



# Analisi e caratterizzazione metrologica dei sistemi di misura delle reti termiche distribuite

M. Dell'Isola, P. Vigo, G.Ficco, L.Celenza



## ANALISI E CARATTERIZZAZIONE METROLOGICA DEI SISTEMI DI MISURA DELLE RETI TERMICHE DISTRIBUITE

M. Dell'Isola, P. Vigo, G. Ficco, L. Celenza

Settembre 2015

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

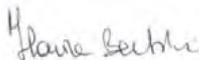
Piano Annuale di Realizzazione 2014

Area: Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica

Progetto: Risparmio di energia elettrica nei settori: civile, industria e servizi

Obiettivo: Reti di poligenrazione

Responsabile del Progetto: Ing. Ilaria Bertini, ENEA



Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione nell'ambito dell' "Analisi e caratterizzazione metrologica dei sistemi di misura delle reti termiche distribuite" (rif. Progetto C.1 " Risparmio di energia elettrica nei settori: civile, industria e servizi")

Responsabile scientifico ENEA: Ing. Biagio Di Pietra

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



## Indice

SOMMARIO.....	6
INTRODUZIONE.....	7
1 INDIVIDUAZIONE DEI PARAMETRI PRINCIPALI CHE CARATTERIZZANO LE RETI TELERISCALDAMENTO E TELERAFFREDDAMENTO NAZIONALI.....	9
1.1 BILANCIO E MONITORAGGIO DELLE RETI DI TELERISCALDAMENTO.....	9
1.2 LA MISURA NELLE SOTTOSTAZIONI DI SCAMBIO (UTENZE).....	10
1.3 STRUMENTAZIONE INSTALLATA A PIÈ DI STABILE DELLE RETI DI TELERISCALDAMENTO ESISTENTI.....	12
2 MISURAZIONE DELLE PRESTAZIONI ENERGETICHE DELLE RETI TERMICHE E CONTABILIZZAZIONE DEI CONSUMI.....	18
2.1 SISTEMI DIRETTI ED INDIRETTI PER LA CONTABILIZZAZIONE DEL CALORE.....	18
2.1.1 Metodo diretto.....	20
2.1.2. Metodi indiretti.....	21
2.1.2.a Ripartitori di Calore.....	22
2.1.2.b Totalizzatori dei tempi di inserzione.....	24
2.2 PROBLEMATICHE METROLOGICHE DEI SISTEMI DI CONTABILIZZAZIONE DIRETTI ED INDIRETTI.....	26
2.2.1 Deriva ed effetti di installazione nella misura diretta.....	26
2.2.2. Deriva ed effetti di installazione nella misura indiretta.....	29
2.3 ANALISI METROLOGICA DEI SISTEMI DIRETTI.....	32
2.3.1 Accuracy test al variare della temperatura del fluido.....	33
2.3.2 Flow disturbance test.....	35
2.4 ANALISI METROLOGICA DEI SISTEMI INDIRETTI.....	38
2.4.1 Analisi a priori delle prestazioni metrologiche dei sistemi indiretti di contabilizzazione del calore.....	38
2.4.2 Sperimentazione preliminare in campo dei sistemi contabilizzazione del calore.....	40
3 PROGETTAZIONE DI MASSIMA DI UN LABORATORIO PER LA RIPRODUZIONE IN SCALA DI UNA RETE DI TELERISCALDAMENTO PRO.RE.TE.....	44
3.1 OBIETTIVI DEL LABORATORIO “PRO.RE.TE”.....	45
3.2 PROGETTO DI MASSIMA DEL PROTOTIPO DI RETE DI TELERISCALDAMENTO IN SCALA.....	45
3.2.1 Sistema di generazione configurabile.....	46
3.2.2 Rete di teleriscaldamento.....	46
3.2.3 Sistema di accumulo termico e di regolazione della pressione.....	48
3.2.4 Sottostazioni di fornitura.....	49
3.2.6 Sistema di controllo, monitoraggio e interfaccia utente.....	51
3.3 ANALISI ECONOMICA PRELIMINARE DEL LABORATORIO PRO.RE.TE.....	54
4 PROGETTAZIONE DI UN SISTEMA DI CONTABILIZZAZIONE DELL’ENERGIA TERMICA DIRETTA ED INDIRETTA DI UNA UTENZA TIPICA DELLE RETI DI TELERISCALDAMENTO.....	55
4.1 DESCRIZIONE EDIFICIO/IMPIANTO.....	55
4.2 DESCRIZIONE DEI SISTEMI DI CONTABILIZZAZIONE.....	59
4.2.1 Unità immobiliari 1 e 2.....	61
4.2.2 Unità immobiliari 3 e 4.....	62
4.2.3 Unità immobiliari 5 e 6.....	63
4.3 ANALISI DI FATTIBILITÀ ECONOMICA.....	65
4.4 ULTERIORI ATTIVITÀ SVOLTE ED IN ITINERE.....	67
5 CONCLUSIONI.....	68
6 APPENDICE.....	69
7 ALLEGATO.....	70
8 BIBLIOGRAFIA.....	73
9 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	76

## Indice delle Figure

Figura 1 - Termini di bilancio di una Rete di Teleriscaldamento .....	10
Figura 2 - Volume di controllo della misura e contabilizzazione del calore .....	11
Figura 3 - Schema funzionamento HM .....	20
Figura 4 - Schema funzionamento HCA.....	23
Figura 5 - Schema funzionamento dei sistemi di contabilizzazione indiretti con ITC .....	24
Figura 6 – Corpi scaldanti: a) tipiche installazioni, b) tipiche connessioni idrauliche. ....	30
Figura 7 – Laboratorio LAMI: a) banco contatori di energia termica, b) schema di funzionamento .....	33
Figura 8 - Accuracy test a diverse temperature contatore statico US.....	34
Figura 9 - Accuracy test a diverse temperature meccanico turbina .....	35
Figura 10 - Generatori di disturbi a) ostruzione 90°, b) generatore di swirl orario.....	35
Figura 11 - Flow disturbance test contatore statico US .....	36
Figura 12 - Flow disturbance test contatore meccanico a turbina.....	37
Figura 13 - Schema delle installazioni della campagna sperimentale .....	41
Figura 14 -Analisi di compatibilità dei risultati stagionali: a) Unità 1, b) Unità 2. ....	42
Figura 15 - Tipologie di rete: a) ramificata; b) ad anello; c) magliata.....	46
Figura 16 - Lay-out rete prototipale .....	47
Figura 17 -Sistema di accumulo: a) con separatore idraulico, b) senza separatore idraulico.....	48
Figura 18 - Schema sottostazione: a) riscaldamento indiretto; b) riscaldamento indiretto e ACS .....	49
Figura 19 - Schema di massima del Laboratorio Pro.Re.Te. ....	53
Figura 20 - Schema edificio.....	56
Figura 21 -Configurazione del sistema completo per appartamento tipo .....	59
Figura 22 - Configurazione del sistema per appartamento tipo .....	60
Figura 23- Schema sistema Unità immobiliare 1 e 2 .....	61
Figura 24 - Schema sistema Unità immobiliare 3 e 4 .....	62
Figura 25 - Schema sistema Unità immobiliare 5 e 6 .....	64

## Indice delle Tabelle

Tabella 1 - Classificazione dei misuratori di energia termica (per sensore di flusso).....	13
Tabella 2 - Effetti in termini di errore di misura e ricorrenze delle criticità nelle misure di energia termica.	16
Tabella 3 - Punti di misura e controllo nelle reti di teleriscaldamento .....	17
Tabella 4 - Punti di misura e controllo nelle reti di teleraffreddamento .....	17
Tabella 5 - Compatibilità Sistemi di contabilizzazione [14] .....	19
Tabella 6 - Caratteristiche dei sistemi di contabilizzazione .....	19
Tabella 7 - Errori massimi tollerati per le diverse classi metrologiche di HM .....	21
Tabella 8 - Raccomandazioni di installazione per i sensori di temperatura .....	28
Tabella 9 - Fattori che influenzano la potenza termica di un corpo scaldante in campo.....	30
Tabella 10 - Risultati “Accuracy test” a diverse temperature contatore statico US .....	33
Tabella 11 - Risultati “Accuracy test” a diverse temperature contatore meccanico turbina.....	34
Tabella 12- Risultati “Flow disturbance test” contatore statico US .....	36
Tabella 13- Risultati “Flow disturbance test” contatore meccanico turbina .....	37
Tabella 14 - Incertezze estese dei singoli elementi di contabilizzazione diretti ed indiretti.....	38
Tabella 15 - Incertezza ripartizione al variare di $r_{cs,app}$ ed $r_{app}$ ( $i_A=3\%$ ; $i_B=15\%$ ; $ncsapp=10$ ) .....	39
Tabella 16 - Descrizione delle unità immobiliari e delle zone termiche.....	40
Tabella 17 - Risultati sperimentali della ripartizione dei consumi nell’intera stagione di riscaldamento .....	42
Tabella 18 -Risultati sperimentali relativi alla ripartizione bimestrale dei consumi .....	42
Tabella 19 - Tipologia di controllo della pressione [46] .....	49
Tabella 20 - Caratteristiche funzionali delle utenze e delle relative sottostazioni di fornitura .....	51
Tabella 21 - Analisi economica preliminare del Laboratorio Pro.Re.Te. ....	54
Tabella 22 - Caratteristiche principali edificio .....	56
Tabella 23 - Dettaglio radiatori unità immobiliare 1 .....	57
Tabella 24 - Dettaglio radiatori unità immobiliare 2 .....	57
Tabella 25 - Dettaglio radiatori unità immobiliare 3 .....	57
Tabella 26 - Dettaglio radiatori unità immobiliare 4 .....	58
Tabella 27 - Dettaglio radiatori unità immobiliare 5 .....	58
Tabella 28 - Dettaglio radiatori unità immobiliare 6 .....	58
Tabella 29 - Riepilogo sistemi utilizzati nella sperimentazione.....	60
Tabella 30 - Principali caratteristiche contatori di energia termica delle unità 1 e 2 .....	61
Tabella 31 - Principali caratteristiche contatori di energia termica delle unità 3 e 4 .....	62
Tabella 32 - Principali caratteristiche contatori di energia termica delle unità 5 e 6 .....	64
Tabella 33 - Analisi preliminare dei costi del sistema sperimentale completo (per appartamento tipo).....	65
Tabella 34 - Analisi preliminare dei costi Unità immobiliare 1-2 .....	66
Tabella 35 - Analisi preliminare dei costi Unità immobiliare 3-4 .....	66
Tabella 36 - Analisi preliminare dei costi Unità immobiliare 5-6 .....	66

## Sommario

Il presente rapporto “Analisi e caratterizzazione metrologica dei sistemi di misura delle reti termiche distribuite” descrive le attività di ricerca svolte ed i risultati ottenuti previste 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 del contratto ha riguardato la caratterizzazione metrologica dei sistemi di misura delle reti termiche distribuite per definire le specifiche tecniche della strumentazione di misura idonea alla valutazione delle prestazioni delle reti e per analizzare le problematiche tecniche caratteristiche dei sistemi di misura e contabilizzazione del calore attualmente installati sulle piccole e grandi utenze.

L’attività di ricerca ha, inoltre, previsto una fase di ideazione e progettazione di massima di due laboratori per la conduzione di idonee sperimentazioni sugli aspetti oggetto dell’accordo di collaborazione. In particolare, il primo laboratorio è stato progettato allo scopo di replicare su scala ridotta una tipica rete di teleriscaldamento, completamente strumentata e potenzialmente operante in differenti configurazioni.

Il secondo laboratorio consiste in un sistema di contabilizzazione del calore condominiale operante in campo su utenze tipiche residenziali allo scopo di confrontare le diverse tecniche di contabilizzazione diretta ed indiretta.

Le attività di ricerca condotte hanno consentito di evidenziare alcune criticità sia nell’utilizzo dei contatori di energia termica diretti che dei sistemi di ripartizione indiretti.

I laboratori progettati consentiranno di quantificare i limiti dei suddetti metodi e di verificare opportune soluzioni correttive.

## Introduzione

Per il raggiungimento degli obiettivi fissati dall'Unione Europea in tema di clima ed energia è richiesta l'adozione da parte degli Stati membri di specifiche politiche in campo energetico. Il risparmio di energia è ottenibile, infatti, sia attraverso un incremento di efficienza dei sistemi energetici che attraverso un uso più razionale dell'energia stessa. In quest'ultimo caso, il controllo e monitoraggio dei consumi per il riscaldamento degli edifici gioca un ruolo cruciale in quanto consente agli utenti finali una gestione "virtuosa" degli impianti di riscaldamento e, di conseguenza, una riduzione degli sprechi di energia.

L'energia termica immessa nelle reti di teleriscaldamento poligenerative può provenire da diverse fonti quali l'incenerimento dei rifiuti solidi urbani, processi industriali (calore di scarto), geotermico, altre fonti rinnovabili (i.e. biomasse, biogas da discariche, ecc.) o può essere prodotta per mezzo di centrali termiche di grosse dimensioni sia convenzionali che combinate. Per trarre il massimo vantaggio dal punto di vista energetico (i.e. massimizzare l'efficienza energetica della rete) e garantire la sostenibilità di un sistema di teleriscaldamento, il calore deve provenire da fonti rinnovabili o da sistemi di produzione ad alta efficienza ed è necessario utilizzare tutte le fonti disponibili sul territorio. In tale contesto, per una gestione ottimale della rete nonché per la valutazione delle prestazioni energetiche della stessa risulta fondamentale selezionare ed installare strumentazione di misura adeguata.

Il ruolo fondamentale che riveste la contabilizzazione individuale dei consumi per riscaldamento è confermato anche dalle Direttive europee emanate negli ultimi anni. In Europa il primo riferimento ai sistemi di regolazione e di contabilizzazione, se pur indiretto, è contenuto nella Direttiva 2002/91/CE [1] sul rendimento energetico nell'edilizia, successivamente sostituita dalla direttiva 2010/31/UE [2]. Tali direttive infatti, sancivano che la fatturazione dei costi relativi al riscaldamento, al condizionamento dell'aria e alla produzione di acqua calda sanitaria se basata sul reale consumo, contribuisce al risparmio energetico nel settore residenziale. Si precisava inoltre che gli occupanti degli edifici dovrebbero essere messi in condizione di regolare il proprio consumo di calore autonomamente in base alle proprie esigenze.

Nella recente Direttiva 2012/27/UE [3], nuova versione della direttiva sull'efficienza energetica (EED), viene ancora individuata la contabilizzazione dei consumi di energia termica come un importante strumento per migliorare l'efficienza energetica. La direttiva, di fatto, introduce l'importante novità dell'obbligo di installazione di contatori di energia termica o di acqua calda in corrispondenza dei punti di fornitura, qualora il riscaldamento, il raffreddamento o l'acqua calda sanitaria per un edificio siano forniti da una rete di teleriscaldamento/teleraffrescamento o da una fonte centrale che alimenta una pluralità di edifici. La Direttiva, inoltre, sancisce l'obbligo, al 31 dicembre 2016, di installazione di sistemi individuali di "sub-metering" per la ripartizione dei costi (sia nei condomini che negli edifici polifunzionali forniti da una fonte di riscaldamento/raffreddamento centrale o da una rete di teleriscaldamento). La Direttiva, inoltre, al fine di assicurare la trasparenza e la precisione del conteggio del consumo individuale, incoraggia gli stati membri a introdurre regole trasparenti sulla ripartizione dei costi connessi al consumo di calore. In merito alla misura dei consumi, la Direttiva esprime altresì la priorità dell'installazione di contatori individuali (i.e. contatori diretti di energia termica) nel caso in cui questa sia economicamente o tecnicamente fattibile; in alternativa è ammessa l'installazione di sistemi di contabilizzazione indiretti. Infatti, spesso non risulta possibile impiegare HM per la contabilizzazione individuale dei consumi, sia a causa di vincoli architettonici e/o impiantistici che per costi non sostenibili (e.g. installazioni su edifici esistenti) [4]. In questi casi la EED ammette l'uso di sistemi di contabilizzazione indiretti. Questi sistemi non effettuano una vera e propria misura del consumo di energia termica, ma solo una stima attraverso la misura di parametri ad essa fortemente correlati. Stima che consente la determinazione dei costi di riscaldamento della singola unità immobiliare come frazione dell'intero consumo di energia dell'edificio (tipicamente effettuato per mezzo di un HM) [5]. HM e sistemi indiretti di contabilizzazione, infine, possono essere inseriti in una architettura di "smart metering" dal momento che essi consentono di acquisire ed elaborare dati di consumo in tempo reale [6]. In [4] sono state stimate "a priori" le prestazioni metrologiche e descritte le principali criticità dei dispositivi di contabilizzazione del calore.

In Italia, i primi riferimenti legislativi riguardanti sistemi di contabilizzazione dell'energia termica sono presenti nel D.P.R. n. 1052/77 [7], decreto attuativo della Legge 373/76 [8]. Successivamente, la legge 10/91 [9] prendeva nuovamente ad esame i sistemi di termoregolazione e contabilizzazione del calore e sanciva l'importanza dell'adozione di tali sistemi. I commi 5 e 6 dell'art.26 del testo di legge citato recitano rispettivamente: i) "per le innovazioni relative all'adozione di sistemi di termoregolazione e di contabilizzazione del calore e per il conseguente riparto degli oneri di riscaldamento in base al consumo effettivamente registrato, l'assemblea di condominio decide a maggioranza, in deroga agli articoli 1120 e 1136 del codice civile"; ii) "gli impianti di riscaldamento al servizio di edifici di nuova costruzione", "devono essere progettati e realizzati in modo tale da consentire l'adozione di sistemi di termoregolazione e di contabilizzazione del calore per ogni singola unità immobiliare". In seguito, il D.P.R. 551/99 [10], decreto attuativo della legge 10/91 [9], all'Art.5 rende di fatto obbligatori i sistemi di termoregolazione e contabilizzazione per edifici di nuova costruzione la cui concessione edilizia è stata rilasciata dopo il 30 giugno 2000. Il successivo D.Lgs. 192/05 [11] concernente attuazione della direttiva 2002/91/CE [1], corretto ed integrato dal D.Lgs. 311/06, prende in considerazione una serie di aspetti tecnici sul rendimento energetico in edilizia. Relativamente alla termoregolazione e contabilizzazione del calore esso impone l'installazione delle valvole termostatiche in tutto il condominio nel caso di ristrutturazione dell'impianto termico.

Il D.P.R. 59/09 [12], regolamento attuativo del D.Lgs. 192/05 [11], all'Art. 4, comma 10 recita "In tutti gli edifici esistenti con un numero di unità abitative superiore a 4, appartenenti alle categorie E1 ed E2, così come classificati in base alla destinazione d'uso all'articolo 3, del decreto del Presidente della Repubblica 26 agosto 1993, n. 412, in caso di ristrutturazione dell'impianto termico o di nuova installazione dell'impianto termico devono essere realizzati gli interventi necessari per permettere, ove tecnicamente possibile, la contabilizzazione e la termoregolazione del calore per singola unità abitativa". Inoltre, secondo il D.P.R. n° 59/09 [12] l'adozione della contabilizzazione del calore è fortemente consigliata anche nel caso di mera sostituzione di generatore (Articolo 4, comma 6). Lo stesso Decreto, all'art.4 comma 11, prevede che le apparecchiature per la contabilizzazione eventualmente installate (ai sensi del comma 10) devono assicurare un errore di misura, nelle condizioni di utilizzo, inferiore a  $\pm 5\%$ , con riferimento alle norme UNI in vigore. Questi errori massimi ammissibili sono compatibili solo con la contabilizzazione diretta.

Infine, il Decreto Legislativo 4 luglio 2014 n.102 [13], di attuazione della Direttiva europea sull'efficienza energetica, recepisce senza sostanziali modifiche gli obblighi previsti in merito all'adozione di sistemi di contabilizzazione individuale del calore, confermando di fatto l'obbligo di installazione entro il 31 dicembre 2016 e individuando nelle norme tecniche esistenti le modalità di ripartizione e le caratteristiche dei sistemi di contabilizzazione. Il Decreto inoltre, nell'attribuire all'AEEGSI le responsabilità di definire gli standard di continuità, qualità e sicurezza del servizio di teleriscaldamento include gli impianti di contabilizzazione del calore.

Per quanto concerne la normativa tecnica, il rapporto tecnico UNI 10200:2015 [14] elaborato dal Comitato Termotecnico Italiano (CTI), definisce i criteri per una corretta ed equa ripartizione delle spese di climatizzazione invernale e acqua calda sanitaria in edifici condominiali. La norma fornisce, per gli edifici provvisti di sistemi di contabilizzazione, i criteri per una ripartizione delle spese in proporzione ai consumi volontari delle singole unità immobiliari al fine di incentivare la razionalizzazione dei consumi. La stessa riporta, inoltre, delle indicazioni per la ripartizione delle spese in edifici sprovvisti di qualsiasi sistema di contabilizzazione dell'energia termica. La UNI 10200 [14] fornisce altresì specifiche informazioni per la progettazione e conduzione dei sistemi di contabilizzazione, richiamando sia i contatori di energia termica che i tre sistemi di contabilizzazione indiretta attualmente normati: i) ripartitori di calore EN 834 [15] e EN 835 [16], ii) totalizzatori dei tempi di inserzione del corpo scaldante compensati della temperatura media del fluido termovettore UNI 11388 [17] e iii) totalizzatori compensati dei gradi giorno effettivi dell'unità immobiliare UNI 9019 [18]. Come noto, i contatori di calore (HM) sono regolati dalla Direttiva Europea MID sugli strumenti di misura [19], che garantisce la conformità della misura dal punto di vista metrico-legale e riconosce forte valenza sia alle norme tecniche della serie EN 1434 [20] [21] [22] [23] [24] [25] che alle raccomandazioni tecniche dell'OIML R75 [26] [27] [28] ed alle guide del WELMEC.

# 1 Individuazione dei parametri principali che caratterizzano le reti teleriscaldamento e teleraffreddamento nazionali

## 1.1 Bilancio e monitoraggio delle reti di teleriscaldamento

Il teleriscaldamento viene, a ragione, oggi considerato come la forma più naturale di riscaldamento di aree fredde densamente popolate. Le motivazioni di ciò sono ascrivibili a molteplici fattori quali il ridotto inquinamento locale, la maggiore sicurezza degli utenti, la maggiore sostenibilità ambientale, i maggiori risparmi energetici derivanti anche dalla produzione combinata di energia termica ed elettrica e dall'utilizzo di fonti rinnovabili. Non a caso le reti di teleriscaldamento si sono sviluppate dapprima nelle aree densamente abitate del nord Europa e, successivamente, sono diventate una valida alternativa al riscaldamento individuale anche in paesi del mediterraneo come l'Italia. Ciò è accaduto in modo progressivo man mano che cresceva da un lato la sensibilità ambientale e che dall'altro le moderne tecnologie rendessero le reti di teleriscaldamento sempre più efficienti.

Il corretto ed efficiente utilizzo di una rete di teleriscaldamento non può però prescindere da un'adeguato monitoraggio ed un corretto bilancio della rete. Entrambe queste condizioni necessitano di strumentare correttamente la rete sia nel suo sviluppo dalla centrale di produzione all'utente finale, che presso quest'ultimo ovvero in corrispondenza delle sottostazioni di scambio termico.

Le sottostazioni di scambio sostituiscono sostanzialmente il generatore di calore di utenza (individuale o condominiale), e sono costituiti principalmente da uno scambiatore di calore, che separa il circuito della rete di teleriscaldamento dal circuito dell'utenza, da valvole di regolazione e da un misuratore di energia termica.

Un'ulteriore potenzialità di sviluppo del teleriscaldamento nei paesi del mediterraneo è rappresentata dal servizio di raffrescamento estivo, ovvero dal teleraffrescamento. Questo servizio consente di utilizzare la reti di distribuzione in modo più uniforme durante l'anno migliorandone notevolmente i tempi di ritorno degli investimento soprattutto nei climi più caldi.

In definitiva, le componenti principali di una rete di teleriscaldamento/teleraffrescamento sono: i) una o più centrali di produzione; ii) una rete di distribuzione del fluido termovettore; iii) le sottostazioni di scambio termico in corrispondenza delle utenze, iv) in alcuni casi, i serbatoi di accumulo utilizzati per gestire i picchi di domanda e quindi garantire un funzionamento più regolare dei sistemi di generazione, v) un sistema di pompaggio e controllo della pressione di rete. Pertanto, il bilancio energetico di una rete di teleriscaldamento, considerando il volume di controllo in Figura 1, può essere scritto come di seguito riportato:

$$\sum_{i=1}^{n_c} E_{P,i} + \sum_{j=1}^{n_S} E_{S,j} = \sum_{k=1}^{n_{utenze}} (E_{Cons,k} - E_{FER,k}) + (E_{Disp} + E_{Pe}) \quad (1)$$

dove:

- $E_P$  è l'energia prodotta dalle  $n_c$  centrali di produzione della rete;
- $E_S$  è l'energia immagazzinata/reimmessa in rete negli  $n_S$  sistemi di accumulo;
- $E_{Cons} - E_{FER}$  è il saldo tra energia consumata ( $E_{Cons}$ ) e quella eventualmente immessa nella rete dagli utenti attivi con FER ( $E_{FER}$ ) dalle  $n_{utenze}$  sottostazioni di scambio;
- $E_{Disp}$  è l'energia perduta per dispersione termica lungo la rete e negli accumuli termici;
- $E_{Pe}$  è l'energia perduta per rotture e/o dispersioni puntuali lungo la rete.

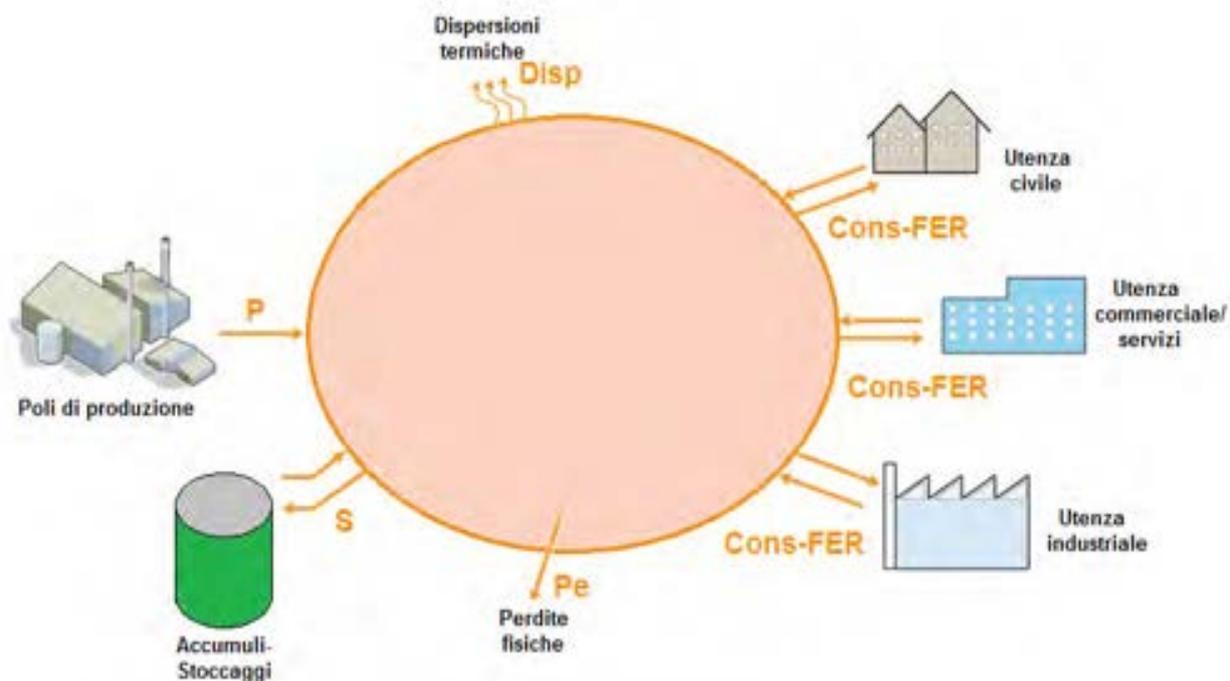


Figura 1 - Termini di bilancio di una Rete di Teleriscaldamento

Una adeguata misurazione e controllo dei flussi energetici delle reti di teleriscaldamento, consente il bilancio fisico continuo della rete e la possibilità di prevedere, sulla base delle curve di prelievo/immissione delle singole sottostazioni/utenze, la diversificazione ed il migliore approvvigionamento delle fonti energetiche. A tale scopo, può essere estremamente utile l'utilizzo di strumenti teleletti, quali ad esempio gli *smart meter*, che consentono una lettura ed acquisizione del dato di misura in tempo reale e, di conseguenza, una gestione più efficiente della rete anche attraverso il controllo degli indici di prestazione energetica.

Ai fini del controllo e bilancio si ritiene quindi estremamente utile strumentare in maniera diffusa la rete prevedendo opportuni punti di controllo e monitoraggio dotati di idonei sistemi di telelettura. Le grandezze più critiche che è necessario monitorare sono: i) la portata del fluido termovettore, ii) la temperatura del fluido termovettore, iii) la pressione del fluido termovettore; iv) la differenza di pressione. In funzione della criticità della misura, infine, dovrebbero essere valutate le utenze/punti in cui installare sistemi di misura ridondanti (e.g. linea fiscale e di back-up per grandi utenze).

