



Ricerca di Sistema elettrico

Ottimizzazione e miglioramento dei sistemi di contabilizzazione e dei metodi di ripartizione del calore

M. Dell'Isola, G. Ficco, L. Canale, R. D'Alessio, G. Cortellessa, A. Massimo, P. Vigo



OTTIMIZZAZIONE E MIGLIORAMENTO DEI SISTEMI DI CONTABILIZZAZIONE E DEI METODI DI RIPARTIZIONE DEL CALORE

M. Dell'Isola, G. Ficco, L. Canale, R. D'Alessio, G. Cortellessa, A. Massimo, P. Vigo

Settembre 2018

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2017

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

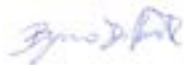
Progetto D.1 - Tecnologie per costruire gli edifici del futuro

Obiettivo:A2. Sistemi di metering e controlli innovativi per l'efficienza energetica degli edifici residenziali

Responsabile del Progetto: Ing. Giovanni Puglisi, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione nell'ambito della "Analisi dei benefici energetici ottenibili attraverso l'utilizzo dei sistemi di contabilizzazione e ripartizione del calore sul territorio nazionale"

Responsabile scientifico ENEA: Ing. Biagio Di Pietra



Responsabile scientifico DICeM: Prof. Ing. Marco Dell'Isola



Indice

SOMMARIO.....	7
1 INTRODUZIONE.....	8
2 OTTIMIZZAZIONE DEI METODI DI RIPARTIZIONE E DEI RISPARMI ATTESI DALLA CONTABILIZZAZIONE DEL CALORE.....	9
2.1 ANALISI DEI CRITERI DI RIPARTIZIONE DEI COSTI ENERGETICI CON PARTICOLARE RIFERIMENTO ALLO STUDIO DI “FATTORI CORRETTIVI” PER TENER CONTO DELLE ESPOSIZIONI SVANTAGGIATE E DEI FURTI DI CALORE.....	13
2.1.1 <i>Metodi per la ripartizione delle spese per riscaldamento in vigore in EU</i>	15
2.1.2 <i>Metodi basati su un principio di proporzionalità fissa</i>	17
2.1.3 <i>Metodi basati sul principio di responsabilità</i>	17
2.1.4 <i>Metodi basati sul principio di equità</i>	18
2.1.5 <i>Il metodo degli "extra-consumi"</i>	19
2.1.6 <i>Risultati sperimentali</i>	21
2.2 ANALISI DELLA PROPENSIONE AL RISPARMIO NELLE DIVERSE CONDIZIONI DI UTILIZZO DEI SISTEMI DI RIPARTIZIONE E DEI RISPARMI ENERGETICI CONSEGUIBILI, CON PARTICOLARE RIFERIMENTO ALL’EDILIZIA POPOLARE.....	25
2.2.1 <i>Indagine preliminare sulla propensione all’utilizzo dei sistemi di contabilizzazione indiretta e di termoregolazione</i>	28
2.2.1 <i>Indici di consumo energetico: casi di studio</i>	31
3. MIGLIORAMENTO DELLE PRESTAZIONI METROLOGICHE DEI SISTEMI DI MISURA DELL’ENERGIA TERMICA NEGLI EDIFICI INTELLIGENTI.....	41
3.1 STUDIO PER IL MIGLIORAMENTO DELLE PRESTAZIONI METROLOGICHE DEI DIVERSI SISTEMI DI CONTABILIZZAZIONE E RIPARTIZIONE DEL CALORE.....	41
3.1.1 <i>Miglioramento dell’accuratezza della stima della potenza termica dei corpi scaldanti</i>	41
3.1.2 <i>Progettazione di una campagna di misure sperimentali per l’analisi del miglioramento delle prestazioni dei sistemi di contabilizzazione indiretti attraverso configurazioni di impianto innovative</i>	55
3.2 ANALISI DEI SISTEMI DI TARATURA E VERIFICA IN CAMPO DEI SISTEMI DI CONTABILIZZAZIONE E RIPARTIZIONE DEL CALORE.....	58
3.2.1 <i>La verifica iniziale dei contatori di energia termica (EN 1434-5)</i>	60
3.2.2 <i>La verifica successiva dei contatori di energia termica</i>	61
3.2.3 <i>La verifica dei sistemi di contabilizzazione diretti mediante Master Meter</i>	63
3.2.4 <i>La verifica in campo dei sistemi di contabilizzazione diretti</i>	65
3.2.5 <i>Risultati della verifica sperimentale (in laboratorio)</i>	67
3.2.6 <i>Verifica dei sistemi di contabilizzazione diretti in campo</i>	72
3.3 ANALISI TECNICA E NORMATIVA DEI SISTEMI DI CONTABILIZZAZIONE DEL FREDDO.....	77
4 CONCLUSIONI.....	79
5 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	81
6 BIBLIOGRAFIA.....	82

Indice delle Tabelle

Tabella 1 – Caratteristiche termofisiche degli edifici ATER investigati	10
Tabella 2- Regole di ripartizione in EU in funzione dei costi variabili.....	16
Tabella 3 – Schema di ripartizione con stima degli extra-consumi	21
Tabella 4 - Costi energetici per riscaldamento nella stagione 2016-2018	22
Tabella 5 - Consumi volontari ed involontari calcolati con il metodo proposto	22
Tabella 6 - Principio di proporzionalità: ripartizione dei costi 2016-2017	23
Tabella 7 - Principio di responsabilità: ripartizione dei costi di riscaldamento 2016-2017	23
Tabella 8 - Principio di equità: ripartizione dei costi di riscaldamento 2016-2017	24
Tabella 9 – Analisi consumi critici.....	39
Tabella 10 - Valori di C per differenti tipologie di corpi scaldanti (UNI 10200:2018)	43
Tabella 11 – Aliquote tipiche dell’energia emessa per radiazione e convezione.....	45
Tabella 12 - Valori dell’emittenza totale in funzione delle caratteristiche superficiali (Peach, 1972).....	47
Tabella 13 - Confronto modelli di calcolo semi-empirici con il valore misurato sperimentalmente EN 442..	49
Tabella 14 - Variazione della potenza termica con il tipo di connessione	52
Tabella 15 - Variazione della potenza termica Φ_L al variare della portata e del numero di elementi.	53
Tabella 16 - Fattori di influenza delle condizioni di installazione sulla potenza termica effettiva.....	54
Tabella 17 – MPE per le diverse classi di Contatore di Energia Termica	59
Tabella 18 – Caratteristiche tecniche del contatore in verifica.....	64
Tabella 19 – Caratteristiche tecniche del Master Meter.....	64
Tabella 20 - Volume minimo di prova	66
Tabella 21 - Condizioni nominali di verifica	67
Tabella 22 – Risultati della verifica della coppia di sensori di temperatura (tubazione isolata).....	70
Tabella 23 – Esito della verifica della coppia di sensori di temperatura (tubazione isolata)	71
Tabella 24- Risultati della verifica della coppia di sensori di temperatura (tubazione isolata/NON isolata)..	71
Tabella 25– Analisi degli errori di misura tubazione isolata/non isolata	71
Tabella 26 – Risultati della verifica dei sensori di temperatura in bagno termostatico.....	72
Tabella 27 – Errore dei sensori di temperatura in bagno termostatico	72
Tabella 28 - Esito della verifica in campo della coppia di sensori di temperatura (tubazione isolata e Clamp-on utilizzato come riferimento).....	76
Tabella 29 – Tecniche di misura per la contabilizzazione del freddo	78

Indice delle Figure

Figura 1 – Fabbricato ATER Anagni 18B.....	11
Figura 2 - Layout di piano del fabbricato ATER Anagni 18B	11
Figura 3 – Fabbricato Anagni ATER 18C.....	12
Figura 4 - Layout di piano del fabbricato Anagni ATER 18C	12
Figura 5 - Classificazione dei costi	15
Figura 6 - Andamento dei consumi individuali per : a) mese tipico; b) intera stagione di riscaldamento.....	22
Figura 7 - Confronto tra i differenti metodi di ripartizione nell’edificio ATER investigato.....	25
Figura 8 – Composizione del campione oggetto di indagine.....	28
Figura 9 – Questionario somministrato agli inquilini degli Edifici ATER investigati	29
Figura 10 – Analisi dei questionari (totale del campione).....	30
Figura 11 – Analisi dei questionari, Edificio ATER 18B	30
Figura 12 – Analisi dei questionari, Edificio ATER 18C	30
Figura 13 –Indici di consumo globale 2017/18, edificio ATER 18B	32
Figura 14 - Indici di consumo globali 2017/18, edificio ATER 18C	32
Figura 15 – Andamento settimanale degli indici di consumo globale e dei due edifici e dei Gradi Giorno....	33
Figura 16 - Indici di consumo locali 2017/18, edificio ATER 18B Interno 1.....	33
Figura 17 - Indici di consumo locali 2017/18, edificio ATER 18B Interno 2.....	33
Figura 18 - Indici di consumo locali 2017/18, edificio ATER 18B Interno 3.....	34
Figura 19 - Indici di consumo locali 2017/18, edificio ATER 18B Interno 4.....	34
Figura 20 - Indici di consumo locali 2017/18, edificio ATER 18B Interno 5.....	34
Figura 21 - Indici di consumo locali 2017/18, edificio ATER 18B Interno 6.....	35
Figura 22 - Indici di consumo locali 2017/18, edificio ATER 18B Interno 7.....	35
Figura 23 - Indici di consumo locali 2017/18, edificio ATER 18B Interno 8.....	35
Figura 24 - Indici di consumo locali 2017/18, edificio ATER 18C Interno 1.....	36
Figura 25- Indici di consumo locali 2017/18, edificio ATER 18C Interno 2.....	36
Figura 26- Indici di consumo locali 2017/18, edificio ATER 18C Interno 3.....	36
Figura 27- Indici di consumo locali 2017/18, edificio ATER 18C Interno 4.....	37
Figura 28- Indici di consumo locali 2017/18, edificio ATER 18C Interno 5.....	37
Figura 29- Indici di consumo locali 2017/18, edificio ATER 18C Interno 6.....	37
Figura 30- Indici di consumo locali 2017/18, edificio ATER 18C Interno 7.....	38
Figura 31- Indici di consumo locali 2017/18, edificio ATER 18C Interno 8.....	38
Figura 32- Indici di consumo locali 2017/18, edificio ATER 18C Interno 9.....	38
Figura 33 – Proposta di layout per il bollettino informativo frequente	40
Figura 34 - Dimensioni caratteristiche di un corpo scaldante	42
Figura 35 - Scostamento tra il metodo dimensionale e gli altri metodi di stima della potenza termica (fonte PoliMI)	44
Figura 36 - Andamento del coefficiente C al variare dell’altezza (a) e larghezza (b) del corpo scaldante	47
Figura 37 - Andamento del coefficiente C al variare dell’altezza (a) e larghezza (b) del corpo scaldante	48
Figura 38 - Radiatore in ghisa Tipologia 5 con colonne grandi e mozzo 60	49
Figura 39 - Confronto tra i modelli di calcolo con il valore misurato sperimentalmente EN 442	50
Figura 40 - Andamento della potenza termica e della sua correzione al variare del ΔT	51
Figura 41 - Variazione della potenza termica misurata in funzione della portata volumetrica	53
Figura 42 - Variazione del fattore correttivo F_p al variare dell’altitudine.....	55
Figura 43 – Configurazione ibrida di un sistema di contabilizzazione indiretta	56
Figura 44 – Mockup di prova per sistemi di contabilizzazione dell’INRIM di Torino	57
Figura 45 - MPE sottounità contatore di energia termica.....	59
Figura 46 – requisiti di installazione Master Meter clamp-on ad ultrasuoni	62
Figura 47 – Laboratorio LAMI: a) banco contatori di energia termica, b) schema di funzionamento	63
Figura 48 –Layout sperimentale di verifica dei contatori di energia termica	65
Figura 49 – Durata minima di prova in funzione della risoluzione del misuratore in verifica e della portata	66

Figura 50 – Risultati prove preliminari a $\vartheta=50\text{ °C}$	67
Figura 51 – Risultati della verifica a $\vartheta=50\text{ °C}$	68
Figura 52 – Risultati della verifica a $\vartheta=20\text{ °C}$	68
Figura 53 – Configurazione di prova in presenza di disturbo di flusso (gomito a 90°).....	69
Figura 54 – Risultati della verifica in presenza di disturbo di flusso a $\vartheta=20\text{ °C}$	69
Figura 55 – Layout di verifica per la coppia di sensori di temperatura.....	70
Figura 56 – Risultati della taratura del Master Meter in laboratorio.....	73
Figura 57– Risultati della verifica in campo con Master Meter corretto.....	73
Figura 58 – Risultati della verifica in campo con Master Meter NON corretto.....	73
Figura 59 – Esito della verifica simulata in campo: a), b).....	74
Figura 60 - Risultati sperimentali della verifica del sensore di flusso di un misuratore di energia termica condominiale in laboratorio (curva blu) e in campo mediante Master Meter clamp-on a ultrasuoni (curva viola). Fonte INRIM.....	74
Figura 61 – Risultati sperimentali della verifica di un misuratore di energia termica condominiale in laboratorio (fonte INRIM).....	75
Figura 62 – Tipologie di impianti termici di raffreddamento [78].....	78

Sommario

Il presente rapporto dal titolo *“OTTIMIZZAZIONE E MIGLIORAMENTO DEI SISTEMI DI CONTABILIZZAZIONE E DEI METODI DI RIPARTIZIONE DEL CALORE”* 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.

Nello specifico, l’attività oggetto della ricerca ha riguardato due principali aspetti: 1) l’ottimizzazione dei metodi di ripartizione e dei risparmi attesi dalla contabilizzazione del calore, 2) il miglioramento delle prestazioni metrologiche dei sistemi di misura dell’energia termica negli edifici intelligenti.

Per la prima attività sono stati, da un lato, analizzati i criteri di ripartizione dei costi energetici applicati nei paesi dell’UE con particolare riferimento allo studio di “fattori correttivi” per tener conto delle esposizioni svantaggiate e dei furti di calore. Dall’altro lato, sulla base degli indici di prestazione individuati nella ricerca PAR 2016 e descritti nel relativo Rapporto, è stata effettuata un’analisi puntuale della propensione al risparmio nelle diverse condizioni di utilizzo dei sistemi di ripartizione e dei risparmi energetici conseguibili in due edifici caso di studio di edilizia popolare in provincia di Frosinone.

Per la seconda attività, è stato effettuato uno studio per il miglioramento delle prestazioni metrologiche dei sistemi di contabilizzazione e ripartizione del calore ad esempio attraverso l’ottimizzazione del metodo dimensionale per la stima della potenza termica dei corpi scaldanti e attraverso la definizione di configurazioni innovative per i sistemi di contabilizzazione indiretti. E’ stata inoltre effettuata un’analisi sperimentale per lo studio delle modalità di taratura e verifica in campo dei sistemi di contabilizzazione e ripartizione del calore

Gli autori ritengono che i risultati raggiunti e descritti puntualmente nel presente rapporto di ricerca potranno essere utili al fine di:

- a) definire modalità di ripartizione delle spese di riscaldamento che presentino carattere di equità sociale superando il problema degli appartamenti svantaggiati e che, al contempo, possano rappresentare un reale impulso per l’adozione di interventi di retrofit energetico;
- b) individuare gli strumenti adeguati per informare in maniera efficace gli utenti residenziali sull’uso puntuale della risorsa energetica al fine di stimolarne l’uso razionale e, quindi, di incentivare comportamenti virtuosi finalizzati al risparmio energetico;
- c) individuare nuovi e più efficaci modelli per il miglioramento delle prestazioni dei sistemi di contabilizzazione;
- d) definire le modalità operative per la conduzione delle verifiche periodiche in campo dei sistemi di contabilizzazione diretta;
- e) definire le tecniche e la strumentazione per la contabilizzazione del freddo.

In particolare, si ritiene i risultati descritti nel presente rapporto possono essere utilizzati come analisi pre-normativa da proseguire in collaborazione con ENEA, UNI-CTI e MISE, oltre che con INRIM, per lo sviluppo/aggiornamento della normativa tecnica del settore.

1 Introduzione

Come noto, la Direttiva europea 2012/27/UE sull'Efficienza Energetica (EED) ha previsto l'obbligo per le utenze residenziali servite da un impianto termico centralizzato o da teleriscaldamento di installare sistemi che consentano la misura individuale dei consumi (i.e. contatori diretti di energia termica o dispositivi per la sua misura indiretta associata a sistemi per la termoregolazione dell'ambiente).

D'altra parte, l'introduzione dei suddetti sistemi di contabilizzazione individuale e l'evoluzione della normativa del settore, impone l'approfondimento di numerosi aspetti operativi affinché possa essere perseguito il fine principale della Direttiva, ovvero l'ottenimento di un adeguato risparmio energetico attraverso l'aumento della consapevolezza dei consumi energetici degli utenti finali e l'introduzione di criteri equi per la ripartizione delle spese di riscaldamento.

Nel presente progetto di ricerca, grazie alla collaborazione con l'Ente Territoriale di Edilizia Residenziale ATER di Frosinone, è stato possibile sperimentare direttamente su due edifici di edilizia popolare un modello di ripartizione che tenesse conto anche delle condizioni svantaggiate degli appartamenti. Il metodo sviluppato è stato confrontato con gli altri metodi adottati nei paesi UE. Sugli stessi edifici è stato inoltre possibile stimare adeguati indici di consumo al fine di progettare una campagna di sensibilizzazione degli utenti al corretto uso dei sistemi di contabilizzazione e, quindi, della risorsa energetica ai fini dell'ottenimento del risparmio energetico auspicato dalla EED. Sono state inoltre approfondite le tematiche relative al miglioramento delle prestazioni metrologiche dei sistemi di contabilizzazione e della conduzione delle verifiche periodiche in campo dei sistemi diretti, resa obbligatoria dal recente Decreto Ministeriale 93/2017.

La ricerca condotta dall'Università di Cassino e del Lazio Meridionale per conto di ENEA è consistita in due linee principali: 1) l'ottimizzazione dei metodi di ripartizione e dei risparmi attesi dalla contabilizzazione del calore; 2) miglioramento delle prestazioni metrologiche dei sistemi di misura dell'energia termica negli edifici intelligenti.

In particolare, per la prima linea di ricerca sono state sviluppate le seguenti attività:

1. analisi dei criteri di ripartizione dei costi energetici con particolare riferimento allo studio di "fattori correttivi" per tener conto delle esposizioni svantaggiate e dei furti di calore;
2. analisi della propensione al risparmio nelle diverse condizioni di utilizzo dei sistemi di ripartizione e dei risparmi energetici conseguibili, con particolare riferimento all'edilizia popolare.

Per la seconda linea di ricerca le attività sviluppate sono state:

1. studio per il miglioramento delle prestazioni metrologiche dei diversi sistemi di contabilizzazione e ripartizione del calore (e.g. migliorando l'incertezza del metodo dimensionale e degli strumenti di ripartizione indiretta, sviluppando tecniche di verifica delle prestazioni in campo);
2. analisi dei sistemi di taratura e verifica in campo dei sistemi di contabilizzazione e ripartizione del calore.
3. Analisi tecnica e normativa dei sistemi di contabilizzazione del freddo

2 Ottimizzazione dei metodi di ripartizione e dei risparmi attesi dalla contabilizzazione del calore

In questo capitolo, vengono sviluppati e descritti:

1. L'analisi dei criteri di ripartizione dei costi energetici con particolare riferimento allo studio di "fattori correttivi" per tener conto delle esposizioni svantaggiate e dei furti di calore [1];
2. L'analisi della propensione al risparmio nelle diverse condizioni di utilizzo dei sistemi di ripartizione e dei risparmi energetici conseguibili, con particolare riferimento all'edilizia popolare.

In particolar modo nel paragrafo §2.1 gli autori, dopo una breve analisi dei metodi di ripartizione delle spese di riscaldamento in diversi stati dell'UE, descrivono un nuovo metodo di ripartizione applicandolo ad un caso studio del patrimonio edilizio ATER del frusinate, in cui era stato installato un sistema di contabilizzazione indiretta e presentano i risultati del confronto in termini di ripartizione dei costi di riscaldamento per l'edificio oggetto di studio del modello con altri metodi applicabili, evidenziandone i punti di forza e di debolezza.

Nel paragrafo §2.2, a valle dell'analisi della bibliografia disponibile sul tema dell'ottimizzazione delle soluzioni di smart-metering con particolare riferimento all'edilizia popolare, gli autori presentano i risultati preliminari della progettazione di una campagna di informazione degli utenti in due edifici di edilizia popolare caso di studio monitorati tramite sistemi di contabilizzazione indiretta del calore e dotati di sistema di termoregolazione di zona mediante valvole termostatiche su ciascun radiatore.

Di seguito i due edifici vengono sinteticamente descritti.

Gli edifici caso di studio sono due fabbricati di edilizia popolare situati ad Anagni, in provincia di Frosinone. Entrambi gli edifici sono stati costruiti nel 1979 da ATER, l'Agenzia Territoriale per l'Edilizia Residenziale, e presentano caratteristiche costruttive ed impiantistiche del tutto simili. Gli edifici hanno struttura in cemento armato, con caratteristiche termo-fisiche e stato di manutenzione tipici degli edifici residenziali di edilizia popolare italiani. Come la maggior parte degli edifici di edilizia popolare in Italia, infatti, gli edifici investigati richiederebbero un importante intervento di retrofit energetico, sia per migliorare l'isolamento dell'involucro edilizio sia per aumentare l'efficienza dell'impianto di riscaldamento. La maggior parte degli inquilini sono persone a basso reddito e anziani e la loro attitudine ad interagire con i sistemi di automazione come i termostati programmabili e le valvole termostatiche dei radiatori è piuttosto bassa.

Le trasmittanze dei singoli elementi costruttivi sono state stimate dagli autori attraverso dati ottenuti da analisi storiche o analogie con edifici simili utilizzando database tecnici specifici [2]. Le principali caratteristiche termofisiche degli edifici esaminati sono elencate in Tabella 1.

Tabella 1 – Caratteristiche termofisiche degli edifici ATER investigati

Elemento edilizio	Descrizione	Strati (dall'interno verso l'esterno)	Spessore [m]	Trasmittanza termica stimata [$Wm^{-2}K^{-1}$]	Trasmittanza termica di riferimento* [$Wm^{-2}K^{-1}$]
Copertura	Tetto a falde non isolato su spazio non riscaldato	Intonaco di gesso	0.02	1.67	0.26
		Calcestruzzo	0.20		
		Strato impermeabilizz. (bitume)	0.004		
		Tegole	0.015		
Muri esterni	Calcestruzzo non isolato/mattoni forati con intercapedine d'aria	Intonaco di gesso	0.02	1.12	0.32
		Mattoni a cassa vuota	0.10		
		Intercapedine d'aria	0.08		
		Mattoni faccia vista	0.10		
Muri interni	Muro di mattoni forati non isolati	Intonaco di gesso	0.01	1.77	-
		Mattoni forati	0.10		
		Intonaco di gesso	0.01		
Pavimenti	Piastrelle ceramiche in monocottura	Intonaco di gesso	0.02	1.30	0.32
		Calcestruzzo a nucleo cavo	0.18		
		Calcestruzzo	0.05		
		Piastrelle in ceramica	0.01		
Finestre	Singolo vetro con telaio in legno	---	---	4.90	1.80

* riferita alla zona climatica "D" per specifici requisiti di retrofit (Allegato 1 del Decreto del Ministero dello Sviluppo Economico (MISE) del 26/06/2015)

L'impianto di riscaldamento è di tipo centralizzato alimentato a gas naturale, il cui consumo viene misurato attraverso un contatore di gas a membrana G16 classe 1,5 MID [3]. Infine, una sonda di temperatura consente il monitoraggio continuo della temperatura esterna. La distribuzione del fluido termovettore avviene in entrambi gli edifici tramite un impianto di distribuzione a colonne montanti verticali. I tubi non sono isolati e corrono principalmente nelle pareti esterne. In tutte le abitazioni sono installati radiatori in ghisa.

I consumi volontari e involontari dei due edifici sono monitorati attraverso un sistema di ripartizione indiretto e un contatore di calore diretto classe 2 MID nel locale caldaia. Il sistema è accessibile a distanza tramite un sistema di comunicazione GSM che consente letture e fatturazioni frequenti. Il gas naturale per la produzione di acqua calda e per cottura viene fornito da singole caldaie a ciascuna abitazione.

Di seguito si descrivono nel dettaglio le caratteristiche costruttive dei due edifici.

Caso di Studio N.1: Anagni ATER 18B

Il fabbricato Anagni ATER 18B è composto da otto appartamenti in due blocchi collegati. Il primo, composto da due abitazioni su due piani, si trova sopra un portico non riscaldato (abitazione tipo C). Il secondo, situato sopra i garage, è composto da sei abitazioni (due per ogni piano) di cui tre orientate a nord-ovest (abitazione tipo A) e 3 orientate a sud-ovest (abitazione tipo B). In Figura 1 e Figura 2 sono riportate alcune immagini, il layout e la sezione trasversale dell'edificio.



Figura 1 – Fabbricato ATER Anagni 18B

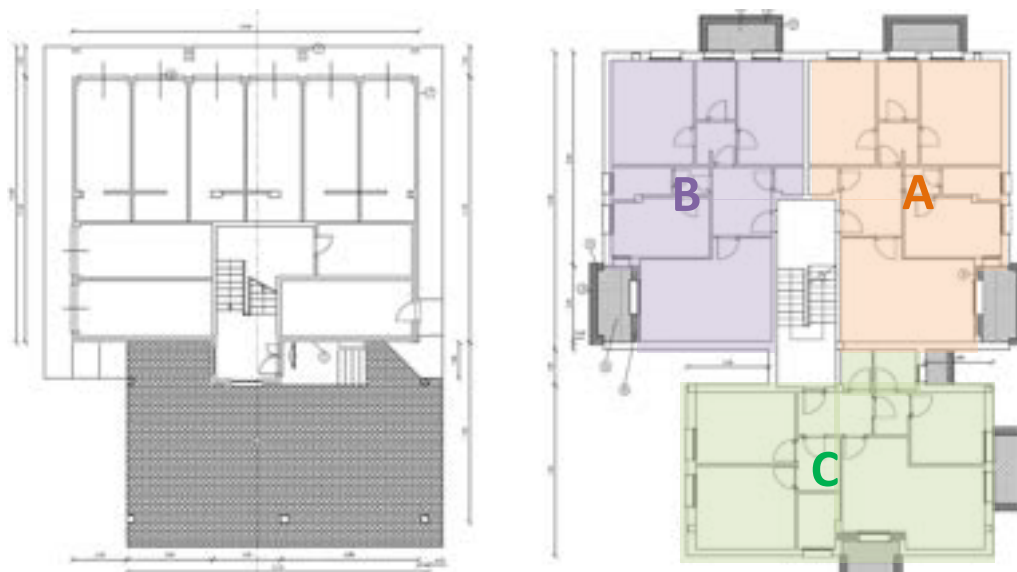


Figura 2 - Layout di piano del fabbricato ATER Anagni 18B

Gli appartamenti di tipo A e B presentano una superficie netta di circa 79 m², mentre gli appartamenti di tipo C di circa 86 m². L'altezza del soffitto netta è di 2,7 m. I due appartamenti di tipo C presentano un'ampia superficie disperdente sia verso l'esterno che verso spazi non riscaldati (il sottotetto e il portico). Gli appartamenti tipo A e tipo B presentano elevati flussi di calore verso ambienti non riscaldati solo al primo (verso i garage) e all'ultimo piano (verso il sottotetto), mentre gli appartamenti del piano intermedio sono racchiusi tra appartamenti riscaldati adiacenti.

Nell'edificio è stato installato un sistema di contabilizzazione del calore indiretto con totalizzatori ad inserzione compensati con la temperatura di ingresso del fluido termovettore [4], conforme alla norma tecnica nazionale UNI 11388 [5], mentre il controllo della temperatura dei singoli ambienti è ottenuto tramite valvole elettroniche controllate da un termostato programmabile. In questo modo, ogni appartamento è autonomo e costituito da un'unica zona termica.

Caso di Studio N.2: Anagni ATER 18C

Il fabbricato Anagni ATER 18C è composto da nove appartamenti in due blocchi collegati. Il primo, composto da tre abitazioni su due piani, si trova sopra un portico non riscaldato (abitazione tipo C). Il secondo, situato sopra i garage, è composto da sei abitazioni (due per ogni piano) di cui tre orientate a nord-ovest (abitazione tipo A) e 3 orientate a sud-ovest (abitazione tipo B). Gli appartamenti di tipo A e B presentano una superficie netta di circa 79 m², mentre gli appartamenti di tipo C di circa 86 m². L'altezza del soffitto netta è di 2,7 m.

In Figura 3 e Figura 4 sono raffigurate alcune immagini, gli schemi di layout e la sezione trasversale dell'edificio investigato.



Figura 3 – Fabbricato Anagni ATER 18C



Figura 4 - Layout di piano del fabbricato Anagni ATER 18C

Nel l'edificio è stato installato un sistema indiretto di ripartizione del calore con ripartitori conformi alla UNI EN 834:2013 [6] 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.

2.1 *Analisi dei criteri di ripartizione dei costi energetici con particolare riferimento allo studio di “fattori correttivi” per tener conto delle esposizioni svantaggiate e dei furti di calore*

Come noto, il consumo di energia residenziale in Europa rappresenta circa il 45% della domanda totale di energia, e di questo circa l'80% è attribuibile al riscaldamento e al raffrescamento degli edifici [7]. Con l'obiettivo di ridurre il consumo energetico nel settore residenziale, la direttiva sull'efficienza energetica (EED) [8] ha recentemente obbligato negli Stati Membri (SM) dell'Unione Europea (UE) l'installazione di sistemi di contabilizzazione del calore in edifici plurifamiliari forniti da una fonte di riscaldamento centralizzata, quando tecnicamente fattibile ed economicamente efficiente [9]. Tuttavia, nonostante l'UE richieda la definizione e l'introduzione di metodi di ripartizione dei costi basati sul consumo e la fatturazione informativa frequente agli utenti finali per il riscaldamento, il raffrescamento e la produzione di acqua calda sanitaria, non tutti gli Stati membri dell'UE hanno introdotto norme specifiche a livello nazionale. Riguardo in particolare al raffrescamento, solo due Stati Membri (SM), Danimarca ed Estonia hanno definito regole chiare su questo argomento [10].

Come evidenziato anche da Canale et al. [11], l'impatto dell'installazione dei sistemi di contabilizzazione del calore e delle valvole termostatiche dei radiatori negli edifici residenziali su scala nazionale dipende fortemente dalle politiche energetiche adottate. Di fatto, l'UE promuove la definizione di efficaci strumenti di policy per incoraggiare comportamenti energeticamente efficienti degli utilizzatori finali [12, 13]. Tuttavia, la definizione di metodi equi per l'allocazione dei costi di riscaldamento nelle abitazioni fornite da un sistema di riscaldamento centralizzato è una questione complessa, che si apre anche a risvolti politici, sociali, economici e tecnici.

Misurare o stimare il calore erogato a ciascun appartamento può essere facilmente effettuato tramite Heat Meters (HM) o Heat Cost Allocators (HCA), rispettivamente. Tuttavia, l'installazione di tali sistemi all'interno di un edificio introduce problemi di equità nella ripartizione dei costi di riscaldamento tra gli inquilini, senza peraltro considerare i problemi correlati in termini di accuratezza e protezione dei consumatori [14-16]. Infatti, alcuni appartamenti (e.g. quelli al primo e all'ultimo piano, quelli adiacenti a spazi non riscaldati o male orientati) possono vedere addirittura raddoppiati i propri costi di riscaldamento a seconda del metodo di ripartizione adottato, a parità di comportamento energetico e livello di comfort dei loro vicini.

Infatti, il consumo di energia per riscaldamento dipende direttamente dal comportamento dell'utente (ad es. temperatura impostata, ore di funzionamento dell'impianto di riscaldamento, ecc.) [17-19], dalle condizioni climatiche (es. temperatura esterna, radiazione solare ecc.) ma anche dalle caratteristiche morfologiche e costruttive degli edifici (ad es. trasmittanze termiche, tenuta all'aria, superficie dell'involucro edilizio, fattore di forma ecc.) e dei sistemi di riscaldamento (ad es. efficienza del sistema), che influiscono notevolmente sul consumo finale, indipendentemente dalla volontà dell'utente. Pertanto, è difficile stabilire se il calore misurato è o non è attribuibile a un determinato appartamento.

Questo problema è stato affrontato da diversi autori nella letteratura scientifica. Ad esempio:

- Siggelsten [20] ha sviluppato un metodo per stimare i trasferimenti di calore tra appartamenti adiacenti in edifici multi-appartamento al fine di allocare i relativi costi di riscaldamento. Applicando il metodo a un edificio esistente con 16 appartamenti, ha dimostrato la possibilità di utilizzare i fattori di correzione in modo economicamente efficiente.
- Michnikowski [21] ha proposto una modifica del metodo proposto da Siggelsten per correggere gli errori nell'assegnazione dei costi di riscaldamento negli edifici plurifamiliari, basandosi sulla determinazione della temperatura media con l'uso di HCA speciali e sulla determinazione analitica dell'energia richiesta per il riscaldamento allo scopo di correggere le quote dei singoli utenti.

- Davariu [22] ha proposto un metodo per correggere i costi di riscaldamento attraverso la differenza misurata tra la temperatura di comfort interna e quella esterna.

Tuttavia, come evidenziato anche da Liu et al. [23], la letteratura scientifica tende a mettere in evidenza la questione della "equità" della ripartizione dei costi energetici, non affrontando tuttavia il problema da un punto di vista più ampio, ovvero che la contabilizzazione del calore basata sul consumo individuale dovrebbe essere funzionale all'ottenimento di comportamenti energeticamente efficienti e a promuovere l'efficientamento negli edifici.

L'adozione di comportamenti responsabili volti al raggiungimento del risparmio/efficienza energetica deve essere promossa attraverso adeguati driver normativi, in particolare nell'edilizia sociale, dove i vincoli economici [24] e le caratteristiche degli edifici dovrebbero essere attentamente considerati. Infatti, gli appartamenti di edilizia popolare sono per lo più assegnati in modo casuale, gli inquilini pagano sulla base della superficie dell'abitazione e indipendentemente dal suo fabbisogno energetico, i primi e gli ultimi piani (in genere le posizioni più sfavorevoli) non hanno ulteriori vantaggi, specialmente in caso di assenza di ascensore [25].

Il miglioramento dell'efficienza energetica degli edifici plurifamiliari non è sempre facilmente realizzabile. Ad esempio, la decisione di migliorare l'isolamento dei componenti dell'involucro edilizio (come il tetto) non dipende esclusivamente dalla volontà dei singoli inquilini e dei proprietari, ma deve essere concordata in assemblea condominiale. Le proprietà comuni determinano una situazione singolare: spetta a tutti i proprietari decidere se migliorare o meno le prestazioni energetiche dell'edificio (cioè attraverso la sostituzione della caldaia, l'isolamento delle superfici comuni), mentre le inefficienze interessano principalmente solo poche abitazioni. Ciò rappresenta spesso un ostacolo per l'approvazione dei retrofit energetici negli edifici residenziali, perché non tutti i proprietari sono allo stesso tempo potenziali beneficiari diretti dell'intervento. Tale situazione è ancora più complessa quando gli inquilini non sono i proprietari dell'appartamento, come spesso accade negli alloggi sociali. Inoltre, la mancanza di trasparenza e semplicità di diversi metodi di ripartizione del calore non incoraggia comportamenti virtuosi e può portare a una percezione di iniquità e all'aumento delle controversie.

Nell'ambito del presente progetto di ricerca, gli autori hanno sviluppato un metodo di ripartizione dei costi di riscaldamento che tiene conto delle problematiche sopra descritte e che risulta applicabile in particolare negli edifici di edilizia popolare. Il metodo proposto si basa sulla stima del consumo dovuta all'inefficienza dell'edificio, di seguito chiamato "extra-consumo", ovvero il consumo aggiuntivo a quello che si verificherebbe se venissero rispettati i limiti legali vigenti in materia di trasmittanza termica dell'involucro edilizio. I costi aggiuntivi dovuti all'inefficienza degli edifici sono quindi ripartiti temporaneamente a tutti gli inquilini, fino a quando non viene effettuato un intervento di retrofit che annulli l'extra-consumo. Il metodo sviluppato potrebbe quindi rappresentare un driver per migliorare l'efficienza energetica degli edifici senza causare condizioni di disagio e/o uno sbilanciamento del sistema di riscaldamento. Si ritiene che questo dovrebbe rappresentare un fattore trainante per la realizzazione del retrofit energetico.

Le principali peculiarità del metodo proposto sono le seguenti:

- i) La ripartizione del consumo di energia delle parti comuni dell'edificio è proporzionale alla prestazione energetica dell'edificio di riferimento (ovvero la trasmittanza termica minima stabilita dalla normativa vigente per fascia climatica) e non è una pura correzione dei dati di consumo;
- ii) tutti gli inquilini sono responsabilizzati a migliorare l'efficienza energetica delle aree comuni e, di conseguenza, i proprietari dovrebbero essere incoraggiati ad eseguire l'intervento di retrofit energetico;
- iii) una volta eseguito il retrofit energetico, proprietari e/o inquilini vedranno ripartirsi solo la quota del loro consumo individuale senza alcuna compensazione.

A differenza dei metodi già proposti nella letteratura scientifica, che affrontano principalmente il problema con l'obiettivo di migliorare l'equità della ripartizione, quello sviluppato dagli autori è finalizzato anche a guidare strategicamente gli utenti finali verso un utilizzo consapevole dell'energia e a promuovere la realizzazione di interventi di retrofit energetico degli edifici. Il metodo proposto è stato sperimentato in

un edificio di edilizia popolare (l'edificio caso di studio ATER 18B), consentendo allo stesso tempo un confronto tra metodi di allocazione del costo del calore adottati in alcuni paesi europei.

