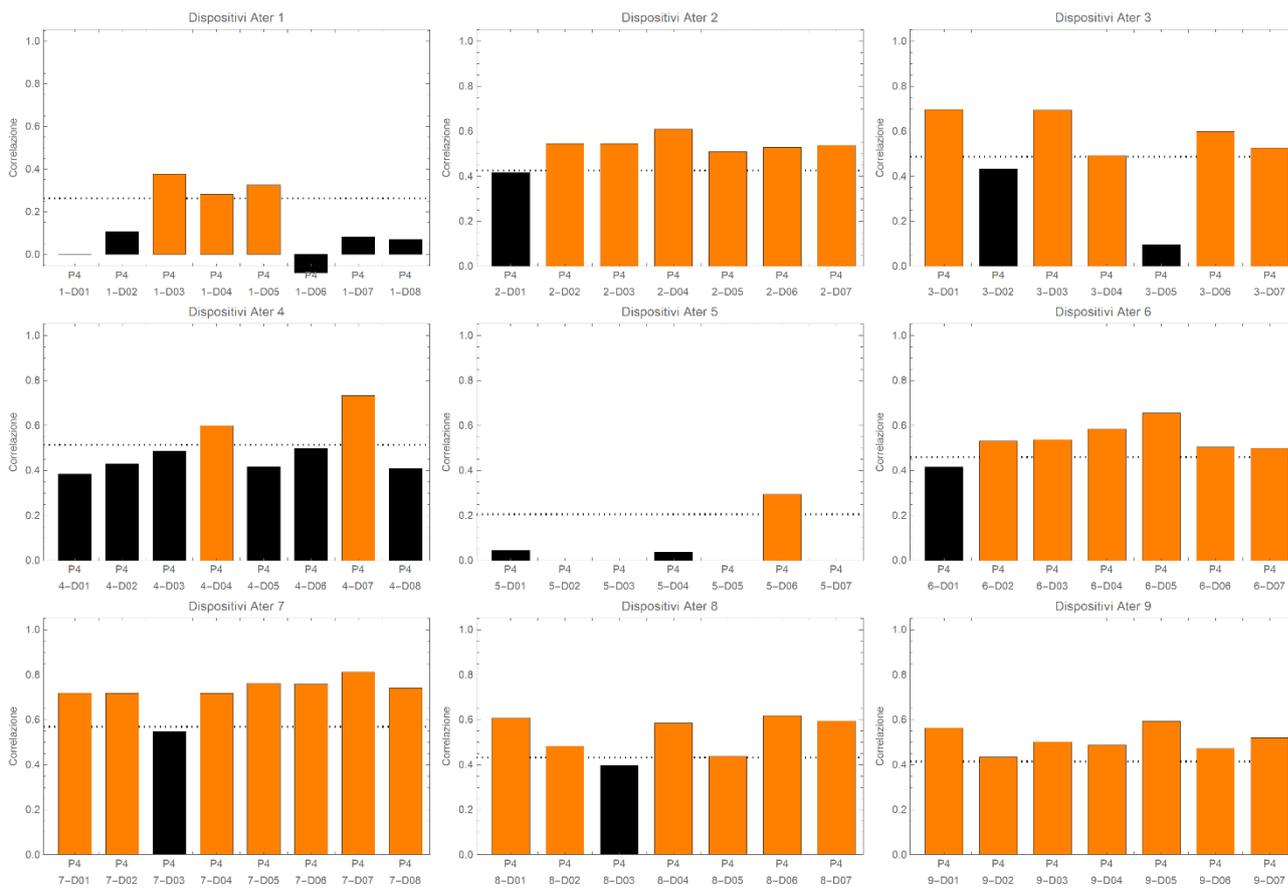


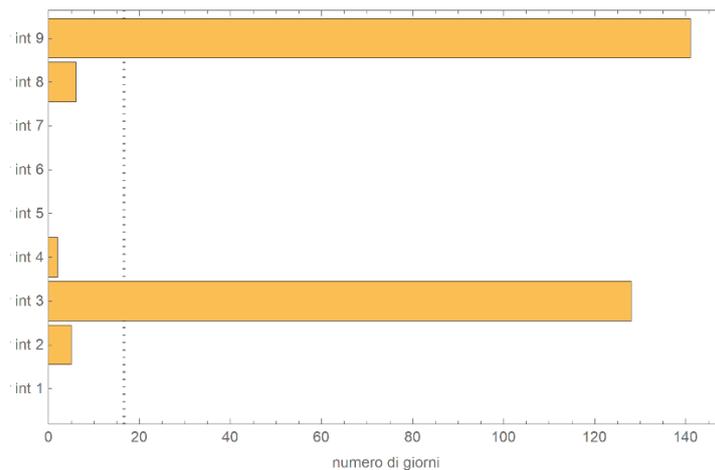
Figura 66 – Fault #5, P4 Correlazione dei consumi nelle singole unità immobiliari

Tabella 32 – Fault #5, P4: Ripartitori classificati come possibili fault per correlazione con Temp ext