E' opportuno fin d'ora evidenziare che la transizione verso reti di riscaldamento "attive" (ovvero di utenti capaci di produrre ed accumulare oltre che consumare localmente energia termica) ed "intelligenti" (ovvero capaci di spostare i propri consumi nelle ore più vantaggiose) è ancora un processo molto lento ancora in itinere ed in molti casi, oggi, solo potenziale.

## 1.2 La misura nelle sottostazioni di scambio (utenze)

Particolarmente critica risulta la misura delle quantità consumate (e di quelle eventualmente immesse in rete dalle utenze con FER) nelle sottostazioni di scambio termico residenziali, industriali e

commerciali/servizi a causa del loro elevato numero, della loro dispersione geografica e spesso delle inadeguate procedure di manutenzione adottate.

In Italia non esiste ancora una specifica regolazione della misura nel settore del teleriscaldamento. A tale riguardo, l'Autorità per l'energia elettrica, il gas ed il sistema idrico (AEEGSI) ha recentemente avviato il processo regolatorio in conformità al D.Lgs 102/2014 [13]. In analogia con altri servizi a rete, nella sottostazione di scambio è possibile distinguere una zona "pre-contatore" ed una "post contatore", rispettivamente a monte e a valle dei contatori "fiscali" con la quale viene effettuata la misura e la fatturazione dei consumi dal gestore verso l'utente.

A questo scopo, è utile chiarire il perimetro di competenza nelle diverse configurazioni di utenza (vedi Figura 2). Le configurazioni che i sistemi di misura possono assumere nelle reti di teleriscaldamento in corrispondenza dello scambio con le utenze, quindi nella zona "pre-contatore", sono:

- un contatore di energia termica in corrispondenza del punto di fornitura, quindi a livello condominiale nel caso di edifici condominiali o polifunzionali (Figura 2, Condominio A) con successiva ripartizione dei consumi mediante sistemi di misura diretti o indiretti;
- un contatore di energia termica individuale per ogni unità immobiliare (Figura 2, Condominio B).

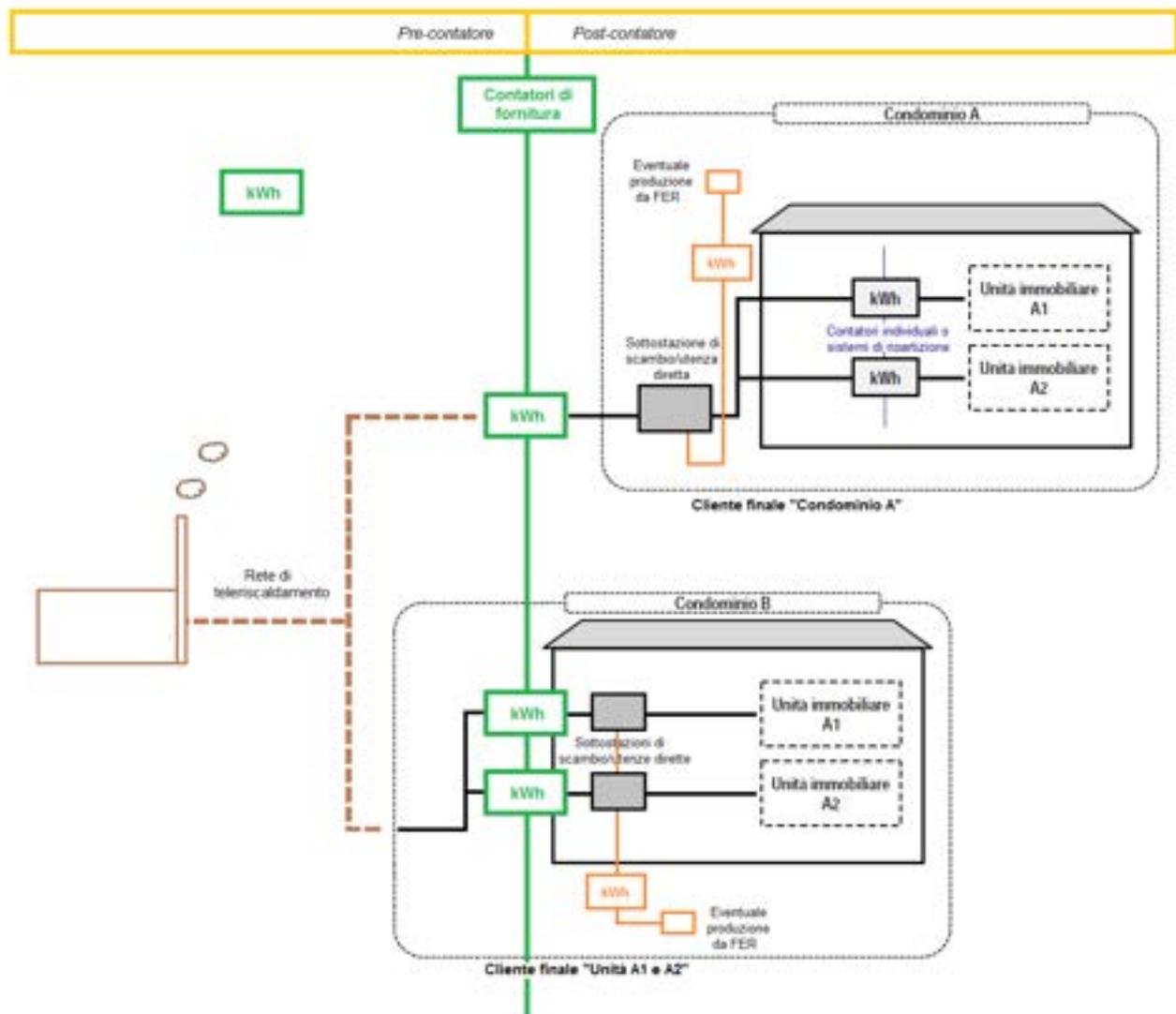


Figura 2 - Volume di controllo della misura e contabilizzazione del calore

Qualora il misuratore è installato a livello condominiale, il cliente finale con il quale il gestore di rete si interfaccia (e.g. contrattualizzazione, fatturazione ecc.) è il condominio o il supercondominio, mentre nel caso di contatori individuali, installati presso ciascuna unità immobiliare, il cliente finale è il proprietario/conducente dell'unità immobiliare.

La prima opzione è la più comune e semplice per il gestore della rete in quanto responsabile della gestione e manutenzione della sola rete di teleriscaldamento e non di parti di rete condominiale.

Dalla recente indagine conoscitiva dell'AGCM [29] vengono individuate come possibili opzioni di *metering*, in aggiunta a quelle citate:

- “i misuratori a livello di radiatore individuale” (permette l’allocazione tra i condomini del calore misurato a livello di scambiatore)
- “i misuratori del flusso d’acqua calda” attraverso i radiatori del singolo appartamento;

A rigore, dette soluzioni sono esclusivamente utilizzabili per la ripartizione dei costi e non per la fatturazione dei consumi nelle sottostazioni delle reti di teleriscaldamento.

### 1.3 *Strumentazione installata a piè di stabile delle reti di teleriscaldamento esistenti*

La diffusione commerciale dei contatori di calore è iniziata negli anni '60 con i primi contatori di tipo meccanico. Solo a partire dagli anni '70 questi misuratori sono stati gradualmente sostituiti da contatori con integratori di tipo elettronico digitali e, successivamente, a partire dagli anni '90 sono state introdotte le prime unità completamente elettroniche basate su tecnologia ad ultrasuoni ed elettromagnetica (denominati “statici” perché senza parti in movimento).

In principio la maggior parte delle reti di teleriscaldamento utilizzavano questi strumenti solo per grandi utenti e, spesso, le misure su piccole utenze erano basate sulla sola misura dei volumi di acqua. Questa prassi è attualmente completamente cambiata ed anche le piccole utenze condominiali misura l'energia termica effettivamente consumata. Tuttavia, l'uso di un unico contatore di calore per un grande blocco di appartamenti non incoraggia il singolo cliente ad essere parsimonioso, se la fattura non viene influenzata significativamente dall'effettivo consumo.

Il ruolo della misura come strumento di efficienza energetica è stato individuato dal legislatore europeo nella Direttiva sull'efficienza energetica [3]. In essa, infatti, la misura ai punti di fornitura delle reti di teleriscaldamento è uno degli strumenti da adottare per il raggiungimento degli obiettivi di efficienza energetica nazionali. Una corretta misurazione dell'energia termica prelevata dalle utenze, nonché di quella prodotta dai poli di generazione di una rete di teleriscaldamento risulta difatti una base fondamentale sia per attuare corrette strategie di gestione delle reti di teleriscaldamento che per incentivare comportamenti virtuosi da parte degli utenti finali e dei responsabili/gestori di impianti e reti.

Dal 2004, infatti, la Direttiva MID [19] sugli strumenti di misura regola i contatori individuali di energia termica. Pertanto, ai sensi del D.Lgs 22/2007 [30] recepimento in Italia della MID, successivamente al 17 marzo 2007 (data di entrata in vigore del decreto) possono essere installati unicamente contatori omologati MID, non essendo per questa categoria di strumenti applicabili le norme transitorie previste, poiché manca il presupposto fondamentale previsto dal decreto, cioè l'esistenza di normativa nazionale antecedente. Inoltre, i dispositivi e strumenti non omologati MID e già messi in servizio prima del 17 marzo 2007 possono continuare ad essere utilizzati purché non rimossi dal luogo di utilizzazione.

Con il DM 155/2013 [31], sono state stabilite anche le regole ed i criteri per l'esecuzione dei controlli periodici in esercizio per i contatori individuali omologati MID. Tutto ciò comporta che i misuratori fiscali di energia termica installati nelle sottostazioni di scambio delle reti di teleriscaldamento Italiane prima del 2016 possano non essere omologati MID, mentre quelli installati successivamente al 30 ottobre 2016

debbano essere necessariamente omologati ai sensi della Direttiva MID e, conseguentemente, sottoposti al regime di controlli periodici regolato dal DM 155/2013.

Attraverso il coinvolgimento di alcuni operatori del settore, è stata condotta un'indagine sulla strumentazione commercialmente disponibile ed installata a piè di stabile di alcune reti di teleriscaldamento esistenti.

In Tabella 1 viene riportata una classificazione dei misuratori in base al principio di misura ed alla tecnologia di fabbricazione.

**Tabella 1 - Classificazione dei misuratori di energia termica (per sensore di flusso)**

<i>Categoria</i>	<i>Principio di Misura</i>	<i>Tecnologia</i>	<i>Utilizzo nelle Sottostazioni di scambio a piè di stabile</i>	<i>Vantaggi</i>	<i>Svantaggi</i>
Meccanico	Volumetrico	Woltmann	Molto diffusi	Economico. Tecnologia completamente sviluppata.	Necessità di filtri a monte. Sensibile a corrosione, viscosità, effetti di cavitazione, swirl. Alta deriva. Non trascurabili perdite di carico. Bassa ripetibilità
		A pistoni rotanti	Diffusi		
		A disco nutante	Poco diffusi		
		A lobi	Poco diffusi		
	Turbina	Assiale	Molto diffusi		
		Tangenziale	Molto diffusi		
	Fluidodinamico	Vortex	Poco diffusi	Basse perdite di carico.	Bassa rangeability. Utilizzabile per elevati Reynolds. Sensibili alle vibrazioni
Restringimento	Venturi Diaframmi	Poco diffusi	Semplicità di montaggio.	Bassa rangeability.	
Pressione differenziale	Annubar	Poco diffusi	Perdite di carico contenute	Sensibile a sporco e contaminanti	
Statico	Ultrasuoni	A tempo di volo	Diffusi	Assenza di parti in movimento. Elevata precisione e rangeability. Uscita elettrica.	Costi elevati. Sensibile alla distorsione del profilo di velocità. Tempo di risposta elevato. Polveri e detriti sui trasduttori
	Elettromagnetico	Legge di Faraday	Diffusi	Elevata precisione e rangeability.	Costo elevato. Elevate perdite di carico.
	Coriolis	Tubi risonanti	Poco diffusi	Elevata precisione e rangeability. effetti fluidodinamici a monte non rilevanti.	Costo elevato. Elevate perdite di carico.

In realtà nonostante esistano numerosi principi di misura della portata, gli strumenti maggiormente utilizzati per la misura legale e fiscale dell'energia termica sono ancora di tipo meccanico. Negli ultimi anni, i misuratori di portata elettromagnetici e ad ultrasuoni hanno però aumentato sensibilmente la loro quota di mercato in Europa. Oggi, i flussimetri meccanici (i.e. turbine e woltmann) hanno una quota di mercato di circa il 36%, mentre i misuratori "statici" elettromagnetici e a ultrasuoni si suddividono la restante quota [32]. Inoltre, i misuratori di portata statici stanno sempre più guadagnando una posizione dominante grazie alla notevole riduzione dei costi (ancora se generalmente superiori a quelli meccanici) anche per basse portate una volta caratteristiche dei misuratori di tipo meccanico (attualmente sono infatti commercialmente disponibili misuratori statici con diametri inferiori a i 20 mm).

La mappatura ha consentito di valutare le caratteristiche dei misuratori installati in termini di tecnologie e modalità di acquisizione dati. Da tale analisi emerge che i misuratori di energia installati non

sono generalmente interfacciabili con i ripartitori di calore condominiali e non consentono attualmente un bilancio della rete in tempo reale.

Le maggiori criticità riscontrate sono: i) l'utilizzo dello strumento al di fuori della propria rangeability; ii) l'assenza di un protocollo condiviso tra i diversi operatori sulle modalità di installazione; iii) la presenza di un cospicuo numero di strumenti installati non MID non soggetto alle stringenti regole di verifica della metrologia legale.

Nelle reti di teleriscaldamento, inoltre, alcune impurità del fluido termovettore possono interagire in modo significativo con i contatori di calore. Possiamo distinguere almeno 5 tipi di fenomeni: i) precipitazione di particelle solide; ii) particelle in sospensione; iii) reazioni chimiche (con alterazione delle caratteristiche del fluido); iv) fenomeni di corrosione; v) fenomeni biologici.

Le precipitazioni di particolato e le incrostazioni biologiche dipendono fortemente dal contenuto di sali di calcio e magnesio e dal particolato sospeso. Altri fattori che influenzano il formarsi di incrostazioni sono: la velocità del flusso, proprietà solventi (ad esempio valori di pH e temperatura) e il materiale della superficie.

Questi fenomeni possono influenzare fortemente le prestazioni metrologiche dei misuratori. Ad esempio la presenza di magnetite può causare imprecisioni significative quando si eseguono misurazioni con unità di flusso magnetico-induttive. Inoltre, uno strato di magnetite all'interno del rivestimento del misuratore, può cortocircuitare gli elettrodi. Pertanto il progettista dovrebbe operare opportune scelte sul tipo di misuratore, sui materiali di rivestimento e sulla velocità di flusso per attenuare il problema delle incrostazioni stesse. Ad esempio un rivestimento resistente alle incrostazioni in politetrafluoroetilene può essere considerato una scelta opportuna, così come l'additivazione con tensioattivi che possono favorire la dispersione delle particelle di magnetite in acqua.

In relazione alla modalità di acquisizione e trasmissione dei dati di misura ed alla interoperabilità con i contatori individuali e con i sistemi indiretti di ripartizione del calore, si riscontra quanto segue:

- i misuratori non omologati ai sensi della Direttiva MID generalmente non dispongono di sistemi automatici di acquisizione e trasmissione dei dati di misura e la lettura viene effettuata manualmente;
- i misuratori omologati ai sensi della Direttiva MID sono generalmente interfacciabili localmente attraverso il modulo di calcolo e mediante opportuni sistemi di concentrazione dati con i contatori individuali e con i sistemi indiretti di ripartizione del calore;
- gli *smart meter* consentono, infine, una lettura a distanza del dato di misura, una profilazione dei consumi su base oraria/quartoraria, una diagnosi del misuratore e della batteria, l'interfacciamento con altri dispositivi in campo quali ad esempio gli in-home display per la visualizzazione in tempo reale dei consumi

Come noto, ogni misuratore, per garantire le migliori prestazioni metrologiche, deve funzionare nel proprio campo di misura e deve lavorare nelle condizioni dichiarate dal costruttore e che scaturiscono dalle prove effettuate in fase di omologazione. Scelte impiantistiche errate, strategie di gestione e condizioni di installazione non corrette possono condurre (sistematicamente o in particolari condizioni di funzionamento) all'impiego degli strumenti di misura in condizioni non ottimali causando: i) l'impossibilità di effettuare la misura durante alcune condizioni di utilizzo (e.g. portata di funzionamento inferiore alla portata minima consentita); ii) un aumento dell'incertezza di misura; iii) la perdita permanente della funzionalità del misuratore o una sua accentuata deriva.

Le cause che più frequentemente ricorrono nel determinare queste condizioni sono:

- un'elevata variabilità giornaliera e/o stagionale della potenza istantanea prelevata (non compatibile con la *rangeability* degli strumenti);
- nelle utenze industriali e commerciali/servizi un errato dimensionamento del contatore rispetto alle effettive condizioni di funzionamento della sottostazione di utenza o linea (spesso l'impianto risulta sovradimensionato rispetto alle effettive esigenze);

- una limitata *rangeability* del misuratore selezionato;
- una non corretta attuazione di strategie di regolazione sulle sottostazioni di scambio (e.g. definizione di un salto termico minimo di funzionamento, di una portata minima-massima di funzionamento, etc.);
- installazione del misuratore non conforme alle istruzioni del costruttore ed alle regole della buona tecnica;
- inadeguata manutenzione del misuratore e dell'impianto.

In particolare, per l'ottimizzazione del funzionamento degli strumenti delle sottostazioni e degli altri punti di misura sarebbe opportuno effettuare un'analisi statistica (per tipologia di utenza) o su base storica (per una specifica utenza) dei regimi di funzionamento e dei profili di consumo. La portata minima di esercizio dovrà risultare sempre maggiore del valore minimo misurabile,  $q_i$ , e quella massima inferiore al valore di portata permanente del misuratore,  $q_p$ , rispettivamente. Solo per limitati periodi di funzionamento è ammesso che il misuratore possa funzionare con una portata superiore a quella permanente, ma comunque al di sotto di un valore di portata massima consentito per brevi periodi,  $q_s$ . In esercizio devono quindi essere rispettate le seguenti condizioni: i)  $q_i < q < q_p$  nel normale funzionamento, ii)  $q_p < q < q_s$  per limitati periodi. A tale riguardo, la Direttiva MID [19], all'allegato MI-004, prescrive per i fabbricanti di contatori di energia termica una *rangeability* minima  $q_p/q_i \geq 10$ .

In relazione alla temperatura del fluido termovettore, la capacità di trasporto nelle reti di teleriscaldamento è funzione della differenza di temperatura tra mandata e ritorno. La temperatura di ritorno, nella gran parte delle reti nazionali, non scende al di sotto dei 50 – 60°C per le caratteristiche di progetto dei circuiti di utilizzazione dell'utenza. Dall'analisi dei dati AIRU [33] emerge che a fine 2013, su circa 200 reti di teleriscaldamento esistenti solo 9 (ovvero il 4% del numero totale) operano con fluido termovettore vapore. Delle rimanenti, 35 (ovvero il 18%) operano con acqua surriscaldata con temperatura di mandata compresa tra 110 e 130°C e la restante parte ad acqua calda, con temperature di mandata comprese tra 70 e 98°C [33] (Figura a). Considerando invece la lunghezza delle reti<sup>1</sup>, solo una minima percentuale opera con vapore (Figura b).

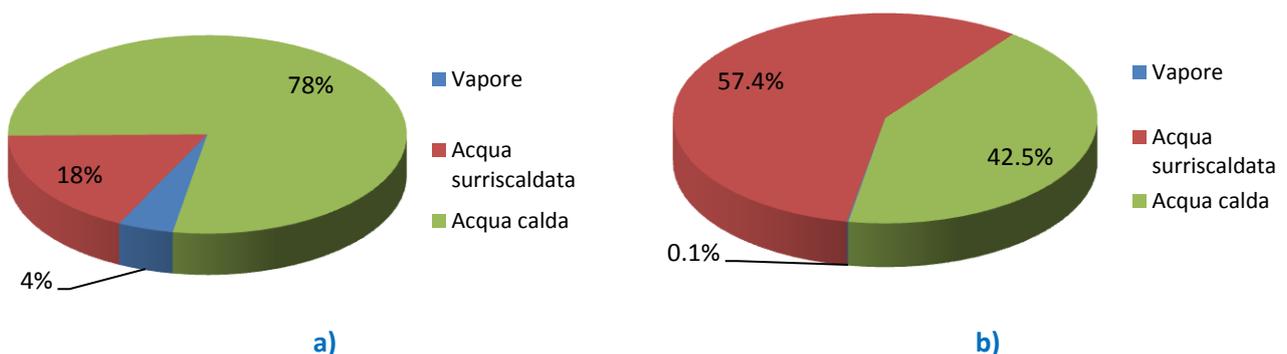


Figura 3 - Fluido impiegato nelle reti di teleriscaldamento italiane, a) per numero b) per km di rete

Anche nella scelta dei sensori di temperatura dei contatori di energia termica, è importante che i limiti di funzionamento imposti dal costruttore siano compatibili con le temperature effettive di esercizio. In particolare per i contatori di energia termica viene imposto un vincolo sulla temperatura di funzionamento, che deve essere compresa tra un valore  $\theta_{min}$  e un valore  $\theta_{max}$ , e sulla differenza di temperatura tra fluido di mandata e di ritorno, la quale deve essere compresa tra  $\Delta\theta_{min}$  e  $\Delta\theta_{max}$ . Inoltre la MID [19] prevede per i fabbricanti degli strumenti di misura che essi rispondano agli ulteriori limiti  $\Delta\theta_{min}/\Delta\theta_{max} \geq 10$  e  $\Delta\theta_{min}=3, 5$  o  $10$  K.

<sup>1</sup> il campione considerato include circa 3300 km di rete su un totale di 3800 km.

I sensori di temperatura disponibili in commercio possono essere classificati in quattro categorie: i) termometri a stelo corto montati direttamente sulla tubazione e collegati con cavi di segnale in modo permanente a contatori di calore compatti (queste sonde sono generalmente montate su contatori a basso costo); ii) termometri a stelo lungo montati direttamente sulla tubazione e collegati con cavi di segnale in modo permanente o a teste di protezione (queste sonde sono più precise di quelle a stelo corto sebbene circa 2-3 volte più costose); iii) termometri a stelo lungo montati su tasca e collegati con cavi di segnale in modo permanente o a teste di protezione; iv) termometri a contatto che misurano la temperatura della superficie della tubazione in luogo della temperatura dell'acqua (queste sonde anche se facili da montare non sono adatte alla contabilizzazione del calore a causa dei grandi errori). Le sonde di temperatura, generalmente termoresistenze al platino, possono avere diverse resistenze a 0°C (i.e. 100, 500 o 1000 ohm), diverse tecnologie (i.e. a filo o a film) e diverso numero di fili di collegamento (i.e. 2, 3 o 4 fili). I sensori Pt 1000 o Pt 500 presentano un'influenza dei cavi di collegamento inferiore rispetto alle Pt100, sebbene con sonde a 4 fili sia possibile eliminarne completamente l'influenza. Anche sensibilità e autoriscaldamento risultano migliori per Pt1000 e Pt 500 [34].

Un fattore fondamentale per un accurata misura della temperatura è, infine, il corretto posizionamento delle sonde. In particolare è necessario assicurare una buona conduttività tra fluido termovettore e sensore al fine di evitare distorsioni della temperatura dovute al riscaldamento o al raffreddamento delle sonde. Ad esempio all'interno di grandi tubi a valle di raccordi si possono sviluppare gradienti di temperatura; in questo caso è opportuno installare diversi sensori di temperatura attorno alla circonferenza del tubo per determinare la temperatura media del fluido.

Dai dati disponibili in letteratura, è possibile evidenziare gli effetti in termini di errore di misura e le ricorrenze delle diverse criticità sopra descritte. In tabella 2 viene riportata una breve sintesi [35].

**Tabella 2 - Effetti in termini di errore di misura e ricorrenze delle criticità nelle misure di energia termica**

Tipo di disturbo	Errore di misura				Frequenza evento	Commento	
	Meccanici	Ultrasuoni	Vortex	Elettrom.			
Presenza gas nel fluido termovettore	Entro i limiti MID	blocco lettura	Entro i limiti MID	Entro i limiti MID	4%	I misuratori ad ultrasuoni possono identificare che esiste il problema	
Fluido diverso (e.g. misuratore tarato in acqua e usato in miscela glicole-acqua)	<+5%	Entro i limiti MID	Entro i limiti MID	Entro i limiti MID	---	Errore del calcolatore porterà ad una sovrastima dell'energia	
Orientamento misuratore	Entro i limiti MID	Entro i limiti MID	<+3%		11%		
Presenza disturbi fluidodinamici							
a) Riduttore	Entro i limiti MID	5%					
b) Valvola	Entro i limiti MID						
c) Doppia curva	<+3%	Entro i limiti MID	Entro i limiti MID	Entro i limiti MID		I misuratori a turbina mostrano errori dell'1% superiori ai limiti MID	
Montaggio nel ramo sbagliato						7%	L'ampiezza dell'errore dipende dalla differenza di temperatura
a) Mandata invece che ritorno	< +5%						
b) Ritorno invece che mandata	< +5%						

In Tabella 3 e Tabella 4 si riportano le principali caratteristiche metrologiche della strumentazione di misura applicabile nelle reti di teleriscaldamento (District Heating) e teleraffreddamento (District Cooling) [36].

**Tabella 3 - Punti di misura e controllo nelle reti di teleriscaldamento**

Punto di controllo	Descrizione	Campo di misura	Accuratezza attesa	Tecnologia di misura applicabile	Utilizzo				
					BT	MT	AT	AS	V
Rete	Portata	Funzione della potenza	0.5÷1.0 %	Ultrasuoni, Elettromagn. Vortex, Turbina, Woltmann	✓	✓	✓	✓	
			2.0 %	Annubar, Venturimetrico					✓
	Temperatura	40-170°C	0.1÷0.5 °C	TRP a stelo lungo e pozzetto (Pt 1000-500-100 4 fili)	✓	✓	✓	✓	✓
	Pressione	0-25 bar	0.5 %	Manometri capacitivi, induttivi	✓	✓	✓	✓	✓
	Differenza di pressione (prim.)	20-50 kPa	0.5 %	Manometri capacitivi, induttivi	✓	✓	✓	✓	✓
Utenza	Portata	Funzione della potenza	2.0÷5.0 %	Ultrasuoni, Elettromagn. Vortex, Turbina, Woltmann	✓	✓	✓	✓	
			2.0÷5.0 %	Annubar, Venturimetrico					✓
	Temperatura	40-170°C	0.5 °C	TRP a stelo corto con o senza pozzetto (Pt 1000-500 4, 3 o 2 fili)	✓	✓	✓	✓	✓
	Pressione	0-10 bar	0.5 %	Manometri capacitivi, induttivi	✓	✓	✓	✓	✓
	Differenza di pressione (sec.)	20-70 kPa	0.5 %	Manometri capacitivi, induttivi	✓	✓	✓	✓	✓

**Tabella 4 - Punti di misura e controllo nelle reti di teleraffreddamento**

Punto di controllo	Descrizione	Campo di misura	Accuratezza attesa	Tecnologia di misura applicabile	Utilizzo				
					BT	MT	AT	AS	V
Rete	Portata	Funzione della potenza	0.5÷1.0 %	Ultrasuoni, Elettromagn. Vortex, Turbina, Woltmann	✓	✓	✓	✓	
			2.0 %	Annubar, Venturimetrico					✓
	Temperatura	1-4°C	0.1÷0.5 °C	TRP a stelo lungo e pozzetto (Pt 1000-500-100 4 fili)	✓	✓	✓	✓	✓
	Pressione	0-10 bar	0.5 %	Manometri capacitivi, induttivi	✓	✓	✓	✓	✓
	Differenza di pressione (primario)	20-50 kPa	0.5 %	Manometri capacitivi, induttivi	✓	✓	✓	✓	✓
Utenza	Portata	Funzione della potenza	2.0÷5.0 %	Ultrasuoni, Elettromagn. Vortex, Turbina, Woltmann	✓	✓	✓	✓	
			2.0÷5.0 %	Annubar, Venturimetrico					✓
	Temperatura	1-4°C	0.5 °C	TRP a stelo corto con o senza pozzetto (Pt 1000-500 4, 3 o 2 fili)	✓	✓	✓	✓	✓
	Pressione	0-10 bar	0.5 %	Manometri capacitivi, induttivi	✓	✓	✓	✓	✓
	Differenza di pressione (secondario)	20-70 kPa	0.5 %	Manometri capacitivi, induttivi	✓	✓	✓	✓	✓

BT bassa temperatura    MT media temperatura    AT alta temperatura    AS acqua surriscaldata    V vapore

## 2 Misurazione delle prestazioni energetiche delle reti termiche e contabilizzazione dei consumi

### 2.1 Sistemi diretti ed indiretti per la contabilizzazione del calore

I sistemi di contabilizzazione del calore sono classificati come “diretti” e “indiretti”.