Di seguito, dopo una breve analisi dei metodi di ripartizione delle spese di riscaldamento in diversi stati dell'UE, gli autori descrivono il metodo proposto e lo applicano al caso studio del patrimonio edilizio ATER del frusinate (fabbricato B). Infine, i risultati del modello in termini di ripartizione dei costi di riscaldamento per l'edificio oggetto di studio vengono confrontati con altri metodi applicabili, evidenziandone i punti di forza e di debolezza.

2.1.1 Metodi per la ripartizione delle spese per riscaldamento in vigore in EU

Negli stati in cui sono definite specifiche regole, i costi energetici per il riscaldamento, il raffreddamento e la produzione di acqua calda sanitaria sono suddivisi in costi variabili e costi fissi. I primi vengono solitamente assegnati in base alle letture raccolte dai singoli contatori o dispositivi di ripartizione dei costi energetici. I costi fissi, che generalmente comprendono i costi di manutenzione e di esercizio, l'energia per i dispositivi ausiliari, come pompe di circolazione, sistemi di controllo ecc., e i servizi di terzi forniti per la misurazione e la ripartizione dei costi, sono suddivisi tra gli inquilini generalmente in proporzione alla superficie dell'abitazione [26]. Nella Figura 5 viene presentata la classificazione dei costi di riscaldamento.

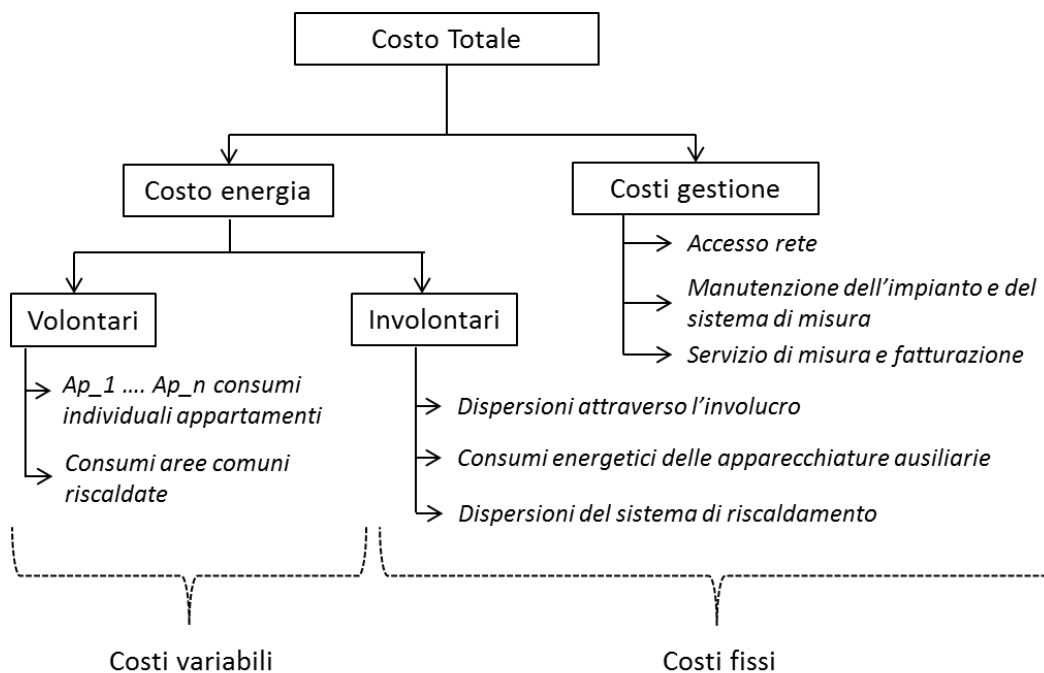


Figura 5 - Classificazione dei costi

Tra gli Stati Membri dell'UE la percentuale del consumo di energia per i costi fissi varia tra un minimo del 25% e un massimo del 60% [10]. Questa elevata variabilità è principalmente attribuibile alle diverse caratteristiche degli stock di edifici. Le quote più elevate di costi fissi sono, infatti, adottate nei paesi dell'Europa orientale, come Romania, Estonia, Slovacchia e Polonia, in cui l'edilizia sociale è più diffusa e dove gli edifici consumano più energia (a causa del loro scarso isolamento e delle basse prestazioni di sistemi di riscaldamento) e i dispositivi di controllo termico non sono molto diffusi. In Polonia, è persino in discussione una proposta volta a portare al 90% la quota dei costi fissi in edifici plurifamiliari non dotati di valvole termostatiche per radiatori. In altri paesi (Germania, Francia, Austria, Croazia, Repubblica Ceca,

Danimarca, Ungheria) la quota dei costi fissi varia tra il 30% e il 50% e la scelta è lasciata a diversi attori (proprietari, società di servizi, fornitori di energia termica, professionisti ecc.). Tra gli stati non UE, la Svizzera applica lo stesso metodo di ripartizione dei costi sopra descritto, dividendo la spesa totale in "costi generali" e "costi basati sul consumo", assumendo per il primo una quota variabile tra il 30% e il 50%.

In Tabella 2 viene presentata una panoramica delle attuali regole di ripartizione dei costi di riscaldamento tra diversi Stati Membri dell'UE.

Tabella 2- Regole di ripartizione in EU in funzione dei costi variabili

Stato Membro	Percentuale dei costi variabili		Note	Compensazione
	Min.	Max.		
Austria	55%	75%	Le percentuali sono definite attraverso accordi tra la società energetica e gli utenti. Se non è possibile trovare un accordo, il costo dell'energia è diviso per il 65% in base al consumo misurato e per il 35% per superficie.	Vietato
Bulgaria	60%	75%	L'allocazione dei costi di riscaldamento viene eseguita da società di trasmissione del calore, dai fornitori di energia o da tecnici qualificati. I fattori di compensazione sono usati raramente.	Permesso
Croazia	10%	50%	-	Permesso
Rep. Ceca	50%	70%	A nessuno è consentito di pagare una quota inferiore al -20% o superiore al + 100% della media dell'edificio.	Obbligatorio
Danimarca	50%	70%	L'allocazione dei costi di riscaldamento è gestita dalla società energetica o dal proprietario dell'edificio.	Obbligatorio
Estonia	40%	60%	Le quote di costi fissi e variabili non sono specificate nella normativa attuale. In genere, le società che offrono sistemi e servizi di misurazione e/o allocazione dei costi forniscono anche raccomandazioni sulla suddivisione dei costi energetici per riscaldamento. I fattori di compensazione sono ampiamente utilizzati.	Permesso
Francia	70%		La quota per il consumo volontario è fissata dalla legge. Le misure di compensazione sono consentite e gestite dalla assemblea condominiale	Permesso
Germania	50%	70%	La scelta è concordata dal proprietario dell'edificio nel contratto di affitto con gli inquilini. È richiesto che il 70% del costo totale sia basato sul consumo individuale.	Vietato
Grecia	Calcolato caso per caso		I costi energetici fissi sono calcolati in funzione del "calore indiretto" consegnato all'appartamento attraverso fattori specifici forniti dallo standard tecnico greco in funzione delle caratteristiche dell'abitazione.	Permesso
Ungheria	50%	70%	Le regole di ripartizione dei costi di riscaldamento sono definite solo per il teleriscaldamento, non si fa cenno a regole simili per i sistemi di riscaldamento centralizzati. L'assemblea condominiale può decidere se applicare uno schema diverso, spesso con un calcolo energetico dettagliato. Il risarcimento è consentito ed eseguito per stanze singole nell'abitazione.	Permesso
Italia	Minimo 70%		Per legge è richiesto un calcolo dettagliato dei consumi energetici eseguiti da un tecnico qualificato.	Vietato
Lettonia	Non regolamentato		Non vi è alcun obbligo di adottare o meno regole di ripartizione dei costi basate sul consumo effettivo. Viceversa, la scelta del metodo di calcolo è in carico all'assemblea condominiale. L'adozione di misure di compensazione è consentita ed eseguita da tecnici indipendenti.	Permesso
Lituania	Non regolamentato		I proprietari di appartamenti/edifici possono decidere il metodo di ripartizione dei costi di riscaldamento. Il metodo concordato deve essere autorizzato/convalidato dalla Commissione nazionale per il controllo e i prezzi dell'energia.	Obbligatorio

Stato Membro	Percentuale dei costi variabili		Note	Compensazione
Olanda	Non regolamentato		Se richiesto da uno o più inquilini, è consentito domandare a un professionista di controllare la ripartizione dei costi di riscaldamento eseguita dal servizio o dalla società di riscaldamento. L'uso di fattori di compensazione è attualmente in discussione.	Non applicabile
Polonia	Non regolamentato		È attualmente in discussione l'adozione di un intervallo min./max. per il consumo di calore variabile tra il 10 e il 45%	---
Romania	Non regolamentato		È in corso una discussione relativa all'adozione di uno share del 40% per i consumi energetici per riscaldamento. La compensazione è consentita e realizzata per le single stanze in un appartamento.	Permesso
Slovacchia	40%		Fissato per legge ma modificabile su accordo	Permesso
Slovenia	50%	80%	I bassi e alti consumi per metro quadrato rispetto alla media sono limitati al 40% e al 300% della media stessa, rispettivamente. I fattori di compensazione sono consentiti e stimati da tecnici indipendenti.	Permesso

Di seguito vengono presentati e discussi i principi di proporzionalità, responsabilità ed equità.

2.1.2 Metodi basati su un principio di proporzionalità fissa

Secondo il principio di "proporzionalità fissa", il consumo di energia viene ripartito in base a quote forfettarie generalmente basate sulla superficie (o, in alternativa, sul volume riscaldato dell'abitazione, sul fabbisogno di energia primaria, sulla potenza termica installata), indipendentemente dal suo consumo effettivo e, quindi, in proporzione all'energia potenzialmente consumata. Questo principio, benché diffuso in diversi Stati Membri, non promuove la consapevolezza dei singoli utenti rispetto al proprio consumo di energia, poiché i costi di riscaldamento sono ripartiti indipendentemente dai consumi effettivi individuali. Ad esempio, questo potrebbe non portare gli utenti a tenere spenti i termosifoni in ore e periodi in cui l'abitazione è disabitata o ad impostare un'adeguata temperatura interna di comfort.

2.1.3 Metodi basati sul principio di responsabilità

Il principio della "responsabilità", come quello in vigore in Italia, si basa sulla misura dell'energia effettivamente prelevata dall'utente attraverso sistemi diretti o indiretti. Questo principio distingue tra costi fissi e costi variabili. I primi sono attribuibili al comportamento degli utenti (il cosiddetto consumo volontario) mentre i secondi (il cosiddetto consumo involontario) includono i costi per manutenzione e funzionamento, per l'energia delle apparecchiature ausiliarie, per i servizi di misurazione e di ripartizione. I costi fissi a volte includono anche i costi relativi all'inefficienza del sistema di riscaldamento e al consumo di aree riscaldate comuni nell'edificio. La quota variabile del consumo di energia viene ripartita attraverso il consumo di energia misurato (cioè con il metodo diretto) o attraverso le letture dei ripartitori di calore (cioè il metodo indiretto) [4].

D'altra parte, i costi fissi sono generalmente addebitati a forfait per mezzo di adeguati coefficienti generalmente calcolati attraverso il fabbisogno energetico stimato, o la potenza termica installata del radiatore, o la superficie dell'abitazione o il volume riscaldato. Tuttavia, la ripartizione basata solo sul principio di responsabilità non rappresenta un driver efficace affinché gli utenti adottino comportamenti volti a migliorare l'efficienza energetica degli edifici. Infatti, le criticità energetiche riguardano principalmente pochi appartamenti (tipicamente primo e ultimo piano), mentre il consumo di energia può essere efficacemente ridotto solo attraverso specifici retrofit dell'intero edificio e, di conseguenza, con l'accordo della intera assemblea condominiale.

In Italia, secondo il Decreto Legislativo n. 102/2014 [27] e successive modifiche, si fa riferimento alla norma tecnica UNI 10200 [28], che prevede che la ripartizione dei costi di riscaldamento viene effettuata dividendo i consumi in volontari e involontari, calcolati caso per caso in funzione delle caratteristiche dell'edificio. Sebbene accurato, questo metodo è piuttosto complesso e richiede un audit energetico preliminare dell'edificio. Se la norma tecnica UNI 10200 non è applicabile, quando si riscontrano differenze superiori al 50% del fabbisogno termico per metro quadro tra le abitazioni nell'edificio, è consentito ripartire i costi tra gli inquilini attribuendo una quota di almeno il 70% ai consumi volontari. La quota residua (cioè il consumo involontario) può essere assegnata con una tariffa forfettaria generalmente basata sulla superficie degli appartamenti. Il consumo involontario può essere invece calcolato per mezzo di una procedura analitica, se sono disponibili le specifiche tecniche dell'impianto di generazione di calore e del sistema di distribuzione, o stimato (metodo semplificato) attraverso un coefficiente specifico (k_{inv}), a seconda delle caratteristiche e delle prestazioni dell'edificio e del sistema di riscaldamento.

La ripartizione delle spese di riscaldamento basata sul "calore rubato" è ampiamente diffusa in Grecia [29, 30], dove una compensazione viene applicata direttamente nel calcolo dei costi fissi in base al "calore indiretto" delle abitazioni. In particolare, uno specifico fattore tiene conto delle dispersioni di calore residue attraverso l'involucro dell'edificio quando non è riscaldato, in base al rapporto tra superficie esterna e superficie totale dell'abitazione, stato di isolamento dell'edificio e delle tubazioni di distribuzione e della posizione dell'appartamento all'interno dell'edificio.

2.1.4 Metodi basati sul principio di equità

Il principio di "equità" tiene conto del maggior consumo di alcune abitazioni all'interno dell'edificio (ad esempio, quelle del primo e dell'ultimo piano), a causa della maggiore incidenza di involucri opachi esterni, della presenza di abitazioni adiacenti non riscaldate, del diverso orientamento (ad esempio, abitazioni esposte a nord o con grandi ombreggiature), utilizzando specifici fattori correttivi che compensano situazioni sfavorevoli.

Sebbene questo principio riduca la sostanziale disuguaglianza introdotta dalla ripartizione dei consumi di energia termica basata esclusivamente sulla misurazione individuale, si ritiene che questo non sia pienamente funzionale all'obiettivo EED di ridurre i consumi energetici dovuti all'inefficienza. Per quanto riguarda la possibilità di applicare fattori di compensazione per situazioni sfavorevoli, gli Stati Membri adottano approcci diversi. L'uso di fattori correttivi, infatti, è vietato in Germania, Italia e Austria. D'altra parte è obbligatorio in Repubblica Ceca, Danimarca e Lituania. Altri Stati Membri consentono all'assemblea dei proprietari di stabilire misure compensative (ad esempio Grecia e Francia). Anche in Svizzera la compensazione è obbligatoria e regolata da standard ufficiali.

I metodi di compensazione proposti nella letteratura tecnico-scientifica appartengono principalmente a due diverse categorie: quelle basate sul comfort termico e quelle basate sulla stima delle perdite di calore e dei trasferimenti di energia tra appartamenti adiacenti. I metodi di compensazione basati sul comfort si basano sul principio che gli inquilini con appartamenti della stessa dimensione e con lo stesso comportamento termico medio dovrebbero pagare lo stesso. Tra questi metodi, sono state proposte una compensazione in base alle temperature di setpoint del termostato [21] e al tempo cumulato, nonché alla superficie di ciascun appartamento [23]. Il metodo del "comfort termico" proposto da Darvari [22] considera una correzione eseguita mediante il rapporto tra la differenza media di temperatura interna/esterna e la differenza tra la temperatura di comfort interna e la temperatura esterna, che è proporzionale al calore idealmente consumato per garantire un certo comfort termico. Questi metodi identificano l'esposizione, la posizione e la maggiore incidenza dell'involucro edilizio di un appartamento come principali cause di iniquità quando i costi di riscaldamento sono allocati attraverso sistemi indiretti. A tal fine, i due metodi definiti dall'Ufficio Federale dell'Energia svizzero (UFE) sono tra i più dettagliati [31, 32] come descritto di seguito:

- il "metodo di riduzione", in cui la compensazione viene eseguita riducendo le unità di allocazione (AU) della maggior parte delle abitazioni esposte per mezzo di determinati fattori di riduzione;
- il "metodo della stanza di riferimento" in cui un insieme di stanze di riferimento è identificato all'interno dell'edificio (ovvero la stanza con lo stesso uso ma con la minore potenza termica) e la contabilizzazione dell'energia termica viene eseguita attraverso la conoscenza della potenza termica dei radiatori installati [33] e delle unità di allocazione misurate nelle abitazioni.

I metodi del secondo tipo focalizzano l'attenzione sul cosiddetto problema dei "furti di calore", che si manifesta quando uno o più appartamenti in un edificio plurifamiliare sfruttano l'energia termica inevitabilmente dispersa dagli appartamenti adiacenti, impostando al minimo il termostato. La questione del "furto di calore" negli edifici con una certa quota parte di abitazioni non riscaldate è ampiamente discussa nella letteratura scientifica. In particolare, Gafsi e Lefebvre [34] hanno dimostrato per un caso di studio in Spagna che è possibile assorbire fino al 90% dell'energia necessaria dagli appartamenti adiacenti. Andersson [35] ha studiato un appartamento non riscaldato in Svezia, circondato da appartamenti adiacenti riscaldati, ad eccezione di un lato, e ha dimostrato che è possibile ottenere oltre il 95% dell'energia termica necessaria dagli appartamenti adiacenti.

A tale riguardo, Siggelesten [20] ha inizialmente proposto un metodo per ripartire i costi di riscaldamento calcolando i trasferimenti di calore tra abitazioni adiacenti senza considerare le differenze tra le abitazioni in termini di fonti di calore interne o di apporti di energia solare. Michnikowski [21] ha proposto l'uso di speciali ripartitori di costo del calore in grado di registrare anche la temperatura media interna. Tale metodo prende in parte in considerazione diverse fonti di calore nelle abitazioni, suggerendo che il 50% del costo energetico dovrebbe essere determinato attraverso gli HCA e il restante 50% attraverso la temperatura interna media misurata. Secondo Michnikowski, questo metodo è stato applicato per molti anni in Polonia con risultati positivi.

2.1.5 Il metodo degli "extra-consumi"

Le regole di ripartizione dei costi per riscaldamento dovrebbero mirare a promuovere il comportamento virtuoso degli utenti finali e a conseguire risparmi energetici ed efficienza negli edifici termicamente inadeguati. In questo contesto, il metodo proposto si basa sulla stima puntuale degli extra-consumi, ovvero la quota di consumo di energia dovuta alla mancanza di isolamento termico delle parti comuni di un edificio, e dei relativi costi. Gli extra-consumi ed i relativi costi sono ripartiti tra tutti gli inquilini dell'edificio, che pertanto ne divengono responsabili, e questo può rappresentare un driver per promuovere i retrofit energetici nell'edificio. Le principali caratteristiche del metodo proposto sono brevemente evidenziate di seguito:

- a) si esegue una stima degli extra-consumi e dei relativi costi aggiuntivi per l'intero edificio;
- b) tutti gli inquilini sono soggetti a costi aggiuntivi e, di conseguenza, l'assemblea condominiale dovrebbe essere incoraggiata a promuovere interventi di riqualificazione energetica;
- c) una volta che l'intervento di retrofit energetico è stato effettivamente realizzato, i costi aggiuntivi sono azzerati e gli inquilini pagheranno solo per i loro consumi individuali.

La stima delle perdite di calore, derivanti dall'isolamento inadeguato delle singole abitazioni e delle parti comuni di un edificio, viene eseguita attraverso il calcolo del flusso di calore che supera quello corrispondente alle condizioni di riferimento, fornite dalla normativa tecnica corrente. A tal fine vengono considerate le prestazioni energetiche dei singoli elementi edilizi e delle aree comuni dell'edificio (per esempio pareti, finestre, pavimento, soffitto, tetto ...). D'altro canto, il metodo proposto non tiene conto né degli apporti gratuiti di calore interni né di quelli esterni, poiché non è possibile modificarli per migliorare l'efficienza energetica degli edifici. Inoltre, il guadagno di calore interno dipende dalle abitudini dell'utente e non dalle caratteristiche dell'edificio, mentre quelli esterni dipendono da variabili incontrollabili come la presenza di nuove costruzioni, la vegetazione naturale etc..

Pertanto, l'extra-consumo volontario e involontario viene assegnato all'*i*-esima abitazione tramite uno specifico fattore di "correzione dell'efficienza", $f_{ext,i}$, calcolato come descritto nella seguente equazione:

$$f_{ext,i} = \frac{HDD \cdot 0.024 \cdot \sum_j [(U_{com,j} - U_{com,j}^{ref}) \cdot b_j \cdot A_{com,j}]}{Q_{H,ls,i}} \quad (1)$$

Dove:

- HDD sono i gradi giorno di riscaldamento, definiti dalla normativa vigente per una data località, K;
- $U_{com,j}$ è la trasmittanza termica del *j*-esimo elemento edilizio comune, $Wm^{-2}K^{-1}$;
- U_{com}^{ref} è il valore di riferimento per la trasmittanza termica del *j*-esimo componente edilizio comune, definiti dalla normativa vigente in funzione della zona climatica), $Wm^{-2}K^{-1}$;
- b_j è il fattore di correzione per le dispersioni termiche attraverso ambienti comuni non riscaldati, adimensionale [36];
- $A_{com,j}$ è la superficie del *j*-esimo componente edilizio comune, m^2 ;
- $Q_{H,ls,i}$ è il calore totale disperso per trasmissione e ventilazione [37] per il riscaldamento dell'*i*-esimo appartamento, kWh.

Il fattore di correzione $f_{ext,i}$ è zero quando $U_{com,j}$ è inferiore a $U_{com,j}^{ref}$. I fattori di correzione, sono quindi utilizzati per allocare gli extra-consumi volontari e involontari per il riscaldamento di ogni abitazione *i*-esima, rispettivamente $EQ_{v,i}$ e $EQ_{inv,i}$, tramite le equazioni (2) e (3).

$$EQ_{v,i} = Q_{v,i} \cdot f_{ext,i} \quad (2)$$

$$EQ_{inv,i} = Q_{inv,i} \cdot f_{ext,i} \quad (3)$$

L'extra consumo totale volontario e involontario, rispettivamente $EQ_{v,tot}$ e $EQ_{inv,tot}$, viene stimato attraverso le equazioni (4) e (5).

$$EQ_{v,tot} = \sum_i EQ_{v,i} \quad (4)$$

$$EQ_{inv,tot} = \sum_i EQ_{inv,i} \quad (5)$$

L'extra consumo di energia finale viene quindi ripartito tra gli inquilini tramite le equazioni (6) e (7), dove m_i è la percentuale del volume lordo riscaldato dell'*i*-esima abitazione.

$$Q_{com,v,i} = -EQ_{v,i} + m_i \cdot EQ_{v,tot} \quad (6)$$

$$Q_{com,inv,i} = -EQ_{inv,i} + m_i \cdot EQ_{inv,tot} \quad (7)$$

Ad esempio, nella Tabella 3 viene presentato lo schema della ripartizione dei consumi di calore e delle relative stime dei consumi volontari e involontari, evidenziando i consumi extra dovuti al tetto, all'involucro edilizio e ai pavimenti non adeguatamente isolati.

Tabella 3 – Schema di ripartizione con stima degli extra-consumi

Consumo volontario							
Appartamento	Consumo volontario misurato	Extra-consumo			Aliquota di extra-consumo		Quota per consumo volontario
		Tetto comune	Pareti comuni	Pavimenti comuni	Quota, %	Quota, kWh	
Ultimo piano	$Q_{v,i}$	$-EQ_{v,j,i}$	$-EQ_{v,j,i}$		m_i	$+m_i \cdot EQ_{v,tot}$	$Q_{v,i} + Q_{com,v,i}$
...	$Q_{v,i}$		$-EQ_{v,j,i}$		m_i	$+m_i \cdot EQ_{v,tot}$	$Q_{v,i} + Q_{com,v,i}$
...
Primo piano	$Q_{v,i}$		$-EQ_{v,j,i}$	$-EQ_{v,j,i}$	m_i	$+m_i \cdot EQ_{v,tot}$	$Q_{v,i} + Q_{com,v,i}$
Totale	$\sum Q_{v,i}$	$-EQ_{v,tot}$			100%	$EQ_{v,tot}$	$\sum Q_{v,i}$
Consumo involontario							
Appartamento	Consumo involontario misurato	Extra-consumo			Aliquota di extra-consumo		Quota per consumo involontario
		Tetto comune	Pareti comuni	Common Floor	Share, %	Tetto comune	
Top floor	$Q_{inv,i}$	$-EQ_{inv,j,i}$	$-EQ_{inv,j,i}$		m_i	$+m_i \cdot EQ_{inv,tot}$	$Q_{inv,i} + Q_{com,inv,i}$
...	$Q_{inv,i}$		$-EQ_{inv,j,i}$		m_i	$+m_i \cdot EQ_{inv,tot}$	$Q_{inv,i} + Q_{com,inv,i}$
...
First floor	$Q_{inv,i}$		$-EQ_{inv,j,i}$	$-EQ_{inv,j,i}$	m_i	$+m_i \cdot EQ_{inv,tot}$	$Q_{inv,i} + Q_{com,inv,i}$
Total	$\sum Q_{inv,i}$	$-EQ_{inv,tot}$			100%	$EQ_{inv,tot}$	$\sum Q_{inv,i}$

Il metodo proposto consente di evidenziare l'inefficienza dell'edificio in termini di extra-consumo e dei relativi costi aggiuntivi. Poiché tale inefficienza è assegnata a tutti gli inquilini, è possibile incoraggiare e promuovere eventuali interventi di retrofit sulle parti comuni dell'edificio. Ciò è ancora più applicabile per gli edifici di edilizia popolare in cui gli inquilini dovrebbero spingere l'ente pubblico (che è spesso il proprietario dell'edificio o della maggior parte dell'edificio) a implementare interventi di riqualificazione energetica. Il consumo extra e la relativa compensazione dei costi vengono quindi azzerati quando l'edificio è ben isolato in conformità con le leggi vigenti e la ripartizione dei costi energetici per riscaldamento dovrebbe basarsi solo su consumi individuali effettivi, in accordo con la EED. D'altra parte, in determinate condizioni, la condivisione del costo del calore attraverso il metodo proposto può generare fatture quasi simili tra gli inquilini (cioè una sorta di tariffa forfettaria) e questo dovrebbe portare a mantenere lo status quo nell'edificio, evitando l'obiettivo previsto dell'EED.

2.1.6 Risultati sperimentali

I metodi descritti nei paragrafi precedenti sono stati applicati per la ripartizione delle spese di riscaldamento del caso di studio Anagni ATER 18B.

Di seguito vengono presentati i risultati sperimentali in termini di quota per il solo consumo di energia variabile secondo i principi di proporzionalità fissa, responsabilità ed equità. A tale scopo, in Tabella 4 gli autori riportano il costo totale per il riscaldamento registrato nell'intera stagione di riscaldamento 2016-2017.

Tabella 4 - Costi energetici per riscaldamento nella stagione 2016-2018

Descrizione dei costi	€
Consumo di Gas Naturale	€ 5.498,80
Manutenzione (caldaia e pompa di ricircolo, valvole termostatiche e radiatori)	€ 766,00
Energia elettrica per caldaia e pompa di ricircolo	€ 100,00
Servizio di ripartizione e bollettazione	€ 242,00
Costo totale per riscaldamento (2016-2017)	€ 6.606,80

I consumi individuali sono stati registrati ogni due settimane e in Figura 6 viene rappresentata la situazione di un mese tipico.

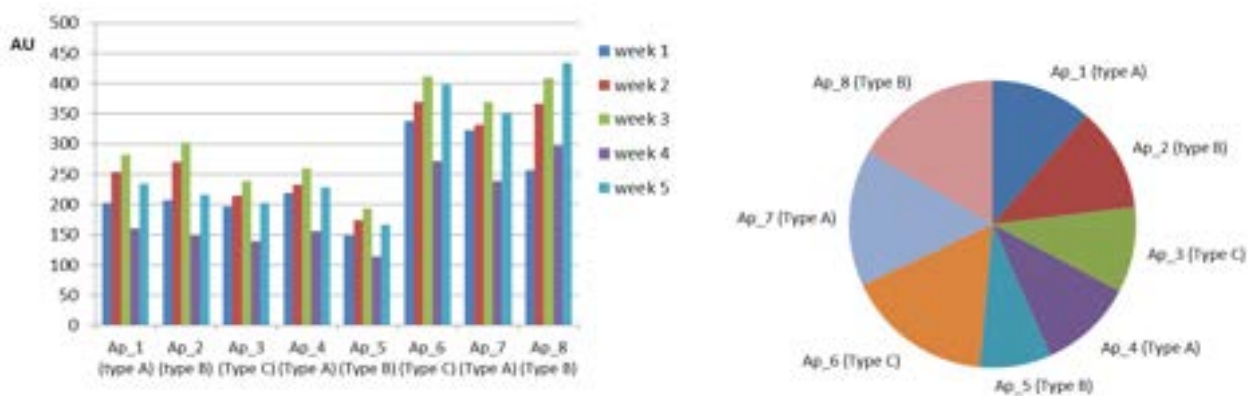


Figura 6 - Andamento dei consumi individuali per : a) mese tipico; b) intera stagione di riscaldamento

In Tabella 5 sono riportati gli extra-consumi stimati dagli autori per l’edificio caso di studio.

Tabella 5 - Consumi volontari ed involontari calcolati con il metodo proposto

Piano	Appartamento	Area [m ²]	Consumo misurato [kWh]	Extra-Consumo [kWh]		Quota di Extra-Consumo		Quota di consumo [kWh]
				Tetto comune	Pavimento comune	%	[kWh]	
1	Ap_1 (tipo A)	78.98	9128		-1576	12.2%	+2565	10117
	Ap_2 (tipo B)	78.98	9496		-1846	12.2%	+2565	10215
	Ap_3 (Tipo C)	85.73	7752		-1981	13.3%	+2784	8555
2	Ap_4 (Tipo A)	78.98	8613			12.2%	+2565	11178
	Ap_5 (Tipo B)	78.98	6461			12.2%	+2565	9026
3	Ap_6 (Tipo C)	85.73	13342	-4645		13.3%	+2784	11480
	Ap_7 (Tipo A)	78.98	12391	-5157		12.2%	+2565	9798
	Ap_8 (Tipo B)	78.98	13416	-5750		12.2%	+2565	10231
Totale		645.34	80599	-15553	-5403	100%	+20956	80599

Nelle seguenti Tabella 6, Tabella 7 e Tabella 8 e in Figura 7 sono rispettivamente presentate le quote di ripartizione per il calore calcolate secondo i metodi di proporzionalità, responsabilità ed equità sopra descritti.

Tabella 6 - Principio di proporzionalità: ripartizione dei costi 2016-2017

Piano	Appartamento	Area			Fabbisogno energetico			Potenza installata		
		m ²	Quota, %	Quota, €	MWh	Quota, %	Quota, €	kW	Quota, %	Quota, €
1	Ap_1 (tipo A)	79.0	12.2%	672.97	18.7	10.7%	586.97	9.6	12.9%	707.05
	Ap_2 (tipo B)	79.0	12.2%	672.97	16.7	9.6%	525.25	9.1	12.2%	669.51
	Ap_3 (Tipo C)	85.7	13.3%	730.49	30.3	17.3%	951.59	8.8	11.8%	649.94
2	Ap_4 (Tipo A)	79.0	12.2%	672.97	13.4	7.7%	421.62	7.6	10.1%	557.35
	Ap_5 (Tipo B)	79.0	12.2%	672.97	12.7	7.3%	400.02	7.4	9.9%	546.38
3	Ap_6 (Tipo C)	85.7	13.3%	730.49	31.4	18.0%	987.38	11.0	14.7%	808.39
	Ap_7 (Tipo A)	79.0	12.2%	672.97	26.2	15.0%	823.79	10.2	13.7%	752.31
	Ap_8 (Tipo B)	79.0	12.2%	672.97	25.5	14.6%	802.19	11.0	14.7%	807.87

Dai dati nella Tabella 6 si può notare che la fatturazione forfettaria basata sulla superficie differisce considerevolmente da quella basata sul fabbisogno energetico e sulla potenza termica dei radiatori installati. Ciò non dovrebbe sorprendere dal momento che la stessa superficie corrisponde a diversi componenti esterni dell'involucro e carichi termici, a seconda del pavimento, dell'esposizione e della trasmissione dei singoli elementi dell'edificio.

Anche l'ampia deviazione tra il fabbisogno di energia e i metodi di produzione di calore dei radiatori installati è particolarmente interessante. In effetti, tale deviazione può sembrare incomprensibile se non si tiene conto del fatto che il primo è rappresentativo del carico medio di energia in condizioni standard, l'ultimo del carico di punta (e quindi senza considerare apporti di calore gratuiti). Inoltre, poiché tali stime sono spesso eseguite da diversi tecnici e spesso attraverso diversi standard di riferimento per la stima della potenza termica dei radiatori, esse comportano deviazioni anche significative (ad esempio in Ap_1, Ap_2 e Ap_3).

Il confronto è particolarmente interessante in quanto, sebbene il principio di proporzionalità fisso non sia più consentito in numerosi Stati Membri, è il più comune per la condivisione dei costi fissi e, spesso, per quelli involontari. Confrontando questi metodi, emerge che, nonostante la semplicità e la distribuzione uniforme dei costi, il metodo della superficie non è rappresentativo né dei potenziali consumi individuali né della produzione di calore, favorendo soprattutto gli appartamenti più disperdenti (cioè AP_6, Ap_7 e Ap_8, situato all'ultimo piano).

Tabella 7 - Principio di responsabilità: ripartizione dei costi di riscaldamento 2016-2017

Piano	Appartamento	Consumi individuali			Volontario/Involontario (Italia)			70/30 (EU)		
		AU	Quota, %	Quota, €	Quota vol., %	Quota invol., %	Quota, %	Quota, €	Quota, %	Quota, €
1	Ap_1 (tipo A)	3651	11.0%	607.18	11.3%	10.7%	11.2%	613.25	11.4%	626.92
	Ap_2 (tipo B)	3798	11.1%	609.28	11.8%	9.6%	11.2%	615.36	11.4%	628.39
	Ap_3 (Tipo C)	3101	9.4%	519.13	9.6%	17.3%	11.7%	640.91	10.6%	582.53
2	Ap_4 (Tipo A)	3445	10.5%	578.69	10.7%	7.7%	9.9%	543.64	11.0%	606.98
	Ap_5 (Tipo B)	2584	7.8%	431.02	8.0%	7.3%	7.8%	429.99	9.2%	503.61
3	Ap_6 (Tipo C)	5337	17.0%	934.28	16.6%	18.0%	16.9%	930.67	15.9%	873.14
	Ap_7 (Tipo A)	4956	15.5%	851.03	15.4%	15.0%	15.3%	839.62	14.5%	797.61
	Ap_8 (Tipo B)	5367	17.6%	968.19	16.6%	14.6%	16.1%	885.35	16.0%	879.62

Dai dati in Tabella 7 si può osservare che i metodi di ripartizione basati sul principio di responsabilità (cioè sui consumi effettivi di ogni abitazione) penalizzano in media le abitazioni più sfavorite in termini di fabbisogno energetico (ad esempio quelle dell'ultimo piano o del piano terra). Un'eccezione è rappresentata da quegli utenti che, grazie all'uso ridotto in termini di ore di accensione o alla maggiore propensione al risparmio energetico in termini di temperatura di set point più bassa (ad esempio Ap_3), adottano intenzionalmente comportamenti volti a consumare meno. Ciò si traduce in un alto carico

economico, che porta ad addebitare ad alcuni inquilini fino al doppio dei costi energetici (ad es. Ap_8 rispetto ad Ap_5) ed è solo in parte mitigato dai metodi "Volontario/Involontario" e dalla percentuale fissa "70/30" per bilanciare il consumo effettivo con i fabbisogni previsti.

Infine, è interessante sottolineare che gli appartamenti meno critici dal punto di vista delle dispersioni termiche (cioè Ap_4 e Ap_5) sono anche quelli che non presentano mai una quota di consumo effettivo inferiore a quello di riferimento potenziale. Ciò è probabilmente dovuto al sovradimensionamento dell'impianto di riscaldamento e/o al problema del calore rubato.

Tabella 8 - Principio di equità: ripartizione dei costi di riscaldamento 2016-2017

Piano	App.	Metodo svizzero (riduzione)				Metodo greco				Metodo proposto			
		Fattore di cons.	AUc	Quota %	Quota €	Quota fissa	Quota var.	Quota %	Quota €	Fattore di extra-cons.	AUc	Quota %	Quota €
1	Ap_1 (A)	-13.1%	3747	11.6%	639.11	3.3%	8.2%	11.5%	632.77	-17.3%	4047	12.6%	690.20
	Ap_2 (B)	-12.0%	3944	12.2%	672.70	3.0%	8.5%	11.5%	631.82	-19.4%	4086	12.7%	696.88
	Ap_3 (C)	-23.3%	2807	8.7%	478.71	4.5%	7.0%	11.5%	630.29	-25.6%	3422	10.6%	583.65
2	Ap_4 (A)	-3.1%	3943	12.2%	672.47	2.8%	7.7%	10.5%	577.19	0.0%	4471	13.9%	762.61
	Ap_5 (B)	-2.0%	2989	9.3%	509.74	2.6%	5.8%	8.4%	463.11	0.0%	3610	11.2%	615.77
3	Ap_6 (C)	-23.3%	4830	15.0%	823.86	3.8%	12.0%	15.8%	866.28	-34.8%	4592	14.2%	783.24
	Ap_7 (A)	-17.0%	4854	15.1%	827.86	3.9%	11.1%	15.0%	826.14	-41.6%	3919	12.2%	668.45
	Ap_8 (B)	-19.1%	5126	15.9%	874.35	3.8%	12.1%	15.8%	871.20	-42.9%	4092	12.7%	698.00

Per quanto riguarda l'uso del principio di "equità" in un tipico edificio residenziale sociale, i dati riportati nella Tabella 8 mostrano che i metodi di compensazione presenti in letteratura (ad esempio i metodi svizzero e greco) non consentono una compensazione effettiva delle disuguaglianze all'interno dell'edificio. a causa delle inefficienze energetiche dell'edificio, se confrontato con i metodi di condivisione "volontario/involontario" e "70/30". Di contro, il metodo proposto in questo documento sembra essere molto più efficace, pur mantenendo il principio di responsabilità e consapevolezza del consumo e della ripartizione tra i diversi inquilini dei costi relativi all'inefficienza energetica delle parti comuni.