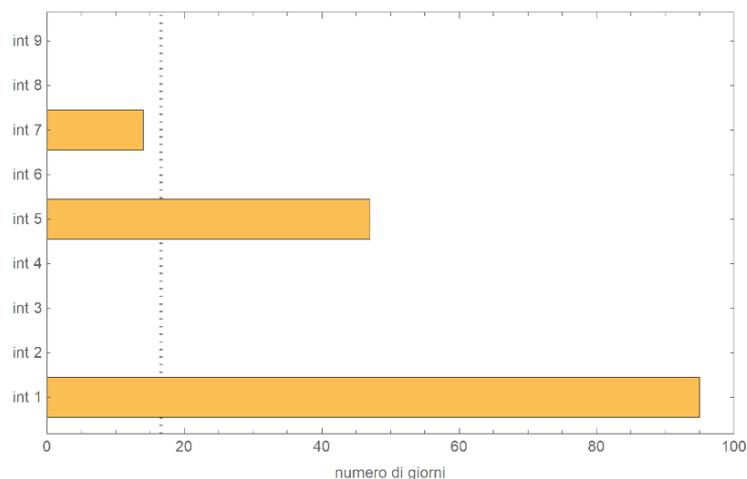
Unità immobiliare	Periodo P4
Interno 1	R02 – R06 – R07 - R08
Interno 2	R01
Interno 3	R02 - R05
Interno 4	R01 – R02 – R03 – R05 – R06 - R08
Interno 5	Non occupato
Interno 6	R01
Interno 7	R03
Interno 8	R03
Interno 9	

### 3.4.3 Analisi dello scostamento della temperatura interna dalle condizioni di comfort

In Figura 67 e Figura 68 sono riportati rispettivamente il numero di giorni in cui nella singola unità immobiliare nel periodo P4 è stata registrata una temperatura interna media superiore alla temperatura massima di comfort (i.e. 22°C) e quelli con temperatura interna media inferiore alla temperatura minima di comfort (i.e. 18°C).



**Figura 67 – Fault #7, P4: Giorni con temp. indoor superiore al limite max di comfort (22°C)**



**Figura 68 - Fault #7, P4: Giorni con temp. indoor inferiore al limite min di comfort (18°C)**

Dall’analisi dei dati si rileva che le unità immobiliari con comportamento “non virtuoso” sono:

- Int.03 e Int.09 in quanto superano quasi costantemente la soglia di 16 giorni con temperature superiori alla temperatura massima di comfort (22°C);
- Int.01, in quanto con circa 90 giorni con temperature interne al di sotto della temperatura minima di comfort (18°C) supera la soglia di 16 giorni.

#### 3.4.4 Riepilogo dei fault individuati nella stagione 2020-21

In Tabella 33 si riporta il riepilogo dei fault relativi alla stagione di riscaldamento 2020-21 (periodo P4) individuati mediante l’applicazione del software sviluppato nell’ambito della ricerca e descritto nel presente rapporto.

**Tabella 33 – Periodo P4, riepilogo dei fault individuati**

<i>Descrizione del fault</i>		<i>Possibile Fault rilevato nel periodo P4</i>
1	Consumo troppo alto di una unità immobiliare rispetto alle altre unità immobiliari	Int.04
2	Consumo troppo basso di una unità immobiliare rispetto alle altre unità immobiliari	Int.01
3	Fault ripartitore	Vedi Tabella 31
4	Variabilità dei consumi dell'unità immobiliare rispetto ai dati storici	Int.01 (consumi sotto soglia)
5	Correlazione dei consumi con la temperatura esterna	Vedi Tabella 32
6	Scostamento dal fabbisogno atteso	– consumi elevati Int.02, Int.04, Int.06, Int.08, Int.09 – consumi bassi Int. 01
7	Superamento dalla temperatura di comfort	– temperatura elevata Int.03, Int.09 – temperatura bassa Int. 01

È stato quindi possibile individuare alcuni comportamenti “non virtuosi” di alcuni utenti (e.g. temperatura troppo elevata negli Int.03 e Int.09 e troppo bassa nell’Int.01) e di riscontrare consumi tendenzialmente superiori al fabbisogno atteso in cinque unità immobiliari. Consumi maggiori del fabbisogno atteso possono essere indice del decadimento delle prestazioni dell’involucro edilizio (e.g. dell’efficacia dell’isolamento delle pareti esterne e dei serramenti) e suggeriscono l’adozione di interventi di retrofit energetico (e.g. cappotto termico, sostituzione degli infissi). Di contro, nell’unità immobiliare Int.01 sono stati registrati consumi inferiori al fabbisogno atteso e questo potrebbe essere indice della presenza di flussi interni (i cosiddetti furti di calore).

## 4 Conclusioni

Lo sviluppo delle tecnologie “smart” negli edifici rappresenta un importante presupposto per il raggiungimento degli obiettivi di efficienza energetica e di riduzione dei consumi energetici. D'altra parte, tuttavia, l'effettiva integrazione di sistemi “smart” per il monitoraggio e controllo dei consumi e l'efficace interazione degli utenti con i sistemi presentano ancora delle criticità.

Con riferimento alla valutazione del livello e del potenziale di smartness del parco edilizio residenziale, sono state condotte: i) un'analisi preliminare dei dati statistici relativi al parco edilizio residenziale esistente e alle relative tipologie impiantistiche e ii) un'analisi dettagliata del contesto normativo riguardante i sistemi di gestione e controllo, al fine di individuare un numero congruo di categorie rappresentative del Parco Edilizio nazionale. A questo scopo, sono stati analizzati 8 casi di studio (rappresentativi di due categorie impiantistiche e di 4 epoche costruttive) sia dal punto di vista dei domini che dal punto di vista delle funzionalità intelligenti presenti, in linea con le istruzioni della Commissione Europea e utilizzando il foglio di calcolo attualmente in fase di testing. È stato quindi possibile calcolare un valore dello SRI variabile da 0% a 23%. L'estensione dei risultati al parco edilizio residenziale attraverso la media pesata per numero di edifici, ha consentito di stimare un valore di SRI del parco edilizio residenziale esistente circa pari a 5.2%. Al fine di determinare poi il potenziale di miglioramento ottenibile dalla riqualificazione degli edifici residenziali, è stata condotta un'analisi degli interventi di riqualificazione energetica degli edifici residenziali nel periodo 2014-2019. Tale analisi ha evidenziato come solo alcuni degli investimenti impattino in maniera significativa sul livello di smartness, ed in particolare: i) l'installazione di sistemi di generazione elettrica da fonte rinnovabile di tipo fotovoltaico con sistemi di accumulo; ii) l'installazione di sistemi cogenerativi; iii) in misura minore, la sostituzione del generatore con caldaia a condensazione o con sistemi a pompa di calore e l'installazione di sistemi di illuminazione efficienti. Sulla base delle risultanze di tale analisi, sono stati simulati due scenari di riqualificazione: i) “energy”, basato sull'ipotesi di riqualificazione del parco edilizio basato sui trend delle riqualificazioni 2014-2019; ii) “smart energy”, in cui sono stati ipotizzati una serie di interventi di efficientamento energetico in ottica smart degli edifici caso di studio agendo su singoli servizi e domini mediante installazioni in cui sono state definite alcune funzionalità minime dei sistemi di nuova installazione/sostituzione (connettività WLAN/Wireless, sistemi di gestione e controllo remoto, sensoristica connessa per la gestione, il controllo ed il monitoraggio). Dalla simulazione dei due scenari, è emerso che lo SRI raggiungibile sarebbe pari al 15.8% e al 27.6% nei due casi rispettivamente e nel caso di parco edilizio completamente riqualificato.