I primi, denominati contatori di energia termica o contatori di calore (*heat meter*, HM), effettuano una misura puntuale dell’energia termica fornita in un circuito di scambio termico.

I secondi sono invece ascrivibili a tre differenti tipologie:

- i ripartitori di calore (*heat cost allocators*, HCA);
- i sistemi di contabilizzazione del calore basati sui tempi di inserzione compensati con la temperatura media del fluido termovettore (*insertion time counter*, ITC-TC);
- i sistemi di contabilizzazione del calore basati sui tempi di inserzione compensati con i gradi giorno effettivi dell’unità immobiliare (*insertion time counter*, ITC- DDC).

I sistemi di contabilizzazione indiretta ad oggi disponibili, ed utilizzabili per la ripartizione delle spese di riscaldamento sono basati su dispositivi conformi alla UNI EN 834 [15] ovvero i ripartitori di calore elettronici, alla UNI 11388 [17] o alla UNI 9019 [18] ovvero i totalizzatori dei tempi di inserzione. La Tabella 5 mostra l’applicabilità di detti sistemi rispettivamente in edifici serviti da impianti termici a distribuzione verticale ed orizzontale.

I sistemi di contabilizzazione diretta sono attualmente gli unici strumenti regolati dalla Metrologia Legale (Direttiva MID [19]); pertanto, essi sono utilizzabili sia per la misura dell’energia termica al punto di fornitura che nella successiva ripartizione dei consumi condominiali. Tuttavia, come si evince dalle Tabelle 3 e 4, tali dispositivi non risultano sempre tecnicamente applicabili e, comunque, sono spesso non convenienti dal punto di vista economico. Spesso ciò accade in interventi di retrofit su edifici esistenti sia a causa della configurazione distributiva degli impianti di riscaldamento (e.g. impianti centralizzati con distribuzione a colonne montanti verticali), sia a causa di vincoli architettonici ed economici. Viceversa, i dispositivi di contabilizzazione indiretta sono pienamente applicabili nella gran parte dei casi in edifici esistenti, ma risultano carenti dal punto di vista regolatorio, ovvero sotto il profilo metrologico-prestazionale a garanzia della transazione economica ed a tutela della fede pubblica.

**Tabella 5 - Compatibilità Sistemi di contabilizzazione [14]**

<i>Impianti a distribuzione verticale (a colonne montanti)</i>				
<i>Tipo terminale di emissione</i>	<i>Diretta</i>		<i>Indiretta</i>	
	<i>Contatore di energia termica</i>		<i>Ripartitori di calore</i>	<i>Totalizzatori dei tempi di inserzione</i>
Radiatore	non ottimale <sup>a)</sup>		Ottimale	Ottimale
Termoconvettore	non ottimale <sup>a)</sup>		Buona	Ottimale
Ventilconvettore	non ottimale <sup>a)</sup>		non realizzabile	non ottimale
Pannello radiante a pavimento	non ottimale <sup>a) b)</sup>		non realizzabile	non ottimale <sup>b)</sup>
Pannello radiante a parete o soffitto	non ottimale <sup>a) b)</sup>		non realizzabile	non ottimale
Bocchetta aria calda	Ottimale		non realizzabile	non realizzabile
<i>Impianti a distribuzione orizzontale</i>				
<i>Tipo terminale di emissione</i>	<i>Diretta</i>		<i>Indiretta</i>	
	<i>Contatore di energia termica</i>		<i>Ripartitori di calore</i>	<i>Totalizzatori dei tempi di inserzione</i>
Radiatore	ottimale <sup>c)</sup>	non ott. <sup>d)</sup>	buona	buona
Termoconvettore	ottimale <sup>c)</sup>	non ott. <sup>d)</sup>	buona	buona
Ventilconvettore	ottimale <sup>c)</sup>	non ott. <sup>d)</sup>	non realizzabile	non ottimale
Pannello radiante a pavimento	ottimale <sup>c)</sup>	non ott. <sup>d)</sup>	non realizzabile	buona <sup>c)</sup> non ott. <sup>d)</sup>
Pannello radiante a parete o soffitto	non ottimale		non realizzabile	buona <sup>c)</sup> non ott. <sup>d)</sup>
Bocchetta d'aria calda	ottimale		non realizzabile	non realizzabile

a) condizione antieconomica;  
b) possibile se il fluido è intercettabile;  
c) nel caso le tubazioni di mandata e ritorno siano contenute in appositi moduli;  
d) nel caso le tubazioni di mandata e ritorno siano sotto traccia

**Tabella 6 - Caratteristiche dei sistemi di contabilizzazione**

	<i>Metodi diretti</i>	<i>Metodi indiretti</i>		
<i>Sistema di contabilizzazione</i>	HM	HCA	ITC-TC	ITC-DDC
<i>Norma applicabile</i>	MID +EN 1434	EN 834	UNI 11388	UNI 9019
<i>Sistema di controllo (su cui si effettua il bilancio termico)</i>	Impianto termico appartamento	Ambiente riscaldato (escluso terminali di emissione)	Zona termoregolata (incluso impianto di distribuzione e corpi scaldanti)	Zona termoregolata (incluso impianto di distribuzione, corpi scaldanti e murature perimetrali)
<i>Accuratezza</i>	Elevata	Media	Media	Medio-bassa
<i>Unità di misura</i>	kWh	unità di ripartizione adimensionale		
<i>Conformità</i>	Marcatura metrologica MID  Verifica Prima in fabbrica(MID)  Verifiche periodiche (DM 155/2013)		Marcatura CE (non metrologica)  Nessun Obbligo Verifica Prima  Nessun Obbligo Verifiche Periodiche	
<i>Costi acquisto e installazione</i>	Medio-alti (installazione complessa)		Bassi (installazione semplice)	

### 2.1.1 Metodo diretto

I contatori di energia termica (HM) misurano il calore che, in un circuito di scambio termico, viene prelevato o ceduto da un fluido termo-vettore (Figura 3). Il sistema di misura può essere compatto (i.e. costituito da un'unica unità indivisibile) oppure composto da diverse sottounità<sup>2</sup> (i.e. un sensore di flusso, una coppia di sensori di temperatura, un calcolatore).

Il principio di misura dei contatori di calore si basa su un semplice bilancio di prima legge applicato al sistema aperto in esame nell'ipotesi di: i) moto stazionario e flusso monodimensionale nelle sezioni di misura; ii) un solo ingresso ed una sola uscita (i.e. assenza di perdite e di prelievi di fluido); iii) trascurabilità dei termini cinetici e potenziali. Nelle condizioni operative tipiche di liquido sottoraffreddato la misura dell'energia termica,  $E$ , in un generico intervallo di tempo può essere effettuata integrando rispetto al tempo la differenza di entalpia tra la condotta di mandata e quella di ritorno attraverso la semplice relazione:

$$E = \int \rho \bar{c}_p q \Delta T d\theta \quad (1)$$

avendo indicato con  $E$  l'energia termica scambiata ( $kWh$ ),  $\rho$  la densità nel punto di misura della portata ( $kg \cdot m^{-3}$ ),  $q$  la portata volumetrica del fluido termovettore ( $m^3 \cdot s^{-1}$ ),  $\bar{c}_p$  il calore specifico medio del fluido ( $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ),  $\Delta T$  la differenza di temperatura tra ingresso e uscita ( $K$ ).

La stima della densità e del calore specifico possono essere effettuate coerentemente all'appendice A della EN 1434-1 [20] ovvero allo "Industrial Standard for the Thermodynamic Properties of Water and Steam (IAPWS-IF 97)".

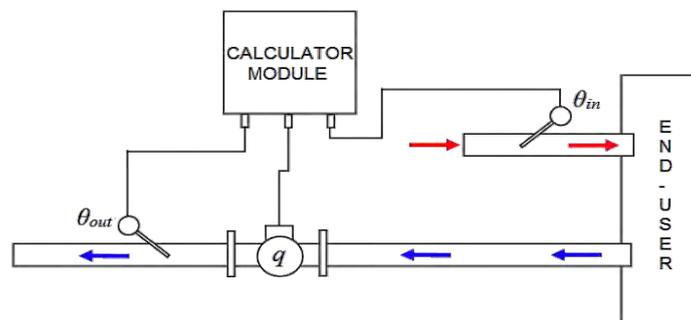


Figura 3 - Schema funzionamento HM

La Direttiva MID [19], definisce l'errore massimo tollerato, EMT (vedi Tabella 7), in funzione della classe per le sottounità del sistema di misura (i.e. sensore di flusso, coppia sensori di temperatura, modulo di calcolo) e delle condizioni di misura (i.e. valore della portata,  $q$ , e della differenza di temperatura  $\Delta T$ ).

<sup>2</sup> La Direttiva MID individua come "sottounità" un dispositivo hardware così denominato negli allegati specifici, che funziona in modo indipendente e che costituisce uno strumento di misura, unitamente ad altre sottounità, con cui è compatibile, ovvero con uno strumento di misura con cui è compatibile.

**Tabella 7 - Errori massimi tollerati per le diverse classi metrologiche di HM**

Classe	EMT Flusso	EMT Temperatura	EMT Calcolatore	EMT Sistema Diretto
1	$\left(1 + 0.01 \frac{q_p}{q}\right)^*$	$0.5 + 3 \frac{\Delta T_{min}}{\Delta T}$	$0.5 + \frac{\Delta T_{min}}{\Delta T}$	$\left(1 + 0.01 \frac{q_p}{q}\right)^* + 1 + 4 \frac{\Delta T_{min}}{\Delta T}$
2	$\left(2 + 0.02 \frac{q_p}{q}\right)^*$			$\left(2 + 0.02 \frac{q_p}{q}\right)^* + 1 + 4 \frac{\Delta T_{min}}{\Delta T}$
3	$\left(3 + 0.05 \frac{q_p}{q}\right)^*$			$\left(3 + 0.05 \frac{q_p}{q}\right)^* + 1 + 4 \frac{\Delta T_{min}}{\Delta T}$

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

Gli errori massimi tollerati applicabili ad un contatore termico completo sono pari alla somma dei contributi di errore delle sottunità, per ciascuna classe di accuratezza. Sempre la MID specifica che, qualora a livello nazionale sia prescritta la misura dell'energia termica in usi residenziali, si può consentire che tale misura venga effettuata per mezzo di contatori di classe 3, mentre per uso commerciale e/o industriale leggero, si può prescrivere qualsiasi contatore di classe 2.

La Direttiva MID prescrive altresì le caratteristiche relative al campo di misura, sia in portata che temperatura, introducendo le seguenti prescrizioni minime a cui i misuratori devono attenersi: i)  $\Delta T_{max}/\Delta T_{min} \geq 10$ ; ii)  $\Delta T_{min} = 3, 5, 10K$ ; iii)  $q_p / q_i \geq 10$ .

### 2.1.2. Metodi indiretti

La contabilizzazione indiretta si basa sulla stima dell'energia termica emessa dai singoli corpi scaldanti o in determinate zone termoregolate dell'impianto di riscaldamento/raffreddamento. Nel caso di misura indiretta, però, la misura non è finalizzata alla esatta determinazione dell'energia termica emessa, ma alla ripartizione dei costi all'interno di un condominio. Pertanto, le unità di ripartizione  $UR_{cs}$ , anche se proporzionali all'energia emessa dal corpo scaldante, sono adimensionali e risultano funzione della differenza di temperatura, della potenza termica e del tempo.

Ciascun metodo indiretto utilizza una diversa stima della differenza di temperatura (a parità di potenza del corpo scaldante e tempo di integrazione) in funzione delle caratteristiche del sistema e della superficie di controllo sulla quale si effettua il bilancio termico.

Per determinare le unità di ripartizione,  $UR_{app,j}$  attribuibili a ciascun j-esimo appartamento, le unità di ripartizione,  $UR_{cs,i,j}$  di ciascun i-esimo corpo scaldante dell'appartamento vengono semplicemente sommate:

$$UR_{app,j} = \sum_{i=1}^{n_{cs,j}} UR_{cs,i,j} \quad (2)$$

Conseguentemente, la ripartizione dei consumi cosiddetti "volontari" in ciascun j-esimo appartamento viene effettuata sulla base della relazione:

$$\frac{UR_{app,j}}{UR_{edif}} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{cs,j}} UR_{cs,i,j}}{\sum_{j=1}^{n_{app,j}} \sum_{i=1}^{n_{cs,j}} UR_{cs,i,j}} \quad (3)$$

avendo indicato con  $UR_{app}$  e  $UR_{edif}$  le unità di ripartizione conteggiate rispettivamente negli appartamenti e nell'edificio, con  $n_{cs,j}$  e  $n_{app}$  il numero di corpi scaldanti nel singolo appartamento ed il numero totale di appartamenti.

### 2.1.2.a Ripartitori di Calore

I ripartitori di calore o heat cost allocator (HCA) sono attualmente i più diffusi tra i sistemi indiretti di contabilizzazione del calore. Tali dispositivi possono essere utilizzati esclusivamente su corpi scaldanti per i quali la superficie di emissione del calore risulta accessibile e vengono applicati sulle piastre radianti dei corpi scaldanti in posizione opportuna a rilevarne la temperatura media.

I ripartitori elettronici sono di norma costituiti da un involucro compatto contenente: i) un modulo di calcolo e trasmissione dei dati; ii) uno o più sensori di temperatura (di cui quello per la temperatura ambiente in alcune configurazioni può essere esterno al case); iii) un display di visualizzazione del conteggio; iv) un sistema di alimentazione; v) una piastra metallica di fissaggio e accoppiamento termico. I dispositivi attualmente utilizzati sono completamente elettronici e derivano dai meno evoluti ripartitori di calore ad evaporazione secondo EN 835 [16], oggi in disuso.

La contabilizzazione si basa sull'integrazione nel tempo della differenza di temperatura tra la superficie del corpo scaldante e l'ambiente in cui esso è installato. La norma EN 834 [15] prevede le seguenti tre tipologie di ripartitori:

- a sensore unico, che misurano e registrano la temperatura media dell'elemento scaldante mediante un sensore di temperatura e usano la temperatura ambiente convenzionale (20°C);
- a due sensori, che misurano e registrano mediante due sensori sia la temperatura dell'elemento scaldante che la temperatura ambiente, oppure una temperatura avente con quest'ultima un rapporto ben definito;
- a sensore multiplo, che (analogamente alla precedente tipologia) misurano sia la temperatura dell'elemento scaldante che quella dell'aria ambiente, ma che impiegano almeno due sensori per la misura della temperatura media del radiatore.

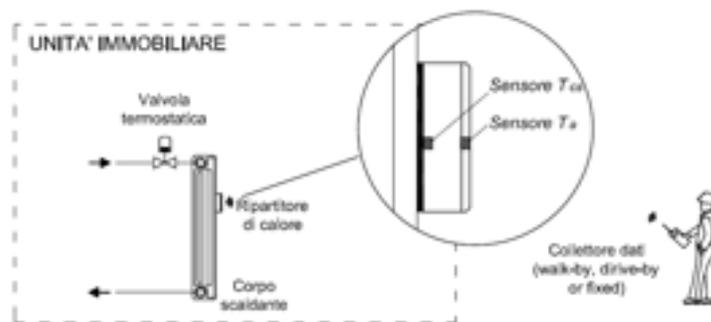
Lo standard EN 834 [15] non fornisce in modo esplicito l'algoritmo di calcolo da utilizzare, ma definisce due tipologie di conteggio: i) "non rated displayed reading"; ii) "rated displayed reading". Nella prima, le unità di conteggio di ciascun corpo scaldante sono stimate sulla base dell'integrale rispetto al tempo della sola differenza di temperatura tra la superficie del corpo scaldante e l'ambiente,  $\Delta T_{HCA}$  (e solo successivamente corrette); nella seconda le unità di ripartizione sono ottenute introducendo direttamente sul ripartitore specifici fattori di valutazione  $K$  mediante un'equazione del tipo:

$$UR_{CS} = K_C \cdot K_Q \cdot K_T \int_{\theta} \left( \frac{\Delta T_{HCA}}{60} \right)^n d\theta \quad (4)$$

dove  $n$  è l'esponente caratteristico del corpo scaldante (nei ripartitori commerciali tipicamente  $n=1.3$ ) e i fattori di valutazione  $K_C$ ,  $K_Q$  e  $K_T$  rappresentano, nelle condizioni di riferimento di laboratorio, rispettivamente il fattore correttivo:

- della resistenza termica sui sensori di temperatura (corpo scaldante e ambiente);
- della potenza termica nominale;
- della variazione di emissione termica con temperature interne di progetto minori di quella (dell'aria) di riferimento (solo per ripartitori a sensore unico).

In particolare, il fattore di valutazione  $K_c$  tiene conto del fatto che i ripartitori di calore non misurano la reale differenza di temperatura tra fluido termovettore ed ambiente, ma un valore ad essa proporzionale in quanto: i) la temperatura superficiale misurata in uno specifico punto è diversa dalla temperatura media superficiale del corpo scaldante (vedi Figura 4); ii) le resistenze termiche di contatto tra piastra di accoppiamento e corpo scaldante influenzano ulteriormente la misura della temperatura superficiale; iii) nei ripartitori a due sensori la misura della temperatura dell'aria è influenzata dagli scambi convettivi e radiativi interni all'involucro del ripartitore.



**Figura 4 - Schema funzionamento HCA**

Pertanto, il fattore  $K_c$  risulta funzione delle caratteristiche del ripartitore, della tipologia del corpo scaldante (ma non della sua potenza termica) e delle condizioni di installazione. Purtroppo, le condizioni di installazione sono generalmente diverse da quelle di laboratorio; per questo motivo il valore del  $K_c$  nelle effettive condizioni di utilizzo può differire molto da quello nominale determinato dal costruttore, soprattutto quando l'installazione non è effettuata in modo conforme alle prescrizioni tecniche (i.e. posizionamento errato, piastra di accoppiamento non adeguata).

Il fattore di valutazione  $K_Q$ , invece, è indicativo della potenza termica nominale del corpo scaldante. Nelle condizioni nominali di installazione ed esercizio, tale fattore è funzione esclusivamente delle caratteristiche, della tipologia e della taglia del corpo scaldante. Purtroppo, raramente le condizioni di installazione e di esercizio del corpo scaldante risultano uguali a quelle nominali di prova, quindi la potenza effettiva emessa dal corpo scaldante dipende, oltre che dalle temperature di funzionamento, da fattori quali l'installazione, i collegamenti idraulici e la verniciatura.

Anche il valore di  $K_Q$  nelle effettive condizioni di utilizzo può differire da quello stimato dal progettista del sistema di ripartizione dei costi (i.e. contabilizzazione), sia per l'impossibilità di determinare con precisione i fattori di correzione relativi alle condizioni di installazione ed esercizio di tutti i singoli corpi scaldanti, sia per l'assenza di certificazione dei terminali di emissione esistenti.

### 2.1.2.b Totalizzatori dei tempi di inserzione

I sistemi di ripartizione che utilizzano i totalizzatori dei tempi di inserzione associati a valvole di zona sono stati tra i primi sistemi di contabilizzazione indiretta a comparire sul mercato nazionale, nonché i primi ad essere normati a livello nazionale.

Nei primi impianti centralizzati con sottostazioni di zona venivano spesso impiegati i primitivi ed ormai obsoleti sistemi di contabilizzazione indiretta costituiti da semplici “conta-ore” che registravano i tempi di apertura della valvola di zona, per mezzo dei quali venivano successivamente ripartite le spese di riscaldamento. L’evoluzione tecnologica ha successivamente consentito lo sviluppo di soluzioni più complesse che, mediante l’impiego di totalizzatori dei tempi di inserzione compensati sono in grado di effettuare una ripartizione più accurata dei consumi di energia delle singole utenze, che non fosse legata unicamente ai tempi di apertura della valvola. La compensazione dei tempi di inserzione viene infatti effettuata sulla base della differenza di temperatura: i) tra il fluido termovettore e l’ambiente nel caso dei totalizzatori compensati con la temperatura media del fluido termovettore (ITC-TC); ii) dei gradi giorno effettivi nel caso dei totalizzatori compensati in gradi giorno (ITC-DDC) (vedi Figura 5).

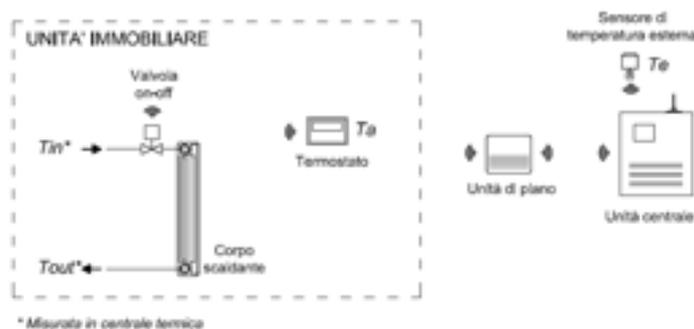


Figura 5 - Schema funzionamento dei sistemi di contabilizzazione indiretti con ITC

I sistemi di contabilizzazione indiretti con totalizzatori dei tempi di inserzione compensati in temperatura media del fluido termovettore ITC-TC sono costituiti da: i) un modulo di calcolo e trasmissione dei dati; ii) una valvola termostatica ed un attuatore (per ciascuna zona termostata); iv) un sensore on-off sulla valvola per il controllo dei tempi di inserzione; v) due sensori di temperatura di mandata e ritorno del fluido termovettore (installati in centrale termica); vi) un sensore di temperatura ambiente (opzionale) ed vii) un display di visualizzazione del conteggio; viii) un sistema di alimentazione. I sistemi indiretti con totalizzatori dei tempi di inserzione compensati in gradi giorno ITC-DDC presentano in luogo del sensore di temperatura per ciascun ambiente un unico sensore di temperatura esterno per la misura dei gradi giorno effettivi.

I termostati ambiente installati nelle unità immobiliari (i.e. zone o corpi scaldanti) consentono di regolare la temperatura ambiente attivando e disattivando le valvole di zona o di corpo scaldante con azione “tutto o niente” di potenza nota. In entrambi i casi, i tempi di apertura delle valvole dei terminali scaldanti o delle valvole di zona vengono registrati dal totalizzatore dei tempi di inserzione e corretti con le rispettive temperature.

Le unità di ripartizione durante l’intera stagione di riscaldamento,  $UR_{CS,AV}$ , sono calcolate mediate l’integrale della potenza istantanea,  $\dot{Q}_i$ , nel tempo di apertura del terminale durante la stagione di riscaldamento:

$$UR_{CS,AV,k} = \int_{\theta_{AV,k}} \dot{Q}_i d\theta = K \dot{Q}_{CS} \int_{\theta_{AV,k}} \left( \frac{T_{m,i} - T_{a,i}}{T_{m,c} - T_{a,c}} \right)^n d\theta \quad (5)$$

avendo indicato con: i)  $T_{m,i}$  la temperatura media del fluido termovettore (tra mandata e ritorno dell'impianto) misurata nel tempo effettivo di apertura valvola  $\vartheta_{AV}$ , ii)  $T_{a,i}$  la temperatura dell'ambiente (convenzionalmente posta pari a 20°C oppure misurata), iii)  $T_{m,c}$  e  $T_{a,c}$  le corrispondenti temperature convenzionali, iv)  $K$  il "coefficiente di proporzionalità tra unità di ripartizione e calore effettivo utilizzato", la cui determinazione è esplicitamente prevista in determinate condizioni al par. 9.3 della UNI 11388 [17].

La potenza istantanea  $\dot{Q}_i$ , infatti, differisce da quella nominale del corpo scaldante,  $\dot{Q}_{CS}$ , essenzialmente perché la differenza di temperatura tra ambiente e corpo scaldante nelle condizioni di reale funzionamento è diversa da quella considerata (in laboratorio) ai fini dell'individuazione della potenza nominale. Nel caso in cui la termoregolazione interessi zone termiche a corpo multiplo, la potenza nominale della zona può essere calcolata sulla base della somma delle potenze dei singoli corpi scaldanti presenti in ciascuna zona.

La norma UNI 11388 [17] considera anche l'energia fornita dal corpo scaldante nel k-esimo transitorio dopo la chiusura della valvola. Questo regime si esaurisce normalmente in un tempo pari a 5 volte la costante di tempo del corpo scaldante e, durante questo tempo, il totalizzatore conteggia l'energia scambiata mediante la formula seguente:

$$\begin{aligned} UR_{CS,CV,k} &= \int_{\theta_{CV,k}} \dot{Q}_i d\theta \\ &= K \dot{Q}_{CS} \left( \frac{T_{m,i,c} - T_{a,i}}{T_{m,c} - T_{a,c}} \right)^n \int_{\theta_{CV,k}} e^{-n\frac{\theta}{\tau}} d\theta \\ &= K \dot{Q}_{CS} \left( \frac{T_{m,i,c} - T_{a,i}}{T_{m,c} - T_{a,c}} \right)^n \frac{\tau}{n} \left( 1 - e^{-n\frac{\theta_{CV,k}}{\tau}} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

avendo indicato con  $T_{m,i,c}$  la temperatura media del fluido termovettore tra mandata e ritorno al momento della chiusura della valvola,  $\tau$  la costante di tempo del/i corpo/i scaldante/i e con  $\theta_{CV}$ , il tempo di chiusura della valvola. Qualora la valvola venga riaperta prima dell'esaurimento del transitorio, il totalizzatore torna a conteggiare l'energia scambiata mediante la (5).

La sommatoria delle unità di ripartizione conteggiate durante il transitorio di chiusura della valvola restituisce la correzione totale. La correzione, quindi, tiene in debito conto lo scambio termico esistente durante il tempo di chiusura della valvola. La costante di tempo  $\tau$  del corpo scaldante riportata nella norma tecnica nazionale UNI 11388 [17] è compresa tra 0,15 (termoconvettore) e 10 ore (pannello pavimento non isolato) e può essere valutata sulla base del rapporto tra la capacità termica e la trasmittanza termica del corpo scaldante nelle condizioni di riferimento.

Infine, le unità di ripartizione complessive del corpo scaldante in esame sono ottenute mediante la formula seguente:

$$UR_{CS} = \sum_{k=1}^n (UR_{CS,AV,k} + UR_{CS,CV,k}) \quad (7)$$

Nel caso di totalizzatori compensati con i gradi giorno le unità di ripartizione vengono invece stimate in conformità alla norma tecnica nazionale UNI 9019 [18] sulla base della relazione (7):

$$\begin{aligned}
 UR_{CS} &= K \sum_{k=1}^n \dot{Q}_{CS} \left( \frac{T_{a,c} - T_{e,i}}{T_{a,c} - T_{e,c}} \right) \theta_{k,e} \\
 &= K \sum_{k=1}^n \dot{Q}_{CS} \left( \frac{GG_i}{T_{a,c} - T_{e,c}} \right) \left[ \theta_{AV,k} + \tau \left( 1 - e^{-\frac{\theta_{CV,k}}{\tau}} \right) \right]
 \end{aligned} \tag{8}$$

avendo indicato con  $T_{a,c}$  e  $T_{e,c}$  le temperature ambiente ed esterna convenzionali, con  $T_{e,i}$  la temperatura esterna misurata nel tempo effettivo di apertura valvola  $\vartheta_{AV}$ , e  $K$  il “coefficiente di proporzionalità tra unità di ripartizione e calore effettivo utilizzato”, la cui determinazione non è prevista dalla UNI 9019 [18]. Al fine di considerare il transitorio durante la chiusura della valvola, la norma introduce un tempo di inserzione equivalente,  $\vartheta_{k-e}$ , funzione del tempo effettivo di apertura e chiusura della valvola ( $\vartheta_{AV,k}$  e  $\vartheta_{CV,k}$ , rispettivamente) e della costante di tempo  $\tau$  del corpo scaldante.

La norma UNI 11388 [17] prevede per i totalizzatori dei tempi di inserzione compensati con la temperatura media del fluido termovettore un errore massimo tollerato nella misura di temperatura pari a  $\pm 1^\circ\text{C}$  e di  $\pm 0,5\%$  sulla misura dei tempi di inserzione. Nessuna prescrizione a riguardo è invece presente nella UNI 9019 [18] per quelli compensati in gradi giorno.

## 2.2 Problematiche metrologiche dei sistemi di contabilizzazione diretti ed indiretti

### 2.2.1 Deriva ed effetti di installazione nella misura diretta

Un HM, come detto, è costituito da tre sottounità: un sensore di flusso, una coppia di sensori di temperatura ed un modulo di calcolo. Per ciascuna sottounità esistono specifiche problematiche che ne influenzano le prestazioni metrologiche in campo.

La MID [19] non impone regole relative alle verifiche periodiche degli strumenti metrico-legali, 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. A tale riguardo, il Ministero per lo Sviluppo Economico ha recentemente emesso il Decreto n.155/2013 [31].

Il decreto definisce i criteri e le periodicità delle verifiche periodiche e dei controlli metrologici casuali per i soli HM approvati MID. In relazione agli EMT in verifica periodica, il decreto stabilisce che questi siano pari ai corrispondenti EMT per la valutazione della conformità MID, non essendo fatta a riguardo alcuna specificazione nelle norme armonizzate (i.e. EN 1434) o OIML (i.e. OIML R75). Per i controlli casuali gli EMT sono invece maggiorati del 50%. In particolare, le periodicità delle verifiche periodiche in esercizio sono definite nell’Allegato I al decreto in funzione della portata permanente,  $q_p$ , e del tipo di sensore per la misura del volume. Per sensori di tipo statico (e.g. ultrasuoni, elettromagnetici) si stabilisce una periodicità di 8 e 9 anni (rispettivamente per portate maggiori o minori di  $3 \text{ m}^3/\text{h}$ ), mentre per i sensori di tipo meccanico di 5 e 6 anni (rispettivamente per portate maggiori o minori di  $3 \text{ m}^3/\text{h}$ ).