Le deviazioni tra i diversi metodi di compensazione mostrano che gli effetti della compensazione del metodo proposto sono molto più incisivi sugli appartamenti all'ultimo piano (circa -40%) rendendo la quota dei costi energetici comparabile tra appartamenti con superficie del pavimento simile e dello stesso tipo (con le stesse ore di accensione e di set point). Nella Figura 7 sono presentati complessivamente i risultati in termini di spesa per riscaldamento di ciascun appartamento nell'edificio oggetto di studio ottenuti mediante i diversi metodi di ripartizione sopra descritti.

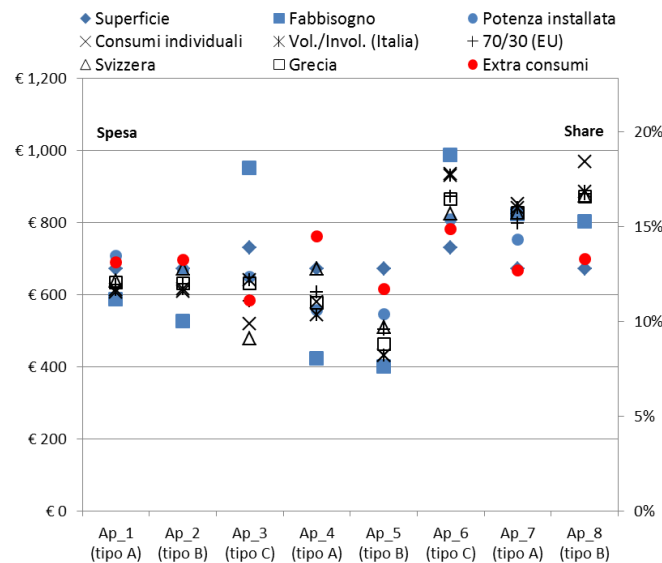


Figura 7 - Confronto tra i differenti metodi di ripartizione nell'edificio ATER investigato

Dall'analisi di Figura 7 si può evidenziare che l'esistenza di importanti differenze tra i diversi metodi di ripartizione analizzati e quello proposto, specialmente per quegli appartamenti che presentano una maggiore propensione al risparmio energetico (i.e. Ap_3) o grandi dispersioni termiche (i.e. Ap_6, Ap_7, Ap_8). Il metodo proposto sembra essere più sostenibile, dal momento che le quote di ripartizione per gli appartamenti svantaggiati sono corrette e che la propensione al risparmio energetico dei singoli inquilini è comunque incoraggiata.

2.2 Analisi della propensione al risparmio nelle diverse condizioni di utilizzo dei sistemi di ripartizione e dei risparmi energetici conseguibili, con particolare riferimento all'edilizia popolare

La questione di come incentivare il risparmio energetico nelle famiglie è argomento di notevole interesse scientifico sin dagli anni '70, quando la crisi energetica sollevò per la prima volta preoccupazione per un possibile esaurimento dei combustibili fossili. Oggi, a quasi 50 anni di distanza, è fuori dubbio che i soli interventi di efficientamento degli edifici non sono sufficienti a garantire un consumo energetico ridotto, ma che questi vanno affiancati ad azioni mirate ad aumentare la consapevolezza e la partecipazione dell'utente finale, anche attraverso una più frequente e dettagliata informazione sul consumo energetico [38]. In assenza di informazioni periodiche, abitazioni con prestazioni energetiche e caratteristiche termo-fisiche identiche, perfino quelle progettate per gli standard energetici N-ZEB, possono consumare anche il doppio l'una rispetto all'altra, a seconda del comportamento degli abitanti [39].

D'altro canto, quantificare il potenziale di risparmio di energia per i "non addetti ai lavori" rappresenta un'operazione difficile, perché l'energia è in gran parte un bene "invisibile" [40-42]. Ciò può rendere arduo per gli utenti avere un'idea chiara di come il suo utilizzo vari nel tempo ed in che modo questo si relazioni con benchmark significativi. Per questo motivo, la letteratura scientifica è ricca di studi il cui obiettivo è di quantificare il risparmio energetico associato a diversi tipi di informazione finale all'utente.

In particolare, Abrahamse et al. [43] hanno raccolto e revisionato 38 studi scientifici al fine di valutare l'efficacia degli interventi volti a incoraggiare le famiglie a ridurre i propri consumi energetici, classificando tali interventi in due macro-categorie, a seconda del modo in cui l'informazione viene fornita alle famiglie. Questa può, in particolare, essere data a monte ("antecedent strategies"), suggerendo ad esempio all'utente misure di risparmio energetico all'interno della propria abitazione, o rendendolo edotto sull'importanza di un uso consapevole delle risorse energetiche per la tutela delle risorse ambientali. Tali misure mirano a prevenire l'adozione di comportamenti energetici poco efficienti, aumentando la consapevolezza dell'utente e, al tempo stesso, operando una sua sensibilizzazione. Rientrano nella categoria delle "antecedent strategies" le campagne tramite mass media, workshop e convegni divulgativi, gli audit energetici per una informazione mirata e personalizzata e la pianificazione di obiettivi di risparmio energetico [44, 45]. È dimostrato che le "antecedent strategies" tendono ad innalzare il livello di consapevolezza degli utenti, ma non portano necessariamente a cambiamenti comportamentali o a sicuri risparmi energetici. Quando l'informazione è fornita a valle ("consequent strategies") l'obiettivo è invece quello di influenzare il comportamento dell'utente sulla base delle conseguenze, positive o negative, della conduzione dell'abitazione. Rientra in questa categoria qualsiasi tipologia di feedback utente (feedback in tempo reale, informazioni presentate su display in-home, app mobili o servizi online [44, 46-48]) e gli eventuali incentivi (di natura economica o meno) dati agli utenti in conseguenza dell'adozione di un comportamento energeticamente virtuoso. È stato dimostrato che, sebbene il feedback frequente comporti una reale diminuzione del consumo energetico finale, gli incentivi, pur avendo effetti positivi, hanno un breve effetto in termini di durata temporale.

Il feedback può a sua volta essere classificato in: "diretto" quando appreso direttamente dal display dello strumento (contatore, sotto contatore etc.), ed "indiretto" in cui l'informazione sul dato di consumo è stata elaborata in qualche modo prima di raggiungere l'utente. Il potenziale di risparmio energetico associato a ciascuna delle due tipologie è pari a circa 5-15% e 0-10%, rispettivamente per il feedback diretto e indiretto [19]. Un recente studio empirico su un campione di 18000 famiglie monitorate in Inghilterra ha indicato tuttavia un risparmio decisamente più modesto (3%) [49].

Il potenziale di risparmio energetico del feedback è quindi estremamente variabile, dipendendo fortemente da una serie di condizioni al contorno relative sia al tipo di informazione (frequenza, durata, contenuto, aggregazione, presentazione, confronti normativi e combinazione con altre strategie di intervento [50, 51]) che all'utente destinatario della stessa (livello di istruzione, reddito, età, propensione all'interazione con la tecnologia etc.). Per pianificare e attuare in modo efficace i programmi di efficienza energetica, è necessaria pertanto una solida comprensione dei fattori determinanti che guidano il consumo di energia delle famiglie [52].

L'elevata variabilità degli effetti dell'informazione all'utente dipende, inoltre, dal fatto che la maggior parte degli studi disponibili appare carente dal punto di vista metodologico [43, 53, 54], ipotizzandosi a monte l'esistenza di una correlazione deterministica tra l'informazione (causa) e l'adozione di comportamenti energeticamente efficienti (effetto), la cui sussistenza non sembra essere scontata e andrebbe suffragata da studi dedicati [54]. Secondo Wilson e Dowlatabadi [55], le incongruenze nei comportamenti legati all'uso dell'energia nelle famiglie possono essere spiegate dai seguenti fatti:

- i. gli utenti finali non prendono decisioni in maniera temporalmente coerente, utilizzando ratei costanti.
- ii. pur essendo razionali, gli utenti finali hanno difficoltà nell'elaborazione delle informazioni di consumo e tendono a utilizzare regole decisionali semplici, spesso dettate dall'abitudine;
- iii. le decisioni degli utenti finali sono influenzate dal modo in cui le informazioni vengono loro presentate e si possono ottenere risultati diversi semplicemente inquadrando in maniera differente il dato presentato.

Buchanan et al. [56], nello specifico, delineano l'esistenza di tre problemi chiave con il feedback, ovvero: la limitata evidenza di efficacia, la necessità di coinvolgimento degli utenti e il potenziale di accadimento di conseguenze indesiderate, concludendo che, allo stato attuale, gli in-home display potrebbero non indurre la risposta desiderata negli utenti ed evidenziando la necessità di sviluppare e

testare nuovi dispositivi di retroazione innovativi progettati tenendo conto del grado di coinvolgimento dell'utente.

Nilsson et al. [54] a valle dell'analisi di specifici questionari erogati agli utenti di una campagna sperimentale, riportano inoltre che tutti gli intervistati hanno espresso le loro difficoltà nell'interpretazione delle unità di potenza istantanea (kW) e di consumo energetico (kWh) e che, analogamente, hanno richiesto che il feedback venisse presentato in una maniera maggiormente comprensibile (ad esempio con la corrispondente valorizzazione economica). Oltre alle metriche, i risultati della stessa ricerca hanno evidenziato una preferenza dei consumatori nei confronti del feedback fornito ad un livello specifico dell'elettrodomestico (sub-metering) o almeno sui principali centri di consumo (fornelli, forno, lavastoviglie, lavatrice, asciugatrice, ecc.). In assenza di feedback disaggregati, gli intervistati hanno espresso difficoltà nel trarre conclusioni ad esempio su quali apparecchi e comportamenti sono associati i maggiori consumi di energia e su come identificare il potenziale di diverse azioni e misure per ridurre il consumo di energia. Da sottolineare come, inoltre, gli intervistati abbiano apprezzato la possibilità di benchmarking con i propri consumi storici, ritenendo tuttavia inutile il confronto con i vicini.

Le famiglie a basso reddito, come quelle residenti in edifici di edilizia popolare, rappresentano una particolare categoria di utenti che, a causa dei loro vincoli sociali, devono essere specificatamente approcciate, essendo considerate difficilmente raggiungibili da parte delle tradizionali politiche pubbliche. Un recente studio sperimentale in 7 Stati Membri dell'EU, ha evidenziato infatti diversi problemi sia nell'implementazione di soluzioni di smart-metering che di benefici ottenibili dall'utilizzo di metodi di feedback personalizzati, per famiglie a basso reddito nella regione del Mediterraneo [57]. Dalla sperimentazione è emerso che l'uso di sofisticati sistemi di smart-metering associato ad in-home display non è raccomandato/necessario in questo determinato contesto sociale. D'altro canto, invece, è stata ben accolta la misurazione del consumo dei singoli apparecchi elettrici, quando venivano presentati nel bollettino periodico di analisi dell'efficienza sia la ripartizione del consumo all'interno della stessa abitazione, sia altri suggerimenti per l'attuazione di misure per l'efficienza energetica. I partecipanti hanno valutato la bollettazione periodica mensile e la ripartizione del consumo di energia per centro di consumo (in termini di costi) come le migliori attività di feedback utente.

Podgornik et al. [58], hanno riconosciuto la necessità di adottare tre azioni distinte nell'interazione con gli utenti a basso reddito dell'edilizia popolare: i) informazione pre-installazione; ii) informazione riguardante l'utilizzo delle apparecchiature di monitoraggio del consumo e il mezzo di feedback; iii) attività di monitoraggio successivo. L'attuazione congiunta di tali misure e la personalizzazione del feedback utente, ha consentito di ottenere risparmi tra il 22 ed il 27% sul consumo di energia elettrica.

Tuttavia, i risultati della ricerca condotta da Boomsma et al. [59] sottolineano che vi è un rischio potenziale di peggioramento delle condizioni di comfort nell'appartamento connesso all'adozione di comportamenti finalizzati al risparmio energetico per riscaldamento nell'edilizia popolare. Nella pianificazione delle campagne di risparmio energetico, in particolare per le famiglie a basso reddito come quelle residenti in edifici di edilizia popolare, è dunque importante sottolineare che, sebbene il risparmio energetico in alcune aree possa contribuire ad alleviare il carico finanziario, una riduzione non controllata della temperatura interna media invernale potrebbe generare problemi di condensa, umidità e muffa. Nello stesso lavoro, gli autori sottolineano anche che l'informazione agli utenti sembra avere un'efficacia maggiore quando le persone vivono in case relativamente più efficienti dal punto di vista energetico, risultando di contro meno efficiente per utenti residenti in case con bassa efficienza energetica (come il social housing).

In sintesi e con particolare riferimento ai residenti dell'edilizia popolare, l'analisi della letteratura ha consentito di evidenziare quanto segue:

1. sebbene sia conclamato il potenziale risparmio energetico derivante dall'adozione di soluzioni di smart-metering negli edifici residenziali, non è altrettanto scontata la riduzione dei consumi energetici se non viene attuata una efficace informazione degli utenti finali;
2. per trarre il massimo vantaggio dai programmi di efficienza energetica, questi devono essere customizzati alle diverse tipologie di clienti residenziali.

3. perché sia maggiormente efficace, la campagna informativa agli utenti finali deve combinare un'opportuna informazione con strumenti di feedback sul consumo energetico reale dell'utente;
4. una bollettazione informativa frequente (cadenza mensile/bimestrale) sembra essere lo strumento di feedback preferito dagli utilizzatori finali, mentre l'efficacia dell'utilizzo di in-home display (anche ad alta tecnologia) non è dimostrata o addirittura il loro utilizzo è sconsigliato (specialmente negli edifici di edilizia popolare);
5. il sub-metering è uno strumento particolarmente apprezzato e richiesto dagli utenti finali che intendono adottare misure di contenimento dei propri consumi energetici;
6. la quantificazione economica dei consumi risulta essere lo strumento preferito per una immediata comprensione, da preferirsi al kWh di energia consumato.

Gli autori presentano di seguito i risultati preliminari di una campagna di informazione utente realizzata nei due edifici di edilizia popolare caso di studio descritti. Entrambi gli edifici oggetto di studio sono attualmente monitorati tramite sistemi di contabilizzazione indiretta e dotati di sistema di termoregolazione di zona mediante valvole termostatiche su ciascun radiatore.

2.2.1 Indagine preliminare sulla propensione all'utilizzo dei sistemi di contabilizzazione indiretta e di termoregolazione

Nell'ambito del presente progetto di ricerca, gli autori hanno condotto un'indagine preliminare per analizzare la propensione degli utenti finali al corretto utilizzo dei sistemi di contabilizzazione e termoregolazione installati negli edifici di edilizia popolare casi di studio. A tale scopo, è stato predisposto un questionario valutativo che è stato consegnato in loco ai diretti interessati, unitamente alla spiegazione delle finalità della presente indagine.

L'indagine condotta ha avuto l'obiettivo di valutare la propensione al risparmio energetico da parte degli utenti finali degli alloggi ATER investigati, ed è stata realizzata prima della campagna di informazione mirata ad aumentare il livello di *user-engagement* per i sistemi di misura installati programmata agli inizi della stagione di riscaldamento 2018-19. Il confronto dei risultati ottenuti dalla somministrazione dei questionari, prima e dopo la campagna di informazione agli utenti finali, nonché l'analisi dei consumi energetici destagionalizzati, consentirà di ricavare informazioni utili per l'ottimizzazione delle prestazioni in campo dei sistemi di contabilizzazione indiretta del calore.

Si precisa che gli edifici oggetto di indagine sono abitati in via prevalente da nuclei familiari composti da 1 o 2 persone (56% del campione), per lo più anziane e a basso reddito, che presentano una limitata familiarità con l'utilizzo di sistemi di monitoraggio dei consumi energetici. La composizione del campione di riferimento è riportata in Figura 8.

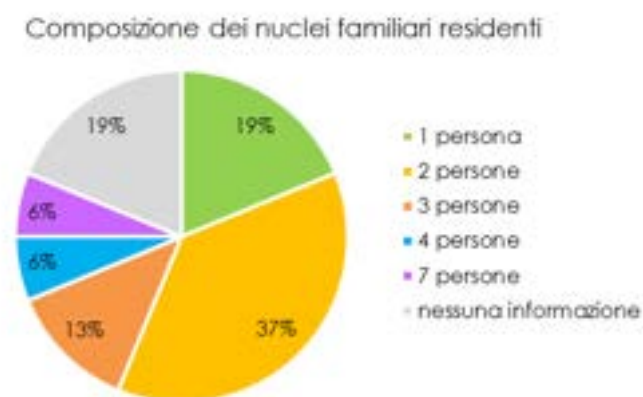


Figura 8 – Composizione del campione oggetto di indagine

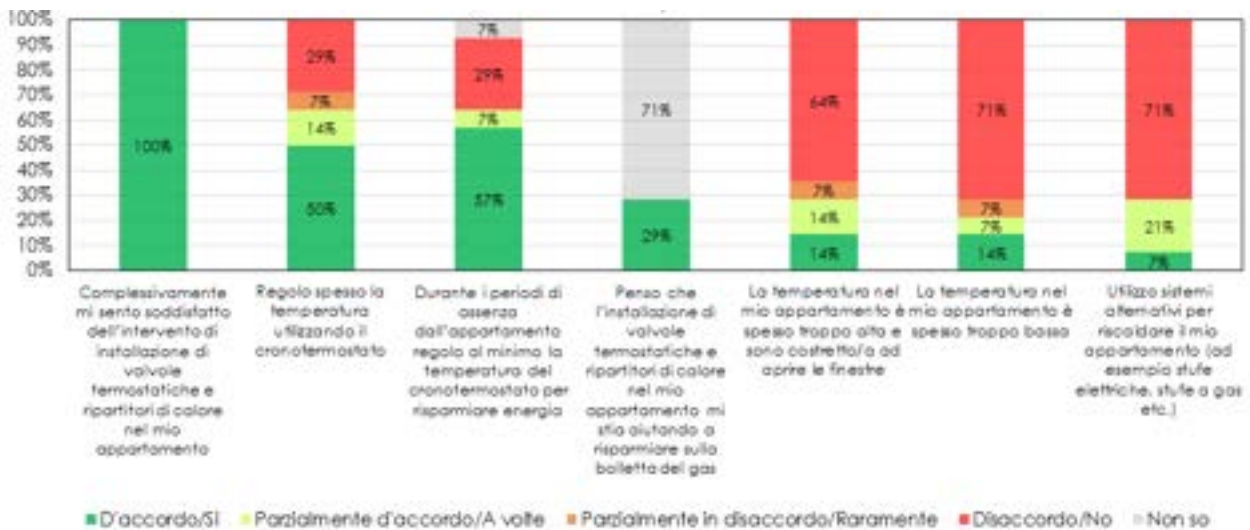


Figura 10 – Analisi dei questionari (totale del campione)

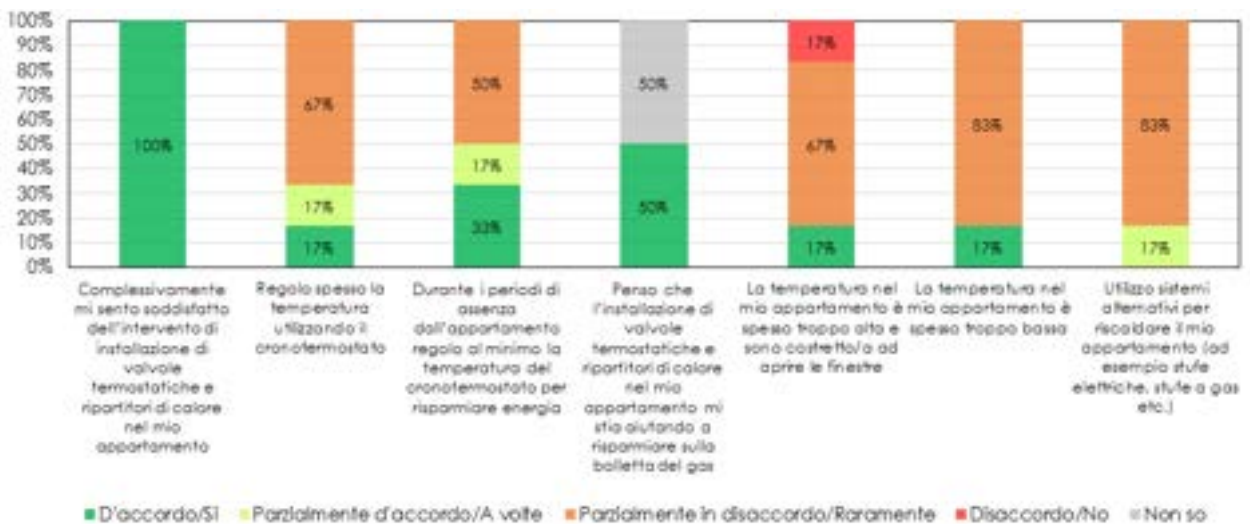


Figura 11 – Analisi dei questionari, Edificio ATER 18B

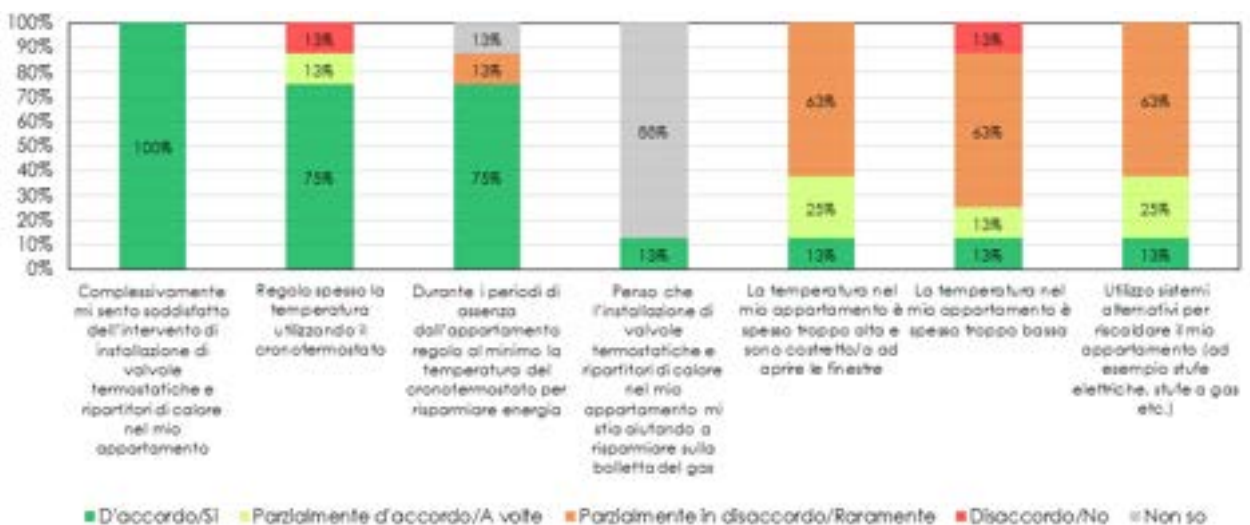


Figura 12 – Analisi dei questionari, Edificio ATER 18C

Come anche evidenziato in figura, dall'analisi dei risultati si riscontra quanto segue:

- gli utenti sono tutti complessivamente soddisfatti dell'installazione dei sistemi di misura indiretta del calore e termoregolazione mediante valvole termostatiche;
- la maggioranza (64% circa) degli utenti afferma di fare un frequente utilizzo del cronotermostato e/o delle valvole termostatiche installate per regolare la temperatura dell'appartamento e di chiudere le valvole nei momenti di assenza;
- circa il 29% degli utenti afferma di non regolare mai la temperatura del proprio appartamento e di non chiudere mai le valvole termostatiche;
- il 71% degli utenti non percepisce se l'utilizzo di tali sistemi stia o meno determinando un risparmio economico (probabilmente ciò è dovuto al fatto che la ripartizione delle spese nei due edifici non era stata ancora effettuata);
- il 28% ed il 21% degli utenti percepisce una temperatura spesso troppo alta e troppo bassa, rispettivamente; comunque, la maggioranza degli utenti non si lamenta della temperatura percepita nel proprio appartamento;
- circa il 28% degli utenti afferma di utilizzare, a volte, sistemi di riscaldamento ausiliari all'interno di determinate stanze;
- nell'edificio ATER 18B (equipaggiato con totalizzatori UNI 11388) si registra il tasso più elevato di utenti scarsamente interagenti con i sistemi installati, gli utenti dichiarano di percepire un livello di comfort più elevato e di utilizzare in misura limitata dispositivi di riscaldamento ausiliari.

2.2.1 Indici di consumo energetico: casi di studio

Ai fini della sintetizzazione di un prospetto semplice ed intuitivo da somministrare agli utenti per l'analisi dei propri consumi energetici per il riscaldamento, si è provveduto a calcolare gli indici di consumo globale (i.e. dell'edificio), parziale (i.e. di ogni singolo appartamento) e locale (i.e. di ciascun ambiente riscaldato), descritti puntualmente nel Rapporto di Ricerca di Sistema Elettrico Unicas-ENEA PAR 2016 [60] al quale si rimanda per eventuali approfondimenti.

In particolare, per ciascuno dei due edifici di edilizia popolare casi di studio, sono stati calcolati:

- l'indice di consumo 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*);
- l'indice di consumo 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*);
- l'indice di consumo 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*).

I sopra descritti indici di consumo sono stati stimati per l'intera stagione di riscaldamento 2017/2018 e saranno calcolati su base mensile o bisettimanale nella stagione di riscaldamento 2018/2019. In questo modo ciascun utente avrà la possibilità di monitorare frequentemente i propri indici mediante un bollettino opportunamente progettato e valutare sia le eventuali variazioni nel tempo del proprio stile di consumo, che quelle di uso dei singoli ambienti della propria abitazione.

Di seguito vengono riportati gli indici di consumo globale dei due edifici (Figura 13 e Figura 14) nell'intera stagione di riscaldamento 2017/18. Per l'edificio ATER Anagni 18C (Figura 14) si riportano anche i dati della temperatura media indoor registrata in ciascun appartamento.

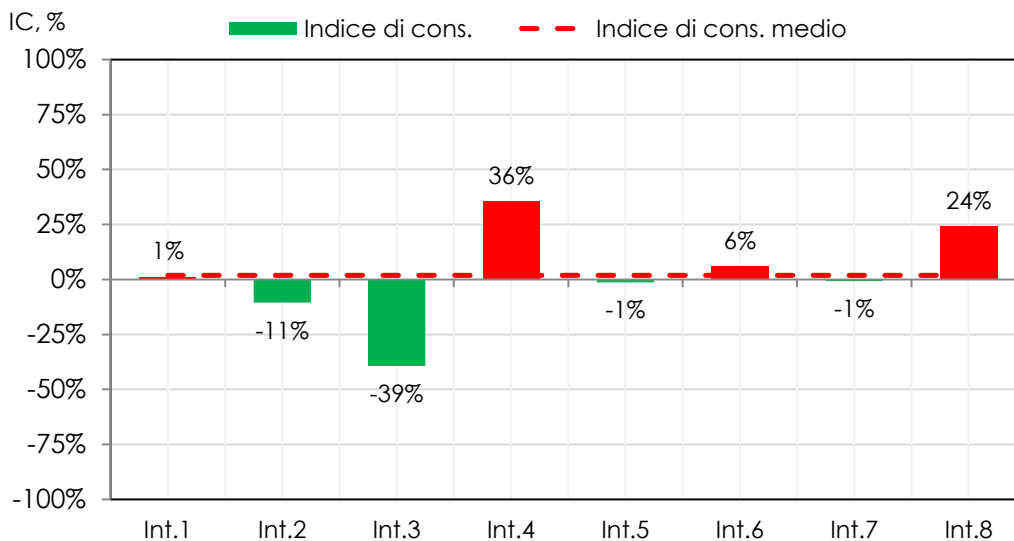


Figura 13 –Indici di consumo globale 2017/18, edificio ATER 18B

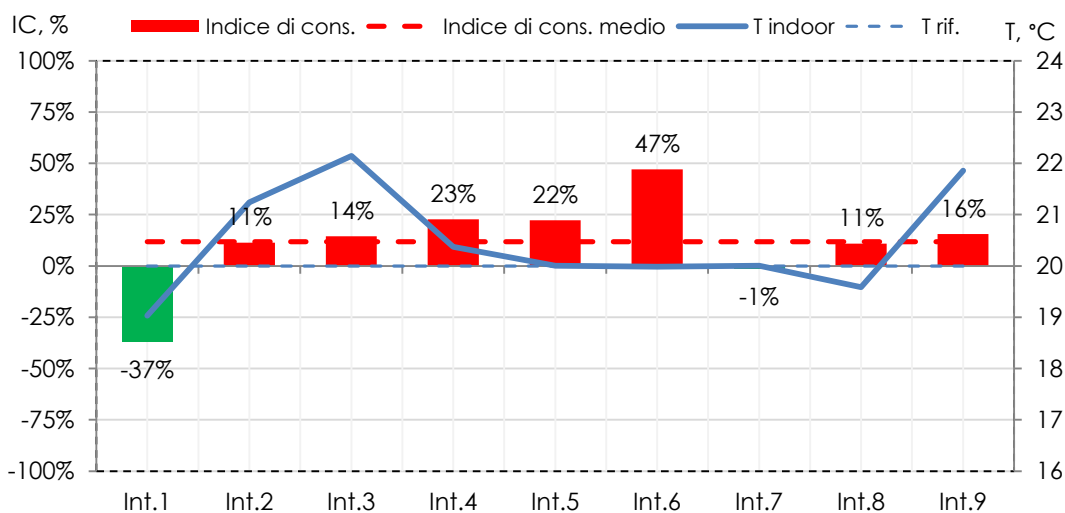


Figura 14 - Indici di consumo globali 2017/18, edificio ATER 18C

In particolare, dall'analisi della Figura 14 è interessante osservare che: l'appartamento 8 (terzo e ultimo piano) presenta un valore di temperatura media basso e consumi elevati; ii) l'appartamento 9 presenta consumi elevati ma temperatura media anch'essa elevata (probabilmente c'è un minore ricorso all'areazione degli ambienti), iii) l'appartamento 1 ha temperatura media bassa e consumi bassi, a denotare un utente attento alla regolazione, iv) l'appartamento 2 ha temperatura elevata e consumi non troppo elevati; vi) l'appartamento 3 (piano intermedio) regola la temperatura su un valore eccessivo e beneficia di consumi non elevati in proporzione; vii) l'appartamento 7 è quello che presenta i consumi maggiori pur avendo una temperatura moderata.

Infine, in Figura 15 si riporta l'andamento settimanale dell'indice di consumo globale dei due edifici in funzione dell'andamento climatico, ovvero dei Gradi Giorno settimanali misurati ad Anagni. Si può notare che, dopo il primo periodo transitorio, i due edifici presentano un andamento simile dei consumi che risulta correlato alle condizioni climatiche esterne.

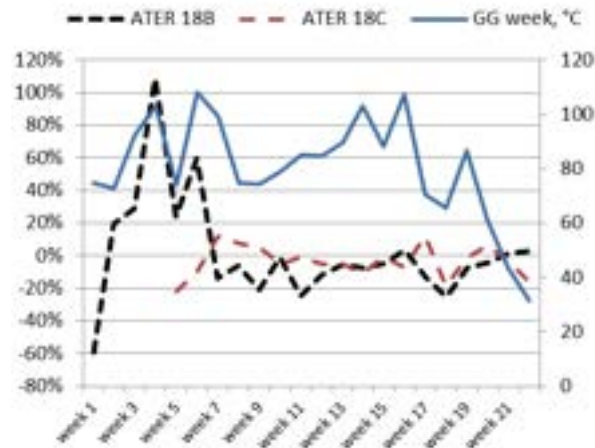


Figura 15 – Andamento settimanale degli indici di consumo globale e dei due edifici e dei Gradi Giorno

Nelle Figure successive si riportano gli indici di consumo locale calcolati nei singoli appartamenti dell'edificio ATER Anagni 18B (con la linea tratteggiata si riporta la media dell'intero appartamento).