Nella seconda parte del rapporto, sono state analizzate le strategie di comunicazione utente ed è stata elaborata una strategia comunicativa per la gestione ottimale dei dati di consumo energetico e di monitoraggio ambientale (misure di temperatura dell'aria, umidità relativa e CO<sub>2</sub>). Dall'analisi è emerso che un efficace feedback energetico richiede l'utilizzo di approcci “user-centered” e che, tra i meccanismi e le diverse soluzioni visive, la comunità scientifica ha attualmente raggiunto un consenso parziale su una serie di interazioni di base che generalmente hanno successo nel promuovere la riduzione del consumo di energia. Queste soluzioni includono: i) interfacce “goal-setting”, cioè interfacce basate sul desiderio degli utenti di soddisfare un determinato obiettivo (energetico), indotto dall'interfaccia o autoimposto dagli abitanti di casa; ii) feedback diretto, ad esempio, display in-house aggiornati tempestivamente (IHD) che mostrano il consumo di energia domestica; iii) andamento storico dei consumi, che mostra come il consumo domestico evolve nel tempo ed evidenzia le correlazioni temporali; iv) device non invadenti, ovvero display e/o dispositivi di comunicazione progettati per integrarsi nell'ambiente domestico, attirando l'attenzione dell'utente solo quando necessario, ma evitando impostazioni e interazioni intrusive che possono favorire l'abbandono dello strumento. Sulla base delle risultanze di tale analisi, sono state analizzate le caratteristiche critiche di una strategia di comunicazione ottimale dei dati di monitoraggio energetico e ambientale. In particolare, è stato sviluppato un indice di monitoraggio energetico per impianti di contabilizzazione indiretta basato sulla stima del consumo atteso attraverso la potenza termica installata dei radiatori. Tale metodo si basa su poche semplici informazioni ed è pertanto particolarmente

indicato per una eventuale implementazione della strategia di feedback su ampia scala. Tenendo conto anche dei vincoli di fattibilità economica associati all'installazione di sensoristica distribuita per il monitoraggio ambientale, sono stati inoltre sviluppati e proposti tre indici base per il monitoraggio della qualità dell'aria (temperatura, umidità relativa e CO<sub>2</sub>) e tre indici aggiuntivi per il benchmark storico basati sull'approccio prestazionale per la ventilazione intelligente negli edifici residenziali. Tali indici sono poi stati utilizzati per la costruzione di un cruscotto per il monitoraggio energetico ed ambientale per l'interazione con l'utente finale.

L'obiettivo principale di un sistema di Fault Detection and Diagnosis (FDD) è la individuazione dei guasti di un sistema e della loro causa, consentendone una tempestiva eliminazione prima che il guasto stesso sia causa di ulteriori danni o di una perdita di efficienza del sistema. Ai fini dell'applicazione delle tecniche di fault detection agli edifici residenziali è opportuno effettuare una distinzione tra fault di sistema (e.g. componenti dell'impianto, sistemi di contabilizzazione, elementi dell'involucro edilizio, etc.) e di utilizzo, ovvero legati al comportamento dell'utente (e.g. errata impostazione dei set point temperatura, apertura di finestre, etc.). Nell'ambito del presente lavoro sono state analizzate le tecniche di fault detection applicate agli edifici ed è stato sviluppato e sperimentato un software per la analisi ed individuazione dei malfunzionamenti legati all'impianto di riscaldamento ed al comportamento degli utenti. Il software sviluppato è stato sperimentato in un caso di studio rappresentato da un edificio di edilizia popolare costituito da 9 appartamenti, limitatamente al servizio di riscaldamento. La disponibilità dei dati di consumo giornalieri registrati dal sistema di contabilizzazione indiretta e dei dati della temperatura indoor nelle ultime quattro stagioni di riscaldamento, unitamente all'acquisizione dei dati meteo, ha consentito di "istruire" uno storico dei consumi registrati sulla base dei dati delle prime tre stagioni e di sperimentare l'applicazione alla quarta stagione (2020-21). È stato quindi possibile individuare alcuni comportamenti "non virtuosi" di alcuni utenti (e.g. temperatura troppo elevata in due unità immobiliari e troppo bassa in una unità immobiliare) e di riscontrare consumi tendenzialmente superiori al fabbisogno atteso, indice del decadimento delle prestazioni dell'involucro edilizio (e.g. isolamento delle pareti esterne e dei serramenti) che suggeriscono l'adozione di interventi di retrofit energetico (e.g. cappotto termico, sostituzione degli infissi). Sperimentazioni future potranno prevedere l'analisi di fault specifici per l'impianto (e.g. rendimento della caldaia tramite il monitoraggio dei consumi di gas naturale e la produzione di energia termica, correlazione dei consumi dei singoli ripartitori con le temperature indoor, etc.).