La verifica periodica viene effettuata da Organismi di Ispezione accreditati ai sensi della norma ISO 17020 [37] da Accredia, ente unico di accreditamento, e riconosciuti da Unioncamere. I controlli metrologici casuali sui HM in servizio sono invece effettuati ad intervalli casuali, senza periodicità e senza preavviso, dagli Uffici Metrici delle Camere di Commercio competenti per territorio.

Purtroppo, gli effetti di installazione non sono pienamente disciplinati dalla metrologia legale. Questi sono principalmente rappresentati da:

- 1) effetti fluidodinamici sul sensore di flusso (presenza di curve, gomiti, riduzioni o cambiamenti di sezione, valvole, ecc.);

- 2) effetti sulla coppia di sensori di temperatura (dovuti a una profondità di immersione non adeguata, resistenze di contatto, ecc.).
- 3) effetti sul fluido termovettore.

I sensori di flusso sono fortemente influenzati da effetti di installazione di natura fluidodinamica, essenzialmente legati alle condizioni in cui il misuratore è installato (e.g. numero di tratti rettilinei a monte e a valle, installazione verticale/orizzontale ecc.), che possono causare errori di misura elevati e prematura usura dei componenti. Il flusso può essere sottoposto a due tipologie di disturbi, denominati dalle norme tecniche di riferimento “*swirl*” e “*velocity profile distortion*”, ovvero un avvitemento del flusso o una distorsione del profilo di velocità.

Lo *swirl* può essere causato da diverse configurazioni di installazione; l’esempio tipico è rappresentato da una configurazione con due o più curve della tubazione su piani diversi. Essi possono generarsi anche dopo una pompa centrifuga, un ingresso del fluido termovettore in direzione tangenziale alla tubazione principale, ecc. Una distorsione del profilo di velocità è invece tipicamente causata da un’ostruzione parziale della tubazione (e.g. valvole parzialmente chiuse, valvole a farfalla, regolatore di portata o pressione, ecc.) o da una singola curva della tubazione.

Per evitare o al più attenuare i disturbi tipo *swirl* risulta importante che, nei casi in cui siano presenti curve su piani diversi o pompe, il misuratore sia installato a monte delle cause di disturbo e il più lontano possibile da esse. Inoltre, l’installazione delle pompe deve essere sempre effettuata in modo che le sue connessioni idrauliche non risultino tangenziali alla linea principale sulla quale è installato il misuratore. Le deformazioni del profilo di velocità sono più semplicemente eliminabili adottando opportuni accorgimenti di installazione. È importante evitare brusche riduzioni di sezione, utilizzare guarnizioni adeguate ed installarle correttamente (senza causare ostruzioni), impiegare a monte e a valle valvole che, in posizione aperta, non creino disturbo al flusso. Inoltre, dispositivi come regolatori di portata o di pressione, valvole di ritegno installate a monte, possono creare dei disturbi al flusso che si propagano ben oltre i  $10D$  di tubazione. Infine, la direzione dell’installazione (e.g. orizzontale o verticale) può determinare sensibili effetti sulle prestazioni metrologiche e questo dovrebbe essere sempre indicato dal costruttore.

Il costruttore dovrebbe altresì specificare le modalità di installazione ovvero i tratti rettilinei a monte e a valle del misuratore a garanzia delle prestazioni metrologiche per differenti tipologie di disturbo. In assenza di ciò una regola empirica comunemente accettata è quella di prevedere un tratto rettilineo a monte e a valle rispettivamente pari ad almeno 10 e 5 volte il diametro<sup>3</sup>. Ovviamente, tale regola rappresenta spesso solo un compromesso pratico: più lungo sarà il tratto rettilineo a monte e valle del sensore, minore sarà l’effetto del disturbo. Idonei raddrizzatori di flusso, possono essere impiegati per ridurre le lunghezze dei tratti rettilinei a monte e a valle del sensore di flusso, purché il loro utilizzo non vada in conflitto con le istruzioni rilasciate dal costruttore del misuratore e certificate dall’Organismo Notificato in sede di approvazione MID.

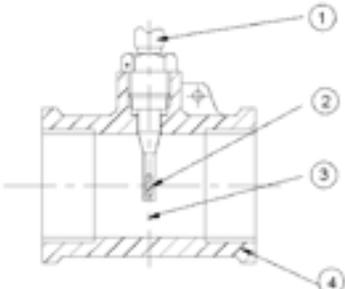
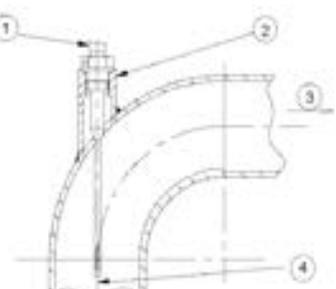
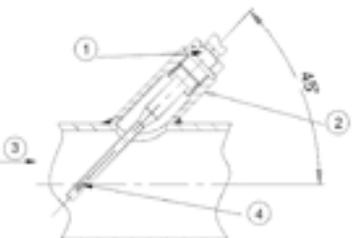
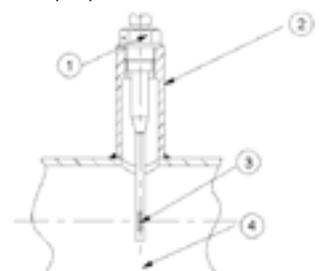
Nella misura della temperatura in un fluido in movimento, si possono riscontrare errori provocati dai flussi di calore scambiati tra sonda e ambiente circostante. In particolare si possono registrare flussi conduttivi (legati al contatto tra la sonda e la condotta che si può trovare ad una temperatura più alta o più bassa del fluido che scorre all’interno) e radiativi (dovuti all’irraggiamento tra sonda e pareti interne della tubazione che lo circondano). Questi ultimi sono decisamente ininfluenti in condotti in cui defluiscono liquidi a causa della prevalenza dello scambio termico convettivo tra fluido e sonda. Per limitare invece gli effetti conduttivi è fondamentale garantire che la profondità di immersione della sonda di temperatura sia adeguata e questa condizione può essere critica nelle condotte di ridotto diametro. In ogni caso, per far sì che gli effetti sistematici sulla coppia di sensori di temperatura, si compensino è bene che i sensori di temperatura di mandata e di ritorno siano installati in maniera identica e, ove possibile, in modo simmetrico su tubi di uguale dimensione e profilo di velocità. Ulteriori accorgimenti nell’installazione dovrebbero essere adottati nell’isolamento termico della testa dei sensori di temperatura ed eventualmente della tubazione in corrispondenza del sensore volumetrico.

---

<sup>3</sup> La norma UNI EN 1434-6 relativa ai requisiti di installazione dei contatori di energia termica prevede 10 D a monte e 8 D a valle.

Questi effetti possono diventare determinanti nel caso in cui i contatori di energia termica operano su ridotte differenze di temperatura come nel caso di utilizzo per la misura dell'energia di raffreddamento o nella climatizzazione invernale a bassa temperatura (e.g. impianti radianti a pavimento, a parete, ecc.). In tal caso deve essere dedicata massima cura sia nella scelta dei sensori di temperatura che nella loro installazione. Per applicazioni in modalità di raffreddamento, qualora vengano utilizzate tasche termometriche, è fondamentale che queste siano installate con apertura verso il basso in modo da evitare l'accumulo di condensa. In Tabella 8 sono riportate alcune delle raccomandazioni per la corretta installazione dei sensori di temperatura previste dalla norma EN 1434-2 [21].

**Tabella 8 - Raccomandazioni di installazione per i sensori di temperatura**

Dim. tubo	Tipologia di installazione	Prescrizioni
DN 15 DN 20 DN 25	Sonda con raccordo filettato 	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Solo per sonde corte montate direttamente senza pozzetto (tipo DS)</li> <li>2. Elemento sensibile in corrispondenza dell'asse della tubazione o oltre</li> <li>3. Asse della sonda perpendicolare e nello stesso piano di quello della tubazione</li> <li>4. Raccordo</li> </ol>
≤ DN 50	Sonda su curva 	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Sia per sonde lunghe montate direttamente senza pozzetto (tipo DL) che con pozzetto (tipo PL)</li> <li>2. Capo</li> <li>3. Direzione del flusso</li> <li>4. Asse della sonda coincidente con quello della tubazione.</li> </ol>
≤ DN 50	Sonda inclinata 	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Sia per sonde lunghe montate direttamente senza pozzetto (tipo DL) che con pozzetto (tipo PL)</li> <li>2. Capo</li> <li>3. Direzione del flusso</li> <li>4. Elemento sensibile in corrispondenza dell'asse della tubazione o oltre</li> </ol>
da DN 65 a DN 250	Sonda perpendicolare 	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Sia per sonde lunghe montate direttamente senza pozzetto (tipo DL) che con pozzetto (tipo PL)</li> <li>2. Capo</li> <li>3. Elemento sensibile in corrispondenza dell'asse della tubazione o oltre</li> <li>4. Asse della sonda perpendicolare e nello stesso piano di quello della tubazione</li> </ol>

Esistono, infine, una serie di fattori legati al modulo di calcolo del contatore di energia termica che possono condurre, in particolari situazioni, ad errori anche significativi sulla misura dell'energia termica. Le

proprietà del fluido termovettore sono infatti stimate dal calcolatore, secondo quanto previsto dalle relative norme armonizzate, in funzione delle sole temperature misurate, senza tenere conto della reale composizione del fluido termovettore. Tale fluido in molti casi è una miscela di acqua e glicole (o altri additivi), con proprietà termofisiche che variano in funzione della composizione scelta nonché del tipo di additivo. Le caratteristiche del fluido, inoltre, in impianti condominiali possono cambiare notevolmente nel tempo arricchendosi di sospensioni solide e altri contaminanti solubili.

### 2.2.2. Deriva ed effetti di installazione nella misura indiretta

Anche nelle misure indirette, così come in quelle dirette, esistono numerosi effetti di installazione e strumentali che possono modificare sostanzialmente le prestazioni metrologiche certificate dai costruttori nelle condizioni nominali [38].

I principali effetti sono ascrivibili a:

- 1) le differenze tra le potenze termiche nominali e quelle effettive;
- 2) gli errori sistematici dovuti all'installazione delle sonde.
- 3) la deriva dei sensori di temperatura;

La determinazione della potenza termica nominale dei radiatori e convettori è codificata dalle norme UNI EN 442-1 [39] e UNI EN 442-2 [40]. La potenza termica nominale viene determinata sulla base di una differenza di temperatura media tra radiatore e ambiente di 50°C. In particolare, la norma definisce le seguenti condizioni nominali di prova: temperatura media superficiale del radiatore,  $T_m$ , pari a 70°C (temperatura dell'acqua in ingresso di 75°C e di uscita pari a 65°C); temperatura dell'aria ambiente,  $T_a$ , pari a 20°C. La UNI EN 442-2 definisce inoltre i metodi di prova, l'accuratezza e la progettazione delle prove per i dispositivi di riscaldamento che utilizzano acqua o vapore a temperature inferiori a 120 °C. Nel caso di corpi scaldanti installati precedentemente alla pubblicazione delle norme EN, in mancanza di dati certi certificati dal costruttore, è possibile ricorrere in ambito nazionale al *metodo dimensionale*, codificato dalla norma UNI 10200 [14], valido per corpi scaldanti compresi dalla stessa norma, oppure, laddove esistenti, certificazioni che si riferiscono alle norme nazionali e internazionali UNI 6514:1987, BS 3528, DIN 4722, ISO 3150. Il calcolo della potenza termica  $\dot{Q}$  secondo la norma EN 442 [39] [40], è basato sulla seguente equazione:

$$\dot{Q} = K_m \Delta T^n = K_m \left[ \frac{1}{2} (T_{f,i} + T_{f,u}) - T_a \right]^n \quad (9)$$

dove  $K_m$  rappresenta la costante di scambio termico del corpo scaldante, mentre  $T_{f,i}$  e  $T_{f,u}$  sono, rispettivamente, la temperatura di ingresso e di uscita del fluido dal corpo scaldante. L'esponente  $n$  assume valori generalmente compresi tra 1.2 e 1.4 e dipende dal rapporto tra potenza scambiata per irraggiamento e per convezione (tipico per ogni modello di corpo scaldante). Per differenze di temperatura diverse da quelle nominali (e.g.  $\Delta T=60^\circ\text{C}$  con una temperatura dell'acqua in ingresso di 90°C, di uscita pari a 70°C e ambiente pari a 20°C) la potenza termica scambiata può essere semplicemente calcolata sulla base della relazione:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{50} \left( \frac{\Delta T}{50} \right)^n \quad (10)$$

Purtroppo, raramente l'effettiva potenza termica operativa del radiatore nelle condizioni di temperatura di riferimento è uguale a quella nominale stimata in laboratorio in condizioni di installazione "standard". Infatti, la potenza termica emessa dal radiatore è influenzata, oltre che dalle temperature di funzionamento, da fattori quali la tipologia di installazione, i collegamenti idraulici e la pittura. Si può tenere conto di tali fattori mediante l'introduzione di fattori correttivi quali:

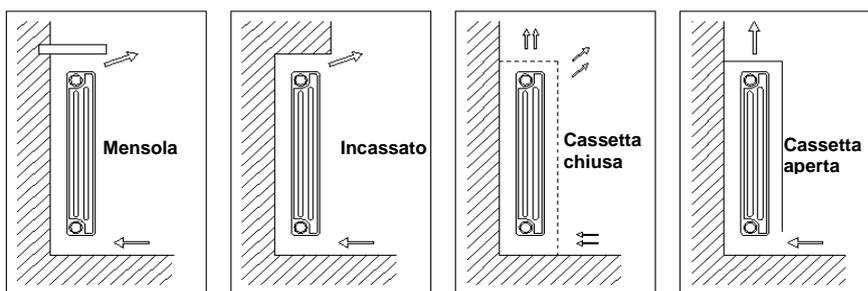
$$\dot{Q}_{nom,corr} = F \dot{Q}_{nom} = F_{in} F_{at} F_{pa} \dot{Q}_{nom} \tag{11}$$

avendo indicato con  $\dot{Q}_{nom}$  e  $\dot{Q}_{nom,corr}$  la potenza nominale e quella nelle condizioni di installazione reali (W),  $F_{in}$ , fattore correttivo dovuto all'installazione del radiatore;  $F_{at}$ , fattore correttivo legato alle connessioni idrauliche del radiatore;  $F_{pa}$ , fattore correttivo dovuto alla verniciatura della superficie del radiatore. I principali parametri di influenza della resa termica sono elencati in Tabella 9.

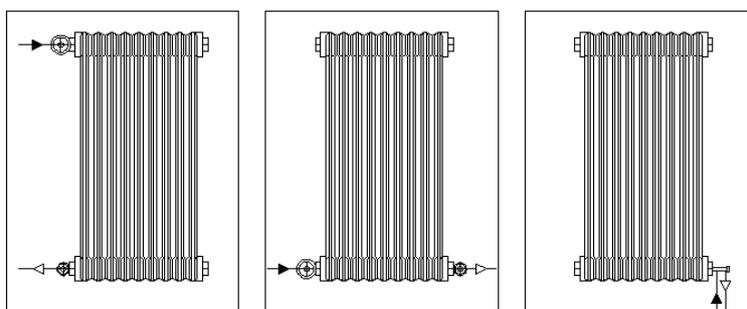
Pertanto, oltre all'incertezza dovuta alla certificazione della potenza nominale del radiatore, stimata variabile tra l'1% (radiatori certificati ai sensi della UNI EN 442) ed il 10% (per radiatori realizzati negli anni '60), è necessario prendere in considerazione le effettive condizioni di installazione [41] [42]. A tale riguardo gli autori stimano un'incertezza sulla potenza effettiva compresa tra il 2% ed il 20% nelle effettive condizioni di installazione.

**Tabella 9 - Fattori che influenzano la potenza termica di un corpo scaldante in campo**

<i>Fattori che incrementano</i>	<i>Fattori che decrementano</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Diminuzione della distanza tra radiatore e pavimento</li> <li>- Aumento dello spazio tra radiatore e parete laterale posteriore</li> <li>- Inserimento di alette</li> <li>- Connessioni idrauliche (linea di alimentazione sulla parte superiore del radiatore)</li> <li>- Applicazione di un riflettore alla parete posteriore del radiatore</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Diminuzione delle portate di fluido termovettore</li> <li>- Presenza di incrostazioni e riduzioni delle sezioni interne</li> <li>- Presenza di bolle d'aria</li> <li>- Presenza di pannelli schermanti a ridosso del radiatore (fino al 70%)</li> <li>- Presenza di mensole</li> <li>- Installazione in cassette incassate</li> <li>- Utilizzo di vernici metalliche (fino al 10%)</li> <li>- Montaggio a ridosso della parete verticale</li> </ul>



a)



b)

**Figura 6 – Corpi scaldanti: a) tipiche installazioni, b) tipiche connessioni idrauliche.**

Per quanto concerne gli errori sistematici sulla differenza di temperatura dovuti all'installazione delle sonde, questi sono notevolmente diversi in funzione delle tipologie di strumenti e metodi impiegati e sono tanto più impattanti sull'incertezza della ripartizione quanto minore è la differenza di temperatura misurata.

Nei ripartitori di calore, gli errori di installazione più frequenti sono in parte ineliminabili in quanto dovuti ad errori di modello, in parte eliminabili in quanto riconducibili ad un'impropria collocazione o installazione del ripartitore (e.g. installazione laterale, sistema di staffaggio inadeguato).

I primi dovrebbero essere notevolmente ridotti mediante un'idonea caratterizzazione del ripartitore ovvero del coefficiente  $K_C$  che, come detto, tiene conto della differenza sistematica tra la misura della differenza di temperatura effettuata dal ripartitore e l'effettiva differenza di temperatura media logaritmica tra fluido termovettore e ambiente. Un interessante studio sperimentale effettuato presso la camera di prova dei corpi scaldanti del Politecnico di Torino [43] ha individuato il punto ottimale di misura (per un ridotto numero di ripartitori) ad un'altezza di circa il 60% dell'altezza totale del corpo scaldante, in luogo del 75% generalmente suggerito dai costruttori. In ogni caso pur ottimizzando la posizione del ripartitore, data la complessità dei regimi e dei campi termofluidodinamici tipici di ciascun modello di radiatore, il valore del  $K_C$  (e quindi l'errore di modello sulla stima della differenza di temperatura) dipende sia dai parametri di installazione (e.g. posizione delle valvole, tipologia di corpo scaldante) che di funzionamento del corpo scaldante (e.g. portata effluente, temperatura di mandata). D'altra parte, il coefficiente  $K_C$  dipende dall'efficacia dell'accoppiamento sensore/radiatore (che può essere molto critico per radiatori con elementi tubolari o con forme non convenzionali).

Tenendo conto dei massimi errori ammissibili previsti dalla EN 834, gli autori stimano prudenzialmente che l'incertezza di  $K_C$  possa variare in funzione della differenza di temperatura effettiva misurata tra circa 3% (corrispondente ad una differenza di temperatura pari a circa 40°C) e 12% (corrispondente ad una differenza di temperatura pari a circa 5°C).

Nei totalizzatori di tempi di inserzione ITC-TC, gli errori sono invece dovuti in parte al modello (che prevede la misura della temperatura media del fluido termovettore sulla mandata e ritorno dell'intero impianto in luogo di quella del singolo corpo scaldante o zona termoregolata) in parte agli effetti di installazione (laddove i sensori di temperatura non siano adeguatamente posizionati), in parte, infine, alla temperatura ambiente quando posta convenzionalmente pari a 20 °C e non misurata.

Nel primo caso l'errore che ne consegue sulla stima dell'energia emessa da ciascun corpo scaldante (o zona) è tanto maggiore quanto peggiore è il bilanciamento degli impianti e la regolazione climatica del generatore. Anche le dispersioni termiche sulla distribuzione (e la conseguente caduta di temperatura) possono incrementare ulteriormente questa incertezza soprattutto nei vecchi impianti non perfettamente coibentati e per gli appartamenti più distanti dalla centrale termica. La norma UNI 11388 [17] prevede specifiche prescrizioni su: i) gli errori massimi sulla misura di temperatura (pari a 1°C); ii) il bilanciamento degli impianti (la differenza tra la temperatura di ingresso al corpo scaldante più svantaggiato e la temperatura di mandata deve essere inferiore ad un valore compreso tra 1°C e 6°C in funzione della temperatura di mandata); iii) la regolazione climatica (richiamando la UNI EN 12098).

Per quanto riguarda gli errori di installazione sulle sonde di temperatura vale quanto già detto per i contatori di energia termica diretti.

Gli autori stimano prudenzialmente che l'incertezza sulla misura della differenza di temperatura possa determinare un contributo sull'incertezza della ripartizione compreso tra 3 al 13%.

Nei totalizzatori dei tempi di inserzione ITC-DDC gli errori sono dovuti principalmente al modello che prevede la misura della sola temperatura ambiente esterna in luogo della temperatura media del fluido termovettore per la compensazione dei consumi al variare delle condizioni climatiche. Anche in questo caso l'errore è tanto maggiore quanto peggiore è il bilanciamento dell'impianto e, soprattutto, la regolazione climatica del generatore. La norma UNI 9019 prevede specifiche prescrizioni su: i) il bilanciamento degli

impianti (minore di 2°C richiamando a tale scopo la norma UNI EN 14336); ii) la regolazione climatica (richiamando la UNI EN 12098).

Gli autori stimano prudenzialmente che l'incertezza sul modello di correzione sulla temperatura ambiente esterna possa essere superiore al 15%.

Infine, anche la deriva dei sensori di temperatura può determinare incertezze non trascurabili che possono aumentare sensibilmente nel tempo (essendo questo effetto tipicamente cumulativo). Questi effetti sono certamente maggiori per termistori e termocoppie rispetto ai termometri a resistenza al platino.

### 2.3 *Analisi metrologica dei sistemi diretti*

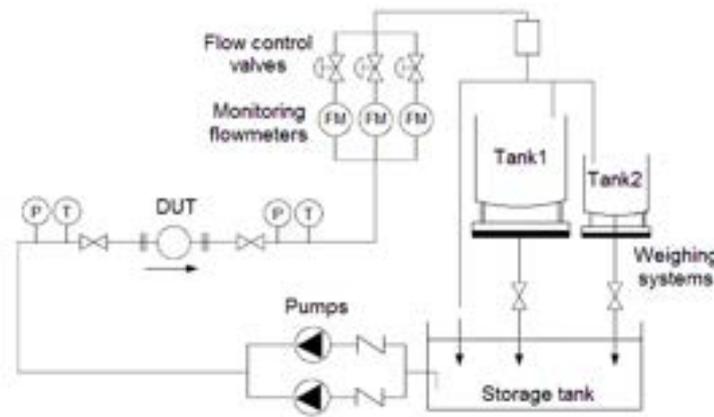
Durante l'attività di ricerca sono stati analizzati i principi di misura e le problematiche connesse alla misura diretta dei flussi di energia termica. In particolare è stata effettuata:

- un'analisi metrologica di HM completi con sensori di flusso di tipo statico e tradizionale;
- un'analisi degli effetti di installazione (ostruzione di flusso e generatore di swirl orario) di HM completi con sensori di flusso di tipo statico e tradizionale.

Le indagini sperimentali sono state condotte presso il laboratorio LAMI dell'Università di Cassino e del Lazio Meridionale. 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 dm<sup>3</sup> e 60 dm<sup>3</sup>) 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 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> e per diametri nominali da DN15 a DN40. La Figura 7 mostra uno schema del banco e il dispositivo di controllo durante le prove effettuate.



a)



b)

Figura 7 – Laboratorio LAMI: a) banco contatori di energia termica, b) schema di funzionamento

### 2.3.1 Accuracy test al variare della temperatura del fluido.

In Tabella 10, Tabella 11 e in Figura 6, Figura 7 si riportano i risultati delle prove di accuratezza al variare della temperatura del fluido ottenuti sul contatore statico ad ultrasuoni e meccanico a turbina con temperatura di mandata pari a 90°C e di ritorno 70°C.

Tabella 10 - Risultati "Accuracy test" a diverse temperature contatore statico US

	Portata Nominale [dm <sup>3</sup> /h]	Portata Misurata [dm <sup>3</sup> /h]	Temp. liquido misurata [°C]	Massa liquido riferimento [kg]	Volume liquido misurato [dm <sup>3</sup> ]	Volume liquido riferimento [dm <sup>3</sup> ]	Errore [%]	MPE [%]
q1	5000	4962.7	11.9	198.32	200.29	198.58	0.86	2.01
	5000	5028.3	17.5	200.94	203.97	201.37	1.29	2.01
	5000	4977.0	49.2	198.89	201.67	201.38	0.14	2.01
q2	1800	1728.6	11.8	95.94	97.58	96.07	1.57	2.03
	1800	1802.0	19.2	100.06	101.75	100.31	1.43	2.03
	1800	1733.0	49.6	96.20	98.12	97.43	0.70	2.03
q3	500	500.1	11.8	49.96	50.83	50.04	1.59	2.10
	500	510.1	19.3	50.96	51.62	51.10	1.03	2.10
	500	524.0	50.0	52.36	52.68	53.05	-0.69	2.10
q4	160	162.9	11.8	25.42	25.75	25.46	1.15	2.31
	160	163.9	19.3	25.60	26.10	25.66	1.71	2.31
	160	168.0	49.7	26.30	26.62	26.64	-0.08	2.31
q5	50	49.4	11.8	9.86	9.81	9.87	-0.65	3.00
	50	52.0	19.5	10.39	10.45	10.42	0.29	3.00
	50	53.5	48.8	10.69	10.16	10.82	-6.14	3.00

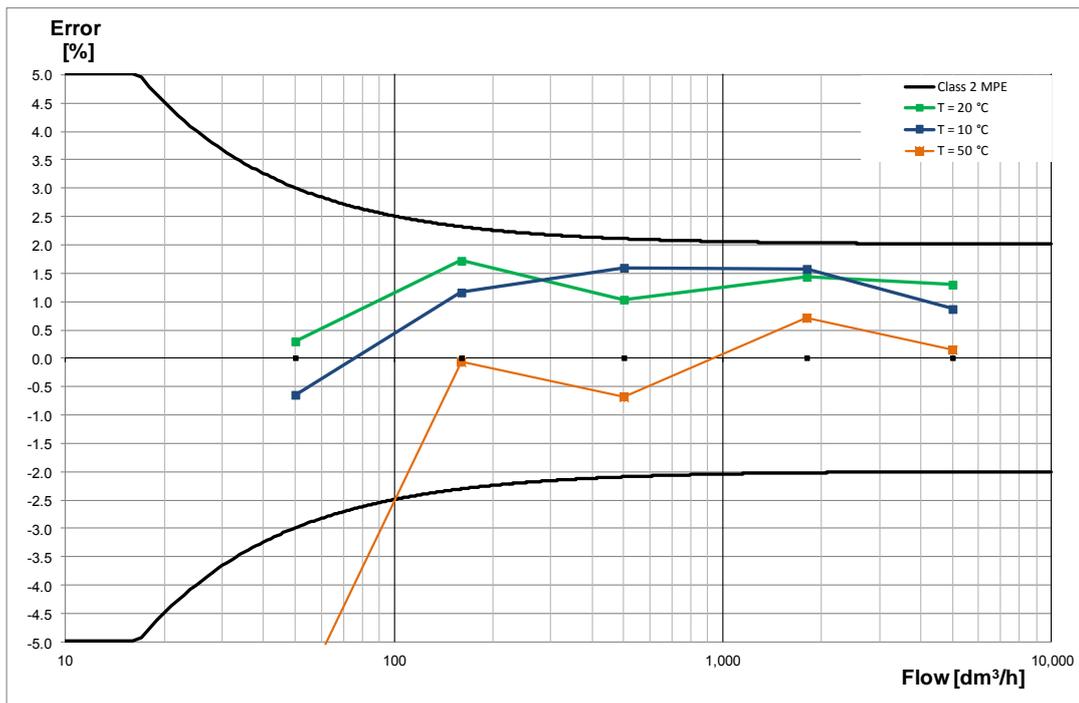
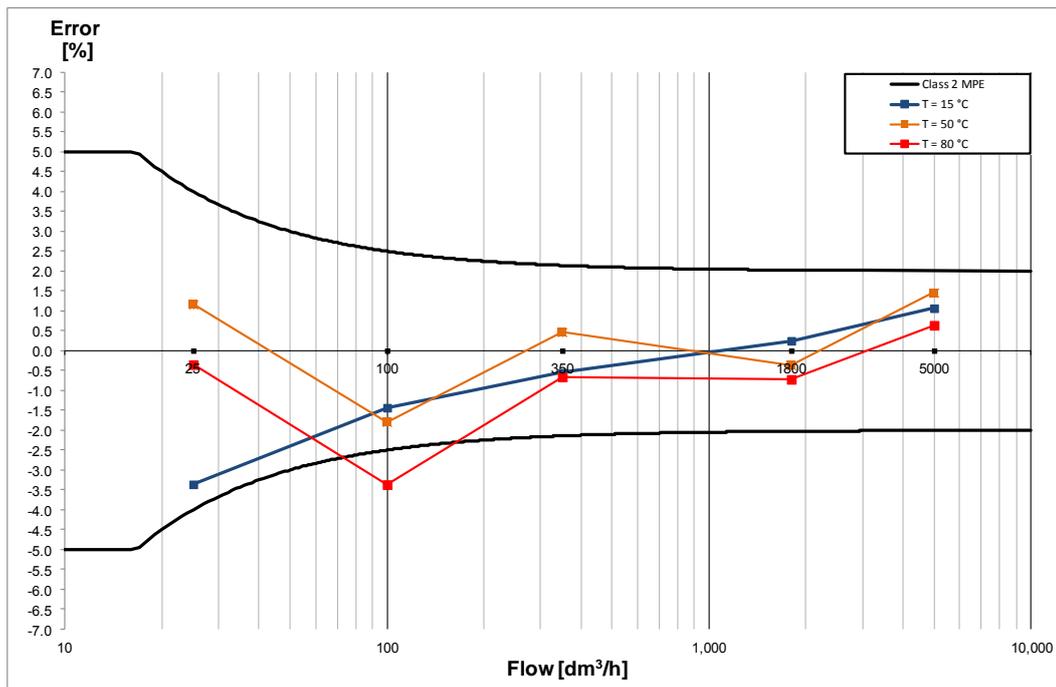