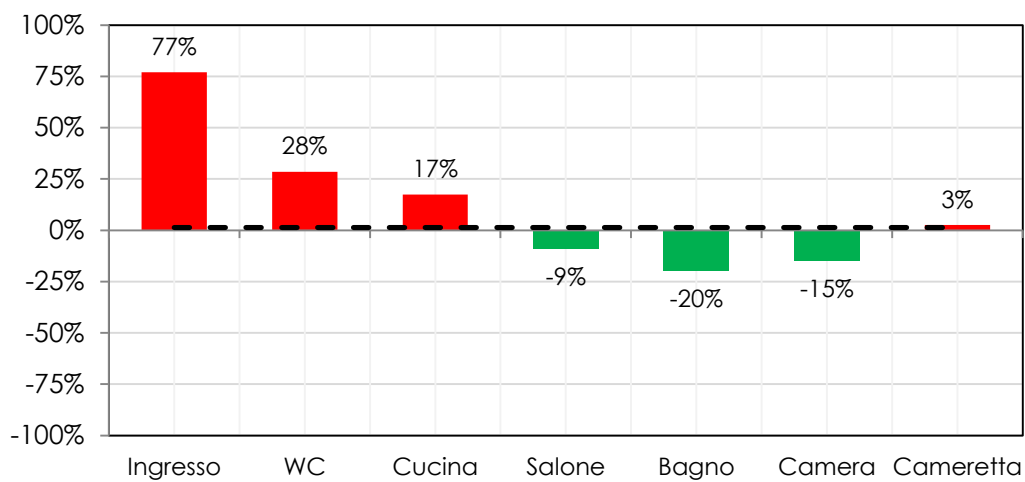


Figura 16 - Indici di consumo locali 2017/18, edificio ATER 18B Interno 1

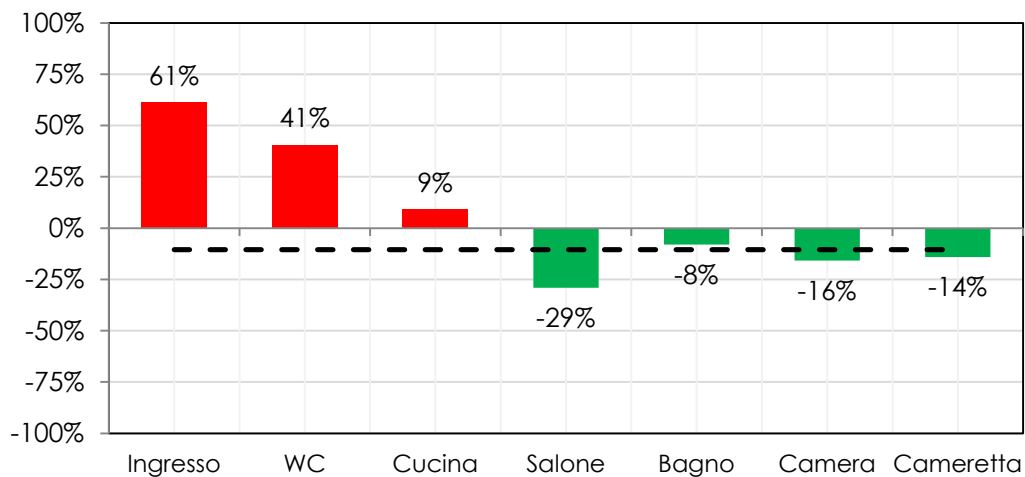


Figura 17 - Indici di consumo locali 2017/18, edificio ATER 18B Interno 2

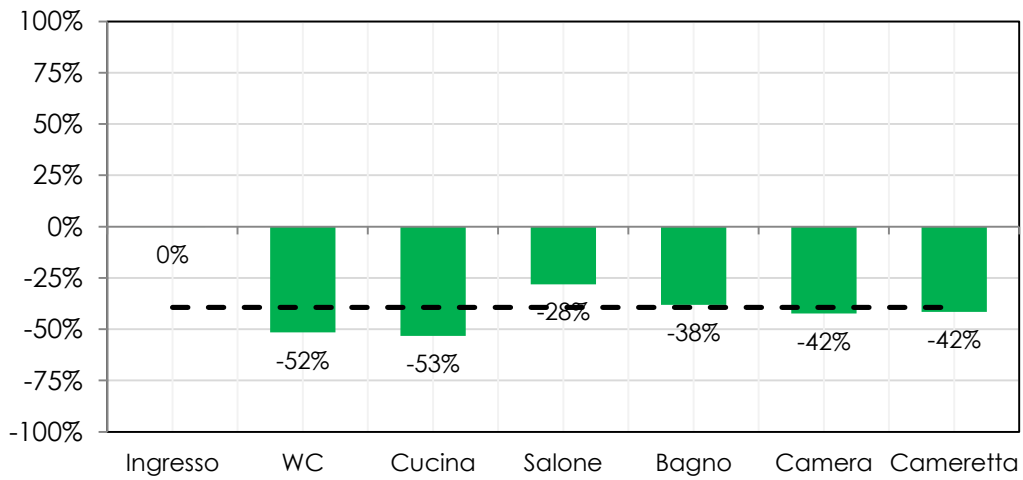


Figura 18 - Indici di consumo locali 2017/18, edificio ATER 18B Interno 3

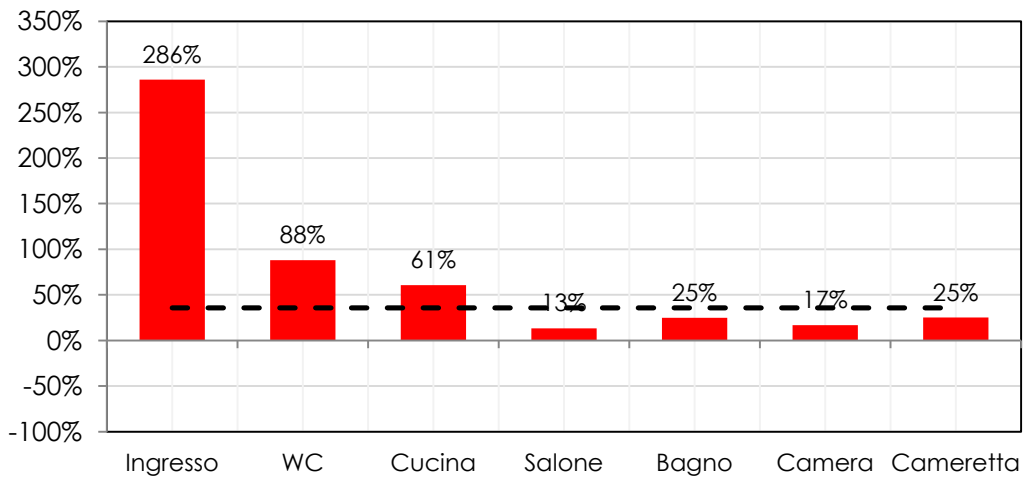


Figura 19 - Indici di consumo locali 2017/18, edificio ATER 18B Interno 4

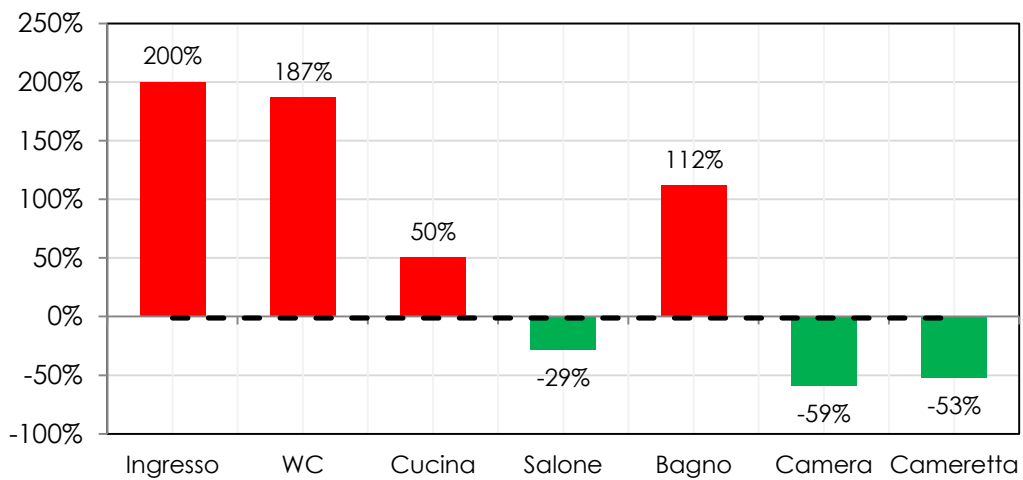


Figura 20 - Indici di consumo locali 2017/18, edificio ATER 18B Interno 5

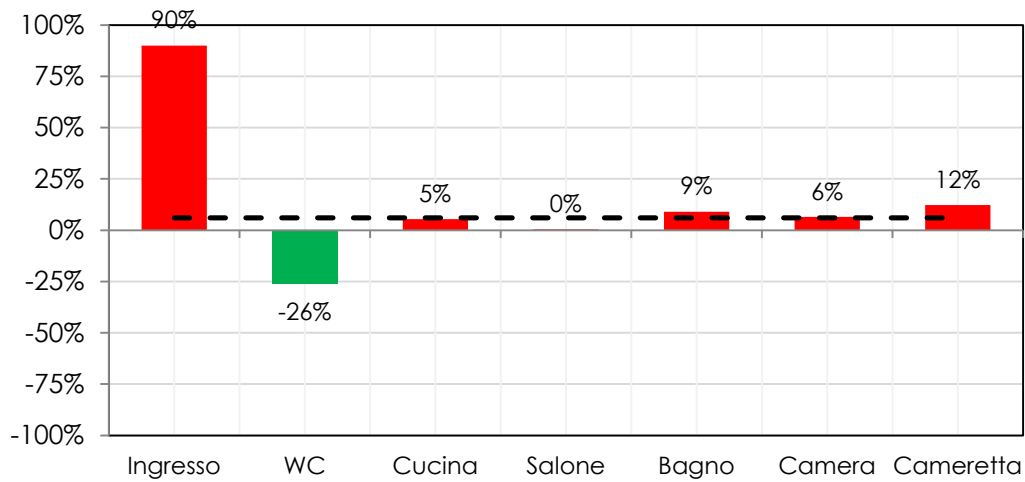


Figura 21 - Indici di consumo locali 2017/18, edificio ATER 18B Interno 6

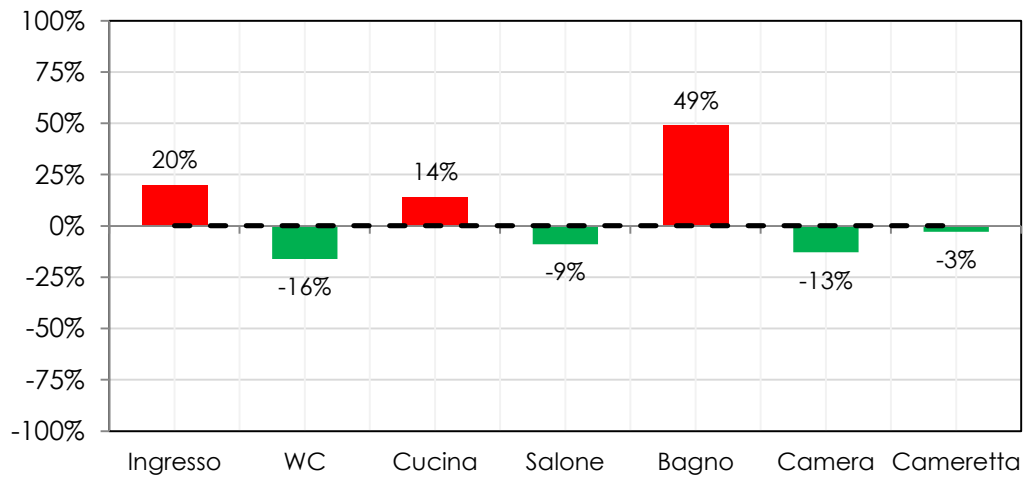


Figura 22 - Indici di consumo locali 2017/18, edificio ATER 18B Interno 7

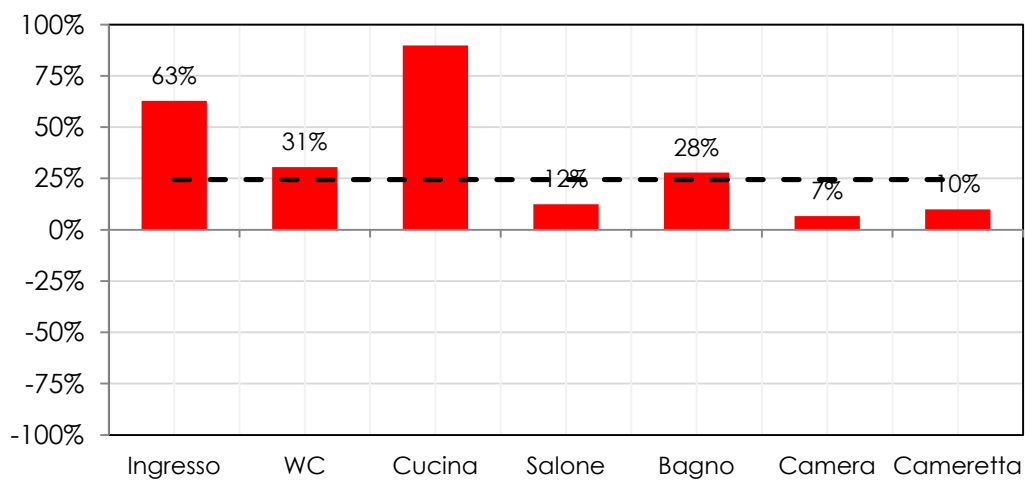


Figura 23 - Indici di consumo locali 2017/18, edificio ATER 18B Interno 8

Nelle Figure successive si riportano gli indici di consumo locale calcolati nei singoli appartamenti dell'edificio ATER Anagni 18C (con la linea tratteggiata si riporta la media dell'intero appartamento).

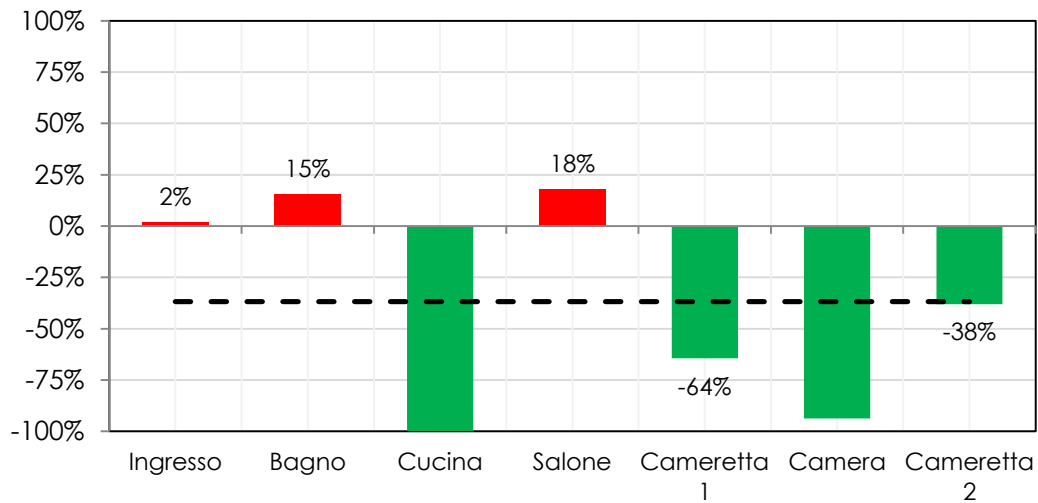


Figura 24 - Indici di consumo locali 2017/18, edificio ATER 18C Interno 1

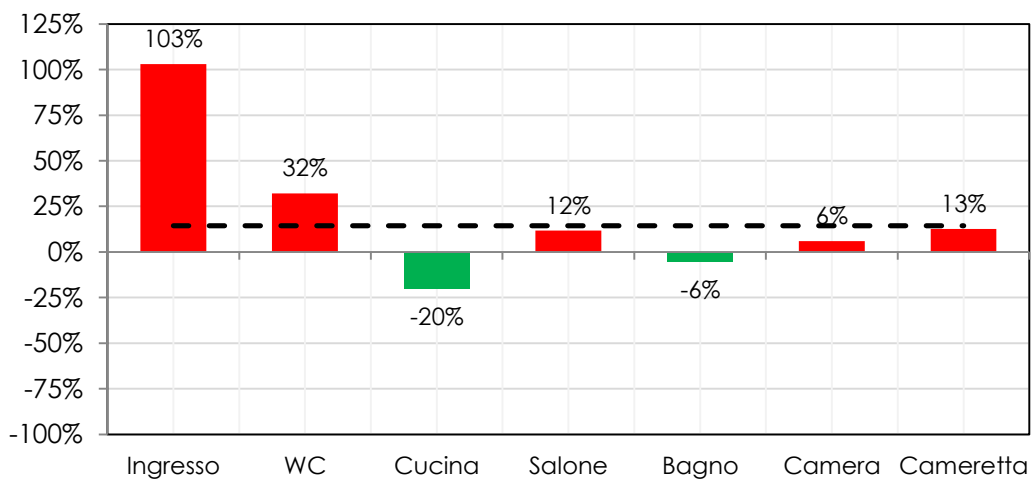


Figura 25- Indici di consumo locali 2017/18, edificio ATER 18C Interno 2

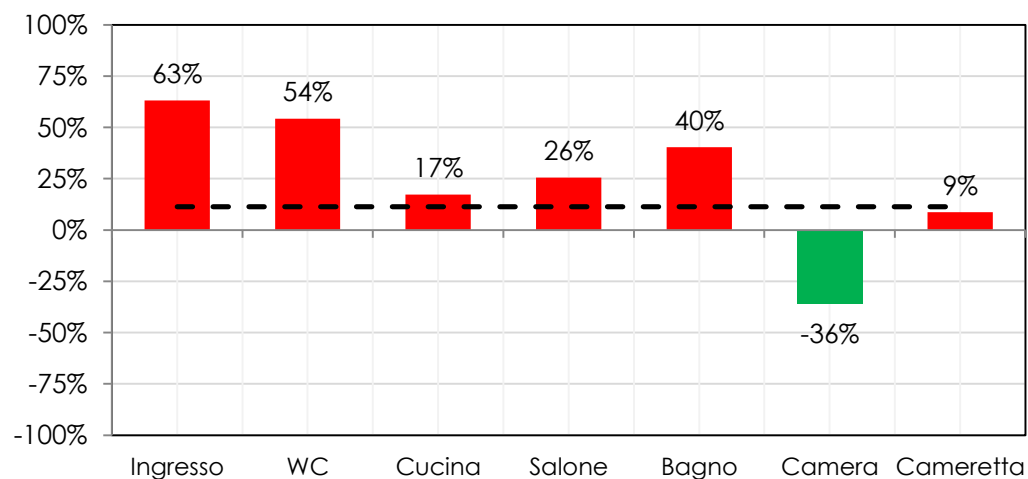


Figura 26- Indici di consumo locali 2017/18, edificio ATER 18C Interno 3

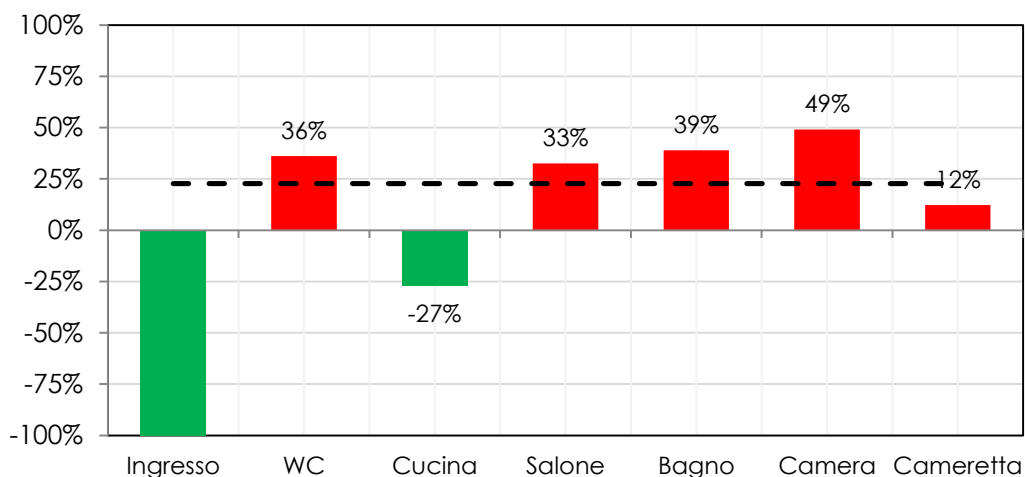


Figura 27- Indici di consumo locali 2017/18, edificio ATER 18C Interno 4

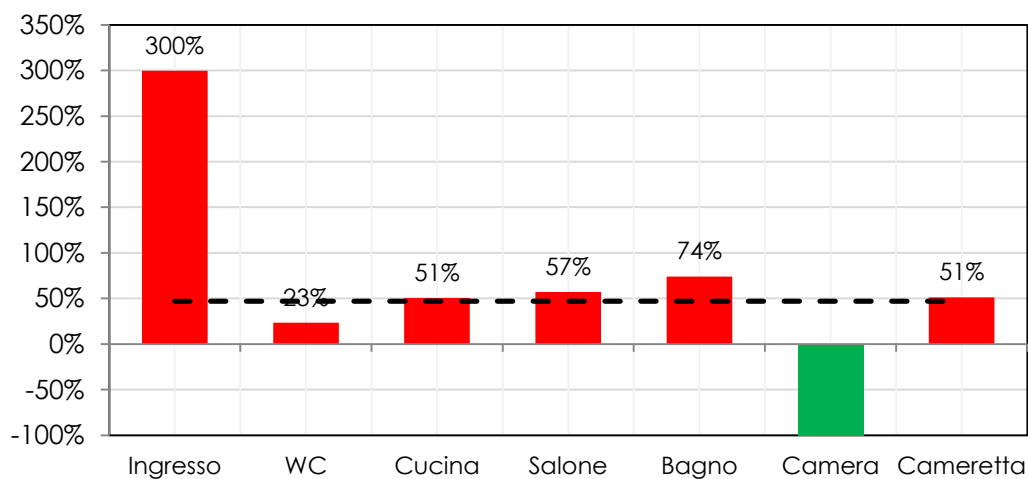


Figura 28- Indici di consumo locali 2017/18, edificio ATER 18C Interno 5

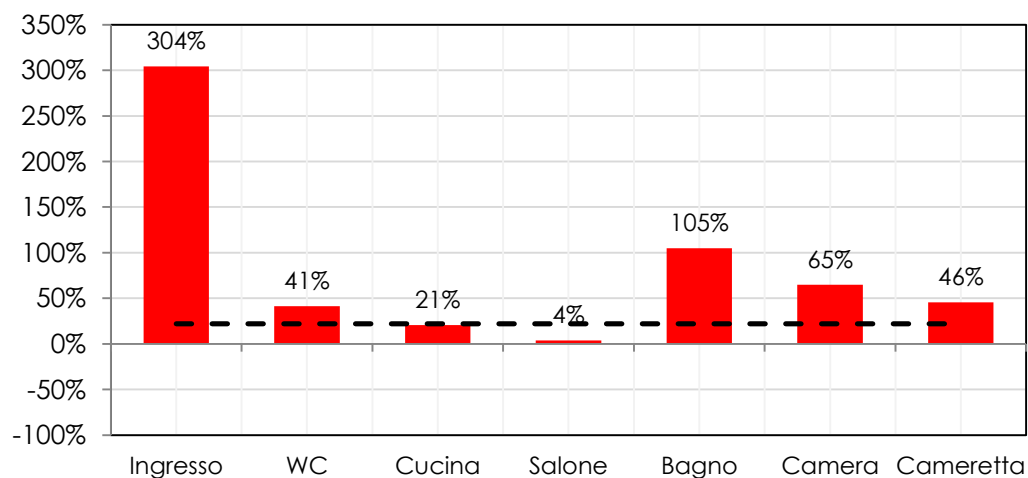


Figura 29- Indici di consumo locali 2017/18, edificio ATER 18C Interno 6

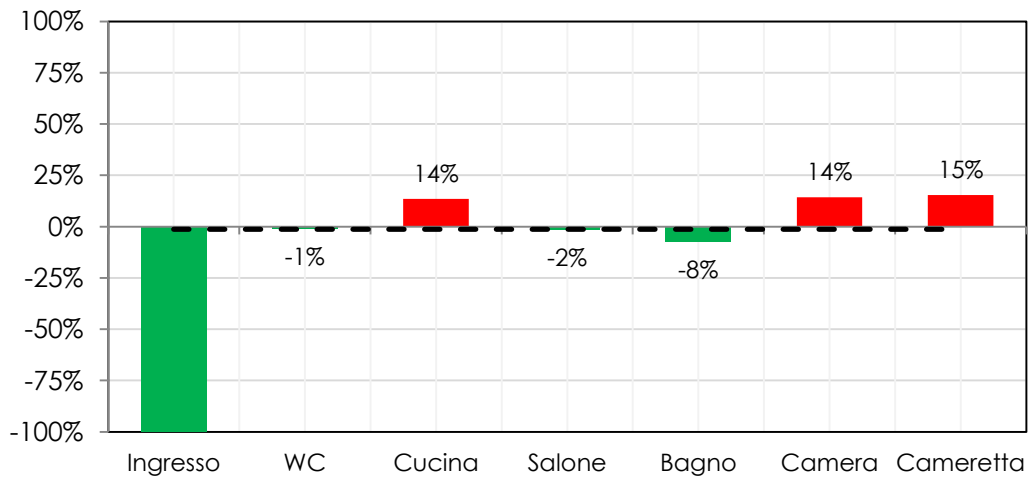


Figura 30- Indici di consumo locali 2017/18, edificio ATER 18C Interno 7

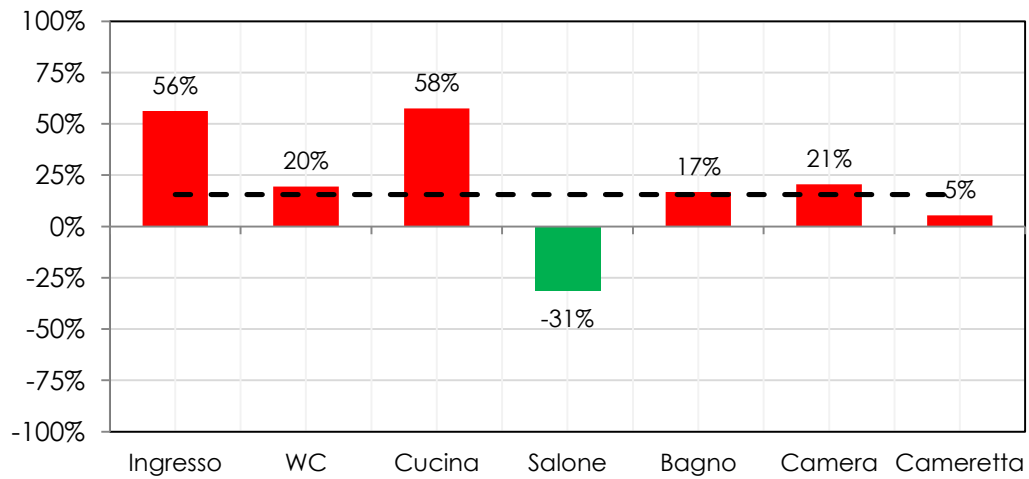


Figura 31- Indici di consumo locali 2017/18, edificio ATER 18C Interno 8

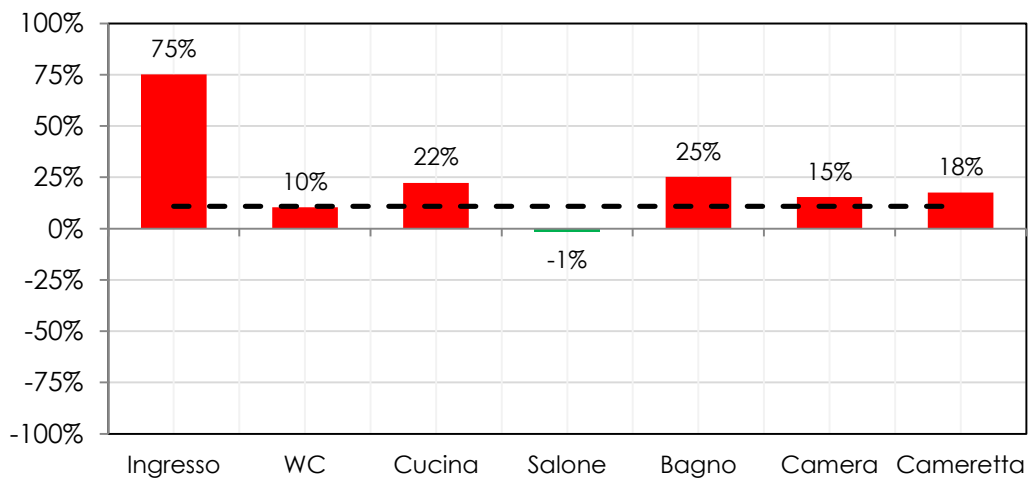


Figura 32- Indici di consumo locali 2017/18, edificio ATER 18C Interno 9

Dalla analisi degli indici di consumo calcolati per i due edifici investigati è stato possibile:

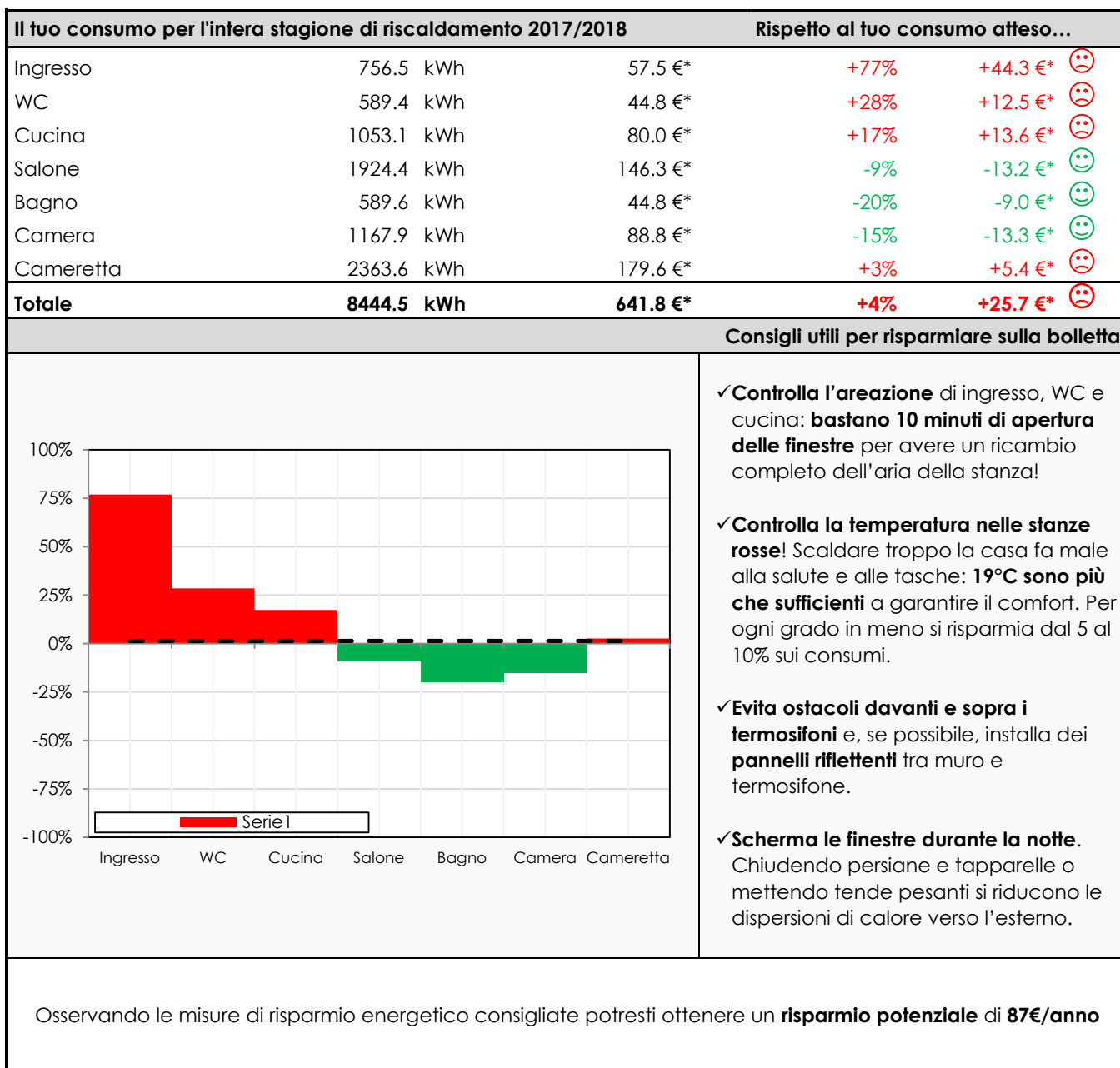
- a. individuare i maggiori centri di consumo di ciascun appartamento; in particolare, sembra che esista una modalità ricorrente di utilizzo degli ambienti che porta ad un consumo eccessivo nell'ingresso, nei bagni ed in cucina. Tale consumo eccessivo sembra essere ascrivibile ad una elevata ventilazione degli ambienti e/o ad una errata impostazione della temperatura ambiente;
- b. formulare indicazioni specifiche personalizzate per ciascun utente e segnalare criticità nell'utilizzo dei sistemi di regolazione.

A titolo di esempio in Tabella 9 si descrivono alcune delle situazioni critiche riscontrate.

Tabella 9 – Analisi consumi critici

<u>Edificio Anagni 18B</u>	
Interno 3	Sebbene sia evidente la propensione al risparmio energetico dell'utente, potrebbero verificarsi problemi di discomfort termico, oltre che di formazione di umidità, condensa e muffe.
Interni 4 e 8	È evidente la necessità di ridurre la temperatura impostata onde evitare consumi energetici e temperature eccessivi all'interno dell'appartamento.
<u>Edificio Anagni 18C</u>	
Interno 1	Sebbene sia evidente la propensione al risparmio energetico dell'utente, potrebbero verificarsi problemi di discomfort termico, oltre che di formazione di umidità, condensa e muffe.
Interno 5	È evidente la necessità di ridurre la temperatura impostata onde evitare consumi energetici e temperature eccessivi all'interno dell'appartamento.

In Figura 33 riporta infine, a titolo di esempio, il prospetto sintetizzato per la comunicazione all'utente finale dell'interno 1 dell'Edificio ATER Anagni 18B.



* (Valori indicativi calcolati considerando un prezzo medio stagionale del gas naturale pari a 0.833€/smc e un potere calorifico medio pari a 10.94 kWh/smc)

Figura 33 – Proposta di layout per il bollettino informativo frequente

3. Miglioramento delle prestazioni metrologiche dei sistemi di misura dell'energia termica negli edifici intelligenti

3.1 Studio per il miglioramento delle prestazioni metrologiche dei diversi sistemi di contabilizzazione e ripartizione del calore

I sistemi di contabilizzazione indiretti sono normalmente utilizzabili negli edifici esistenti, ma presentano incertezze tipiche del singolo dispositivo anche superiori al 30% [4]. Se invece si considera l'intero sistema di contabilizzazione installato nell'edificio, in alcuni casi gli errori dei singoli dispositivi possono trovare parziale compensazione e generare quindi un valore complessivo di accuratezza che in talune condizioni (e.g. dispositivi tutti uguali, radiatori installati di uguale potenza sulle verticali, identiche condizioni di installazione e di utilizzo) può ridursi anche fino al 2-3%. Di contro, in presenza di variazione delle condizioni di installazione ed uso del sistema questo valore può crescere in maniera significativa [16].

Nell'ambito del presente progetto, al fine di migliorare le prestazioni metrologiche dei sistemi di contabilizzazione indiretta negli edifici esistenti, maggiormente interessati all'obbligo di installazione:

- sono stati analizzati i modelli applicabili per la stima della potenza termica dei corpi scaldanti (parametro critico per i sistemi di contabilizzazione indiretti), come ad esempio il coefficiente KQ dei ripartitori di calore;
- è stata progettata una campagna di misure sperimentali per valutare in laboratorio le prestazioni metrologiche di un sistema indiretto "ibrido", ovvero con contatori di energia termica installati alla base di ciascuna colonna verticale e ripartitori sui corpi scaldanti.

3.1.1 Miglioramento dell'accuratezza della stima della potenza termica dei corpi scaldanti

La determinazione della potenza termica dei corpi scaldanti risulta molto complessa in quanto dipende da numerosi fattori quali ad esempio la temperatura media delle superfici che contribuiscono allo scambio termico, la forma del corpo scaldante (e.g. a pannello, a colonne), il materiale (e.g. ghisa, acciaio, alluminio), le dimensioni e la finitura superficiale (e.g. vernice), la portata del fluido termovettore.

La determinazione accurata della potenza termica nominale è stata migliorata progressivamente nel corso degli ultimi anni passando da una semplice dichiarazione del costruttore (fino ai primi anni sessanta), ad una misura normalizzata a livello nazionale nei primi anni settanta ad una rigorosa e accurata misura della potenza termica nominale definita dalla norma UNI EN 442-1 e UNI EN 442-2.

La norma UNI 10200 stabilisce ai fini della contabilizzazione indiretta, che la determinazione della potenza termica di un radiatore debba essere effettuata attraverso la seguente gerarchia:

- Livello 1) certificazione corpi scaldanti mediante norma internazionale UNI EN 442-2;
- Livello 2) certificazione corpi scaldanti mediante norma nazionale (UNI o altra norma tecnica);
- Livello 3) prove sperimentali eseguite da organismi qualificati;
- Livello 4) applicazione di un metodo di calcolo validato sperimentalmente (e.g. metodo dimensionale).

Purtroppo nella contabilizzazione energetica degli edifici storici, ma anche in moltissimi edifici costruiti in Italia nel dopoguerra, non è possibile adottare metodi accurati, se non quelli di calcolo (livello 4) o in alternativa effettuare specifiche (ma costose) prove sperimentali sui radiatori utilizzati (livello 3).

Il metodo semi-empirico dimensionale ha il vantaggio, rispetto ad altri metodi del livello 4, di essere normato nella UNI 10200:2018 [28] e di essere già applicato da numerosi anni. Tale metodo però tiene conto solo di alcuni parametri geometrici (i.e. il volume e superficie esterna del radiatore), del materiale e della tipologia di radiatore (e.g. larghezza colonne, passo del mozzo, tipo di piastra, tipo di alette) e pertanto non ha la stessa accuratezza del metodo di prova definito dalla norma EN 442 [61, 62].

Nel metodo dimensionale il calcolo della potenza termica emessa dal corpo scaldante (riferita ad un salto termico pari a 60 °C) si basa sulla seguente relazione:

$$\dot{Q}_{\Delta T60} = \dot{Q}_C + \dot{Q}_R = 314 \cdot S + C \cdot V \quad (8)$$

avendo indicato con:

- $\dot{Q}_{\Delta T60}$ (W) la potenza termica del corpo scaldante (riferita ad un salto termico di 60 °C);
- \dot{Q}_C (W) la potenza termica del corpo scaldante scambiata per convezione;
- \dot{Q}_R (W) la potenza termica del corpo scaldante scambiata per irraggiamento;
- S (m²) la superficie di involuppo del corpo scaldante;
- V (m³) il volume di involuppo del corpo scaldante;
- C (W/m³) il coefficiente di scambio termico caratteristico della tipologia di radiatore.

In particolare, il primo termine dell'equazione rappresenta la componente radiante della potenza termica, mentre il secondo termine rappresenta l'aliquota emessa dal corpo scaldante per convezione. Il coefficiente di scambio C è stato determinato sperimentalmente per diverse tipologie riportate nella norma UNI 10200:2018 al prospetto C.1) e riportato in Tabella 10. La superficie S e il volume V di involuppo del corpo scaldante (Figura 34) sono invece calcolati sulla base delle dimensioni del corpo stesso (ma non comprendono eventuali tappi, riduzioni o piedini) sulla base delle relazioni:

$$S = 2 \cdot H \cdot l + 2 \cdot p \cdot l + 2 \cdot H \cdot p \quad (9)$$

$$V = H \cdot l \cdot p \quad (10)$$

dove:

- H (m) è l'altezza dell'intero corpo scaldante pari a quella del singolo elemento H_{el} (m);
- p (m) è la profondità del corpo scaldante pari a quella del singolo elemento p_{el} (m);
- l (m) è la larghezza del corpo scaldante pari a quella del singolo elemento l_{el} per il numero di elementi n_{el}

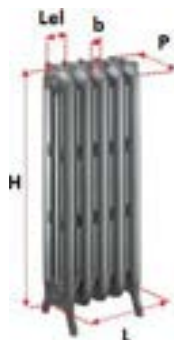
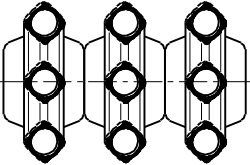
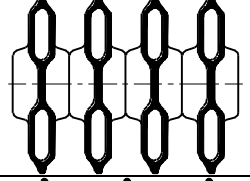
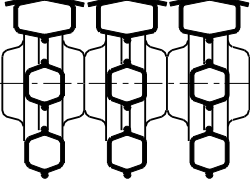
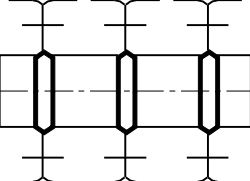
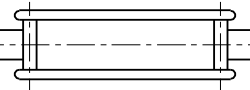


Figura 34 - Dimensioni caratteristiche di un corpo scaldante

Tabella 10 - Valori di C per differenti tipologie di corpi scaldanti (UNI 10200:2018)

Materiale	Tipologia	Descrizione	C [W/m ³]	Tipologia	
Ghisa		Colonne piccole (sezione ≤ 30 × 30 mm)	mozzo 50 mm	18'000	1
			mozzo 55 mm	16'900	2
			mozzo 60 mm	15'500	3
		Colonne grandi (sezione > 30 × 30 mm)	mozzo 55 mm	18'600	4
			mozzo 60 mm	17'600	5
Ghisa o acciaio		Colonne unite da diaframma	16'900	6	
Piastre di ghisa		Colonne lisce	20'300	7	
		Colonne alettate	21'400	8	
Alluminio		molto alettate	28'100	9	
		mediamente alettate	24'800	10	
		poco alettate	21'400	11	
Piastre di acciaio		Piastre non alettate	20'300	12	
		Piastre con alettatura posteriore	23'600	13	
		Piastre con alettatura tra i ranghi	22'500	14	

Un ulteriore problema nella stima della potenza termica dei corpi scaldanti è rappresentato dalla variazione della potenza termica nelle condizioni di esercizio rispetto a quella nominale. Spesso, infatti, le condizioni termo-fluidodinamiche (e.g. temperature, portata), le condizioni di installazione, la presenza di ostruzioni, il collegamento idraulico, la finitura superficiale influiscono sulla potenza termica effettivamente scambiata.