## 5 Riferimenti bibliografici

- [1] International Energy Agency, Energy Efficiency: Buildings. The global exchange for energy efficiency policies, data and analysis. Available at: <https://www.iea.org/topics/energyefficiency/buildings/> (last accessed: August 2019), (2019).
- [2] European Commission, Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2002 on the energy performance of buildings., (2002).
- [3] European Commission, Directive (EU) 2018/844 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings and Directive 2012/27/EU on energy efficiency, (2018).
- [4] D. Banister, The sustainable mobility paradigm, *Transp. Policy.* (2008). <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2007.10.005>.
- [5] E. Conticelli, G. Gobbi, P.I.S. Rosas, S. Tondelli, Assessing the performance of modal interchange for ensuring seamless and sustainable mobility in European cities, *Sustain.* (2021). <https://doi.org/10.3390/su13021001>.
- [6] S.J. Darby, Smart technology in the home: time for more clarity, *Build. Res. Inf.* (2018). <https://doi.org/10.1080/09613218.2017.1301707>.
- [7] I. Røpke, S. Nyborg, Energy impacts of the smart home – conflicting visions, *Eceee 2011 Summer Study.* (2011).
- [8] F. Yousefi, Y. Gholipour, W. Yan, A study of the impact of occupant behaviors on energy performance of building envelopes using occupants’ data, *Energy Build.* 148 (2017) 182–198. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.04.085>.
- [9] R.V. Andersen, B. Olesen, J. Toftum, Simulation of the Effects of Occupant Behaviour on Indoor Climate and Energy Consumption, in: *Clima2007*, 2007.
- [10] M. Dell’Isola, G. Ficco, L. Canale, B.I. Palella, G. Puglisi, An IoT Integrated Tool to Enhance User Awareness on Energy Consumption in Residential Buildings, *Atmosphere (Basel).* 10 (2019) 743. <https://doi.org/10.3390/atmos10120743>.
- [11] J. Al Dakheel, C. Del Pero, N. Aste, F. Leonforte, Smart buildings features and key performance indicators: A review, *Sustain. Cities Soc.* (2020). <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102328>.
- [12] European Union, Energy Roadmap 2050. Available online: [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/2012\\_energy\\_roadmap\\_2050\\_en\\_0.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/2012_energy_roadmap_2050_en_0.pdf) (last accessed: 02/2020), (2012). <https://doi.org/doi:10.2833/10759>.
- [13] Jennifer King, Christopher Perry, Smart Buildings: Using Smart Technology to Save Energy in Existing Buildings, *Am. Council on Energy-Efficient Econ.* (2017).
- [14] V. Fabi, G. Spigiantini, S.P. Corngati, Insights on Smart Home Concept and Occupants’ Interaction with Building Controls, in: *Energy Procedia*, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.238>.
- [15] L. Hernandez, C. Baladron, J.M. Aguiar, B. Carro, A.J. Sanchez-Esguevillas, J. Lloret, J. Massana, A survey on electric power demand forecasting: Future trends in smart grids, microgrids and smart buildings, *IEEE Commun. Surv. Tutorials.* (2014). <https://doi.org/10.1109/SURV.2014.032014.00094>.
- [16] Y. Liu, N. Yu, W. Wang, X. Guan, Z. Xu, B. Dong, T. Liu, Coordinating the operations of smart buildings in smart grids, *Appl. Energy.* (2018). <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.07.089>.
- [17] P. Ciholas, A. Lennie, P. Sadigova, J.M. Such, The security of smart buildings: A systematic literature review, *ArXiv.* (2019).
- [18] J.L. Hernández-Ramos, M.V. Moreno, J.B. Bernabé, D.G. Carrillo, A.F. Skarmeta, SAFIR: Secure access framework for IoT-enabled services on smart buildings, in: *J. Comput. Syst. Sci.*, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jcss.2014.12.021>.
- [19] C. Marche, M. Nitti, V. Pilloni, Energy efficiency in smart building: A comfort aware approach based on Social Internet of Things, in: *GloTS 2017 - Glob. Internet Things Summit, Proc.*, 2017. <https://doi.org/10.1109/GIOTS.2017.8016267>.
- [20] E. Taveres-Cachat, S. Grynning, J. Thomsen, S. Selkowitz, Responsive building envelope concepts in