Figura 8 - Accuracy test a diverse temperature contatore statico US

Tabella 11 - Risultati "Accuracy test" a diverse temperature contatore meccanico turbina

	Portata Nominale [dm³/h]	Portata Misurata [dm³/h]	Temp. liquido misurata [°C]	Massa liquido riferimento [kg]	Volume liquido misurato [dm³]	Volume liquido riferimento [dm³]	Errore [%]	MPE [%]
q1	5000	4999.0	16.4	199.78	202.31	200.17	1.07	2.01
	5000	4949.0	50.1	197.77	203.26	200.34	1.46	2.01
	5000	4871.0	78.6	97.32	100.78	100.14	0.64	2.01
q2	1800	1776.0	16.1	98.59	99.03	98.78	0.25	2.03
	1800	1754.0	50.1	97.37	98.28	98.64	-0.37	2.03
	1800	1742.0	79.5	48.33	49.41	49.77	-0.72	2.03
q3	350	351.0	16.0	50.21	50.04	50.31	-0.55	2.14
	350	369.0	50.1	52.70	53.65	53.40	0.47	2.14
	350	369.0	79.0	21.08	21.56	21.70	-0.66	2.14
q4	100	103.0	16.0	10.30	10.17	10.32	-1.43	2.50
	100	107.0	50.1	10.73	10.68	10.87	-1.79	2.50
	100	112.0	77.5	5.63	5.60	5.79	-3.37	2.50
q5	25	27.0	16.7	5.40	5.23	5.41	-3.36	4.00
	25	28.5	50.1	5.70	5.84	5.78	1.16	4.00
	25	29.0	75.1	2.36	2.42	2.42	-0.35	4.00

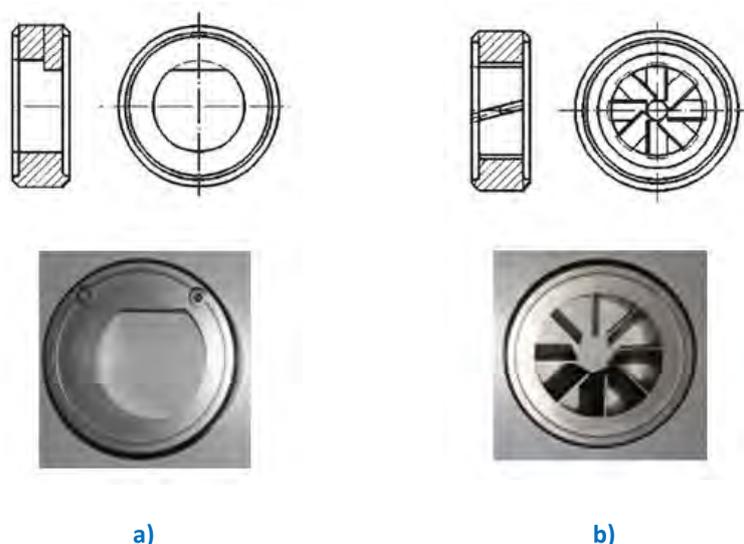


**Figura 9 - Accuracy test a diverse temperature meccanico turbina**

I risultati sperimentali mostrano che sia i misuratori meccanici che statici presentano migliori prestazioni alle portate più elevate, con alcune situazioni critiche di sfioramento dei limiti metrico-legali alle basse portate. I misuratori meccanici sembrano risentire maggiormente gli effetti della temperatura.

### 2.3.2 Flow disturbance test

Per quanto riguarda l'analisi degli effetti di installazione, gli autori hanno condotto specifici test di accuratezza in assenza di disturbo fluidodinamico, in presenza di un'ostruzione a 90° e di un generatore di swirl in senso orario (vedi Figura 10).

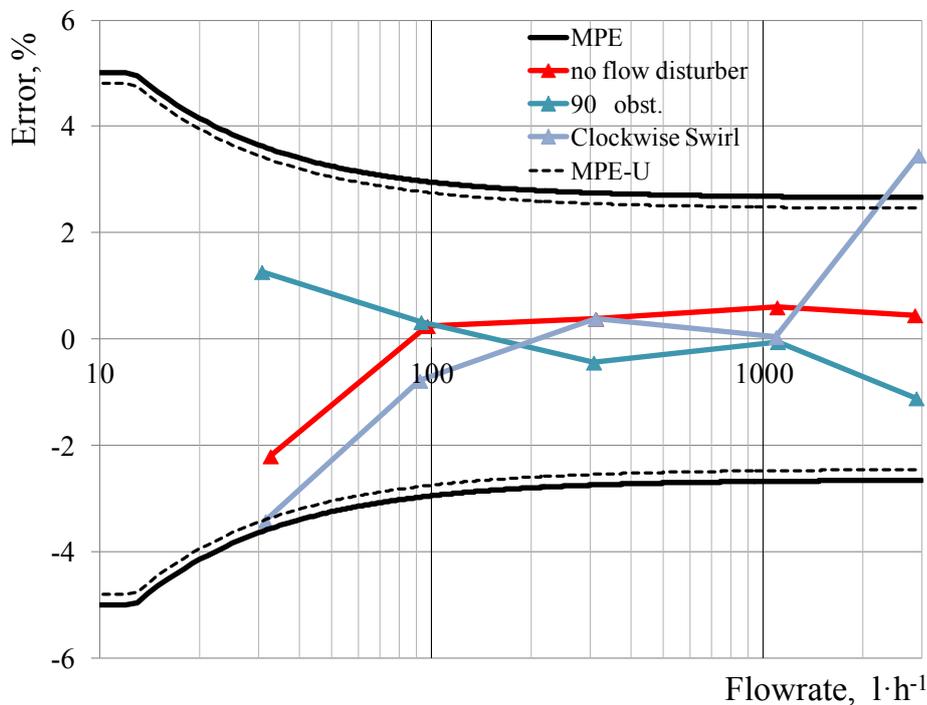


**Figura 10 - Generatori di disturbi a) ostruzione 90°, b) generatore di swirl orario**

In Tabella 12 e Tabella 13 e in Figura 11 e Figura 12 si riportano i risultati ottenuti sul contatore statico ad ultrasuoni e meccanico a turbina con temperatura di mandata pari a 90°C e di ritorno 70°C:

**Tabella 12- Risultati "Flow disturbance test" contatore statico US**

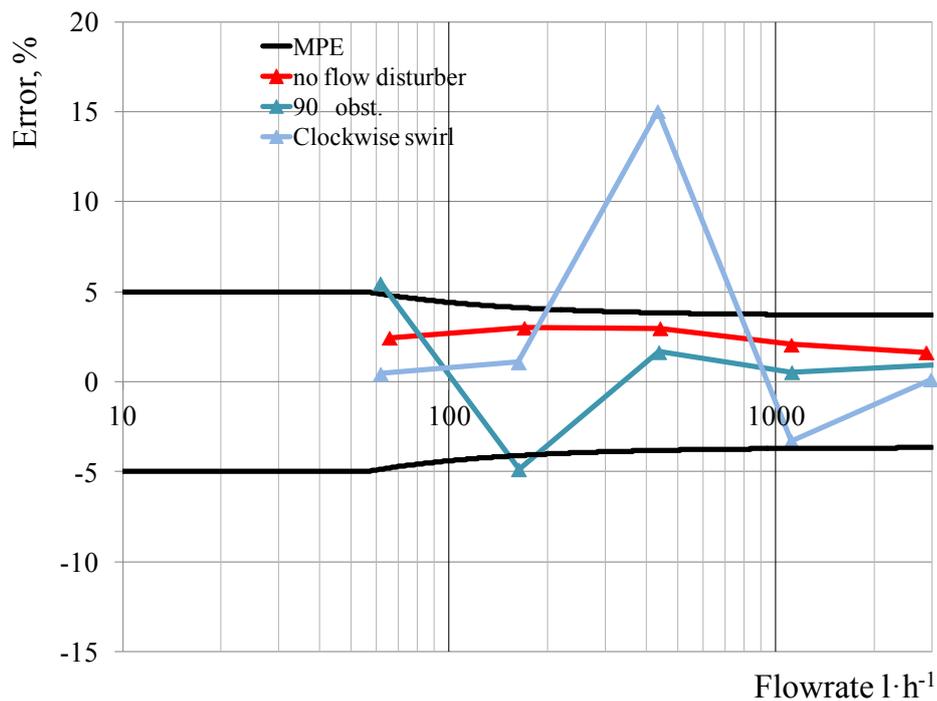
Portata di prova [dm3/h]	Tipo di disturbo	Errore [%]	MPE [%]
30	Flusso indisturbato	-2.20	3.65
	Ostruzione 90°	1.27	3.65
	Swirl in senso orario	-3.42	3.65
95	Flusso indisturbato	0.25	2.97
	Ostruzione 90°	0.32	2.97
	Swirl in senso orario	-0.78	2.97
300	Flusso indisturbato	0.38	2.75
	Ostruzione 90°	-0.44	2.75
	Swirl in senso orario	0.38	2.75
1100	Flusso indisturbato	0.60	2.68
	Ostruzione 90°	-0.05	2.68
	Swirl in senso orario	0.04	2.68
3000	Flusso indisturbato	0.45	2.66
	Ostruzione 90°	-1.11	2.66
	Swirl in senso orario	3.46	2.66



**Figura 11 - Flow disturbance test contatore statico US**

**Tabella 13- Risultati “Flow disturbance test” contatore meccanico turbina**

Portata di prova [dm <sup>3</sup> /h]	Tipo di disturbo	Errore [%]	MPE [%]
60	Flusso indisturbato	2.4	4.90
	Ostruzione 90°	5.5	4.90
	Swirl in senso orario	0.4	4.90
160	Flusso indisturbato	3.0	4.12
	Ostruzione 90°	-4.9	4.12
	Swirl in senso orario	1.1	4.12
420	Flusso indisturbato	3.0	3.83
	Ostruzione 90°	1.6	3.83
	Swirl in senso orario	15.0	3.83
1100	Flusso indisturbato	2.1	3.72
	Ostruzione 90°	0.5	3.72
	Swirl in senso orario	-3.3	3.72
3000	Flusso indisturbato	1.6	3.68
	Ostruzione 90°	0.9	3.68
	Swirl in senso orario	0.1	3.68



**Figura 12 - Flow disturbance test contatore meccanico a turbina**

I risultati sperimentali mostrano che alcuni disturbi di flusso possono determinare, soprattutto negli HM meccanici errori significativi.

## 2.4 Analisi metrologica dei sistemi indiretti

Come detto, i sistemi indiretti di contabilizzazione, oggi sempre più diffusi anche a seguito dei recenti obblighi normativi, non effettuano una vera e propria misura dell'energia termica consumata dalle utenze ma solo una stima indiretta di essa. Tali sistemi, inoltre, sono regolati da standard tecnici internazionali (EN 834) e nazionali (UNI 11388, UNI 9019), ma non dalla metrologia legale.

Durante l'attività di ricerca sono stati quindi analizzati i principi di misura e le problematiche connesse alla misura indiretta dei flussi di energia termica ed in particolare:

- un'analisi a priori delle prestazioni metrologiche dei sistemi indiretti di contabilizzazione del calore;
- una sperimentazione preliminare in campo dei sistemi di contabilizzazione del calore.

Le indagini sperimentali sono state condotte presso il laboratorio LAMI dell'Università di Cassino e del Lazio Meridionale e su un edificio residenziale.

### 2.4.1 Analisi a priori delle prestazioni metrologiche dei sistemi indiretti di contabilizzazione del calore

Dall'analisi delle problematiche di misura sopra illustrate ed applicando il modello ISO Guide per la stima delle incertezze di misura [44] gli autori hanno stimato le incertezze estese dei singoli elementi di contabilizzazione diretti ed indiretti riportate in Tabella 14 [4] e messo a punto un modello per la stima delle incertezze nella ripartizione.

**Tabella 14 - Incertezze estese dei singoli elementi di contabilizzazione diretti ed indiretti**

	Incertezza estesa	
	minima	massima
Contatori di calore HM	2% *	9%
Ripartitori HCA	3%	24%
Totalizzatori ITC-TC	6%	30% **
Totalizzatori ITC-DDC	15%	30%

Note: \* stimato per un HM in classe 1  
 \*\* relativo ai totalizzatori conformi alla UNI 11388:2015

La stima dell'incertezza su ogni singolo ripartitore o totalizzatore dei tempi di inserzione,  $i_{app}$ , può però non essere particolarmente significativa nella ripartizione dei consumi in quanto le unità di ripartizione per ciascuna unità abitativa e per ciascun edificio vengono valutate attraverso la somma ed il rapporto delle unità di ripartizione dei corpi scaldanti presenti secondo le equazioni (2) e (3). Di conseguenza, si determina una compensazione dei relativi errori sistematici tanto più rilevante quanto più gli elementi scaldanti sono simili per tipologia, dimensioni, condizioni di installazione e di esercizio [45]. Per tener conto di questo effetto è necessario determinare la correlazione delle incertezze che, nelle ipotesi di eguale potenza termica nominale di ciascun corpo scaldante, applicando la legge della propagazione delle incertezze (ISO, 2009), può scriversi mediante l'equazione (12) in appendice.

L'equazione (12), nelle ipotesi di  $i_A$  e  $i_B$  uguali per ciascun corpo scaldante e di  $n_{CS}^{app}$  e  $UR_{app}$  uguali per ciascun appartamento, può semplificarsi nella equazione (13) in appendice. Analizzando l'equazione (13) è possibile considerare che: i) il contributo delle incertezze accidentali (primo termine) sulla  $UR_{app}$  si riduce al crescere del numero di corpi scaldanti installati nel singolo appartamento; ii) il contributo delle incertezze

accidentali (secondo termine) sulla  $UR_{edif}$  si riduce al crescere del numero di appartamenti e pertanto può ritenersi trascurabile nei grandi condomini; iii) gli effetti correlativi tra ripartitori o totalizzatori nel singolo appartamento (terzo e quarto termine) contribuiscono ad aumentare le incertezze sistematiche; iv) gli effetti correlativi tra appartamento ed edificio (quinto e sesto termine) contribuiscono a ridurre le incertezze di ripartizione, determinando un'incertezza complessiva inferiore a quella del singolo corpo scaldante.

Per determinare in prima approssimazione i coefficienti di correlazione è possibile valutare il numero di corpi scaldanti simili (per tipologia, installazione ed esercizio) rispetto al numero totale. Per comprendere la compensazione delle incertezze sistematiche in alcune tipiche applicazioni, in Tabella 15 viene riportata l'incertezza nella ripartizione del calore al variare dei coefficienti di correlazione  $r_{cs}$  (tra la tipologia dei corpi scaldanti installati nel medesimo appartamento) e  $r_{app}$  (tra tipologia di corpo scaldante nell'impianto in esame e i restanti corpi scaldanti degli impianti condominiali) nelle seguenti ipotesi semplificative: i)  $i_A=3\%$ ; ii)  $i_B=15\%$ ; iii)  $n_{CS}^{app}=10$ .

**Tabella 15 - Incertezza ripartizione al variare di  $r_{cs,app}$  ed  $r_{app}$  ( $i_A=3\%$ ;  $i_B=15\%$ ;  $n_{CS}^{app}=10$ )**

Numero appartamenti	$r_{cs,app}=r_{cs,edif}=10\%$ (corpi scaldanti diversi nell'appartamento)					$r_{cs,app}=r_{cs,edif}=90\%$ (corpi scaldanti simili nell'appartamento)				
	3	6	12	24	48	3	6	12	24	48
$r_{edif}=0\%$ (C.S. compl. diversi nell'edificio)	7,0	7,6	7,9	8,0	8,1	16,5	18,5	19,4	19,8	20,0
$r_{edif}=5\%$ (C.S. molto diversi nell'edificio)	6,8	7,4	7,7	7,8	7,9	16,1	18,0	18,9	19,2	19,5
$r_{edif}=10\%$ (C.S. diversi nell'edificio)	6,7	7,2	7,5	7,6	7,7	15,7	17,5	18,4	18,8	19,0
$r_{edif}=50\%$ (C.S. ibridi nell'edificio)	5,0	5,4	5,6	5,7	5,8	11,7	13,1	13,7	14,0	14,2
$r_{edif}=90\%$ (C.S. simili nell'edificio)	2,4	2,6	2,7	2,7	2,7	5,3	5,9	6,2	6,3	6,4
$r_{edif}=95\%$ (C.S. molto simili nell'edificio)	1,9	2,0	2,0	2,0	2,0	3,9	4,3	4,4	4,5	4,6
$r_{edif}=100\%$ (C.S. identici nell'edificio)	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0

Dall'analisi dei risultati emerge che l'incertezza di ripartizione si riduce notevolmente al crescere della correlazione tra la tipologia di corpi scaldanti installati nell'impianto termico in esame e la tipologia di corpo scaldante prevalente nel condominio. Nel caso di corpi scaldanti diversi (dovuti ad esempio ad una ristrutturazione parziale del condomino), l'incertezza può non compensarsi affatto nel caso di corpi scaldanti molto simili tra loro o compensarsi solo parzialmente nel caso di corpi scaldanti molto diversi tra loro nell'appartamento in esame. Inoltre l'effetto della compensazione degli errori è più rilevante nei piccoli condomini, laddove cioè la percentuale dei consumi del singolo appartamento è più rilevante.

### 2.4.2 Sperimentazione preliminare in campo dei sistemi contabilizzazione del calore.

L'edificio investigato, ubicato nel centro Italia (regione Lazio) in una zona geografica classificata con 1775 gradi giorno, è una tipica costruzione degli anni '80 ed è costituito da due unità immobiliari disposte su due livelli, per una superficie totale riscaldata di circa 210 m<sup>2</sup>. La gestione dell'impianto di riscaldamento è diversa per le due unità immobiliari. La prima unità presenta accensioni giornaliere regolari e continue con attenuazione notturna mentre la seconda unità presenta accensioni variabili e limitate nel tempo (come ad esempio accade in un uso tipo "residence").

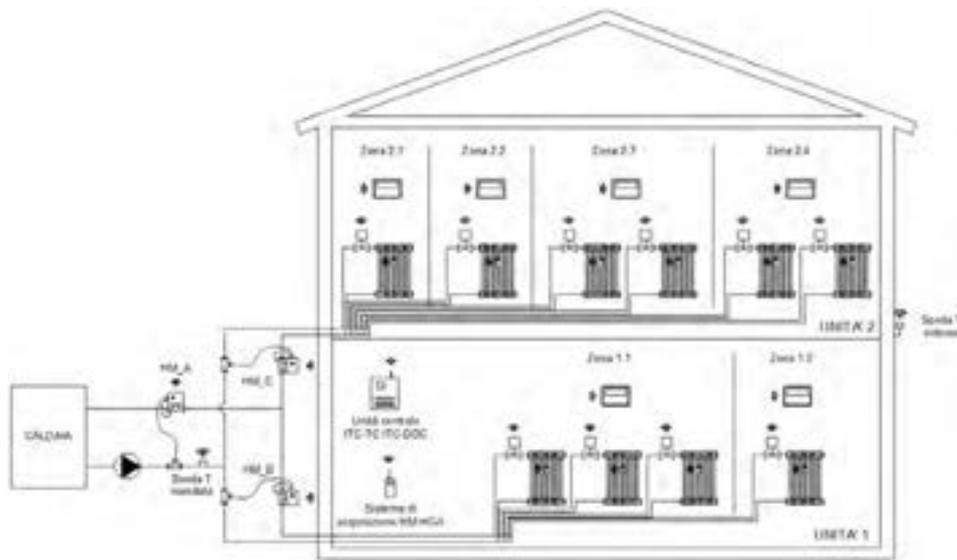
L'edificio è riscaldato per mezzo di un impianto idronico che utilizza un generatore di calore a gas metano, un sistema di distribuzione "a zone" e radiatori in alluminio e acciaio come unità terminali. L'edificio è diviso in due unità e 6 zone termiche, 2 per la prima unità e 4 per la seconda unità. Ogni zona è dotata di un sistema di controllo indipendente della temperatura composto da valvole elettroniche on-off su ogni radiatore e un termostato di gestione per ogni zona termica. Nella Tabella 16 sono mostrate le principali caratteristiche di ogni zona.

**Tabella 16 - Descrizione delle unità immobiliari e delle zone termiche**

<i>Unità</i>	<i>Zona termica</i>	<i>Superficie riscaldata [m<sup>2</sup>]</i>		<i>Tipologia di radiatori installati</i>	<i>Potenza termica nominale a 60°C totale [W]</i>
1	1.1	76.0	84.4	Tubolari in acciaio	10799
	1.2	8.4		Alluminio	1832
2	2.1	15.0	124.6	Alluminio	1832
	2.2	17.2		Alluminio	2512
	2.3	28.0		Alluminio	2817
	2.4	64.4		Alluminio	3280

Per la sperimentazione sono stati installati contatori di energia termica (i.e. diretti) per la misura dei consumi di energia termica totale e di ogni unità immobiliare e sistemi di contabilizzazione indiretta per l'allocazione dei costi tra le Unità e le diverse zone definite. I dati dei sistemi installati sono stati acquisiti per l'intero periodo di sperimentazione (i.e. una intera stagione di riscaldamento).

In Figura 13 è riportato lo schema di installazione adottato per la sperimentazione. HM\_A è stato installato a valle del generatore di calore per la misura dell'energia totale consumata, mentre HM\_B e HM\_C sono stati installati per la misura dell'energia termica consumata dalla prima unità (zone 1.1 e 1.2) e dalla seconda unità (zone da 2.1 a 2.4). Gli HM sono tutti approvati MID in classe 3 (i.e. per uso residenziale) ed utilizzano il principio di misura a turbina per il flusso e termoresistenze PT500 per la misura delle temperature.



**Figura 13 - Schema delle installazioni della campagna sperimentale**

Il sistema di ripartizione indiretta con HCA prevede l'installazione di un dispositivo su ogni radiatore e di un sistema centrale di acquisizione dati. Gli HCA utilizzati nella sperimentazione sono del tipo a due sensori (i.e. un sensore per la misura della temperatura superficiale del radiatore ed una per la temperatura dell'aria) e sono approvati secondo lo standard Europeo EN834. Sono inoltre dotati di una interfaccia di trasmissione wireless. Un unico sistema di acquisizione ha consentito la gestione contemporanea dei dati degli HCA e degli HM.

Il sistema di contabilizzazione indiretta con ITC consente anche la termoregolazione indipendente di ogni unità abitativa nonché di ogni zona termica. Il sistema installato è composto da: i) un termostato per ogni zona; ii) valvole on-off su ogni radiatore; iii) sensore di temperatura esterno; iv) sensore di temperatura del fluido termovettore installato sulla tubazione di mandata del generatore; v) una unità di calcolo centrale. La comunicazione tra i vari elementi del sistema è garantita da interfacce di comunicazione wireless M-Bus.

L'installazione e la programmazione dei dispositivi è stata effettuata secondo le indicazioni fornite dai costruttori e coerentemente alle norme di prodotto applicabili [15] [18] [17]. In particolare, la determinazione dei fattori di valutazione  $K_c$  e  $K_q$  per gli HCA è stata effettuata rispettivamente sulla base dei dati forniti dal costruttore del dispositivo di misura e delle certificazioni fornite dai costruttori dei corpi scaldanti in conformità della norma EN 442 [39] [40].

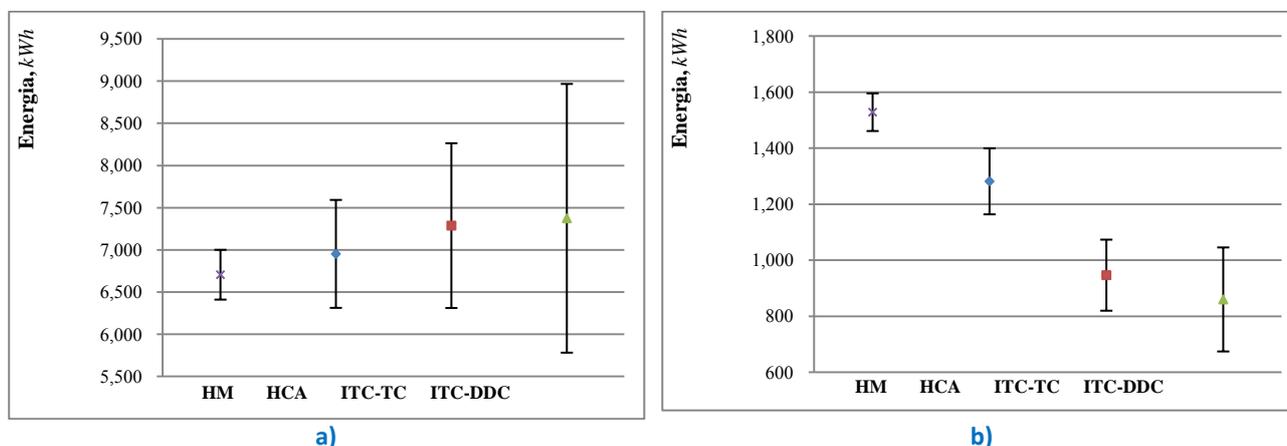
In Tabella 17 è riportato il riepilogo dei risultati ottenuti nell'intera stagione di riscaldamento. La tabella riporta i valori di energia misurata attraverso gli HM installati, la percentuale di ripartizione e l'errore. L'errore degli HM\_B e C è stato valutato per confronto con l'energia totale misurata dall'HM\_A. Nelle altre colonne sono invece riportati i risultati della ripartizione effettuata per le due Unità mediante l'utilizzo dei sistemi di contabilizzazione indiretta (i.e. HCA, ITC-TC, ITC-DDC). In particolare per la medesima unità e per ogni sistema impiegato sono riportati i coefficienti di ripartizione e l'errore commesso nella stima dell'energia, e, utilizzando la formula:

$$e = \frac{\frac{UR_{unità}}{UR_{tot}} Q_{tot} - Q_{unità}}{Q_{unità}} \quad (14)$$

**Tabella 17 - Risultati sperimentali della ripartizione dei consumi nell'intera stagione di riscaldamento**

	HM			HCA		ITC-TC		ITC-DDC	
	$Q$	$\frac{Q_{unità}}{Q_{tot}}$	$e$	$\frac{UR_{Unità}}{UR_{Tot}}$	$e$	$\frac{Q_{unità}}{Q_{tot}}$	$e$	$\frac{Q_{unità}}{Q_{tot}}$	$e$
	kWh	%	%	%	%	%	%	%	%
Totale	8235								
Unità1	6638	81.4%	-1.0%	84.4%	3.7%	88.5%	8.7%	89.6%	10.0%
Unità 2	1513	18.6%		15.6%	-16.1%	11.5%	-38.1%	10.4%	-43.7%

Dai dati in Tabella 17 si osserva anche che i consumi delle due unità immobiliari sono significativamente differenti (in un rapporto variabile tra 1:2 a 1:10). In Figura 14 è riportata inoltre un'analisi di compatibilità dei risultati, tenendo in considerazione le incertezze tipiche di ogni sistema di contabilizzazione come riportate in Tabella 14.



**Figura 14 -Analisi di compatibilità dei risultati stagionali: a) Unità 1, b) Unità 2.**

La Tabella 18 mostra infine i coefficienti di ripartizione e gli errori calcolati su base bimestrale con l'impiego dei vari sistemi di contabilizzazione relativi alle Unità abitativa 1 e 2.