Questo specifico problema può riguardare in generale anche gli altri metodi (i.e. livello 1, 2 e 3) in quanto, sebbene la norma EN 442 preveda la possibilità di tenere conto di questi specifici effetti attraverso la relazione (10), spesso viene utilizzata la relazione semplificata (11).

$$\phi = K_T \cdot L^a \cdot H^b \cdot q_m^c \cdot \Delta T^{(c_0 + c_1 H)} \quad (10)$$

$$\phi = K_m \cdot \Delta T^n \quad (11)$$

avendo indicato con K_T , a , b , c , c_0 e c_1 (o, in alternativa, K_m e n) le costanti caratteristiche del corpo scaldante, H l'altezza, L la lunghezza e $\Delta T = t_m - t_a$ la differenza tra la temperatura media del corpo scaldante e l'ambiente di prova.

Per migliorare l'accuratezza del metodo dimensionale nella stima della potenza termica dei corpi scaldanti e meglio valutare l'accuratezza nelle effettive condizioni di esercizio, gli autori hanno: a) analizzato l'incertezza del metodo dimensionale per diverse tipologie di radiatori; b) sviluppato un nuovo modello geometrico semi-empirico (migliorativo del metodo dimensionale), c) analizzato l'influenza dei

diversi fattori di installazione ed esercizio (e.g. presenza di mensola, griglia, incasso, tendaggi; posizione del radiatore rispetto alla parete ed al pavimento, portata fluido termovettore, temperatura di mandata).

a) *Analisi dell'accuratezza del metodo dimensionale per diverse tipologie di radiatori*

L'analisi dell'accuratezza del metodo dimensionale è stata effettuata in collaborazione con il CTI ed il Politecnico di Milano sulla base del confronto tra i risultati ottenuti applicando il metodo dimensionale e quelli forniti da diversi laboratori e costruttori. L'analisi riguarda diverse tipologie di corpi scaldanti antecedenti agli anni '70, ovvero di corpi scaldanti in cui non sono disponibili certificazioni in conformità alla normativa nazionale o internazionale (si tenga infatti presente che le prime edizioni delle norme nazionali UNI 6514 e della norma europea EN 442 fanno riferimento rispettivamente al 1967 e al 1997).

L'analisi ha riguardato un totale di 791 corpi scaldanti e, in particolare: i) 127 corpi scaldanti in riferimento a misure effettuate in conformità alla norma UNI 6514, ii) 396 corpi scaldanti in riferimento a misure effettuate in conformità alla norma EN 442, iii) 268 corpi scaldanti con misure effettuate da differenti costruttori europei. Nel campione analizzato sono quindi comprese tutte le tipologie coperte dal metodo dimensionale ovvero modelli costituiti da differenti materiali (e.g. Ghisa, Alluminio, Acciaio) ed un numero di elementi compreso tra 10 e 18. Non sono state analizzate tipologie di corpi scaldanti non comprese nel campo di applicazione dichiarato del metodo dimensionale e per il quale il metodo non risulta validato. In Figura 35 viene riportata una sintesi degli scostamenti determinati.

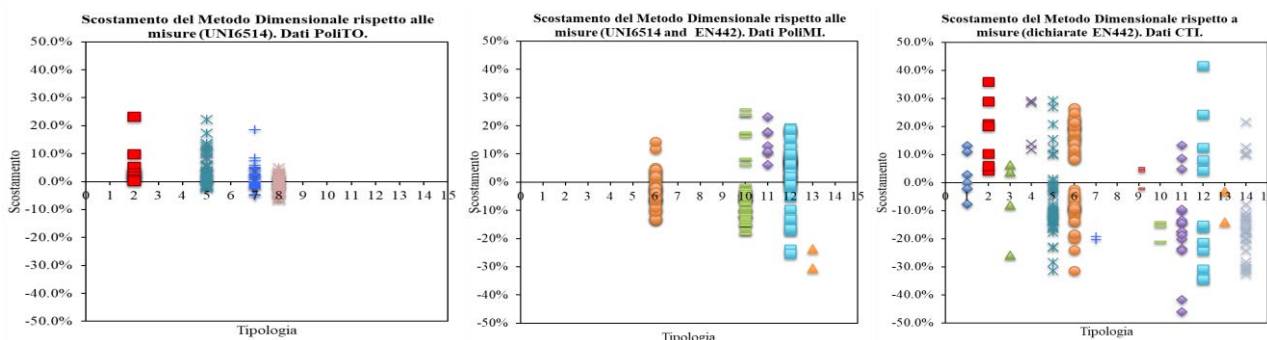


Figura 35 - Scostamento tra il metodo dimensionale e gli altri metodi di stima della potenza termica (fonte PoliMI)

Dalle analisi condotte è possibile affermare che: i) il metodo dimensionale presenta uno scostamento con gli altri metodi inferiore a $\pm 15\%$ per i radiatori in ghisa (tipologie 1-8) e per la maggior parte dei corpi scaldanti analizzati (oltre l'80% dei casi esaminati); ii) le deviazioni maggiori vengono osservate per corpi scaldanti in alluminio e piastre in acciaio; iii) le deviazioni più limitate riguardano i corpi scaldanti più vecchi, che presentano una geometria semplice che rappresenta la base sperimentale di sviluppo del metodo dimensionale stesso.

D'altra parte è opportuno sottolineare che, poiché i dati del KQ relativi alla potenza termica sono applicati nella ripartizione dei costi per i sistemi di contabilità indiretta per determinare un rapporto tra consumi di un'abitazione rispetto a quelli totali, l'errore sulla potenza termica (anche se rilevante) si compensa se sistematico (come nel caso di corpi scaldanti simili installati nello stesso edificio) [16].

b) Sviluppo di un nuovo modello semi-empirico geometrico

I meccanismi di trasmissione del calore, anche su un dispositivo apparentemente semplice come un corpo scaldante, sono molto complessi, in quanto coinvolgono diverse modalità di scambio termico (normalmente convettiva, radiativa e, in modo trascurabile, conduttiva). Mentre per lo scambio termico radiativo sono disponibili in letteratura modelli analitici molto accurati basati sulla stima dei fattori di vista (che risentono principalmente dell'incertezza dell'emissività e della distribuzione di temperatura del corpo radiante e delle superfici irradiate), per lo scambio convettivo i modelli semi-empirici analitici disponibili non sono altrettanto accurati e forniscono risultati molto diversi in funzione delle geometrie e caratteristiche del corpo scaldante (e.g. forma, dimensioni, finitura superficiale), delle modalità di installazione del corpo scaldante nell'ambiente (e.g. sottofinestra, in nicchia), dell'allacciamento all'impianto (e.g. valvole monotubo, tradizionali) e delle condizioni operative di funzionamento (e.g. portata fluido vettore, temperatura mandata e ritorno).

Ai fini della determinazione della potenza termica è possibile classificare i corpi scaldanti secondo il materiale di costruzione e la loro forma, in quanto da questi parametri dipende fortemente la resa termica nominale. Limitando l'attenzione ai cosiddetti "radiatori" e "convettori", per i quali la norma UNI 10200 consente l'applicazione dei ripartitori di calore, la convezione naturale gioca un ruolo fondamentale, anche se il meccanismo radiativo resta sempre estremamente importante. L'aliquota convettiva è generalmente compresa tra il 50% e il 90% in funzione del tipo di corpo scaldante [63], ma il valore massimo del contributo convettivo si verifica utilizzando i cosiddetti convettori (vedi Tabella 11).

Tabella 11 – Aliquote tipiche dell'energia emessa per radiazione e convezione

Tipo di elemento	Radiazione (%)	Convezione (%)
Pannello singolo	50	50
Pannello doppio	30	70
Pannello triplo	25	75
2-colonne	30	70
3-colonne	22	78
4 colonne	19	81
6- colonne	17	83
Convettori	15-10	85-90

Per tali tipologie di corpi scaldanti il meccanismo di scambio termico convettivo è sempre di tipo naturale. Pertanto la potenza termica convettiva ceduta all'ambiente dal corpo scaldante può essere calcolata mediante la nota relazione:

$$\dot{Q}_c = \bar{h}_c S_{eff} (T_s - T_a) \quad (12)$$

dove \bar{h}_c ($Wm^{-2}K^{-1}$) è la conduttanza media convettiva, S_{eff} (m^2) è la superficie di scambio termica effettiva, T_s (K) è la temperatura media superficiale del corpo scaldante e T_a (K) rappresenta la temperatura media dell'aria dell'ambiente riscaldato.

E' opportuno sottolineare che le superfici di scambio termico effettive S_{eff} dei corpi scaldanti sono molto differenti da quelle di involucro utilizzate nel metodo dimensionale e possono essere approssimate in prima approssimazione a quelle di n_{el} piastre verticali parallelepipedo di dimensioni H_{el} , l_{el} , p_{el} (vedi Figura 34 b). Inoltre ai fini della determinazione dello scambio termico convettivo è opportuno distinguere tra le

superfici interne al corpo scaldante, $S_{eff,i}$ (che presentano uno scambio caratteristico in intercapedine), da quelle esterne, $S_{eff,e}$ (che presentano uno scambio caratteristico da piastra verticale):

$$\begin{aligned}
 S_{eff,i} &= 2 \cdot H_{el} \cdot p_{el} \cdot (n_{el} - 1) + 2 p_{el}(l_{el} - b) \cdot n_{el} \\
 S_{eff,e} &= 2 \cdot H_{el} \cdot p_{el} + 2 \cdot H_{el}(l_{el} - b) \cdot n_{el} \\
 S_{eff} &= S_{eff,i} + S_{eff,e}
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

In condizioni stazionarie, date le dimensioni e le temperature tipiche di funzionamento del corpo scaldante, il regime di moto dell'aria in prossimità della superficie calda è generalmente turbolento. In tal caso è possibile utilizzare per calcolare la conduttanza convettiva media dei corpi scaldanti la correlazione di Churchill e Chu [64] per piastre verticali (eq. 14), e di Churchill e Usagi [65] o, in alternativa, di Elenbaas [66]), per intercapedini (eq. 15 e 16, rispettivamente).

$$\bar{h}_{c,e} = \left[0.825 + \frac{0.387 \cdot \left[\frac{\rho c_p g \beta H^3}{\nu \cdot k} (T_s - T_a) \right]^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0.492k}{\nu \rho c_p} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right] \frac{k}{H}
 \tag{14}$$

$$\bar{h}_{c,i} = \frac{1}{\sqrt{\left[\frac{576}{\left[\frac{\rho c_p g \beta b^4}{k \nu H} (T_s - T_a) \right]^2} \right] + \left[\frac{3.56}{\left[\frac{\rho c_p g \beta b^4}{k \nu H} (T_s - T_a) \right]} \right]}} \frac{k}{b}
 \tag{15}$$

$$\bar{h}_{c,i} = \frac{k}{b} \frac{\rho^2 g \beta c_p b^4 (T_s - T_a)}{\mu^2 H} \left(1 - e^{-\frac{35}{\frac{\rho^2 g \beta c_p b^4 (T_s - T_a)}{\mu^2 H}}} \right)^{0.75}
 \tag{16}$$

dove k ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), ρ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), c_p ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), ν ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$), β (K^{-1}) sono, rispettivamente, la conducibilità termica, la densità, il calore specifico a pressione costante, la viscosità cinematica e la comprimibilità isobara del fluido, H (m) e b (m) le dimensioni del corpo scaldante e g ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$) l'accelerazione di gravità.

Il metodo dimensionale, consente di determinare i valori dei coefficienti C per diverse tipologie di corpo scaldante, diversi spessori dei mozzi S_m (generalmente compresi tra 50 mm e 60 mm), mentre tiene in conto delle diverse larghezze e altezze dei corpi scaldanti solo attraverso il suo volume. Le geometrie dei radiatori storici presentano diverse altezze (tipicamente comprese tra 0.4 e 1.2, ma che possono anche arrivare fino a 2.4 m) e numero di elementi (anche oltre quindici elementi). Pertanto è necessario verificare se in tutte queste condizioni il metodo dimensionale è in grado di rappresentare i fenomeni fisici convettivi che intervengono nel funzionamento di un corpo scaldante. In altre parole valutare se, a partire dallo stesso

volume V del corpo scaldante (corrispondente a differenti combinazioni altezza/larghezza) corrispondano valori ingegneristicamente simili della potenza termica e del coefficiente C .

A tal fine è stato calcolato, sulla base delle correlazioni semi-empiriche sopra riportate (eq.14), l'andamento del coefficiente C al variare dell'altezza e della larghezza di un corpo scaldante (vedi Figura 36). Dalla Figura 36 è possibile evincere che il coefficiente C non è costante a parità di tipologia, come previsto dal metodo dimensionale, ma dipende anche dall'altezza del corpo scaldante e, in misura inferiore, dal numero di elementi, quando questo è molto ridotto (e.g. $N_{el}=2$).

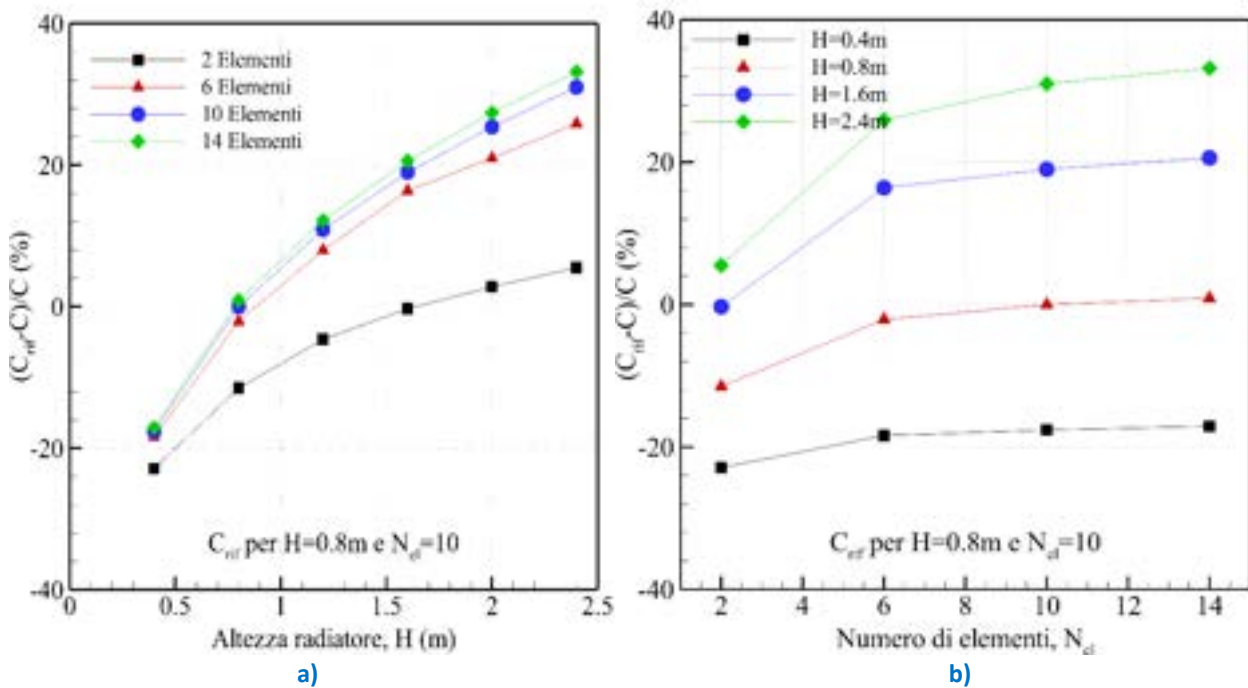


Figura 36 - Andamento del coefficiente C al variare dell'altezza (a) e larghezza (b) del corpo scaldante

Per quanto concerne l'aliquota di energia termica radiativa ceduta all'ambiente dal corpo scaldante, essa come noto dipende, oltre che dalla temperatura superficiale del corpo stesso, anche dal materiale di cui esso è costituito, dalla sua finitura superficiale e dalla verniciatura. Tali caratteristiche, infatti, influenzano in modo significativo l'emittenza totale che, nel caso di materiali metallici non verniciati, è altresì debole funzione della temperatura. I campi di variabilità dell'emittenza totale in funzione delle caratteristiche superficiali sono elencati in

Tabella 12.

Tabella 12 - Valori dell'emittenza totale in funzione delle caratteristiche superficiali (Peach, 1972)

Caratteristiche superficiali	Emittenza totale
Rivestimenti non metallici	0,8 – 0,95
Vernici metalliche	0,4 – 0,7
Metalli ossidati	0,8 – 0,9
Metalli puliti	0,1 -0,4
Metalli lucidi	0,1

Lo scambio termico radiativo tra la superficie esterna del corpo scaldante e la cavità (costituita dalle superfici delimitanti l'ambiente confinato) può essere descritto dalla seguente relazione:

$$\dot{Q}_r = \bar{h}_r S_{eff} (T_s - T_r) \cong 4\sigma\epsilon\bar{T}^3 \cdot S_{eff} \cdot (T_s - T_r) \quad (17)$$

dove \bar{h}_r ($Wm^{-2}K^{-1}$) rappresenta la conduttanza unitaria radiativa il cui valore dipende, oltre che dalla emissività ϵ , anche dalla differenza di temperatura media tra la temperatura superficiale, T_s , e la temperatura media radiante, T_r , tipicamente approssimata alla temperatura dell'aria, T_a .

Il metodo dimensionale, non differenzia il contributo radiativo per diverse tipologie ed emissività dei corpi scaldanti e tiene conto delle diverse dimensioni dei corpi scaldanti solo attraverso la superficie (l'aliquota radiativa è infatti costante e pari a $314 Wm^{-2}$). Se assimiliamo lo scambio termico radiativo al caso di corpo grigio in cavità nera con pareti isoterme, il flusso termico raggiante non dipende, infatti, dalle geometrie del corpo e dell'ambiente, ma solo dalla superficie del corpo scaldante e dalla sua emissività. In realtà, considerando che lo scambio termico radiativo è in parte rivolto verso la parete posteriore (generalmente più calda della temperatura ambiente) e nella restante parte verso le pareti laterali, orizzontali e frontali (generalmente alla temperatura ambiente), si dovrebbe considerare in modo più articolato la geometria del corpo scaldante stesso come si evince dalla Figura 37.

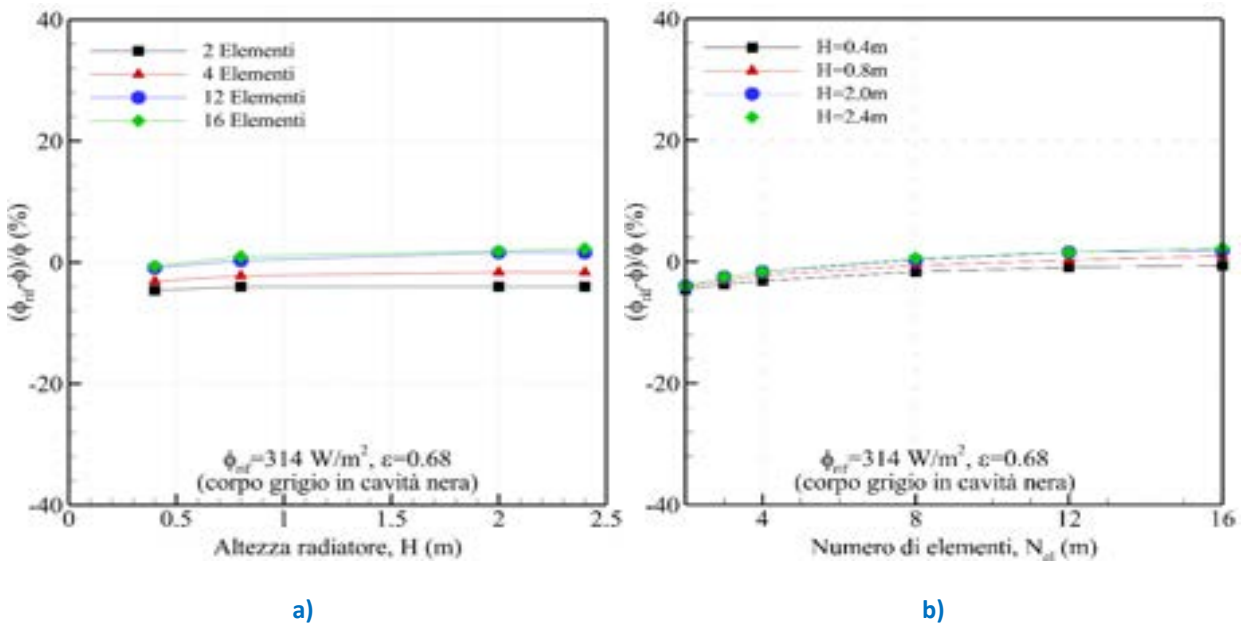


Figura 37 - Andamento del coefficiente C al variare dell'altezza (a) e larghezza (b) del corpo scaldante

Per migliorare l'accuratezza del calcolo, gli autori propongono due diversi approcci:

- Il primo approccio consiste nel correggere il metodo dimensionale tenendo conto degli effetti sopra indicati ed in particolare dell'emissività dei corpi scaldanti (dovuti alla diversa finitura superficiale e verniciatura), nonché della diversa influenza dell'altezza H e della profondità P rispetto alla larghezza dei corpi scaldanti (nel metodo dimensionale altezza, profondità e larghezza influenzano linearmente, in misura egual misura, la potenza termica in palese contraddizione rispetto all'evidenza fisica), attraverso la seguente relazione, in cui è stata posta in prima applicazione un'altezza di riferimento pari a $H_{rif}=0.68$ m, una profondità di riferimento $P_{rif}=0.15$ m ed un coefficiente di correzione C' pari a 0,1.

$$\dot{Q}_{\Delta T60} = \dot{Q}_R + \dot{Q}_C = (314 \cdot S) \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{rif}} + (C \cdot V) \cdot \left(1 - C' \frac{H}{H_{rif}} \sqrt{\frac{P}{P_{rif}}} \right) \quad (16)$$

- Il secondo approccio si basa invece sulle correlazioni sperimentali dei coefficienti convettivi disponibili in letteratura (con particolare riferimento alle correlazioni adimensionali di Elenbaas) e dei diversi fattori di vista tra il corpo scaldante e le pareti circostanti, attraverso la relazione:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\Delta T60} = \dot{Q}_R + \dot{Q}_C &= 4\sigma\varepsilon\bar{T}^3 \cdot S_{eff} \cdot (T_s - T_{mr}) + \bar{h}_c S_{eff} (T_s - T_a) = \\ &= 4\sigma\varepsilon\bar{T}^3 \cdot \left[S_{eff}^{ant} \cdot (T_s - T_a) + S_{eff}^{post} \cdot \left(\frac{T_s + T_a}{2} - T_a \right) \right] \\ &+ (\bar{h}_{c,i} S_{eff,i} + \bar{h}_{c,e} S_{eff,e}) (T_s - T_a) \end{aligned} \quad (17)$$

dove i coefficienti convettivi $\bar{h}_{c,i}$ ed $\bar{h}_{c,e}$ possono essere determinati sulla base delle correlazioni sperimentali disponibili in letteratura [64-66].

A titolo di esempio, in Tabella 13 ed in Figura 39 si riportano i risultati dei tre diversi metodi (i.e. metodo dimensionale, metodo dimensionale corretto e metodo semi-empirico classico) per una particolare tipologia (Tipologia 5, Radiatore in ghisa con colonne grandi e mozzo 60, vedi Figura 38) per la quale sono disponibili in commercio quattro diverse altezze H e quattro diverse profondità P (con un numero di elementi pari a 10).



Figura 38 - Radiatore in ghisa Tipologia 5 con colonne grandi e mozzo 60

Tabella 13 - Confronto modelli di calcolo semi-empirici con il valore misurato sperimentalmente EN 442

Tipo / Ranghi	L, m	H, m	P, m	Potenza, kW				Errore, %			
				EN 442-2	Metodo dimens. UNI 10200	Metodo dimens. corretto	Metodo semi-emp. appr_2	Metodo dimens. UNI 10200	Metodo dimens. corretto	Metodo semi-emp. appr_2	
LBT 2/880	2	0,600	0,880	0,070	1001	1047	982	1031	4,7%	3,0%	-1,9%
LBT 4/580	4	0,600	0,580	0,146	1201	1221	1136	1148	1,6%	-4,4%	-5,5%
LBT 4/680	4	0,600	0,680	0,146	1375	1422	1305	1324	3,4%	-3,7%	-5,1%
LBT 4/880	4	0,600	0,880	0,146	1729	1824	1628	1671	5,5%	-3,4%	-5,9%
LBT 6/430	6	0,600	0,430	0,225	1348	1329	1240	1212	-1,4%	-10,1%	-8,1%
LBT 6/580	6	0,600	0,580	0,225	1581	1763	1600	1570	11,5%	-0,7%	1,2%
LBT 6/680	6	0,600	0,680	0,225	1737	2053	1829	1804	18,2%	3,9%	5,3%
LBT 6/880	6	0,600	0,880	0,225	2010	2632	2256	2263	31,0%	12,6%	12,3%
LBT 9/300	9	0,600	0,300	0,340	1423	1382	1301	1245	-2,8%	-12,5%	-8,5%

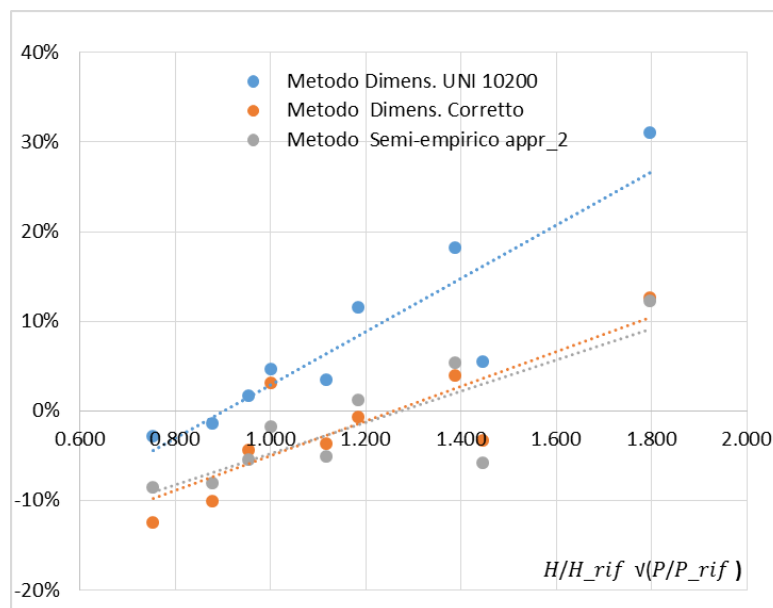


Figura 39 - Confronto tra i modelli di calcolo con il valore misurato sperimentalmente EN 442

Dall’analisi dei risultati della validazione, i due metodi di calcolo della potenza termica nominale dei corpi scaldanti proposti sembrano presentare un migliore accordo con la potenza misurata sperimentalmente mediante la norma EN 442 rispetto al metodo dimensionale, ma dovrebbero essere validati con un numero consistente di casi per poter essere proposti in alternativa al metodo dimensionale stesso.

c) *analisi dell’influenza dei diversi fattori di installazione ed esercizio*

In condizioni di esercizio spesso si riscontrano condizioni termo-fluidodinamiche molto differenti dalle condizioni di prova quali portata di fluido diversa dalla portata nominale di prova, diversa modalità di connessione all’impianto con conseguente diversa distribuzione di temperatura del corpo scaldante.

Mentre alcuni di questi elementi dovrebbero essere tenuti in debito conto nella stima del KQ (e.g. diversa temperatura del fluido, connessioni), altri risultano particolarmente interessanti per gli utilizzatori per poter valutare gli errori sistematici prodotti da una particolare condizione di utilizzo (e.g. posizionamento in nicchia, tendaggi pesanti, ecc.).

La potenza termica effettiva nelle condizioni di esercizio può essere valutata attraverso la seguente relazione:

$$\Phi_{eff} = \Phi \cdot F = \Phi \cdot (F_{\Delta T} \cdot F_{con} \cdot F_{qm} \cdot F_{in} \cdot F_{vr} \cdot F_p) \tag{18}$$

avendo indicato con:

- F il fattore correttivo globale adimensionale,
- $F_{\Delta T}$ il fattore correttivo per la diversa temperatura del fluido,
- F_{con} il fattore correttivo per le tipologie di connessioni;
- F_{qm} il fattore correttivo per la portata media;
- F_{in} il fattore correttivo per l’installazione del corpo scaldante;
- F_{vr} il fattore correttivo per effetto della verniciatura;

- F_p il fattore correttivo per effetto della pressione atmosferica.

Di seguito si analizza l'influenza di tali fattori sulla potenza termica ed in particolare:

- il fattore correttivo sulla temperatura del fluido, $F_{\Delta T}$ consente di correggere la potenza termica di un corpo scaldante quando la temperatura media del fluido scaldante e la temperatura dell'ambiente differiscono dalle condizioni di prova. Tale fattore può essere determinato, per temperature medie del fluido scaldante variabili da 30°C a 80°C, attraverso la seguente relazione:

$$F_{\Delta T} = \left(\frac{T_m - T_a}{\Delta T_{RIF}} \right)^n \quad (19)$$

avendo indicato con T_m e T_a rispettivamente la temperatura media del fluido e la temperatura dell'aria, riferita al centro dell'ambiente ad una quota di 0,75 m.

Gli autori hanno analizzato l'effetto legato alla stima del flusso termico normalizzato alle condizioni di riferimento ottenuto da misure effettuate al variare della differenza di temperatura media ΔT tra fluido ed ambiente (vedi Figura 40). In Figura 40 viene riportato l'andamento della potenza termica ϕ_L misurata nel laboratorio MRT al variare del ΔT per diversi numeri di elementi in ghisa e lo scostamento delle misure effettuate in campo (LAMI) ed in laboratorio (MRT) con il valore della potenza termica stimata attraverso l'equazione caratteristica standard. Tali scostamenti sono sempre molto ridotti in campo e praticamente nulli in laboratorio avendo stimato con accuratezza il coefficiente n .

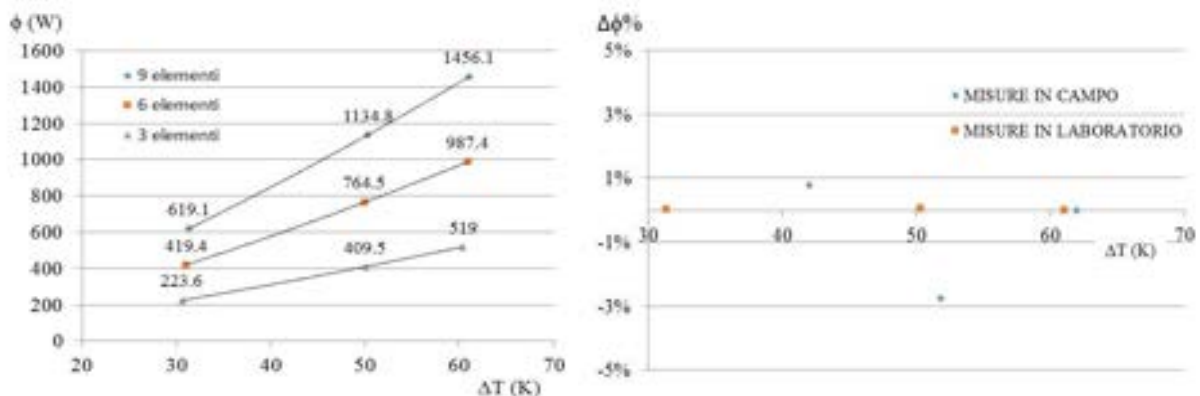

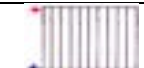







Figura 40 - Andamento della potenza termica e della sua correzione al variare del ΔT

- il fattore correttivo sulle connessioni dei corpi scaldanti, F_{con} consente di correggere la potenza termica nel caso in cui il corpo scaldante non risulti alimentato secondo le condizioni nominali di prova; generalmente le connessioni di ingresso e di uscita del fluido termovettore vengono poste rispettivamente nella zona superiore ed inferiore del corpo scaldante; qualora gli attacchi siano entrambi localizzati nella parte inferiore il fattore F_{con} è inferiore ad 1. In Tabella 14 sono riportati i risultati delle prove in campo di verifica dell'influenza delle connessioni sulla potenza termica effettiva dei radiatori alla portata massima e ridotta. In particolare, sono stati analizzati i casi di connessione più comuni, quali: a) flusso misto (mandata sx alta/ritorno dx basso); b) flusso controcorrente (mandata sx alta/ritorno sx basso); c) flusso incrociato (mandata sx basso/ritorno dx basso); d) monotubo con stelo corto; e) monotubo con stelo medio; f) monotubo con stelo lungo e ugelli; f) monotubo con stelo lungo e separatore. I maggiori scostamenti tra potenza termica effettiva e potenza nominale sono stati osservati in

presenza di valvola monotubo con basse portate in cui sono stati osservati scostamento con la configurazione di riferimento ottimale anche superiori al 20%.

Tabella 14 - Variazione della potenza termica con il tipo di connessione

Tipo di Connessione	Schema	Portata max (circa 200 kg/h)		Portata ridotta (circa 70 kg/h)	
		$\Phi_{\Delta T60}$	$\Delta \Phi \%$	$\Phi_{\Delta T60}$	$\Delta \Phi \%$
A (Flusso Misto)		1779W	0.0%	1770W	-0.5%
B (Flusso controcorrente)				1761W	-1.0%
C (Flusso incrociato)		1701W	-4.4%	1552W	-12.8%
D (Monotubo con stelo corto)		1527W	-14.2%		
E (Monotubo con stelo medio)				1440W	-19.1%
F (Monotubo con stelo lungo e ugelli)		1628W	-8.5%	1388W	-22.0%
G (Monotubo con stelo lungo e separatore)		1727W	-2.9%	1547W	-13.0%

- il **fattore correttivo sulla portata F_{qm}** dipende dalla termo-fluidodinamica interna del corpo scaldante e dalla presenza di valvole termostatiche o di sistemi di regolazione della potenza che agiscono sulla portata, può assumere valori maggiori o minori di 1, può essere correttamente computato utilizzando l'equazione caratteristica della gamma ottenuta in funzione della portata. Presso il laboratorio MRT sono state svolte specifiche prove volte a valutare la deviazione tra i valori di potenza di uno stesso modello di corpo scaldante in ghisa al variare del numero di elementi provati, al variare della portata e al variare del ΔT . I risultati sperimentali sono riportati in Tabella 15 ed in Figura 41.

Tabella 15 - Variazione della potenza termica ϕ_L al variare della portata e del numero di elementi.

Prova 16916 - RAD. GHISA H 900 4 COL. 3 ELEMENTI							
	Prova EN 442			Influenza della portata sulla ϕ_L			
ΔT_m	60,35	50,06	30,60	49,94	49,88	47,63	K
q	34,522	34,632	34,425	280,447	17,933	8,813	kg/h
q	0,0096	0,0096	0,0096	0,0779	0,0050	0,0024	kg/s
Φ_c	519,0	409,5	223,6	445,0	394,7	385,0	W
model	521,7	413,8	224,7	439,3	403,9	373,4	W
$\Phi(50)$	-----	408,9	---	445,66	405,1	409,1	W
$\Delta\Phi(50)$	-----	-----	----	8,98 %	-0,9 %	0,04 %	%
Prova 16917 - RAD. GHISA H 900 4 COL. 6 ELEMENTI							
	Prova EN 442			Influenza della portata sulla ϕ_L			
ΔT_m	60,91	49,96	31,01	49,93	50,25	50,28	K
q	65,687	66,039	66,348	291,706	34,199	16,809	kg/h
q	0,0182	0,0183	0,0184	0,0810	0,0095	0,0047	kg/s
Φ_c	987,4	764,5	419,4	796,1	753,1	699,6	W
model	972,5	758,4	416,8	810,5	741,6	718,7	W
$\Phi(50)$	-----	759,1	---	797,5	748,4	713,7	W
$\Delta\Phi(50)$	-----	-----	----	5,05 %	-1,4 %	- 5,98 %	%
Prova 16918 - RAD. GHISA H 900 4 COL. 9 ELEMENTI							
	Prova EN 442			Influenza della portata sulla ϕ_L			
ΔT_m	61,03	50,27	31,33	50,25	49,66	50,15	K
q	99,163	98,614	99,146	286,454	49,568	25,055	kg/h
q	0,0275	0,0274	0,0275	0,0796	0,0138	0,0070	kg/s
Φ_c	1456,1	1134,8	619,1	1133,3	1087,4	1037,3	W
model	1431,2	1119,1	614,8	1161,5	1075,5	1063,1	W
$\Phi(50)$	-----	1111,4	---	1154,1	1084,9	1059,0	W
$\Delta\Phi(50)$	-----	-----	----	3,1%	-2,3 %	- 4,71 %	%

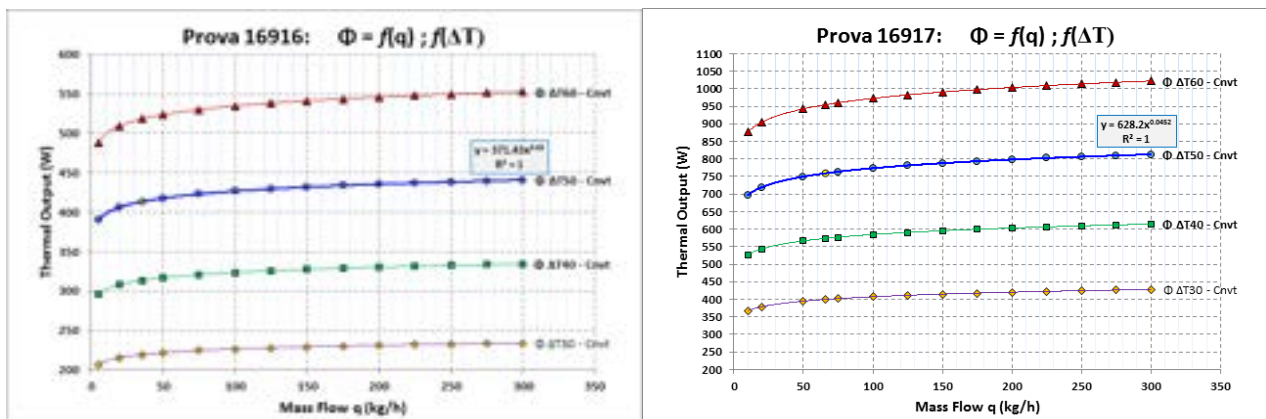


Figura 41 - Variazione della potenza termica misurata in funzione della portata volumetrica

Dall'analisi dei dati emerge che, nel caso di una differenza di temperatura ΔT pari a 60°C, una diminuzione della portata q compresa tra il 5 e il 10% della massima q_{max} (pari a 300 l/h) da luogo a riduzioni della potenza termica comprese tra il 10 ed il 15%. Questo effetto è molto impattante nel caso di installazione di valvole termostatiche che riducono in modo significativo le portate effluenti nei corpi scaldanti nel normale utilizzo dell'impianto.