- zero emission neighborhoods and smart cities - A roadmap to implementation, *Build. Environ.* (2019). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.12.045>.
- [21] . I., A. Nurillaily, H. Amani, S.K.B. Pillai, Measuring Smart Building Readiness Index: A Case Study of Bandung City, *J. Manaj. Indones.* (2020). <https://doi.org/10.25124/jmi.v20i2.3201>.
- [22] Commissione Europea, Regolamento Delegato C(2020)6930 del 14.10.2020, (n.d.).
- [23] Commissione Europea, Regolamento di esecuzione (UE) C(2020)6929 del 14.10.2020, (n.d.).
- [24] European Commission, Final Report On The Technical Support To The Development Of A Smart Readiness Indicator For Buildings, (2020).
- [25] Vito, Smart Readiness Indicator for Buildings, (n.d.). <https://smartreadinessindicator.eu/milestones-and-documents>.
- [26] T. Märzinger, D. Österreicher, Supporting the smart readiness indicator-A methodology to integrate a quantitative assessment of the load shifting potential of smart buildings, *Energies.* (2019). <https://doi.org/10.3390/en12101955>.
- [27] T. Märzinger, D. Österreicher, Extending the Application of the Smart Readiness Indicator—A Methodology for the Quantitative Assessment of the Load Shifting Potential of Smart Districts, *Energies.* 13 (2020). <https://doi.org/doi.org/10.3390/en13133507>.
- [28] E. Janhunen, L. Pulkka, A. Säynäjoki, S. Junnila, Applicability of the smart readiness indicator for cold climate countries, *Buildings.* (2019). <https://doi.org/10.3390/buildings9040102>.
- [29] I. Vigna, R. Perneti, G. Pernigotto, A. Gasparella, Analysis of the building smart readiness indicator calculation: A comparative case-study with two panels of experts, *Energies.* (2020). <https://doi.org/10.3390/en13112796>.
- [30] P.A. Fokaides, C. Panteli, A. Panayidou, How are the smart readiness indicators expected to affect the energy performance of buildings: First evidence and perspectives, *Sustain.* (2020). <https://doi.org/10.3390/su12229496>.
- [31] E. Markoska, S. Sethuvenkatraman, N.J. Lazarova-Molnar, Are We Ready to Evaluate the Smart Readiness of Australian Buildings?, *Sustain. Energy Build.* (2020) 549–559.
- [32] A.. Verbeke, S.; Ma, Y.; Van Tichelen, P.; Bogaert, S.; Gómez Oñate, V.; Waide, P.; Bettgenhäuser, K.; Ashok, J.; Hermelink, Support for Setting up a Smart Readiness Indicator for Buildings and Related Impact Assessment, Final Report; Study Accomplished under the Authority of the European Commission DG Energy 2017/SEB/R/1610684; Vito NV: Mol, Belgium, 2018, (n.d.).
- [33] T. Loga, B. Stein, N. Diefenbach, TABULA building typologies in 20 European countries-Making energy-related features of residential building stocks comparable, *Energy Build.* 132 (2016) 4–12. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.094>.
- [34] I. Ballarini, S.P. Corgnati, V. Corrado, Use of reference buildings to assess the energy saving potentials of the residential building stock: The experience of TABULA project, *Energy Policy.* 68 (2014) 273–284. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.01.027>.
- [35] Italian Republic, Decreto Legislativo 4 luglio 2014, n. 102 Attuazione della direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica, che modifica le direttive 2009/125/CE e 2010/30/UE e abroga le direttive 2004/8/CE e 2006/32/CE (in Italian language only)., (2014).
- [36] Energy & Strategy Group, SMART BUILDING REPORT Il volume d'affari in Italia, i servizi offerti e il superecobonus., Milano, 2021.
- [37] Italian Agency for Energy Environment and Sustainable Development (ENEA), Rapporto Annuale Detrazioni Fiscali. L'efficienza energetica e l'utilizzo di fonti rinnovabili negli edifici esistenti. RAPPORTO ANNUALE 2020., (2020).
- [38] Italian Agency for Energy Environment and Sustainable Development (ENEA), Vademecum: Building Automation, (2015). [https://www.energiaenergetica.enea.it/media/attachments/2021/02/12/building\\_automation.pdf](https://www.energiaenergetica.enea.it/media/attachments/2021/02/12/building_automation.pdf).
- [39] European Union, DIRETTIVA (UE) 2018/2001 DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO dell'11 dicembre 2018 sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili (rifusione), (2018).
- [40] S. Håkon, W. Hege, A Multi-Method Evaluation of the Potential for Using the Electricity Bill to

- Encourage Energy Savings in Norwegian Households, *Energy Environ. Res.* Vol. 3, No (2013). <https://doi.org/10.5539/eer.v3n1p135>.
- [41] Robert C.Sonderegger, Movers and stayers: The resident's contribution to variation across houses in energy consumption for space heating, *Energy Build.* 1 (3) (1978) 313–324.
- [42] V. Marinakis, H. Doukas, An Advanced IoT-based System for Intelligent Energy Management in Buildings, *Sensors.* 18 (2018). <https://doi.org/Artn 61010.3390/S18020610>.
- [43] W. Abrahamse, L. Steg, C. Vlek, T. Rothengatter, A review of intervention studies aimed at household energy conservation, *J. Environ. Psychol.* 25 (2005) 273–291. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2005.08.002>.
- [44] G. Brandon, A. Lewis, Reducing household energy consumption: A qualitative and quantitative field study, *J. Environ. Psychol.* 19 (1999) 75–85. <https://doi.org/DOI 10.1006/jevp.1998.0105>.
- [45] G. Guerassimoff, J. Thomas, Enhancing energy efficiency and technical and marketing tools to change people's habits in the long-term, *Energy Build.* 104 (2015) 14–24. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.080>.
- [46] V.L. Chen, M.A. Delmas, W.J. Kaiser, Real-time, appliance-level electricity use feedback system: How to engage users?, *Energy Build.* 70 (2014) 455–462. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.069>.
- [47] W. Anderson, V. White, The smart way to display. Full report: exploring consumer preferences for home energy display functionality. A Report For the Energy Saving Trust by the Centre for Sustainable Energy, *Energy Sav. Trust.* (2009).
- [48] W. Gans, A. Alberini, A. Longo, Smart meter devices and the effect of feedback on residential electricity consumption: Evidence from a natural experiment in Northern Ireland, *Energy Econ.* 36 (2013) 729–743. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2012.11.022>.
- [49] C. Wilson, H. Dowlatabadi, Models of decision making and residential energy use, *Annu. Rev. Environ. Resour.* (2007). <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.32.053006.141137>.
- [50] A. Nilsson, M. Wester, D. and B. Lazarevic Nils, Smart homes, home energy management systems and real-time feedback: Lessons for influencing household energy consumption from a Swedish field study, *Energy Build.* 179 (2018) 15–25.
- [51] G. Jacucci, A. Spagnolli, L. Gamberini, A. Chalambalakis, C. Björksog, M. Bertoncini, C. Torstenson, P. Monti, Designing effective feedback of electricity consumption for mobile user interfaces, *PsychNology J.* (2009).
- [52] L.J. Becker, Joint effect of feedback and goal setting on performance: A field study of residential energy conservation, *J. Appl. Psychol.* (1978). <https://doi.org/10.1037/0021-9010.63.4.428>.
- [53] C. Seligman, J.M. Darley, L.J. Becker, Behavioral approaches to residential energy conservation, *Energy Build.* (1978). [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(78\)90012-9](https://doi.org/10.1016/0378-7788(78)90012-9).
- [54] J.H. van Houwelingen, W.F. van Raaij, The Effect of Goal-Setting and Daily Electronic Feedback on In-Home Energy Use, *J. Consum. Res.* (1989). <https://doi.org/10.1086/209197>.
- [55] W. Abrahamse, L. Steg, C. Vlek, T. Rothengatter, The effect of tailored information, goal setting, and tailored feedback on household energy use, energy-related behaviors, and behavioral antecedents, *J. Environ. Psychol.* (2007). <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2007.08.002>.
- [56] J.E. Petersen, V. Shunturov, K. Janda, G. Platt, K. Weinberger, Dormitory residents reduce electricity consumption when exposed to real-time visual feedback and incentives, *Int. J. Sustain. High. Educ.* (2007). <https://doi.org/10.1108/14676370710717562>.
- [57] G. Peschiera, J.E. Taylor, J.A. Siegel, Response-relapse patterns of building occupant electricity consumption following exposure to personal, contextualized and occupant peer network utilization data, *Energy Build.* (2010). <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.03.001>.
- [58] D. Petersen, J. Steele, J. Wilkerson, WattBot: A residential electricity monitoring and feedback system, in: *Conf. Hum. Factors Comput. Syst. - Proc.*, 2009. <https://doi.org/10.1145/1520340.1520413>.
- [59] D. Foster, S. Lawson, M. Blythe, P. Cairns, Wattsup?: Motivating reductions in domestic energy consumption using social networks, in: *Nord. 2010 Extending Boundaries - Proc. 6th Nord. Conf. Human-Computer Interact.*, 2010. <https://doi.org/10.1145/1868914.1868938>.