**Tabella 18 -Risultati sperimentali relativi alla ripartizione bimestrale dei consumi**

Unità	Bimestre	HM			HCA		ITC-TC		ITC-DDC	
		$Q$	$\frac{Q_{unità}}{Q_{tot}}$	$e$	$\frac{UR_{Unità}}{UR_{Tot}}$	$e$	$\frac{UR_{Unità}}{UR_{Tot}}$	$e$	$\frac{UR_{Unità}}{UR_{Tot}}$	$e$
		kWh	%	%	%	%	%	%	%	%
1	Nov-Dic	1120	63.1%	-0.8%	65.3%	3.5%	75.6%	19.7%	74.7%	18.4%
	Gen-Feb	3779	84.9%	-1.2%	88.4%	4.2%	91.2%	7.5%	93.2%	9.8%
	Mar-Apr	1739	90.3%	-0.9%	92.9%	2.8%	94.0%	4.0%	94.1%	4.2%
2	Nov-Dic	654	36.9%	-0.8%	34.7%	-5.9%	24.4%	-33.7%	25.3%	-31.5%
	Gen-Feb	673	15.1%	-1.2%	11.6%	-23.4%	8.8%	-42.0%	6.8%	-55.0%
	Mar-Apr	186	9.7%	-0.9%	7.1%	-26.6%	6.0%	-37.4%	5.9%	-38.9%

Dai risultati riportati in Tabella 17, Tabella 18, ed in Figura 14 si evince che :

- i sistemi indiretti (HCA ed ITC) presentano errori nella ripartizione notevolmente superiori ai sistemi diretti (HM);

- gli errori stagionali stimati per gli HM sono pari a circa 1%; per gli HCA variano in un intervallo compreso tra 4 e 16%; per gli ITC-TC tra 9 e 38%; per gli ITC-DDC tra 10 e 44%;
- gli errori bimestrali stimati per gli HM sono compresi in un intervallo tra 0.8 e 1.2%; per gli HCA tra 3 e 26%; per gli ITC-TC tra 4 e 42%; per gli ITC-DDC tra 4 e 55%;
- a consumi energetici bassi corrispondono errori elevati;
- le misure ottenute con i sistemi investigati risultano compatibili tra loro unicamente per l'Unità 1 e non per l'Unità 2.

I risultati ottenuti mostrano che:

- dal punto di vista teorico le incertezze associate ai sistemi di contabilizzazione diretta sono in linea con i requisiti normativi e legislativi, mentre le incertezze di misura associate alle misure effettuate con i sistemi indiretti potrebbero, in alcune condizioni critiche, raggiungere valori molto elevati (Tabella 18);
- i sistemi di contabilizzazione diretta presentano una buona affidabilità in campo, mentre le misure effettuate con sistemi di ripartizione indiretta non sempre risultano in linea con le incertezze tipiche stimate dagli autori nell'analisi a priori (Tabella 14).

E' opportuno evidenziare che la programmazione degli ITC installati prevedeva la conformità alla norma UNI 11388: 2010 vigente all'inizio della sperimentazione, ovvero con una diversa stima dell'energia erogata nei transitori ed una diversa stima della temperatura compensata rispetto alla nuova revisione norma UNI 11388:2015.

Gli scostamenti sistematici dell'energia termica contabilizzata in ciascuna unità utilizzando i metodi indiretti possono essere legati a fattori quali: i) la differenza tra potenza operativa dei radiatori nelle reali condizioni di installazione, e quella nominale; ii) una non ottimale regolazione climatica del generatore (soprattutto nella metodologia ITC-DDC); iii) la diversa dispersione termica del sistema di distribuzione delle due unità.

### 3 Progettazione di massima di un laboratorio per la riproduzione in scala di una rete di teleriscaldamento Pro.Re.Te

L'attuale evoluzione del mercato dell'energia elettrica in Italia a seguito dell'approvazione del decreto legislativo n. 387/03 e delle politiche di incentivazione delle FER ha visto negli ultimi anni la progressiva introduzione del concetto di generazione distribuita con incremento esponenziale di installazioni di impianti di produzione da fonti rinnovabili per lo più di carattere non programmabile (e.g. eolico, idroelettrico ad acqua fluente, fotovoltaico, ecc.). Tutto ciò ha prodotto criticità strutturali nella produzione, trasporto e distribuzione dell'energia, determinato dall'impatto di un elevato quantitativo di energia non programmabile in termini di regolazione e controllo sull'esercizio in condizioni di sicurezza della rete. Questo problema è esaltato in particolari zone geografiche quali l'Italia meridionale ed insulare per diverse concause quali: i) l'effetto dell'estrema concentrazione delle risorse rinnovabili non programmabili; ii) una rete caratterizzate da una insufficiente magliatura; iii) la presenza di limitazioni sulla potenza trasportabile; iv) la presenza di un fabbisogno locale fortemente sottodimensionato rispetto alla generazione installata; v) un sistema di produzione termoelettrico caratterizzato da scarsa capacità di regolazione.

Questa rapida evoluzione soprattutto del sistema elettrico richiederebbe che le reti di distribuzione si trasformassero progressivamente da "passive" ad "attive" e che gli impianti di produzione e consumo diventassero sempre più "partecipi" alla gestione efficace, efficiente ed sicura.

In Italia, malgrado il teleriscaldamento sia ancora alquanto limitato, già alla fine del 2010 era stata raggiunta l'ambiziosa soglia delle "100 città teleriscaldate". Sempre nel 2010 la volumetria allacciata aveva subito un incremento superiore a quello degli anni precedenti, superando ancora il trend medio del decennio 2000-2009: oltre 17,8 milioni di metri cubi riscaldati, di cui circa 6,5 milioni (36%) relativi alle nuove reti ed i restanti 11,3 milioni come estensioni delle reti esistenti.

L'estensione delle reti di riscaldamento urbano in Italia ha raggiunto attualmente circa 3.000 km di rete primaria. L'utenza tipica del teleriscaldamento vede oltre il 63% degli impianti asserviti all'erogazione di calore per riscaldamento ed acqua calda sanitaria. Dai dati AIRU 2013 si rileva che, prescindendo dalle caldaie di integrazione e riserva, la tipologia di impianti di produzione prevalente nel teleriscaldamento è costituita da: i) impianti di cogenerazione alimentati da combustibili fossili di cui 1.110 MWt di impianti dedicati ed 845 MWt da centrali termoelettriche (con una consistente presenza di impianti di termovalorizzazione RSU); ii) impianti utilizzando biomassa (248 MWt totali installati, di cui 184 MWt in combustione semplice e 64 MWt da impianti cogenerativi); iii) piccoli impianti che utilizzano energia geotermica (localizzati nell'area di Larderello e Ferrara), recupero da processi industriale ed energia solare (*Solar Energy District*).

D'altro canto la diffusione della generazione distribuita da fonti rinnovabili sta sempre di più modificando i paradigmi della generazione, trasporto e distribuzione dell'energia elettrica, termica e frigorifera. La rete non rappresenterà più un semplice canale per trasmettere e distribuire energia dai sistemi centralizzati di produzione ai clienti finali, ma sarà sempre più una rete magliata ed intelligente in grado di scambiare in modo bidirezionale flussi di energia elettrica, termica e frigorifera. In altre parole produttori e consumatori scambiando informazioni sui flussi di energia potranno interagire determinando in anticipo le richieste di consumo, adattando la produzione di energia, mettendo in atto strategie di accumulo o diversificazione dei consumi. In tal modo gli utenti della rete saranno in grado di : i) gestire in modo efficiente i picchi di produzione/richiesta di energia (evitando interruzioni nella fornitura e sovraccarichi della rete); ii) razionalizzare i consumi con conseguenti risparmi sulla spesa in bolletta; iii) essere consapevoli del proprio stile di consumo; iv) garantire una maggiore tutela ambientale (maggiore diffusione delle energie rinnovabili) ed un uso sempre più razionale dell'energia (contribuendo alla riduzione di emissioni di CO<sub>2</sub>).

Sebbene questa trasformazione sia già in atto nelle reti di distribuzione elettrica, del gas e del teleriscaldamento (ed in generale nella gestione di tutte le utility) solo alcuni dei tasselli necessari a questa trasformazione sono stati messi in campo.

Tra questi gli aspetti che certamente dovranno essere oggetto di approfondimento nel breve periodo sono:

- la messa a punto di una rete magliata in grado di gestire in modo flessibile la variabilità dei carichi e la produzione distribuita;
- il potenziamento di sistemi di accumulo/stoccaggio dell'energia;
- il potenziamento dei sistemi di produzione locale da FER;
- l'utilizzo diffuso di *smart meter*: strumenti indispensabili ai fini dello scambio di informazioni sui consumi/produzione in tempo reale; in particolare nel settore elettrico questa sostituzione è oramai completa, mentre nell'ambito della distribuzione del gas e del teleriscaldamento è appena iniziata.

### 3.1 Obiettivi del laboratorio "Pro.Re.Te"

Allo scopo di verificare il comportamento di una rete di teleriscaldamento al variare dei principali parametri di esercizio della rete e delle condizioni climatiche esterne, l'ENEA intende progettare e realizzare un sistema di teleriscaldamento in scala, completamente strumentato e potenzialmente operante in differenti configurazioni:

- a) utenze passive e attive (utenti prosumers);
- b) fornitura diretta e indiretta;
- c) diversi livelli termici del fluido termovettore (i.e. acqua calda, acqua surriscaldata);
- d) rete ramificata, ad anello e magliata.

L'impianto potrà consentire, inoltre, sia di validare modelli e codici di simulazione delle reti, che di verificare sperimentalmente prototipi di dispositivi innovativi come *smart meter*, sistemi di accumulo, ecc.

Obiettivo del seguente lavoro di ricerca è la progettazione di massima di un "prototipo di rete di teleriscaldamento" (Pro.Re.Te.) in grado di replicare su opportuna scala le reali condizioni di lavoro delle grandezze fisiche identificate dei parametri di esercizio e che consenta di caratterizzare reti di teleriscaldamento e teleraffreddamento e i suoi principali componenti nelle tipiche configurazioni disponibili.

### 3.2 Progetto di massima del prototipo di rete di teleriscaldamento in scala

Il prototipo di rete in scala progettato è costituito da:

- un sistema di generazione configurabile;
- un sistema di accumulo e di controllo della pressione;
- una rete riconfigurabile (i.e. magliata, ad anello e ramificata) (Figura 15);
- almeno n.12 elementi di accumulo distribuiti in prossimità delle utenze per consentire di simulare la capacità termica della rete e quindi il comportamento della stessa in assetto dinamico;
- N° 12 sottostazioni di fornitura (costituite da sistemi di misura dell'energia termica in ingresso in configurazione passiva ed uscita in configurazione attiva);
- N° 12 utenze simulate (costituite da scambiatori di calore controllati da un sistema per la modellazione delle utenze); il prototipo è stato infatti progettato in modo da simulare i diversi

- profili di carico (caratteristici dell'utenza che si vuole studiare) e le diverse tipologie di utenze attive in modalità passiva o attiva attraverso n.12 dry cooler dedicati;
- un sistema di controllo, monitoraggio e interfaccia utente dell'impianto Pro.Re.Te.

### 3.2.1 Sistema di generazione configurabile

Il teleriscaldamento può essere, come noto, alimentato attraverso diversi approvvigionamenti energetici sia da fonte fossile (i.e gas naturale e carbone soprattutto in assetto cogenerativo), che da energie rinnovabili (i.e biomasse, geotermica, solare,). Anche il calore di recupero prodotto dagli scarti delle lavorazioni industriali o dalla termovalorizzazione dei rifiuti/reflui può essere utilmente impiegato. Tutte queste fonti possono essere anche contemporaneamente presenti nella medesima rete dal momento che un mix di fonti integrato rende la rete più flessibile e indipendente da un'unica fonte. La scelta delle fonti dipende principalmente da fattori economici ed ambientali, ma anche dalla loro reperibilità locale. In Italia più del 75% delle reti è basato su sistemi energetici integrati basati su gas naturale, seguito dalla termovalorizzazione dei rifiuti urbani (12,6%) e dalle biomasse (6,3%). La geotermia è utilizzata come fonte di energia per lo 0,7%, mentre per il restante 4% circa si tratta prevalentemente di carbone, olio combustibile e recupero da processi industriali. Nel complesso, oltre la metà dell'energia termica immessa in rete è prodotta in assetto cogenerativo. L'Italia è sicuramente uno dei paesi europei più vocati alla diversificazione delle fonti ed alla valorizzazione delle risorse locali a disposizione.

Il sistema di generazione scelto consente di modificare le temperature e pressioni di esercizio del vettore termico. La potenza termica della centrale termica è di circa 300 kW con bruciatore modulante a gas naturale o a gasolio/policombustibile ad alto rendimento (con carter di protezione dagli agenti atmosferici se posizionata all'esterno), costituita da due o più generatori di calore per acqua calda fino a 130°C, completa di bruciatore atmosferico, caldaia in ghisa, apparecchiature di controllo e sicurezza, bypass valvole termostatiche e sistema di regolazione della temperatura di mandata, gruppo di riempimento, canna fumaria.

### 3.2.2 Rete di teleriscaldamento

Le reti di teleriscaldamento possono essere classificate sulla base della topologia di rete (i.e. ramificata, ad anello, magliata), della modalità di teleriscaldamento (e.g. diretto o indiretto), e delle caratteristiche del fluido termovettore (e.g. acqua calda, acqua surriscaldata, vapore). In ogni caso i parametri che identificano e caratterizzano la rete sono la temperatura massima di esercizio (ovvero il differenziale di temperatura) ed il sistema di pressurizzazione. Inoltre, le reti possono essere a 1, 2, 3, 4 tubi, sebbene la configurazione più utilizzata sia quella a 2 tubi, salvo rare eccezioni.

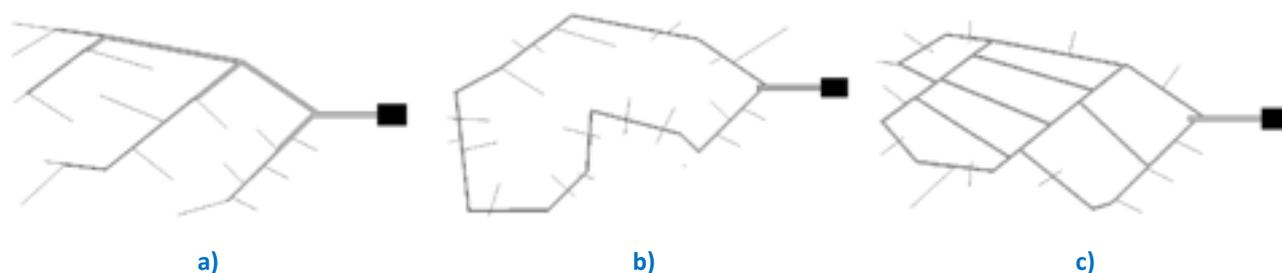
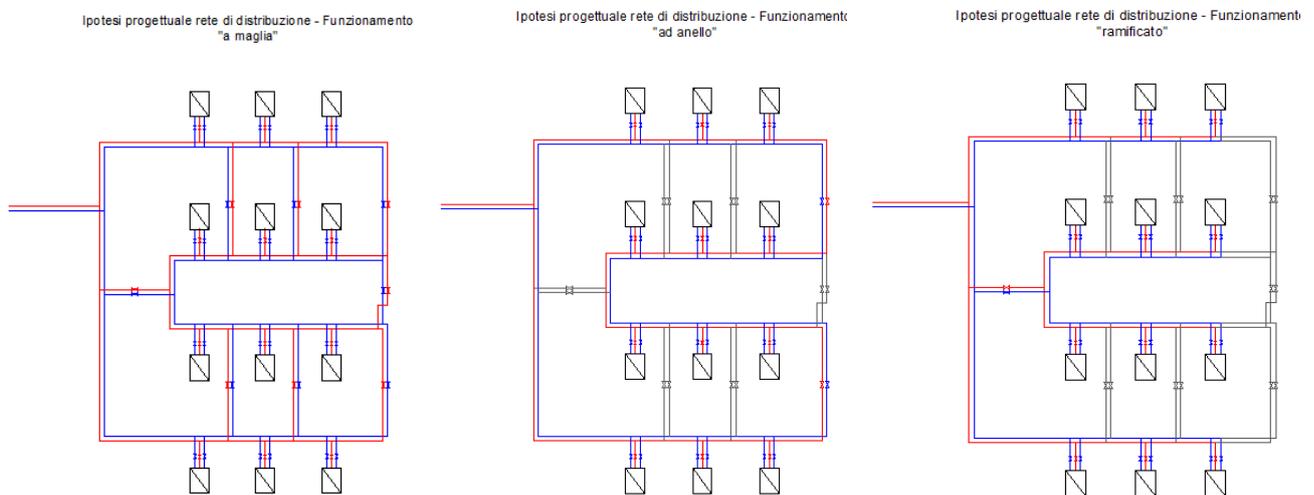


Figura 15 - Tipologie di rete: a) ramificata; b) ad anello; c) magliata

Nella pratica gli schemi progettuali di una rete sono determinati dai seguenti principali parametri: i) la potenza, la temperatura e la tipologia delle sorgenti termiche (e.g. centrale a biomassa, cogenerativa, geotermica, solare, ...); ii) la tipologia di utenza (e.g. temperatura massima richiesta, salto termico); iii) la lunghezza della rete, le perdite di carico, i dislivelli altimetrici della rete, la dislocazione delle utenze.

Su tali basi sono stati scelti i parametri di base del progetto idraulico quali la portata massima della rete (circa 25 m<sup>3</sup>/h), le differenze di pressione alla centrale e sulla rete, la perdita di carico massima specifica (es: 150÷180 Pa/m), la velocità massima nei tubi (< 1 m/s), la pressione assoluta minima (per rischio vaporizzazione), il diametro delle tubazioni (DN100).

In Figura 16 vengono inoltre riportate le caratteristiche e lo schema di massima del prototipo di rete progettato. Da tale schema è possibile evincere che il prototipo potrà funzionare nelle tre differenti configurazioni rete (i.e. ramificata, ad anello, magliata). Inoltre la presenza di opportune capacità termiche renderà possibile simulare differenti dinamiche di funzionamento. Per consentire, inoltre, l'utilizzo contemporaneo di due differenti livelli termici la rete potrà essere realizzata in configurazione a tre tubi.



**Figura 16 - Lay-out rete prototipale**

La qualità dell'acqua di circolazione nelle reti può essere adulterata da processi di afflusso dell'acqua, afflusso di gas o corrosione esterni, e può essere modificato mediante condizionamento. L'acqua utilizzata nelle reti può infatti contenere sostanze insolubili e solubili: le sostanze insolubili sono poco frequenti, mentre quelle solubili (in acqua non trattata) si verificano sia in forma di sali inorganici (e.g. Sali di calcio, magnesio e sodio) e sostanze organiche, sia in forma di gas solubili (principalmente ossigeno, azoto e anidride carbonica). In un impianto di teleriscaldamento, questi costituenti possono portare a gravi malfunzionamenti della rete e devono quindi essere rimossi. In generale minore è la conducibilità elettrica nell'acqua di circolazione, minore è il rischio di corrosione. Una concentrazione di ossigeno di 0,1 mg/l può essere tollerato in condizioni operative a basso contenuto di sale (e.g. < 100 µS/cm); in tali condizioni inoltre anche il pericolo di formazione di flora microbica nelle strutture di teleriscaldamento viene limitato. Se l'afflusso di ossigeno e di altri gas è limitato (< 0,02 mg/l) potrebbe comunque essere accettato una salinità più elevata.

Nella rete progettata è stato a tale scopo previsto il funzionamento in due modalità di funzionamento (i.e. a basso e medio contenuto di sale) caratterizzati da precisi valori di conducibilità elettrica, contenuto di ossigeno, pH e durezza. Il trattamento all'acqua supplementare avviene con l'ausilio di un impianto di trattamento parziale nel bypass di filtraggio, degassaggio e demineralizzazione. Il dimensionamento dell'impianto di trattamento a flusso parziale per l'acqua di circolazione è tale che fino al 3% del volume d'acqua di circolazione viene trattato.

Il trattamento dell'acqua gioca inoltre un ruolo importante nella scelta dei materiali della rete: materiali ferrosi non legati, acciai non corrosivi e rame possono essere utilizzate da soli o combinati, mentre con acciai austenitici il rischio di stress, corrosione e fessurazione deve essere preso in seria considerazione.

### 3.2.3 Sistema di accumulo termico e di regolazione della pressione

I sistemi termici di accumulo realizzano come noto un disaccoppiamento tra la potenza fornita e quella prodotta. I vantaggi che ne conseguono sono: i) una maggiore flessibilità nella produzione di energia elettrica nei picchi di domanda elettrica (nel caso di sistemi cogenerativi); una maggiore flessibilità nella produzione di energia termica (e.g. attraverso l'accumulo di calore in eccesso durante i periodi di valle della domanda termica); iii) una maggiore redditività (e.g. attraverso l'arresto dell'impianto durante orari di bassa redditività del prezzo dell'elettricità); iv) una compensazione delle variazioni di carico giornaliero della domanda di calore (generalmente causate da riduzione notturna) e conseguente riduzione degli start/stop; v) il funzionamento da serbatoio di espansione.

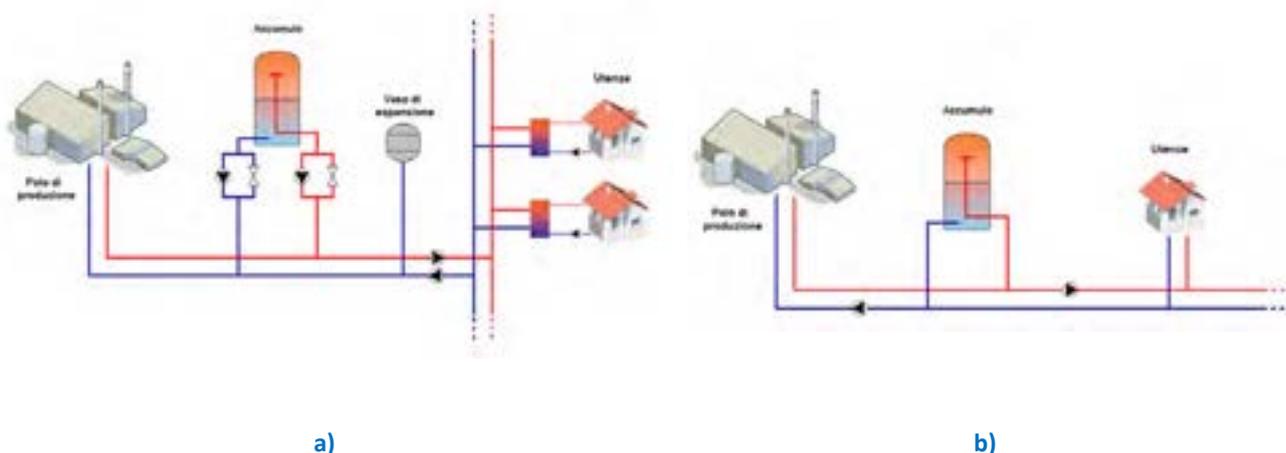


Figura 17 -Sistema di accumulo: a) con separatore idraulico, b) senza separatore idraulico

La regolazione della pressione dell'acqua deve essere garantita principalmente per: i) garantire un adeguato livello di pressione di esercizio; ii) compensare le variazioni di volume e pressione dovute alle variazioni di temperatura; iii) la compensazione delle perdite di acqua in funzione (con reintegrazione del fluido termovettore) [46].

La corretta scelta, dimensionamento del sistema di regolazione della pressione nonché delle pompe di circolazione della rete presentano un'influenza determinante sull'afflusso di gas (e.g. ossigeno e azoto). Occorre quindi prestare particolare attenzione nel garantire costantemente un eccesso di pressione nel punto più alto della rete (e.g. > 0,5 bar). In Tabella 19 sono riportate le principali tipologie di sistemi per il mantenimento della pressione della rete.

Allo scopo di valutare le problematiche delle diverse tipologie di sistema di accumulo e controllo della pressione verranno utilizzate sia un sistema di accumulo (di circa 50 m<sup>3</sup>) e regolazione statico a vaso di espansione chiuso, sia un sistema dinamico a pompa. Inoltre è previsto l'uso di almeno n.12 elementi di accumulo localizzati in corrispondenza delle utenze per consentire di simulare la capacità termica della rete stessa e quindi il comportamento della rete in assetto dinamico.

**Tabella 19 - Tipologia di controllo della pressione [46]**

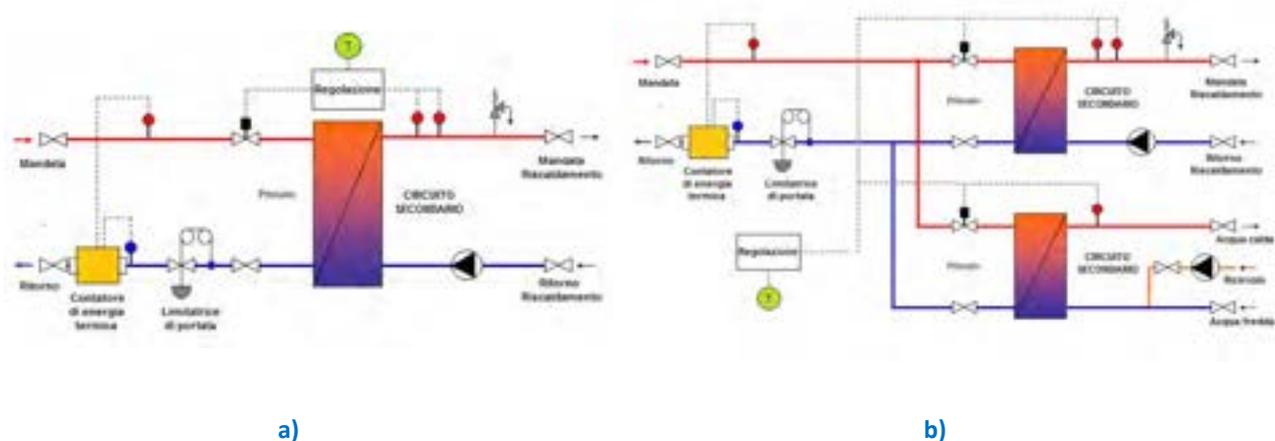
Tipo	Statico					Dinamico			
Progetto	Vaso Espansione Aperto		Vaso Espansione Chiuso		Vaso Espansione A diaframma	A Pompa		A compressore	
Camera di compensazione	Ad Aria		A Miscela di gas (e.g. vapore)		A Gas inerte (e.g. azoto)	A Miscela di gas (e.g. vapore, aria)		Ad Aria	
Diaframma vaso di espansione	senza	con	senza	con	obbligatorio	senza	con	senza	con

### 3.2.4 Sottostazioni di fornitura

Nella pratica lo schema di una sottostazione di fornitura è determinato da numerosi parametri quali:

- i) le caratteristiche del circuito secondario dell'utente (e.g. potenza nominale riscaldamento e ACS, portata, flusso variabile/costante, temperatura massima e salto termico scambiatore, caduta di pressione, sistema di regolazione, circuiti idraulici impianto ed elementi scaldanti,);
- ii) le prescrizioni normative e di sicurezza;
- iii) i fattori economico-gestionali (e.g. costi investimento, di conduzione e di manutenzione);
- iv) scelte contrattuali (i.e interrompibilità, limitazione prelievo, espandibilità, telemisura, telegestione);
- v) utenza passiva/attiva (e.g. sistema di accumulo, sistema di produzione locale).

Il prototipo Pro.Re.Te prevede 12 sottostazioni di fornitura di circa 24 kW ciascuna, comprensive di sistemi di misura dell'energia termica in ingresso in configurazione passiva ed uscita in configurazione attiva. Infatti, alcune sottostazioni termiche potranno funzionare in modalità passiva o attiva, simulando la presenza di impianti FER (e.g. solare termico, pompe di calore etc.) nelle seguenti due configurazioni: a) solo passiva; b) con produzione attiva (e.g. in parallelo; in serie sulla mandata; in serie sul ritorno). Per quanto concerne l'impianto per ACS la sottostazione termica potrà funzionare in due differenti configurazioni: a) senza accumulo e produzione istantanea; b) con accumulo (in parallelo; in serie sulla mandata; in serie sul ritorno). In Figura 18 viene riportato lo schema di massima della tipica sottostazione di fornitura.



**Figura 18 - Schema sottostazione: a) riscaldamento indiretto; b) riscaldamento indiretto e ACS**

Per consentire il bilancio della rete nelle diverse configurazioni e condizioni di esercizio, particolare attenzione è stata data ai sistemi di misura dell'energia termica. Ogni utenza e servizio verrà infatti strumentata con contatori di energia termica omologati MID aventi le seguenti caratteristiche:

- N.1 Contatore in classe 1 MID (DN 100) sul sistema di generazione
- N.1 Contatore in classe 1 MID (DN 100) sul sistema di accumulo
- N.12 Contatore in classe 2 MID (DN 15) su ciascuna utenza

Le utenze connesse alla rete possono essere estremamente diverse tra loro in termini di potenze richieste e profili di carico. Le principali tipologie di utenze connesse alle reti di teleriscaldamento possono essere classificate come:

- Edifici residenziali (mono e multiutenza)
- Utenze industriali
- Utenze ospedaliere
- Utenze commerciali (e.g. centri commerciali, ipermercati)
- Edifici scolastici
- Uffici e pubblica amministrazione

I profili di carico sono estremamente dipendenti dalle condizioni climatiche, dalla tipologia di utenza e dalle strategie di regolazione e controllo degli impianti termici. In particolare alcuni di essi presentano elevate variazioni stagionali (oltre che naturalmente del consumo giornaliero): i) gli edifici industriali, commerciali e della pubblica amministrazione hanno una variazione stagionale del profilo di circa il 30-40 % (indipendente dalla variazione annuale relativa giornaliera); ii) gli edifici ospedalieri hanno variazioni stagionali di circa il 30% ; iii) gli edifici residenziali hanno la più bassa variazione stagionale compresa tra il 20 % e 30 %. La variazione del profilo dipende infatti da un lato dalle variazioni nella conduzione dell'edificio stesso e principalmente dall'affollamento dei locali (ventilazione,), dall'altro dalle variazioni del profilo climatico giornaliero. Un ulteriore aspetto da considerare nell'evoluzione delle reti di teleriscaldamento è la trasformazione dei consumatori in consumatori-produttori (ovvero in prosumer).