- il fattore correttivo sull’installazione del corpo scaldante, F_{in} consente di correggere la potenza termica in presenza di protezioni (i.e. una mensola, di una griglia, di un incasso) che limitano in modo rilevante gli scambi termici tra il radiatore e l’ambiente circostante;

In tabella 3.6 sono riportati i risultati delle prove in campo di verifica dell’influenza delle condizioni di installazione sulla potenza termica effettiva dei radiatori in alluminio ed in ghisa. In particolare, sono stati analizzati alcuni casi di installazione molto comuni, quali: i) mensola; ii) incasso; iii) griglia; iv) posizionamento verticale ed orizzontale; v) presenza di ostruzioni in tessuto. I maggiori scostamenti tra potenza termica effettiva e potenza nominale sono stati osservati in presenza di griglia per entrambi i corpi scaldanti analizzati. Nel caso di radiatori in alluminio, la copertura parziale del corpo scaldante provoca uno scostamento della potenza termica effettiva di circa il 18% rispetto a quella nominale.

Tabella 16 - Fattori di influenza delle condizioni di installazione sulla potenza termica effettiva

Corpo scaldante	Ghisa			Alluminio		
	da parete	da pavim.	$\Delta\phi\%$	da parete	da pavim.	$\Delta\phi\%$
corretta installazione	6 cm	11 cm	0.00	2 cm	10,5 cm	0.00
mensola	6 cm	11 cm	0.47	2 cm	10,5 cm	0.18
incasso	6 cm	11 cm	-1.83	2 cm	10,5 cm	-6.3
griglia	6 cm	11 cm	-16.2	2 cm	10,5 cm	-11
posizione orizzontale	-	-	-	16 cm	10,5 cm	-0.5
posizione verticale	6 cm	19 cm	-0.29	16 cm	19 cm	2.96
	6 cm	25.6 cm	0.24	16 cm	26,5 cm	3.87
copertura parziale	-	-	-	16 cm	10,5 cm	-17.7

- il fattore correttivo sulla verniciatura, F_{vr} , consente di correggere il valore nominale della potenza termica in presenza di una vernice diversa da quella di prova (e.g. per vernici a base di alluminio o di bronzo); in ogni caso la norma EN 442 considera diversi due modelli identici di corpo scaldante verniciati rispettivamente con vernici opache e lucide e richiede due prove distinte. Nei calcoli di potenza in esercizio occorrerà riferirsi al rapporto di prova appropriato;
- il fattore correttivo sulla pressione, F_p tiene conto della variazione della potenza termica dell’elemento scaldante quando è installato ad una altitudine diversa rispetto al livello del mare, ovvero nel caso in cui la ridotta densità dell’aria influenza la capacità di trasporto di energia termica, ed è determinabile attraverso la seguente relazione:

$$F_p = Sk + (1 - Sk) \left(\frac{P_0}{P} \right)^{n_p} \quad (25)$$

in cui P è la pressione barometrica misurata durante la prova, P_0 è pari a 1013 mbar, l’esponente n_p e il valore di Sk sono definiti nella tabella 4 della EN 442-2.

In Figura 42 è riportato l’effetto di variazione del fattore correttivo sulla pressione F_p al variare della pressione barometrica. Tale andamento è stato ottenuto applicando l’eq. (18). Dal grafico si evince che, riducendo la pressione rispetto a quella atmosferica si ottiene un aumento del fattore correttivo F_p esponenziale con un aumento di circa l’8.6% ad una quota di 2000 m per corpi scaldanti multi-colonna ($Sk=0.25$; $n_p=0.45$).

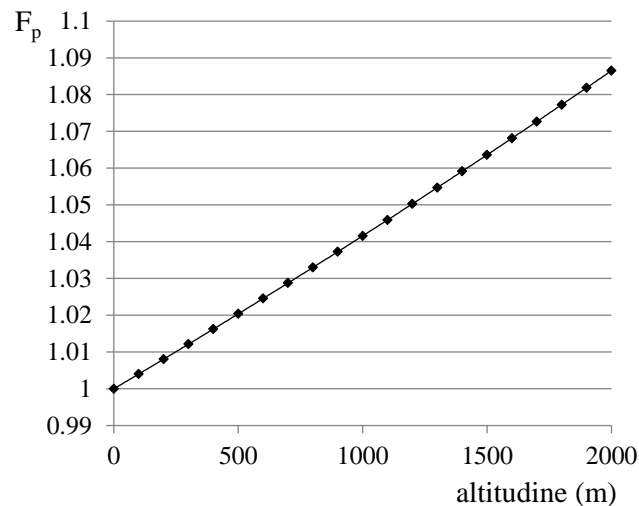


Figura 42 - Variazione del fattore correttivo F_p al variare dell'altitudine.

3.1.2 Progettazione di una campagna di misure sperimentali per l'analisi del miglioramento delle prestazioni dei sistemi di contabilizzazione indiretti attraverso configurazioni di impianto innovative

La possibilità di migliorare le prestazioni metrologiche dei sistemi di contabilizzazione indiretti attraverso l'utilizzo "ibrido" nell'impianto di un certo numero di misuratori diretti di energia termica è stata per la prima volta prospettata da Celenza et al. in [14] al fine di migliorare le prestazioni metrologiche negli impianti a distribuzione verticale laddove non possono, per vincoli impiantistici, essere utilizzati i sistemi diretti ed i sistemi indiretti risultano particolarmente critici (e.g. parziali ristrutturazioni dell'impianto termico nell'edificio).

La configurazione proposta, applicabile negli edifici esistenti, prevede la possibilità di utilizzare sistemi indiretti (e.g. ripartitori) su ciascun radiatore misuratori diretti in caldaia e alla base di ciascuna colonna verticale, come illustrato in Figura 43.

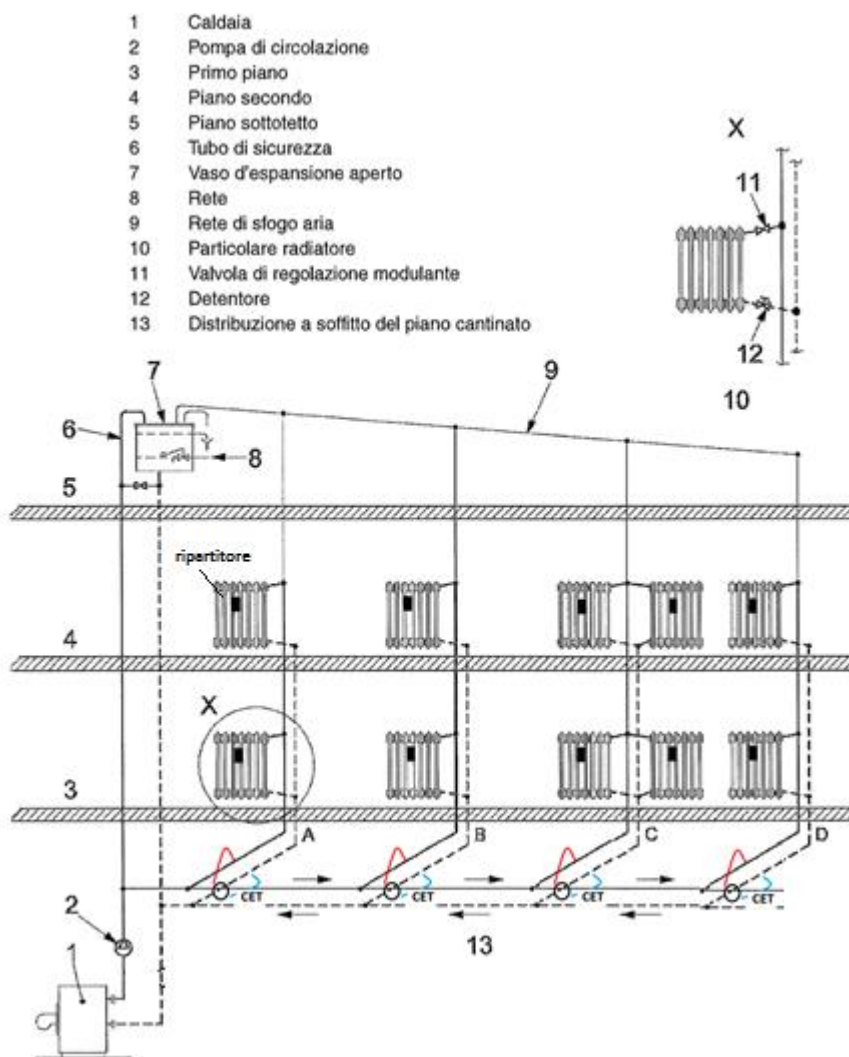


Figura 43 – Configurazione ibrida di un sistema di contabilizzazione indiretta

Un sistema di contabilizzazione indiretta in configurazione “ibrida” può consentire:

- di verificare a valle della caldaia l’energia termica prodotta dal generatore e, quindi, di monitorarne l’efficienza e programmare tempestivamente gli eventuali interventi di manutenzione;
- di correggere i consumi indiretti stimati per ciascuna colonna verticale, con il vantaggio di intercettare sulla stessa verticale radiatori simili tra loro (e.g. per potenza termica nominale e condizioni di installazione) e quindi con effetti positivi sull’accuratezza della ripartizione grazie alla correzione degli errori sistematici.

La campagna di misure sperimentali finalizzata all’analisi delle prestazioni metrologiche del sistema ibrido descritto in Figura 43 è stata progettata ed è in corso di realizzazione presso l’Istituto di Ricerca Metrologica INRIM di Torino, dove è disponibile un impianto di prova per valutare le prestazioni dei sistemi di contabilizzazione indiretti [15, 67], costituito da un generatore di calore centralizzato con 40 radiatori alimentati con acqua e caratterizzati da diversa potenza termica (i.e. diverse forme, connessioni idrauliche, dimensioni e materiali).

L’impianto è automaticamente configurabile in configurazione orizzontale/verticale e simula un edificio con 8 alloggi standard e 40 radiatori in totale. L’impianto è strumentato con 60 sensori di flusso elettromagnetici, sensori di pressioni differenziali, 212 termoresistenze al platino e 180 valvole motorizzate, in modo da effettuare misure dirette (delle grandezze fisiche coinvolte) con elevata precisione e

riconfigurare il simulatore per simulare le tipologie idrauliche riscontrabili in campo (colonna montante, a zona, monotubo, etc.). Ogni contatore di calore diretto di riferimento è costituito da un misuratore di portata elettromagnetico, due sensori di temperatura Pt100 e un'unità di calcolo dell'energia termica direttamente implementata sul PC, che riceve i segnali di misura convertiti da un controllore logico programmabile (PLC). L'intero impianto è monitorato e controllato con un PLC, due sottostazioni di controllo e 3 sinottici interattivi utilizzabili sia per il monitoraggio ed il controllo dei parametri di regolazione dell'impianto. Attraverso il sistema di controllo è possibile variare i punti di lavoro del generatore centralizzato, della pompa di circolazione e gli stati di apertura e chiusura delle valvole di ogni corpo scaldante, intervenendo sia manualmente che automaticamente secondo un programma prestabilito.

Per la conduzione della campagna sperimentale di prove finalizzate alla valutazione delle prestazioni del sistema di contabilizzazione in configurazione ibrida sono stati:

- installati e programmati i ripartitori di calore elettronici a doppio sensore (conformi EN 834) su ciascun corpo scaldante (n.40) presente sull'impianto;
- configurati i misuratori diretti di energia termica su ogni colonna verticale (n.8) presente sull'impianto.

In Figura 44 si riporta un'immagine e lo schema dell'impianto Mockup dell'INRIM di Torino. Sono in corso di realizzazione le prove per la determinazione delle quote di ripartizione corrette con il metodo "ibrido" ed il confronto con le quote di ripartizione del sistema indiretto "standard".

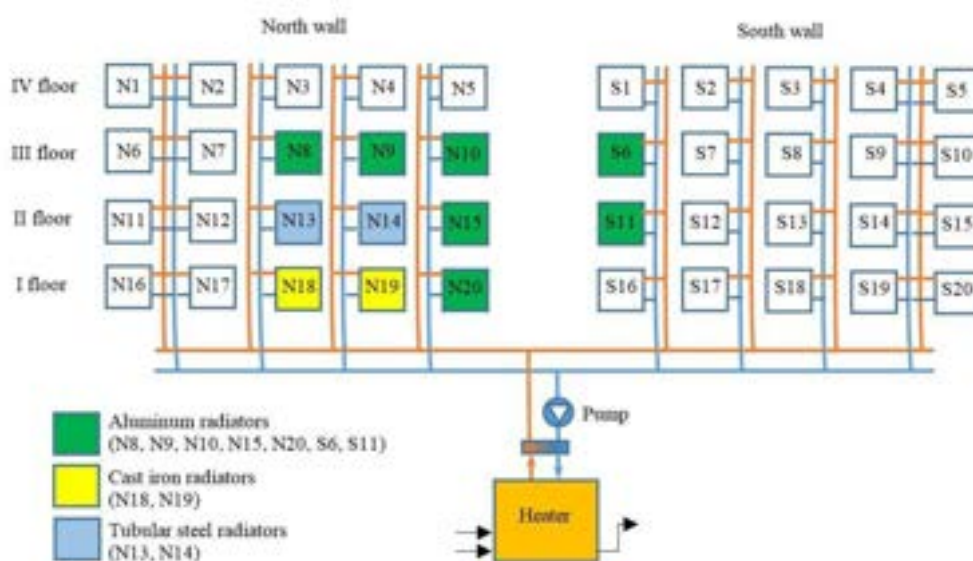


Figura 44 – Mockup di prova per sistemi di contabilizzazione dell'INRIM di Torino

3.2 Analisi dei sistemi di taratura e verifica in campo dei sistemi di contabilizzazione e ripartizione del calore

Come noto, la direttiva MID 2014/32/UE [68] non impone regole per le verifiche periodiche, lasciando a ciascuno Stato Membro la libertà di stabilire le proprie, anche al fine di garantire la continuità con le norme nazionali vigenti in materia.

Per i contatori di energia termica, Il Ministero per lo Sviluppo Economico ha emesso il Decreto 21 aprile 2017, n. 93 [69] recante la disciplina attuativa della normativa sui controlli degli strumenti di misura in servizio e sulla vigilanza sugli strumenti di misura conformi alla normativa nazionale e europea. Il decreto definisce per i contatori energia termica approvati MID le modalità e le periodicità delle verifiche periodiche e dei controlli metrologici casuali. Al momento, tuttavia, per i contatori di energia termica non sono disponibili riferimenti legislativi e normativi relativi alle modalità operative da adottare in campo o in laboratorio per l'esecuzione delle verifiche successive.

Ai sensi del Decreto, le verifiche periodiche sono effettuate da Laboratori o Organismi di Ispezione/Certificazione riconosciuti da Unioncamere ed accreditati da ACCREDIA (in conformità con una delle norme IEC/ISO 17020, 17025, 17065), secondo le periodicità definite nell'Allegato I, ovvero:

- ogni 8 o 9 anni per misuratori di flusso di tipo statico a seconda se la portata permanente q_p è rispettivamente minore o maggiore di $3 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$;
- ogni 5 o 6 anni per misuratori di flusso di tipo meccanico a seconda se la portata permanente q_p è rispettivamente minore o maggiore di $3 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$;

Il D.M. 93/2017 prevede che gli errori massimi tollerati:

- in sede di verifica periodica sono pari a quelli fissati per i controlli in servizio, in corrispondenza della stessa tipologia e classe di accuratezza, dalla relativa Norma armonizzata o Raccomandazione OIML;
- nei casi in cui le pertinenti norme armonizzate o Raccomandazioni OIML non prevedono errori specifici per le verifiche sugli strumenti in servizio, gli errori massimi tollerati in sede di verifica periodica sono pari a quelli stabiliti per la verifica prima;
- in sede di controlli casuali sono superiori del 50% rispetto a quelli della verifica periodica.

Per i contatori di energia termica (MI-004) la norma armonizzata (i.e. norme della serie EN 1434¹) non prescrive criteri specifici per gli errori in servizio, mentre la raccomandazione OIML pertinente (i.e. OIML R75²) rimanda alla legislazione nazionale, suggerendo che, laddove sia prevista una differenziazione, gli MPE in servizio debbano essere pari al doppio di quelli della verifica prima. Pertanto, a giudizio degli autori esiste un "riferimento circolare" tra il DM 93/2017 e La OIML R75 che non consente di stabilire chiaramente se gli MPE in servizio debbano essere pari a quelli della verifica prima o doppi. Nel seguito, in attesa di un pronunciamento a riguardo da parte del MiSE, gli autori hanno considerato entrambe le condizioni.

1 La EN 1434-1 par. 3.23 per la definizione di "durability" stabilisce che "a measuring instrument shall be designed to maintain an adequate stability of its metrological characteristics (e.g. to fulfil the double of MPE) over a period of time estimated by the manufacturer, provided that it is properly installed, maintained and used according to the manufacturer's instruction when in the environmental conditions for which it is intended under treated water conditions". Quanto sopra non rappresenta, a parere degli autori, una dichiarazione sugli errori specifici per le verifiche sugli strumenti in servizio.

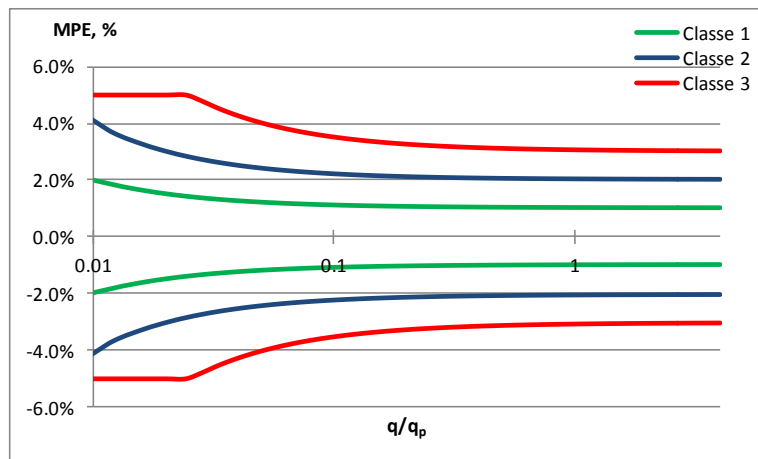
2 La OIML R75-1 al par. 9.4 sancisce: "Maximum permissible errors in service: Where different values for maximum permissible errors in service and at verification are prescribed by national regulations, the values of the maximum permissible errors in service shall be equal to 2 times the maximum permissible errors fixed for verification". Quanto sopra non rappresenta, a parere degli autori, una dichiarazione sugli errori specifici per le verifiche sugli strumenti in servizio.

In Tabella 17 e in Figura 45 sono riportati gli errori massimi tollerati in sede di verifica prima dei contatori di energia termica, come indicati dai documenti tecnici di riferimento (i.e. norma armonizzata EN 1434-1 [70] e raccomandazione tecnica OIML R 75-1 [71]).

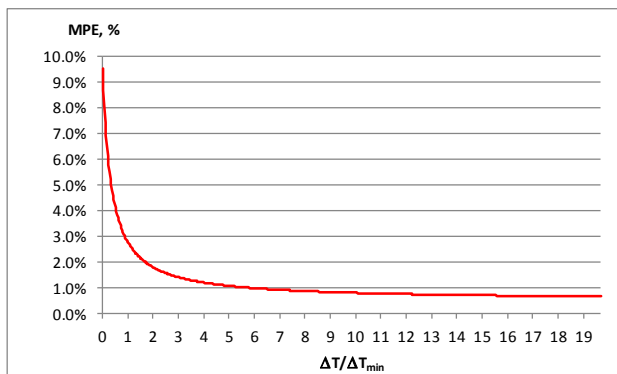
Tabella 17 – MPE per le diverse classi di Contatore di Energia Termica

Classe di precisione (MI-004)	Sottounità del contatore "combinato"			Contatore "compatto"
	Sensore di Flusso	Coppia sensori di temperatura e diff. di temperatura	Calcolatore	
cl. 1	$\left(1 + 0.01 \frac{q_p}{q}\right)^*$	$0.5 + 3 \frac{\Delta\vartheta_{min}}{\Delta\vartheta}$	$0.5 + \frac{\Delta\vartheta_{min}}{\Delta\vartheta}$	$\left(1 + 0.01 \frac{q_p}{q}\right)^* + 1 + 4 \frac{\Delta\vartheta_{min}}{\Delta\vartheta}$
2	$\left(2 + 0.02 \frac{q_p}{q}\right)^*$			$\left(2 + 0.02 \frac{q_p}{q}\right)^* + 1 + 4 \frac{\Delta\vartheta_{min}}{\Delta\vartheta}$
3	$\left(3 + 0.05 \frac{q_p}{q}\right)^*$			$\left(3 + 0.05 \frac{q_p}{q}\right)^* + 1 + 4 \frac{\Delta\vartheta_{min}}{\Delta\vartheta}$

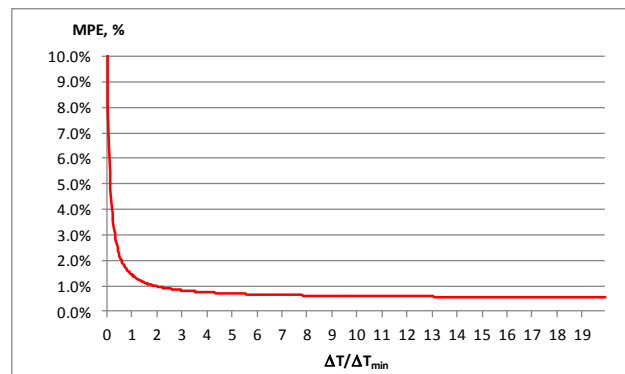
Nota : * comunque non superiore al 5 %
 q_p condizioni di permanenza del flusso
 ΔT_{min} limite inferiore della differenza di temperatura ΔT per il corretto funzionamento del contatore



a) sensore di flusso



b) coppia sensori di temperatura



c) calcolatore

Figura 45 - MPE sottounità contatore di energia termica

Il DM 93/2017 specifica ulteriormente che gli strumenti utilizzati per l'esecuzione della verifica periodica e dei controlli casuali non devono essere affetti da un errore superiore a 1/3 dell'errore massimo tollerato per la grandezza che si sta misurando e l'incertezza estesa con cui è stato determinato l'errore dello strumento non deve superare 1/3 dell'errore misurato³. Il requisito sopra esposto si applica anche qualora la verifica dello strumento in servizio viene effettuata con uno strumento di controllo (i cosiddetti Master Meter).

Il decreto 93/2017 all'allegato II comma 1.10 specifica che *“Le procedure di verifica di alcune tipologie di strumenti di misura sono riportate nelle schede di cui all'allegato III; per le altre tipologie di strumenti, nelle more dell'adozione delle direttive di cui al comma 4 dell'art. 3, la verifica periodica e i controlli in genere sono eseguiti tenendo presenti i principi, in quanto applicabili, dalle prescrizioni previste in materia di verifica dalle norme nazionali, dalle norme europee e dalle pertinenti norme armonizzate europee o, in loro assenza, dalle relative raccomandazioni OIML. Si applicano inoltre le eventuali procedure specificamente previste per controlli analoghi dalle relative approvazioni di modello nazionali e europee o dai relativi attestati di esame CE del tipo o di progetto”* Per quanto sopra riportato, in assenza di istruzioni specifiche per la verifica periodica in campo (come nel caso dei contatori di energia termica) dovrà farsi riferimento, per quanto applicabile, alle prescrizioni previste in materia di verifica dalle norme nazionali, dalle norme europee e dalle pertinenti norme armonizzate europee e, quindi, per i contatori di energia termica alla EN 1434-5 [72] per la verifica iniziale (anche detta “verifica prima”).

Di seguito si riportano sinteticamente i requisiti espressi dalla norma armonizzata EN 1434-5 per la verifica iniziale dei contatori di energia termica.

3.2.1 La verifica iniziale dei contatori di energia termica (EN 1434-5)

La verifica iniziale del contatore di energia termica viene effettuata presso il laboratorio del fabbricante in applicazione dei requisiti della EN 1434-5. Lo strumento viene verificato alle cosiddette “rated operating conditions”⁴, ovvero alle condizioni di uso specificate (e riportate nella etichetta presente sul contatore) per il contatore oggetto di verifica in termini di temperatura, differenza di temperatura tra mandata e ritorno, portata, potenza termica, pressione di esercizio e pressione nominale.

La norma specifica che i punti di verifica sono agli estremi ed alla metà del campo di misura e che se il misuratore è composto da unità separate (sensore di flusso, coppia di sensori di temperatura e calcolatore), ognuna di queste andrà verificata separatamente. Se non diversamente specificato nel certificato di tipo la verifica dovrà essere condotta secondo le modalità descritte dalla norma.

Per i contatori compatti, la verifica deve essere svolta almeno ai seguenti punti di misura per le applicazioni di riscaldamento⁵:

- 1) $\Delta\vartheta_{min} \leq \Delta\vartheta \leq 1.2 \Delta\vartheta_{min}$ e $0.9 q_p < q < 1.1 q_p$,
- 2) $10 K \leq \Delta\vartheta \leq 20 K$ e $0.1 q_p < q < 0.11 q_p$,
- 3) $(\Delta\vartheta_{max} - 5 K) < \vartheta_3 < \Delta\vartheta_{max}$ e $q_i < q < 1.2 q_i$

La temperatura di ritorno deve essere nel range (50±5) °C per riscaldamento e (15±5) °C per raffrescamento, se non diversamente specificato nel certificato di tipo. Per velocizzare le operazioni di verifica, è consentito by-passare il visualizzatore, tuttavia dovrebbe essere effettuato almeno un test con il visualizzatore attivo.

3 in realtà quest'ultimo requisito dovrebbe essere riformulato come 1/3 dell'errore ammesso dello strumento utilizzato per l'esecuzione della verifica, quindi 1/9 dell'errore ammesso per lo strumento sottoposto a verifica

4 La definizione di “rated operating conditions” è data dalla EN 1434-1:2015 par.3.4, ovvero le condizioni di utilizzo fissato il range delle grandezze di influenza.

5 per le applicazioni di raffrescamento: 1) $\Delta\vartheta_{min} \leq \Delta\vartheta \leq 1.2 \Delta\vartheta_{min}$ e $0.9 q_p < q < 1.1 q_p$, 2) $0.8 \Delta\vartheta_{max} \leq \Delta\vartheta \leq \Delta\vartheta_{max}$ e $0.1 q_p < q < 0.11 q_p$, 3) $0.8 \Delta\vartheta_{max} \leq \Delta\vartheta \leq \Delta\vartheta_{max}$ e $q_i < q < 1.2 q_i$

Per i contatori “combinati”, invece, le singole unità sono considerate come moduli separati. Di seguito sono sinteticamente riportati i requisiti descritti per la verifica delle singole unità:

Sensore di flusso

La verifica viene effettuata rispettando le specifiche del certificato di tipo (e.g. requisiti per conducibilità, temperatura del fluido, tratti rettilinei a monte e valle) con fluido alla temperatura di $(50 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$ per applicazioni di riscaldamento e di $(15 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$ per raffreddamento alle seguenti portate : 1) $q_i < q < 1.2 q_i$, 2) $0.1 q_p < q < 0.11 q_p$, 3) $0.9 q_p < q < 1.1 q_p$

Coppia sensori di temperatura

I due sensori di temperatura devono essere verificati (senza pozzetto e rispettando una profondità di immersione di almeno il 90% della lunghezza) nello stesso bagno termostatico a tre valori di temperatura, come di seguito riportato: 1) $\vartheta_{min} < \vartheta_1 < (\vartheta_{min} + 10 \text{ K})$, 2) $\vartheta_2 = \frac{\vartheta_1 + \vartheta_3}{2} \pm 5 \text{ K}$, 3) $(\vartheta_{max} - 10 \text{ K}) < \vartheta_3 < \vartheta_{max}$ (oppure $140 \text{ K} < (\vartheta_{max} - 20 \text{ K}) < \vartheta_3 < \vartheta_{max}$, se $\vartheta_{max} > 150 \text{ K}$)

Calcolatore

Il calcolatore deve essere verificato ai seguenti valori di differenza di temperatura per applicazioni di riscaldamento: 1) $\Delta\vartheta_{min} \leq \Delta\vartheta \leq 1.2 \Delta\vartheta_{min}$, 2) $10 \text{ K} \leq \Delta\vartheta \leq 20 \text{ K}$, 3) $(\Delta\vartheta_{max} - 5 \text{ K}) \leq \Delta\vartheta \leq 1.2 \Delta\vartheta_{max}$. Per applicazioni di raffreddamento i valori sono invece i seguenti : 1) $\Delta\vartheta_{min} \leq \Delta\vartheta \leq 1.2 \Delta\vartheta_{min}$, 2) $0.8 \Delta\vartheta_{max} \leq \Delta\vartheta \leq \Delta\vartheta_{max}$. Inoltre:

- il valore di portata simulato in ingresso non deve essere superiore a quello ammesso per il calcolatore.
- la temperatura di ritorno deve essere nel range $(50 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$ per riscaldamento e $(15 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$ per raffreddamento, se non diversamente specificato nel certificato di tipo.
- per velocizzare le operazioni di verifica, è consentito by-passare il visualizzatore, tuttavia dovrebbe essere effettuato almeno un test con il visualizzatore attivo.

3.2.2 La verifica successiva dei contatori di energia termica

Mentre la verifica prima del contatore viene effettuata in condizioni di laboratorio direttamente presso il Fabbrikante, la verifica periodica, per ovvi motivi economici e di continuità della fornitura e di affidabilità del risultato in congruenza con le reali condizioni di installazione ed esercizio, dovrebbe essere eseguita in campo. Di conseguenza le grandezze di influenza in campo devono essere adeguatamente controllate e misurate affinché i requisiti in termini di incertezza stabiliti dalle norme e dal Decreto 93/17 siano rispettati.

Come noto, la verifica in campo dei contatori di energia termica (sia quelli di fornitura normalmente presenti nel locale caldaia che i sottocontatori, installati all’ingresso della tubazione ad anello di ogni appartamento) presenta numerose criticità tecniche ed operative. In particolare, le condizioni di installazione del contatore, a causa di vincoli impiantistici (e.g. presenza di disturbi a monte e valle, raccordi e riduzioni di diametro, installazione verticale/orizzontale, disponibilità di pozzetti termici per la sonda di temperatura sulla tubazione di ritorno, ecc.), spesso non rispettano i requisiti di installazione richiamati nei certificati di tipo. Non è poi facile trovare tratti di tubazione facilmente accessibili per l’installazione di un Master Meter di riferimento.

Tra gli aspetti tecnici rilevanti posti dal DM 93/2017, l’incertezza degli strumenti utilizzati nella verifica deve essere inferiore almeno ad $1/3$ del massimo errore permesso per lo strumento utilizzato, che a sua

volta deve presentare un errore inferiore ad $1/3$ del massimo errore permesso per lo strumento in verifica⁶. Nessun riferimento viene fatto dal Decreto alle grandezze di influenza presenti durante la verifica che invece sono considerate dalla norma EN 1434-5 che al par. 5 prescrive che le incertezze associate agli standard di riferimento, al metodo ed agli strumenti utilizzati siano note e inferiori a $1/5$ del MPE del contatore in verifica⁷.

Riguardo invece alle modalità operative, non essendo prevista nell'allegato III del Decreto alcuna scheda tecnica specifica per contatori di energia termica, ai sensi del Decreto stesso, per quanto possibile dovrebbe farsi riferimento alle corrispondenti modalità descritte nelle norme tecniche armonizzate (nazionali ed internazionali) o raccomandazione OIML per la verifica (i.e. prima). Nello specifico caso dei contatori di energia termica, l'unico riferimento applicabile a riguardo, come detto, è la norma tecnica armonizzata EN 1434-5, descritta sinteticamente nel paragrafo precedente.

Nella quasi totalità dei casi, nel settore residenziale per le funzioni di sottocontatore per la ripartizione dei consumi sono utilizzati contatori di tipo "compatto". I contatori di tipo "combinato" sono invece talvolta utilizzati quali contatori di subfornitura direttamente nella sottostazione di scambio termico all'interfaccia con l'azienda fornitrice del servizio.

Da un lato, la verifica con Master Meter del tipo clamp-on sembra essere la migliore dal punto di vista della facilità delle operazioni in campo, dal momento che prevede il montaggio dei sensori di flusso e di temperatura direttamente sulla superficie esterna della tubazione senza quindi necessità di smontaggio di parte dell'impianto. D'altra parte, però, la modalità di installazione Clamp-on del Master Meter presenta indubbe criticità metrologiche. Infatti, per la corretta installazione del sensore di flusso si deve disporre di idonei tratti rettilinei a monte e valle della coppia di sensori (fino a 20 e 10 volte il diametro del tubo, rispettivamente) e deve prestarsi particolare attenzione al rischio di presenza di aria o di depositi nella tubazione (vedi Figura 46). Ad esempio, la presenza di un'ostruzione cinque diametri a monte del misuratore di flusso può determinare un impatto tra -0.6% e -7.9% sull'accuratezza [73].

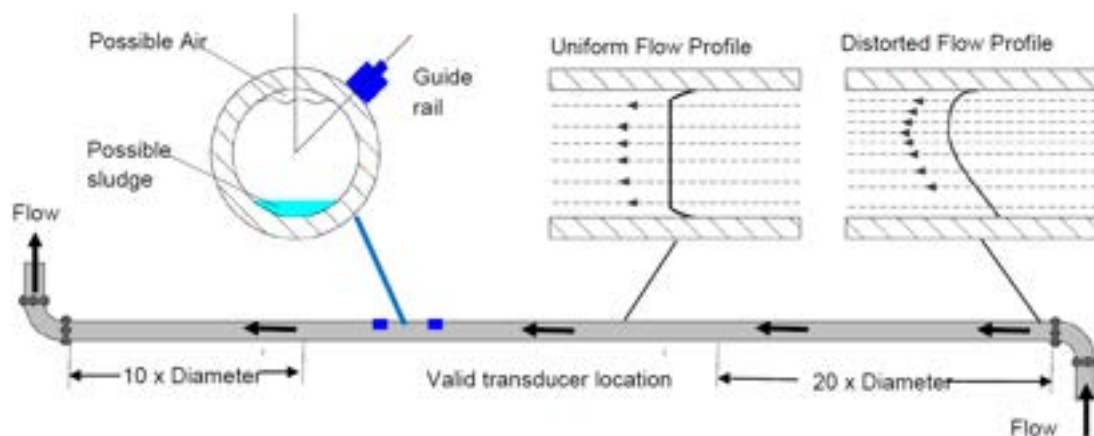


Figura 46 – requisiti di installazione Master Meter clamp-on ad ultrasuoni

Per la verifica della coppia di sensori di temperatura la configurazione normale dei contatori di energia termica prevede l'utilizzo di specifici pozzetti termometrici, sia sulla mandata che sul ritorno (quest'ultimo montato generalmente a bordo del sensore di flusso). L'utilizzo quindi di sistemi diversi in sede di verifica (e.g. sonde di temperatura del tipo clamp-on, bagni termostatici) rischia di introdurre errori ed incertezze difficilmente stimabili e variabili in funzione dei materiali della tubazione, delle condizioni termodinamiche e della velocità del fluido all'interno della condotta.

⁶ Vedi precedente nota 3

⁷ Se invece le incertezze in verifica sono superiori a $1/5$ del MPE la differenza tra l'incertezza stimata e $1/5$ del MPE deve essere sottratta al MPE del contatore in verifica per determinare un nuovo MPE.

3.2.3 La verifica dei sistemi di contabilizzazione diretti mediante Master Meter

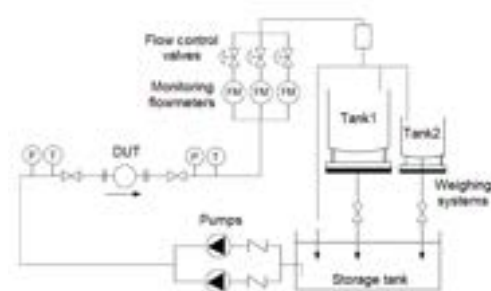
Nell'ambito del presente progetto di ricerca è stata condotta un'indagine sperimentale finalizzata alla caratterizzazione ed analisi sperimentale di un metodo per la verifica in campo dei sistemi di contabilizzazione diretti mediante Master Meter. A tal fine, gli autori hanno sperimentato un metodo di verifica dei contatori di energia termica utilizzando un Master Meter. La sperimentazione è stata effettuata su un contatore di tipo compatto, ma, per semplicità delle operazioni, sono state condotte verifiche separate unicamente sul sensore di flusso e sulla coppia di sensori di temperatura.

Le indagini sperimentali sono state condotte presso il laboratorio LAMI dell'Università di Cassino e del Lazio Meridionale. Gli autori hanno specificatamente progettato e realizzato un layout sperimentale di prova per valutare le prestazioni metrologiche della verifica dei contatori di energia termica nella configurazione di laboratorio (i.e. rispetto al banco gravimetrico per contatori di energia termica del LAMI) e rispetto ad una possibile modalità applicabile in campo (i.e. utilizzo di un Master Meter e Bagno termostatico portatile). La scelta di effettuare la campagna di misure sperimentali in laboratorio è giustificata dalla possibilità di confrontare direttamente i risultati di misura con i corrispondenti metodi primari di riferimento (volume e temperatura) e di valutare di conseguenza se, in linea di principio, sono rispettate le condizioni imposte dal Decreto 93/2017. Si consideri anche che il MiSE, in una recente nota⁸ ha chiarito che *“qualunque sia il motivo della rimozione dal luogo originario di installazione, non sussiste alcun obbligo di reinstallazione dello strumento nello stesso luogo da cui è stato rimosso né l'impossibilità o il divieto di reinstallare lo stesso in un luogo diverso”*.