- [60] A. Spagnolli, N. Corradi, L. Gamberini, E. Hoggan, G. Jacucci, C. Katzeff, L. Broms, L. Jonsson, Eco-feedback on the go: Motivating energy awareness, *Computer* (Long. Beach. Calif). (2011). <https://doi.org/10.1109/MC.2011.125>.
- [61] G. Wood, M. Newborough, Dynamic energy-consumption indicators for domestic appliances: Environment, behaviour and design, *Energy Build.* (2003). [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00241-4](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00241-4).
- [62] A. Grønhøj, J. Thøgersen, Feedback on household electricity consumption: Learning and social influence processes, *Int. J. Consum. Stud.* (2011). <https://doi.org/10.1111/j.1470-6431.2010.00967.x>.
- [63] C. Grevet, J. Mankoff, S.D. Anderson, Design and evaluation of a social visualization aimed at encouraging sustainable behavior, in: *Proc. Annu. Hawaii Int. Conf. Syst. Sci.*, 2010. <https://doi.org/10.1109/HICSS.2010.135>.
- [64] H. Wilhite, R. Ling, Measured energy savings from a more informative energy bill, *Energy Build.* (1995). [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(94\)00912-4](https://doi.org/10.1016/0378-7788(94)00912-4).
- [65] T. Ueno, F. Sano, O. Saeki, K. Tsuji, Effectiveness of an energy-consumption information system on energy savings in residential houses based on monitored data, *Appl. Energy.* (2006). <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2005.02.002>.
- [66] F.W. Siero, A.B. Bakker, G.B. Dekker, M.T.C. Van Den Burg, Changing organizational energy consumption behaviour through comparative feedback, *J. Environ. Psychol.* (1996). <https://doi.org/10.1006/jevp.1996.0019>.
- [67] L.T. McCalley, C.J.H. Midden, Energy conservation through product-integrated feedback: The roles of goal-setting and social orientation, *J. Econ. Psychol.* (2002). [https://doi.org/10.1016/S0167-4870\(02\)00119-8](https://doi.org/10.1016/S0167-4870(02)00119-8).
- [68] G. Wood, M. Newborough, Energy-use information transfer for intelligent homes: Enabling energy conservation with central and local displays, *Energy Build.* (2007). <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.06.009>.
- [69] R. Wever, J. van Kuijk, C. Boks, User-centred design for sustainable behaviour, *Int. J. Sustain. Eng.* (2008). <https://doi.org/10.1080/19397030802166205>.
- [70] J. Mankoff, S.R. Fussell, T. Dillahunt, R. Graves, C. Grevet, M. Johnson, D. Matthews, H.S. Matthews, R. McGuire, R. Thompson, A. Shick, L. Setlock, StepGreen.org: Increasing energy saving behaviors via social networks, in: *ICWSM 2010 - Proc. 4th Int. AAAI Conf. Weblogs Soc. Media*, 2010.
- [71] S. Karjalainen, Consumer preferences for feedback on household electricity consumption, *Energy Build.* 43 (2011) 458–467. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.10.010>.
- [72] Australian Energy Regulator, Guidance on energy consumption benchmarks on residential customers' bills. AER Reference: 61307 – D17/171822, available at: [https://www.aer.gov.au/system/files/Bill%20benchmark%20guidance%202018\\_0.pdf](https://www.aer.gov.au/system/files/Bill%20benchmark%20guidance%202018_0.pdf) (last accessed: November 2019), 2017.
- [73] L. Zhengwei, H. Yanmin, X. Peng, Methods for benchmarking building energy consumption against its past or intended performance: An overview, *Appl. Energy.* 124 (2014) 325–334.
- [74] T. Jensen, G. Holtz, C. Baedeker, É.J.L. Chappin, Energy-efficiency impacts of an air-quality feedback device in residential buildings: An agent-based modeling assessment, *Energy Build.* 116 (2016) 151–163. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.11.067>.
- [75] G. Guyot, M.H. Sherman, I.S. Walker, Smart ventilation energy and indoor air quality performance in residential buildings: A review, *Energy Build.* 165 (2018) 416–430. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.12.051>.
- [76] R. Galvin, Impediments to energy-efficient ventilation of German dwellings: A case study in Aachen, *Energy Build.* 56 (2013) 32–40. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.10.020>.
- [77] L. Stabile, A. Massimo, L. Canale, A. Russi, A. Andrade, M. Dell'Isola, The Effect of Ventilation Strategies on Indoor Air Quality and Energy Consumptions in Classrooms, *Buildings.* 9 (2019) 110. <https://doi.org/10.3390/buildings9050110>.
- [78] G. Guyot, I.S. Walker, M.H. Sherman, Performance based approaches in standards and regulations