La rete progettata prevede, come detto, un numero ridotto di utenze allo scopo di contenere costi e spazi, ed al contempo simulare in scala ridotta il funzionamento di una rete costituita da 12 utenze con un mix variabile di utenze residenziali (i.e. condomini), industriali (e.g. cartiera) e del terziario (e.g. centro commerciale, scuole e università, uffici). Tutte le utenze sono quindi costituite da scambiatori di calore controllati da un sistema per la modellazione delle utenze di cui si desidera simulare i diversi profili di carico (caratteristici dell'utenza che si vuole studiare) e le diverse tipologie di utenze (e.g. in modalità passiva o attiva). In Tabella 20 sono riportate le caratteristiche funzionali delle diverse utenze.

Le potenze assorbite dalle singole utenze sono simulate attraverso sistemi di raffreddamento a secco del liquido termovettore (i.e. dry cooler). Questi sistemi sono come noto normalmente utilizzati per raffreddare liquidi di processo e sfruttano l'aria come fluido secondario. Nella progetto in esame sono stati considerati elementi con potenza massima di scambio pari a 24 kW, completati con sistemi di attuazione e regolazione in grado di consentire la modulazione della potenza da dissipare e, quindi, di simulare le sopra richiamate tipologie di utenze ed i relativi profili di consumo.

**Tabella 20 - Caratteristiche funzionali delle utenze e delle relative sottostazioni di fornitura**

Utenza	Alloggi equivalenti	Volumi riscaldati equivalenti.	Tipo sistema	Numero scambiatori	Potenza specifica ACS	Potenza nominale ACS	Circuito Riscaldamento												
							Potenza specifica riscaldamento	Potenza nominale riscaldamento	Circuito primario					Circuito secondario					
									Portata	Tubazione	DP	Temp. mandata	Temp. Ritorno	Portata	Tubazione	DP	Temp. Mandata	Temp. Ritorno	
No	No	m <sup>3</sup>	-	-	kW/app	kW	kW/app	kW	m <sup>3</sup> /h	DN	kPa	°C	°C	m <sup>3</sup> /h	DN	kPa	°C	°C	
12	3	900	diretto	0	8	24	8	24	2.06		30	70	60						
12	3	900	indiretto AC	1	8	24	8	24	1.03		200	90	70	1.38		20	80	65	
12	3	900	indiretto AS	1	8	24	8	24	0.46	10	200	120	75	2.06	20	25	80	70	
12	3	900	indiretto AC	1	8	24	8	24	0.46	10	200	120	75	2.06	20	25	80	70	

### 3.2.6 Sistema di controllo, monitoraggio e interfaccia utente

Il sistema di controllo, monitoraggio ed interfaccia progettato si basa su una piattaforma Labview programmabile. Esso è costituito da:

- un sistema di elaborazione dati;
- una scheda di interfaccia analogico-digitale per l'acquisizione dati e l'attuazione;
- attuatori valvole on-off e valvole modulanti;
- sensori di misura di portata, pressione e temperatura nei punti critici della rete.

L'ambiente di sviluppo integrato LabVIEW® (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*) per il linguaggio di programmazione grafica della NATIONAL INSTRUMENTS, crea programmi chiamati "Strumenti Virtuali" per l'analogia a strumenti fisici. Il linguaggio di programmazione LabVIEW® è caratterizzato da un modello di programmazione a flusso dati (*dataflow*) la cui esecuzione è determinata dalla struttura di un diagramma a blocchi (*block diagram*) sul quale vengono programmati dei nodi (ovvero delle specifiche funzioni utilizzate) e connessi tra loro attraverso linee (che trasportano le informazioni e le variabili del programma da un nodo di controllo ad un altro). Le operazioni nei nodi possono avvenire e propagarsi in serie e in parallelo.

Il sistema di controllo Pro.Re.Te sarà quindi strutturato in un pannello di sintesi e collegamento principale sul quale saranno visualizzati i principali parametri di misura e controllo della rete dal quale si potrà accedere a specifiche funzionalità.

In particolare, sono previsti i seguenti ulteriori pannelli (i.e strumenti virtuali):

- a) sistema di generazione: dal quale è possibile monitorare e controllare tutti i parametri specifici del sistema di generazione (e.g. temperatura, pressione di fornitura, portate, potenza termica) e del sistema di accumulo;
- b) rete di distribuzione: dal quale è possibile scegliere la configurazione di rete; monitorare e controllare tutti i parametri specifici della rete (quali ad esempio la temperatura e la pressione); effettuare il bilancio energetico e di massa sulla rete stessa in tempo reale;
- c) n.12 sottostazioni utenti: dal quale è possibile scegliere tipologia di utenza quali le curve di consumo; monitorare e controllare tutti i parametri specifici degli utenti; le strategie di controllo delle sottostazioni di scambio possono essere molto diverse [47], come ad esempio: i) a potenza costante, ii) a portata costante, iii) a temperatura di ritorno limitata, iv) a controllo della differenza

di pressione, v) a temperatura di ritorno variabile, vi) a temperatura e pressione di mandata costanti, ecc.

Ciascuno strumento virtuale VI è formato dal "*front panel*", ovvero dall'interfaccia utente dal quale sono visibili i dati di controllo (i.e. i dati in ingresso) e gli indicatori (i.e. i dati in uscita). I dati in ingresso sono ottenuti direttamente dal sistema di acquisizione dati (DAQ), mentre i dati in uscita sono visualizzati con indicatori numerici sintetici o grafici direttamente sul pannello frontale, e quindi salvati su file per l'analisi successiva.

Ogni strumento virtuale è rappresentato da un' icona nelle finestre del pannello frontale e del diagramma a blocchi. L'icona ed il pannello di connessione consentiranno di utilizzare e visualizzare lo strumento virtuale all'interno di un altro.

In Figura 19 si riporta lo schema di massima del Laboratorio Pro.Re.Te. progettato.

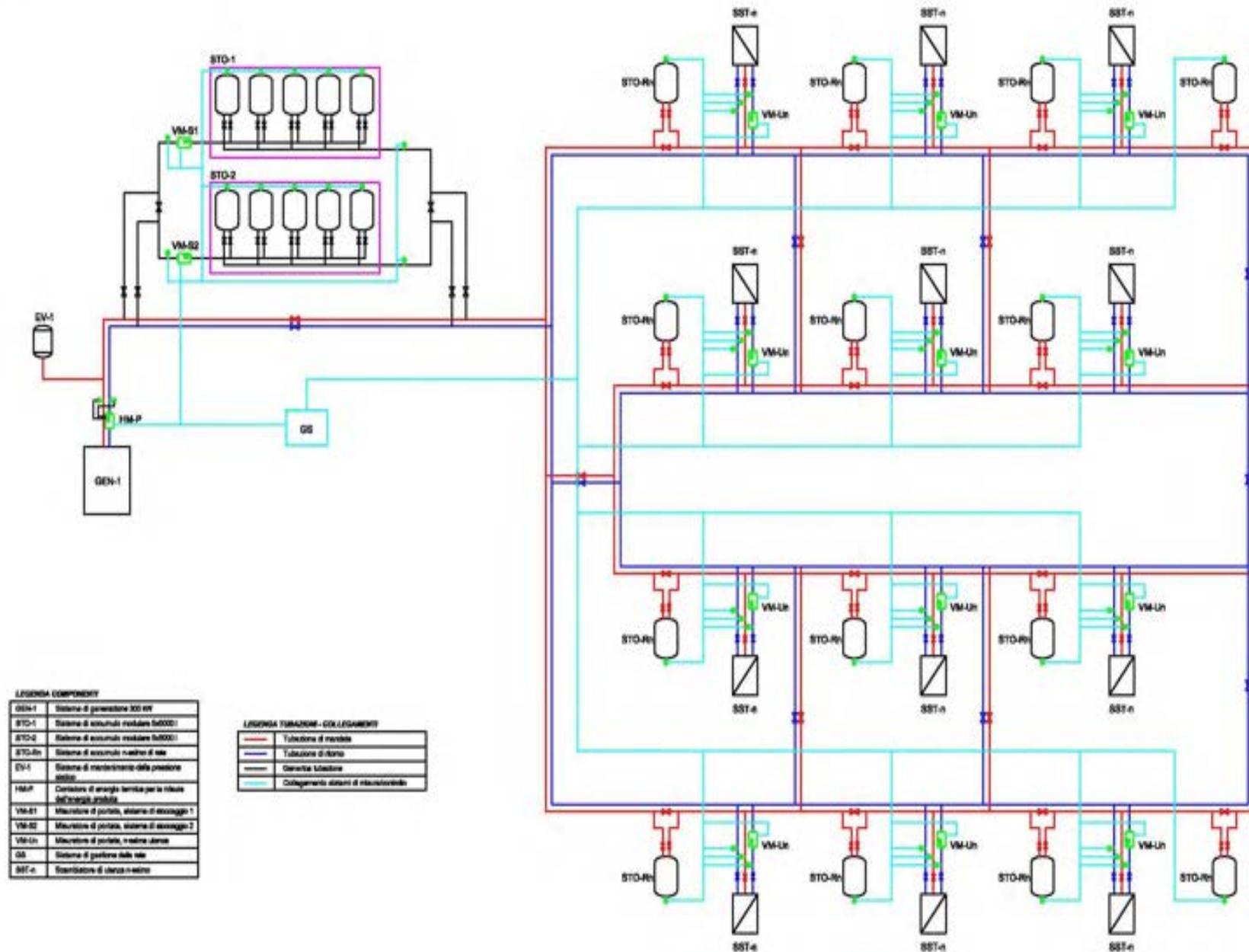


Figura 19 - Schema di massima del Laboratorio Pro.Re.Te.

### 3.3 Analisi economica preliminare del Laboratorio Pro.Re.Te.

In Tabella 21 viene riportata una valutazione di massima dei costi per la realizzazione del laboratorio per la riproduzione in scala della rete di teleriscaldamento Pro.Re.Te. La fase della progettazione non consente ancora uno studio tecnico-economico dettagliato; per tale motivo sono stati ipotizzati i valori minimo e massimo dei prezzi di riferimento sia per la componentistica che per l'installazione.

Dall'analisi preliminare si stima che il costo del sistema progettato è compreso tra circa 500.000 e 730.000 euro circa.

**Tabella 21 - Analisi economica preliminare del Laboratorio Pro.Re.Te.**

<i>Componenti</i>	<i>Quantità</i>	<i>Costo unitario</i> (min—max) €	<i>Costo totale</i> (min—max) €
Sistema di generazione configurabile circa 300 kW (comprensivo di generatore, caldaia, e sistemi di sicurezza)	1	50.000-70.000	50.000-70.000
Sistema di accumulo e controllo della pressione (comprensivo di pompe di ricircolo e inverter)	1	75.000-100.000	75.000-100.000
Rete riconfigurabile ed elementi di accumulo distribuiti (comprensivo di valvole e sistemi di sicurezza)	1	35.000-50.000	35.000-50.000
Sottostazioni di fornitura (comprensivo di scambiatori)	12	5.000-7.000	60.000-84.000
Sottostazioni di misura utenza	12	200-400	2.400-4.800
Sottostazioni di misura rete	2	2.000-4.000	4.000-8.000
UtENZE simulate (comprensivo di dry cooler e sistemi di attuazione)	12	6.000-10.000	72.000-120.000
Sistema di controllo, monitoraggio e interfaccia utente dell'impianto Pro.Re.Te.	1	40.000-60.000	40.000-60.000
Altri accessori (comprensivo di quadro elettrico)	1	20.000-30.000	20.000-30.000
Installazione, messa in esercizio e collaudo (comprensivo di opere murarie, pavimentazione necessarie, ...)	1	150.000-200.000	150.000-200.000
<b>Totale</b>			508.400-726.800

## 4 Progettazione di un sistema di contabilizzazione dell'energia termica diretta ed indiretta di una utenza tipica delle reti di teleriscaldamento

Il sistema di simulazione oggetto del presente paragrafo è stato ideato e progettato con l'obiettivo di verificare in campo i diversi sistemi di misura e contabilizzazione del calore ad oggi disponibili in ambito nazionale. Come detto, infatti, le performance metrologiche e le problematiche in campo connesse all'utilizzo di tali strumenti non risultano pienamente indagate né dal settore industriale, né tantomeno in letteratura scientifica. Il laboratorio prevede nella sua fase di sviluppo completo, oltre che la possibilità di svolgere in campo sperimentazioni riguardo i sistemi di misura e contabilizzazione del calore, l'integrazione con altri sistemi di misura e dunque la possibilità di svolgere una vera e propria diagnosi energetica dell'edificio in tempo reale. La possibilità di installare *smart meter* in corrispondenza dei flussi energetici di interesse, apre difatti la strada a numerosi studi futuri riguardanti:

- il risparmio energetico ottenibile con l'adozione di sistemi di contabilizzazione individuale dei consumi energetici, anche sulla base delle diverse modalità con cui viene informato l'occupante dell'edificio (i.e. con in-home display in tempo reale, via internet non in tempo reale);
- la valutazione di indici di rendimento dei dispositivi e impianti esistenti e definizione delle strategie di efficientamento da intraprendere;
- l'implementazione di logiche di *fault detection*.

### 4.1 Descrizione edificio/impianto

Per raggiungere gli obiettivi prefissati è stato necessario individuare un edificio reale con caratteristiche idonee all'installazione di tutte le tipologie di sistemi di contabilizzazione, per la conduzione della sperimentazione. A seguito di una dettagliata ricognizione in campo sull'edificato locale e sulla base delle disponibilità ricevute dai proprietari/occupanti degli edifici è stato individuato un piccolo condominio costituito da 6 unità immobiliari residenziale (suddiviso in 6 unità immobiliari) serviti da impianti autonomi. È ovvio che nelle ordinarie condizioni di utilizzo, un condominio servito da impianti autonomi non necessita di sistemi di ripartizione e contabilizzazione individuale dei consumi. Tuttavia la scelta di un impianto con distribuzione orizzontale (sebbene costituito da generatori di calore autonomi) è stata fondamentale per consentire l'installazione dei sistemi di contabilizzazione diretta. Successivamente all'acquisizione della disponibilità da parte di tutti i proprietari ed occupanti dell'edificio è stato stilato un protocollo di sperimentazione per l'installazione, la gestione e la dismissione dei sistemi di contabilizzazione.

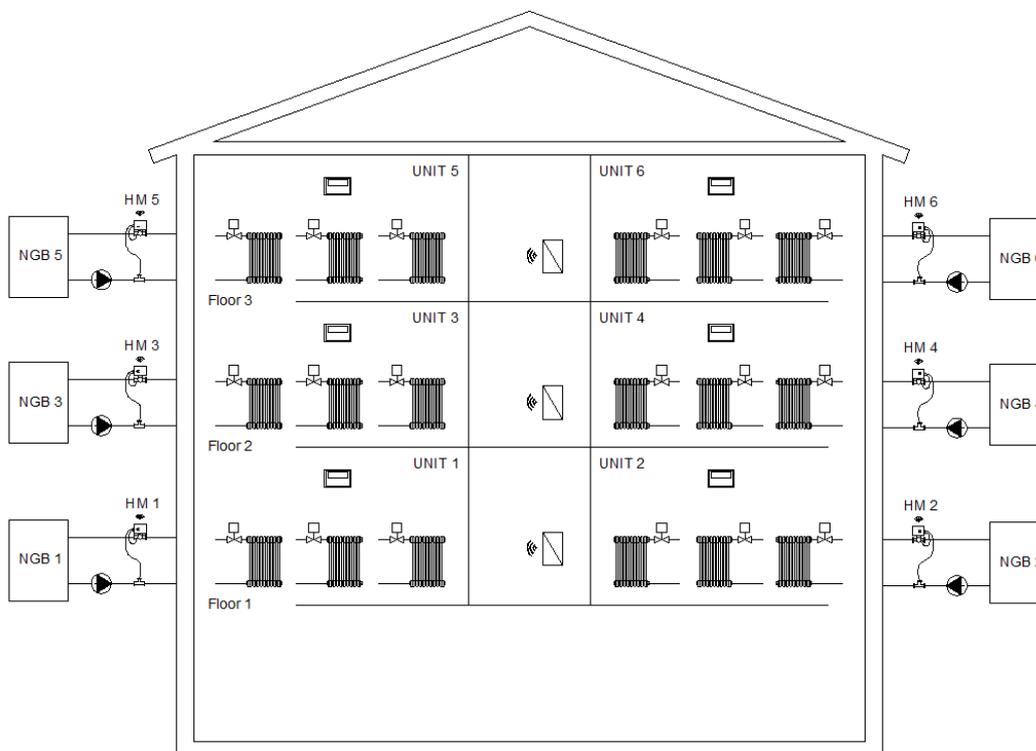
L'edificio selezionato risulta edificato intorno al 1950 ed è situato nel territorio del Lazio meridionale, nel centro urbano di Cassino (FR). Esso è composto complessivamente da 4 piani, uno dei quali adibito a servizi e tre ad uso residenziale (vedi Allegato).

La campagna progettata prevede nella fase iniziale la sperimentazione sulle sole sei unità immobiliari con destinazione d'uso residenziale. In Tabella 22 sono riportate le principali caratteristiche dell'edificio.

**Tabella 22 - Caratteristiche principali edificio**

Ubicazione edificio	Cassino (FR)
Zona climatica	C
Gradi giorno	1164
Numero livelli	Nr. 4
Unità immobiliari coinvolte nella sperimentazione	Nr. 6
Destinazione d'uso unità immobiliari coinvolte nella sperimentazione	Residenziale
Superficie totale	1268 m <sup>2</sup>
Superficie riscaldata totale	825 m <sup>2</sup>

Come detto, ogni unità abitativa è servita da un impianto di riscaldamento autonomo con caldaia alimentata a gas naturale, un sistema di distribuzione del fluido termovettore orizzontale e radiatori come unità terminali di emissione (Vedi Figura 17).



**Figura 20 - Schema edificio**

Nelle Tabelle 21-26 è riportato il dettaglio dei radiatori (i.e. posizionamento, tipologia, tipo di installazione) per ogni unità immobiliare. La determinazione della potenza termica nominale dei corpi scaldanti, necessaria ai fini della programmazione dei sistemi di ripartizione del calore, è stata effettuata secondo le prescrizioni della norma di riferimento [14]. Per i radiatori per i quali non siano reperibili dati conformi alla UNI EN 442, è previsto l'utilizzo del metodo dimensionale, basato appunto sulle dimensioni fisiche dei corpi scaldanti. A seguito del rilievo dettagliato delle dimensioni di tutti i corpi scaldanti presenti nelle unità immobiliari coinvolte è stato possibile determinare la potenza termica emessa dai corpi scaldanti per un salto termico di 60°C.

**Tabella 23 - Dettaglio radiatori unità immobiliare 1**

<i>id radiatore</i>	<i>Tipo radiatore</i>	<i>Potenza nominale radiatore (DT60°C)</i>	<i>Tipo installazione</i>
-	-	W	-
A1 R01	Colonne in ghisa	1643.2	Mensola
A1 R02	Colonne in ghisa	2403.4	Mensola
A1 R03	Colonne in ghisa	1319.4	Mensola
A1 R04	Colonne in ghisa	1283.3	Mensola corta
A1 R05	Colonne in ghisa	1319.4	Libero
A1 R06	Colonne in ghisa	1784.0	Libero
A1 R07	Colonne in ghisa	1266.4	Libero
A1 R08	Colonne in ghisa	1009.7	Libero

**Tabella 24 - Dettaglio radiatori unità immobiliare 2**

<i>id radiatore</i>	<i>Tipo radiatore</i>	<i>Potenza nominale radiatore (DT60°C)</i>	<i>Tipo installazione</i>
-	-	W	-
A2 R01	Colonne in ghisa	1784.0	Libero
A2 R02	Colonne in ghisa	1721.8	Libero
A2 R03	Colonne in ghisa	854.9	Libero
A2 R04	Colonne in ghisa	854.9	Libero
A2 R05	Colonne in ghisa	1514.3	Mensola corta
A2 R06	Colonne in ghisa	1474.3	Mensola
A2 R07	Colonne in ghisa	1474.3	Mensola
A2 R08	Colonne in ghisa	1197.9	Mensola corta
A2 R09	Colonne in ghisa	1917.7	Libero
A2 R10	Colonne in ghisa	1784.0	Libero
A2 R11	Colonne in ghisa	1721.8	Libero

**Tabella 25 - Dettaglio radiatori unità immobiliare 3**

<i>id radiatore</i>	<i>Tipo radiatore</i>	<i>Potenza nominale radiatore (DT60°C)</i>	<i>Tipo installazione</i>
-	-	W	-
A3 R01	Colonne in ghisa	1643.2	Mensola
A3 R02	Colonne in ghisa	2403.4	Libero
A3 R03	Colonne in ghisa	1319.4	Libero
A3 R04	Colonne in ghisa	1283.3	Mensola corta
A3 R05	Colonne in ghisa	1319.4	Mensola
A3 R06	Colonne in ghisa	1784.0	Mensola
A3 R07	Colonne in ghisa	1266.4	Libero
A3 R08	Colonne in ghisa	1009.7	Libero

**Tabella 26 - Dettaglio radiatori unità immobiliare 4**

<i>id radiatore</i>	<i>Tipo radiatore</i>	<i>Potenza nominale radiatore (DT60°C)</i>	<i>Tipo installazione</i>
-	-	W	-
A4 R01	Colonne in ghisa	1784.0	Libero
A4 R02	Colonne in ghisa	1721.8	Mensola
A4 R03	Colonne in ghisa	854.9	Mensola corta
A4 R04	Colonne in ghisa	854.9	Libero
A4 R05	Colonne in ghisa	1514.3	Mensola corta
A4 R06	Colonne in ghisa	1474.3	Mensola
A4 R07	Colonne in ghisa	1474.3	Mensola
A4 R08	Colonne in ghisa	1197.9	Mensola corta
A4 R09	Colonne in ghisa	1917.7	Libero
A4 R10	Colonne in ghisa	1784.0	Libero
A4 R11	Colonne in ghisa	1721.8	Libero

**Tabella 27 - Dettaglio radiatori unità immobiliare 5**

<i>id radiatore</i>	<i>Tipo radiatore</i>	<i>Potenza nominale radiatore (DT60°C)</i>	<i>Tipo installazione</i>
-	-	W	-
A5 R01	Colonne in ghisa	2279.4	Mensola
A5 R02	Colonne in ghisa	1364.2	Mensola (corta)
A5 R03	Colonne in ghisa	1231.8	Mensola (corta)
A5 R04	Colonne in ghisa	1231.8	Mensola (corta)
A5 R05	Colonne in ghisa	1692.9	Mensola
A5 R06	Colonne in ghisa	867.7	Mensola (corta)
A5 R07	Colonne in ghisa	1268.7	Mensola

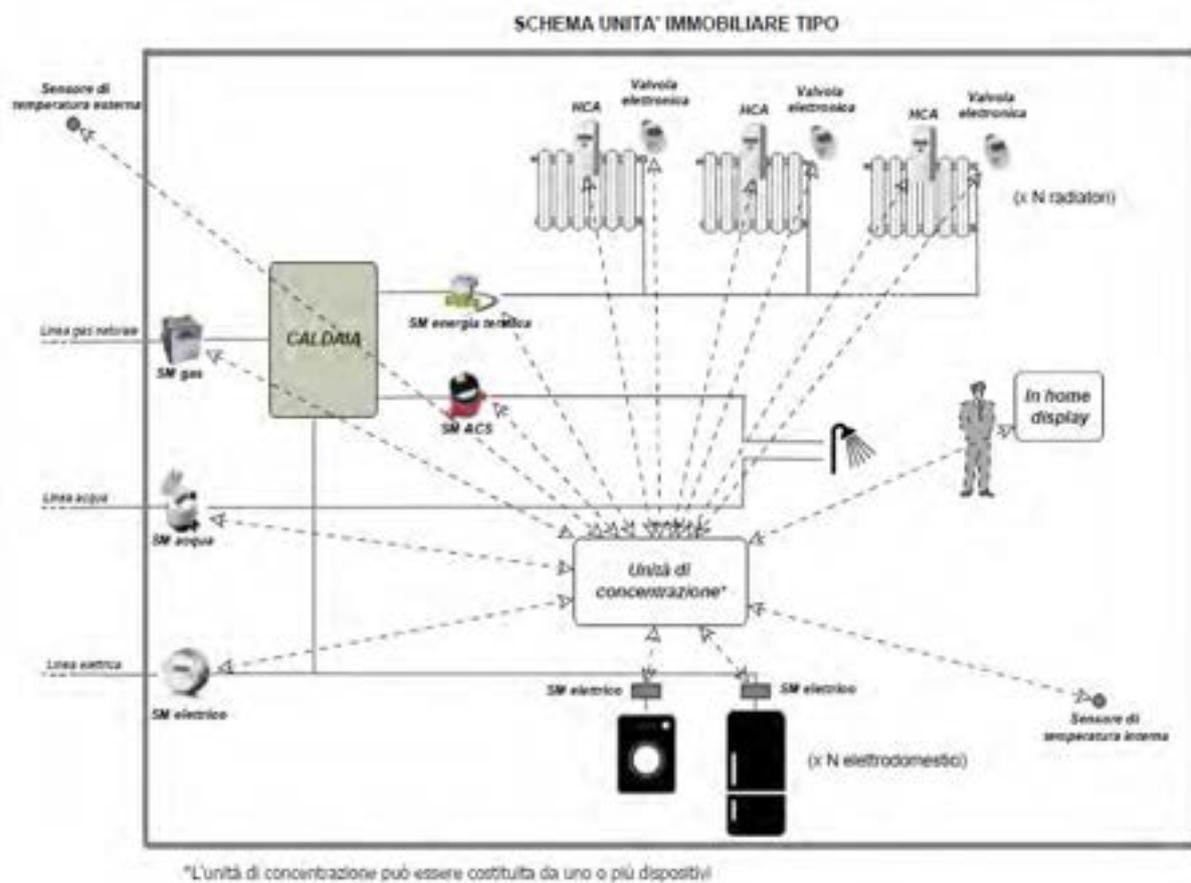
**Tabella 28 - Dettaglio radiatori unità immobiliare 6**

<i>id radiatore</i>	<i>Tipo radiatore</i>	<i>Potenza nominale radiatore (DT60°C)</i>	<i>Tipo installazione</i>
-	-	W	-
A6 R01	Colonne in ghisa	674.7	Incasso e case
A6 R02	Colonne in ghisa	1320.0	Mensola (corta)
A6 R03	Colonne in ghisa	674.7	Incasso
A6 R04	Piastre in ghisa	387.8	Mensola (corta)
A6 R05	Convettore	268.7	Mensola (corta)
A6 R06	Colonne in ghisa	1231.8	Mensola (corta)
A6 R07	Colonne in ghisa	989.1	Mensola (corta)
A6 R08	Colonne in ghisa	1424.2	Incasso e case
A6 R09	Piastre in ghisa	872.3	Libero
A6 R10	Colonne in ghisa	1721.2	Incasso e case
A6 R11	Colonne in ghisa	1323.2	Mensola

## 4.2 Descrizione dei sistemi di contabilizzazione

Nel presente paragrafo viene illustrata l'architettura di *smart metering* ipotizzata in grado di monitorare i flussi energetici di ogni unità immobiliare. Successivamente verrà descritta nel dettaglio la prima fase di sperimentazione relativa alla misura e contabilizzazione dell'energia termica ad uso riscaldamento.

Il sistema completo per il laboratorio sperimentale in campo è mostrato in Figura 21. Esso prevede i) la misura dei flussi energetici in ingresso all'unità (i.e. gas, energia elettrica); ii) la misura dell'acqua ad uso sanitario; iii) la misura delle quantità di energia in uscita dalla caldaia (i.e. acqua calda sanitaria e energia termica per riscaldamento); iv) la contabilizzazione individuale su ogni radiatore (i.e. totalizzatori di tempi di inserzione e ripartitori di calore); v) la misura dell'energia consumata dagli elettrodomestici; vi) la restituzione delle informazioni riguardanti i consumi su un in-home display.



**Figura 21 -Configurazione del sistema completo per appartamento tipo**

La prima fase di sperimentazione prevede unicamente l'installazione degli strumenti e dei sistemi per la misura e contabilizzazione del calore in ogni unità immobiliare. Pertanto lo schema in Figura 21 si semplifica negli schemi successivi in Figura 22, 23 e 24.

In ciascuna unità immobiliare, infatti, si è previsto di installare:

- i) un contatore di energia termica (HM) in uscita dalla caldaia per la misura dell'energia utilizzata dall'utenza;

- ii) un sistema di ripartizione indiretta con HCA (mediante installazione di un dispositivo su ogni radiatore) e di un sistema centrale di acquisizione dati;
- iii) un sistema di contabilizzazione indiretta basato sul metodo dei totalizzatori dei tempi di inserzione (ITC) che consente la termoregolazione indipendente di ogni zona termica individuata.