Il banco per la caratterizzazione dei contatori di energia termica del LAMI opera con principio gravimetrico. I componenti principali del banco sono: i) un serbatoio da 1000 litri con riscaldatori elettrici per ottenere una temperatura di prova del fluido termovettore variabile tra 15 e 90 °C; ii) un sistema di regolazione portata; iii) un tratto rettilineo di prova sufficientemente esteso per l'installazione di un contatore per volta. Il volume di liquido misurato nel misuratore in prova viene quindi confrontato con la massa del liquido convogliato in funzione della portata di prova in due serbatoi di misura (capacità 600 dm³ e 60 dm³) e misurata con 2 bilance di precisione su cui sono installati i serbatoi. Il banco funziona in un intervallo da 0.01 fino a 20.0 m³h⁻¹ e per diametri nominali da DN15 a DN40. La Figura 47 mostra un'immagine e lo schema del banco di prova del LAMI.



a)



b)

Figura 47 – Laboratorio LAMI: a) banco contatori di energia termica, b) schema di funzionamento

⁸ Nota MISE Prot. 0086683 del 23/05/2013. La nota, anche se relativa al decreto 75/2012 (contatori gas e dispositivi di conversione del volume), a parere degli autori, illustra una posizione generale del MiSE, estendibile quindi anche agli altri strumenti oggi regolati dal DM 93/2017.

Il contatore in verifica (DUT) è di tipo compatto con sensore di flusso a turbina e coppia di sensori di temperatura tipo PT 1000 (termoresistenza al Platino). Il contatore è omologato MID in classe di precisione 2 e i dati tecnici principali sono riepilogati in Tabella 18.

Tabella 18 – Caratteristiche tecniche del contatore in verifica

Classe MID di accuratezza	2
Tipo di attacco	DN20 - G 1"
Portata permanente, q_p	$2.5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$
Portata di sovraccarico, q_s	$5.0 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$
Portata minima, q_i	$0.05 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$
Temperatura di misura del fluido, ϑ	5...90 °C
Differenza di temperatura, $\Delta\vartheta$	3...70 °C
Unità di formato (volume)*	0.001 dm^3
Unità di formato (portata)*	$0.01 \text{ dm}^3 \text{ h}^{-1}$
Unità di formato (temperatura)*	0.01 °C
Unità di formato (energia)*	0.001 Wh

* in modalità "Test"

Si noti che in Tabella 18 sono riportati i valori dell'unità di formato dello strumento in verifica nella modalità "TEST". In questa modalità la lettura avviene mediante sonda ottica direttamente collegata al PC. In campo questa modalità è interdetta al fine di impedire fraudolenti accessi al SW del misuratore e, pertanto, il Laboratorio/Organismo che effettua la verifica dovrà necessariamente effettuare le letture con l'unità di formato disponibile sul display (ovvero 10 dm^3 per il volume e 0.1 °C per la coppia di sensori di temperatura, nel caso del misuratore utilizzato nella sperimentazione). Il contatore oggetto di verifica è idoneo per l'esecuzione della prove di verifica prima anche in acqua fredda, di conseguenza, ai sensi del DM 93/2017, anche la verifica successiva potrebbe essere condotta con acqua fredda.

Per la conduzione della verifica gli autori hanno utilizzato un Master Meter con principio di misura ad ultrasuoni a tempo di transito del tipo clamp-on e con coppia di sensori di temperatura tipo PT 1000 (termoresistenza al Platino) a 4 fili. I dati tecnici caratteristici del Master Meter utilizzato per la sperimentazione sono riportati in Tabella 19.

Tabella 19 – Caratteristiche tecniche del Master Meter

Accuratezza dichiarata	$\pm 3 \% \text{ VL}$
Range velocità fluido	$0.1-10 \text{ ms}^{-1}$
Temperatura di misura del fluido, ϑ	0...85 °C
Unità di formato (portata)	$0.1 \text{ dm}^3 \text{ h}^{-1}$
Unità di formato (volume)	0.1 dm^3
Unità di formato (temperatura)	0.1 °C

In Figura 48 è riportata un'immagine del layout sperimentale di verifica.



Figura 48 –Layout sperimentale di verifica dei contatori di energia termica

3.2.4 La verifica in campo dei sistemi di contabilizzazione diretti

Un parametro fondamentale da definire è il volume di prova necessario per la verifica. In generale, quanto maggiore è il volume di fluido erogato durante la verifica, tanto minore sarà l'incertezza della misura; di contro, volumi elevati comportano durate maggiori e possono dare luogo a deriva di alcune grandezze fisiche rilevanti (e.g. la temperatura del fluido). I principi per la definizione del volume di fluido da utilizzare per la verifica non sono purtroppo esplicitamente stabiliti nella normativa di riferimento per i contatori di energia termica, ma a questo scopo ci si può riferire a regole consolidate della metrologia legale per altre tipologie di contatori (e.g. i contatori del gas). I parametri da considerare sono:

- 1) la risoluzione di lettura, in particolare *“la risoluzione di lettura è considerata insufficiente quando il valore in volume, massa o quantità conteggiata corrispondente all'ultima cifra o divisione di un contatore di gas non è almeno un ordine di grandezza inferiore all'incertezza tipo richiesta allo strumento in questione”* [74];
- 2) la portata massima del contatore, ovvero si considerano sempre adeguate le quantità corrispondenti all'erogazione della durata di un minuto alla portata massima [75];
- 3) una durata minima della verifica, ad esempio la UNI 11003 [76] per i criteri di verifica metrologica dei contatori gas prevede 10 minuti per portate inferiori a $2 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ e 5 minuti per portate superiori a $2 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$, in ogni caso il tempo di verifica metrologica dovrà garantire il passaggio di un volume di prova congruo con il numero di decimali rilevati dalla lettura del totalizzatore (i.e. della risoluzione).

A questo riguardo, si consideri che la distribuzione di probabilità associata alla risoluzione dello strumento è di tipo triangolare e che quindi vale $u_R = R/\sqrt{6}$, dove con R è stata indicata la risoluzione e con u_R l'incertezza tipo ad essa associata. Di conseguenza, la quantità minima di prova deve essere maggiore di un numero n di volte la risoluzione dato da $n \geq \sqrt{6}/\text{MPE}\%$ [75].

A titolo di esempio, si consideri la verifica del sensore di flusso. Come noto, la risoluzione in volume dei contatori di energia termica per uso residenziale è spesso limitata (tipicamente 1 o 10 litri). Pertanto, per effettuare in campo la verifica nel rispetto delle condizioni di MPE e di incertezza imposte, è necessario operare con volumi significativi di fluido. Ne consegue che la durata minima della prova è nell'ordine delle ore e ne deriva, di conseguenza, un notevole impegno in termini operativi ed economici per la verifica. In

Figura 49 si riporta l'andamento della durata minima di prova al variare della risoluzione del contatore e della portata di verifica, sia nel caso di MPE uguale a quello della verifica prima che di MPE doppio.

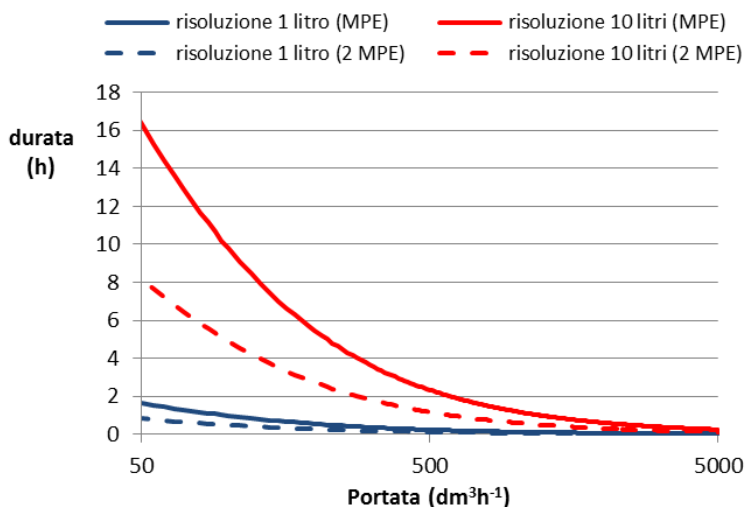


Figura 49 – Durata minima di prova in funzione della risoluzione del misuratore in verifica e della portata

Considerando che l'incertezza tipo di verifica dei misuratori di energia termica deve essere ai sensi del DM 93/2017 inferiore a 1/3 MPE (mentre per la EN 1434 inferiore a 1/5 MPE), per il contatore in verifica (che presenta una unità di formato sul volume pari a 10 litri), alle diverse condizioni di prova e con i diversi criteri sopra descritti, si ottiene la situazione in Tabella 20.

Tabella 20 - Volume minimo di prova

q (dm³h⁻¹)	q_p/q	MPE			2MPE		
		MPE (%)	V_{min} (dm³)	Durata (min)	2 MPE (%)	V_{min} (dm³)	Durata (min)
Risoluzione 1 litro							
2500	1	2.0%	121	3	4.0%	61	1
500	5	2.1%	117	14	4.2%	58	7
50	50	3.0%	82	98	6.0%	41	49
Risoluzione 10 litri							
2500	1	2.0%	1213	29	4.0%	606	15
500	5	2.1%	1166	140	4.2%	583	70
50	50	3.0%	816	980	6.0%	408	490

Considerando che il misuratore in verifica presenta una risoluzione in campo pari 10 dm³ la durata complessiva della verifica sarebbe pari a circa 19 h e 9 min nel caso di MPE pari a quello della verifica prima e circa 9 h e 35 min nel caso di MPE doppio.

3.2.5 Risultati della verifica sperimentale (in laboratorio)

Per i ragionamenti sopra esposti, la verifica del contatore descritto in Tabella 18 dovrebbe essere condotta alle condizioni descritte in Tabella 21.

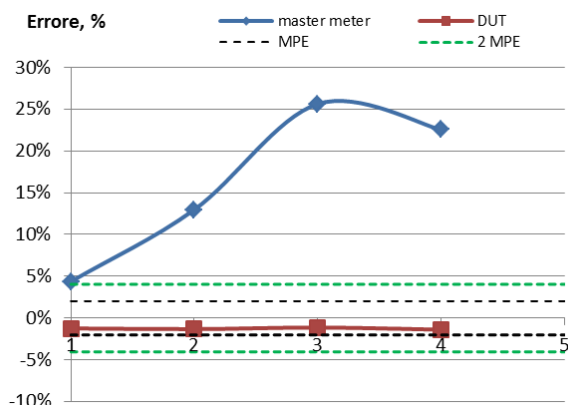
Tabella 21 - Condizioni nominali di verifica

ϑ temp. fluido °C	$\Delta\vartheta$ Diff. di Temp. °C	q Portata dm^3h^{-1}	Flusso		$\Delta\vartheta$		Calcolatore		Totale	
			MPE %	2 MPE %	MPE %	2 MPE %	MPE %	2 MPE %	MPE %	2 MPE %
50	3	2500	2.02	4.04	3.50	7.00	1.50	3.00	7.02	14.04
50	15	250	2.20	4.40	1.10	2.20	0.70	1.40	4.00	8.00
80	65	50	3.00	6.00	0.95	1.90	0.65	1.30	4.60	9.20

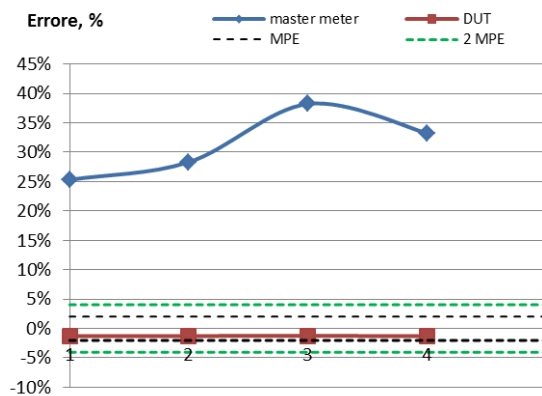
Verifica del sensore di flusso

Durante le operazioni preliminari di verifica, sono state riscontrate alcune criticità operative che hanno determinato forte variabilità delle prestazioni del Master Meter (vedi Figura 50). In particolare:

- alle basse portate di prova (i.e. $q < 0.5 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$) spesso il Master Meter non effettuava la misura;
- il gel di accoppiamento del Master Meter, alla temperatura del fluido ϑ pari a 50°C ha presentato un evidente degrado delle prestazioni, tanto da non garantire un efficace accoppiamento dei sensori sul tubo.



a) $q=250 \text{ dm}^3\text{h}^{-1}$

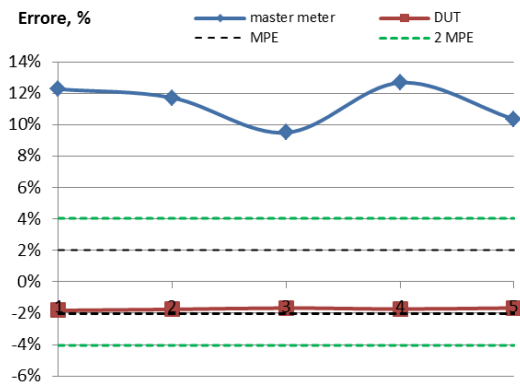


b) $q=2500 \text{ dm}^3\text{h}^{-1}$

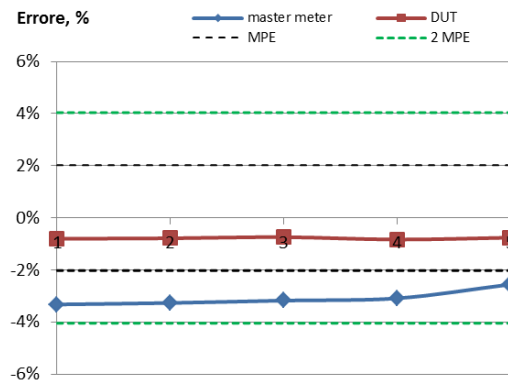
Figura 50 – Risultati prove preliminari a $\vartheta=50^\circ\text{C}$

Si è pertanto reso necessario sostituire il gel con uno resistente alle alte temperature ed effettuare le prove di verifica ad una portata minima pari a $q = 0.5 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$, a causa dell'instabilità del Master Meter alle portate più basse. Di conseguenza, non è stato possibile effettuare le prove alla portata $q = 0.05 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ e le prove sono state effettuate unicamente alle portate $q = 2.50 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ e $q = 0.50 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$, con temperatura dell'acqua $\vartheta = 50^\circ\text{C}$ e $\vartheta = 20^\circ\text{C}$. Per quanto possibile, è stato utilizzato un volume di prova di circa 250 dm^3 .

In Figura 51 e Figura 52 sono riportati i risultati della verifica con acqua ad alta temperatura e a temperatura ambiente e con portata di prova 500 e 2500 dm³h⁻¹, rispettivamente.

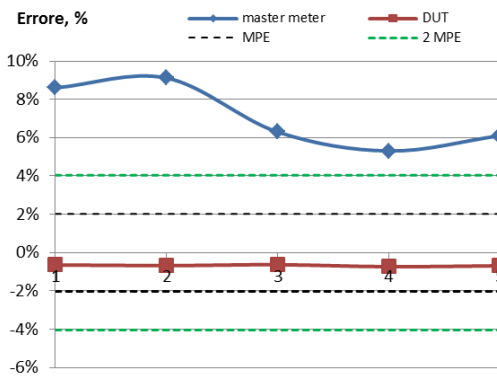


a) q=500 dm³h⁻¹

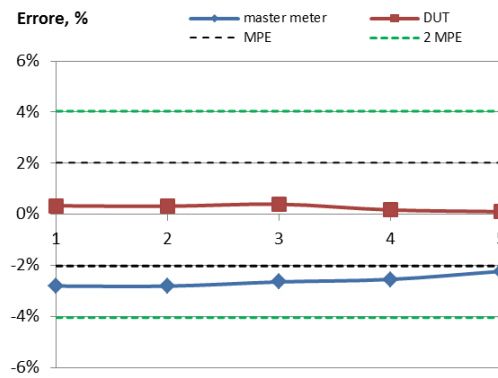


b) q=2500 dm³h⁻¹

Figura 51 – Risultati della verifica a T=50 °C



a) q=500 dm³h⁻¹



b) q=2500 dm³h⁻¹

Figura 52 – Risultati della verifica a T=20 °C

Successivamente, al fine di verificare le prestazioni del Master Meter in condizioni non ottimali di installazione, le prove sono state ripetute con il Master Meter installato immediatamente a valle di un gomito a 90° (vedi Figura 53), ovvero in una situazione impiantistica frequente. I risultati sono riportati in Figura 54.



Figura 53 – Configurazione di prova in presenza di disturbo di flusso (gomito a 90°)

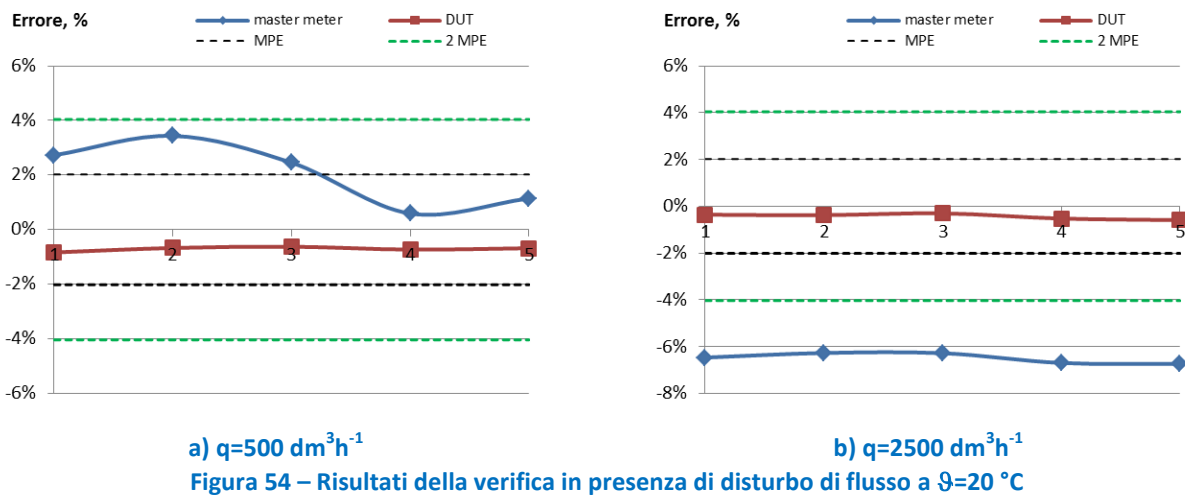


Figura 54 – Risultati della verifica in presenza di disturbo di flusso a $\vartheta=20 \text{ }^\circ\text{C}$

Dai risultati sperimentali ottenuti si può riscontrare quanto segue:

- a) il Master Meter Clamp-on in prova presenta errori molto elevati soprattutto alle basse portate e non consente misure in prossimità della portata minima del contatore in verifica; ciò è determinato dalla impossibilità di lavorare con alte velocità sul diametro normalmente associato al contatore in prova;
- b) il Master Meter clamp-on presenta una buona ripetibilità alle alte portate di prova sia a bassa che ad alta temperatura del fluido, mentre alle basse portate l'errore aumenta all'aumentare della temperatura (da circa +7% a $\vartheta = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ a circa +11% a $\vartheta = 50 \text{ }^\circ\text{C}$);
- c) in presenza di disturbo del flusso (i.e. gomito a 90°) per il Master Meter clamp-on si riscontra:
 - i) una deriva dell'errore medio da circa -3.0% a circa -6.0% a portata elevata;
 - ii) una elevata deriva dell'errore medio da circa +7% a circa -7% a bassa portata.
- d) la calibrazione prima della verifica in campo del Master Meter clamp-on è necessaria ai fini del rispetto dei limiti imposti dal DM 93/2017;

Verifica della coppia di sensori di temperatura

Gli autori hanno infine effettuato la verifica della coppia di sensori di temperatura, alle condizioni nominali di prova, ovvero $\vartheta = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $\vartheta = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ e portata di prova 500 e 2500 dm^3h^{-1} . Per valutare la criticità dell'errore sulla misura della temperatura si consideri che gli strumenti in campo presentano spesso una risoluzione di 0.1 $^{\circ}\text{C}$ e che un errore di 0.1 $^{\circ}\text{C}$ è pari a circa il 3.3% del $\Delta\vartheta_{min}=3\text{ K}$ (molti contatori di energia termica in commercio sono omologati con $\Delta\vartheta_{min}=3\text{ K}$), rispetto alla condizione di MPE=3.5% (errori uguali alla verifica prima) e MPE=7.0% (errori doppi).

A tale scopo, i valori di riferimento sono rappresentati per il ritorno (ϑ_{low}) dalla temperatura di uscita del banco (posta a monte dei serbatoi di pesata) e per la mandata (ϑ_{high}) dalla temperatura indicata da una termoresistenza campione PT100 del LAMI immersa nel bagno termostatico. Le prove sono state effettuate sia con tubazione isolata che con tubazione scoperta, in modo da valutare l'influenza della temperatura ambiente (vedi Figura 55).



a) tubazione isolata



b) sensore di temperatura su tubazione non isolata

Figura 55 – Layout di verifica per la coppia di sensori di temperatura

I risultati della verifica sono riportati in Tabella 22 e Tabella 23, ottenuti nella configurazione di Figura 55, con tubazione isolata.

Tabella 22 – Risultati della verifica della coppia di sensori di temperatura (tubazione isolata)

Portata dm^3h^{-1}	Riferimento, $^{\circ}\text{C}$		Clamp-on, $^{\circ}\text{C}$		DUT, $^{\circ}\text{C}$	
	T high	T Low	T high	T Low	T high	T Low
500	29.60	23.30	29.60	23.50	29.50	23.50
2500	29.60	23.30	29.60	23.50	29.50	23.50
500	74.66	49.80	74.50	50.30	74.76	48.85
2500	74.66	50.00	74.50	50.60	74.76	50.11

Tabella 23 – Esito della verifica della coppia di sensori di temperatura (tubazione isolata)

q Portata dm^3h^{-1}	ϑ Fluido $^{\circ}C$	$\Delta\vartheta$ Riferim. $^{\circ}C$	Clamp-on			DUT			MPE, %	2 MPE, %
			$\Delta\vartheta$	$E, ^{\circ}C$	$E, \%$	$\Delta\vartheta$	$E, ^{\circ}C$	$E, \%$		
500	20	6.30	6.10	-0.20	-3.17%	6.00	-0.30	-4.76%	1.93%	3.86%
2500	20	6.30	6.10	-0.20	-3.17%	6.00	-0.30	-4.76%	1.93%	3.86%
500	50	24.86	24.20	-0.66	-2.65%	25.91	1.05	4.22%	0.86%	1.72%
2500	50	24.66	23.90	-0.76	-3.08%	24.65	-0.01	-0.04%	0.86%	1.73%

Dall'analisi dei risultati si riscontra un esito negativo della verifica sia per il Clamp-on che per il DUT in tutte le condizioni di prova con MPE uguale a quello della verifica prima (ad esclusione del DUT ad alta portata e alta temperatura), mentre si avrebbe un esito positivo per il Clamp-on solo a bassa temperatura (ad entrambe le portate) e per il DUT ad elevata temperatura ed elevata portata nel caso di MPE doppio.

I risultati in Tabella 24 e Tabella 25 sono invece stati ottenuti effettuando le prove con tubazione isolata e non isolata, al fine di valutare l'effetto della temperatura ambiente sull'accuratezza delle sonde. Nel caso di tubazione non isolata, infatti, la misura della temperatura sull'esterno del tubo può essere significativamente differente rispetto a quella misurata direttamente nel fluido (come avviene nel banco di laboratorio) o mediante pozzetto termometrico (come avviene nel DUT), e questa differenza può dipendere dalla portata del fluido all'interno della tubazione.

Tabella 24- Risultati della verifica della coppia di sensori di temperatura (tubazione isolata/NON isolata)

Portata dm^3h^{-1}	Tubazione Isolata ($^{\circ}C$)			Tubazione non isolata ($^{\circ}C$)		
	ϑ_{ref}	ϑ_{clamp}	ϑ_{DUT}	ϑ_{ref}	ϑ_{clamp}	ϑ_{DUT}
q=500	23.30	23.50	23.50	22.80	22.70	22.90
q=2500	23.30	23.50	23.50	22.80	22.70	22.90
q=500	49.80	50.30	49.85	50.20	49.80	50.43
q=2500	50.00	50.60	50.11	50.20	49.80	50.46

Tabella 25– Analisi degli errori di misura tubazione isolata/non isolata

q Portata dm^3h^{-1}	ϑ Fluido $^{\circ}C$	Tubazione isolata ($^{\circ}C$)		Tubazione NON Isolata ($^{\circ}C$)		Deviazione ($^{\circ}C$)	
		E_{Clamp}	E_{DUT}	E_{Clamp}	E_{DUT}	Clamp-on	DUT
q=500	20	0.20	0.20	-0.10	0.10	0.30	0.10
q=2500	20	0.20	0.20	-0.10	0.10	0.30	0.10
q=500	50	0.50	0.05	-0.40	0.23	0.90	-0.18
q=2500	50	0.60	0.11	-0.40	0.26	1.00	-0.15

Dall'analisi dei risultati si può riscontrare che il Clamp-on presenta una deriva di 0.30 $^{\circ}C$, da un errore positivo (tubazione isolata) ad uno negativo (tubazione non isolata) e che a temperatura elevata la deriva è maggiore e mediamente pari a circa 1 $^{\circ}C$. Per il DUT invece a temperatura ambiente si riscontra una deviazione contenuta pari a 0.1 $^{\circ}C$ mentre a temperatura elevata l'effetto riscontrato è opposto e più significativo pari a circa -0.2 $^{\circ}C$. La portata di prova sembra essere un parametro di influenza poco significativo sia per il Clamp-on che per il DUT.

Infine, in Tabella 26 e Tabella 27 sono riportati i risultati della verifica dei sensori di temperatura effettuata smontando tutti i sensori e ponendoli nello stesso bagno termostatico a diverse temperature (quelle indicate dalla EN 1434-5 per la verifica prima sono $\vartheta_1=15^{\circ}C$, $\vartheta_2=50^{\circ}C$ e $\vartheta_3=80^{\circ}C$) insieme ad una termoresistenza tarata PT 100 di riferimento del LAMI.

Tabella 26 – Risultati della verifica dei sensori di temperatura in bagno termostatico

ϑ Bagno °C	ϑ_{rif} Tarata °C	ϑ_{banco} Uscita °C	Clamp-on		CET	
			ϑ_{high} °C	ϑ_{low} °C	ϑ_{high} °C	ϑ_{low} °C
19	18.91	19.00	18.90	19.00	18.90	18.80
23	22.50	22.50	22.40	22.50	22.60	22.60
50	49.55	49.60	49.50	50.40	49.46	49.32
60	59.62	59.70	59.60	60.70	59.53	59.36
75	73.83	74.90	74.60	76.10	74.69	74.54

Tabella 27 – Errore dei sensori di temperatura in bagno termostatico

ϑ Bagno °C	Clamp on		DUT	
	$\vartheta_{high} - \vartheta_{high,rif}$	$\vartheta_{low} - \vartheta_{low,rif}$	$\vartheta_{high} - \vartheta_{high,rif}$	$\vartheta_{low} - \vartheta_{low,rif}$
19	-0.01	0.00	-0.01	-0.20
23	-0.10	0.00	0.10	0.10
50	-0.05	0.80	-0.09	-0.28
60	-0.02	1.00	-0.09	-0.34
75	0.77	1.20	0.86	-0.36

3.2.6 Verifica dei sistemi di contabilizzazione diretti in campo

L’analisi dei risultati delle prove sperimentali condotte in laboratorio consente di simulare una verifica in campo, dal momento che le prove in laboratorio possono essere considerate preliminari alla verifica e finalizzate alla caratterizzazione del Master Meter.

Verifica in campo del sensore di flusso

In campo si dovrà necessariamente utilizzare la risoluzione di lettura standard del contatore in verifica (i.e. 10 dm³) e si potrà utilizzare un valore medio di correzione delle letture del Master Meter tarato in laboratorio (ad esempio con il metodo gravimetrico). Si noti che l’applicazione di una correzione è in teoria non ammessa dal DM 93/2017 che richiede di verificare che il Master Meter sia stato tarato e che i risultati della taratura evidenzino per lo stesso un errore inferiore a 1/3 del MPE ammesso per lo strumento in verifica. Per il contatore (classe 2 MID) alle portate di prova 500 e 2500 dm³h⁻¹ il MPE=2.02%, il limite di errore del Master Meter sarebbe pari a 0.67% sul volume (quindi molto stringente). L’ulteriore condizione di incertezza posta dal DM 93/2017 (in questo caso U<0.23%) è addirittura praticamente impossibile da realizzarsi in campo.

Come noto, inoltre, la taratura in laboratorio del Master Meter (come quella di qualsiasi altro strumento di misura) ha valore unicamente nelle puntuali condizioni di taratura descritte nel certificato. In questo caso, oltre alle condizioni ambientali di riferimento durante la taratura dovranno necessariamente essere considerate anche le caratteristiche della tubazione sulla quale il Master Meter clamp-on ad ultrasuoni viene installato durante la taratura (e.g. finitura, materiale e spessore del tubo).

Purtroppo, in campo, le suddette condizioni sono difficilmente replicabili (e.g. tratti rettilinei a monte e valle non completamente sviluppati, presenza di incrostazioni, ruggine e disomogeneità nelle tubazioni, deposito di calcare e altri residui sul fondo della tubazione con conseguente restringimento della sezione, ecc.) e gli opportuni fattori di correzione sono di difficile definizione.

In Figura 56 si riportano i risultati della taratura del Master Meter, mentre in Figura 59 sono riportati i risultati della verifica simulata in campo, con e senza correzione dell’errore di taratura del Master Meter, da cui si può evincere che l’esito della verifica sarebbe spesso opposto nelle diverse condizioni.

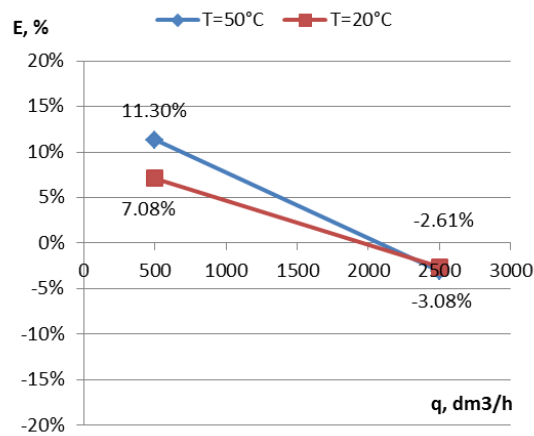
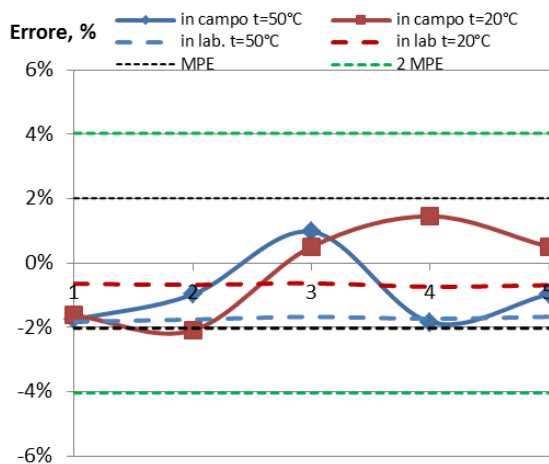
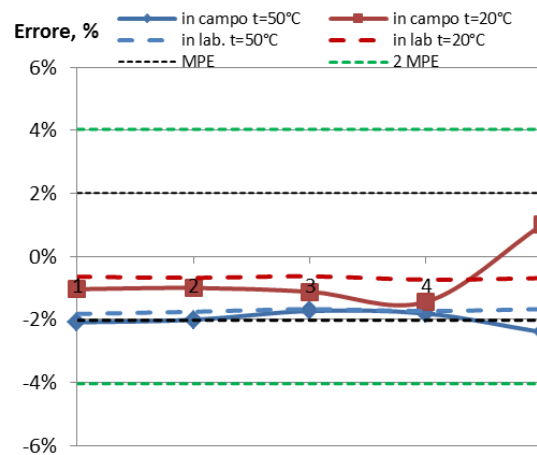


Figura 56 – Risultati della taratura del Master Meter in laboratorio

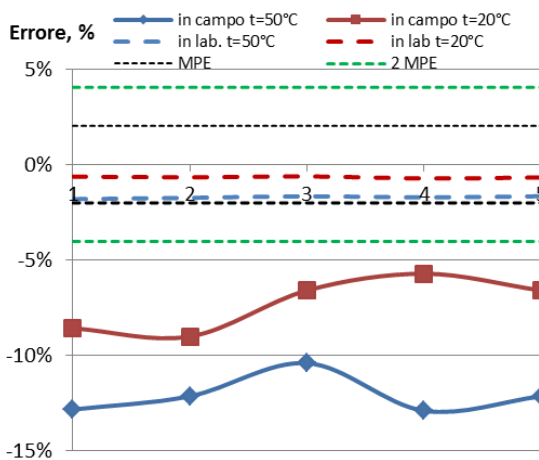


a) $q=500 \text{ dm}^3 \text{ h}^{-1}$

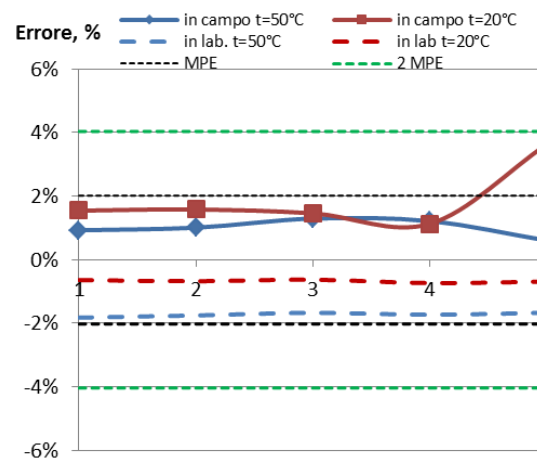


b) $q=2500 \text{ dm}^3 \text{ h}^{-1}$

Figura 57– Risultati della verifica in campo con Master Meter corretto

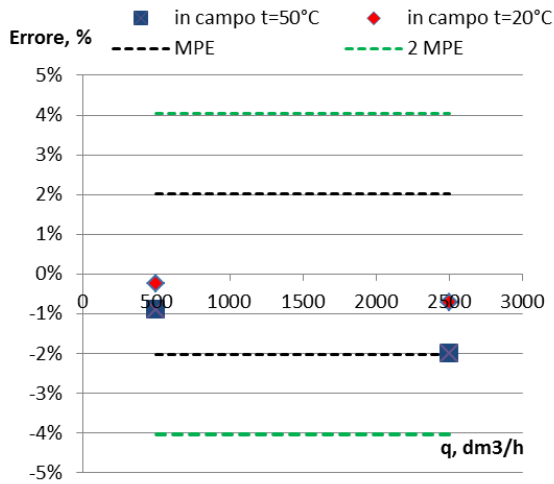


a) $q=500 \text{ dm}^3 \text{ h}^{-1}$

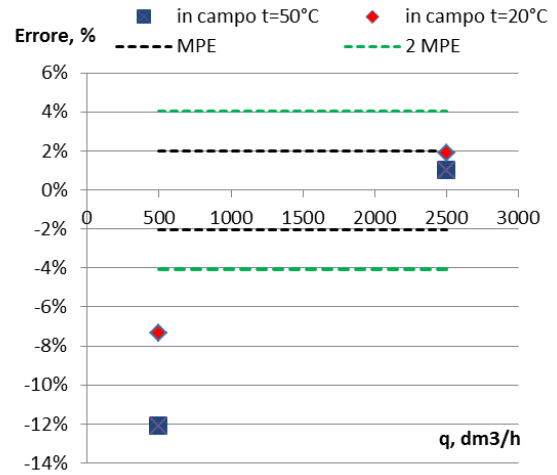


b) $q=2500 \text{ dm}^3 \text{ h}^{-1}$

Figura 58 – Risultati della verifica in campo con Master Meter NON corretto



a) errori corretti



b) errori NON corretti

Figura 59 – Esito della verifica simulata in campo: a), b)

Da una analoga campagna sperimentale realizzata dall'INRIM in collaborazione con il Politecnico di Torino [77] ed effettuata su un misuratore di energia termica condominiale (di tipo elettromagnetico DN 25) installato presso la sottostazione di scambio termico di un condominio allacciato alla rete di teleriscaldamento di Torino. Le prove sono state effettuate in campo (per un confronto con un Master Meter ad ultrasuoni clamp-on) e successivamente ripetute in laboratorio (vedi Figura 60 e Figura 61).