## Appendice: Curriculum scientifico del gruppo di lavoro

Il Dipartimento di Ingegneria Civile e Meccanica (DICeM) nasce dalla fusione del Dipartimento di Meccanica, Strutture, Ambiente e Territorio e di parte del Dipartimento di Ingegneria Industriale. Gli ambiti scientifici di riferimento sono quelli dell'ingegneria meccanica, gestionale, civile ed ambientale, nonché delle materie di base quali la fisica e la chimica. Il DICeM si occupa della didattica, della ricerca scientifica e dello sviluppo tecnologico nei seguenti settori: fisica di base; meccanica dei fluidi e dei solidi; meccanica dei materiali; salvaguardia, sviluppo e pianificazione del territorio (protezione e riqualificazione dell'ambiente); analisi e progettazione dei sistemi meccanici, degli impianti termici e delle strutture; fisica dei piccoli acceleratori per uso industriale e medicale.

Le attività di ricerca del gruppo di lavoro di Fisica Tecnica (ING-IND/10 e ING-IND/11) e Misure Meccaniche e Termiche (ING-IND/12) sono supportate dal LAMI - Laboratorio di Misure Industriali. Il LAMI è laboratorio accreditato LAT n.105 dal 2000 nei settori umidità e pressione e poi esteso ai settori volume (di gas), velocità e misure di tempo e frequenza. Il Laboratorio è dotato delle competenze e delle attrezzature tecnico-scientifiche funzionali allo sviluppo dei progetti, anche nel quadro di collaborazioni nazionali ed internazionali, e al rilascio di qualificate consulenze a beneficio di istituzioni, enti ed industrie. Di seguito sono riportati i principali ambiti di ricerca del gruppo di lavoro:

- misura delle concentrazioni di inquinanti (polveri aero disperse),
- misure di umidità e temperatura di rugiada, pressione (relativa, assoluta e differenziale), temperatura (termometri a resistenza, termocoppie) e termografia IR;
- metrologia legale
- metrologia delle portate e termofluidodinamica
- analisi termofisica degli edifici e caratterizzazione degli impianti di condizionamento
- analisi sperimentale di problemi connessi al trasporto di energia termica e teleriscaldamento
- misura, monitoraggio e controllo nelle reti di trasporto e distribuzione del gas naturale
- modellazione numerica di problemi termofluidodinamici complessi mediante tecniche di fluidodinamica computazionale (CFD) e Particle Image Velocimetry (PIV).

Si riportano di seguito alcuni progetti di R&S sviluppati recentemente dal gruppo di lavoro:

- MISE Industria 2015 "Efficienza Energetica", progetto EE-065, Progetto per lo Sviluppo di Sistemi per la Gestione Efficiente dei consumi energetici;
- MISE Industria 2015 progetto MI-292. Progettazione e sviluppo di un sistema di misura polifunzionale per la determinazione dei consumi energetici;
- MIUR PRIN 2015 "Riqualificazione del Parco Edilizio esistente in ottica NZEB (Nearly Zero Energy Buildings): Costruzione di un network nazionale per la ricerca".
- Autorità per l'Energia Elettrica ed il Gas ed il Sistema Idrico (AEEGSI). Supporto tecnico in materia di misura e contabilizzazione individuale del calore/freddo/acqua calda sanitaria nei settori del teleriscaldamento e teleraffreddamento.
- SNAM Spa. Analisi del Gas Non Contabilizzato (GNC) nella rete di trasporto del gas naturale di SNAM: analisi storica e statistica e azioni per il miglioramento delle prestazioni di misura ai fini del contenimento del GNC. Dal 2019
- TAG GmbH (Vienna, Austria). Analysis of Lost and Unaccounted for Gas (LAUF) in the natural gas transmission network of TAG GmbH: statistical, historical and literature analysis and development of potential actions to improve measurement performance and lower LAUF. Dal 2019

- ENEA “Advanced tools to assess and mitigate the criticalities of ICT components and their dependencies over critical infrastructures” (Horizon 2020, Progetto Atena).
- ENEA Accordo di Programma con il MiSE, Ricerca di Sistema: i) PAR2014. “Analisi e caratterizzazione metrologica dei sistemi di misura delle reti termiche distribuite”, ii) PAR2015. “Sperimentazione e caratterizzazione metrologica dei sistemi di misura per la contabilizzazione e ripartizione del calore”, iii) PAR2016. “Analisi dei benefici energetici ottenibili attraverso l’utilizzo dei sistemi di contabilizzazione e ripartizione del calore sul territorio nazionale”, iv) PAR2017. “Ottimizzazione e miglioramento dei sistemi di contabilizzazione e dei metodi di ripartizione del calore”, v) PAR2018. “Sviluppo di un software per l’analisi della fattibilità tecnica ed economica dei sistemi di contabilizzazione individuale dei consumi di ACS”, vi) PAR 2019-2022 prima annualità “Verifica dell’affidabilità delle nuove tecnologie e problematiche dello smart metering e sub metering ai fini della misura dell’efficienza energetica”

Di seguito si riporta un breve curriculum vitae degli autori del presente rapporto di ricerca.

**Marco Dell’Isola**, Laureato con lode in Ingegneria Meccanica presso la Facoltà di Ingegneria dell’Università di Napoli “Federico II”. È Professore Ordinario Settore Scientifico Disciplinare ING/IND-10 Fisica Tecnica Industriale nonché membro del Consiglio di Amministrazione dell’Università di Cassino e del Lazio Meridionale. È stato Direttore del Dipartimento di Ingegneria Civile e Meccanica (DICEM), Preside Vicario della Facoltà di Ingegneria, Presidente del Corso di Studi in Ingegneria Meccanica, Delegato del Rettore alle problematiche energetiche e membro del Senato Accademico. È Membro del Comitato Settoriale di Accreditamento Organismi Notificati di ACCREDIA, Coordinatore del Comitato tecnico CT271 “Contabilizzazione del calore” del CTI, Membro del Consiglio Direttivo di AICARR. Le sue attività di ricerca fanno riferimento agli ambiti della sostenibilità energetica ed ambientale e della metrologia delle grandezze termofluidodinamiche, e in particolare a: i) le tecniche di diagnosi energetica ed ambientale in riferimento ai modelli ed alle metodiche di misura; ii) la misura del benessere e dello stress termico approfondendo le problematiche di caratterizzazione e taratura della strumentazione di misura; iii) l’applicazione di modelli di “governance” per lo sviluppo sostenibile del territorio e la pianificazione strategica per lo sviluppo dei sistemi produttivi; iv) gli aspetti energetici e fluidodinamici dei sistemi di aspirazione locale e dei sistemi per il risparmio energetico; v) le fonti rinnovabili di energia; vi) la misura dell’umidità, della pressione, della velocità e della portata; vii) l’analisi dell’incertezza di misura, la progettazione degli esperimenti e la modellazione numerica di sistemi di misura. È autore e coautore di oltre 150 lavori scientifici pubblicati su riviste nazionali ed internazionali e presentati a congressi e conferenze.

**Giorgio Ficco** è laureato con lode in Ingegneria Meccanica presso la Facoltà di Ingegneria dell’Università di Cassino e Dottore di Ricerca in Ingegneria Meccanica presso la stessa Università. È stato Responsabile del Laboratorio Accreditato di Prove e Taratura del Palmer Scarl di Latina e del Laboratorio LAMI dell’Università di Cassino e del Lazio Meridionale. Attualmente è Professore Associato per il settore ING-IND/12 Misure Meccaniche e Termiche presso il DICEM, Dipartimento di Ingegneria Civile e Meccanica dell’Università di Cassino e del Lazio Meridionale, dove è Docente dei corsi di Misure Industriali e Misure Meccaniche e Termiche. È Ispettore ed Esperto tecnico per ACCREDIA Dipartimento di Taratura. Le attività di ricerca sviluppate sono riconducibili principalmente ai seguenti ambiti: i) Misure Meccaniche e Termiche, ii) Metrologia Legale, iii) Misura della portata di fluido, iv) Misura delle prestazioni energetiche degli edifici, v) Misura e contabilizzazione dei consumi energetici, vi) Misura dell’Inquinamento Ambientale, vii) Analisi dell’incertezza di misura, progettazione degli esperimenti e modellazione numerica di sistemi di misura. È autore di circa 110 pubblicazioni su primarie riviste scientifiche e negli atti di convegni nazionali ed internazionali.

**Laura Canale** è laureata con lode in Ingegneria Meccanica presso la Facoltà di Ingegneria dell’Università di Cassino, e Dottore di Ricerca in Ingegneria Meccanica presso la stessa Università. Attualmente è docente a contratto per l’insegnamento “Energetica dell’Edificio” (settore ING-IND/11) presso il Dipartimento di Ingegneria Civile e Meccanica dell’Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale ed è vincitrice di una procedura di selezione per la copertura di n. 1 posto di ricercatore a tempo determinato tipo A nel

settore concorsuale 09/C2, SSD ING -IND/10 "Fisica Tecnica Industriale" presso l'Universitas Mercatorum. Le attività di ricerca sviluppate sono riconducibili principalmente ai seguenti ambiti: i) Fisica tecnica industriale ed ambientale, ii) Misura, analisi e monitoraggio delle prestazioni energetiche degli edifici, iii) Misura e contabilizzazione dei consumi energetici. È autrice di 15 pubblicazioni su primarie riviste scientifiche e negli atti di convegni nazionali ed internazionali.

**Marianna De Monaco** è laureata con lode in Ingegneria Meccanica presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Cassino, e Dottoranda di Ricerca in Ingegneria Meccanica presso la stessa Università. Attualmente è iscritta al corso di Dottorato Industriale "Metodi, modelli e tecnologie per l'ingegneria", XXXVI ciclo A.A. 2020/2021 presso l'Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale, in collaborazione con ENEA. Le attività di ricerca sviluppate sono riconducibili principalmente ai seguenti ambiti: i) Fisica tecnica industriale ed ambientale, ii) Misura, analisi e monitoraggio delle prestazioni energetiche degli edifici, iii) Efficienza energetica degli edifici.