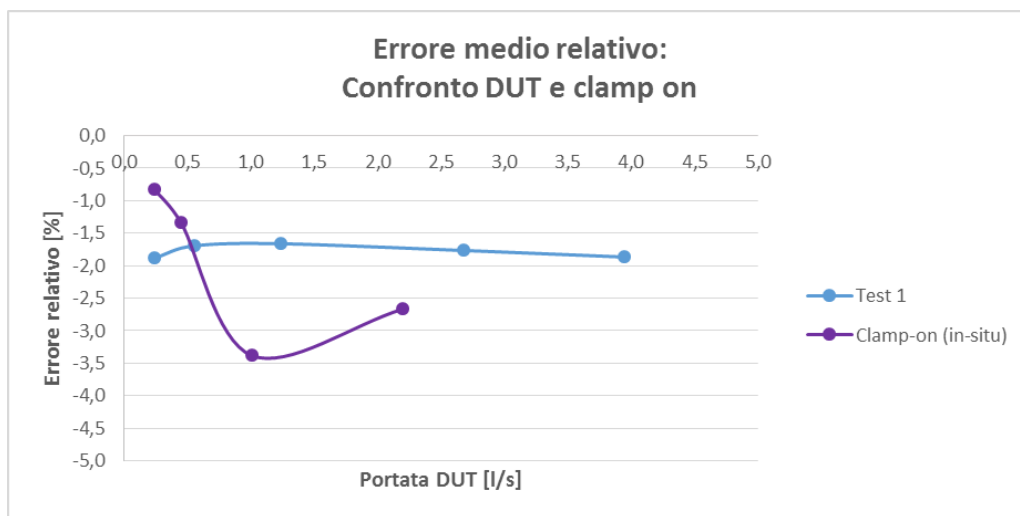


Figura 60 - Risultati sperimentali della verifica del sensore di flusso di un misuratore di energia termica condominiale in laboratorio (curva blu) e in campo mediante Master Meter clamp-on a ultrasuoni (curva viola). Fonte INRIM

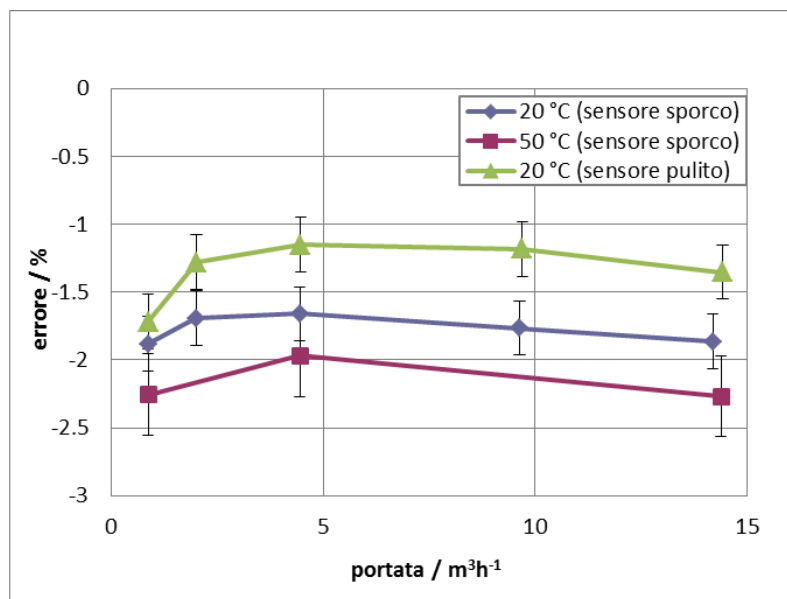


Figura 61 – Risultati sperimentali della verifica di un misuratore di energia termica condominiale in laboratorio (fonte INRIM)

Dall'analisi dei risultati si riscontra quanto segue:

- i risultati in campo risultano compatibili solamente in uno dei quattro punti di verifica, ovvero alla portata di 0.5 dm³/s, mentre alle altre portate le differenze risultano significative;
- a fronte di una risposta sostanzialmente costante del misuratore in laboratorio (errore alle diverse portate variabile tra -1.6% e -1.9% circa) in campo il misuratore presenta una elevata variabilità (tra -0.7% e -3.4%) attribuibile quindi alle condizioni in campo;
- la curva di errore del misuratore verificato in laboratorio mostra una deriva costante (mediamente pari a circa -1%) quando la temperatura del fluido passa da 20 a 50 °C;
- la presenza di sporco e detriti determina un decadimento delle prestazioni (mediamente pari a circa 0.8%).

Verifica in campo della coppia di sensori di temperatura

In Tabella 28 sono riportati i risultati nel caso in cui il Master Meter viene considerato come riferimento in campo per le misure di temperatura. Dall'analisi dei risultati si riscontra che:

- a) a bassa temperatura (e basso $\Delta\theta$) l'esito è positivo sia a bassa che alta portata e con MPE uguale a quello in verifica prima;
- b) ad elevata temperatura (ed elevato $\Delta\theta$) sia a bassa che ad alta portata l'esito è negativo anche con MPE doppio.

Tabella 28 - Esito della verifica in campo della coppia di sensori di temperatura (tubazione isolata e Clamp-on utilizzato come riferimento)

q Portata dm^3h^{-1}	ϑ Fluido $^{\circ}C$	$\Delta\vartheta$ Riferim. $^{\circ}C$	$\Delta\vartheta$ DUT – Clamp-on		MPE, %	2 MPE, %
			$^{\circ}C$	%		
500	20	6.3	0.10	1.64%	1.93%	3.86%
2500	20	6.3	0.10	1.64%	1.93%	3.86%
500	50	24.9	-1.71	-7.07%	0.86%	1.72%
2500	50	24.7	-0.75	-3.14%	0.86%	1.73%

.....

In conclusione, dalle prove effettuate emerge la necessità di prevedere, sia nei nuovi impianti di misura che nel retrofit degli impianti esistenti, idonee configurazioni per la rapida connessione dei Master Meter o dei sistemi di verifica (e.g. sensore di flusso e pozzetti di temperatura) al fine di evitare che i vincoli impiantistici influenzino in maniera significativa l'esito della verifica.

L'utilizzo di Master Meter può notevolmente semplificare le modalità operative della verifica in campo, ma deve essere prestata particolare attenzione alle condizioni di montaggio ed all'applicazione di idonei coefficienti di correzione (i.e. derivanti dagli errori di taratura e dall'analisi puntuale delle effettive condizioni di uso ed installazione, sia del sensore di flusso che della coppia di sensori di temperatura).

Inoltre, dalle evidenze sperimentali, si evince che in alcune condizioni di prova (e.g. basse portate e alta temperatura del fluido) la necessità di rispettare i limiti di incertezza stabiliti non consente di effettuare efficacemente la verifica in campo e, quindi, soprattutto nei contenziosi, è opportuno che le verifiche siano condotte in laboratorio.

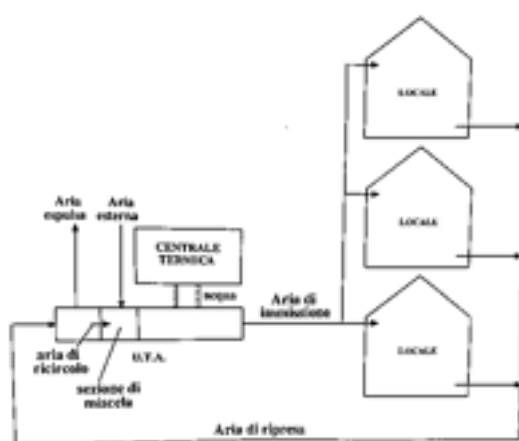
3.3 Analisi tecnica e normativa dei sistemi di contabilizzazione del freddo

La direttiva EED [8] stabilisce l'obbligo di installare contatori individuali per misurare il consumo di energia termica per raffreddamento (oltre che per riscaldamento ed acqua calda sanitaria) per ciascuna unità abitativa (se tecnicamente possibile ed efficiente in termini di costi) nei condomini e negli edifici polifunzionali riforniti da una fonte di riscaldamento/raffreddamento centrale. Quest'obbligo, recepito in Italia nel Dlgs 102/2014 e s.m.i. [27], trova solo in parte riscontro nella normativa tecnica di riferimento UNI 10200:2018 in merito alle modalità di ripartizione, ma risulta ancora carente in merito alle modalità di misura, a causa di: i) le diverse tipologie di impianti di raffreddamento esistenti (e.g. aeraulici, idronici, ad espansione diretta, misti); ii) per la non applicabilità tecnica dei sistemi indiretti di contabilizzazione; iii) la non applicabilità della Direttiva MID [68] sui contatori di energia termica diretti utilizzati per la misura del freddo.

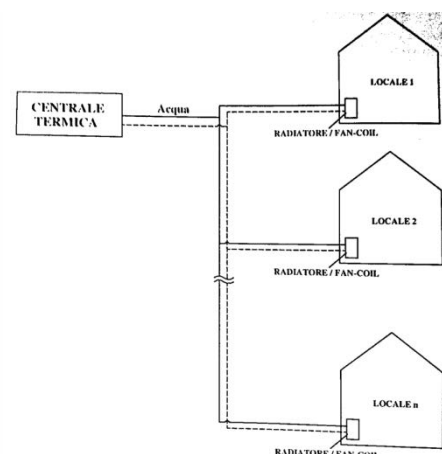
Pertanto, per valutare dal punto di vista della fattibilità tecnica i sistemi disponibili per la contabilizzazione dei consumi di energia per raffrescamento è utile descrivere le principali tipologie di impianti di raffrescamento centralizzati utilizzati negli edifici residenziali e le modalità di contabilizzazione ad esse applicabili. Come sopra descritto, gli impianti di raffrescamento possono essere classificati in base al tipo di fluido termovettore utilizzato (vedi Figura 62):

- a) impianti a tutt'aria (negli ambienti è distribuita aria trattata mediante opportune canalizzazioni e terminali di diffusione)
- b) impianti idronici;
- c) impianti misti aria-acqua, in cui l'aria primaria è quella esterna necessaria per il rinnovo (negli impianti misti viene anche utilizzata per bilanciare il carico latente) mentre l'acqua viene inviata ad unità terminali idrauliche nei locali (e.g. fan coil, pannelli radianti);
- d) impianti ad espansione diretta (i.e. a fluido frigorifero)

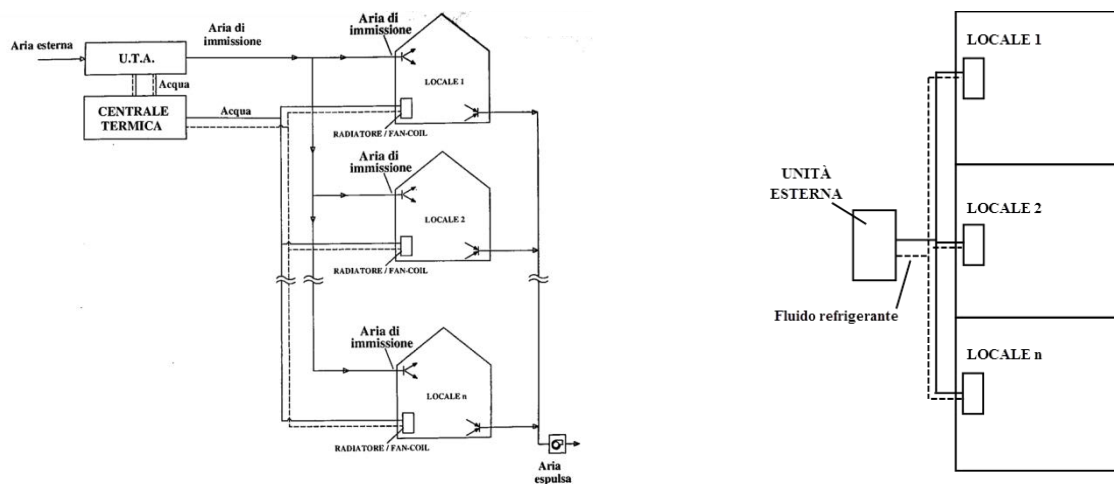
Nelle diverse tipologie di impianto è possibile applicare differenti tipologie di strumenti di misura e sistemi di contabilizzazione, solo in parte normati. In particolare, le possibili soluzioni tecniche per la misura del «freddo» negli impianti di raffrescamento attualmente disponibili sono riportate in Tabella 29.



a) a tutt'aria



b) idronici



c) misti aria-acqua

d) espansione diretta

Figura 62 – Tipologie di impianti termici di raffreddamento [78]

Tabella 29 – Tecniche di misura per la contabilizzazione del freddo

Tipo impianto	Dispositivo di Contabilizzazione	Normativa tecnica
Aeraulici	a) Misuratori di portata ad inserzione (e.g. Griglie di Wilson) unitamente ad una coppia di sonde entalpiche (i.e. di temperatura e umidità relativa) su mandata e ripresa;	ISO 7145:1982* ISO 3966: 2008 UNI EN 12599:2012
Idronici	b) misura diretta con CET;	UNI EN 1434:2016
	c) misura indiretta con totalizzatori dei tempi di inserzione (utilizzabile solo su fan coil a velocità costante);	UNI 11388:2015 UNI 9019:2013
Misti aria-acqua	d) tecnica mista (misuratori CET/misuratori di portata ad inserzione)	vedi sopra
Espansione diretta	e) Contatori volumetrici (combinati con misura di pressione).	n.d.

* norma ritirata

Dal punto di vista normativo, la direttiva MID, nel definire il campo di applicazione dei contatori di energia termica, specifica che la differenza di temperatura $\Delta\vartheta$ del fluido termovettore tra ingresso ed uscita dall'impianto ($\vartheta_{in} - \vartheta_{out}$) sia maggiore o uguale a 0. Questo di fatto esclude l'applicabilità della Direttiva MID ai contatori di energia termica per la misura del freddo. La MID, tuttavia, non esclude la possibilità che lo stesso contatore per la misura del "calore" possa avere la funzionalità aggiuntiva di misura del "freddo", che sarebbe così coperta solo dalla normativa tecnica EN 1434, che copre sia la funzione "freddo" che "caldo", e dalla normativa nazionale eventualmente in vigore negli Stati Membri. Di conseguenza, anche le normative nazionali di verifica successiva non coprono la suddetta funzionalità.

La problematica a livello europeo è ben nota come evidenziato dal WELMEC [79], tuttavia, il recente recast della MID ha confermato il suddetto approccio, di fatto modificando unicamente la denominazione della categoria di strumento da "heat meter" a "thermal energy meter" e lasciando inalterati i requisiti specifici. In commercio, tuttavia, per superare questo problema, i fabbricanti hanno consolidato la prassi di omologare i cosiddetti contatori "ibridi" (caldo/freddo), che presentano la funzionalità aggiuntiva per la misura del "freddo", utilizzando sostanzialmente lo stesso hardware dei contatori di calore, con la principale differenza nel modulo di calcolo e nel software ad esso connesso.

4 Conclusioni

Nel presente lavoro, sono stati affrontati due principali aspetti quali l'ottimizzazione dei metodi di ripartizione e dei risparmi attesi dalla contabilizzazione del calore ed il miglioramento delle prestazioni metrologiche dei sistemi di misura dell'energia termica negli edifici intelligenti.

Per quanto concerne il primo obiettivo, sono stati analizzati i criteri di ripartizione dei costi energetici applicati nei paesi dell'UE con particolare riferimento allo studio di "fattori correttivi" per tener conto delle esposizioni svantaggiate e dei "furti di calore" ed è stata effettuata un'analisi puntuale della propensione al risparmio nelle diverse condizioni di utilizzo dei sistemi di ripartizione e dei risparmi energetici conseguibili in due edifici caso di studio di edilizia popolare in provincia di Frosinone.

I risultati della ricerca hanno mostrato che, negli edifici di edilizia popolare, spesso termicamente inefficienti e in uso ad utenti socialmente ed economicamente "vulnerabili", gli attuali metodi di ripartizione sono poco efficaci in termini di risparmi attesi e potenziali e per la promozione di interventi di efficientamento. In particolare, i metodi basati sul principio di proporzionalità fisso (i.e. per millesimi di superficie o di potenza installata) non promuovono il comportamento virtuoso degli utenti poiché non incoraggiano l'uso razionale dell'energia né l'adozione di interventi di riqualificazione energetica nell'edificio. D'altro canto, i metodi basati sul principio di responsabilità (i.e. in base ai consumi individuali) penalizzano eccessivamente gli appartamenti svantaggiati a causa delle scarse prestazioni energetiche (infatti, a parità di superficie la ripartizione basata solo sui consumi individuali può portare a quote molto diverse, fino al doppio). Gli autori, nell'ambito del presente lavoro, hanno sviluppato e sperimentato un metodo di ripartizione basato sulla stima degli extra-consumi legati all'inefficienza energetica. Negli edifici di edilizia popolare casi di studio il metodo proposto ha mostrato di essere particolarmente efficace, dal momento che tra quelli analizzati presenta una minore differenza dei costi energetici tra i diversi appartamenti. Pertanto, il metodo degli extra-consumi è stato proposto come metodo standard all'UNI-CTI e all'Autorità Nazionale (MISE) e può rappresentare un efficace impulso per migliorare le prestazioni energetiche degli edifici attraverso l'adozione di interventi di retrofit energetico.

Per quanto concerne, invece, l'analisi della propensione al risparmio, gli autori hanno condotto un'analisi su due edifici di edilizia popolare in cui erano stati precedentemente installati sistemi di contabilizzazione indiretti. I risultati dell'analisi hanno evidenziato che la maggioranza (64% circa) degli utenti utilizza frequentemente il cronotermostato e le valvole termostatiche per regolare la temperatura dell'appartamento, mentre il 71% degli utenti non percepisce se l'utilizzo di tali sistemi sia utile ai fini del risparmio energetico. Inoltre, l'analisi puntuale degli indici di consumo globale (dei due edifici) parziali (degli appartamenti) e locali (degli ambienti) ha consentito di individuare le criticità energetiche di ciascun locale, appartamento ed edificio. Su tale base è stata progettata una campagna di informazione specifica per gli utenti finalizzata ad aumentarne la consapevolezza e la familiarità con il sistema di regolazione e contabilizzazione che verrà attuata prima dell'inizio della stagione di riscaldamento 2018/19.

Per il secondo obiettivo, è stato effettuato uno studio per il miglioramento delle prestazioni metrologiche dei sistemi di contabilizzazione e ripartizione del calore attraverso l'ottimizzazione del metodo dimensionale per la stima della potenza termica dei corpi scaldanti e attraverso la definizione di configurazioni innovative per i sistemi di contabilizzazione indiretti. È stata inoltre effettuata un'analisi sperimentale per lo studio delle modalità di taratura e verifica in campo dei sistemi di contabilizzazione e ripartizione del calore.

In particolare, gli autori hanno proposto due metodi di calcolo, uno correttivo e l'altro alternativo al metodo dimensionale. Il primo metodo tiene conto esclusivamente della diversa emissività dei corpi scaldanti e dell'influenza dell'altezza e della profondità dei corpi scaldanti sul coefficiente C di scambio termico. Il secondo metodo invece si basa invece sulle correlazioni sperimentali dei coefficienti convettivi disponibili in letteratura e sugli effettivi fattori di vista tra il corpo scaldante e le pareti circostanti. Rispetto al metodo dimensionale attualmente riconosciuto, i due metodi proposti sembrano presentare un migliore

accordo con la potenza misurata sperimentalmente mediante la norma EN 442, ma dovranno essere validati con un numero consistente di casi per poter essere proposti in alternativa al metodo dimensionale stesso. Sempre al fine di migliorare l'accuratezza dei sistemi di contabilizzazione indiretta, gli autori hanno ideato una configurazione innovativa dell'impianto di misura definita "ibrida", ovvero con l'installazione di misuratori diretti alla base di ciascuna colonna verticale di mandata e ritorno. Per poter stimare l'efficacia della soluzione proposta è stata progettata in collaborazione con INRIM di Torino una specifica campagna sperimentale di misura, attualmente in corso di esecuzione.

Per quanto riguarda, infine, la verifica periodica dei misuratori di energia termica ai sensi del DM 93/2017, gli autori hanno analizzato i numerosi aspetti procedurali critici, sia in campo che in laboratorio, da considerare al fine di rispettare i requisiti di errore ed incertezza imposti e di tutelare la fede pubblica, garantendo al contempo l'economicità della verifica. In particolare, l'utilizzo in campo di Master Meter presenta numerose criticità metrologiche e non può prescindere dalla conoscenza puntuale delle effettive condizioni di installazione e di servizio del misuratore in verifica (e.g. presenza di tratti rettilinei, materiale e spessore della tubazione, presenza di depositi nella tubazione e di particelle sospese nel fluido, temperatura e portate di prova). Inoltre, la mancata correzione in campo degli errori di taratura (che sono validi nelle condizioni di laboratorio) del Master Meter può portare ad esiti contrastanti. Dalle prove effettuate emerge la necessità di prevedere, sia nei nuovi impianti di misura che nel retrofit degli impianti esistenti, idonee configurazioni per la rapida connessione dei sistemi di verifica (e.g. sensore di flusso e pozzetti di temperatura) al fine di evitare che i vincoli impiantistici ne influenzino in maniera significativa l'esito. Dalle evidenze sperimentali, si riscontra che in alcune condizioni di prova (e.g. basse portate e alta temperatura del fluido) la necessità di rispettare i limiti di errore ed incertezza stabiliti non consente di effettuare efficacemente la verifica in campo e, quindi, soprattutto nei contenziosi, è opportuno che le verifiche siano condotte in laboratorio. Infine, per rispettare i requisiti di incertezza stabiliti dalla normativa applicabile è necessario effettuare le prove con elevate quantità di fluido, in funzione della unità di formato del misuratore in verifica. Questo comporta una durata elevata della verifica con conseguenti elevati costi.

Gli autori ritengono che i risultati raggiunti e descritti puntualmente nel presente rapporto di ricerca potranno essere utili al fine di:

- f) definire modalità di ripartizione delle spese di riscaldamento che presentino carattere di equità sociale superando il problema degli appartamenti svantaggiati e che, al contempo, possano rappresentare un reale impulso per l'adozione di interventi di retrofit energetico;
- g) individuare gli strumenti adeguati per informare in maniera efficace gli utenti residenziali sull'uso puntuale della risorsa energetica al fine di stimolarne l'uso razionale e, quindi, di incentivare comportamenti virtuosi finalizzati al risparmio energetico;
- h) individuare nuovi e più efficaci modelli per il miglioramento delle prestazioni dei sistemi di contabilizzazione;
- i) definire le modalità operative per la conduzione delle verifiche periodiche in campo dei sistemi di contabilizzazione diretta;
- j) definire le tecniche e la strumentazione per la contabilizzazione del freddo.

In particolare, si ritiene i risultati descritti nel presente rapporto possono essere utilizzati come analisi pre-normativa da proseguire in collaborazione con ENEA, UNI-CTI e MISE, oltre che con INRIM, per lo sviluppo/aggiornamento della normativa tecnica del settore.

5 Abbreviazioni ed acronimi

AEEGSI	Autorità per l'Energia Elettrica, il Gas ed il Sistema Idrico
D.Lgs.	Decreto legislativo
D.P.R.	Decreto del Presidente della Repubblica
DICEM	Dipartimento di Ingegneria Civile e Meccanica dell'Università di Cassino e del Lazio Meridionale
DM	Decreto Ministeriale
DUT	Device under test (contatore sottoposto a verifica)
EED	Direttiva Europea sull'efficienza energetica
HCA	Ripartitore di calore
HM	Contatore di energia termica
ITC-TC	Sistema di contabilizzazione del calore basato sui tempi di inserzione compensati con la temperatura media del fluido termovettore
f_x	fattore di utilizzazione degli apporti gratuiti;
H_T	coefficiente globale di scambio termico per trasmissione , W/K
H_V	coefficiente globale di scambio termico per ventilazione , W/K
Q_{int}	apporto gratuito interno dell'edificio, kWh
Q_{sol}	apporto solare termico attraverso l'edificio, kWh
S_{floor}	superficie utile, m ²
η_{glob}	rendimento globale del sistema di riscaldamento
$EP_{H,nd}$	Fabbisogno di energia primaria per riscaldamento, kWh/m ²
GG	Gradi Giorno, °C
$GG_{eff.}$	Gradi Giorno effettivi, °C
$GG_{norm.}$	Gradi Giorno da normativa, °C
IR_{gl}	Indice di risparmio globale (edificio), %
IR_l	Indice di risparmio locale (singolo ambiente), %
IR_p	Indice di risparmio parziale (appartamento), %
$Q_{P,H}$	Energia primaria per riscaldamento, kWh
$(Q_{P,H})_{OR}$	Energia primaria in condizioni di operational rating, kWh
$(Q_{P,H})_{TR}$	Energia primaria in condizioni di tailored rating, kWh
FR	fattore medio di riduzione dei consumi, %
S	Superficie, m ²

6 Bibliografia

- [1] M. Dell'Isola, G. Ficco, L. Canale, A. Frattolillo, I. Bertini, A new heat cost allocation method for social housing, *Energy and Buildings*, 172 (2018) 67-77.
- [2] G. Ficco, F. Iannetta, E. Ianniello, F.R.D. Alfano, M. Dell'Isola, U-value in situ measurement for energy diagnosis of existing buildings, *Energy and Buildings*, 104 (2015) 108-121.
- [3] G. Ficco, Metrological performance of diaphragm gas meters in distribution networks, *Flow Meas Instrum*, 37 (2014) 65-72.
- [4] L. Celenza, M. Dell'Isola, G. Ficco, B.I. Palella, G. Riccio, Heat accounting in historical buildings, *Energy and Buildings*, 95 (2015) 47-56.
- [5] Norma Tecnica UNI 11388:2015. Sistemi di contabilizzazione indiretta del calore basati sui tempi di inserzione dei corpi scaldanti compensati dalla temperatura media del fluido termovettore (In Italian).
- [6] Ente Nazionale Italiano di Unificazione, UNI EN 834:2013. Ripartitori dei costi di riscaldamento per la determinazione del consumo dei radiatori - Apparecchiature ad alimentazione elettrica., in, 2013.
- [7] European Commission, Review of available information accompanying the document Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions on an EU Strategy for Heating and Cooling., in, 2016.
- [8] European Commission, Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012 on energy efficiency, amending Directives 2009/125/EC and 2010/30/EU and repealing Directives 2004/8/EC and 2006/32/EC Text with EEA relevance, in, 2012.
- [9] L. Celenza, M. Dell'Isola, G. Ficco, M. Greco, M. Grimaldi, Economic and technical feasibility of metering and sub-metering systems for heat accounting, *International Journal of Energy Economics and Policy*, 6(3), (2016) 581-587.
- [10] L. Castellazzi, Analysis of Member States' rules for allocating heating, cooling and hot water costs in multiapartment/ purpose buildings supplied from collective systems, in, 2017.
- [11] L. Canale, M. Dell'Isola, G. Ficco, B. Di Pietra, A. Frattolillo, Estimating the impact of heat accounting on Italian residential energy consumption in different scenarios, *Energy and Buildings*, 168 (2018) 385-398.
- [12] EEA, Achieving Energy Efficiency Through Behaviour Change: What Does it Take?. in, 2013.
- [13] European Commission, Commission staff working document Guidance note on Directive 2012/27/EU on energy efficiency, amending Directives 2009/125/EC and 2010/30/EC, and repealing Directives 2004/8/EC and 2006/32/EC., in, 2013.
- [14] G. Ficco, L. Celenza, M. Dell'Isola, P. Vigo, Experimental comparison of residential heat accounting systems at critical conditions, *Energy and Buildings*, 130 (2016) 477-487.
- [15] F. Saba, V. Fernicola, M.C. Masoero, S. Abramo, Experimental Analysis of a Heat Cost Allocation Method for Apartment Buildings, *Buildings*, 7 (1) (2017).
- [16] M. Dell'Isola, G. Ficco, F. Arpino, G. Cortellessa, L. Canale, A novel model for the evaluation of heat accounting systems reliability in residential buildings, *Energy and Buildings* 150 (2017) 281-293.
- [17] C. Hiller, Influence of residents on energy use in 57 Swedish houses measured during four winter days, *Energy and Buildings*, 54 (2012) 376-385.
- [18] M. Paulsen, L. Gullev, The installation of meters leads to permanent changes in consumer behaviour, in, *News from DBDH* 3/2006, 2006.
- [19] S. Darby, The Effectiveness of Feedback on Energy Consumption (available at: <http://www.eci.ox.ac.uk/research/energy/downloads/smart-metering-report.pdf>, last accessed 2018-01-15), *Environmental Change Institute, University of Oxford*, (2006) 1-24.
- [20] S. Siggelsten, Reallocation of heating costs due to heat transfer between adjacent apartments., *Energy and Buildings*, 75 (2014) 256-263.
- [21] P. Michnikowski, Allocation of heating costs with consideration to energy transfer from adjacent apartments, *Energy and Buildings*, 139 (2017) 224-231.
- [22] P. Darvariu, New method and instrument for heat metering and billing, *OIML Bulletin*, XLV (2004).
- [23] L.B. Liu, L. Fu, Y. Jiang, S. Guo, Major issues and solutions in the heat-metering reform in China, *Renew Sust Energy Rev*, 15 (1) (2011) 673-680.

- [24] S. Bird, D. Hernandez, Policy options for the split incentive: Increasing energy efficiency for low-income renters, *Energy Policy*, 48 (2012) 506-514.
- [25] P. Morgenstern, R. Lowe, L.F. Chiu, Heat metering: socio-technical challenges in district-heated social housing, *Build Res Inf*, 43 (2) (2015) 197-209.
- [26] Empirica GmbH, Guidelines on good practice in cost-effective cost allocation and billing of individual consumption of heating, cooling and domestic hot water in multi-apartment and multi-purpose buildings, in, 2016.
- [27] Repubblica Italiana, Decreto Legislativo 4 luglio 2014, n. 102 in, *Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana*, 2014.
- [28] Ente Nazionale Italiano di Unificazione, UNI 10200 "Impianti termici centralizzati di climatizzazione invernale ed acqua calda sanitaria – Criteri di ripartizione delle spese di climatizzazione ed acqua calda sanitaria". (in Italian), (2018).
- [29] J.J. Gelezenis, D. Harris, D. Diakoulaki, H. Lampropoulou, G. Giannakidis, Determination of fixed expenses in central heating costs allocation An arising issue of dispute, *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 26 (6) (2015).
- [30] G. Nikos Gkonis, Allocation rules for thermal energy costs in multi-apartment and multi-purpose buildings, in, 2017.
- [31] Swiss Federal Office of Energy (SFOE), Modello di calcolo per il conteggio individuale delle spese di riscaldamento e di acqua calda CISR (in Italian), in, Basilea AG, 2004.
- [32] A. Mattarelli, S. Piva, Sulla redistribuzione compensata delle spese di riscaldamento in condomini. (In Italian).
- [33] F. Arpino, G. Cortellessa, M. Dell'Isola, G. Ficco, R. Marchesi, C. Tarini, Influence of installation conditions on heating bodies thermal output: preliminary experimental results, *Energy Proced*, 101 (2016) 74-80.
- [34] A. Gafsi, G. Lefebvre, Stolen heating or cooling energy evaluation in collective buildings using model inversion techniques, *Energy and Buildings*, 35 (3) (2003) 293-303.
- [35] G. Andersson, Kv Jankowitz–Individuell värmemätning och inverkan avvärmeövergång mellan lägenheter, , in, Bengt Dahlgren AB, Göteborg, (In Swedish). 2001.
- [36] Ente Nazionale Italiano di Unificazione, UNI 11300-1 Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale (in Italian), in, Milano, 2014.
- [37] F.R.D. Alfano, M. Dell'Isola, G. Ficco, F. Tassini, Experimental analysis of air tightness in Mediterranean buildings using the fan pressurization method, *Building and Environment*, 53 (2012) 16-25.
- [38] S. Håkon, W. Hege, A Multi-Method Evaluation of the Potential for Using the Electricity Bill to Encourage Energy Savings in Norwegian Households, *Energy and Environment Research Vol. 3, No. 1* (2013).
- [39] Robert C.Sonderegger, Movers and stayers: The resident's contribution to variation across houses in energy consumption for space heating, *Energy and Buildings*, 1 (3) (1978) 313-324.
- [40] A.L. Linden, A. Carlsson-Kanyama, B. Eriksson, Efficient and inefficient aspects of residential energy behaviour: What are the policy instruments for change?, *Energy Policy*, 34 (14) (2006) 1918-1927.
- [41] L. Pedersen, The dynamics of green consumption: a matter of visibility? , *Journal of Environmental Policy and Planning*, 2(3) (2000) 193-210.
- [42] M.B. Schiffer, The Impact of Electricity: Development, Desires and Dilemmas, *Am Anthropol*, 111 (4) (2009) 546-547.
- [43] W. Abrahamse, L. Steg, C. Vlek, T. Rothengatter, A review of intervention studies aimed at household energy conservation, *J Environ Psychol*, 25 (3) (2005) 273-291.
- [44] G. Guerassimoff, J. Thomas, Enhancing energy efficiency and technical and marketing tools to change people's habits in the long-term, *Energy and Buildings*, 104 (2015) 14-24.
- [45] G. Brandon, A. Lewis, Reducing household energy consumption: A qualitative and quantitative field study, *J Environ Psychol*, 19 (1) (1999) 75-85.
- [46] 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 Saving Trust, (2009).

- [47] V.L. Chen, M.A. Delmas, W.J. Kaiser, Real-time, appliance-level electricity use feedback system: How to engage users?, *Energy and Buildings*, 70 (2014) 455-462.
- [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.
- [49] AECOM Limited, Energy Demand Research Project: Final Analysis, Retrieved from <https://www.ofgem.gov.uk/ofgem-publications/59105/energy-demand-research-project-final-analysis.pdf>, (2011).
- [50] C. Fischer, Feedback on household electricity consumption: a tool for saving energy?, *Energy Effic*, 1 (1) (2008) 79-104.
- [51] K. Ehrhardt-Martinez, K.A. Donnelly, J.A.S. Laitner, Advanced Metering Initiatives and Residential Feedback Programs: A Meta-review for Household Electricity-Saving Opportunities, American Council for an Energy-Efficient Economy, Washington DC, (2010).
- [52] S. Firth, K. Lomas, A. Wright, R. Wall, Identifying trends in the use of domestic appliances from household electricity consumption measurements, *Energy and Buildings*, 40 (5) (2008) 926-936.
- [53] M.A. Delmas, M. Fischlein, O.I. Asensio, Information strategies and energy conservation behavior: A meta-analysis of experimental studies from 1975 to 2012, *Energy Policy*, 61 (2013) 729-739.
- [54] A. Nilsson, M. Wester, D.a.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 and Buildings*, 179 (2018) 15-25.
- [55] C. Wilson, H. Dowlatabadi, Models of decision making and residential energy use, *Annu Rev Env Resour*, 32 (2007) 169-203.
- [56] K. Buchanan, R. Russo, B. Anderson, The question of energy reduction: The problem(s) with feedback, *Energy Policy*, 77 (2015) 89-96.
- [57] The return of experience report ANNEX I Final conclusions and recommendations Work package: D 6.4.3 - Intelligent energy management systems. December 2014.
- [58] A. Podgornik, B. Sucic, B. Blazic, Effects of customized consumption feedback on energy efficient behaviour in low-income households, *J Clean Prod*, 130 (2016) 25-34.
- [59] B. Christine, V.J. Rory, P. Sabine, F. Alba, Do psychological factors relate to energy saving behaviours in inefficient and damp homes? A study among English social housing residents, *Energy Research & Social Science* 47 (2019) 146-155.
- [60] M. Dell'Isola, G. Ficco, L. Canale, G. Cortellessa, A. Massimo, P. Vigo, Analisi dei benefici energetici ottenibili attraverso l'utilizzo dei sistemi di contabilizzazione e ripartizione del calore sul territorio nazionale, in: *Ricerca di Sistema Elettrico*, 2017.
- [61] Ente Italiano di Normazione (UNI), UNI EN 442-1: Radiators and convectors - Part 1: Technical specification and requirements, in, 2004.
- [62] Ente Italiano di Normazione (UNI), UNI EN 442-2: Radiators and convectors - Part 2: Test methods and rating., (2004).
- [63] S. Peach, Radiators and other convectors, *J. Inst. Heating Ventil. Eng.*, 39 (2) (1972) 239-253.
- [64] S.W. Churchill, H.H.S. Chu, Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a vertical plate, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 18 (11) (November 1975) 1323-1329.
- [65] S.W. Churchill, R. Usagi, A general expression for the correlation of rates of transfer and other phenomena *AIChE Journal*, (18) (1972) 1121-1128.
- [66] W.Elenbaas, Heat Dissipation of Parallel Plates by Free Convection, *Physica*, 9 (1) (January 1942) 1-28.
- [67] F. Saba, Development of a standard for thermal energy and smart heat metering applications, Doctoral School in Energetics, Politecnico di Torino.
- [68] European Commission, DIRETTIVA 2014/32/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO del 26 febbraio 2014 concernente l'armonizzazione delle legislazioni degli Stati membri relative alla messa a disposizione sul mercato di strumenti di misura (rifusione), (2014).
- [69] Repubblica Italiana, DECRETO 21 aprile 2017 , n. 93 .
Regolamento recante la disciplina attuativa della normativa sui controlli degli strumenti di misura in servizio e sulla vigilanza sugli strumenti di misura conformi alla normativa nazionale e europea., (2017).

- [70] Ente Italiano di Normazione (UNI), UNI EN 1434-1:2016 Contatori di calore - Parte 1: Requisiti generali, 2016.
- [71] International Organisation of Legal Metrology, OIML R75-1:2002 Heat meters. Part 1: General requirements, in, 2002.
- [72] Ente Italiano di Normazione (UNI), UNI EN 1434-5:2016 Contatori di calore - Parte 5 : Prove per la verifica prima, (2016).
- [73] D. Butler, A. Abela, C. Martin, Heat meter accuracy testing, in, Department for Business, Energy and Industrial Strategy, 2016.
- [74] Ente Italiano di Normazione (UNI), UNI 11363:2010 Riferibilità metrologica delle misure di quantità e di portata dei gas combustibili, (2010).
- [75] International Organisation of Legal Metrology, OIML R140:2007 Measuring systems for gaseous fuels, (2007).
- [76] Ente Italiano di Normazione (UNI), UNI 11003:2017 Contatori gas con pressione di misura non maggiore di 0.07 bar. Criteri di verifica, (2017).
- [77] V. La Terra, Contabilizzazione del calore: ricerca della deriva dell'errore di misura mediante analisi statistiche., Tesi di Laurea Magistrale PoliTO (2018).
- [78] L. Bellia, P.Mazzei, F.Minichiello, D.Palma, Aria Umida Climatizzazione ed Involucro Edilizio, 2006.
- [79] Welmec, Ares(2014)2787989 - 26/08/2014 "Background document 2 List of changes to MID suggested by WELMEC (Member States and some stakeholders)".