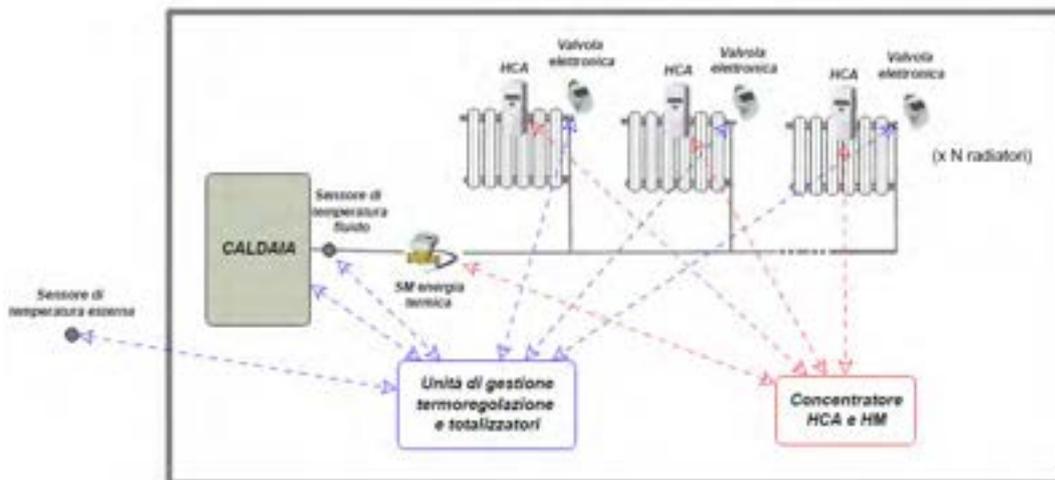


Figura 22 - Configurazione del sistema per appartamento tipo

Allo scopo di testare diversi sistemi commerciali presenti sul mercato le varie unità immobiliari sono state differenziate, prevedendo l’utilizzo di sistemi di contabilizzazione con diverse caratteristiche tecniche e di diversi costruttori. In particolare sono stati individuati tre costruttori , che indicheremo nel seguito come costruttore “A”, “B” e “C”. In Tabella 29 è riportato un quadro di riepilogo degli strumenti di contabilizzazione e la relativa ubicazione nelle diverse unità immobiliari.

Tabella 29 - Riepilogo sistemi utilizzati nella sperimentazione

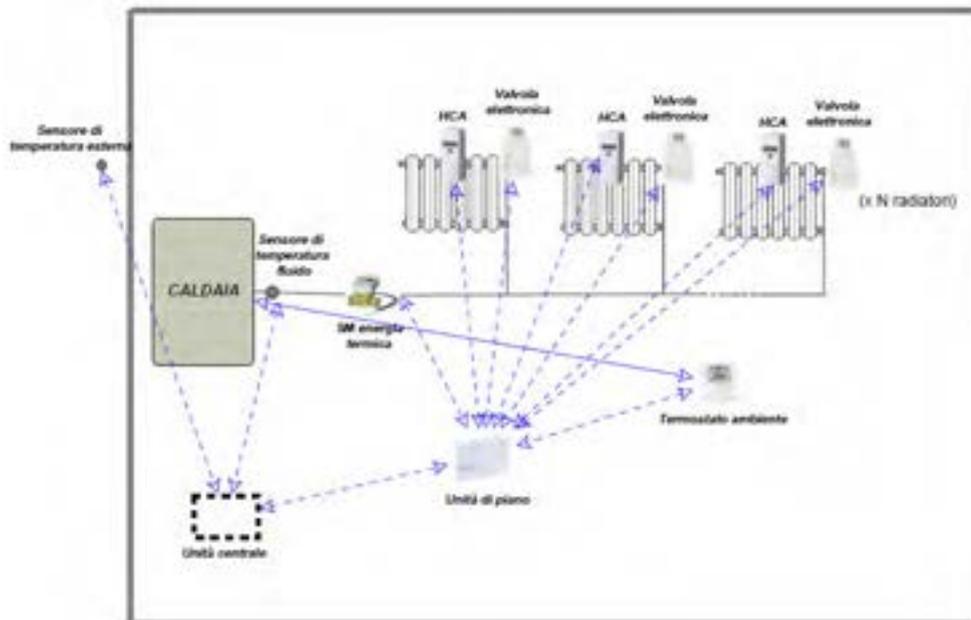
	HM	HCA	ITC-TC	ITC-DDC
Unità 1	Compatto, Fab. “A”	Due sensori, Fab. “A”	Fab. “A”	Fab. “A”
Unità 2	Compatto, Fab. “A”	Due sensori, Fab. “A”	Fab. “A”	Fab. “A”
Unità 3	Compatto, Fab. “B”	Due sensori, Fab. “B”	Fab. “C”	Fab. “C”
Unità 4	Compatto, Fab. “B”	Due sensori, Fab. “B”	Fab. “C”	Fab. “C”
Unità 5	Sottounità, Fab. “C”	Due sensori, Fab. “C”	Fab. “C”	Fab. “C”
Unità 6	Sottounità, Fab. “C”	Uno e Due sensori, Fab. “C”	Fab. “C”	Fab. “C”

Di seguito si riporta il dettaglio delle diverse unità immobiliari.

#### 4.2.1 Unità immobiliari 1 e 2

Nelle unità immobiliari 1 e 2 è prevista l'installazione di sistemi di termoregolazione e di contabilizzazione sia diretta che indiretta del fabbricante "A".

Lo schema di dettaglio dei componenti è illustrato in Figura 23.



**Figura 23- Schema sistema Unità immobiliare 1 e 2**

In Tabella 30, sono descritte le caratteristiche tecniche dei contatori di energia termica "completi" omologati ai sensi della MID in classe 2 (adatti anche per uso residenziale).

**Tabella 30 - Principali caratteristiche contatori di energia termica delle unità 1 e 2**

Principio di misura	Volumetrico a turbina getto multiplo
Portata permanente, $Q_p$	$0,6 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
Portata massima consentita per brevi periodi, $Q_{max}$	$1,2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
Portata minima, $Q_i$	$0,012 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
Classe di precisione MID	2
Tipo sensore di temperatura	Pt 1000

Il sistema di termoregolazione è costituito da una testa elettronica di attuazione installata sulle valvole termostattizzabili di ogni radiatore. Le teste di comando, ad azione on-off, vengono comandate via wireless dai termostati ambiente per mezzo dei quali è quindi possibile effettuare il controllo di temperatura. Gli attuatori comunicano con i termostati di zona o di appartamento che a loro volta comunicano con l'unità centrale attraverso delle unità di piano.

Il sistema di termoregolazione utilizzato consente anche la stima delle quantità di energia consumate mediante l'applicazione delle metodologie previste dalla UNI 11388 (basata sui tempi di inserzione dei corpi scaldanti compensati dalla temperatura media del fluido termovettore) e dalla UNI 9019 (basata sui tempi di inserzione dei corpi scaldanti compensati dai gradi-giorno dell'unità immobiliare).

I ripartitori utilizzati, approvati secondo lo standard Europeo EN834:2013, eseguono il conteggio secondo la metodologia a doppio sensore.

Mediante l’installazione di ulteriori apparati (e.g. moduli di comunicazione, contaimpulsi, modem gsm, etc.) è possibile acquisire e trasmettere a distanza i dati di tutti i sistemi di contabilizzazione del calore installati con un'unica unità centrale.

#### 4.2.2 Unità immobiliari 3 e 4

Per le unità immobiliari 3 e 4 è previsto l’utilizzo di contatori di energia termica e ripartitori del fabbricante “B” e sistemi di termoregolazione e di contabilizzazione indiretta bastato sui totalizzatori dei tempi di inserzione del fabbricante “C”.

Lo schema di dettaglio dei componenti è illustrato in Figura 24.

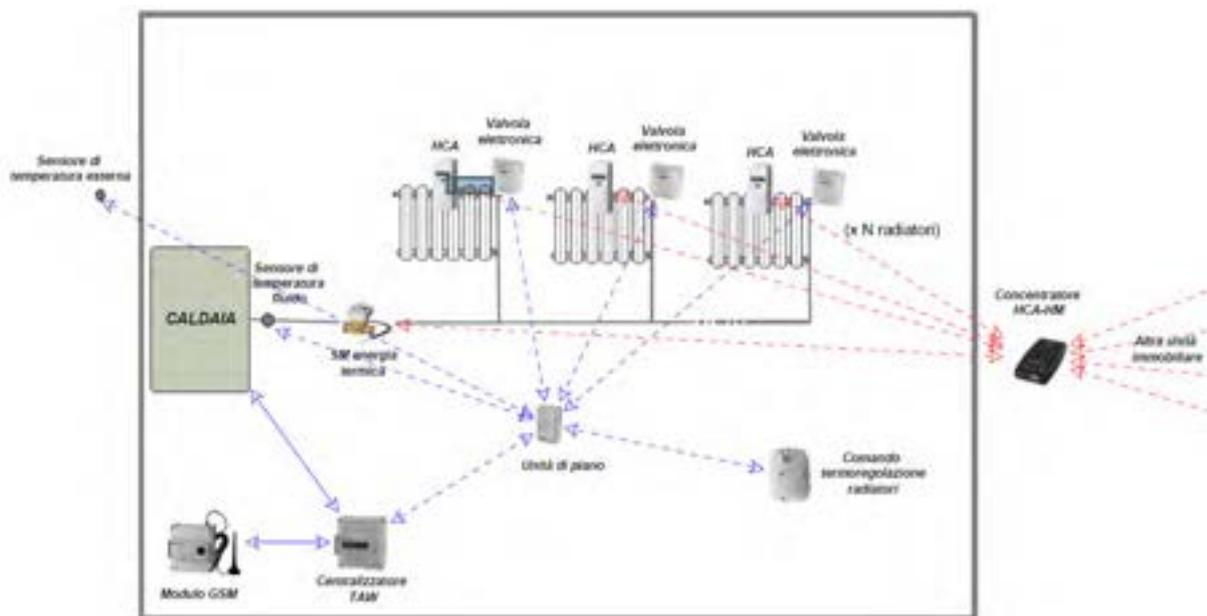


Figura 24 - Schema sistema Unità immobiliare 3 e 4

In Tabella 31, sono descritte le caratteristiche tecniche dei contatori di energia termica “completi” omologati ai sensi della MID in classe 3 (per uso esclusivamente residenziale).

Tabella 31 - Principali caratteristiche contatori di energia termica delle unità 3 e 4

Principio di misura	Volumetrico a turbina getto unico
Portata permanente, $Q_p$	$0,6 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
Portata massima consentita per brevi periodi, $Q_{max}$	$1,2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
Portata minima, $Q_i$	$0,012 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
Classe di precisione MID	3
Tipo sensore di temperatura	Pt 500

Il sistema di termoregolazione ambiente è costituito da una testa elettronica di attuazione installata sulle valvole termostattizzabili di ogni radiatore. La testa di comando è sostanzialmente un regolatore termostatico elettronico che consente il controllo della temperatura ambiente in modo automatizzato sia via wireless, mediante telecomando, che mediante il comando locale sull'attuatore stesso. Gli attuatori comunicano con un centralizzatore attraverso un concentratore di piano che consente quindi la termoregolazione degli ambienti nonché la gestione della centrale termica, in questo caso coincidente con la sola caldaia. L'unità centrale comunicando continuamente con tutti gli attuatori è in grado di conoscere in ogni momento la situazione d'uso dell'impianto di riscaldamento, e può in impianti serviti da sistemi di generazione e distribuzione più complessi (e.g. con regolazione climatica, pompe di circolazione ad inverter, ecc.) controllare la generazione di calore e la distribuzione. Il modulo centrale è difatti in grado di modulare la velocità della pompa a giri variabili, spegnere il generatore quando non c'è richiesta di riscaldamento o è comunque limitata, ecc. Nel caso specifico della sperimentazione in oggetto è utilizzata la funzione di spegnimento del generatore con richiesta di calore limitata, ovvero nel momento in cui resta un solo corpo scaldante attivo.

Lo stesso sistema, inoltre, consente la determinazione delle quantità di energia consumate dal singolo corpo scaldante in applicazione della metodologia prevista dalla UNI 11388 basata sui tempi di inserzione dei corpi scaldanti compensati dalla temperatura media del fluido termovettore.

I ripartitori previsti per le presenti unità sono programmabili per un conteggio secondo la metodologia a doppio sensore o singolo sensore e sono approvati secondo lo standard UNI EN 834:2013. Per la sperimentazione in oggetto è prevista la programmazione dei ripartitori con metodologia di calcolo a doppio sensore.

In tale unità i dati derivanti dal sistema di termoregolazione e contabilizzazione sulla metodologia dei totalizzatori dei tempi di inserzione, sono stati gestiti mediante il modulo centrale di appartamento, già descritto in precedenza. I dati relativi agli HM e agli HCA di entrambi gli appartamenti verranno invece acquisiti per mezzo di una unica unità centrale.

#### 4.2.3 Unità immobiliari 5 e 6

Per le unità immobiliari 5 e 6 è previsto l'impiego di sistemi di termoregolazione e di contabilizzazione sia diretta che indiretta del fabbricante "C".

Lo schema di dettaglio dei componenti è illustrato in Figura 25.

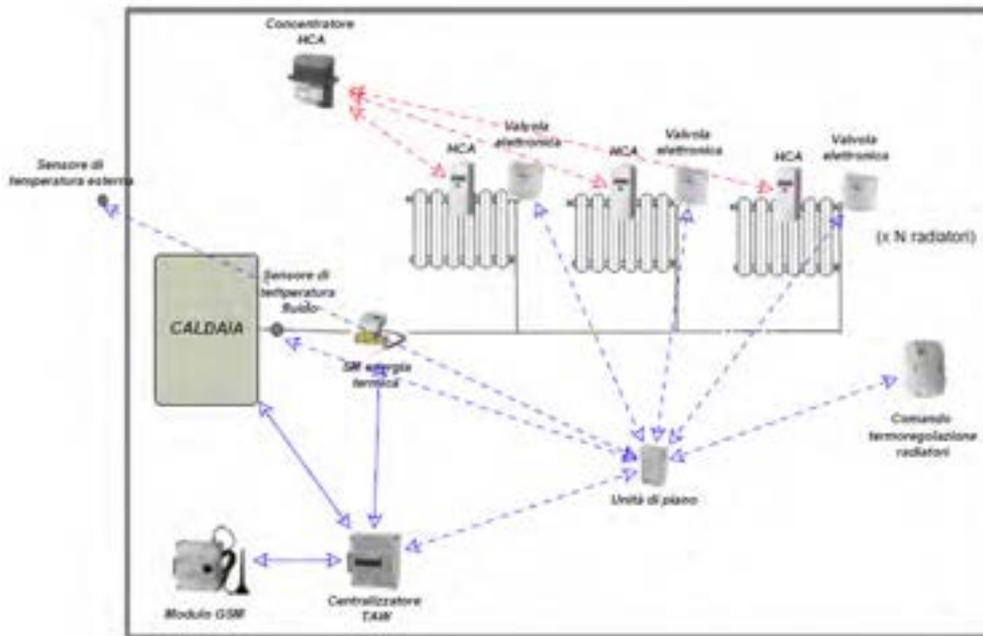


Figura 25 - Schema sistema Unità immobiliare 5 e 6

I contatori di energia termica, previsti a valle del generatore di calore, sono contatori di energia termica composti da tre sottounità separate ai sensi della MID (Allegato MI-004), ovvero: i) misuratore di portata volumetrico; ii) coppia di sensori di temperatura; iii) unità di calcolo. Tali dispositivi dispongono di una serie di funzionalità aggiuntive, quale la di trasmissione a distanza dei dati di misura del flusso e delle temperature indispensabile per il post-processing dei dati. Le principali caratteristiche dei dispositivi sono riportate in Tabella 32.

Tabella 32 - Principali caratteristiche contatori di energia termica delle unità 5 e 6

Principio di misura	Volumetrico a turbina getto singolo
Portata permanente, $Q_p$	$0,6 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
Portata massima consentita per brevi periodi, $Q_{max}$	$1,2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
Portata minima, $Q_i$	$0,012 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
Classe di precisione MID	3
Tipo sensore di temperatura	Pt 1000

L'architettura del sistema di termoregolazione e contabilizzazione basato sul metodo dei totalizzatori dei tempi di inserzione è quella già descritta precedentemente per le unità 3 e 4.

Gli HCA utilizzati sono programmabili sia secondo il principio di funzionamento "ad un sensore" che "a doppio sensore", e sono approvati secondo lo standard Europeo EN834:2013. Per l'unità immobiliare 5 è prevista l'installazione di ripartitori funzionanti secondo il metodo di conteggio a due sensori, mentre per l'unità immobiliare 6 è previsto un doppio ripartitore per ogni radiatore, uno dei quali programmato con il metodo di calcolo a sensore unico. Quest'ultima configurazione consentirà il confronto dei risultati ottenuti in condizioni operative con l'applicazione delle due metodologie di conteggio.

È inoltre prevista l'installazione di ulteriori componenti integrativi per consentire il monitoraggio e la gestione a distanza di tutti i sistemi.

### 4.3 Analisi di fattibilità economica

In Tabella 33 viene riportata l'analisi preliminare dei costi di implementazione del sistema "completo" descritto in Figura 21 (valido per un singolo appartamento tipo).

**Tabella 33 - Analisi preliminare dei costi del sistema sperimentale completo (per appartamento tipo)**

	<i>Costo Unitario</i>	<i>Q.tà</i>	<i>Costo Totale</i>
Smart meter energia termica/ACS*	€ 230-350	2	€ 460-700
Smart meter Acqua*	€ 200-320	1	€ 200-320
Smart meter gas naturale*	€ 220-500	1	€ 220-500
Smart meter elettrico di nuova generazione*	€ 440 -520	1	€ 440 -520
Valvole termostatzabili complete di testa elettronica*	€ 145-210	10	€ 1.450-2.100
Ripartitore di calore a due sensori*	€ 27-36	10	€ 270-360
Sensori di temperatura*	€ 90-110	3	€ 270- 330
In-home display/tablet	€ 130-160	1	€ 130-160
Smart meter elettrici per elettrodomestici*	€ 100-150	2	€ 200-300
Concentratore multifunzione (Hardware)*	€ 2.000-2.500	1	€ 2.000-2.500
Sviluppo software dedicato per concentratore e programmazione dei dispositivi	€ 5.500-7.000	1	€ 5.500-7.000
			<b>€ 11.140- 14.790</b>

\* i costi indicati si intendono comprensivi dei costi di installazione da sostenere

I costi dell'analisi economica riportata nella tabella sono stati stimati dagli autori sulla base di costi della strumentazione disponibile ad oggi sul mercato e delle ore di lavoro necessarie all'installazione e configurazione degli apparati e allo sviluppo di software dedicati. Tali costi sono stati individuati mediante la richiesta di preventivi a costruttori leader nel settore e mediante l'interrogazione di professionisti installatori. L'ampia variabilità che si registra per alcune voci è dovuta sia ai costi differenti di acquisto che alle installazioni che possono essere più o meno complesse a seconda della configurazione impiantistica degli appartamenti.

Si può notare che la voce di costo che incide maggiormente è quella relativa allo sviluppo di software dedicato. Tale costo tuttavia sarebbe da affrontare esclusivamente per la prima applicazione sperimentale.

Nelle tabelle 32-34 viene riportata l'analisi preliminare dei costi di implementazione per le tre configurazioni di sistema previste in fase progettuale. I costi riportati sono stati individuati sulla base di preventivi e sulle ore previste per l'installazione degli apparati.

Nella sperimentazione in oggetto, i costi dei sistemi di acquisizione ed elaborazione centrali, normalmente suddivisi per le "N" unità immobiliari del condominio, ricadono totalmente sulla singola unità sperimentale causando dunque un incremento del costo per unità immobiliare rispetto a sistemi di contabilizzazione realizzati nelle condizioni ordinarie.

**Tabella 34 - Analisi preliminare dei costi Unità immobiliare 1-2**

	<i>Costo Unitario</i>	<i>Q.tà</i>	<i>Costo Totale</i>
Contatore di energia termica ed interfaccia contaimpulsi fabbricante "A"	€ 165	1	€ 165
Valvole termostattizzabili incluse teste elettroniche di comando fabbricante "A"	€ 110	8	€ 880
Termostato ambiente, sonde di temperatura (mandata/ritorno e aria esterna) radio	€ 425	2	€ 850
Concentratore	€190	1	€190
Ripartitore di calore a due sensori fabbricante "A"	€ 29,8	8	€ 238,4
Interfaccia per acquisizione HCA e HM	€ 225	1	€ 225
Unità centrale, software e modem di trasmissione	€ 3200	1	€ 3200
Installazione degli apparati e configurazione	€ 950	1	€ 950
			<b>€ 6.698,4</b>

**Tabella 35 - Analisi preliminare dei costi Unità immobiliare 3-4**

	<i>Costo Unitario</i>	<i>Q.tà</i>	<i>Costo Totale</i>
Contatore di energia termica smart fabbricante "B"	€ 145	1	€ 145
Valvole termostattizzabili incluse teste elettroniche di comando fabbricante "C"	€ 122	8	€ 976
Concentratore, telecomando, sonde di temperatura (mandata/ritorno e aria esterna) radio	€ 750	1	€ 750
Unità centrale, software e modem di trasmissione	€ 1930	1	€ 1930
Ripartitore di calore a due sensori fabbricante "B"	€ 25	8	€ 200
Sistema per acquisizione HCA e HM fabbricante "B"	€ 970	1	€ 970
Accessori di montaggio, installazione degli apparati e configurazione	€ 950	1	€ 950
			<b>€ 5.921</b>

**Tabella 36 - Analisi preliminare dei costi Unità immobiliare 5-6**

	<i>Costo Unitario</i>	<i>Q.tà</i>	<i>Costo Totale</i>
Contatore di energia termica smart "C"	€ 580	1	€ 580
Valvole termostattizzabili incluse teste elettroniche di comando fabbricante "C"	€ 122	7	€ 854
Concentratore, telecomando, sonde di temperatura (mandata/ritorno e aria esterna) radio	€ 750	1	€ 750
Unità centrale, software e modem di trasmissione	€ 1930	1	€ 1930
Ripartitore di calore a due sensori fabbricante "C"	€ 29	7	€ 203
Interfaccia per acquisizione HCA fabbricante "C"	€ 650	1	€ 650
Accessori di montaggio, installazione degli apparati e configurazione	€ 950	1	€ 950
			<b>€ 5.917</b>

#### 4.4 *Ulteriori attività svolte ed in itinere*

Terminata la progettazione del laboratorio sperimentale e la analisi preliminare dei costi, il gruppo di ricerca ha fornito supporto ad ENEA, sia nella definizione dei fornitori che nell'individuazione delle caratteristiche di dettaglio degli strumenti ed apparati oggetto della sperimentazione.

A conclusione delle procedure di acquisto si è proceduto alla programmazione e configurazione degli strumenti da parte del DICeM. Parte della strumentazione, già disponibile presso il LAMI, è stata configurata e programmata presso il laboratorio stesso, la restante strumentazione è stata invece configurata in collaborazione con il costruttore "C" presso la sede dello stesso costruttore.

## 5 Conclusioni

Il presente lavoro di ricerca ha riguardato la caratterizzazione metrologica dei sistemi di misura delle reti termiche distribuite allo scopo sia di definire le specifiche tecniche della strumentazione di misura idonea alla valutazione delle prestazioni delle reti, sia di analizzare le problematiche tecniche caratteristiche dei sistemi di misura e contabilizzazione del calore attualmente installati sulle piccole e grandi utenze.

Per quanto concerne le specifiche tecniche della strumentazione di misura e contabilizzazione del calore installate sulle utenze, i risultati della ricerca hanno evidenziato che:

- gli strumenti di misura diretti utilizzati nella contabilizzazione dell’energia termica nelle reti di riscaldamento presentano incertezze adeguate alle necessità se l’utilizzo dello strumento è conforme ai limiti caratteristici del misuratore; in particolare, il funzionamento a ridotte differenze di temperatura o a portate inferiori a quella permanente compromettono sensibilmente le prestazioni metrologiche; altri aspetti quali l’impossibilità di utilizzare contatori bidirezionali (e.g. utenti attivi), di installare in modo opportuno il misuratore e di valutare la qualità dell’energia termica fornita aprono ampi spazi di miglioramento della tecnologia di misura e della normativa ad essa connessa;
- gli strumenti di misura indiretti utilizzati nella ripartizione del calore delle grandi utenze civili, sebbene già diffusi in alcuni paesi europei (soprattutto i ripartitori di calore HCA) non risultano adeguatamente investigati dal punto di vista delle prestazioni metrologiche in campo; i ripartitori analizzati, infatti, sebbene presentino caratteristiche generalmente conformi alle normative europee, possono presentare errori facilmente prevedibili nelle effettive condizioni operative e di installazione.

Sempre allo scopo di analizzare gli strumenti di misura, il gruppo di ricerca ha condotto un’indagine sulla strumentazione installata a piè di stabile di alcune reti di teleriscaldamento esistenti attraverso il coinvolgimento di alcuni operatori del settore; la mappatura ha consentito di valutare le caratteristiche dei misuratori installati in termini di tecnologie e modalità di acquisizione dati. Da tale analisi emerge che i misuratori di energia installati non sono generalmente interfacciabili con i ripartitori di calore condominiali e non consentono attualmente un bilancio della rete in tempo reale. Le maggiori criticità riscontrate sono: i) l’utilizzo dello strumento al di fuori della propria *rangeability*; ii) l’assenza di un protocollo condiviso tra i diversi operatori sulle modalità di installazione; iii) la presenza di un cospicuo numero di strumenti installati non MID non soggetto alle stringenti regole di verifica della metrologia legale.

Per analizzare e proporre soluzioni adeguate alle su citate criticità il gruppo di ricerca ha sviluppato:

- un progetto di massima di un impianto pilota per la riproduzione in scala di una rete di teleriscaldamento (Pro.Re.Te) capace di replicare in scala le diverse condizioni di esercizio e bilanciamento tipiche delle reti di teleriscaldamento;
- un progetto di un sistema di contabilizzazione dell’energia termica diretta ed indiretta in una rete di riscaldamento condominiale.

I suddetti sistemi consentiranno: i) l’esecuzione di prove in campo per il confronto dei sistemi di misura diretti e di contabilizzazione in diverse condizioni operative ed impiantistiche nel settore residenziale; ii) l’analisi delle problematiche di integrazione con altri sistemi di misura (e.g. *smart meter* gas, elettrici, acqua) ai fini di una diagnosi energetica dell’edificio in tempo reale e l’implementazione di tecniche di *fault detection and isolation*; iii) l’analisi del risparmio energetico ottenibile con l’adozione di sistemi di contabilizzazione individuale dei consumi energetici, anche sulla base delle diverse modalità con cui viene informato l’utente finale (i.e. con in-home display in tempo reale, via internet non in tempo reale); iv) la validazione di modelli di funzionamento delle reti di teleriscaldamento, nonché la prova di diversi componenti e strumenti nei diversi assetti; v) la valutazione di indici di prestazione delle reti di teleriscaldamento e la sperimentazione di diverse strategie di conduzione e gestione.

## 6 Appendice

Di seguito si riporta la formula per la stima dell'incertezza di ripartizione dei consumi per un generico appartamento. La formula tiene conto della correlazione tra i corpi scaldanti nello stesso appartamento e nell'intero edificio e tra i consumi dell'appartamento in esame e quelli dell'intero edificio.

$$\begin{aligned}
 i_{app}^2 \left( \frac{UR_{app}}{UR_{edif}} \right) &= \sum_{i=1}^{n_{cs}^{app}} \frac{i_A^2(UR_{cs,i}) + i_B^2(UR_{cs,i})}{(n_{cs}^{app})^2} + \sum_{i=1}^{n_{cs}^{edif}} \frac{i_A^2(UR_{cs,i}) + i_B^2(UR_{cs,i})}{(n_{cs}^{edif})^2} \\
 &+ 2r_{cs,app} \sum_{i_1=1}^{n_{cs}^{app}-1} \sum_{i_2=i_1+1}^{n_{cs}^{app}} \frac{i_B(UR_{cs,i_1})}{n_{cs}^{app}} \frac{i_B(UR_{cs,i_2})}{n_{cs}^{app}} \\
 &+ 2r_{cs,edif} \sum_{i_1=1}^{n_{cs}^{edif}-1} \sum_{i_2=i_1+1}^{n_{cs}^{edif}} \frac{i_B(UR_{cs,i_1})}{n_{cs}^{edif}} \frac{i_B(UR_{cs,i_2})}{n_{cs}^{edif}} \\
 &- 2r_{app} \sum_{j_1=1}^{n_{app}-1} \sum_{j_2=j_1+1}^{n_{app}} \frac{i_B(UR_{cs,j_1})}{n_{app}} \frac{i_B(UR_{cs,j_2})}{n_{app}} \\
 &- 2r_{edif} \sum_{j_1=1}^{n_{cs}^{edif}-1} \sum_{j_2=j_1+1}^{n_{cs}^{edif}} \frac{i_B(UR_{cs,j_1})}{n_{cs}^{edif}} \frac{i_B(UR_{cs,j_2})}{n_{cs}^{edif}}
 \end{aligned} \tag{12}$$

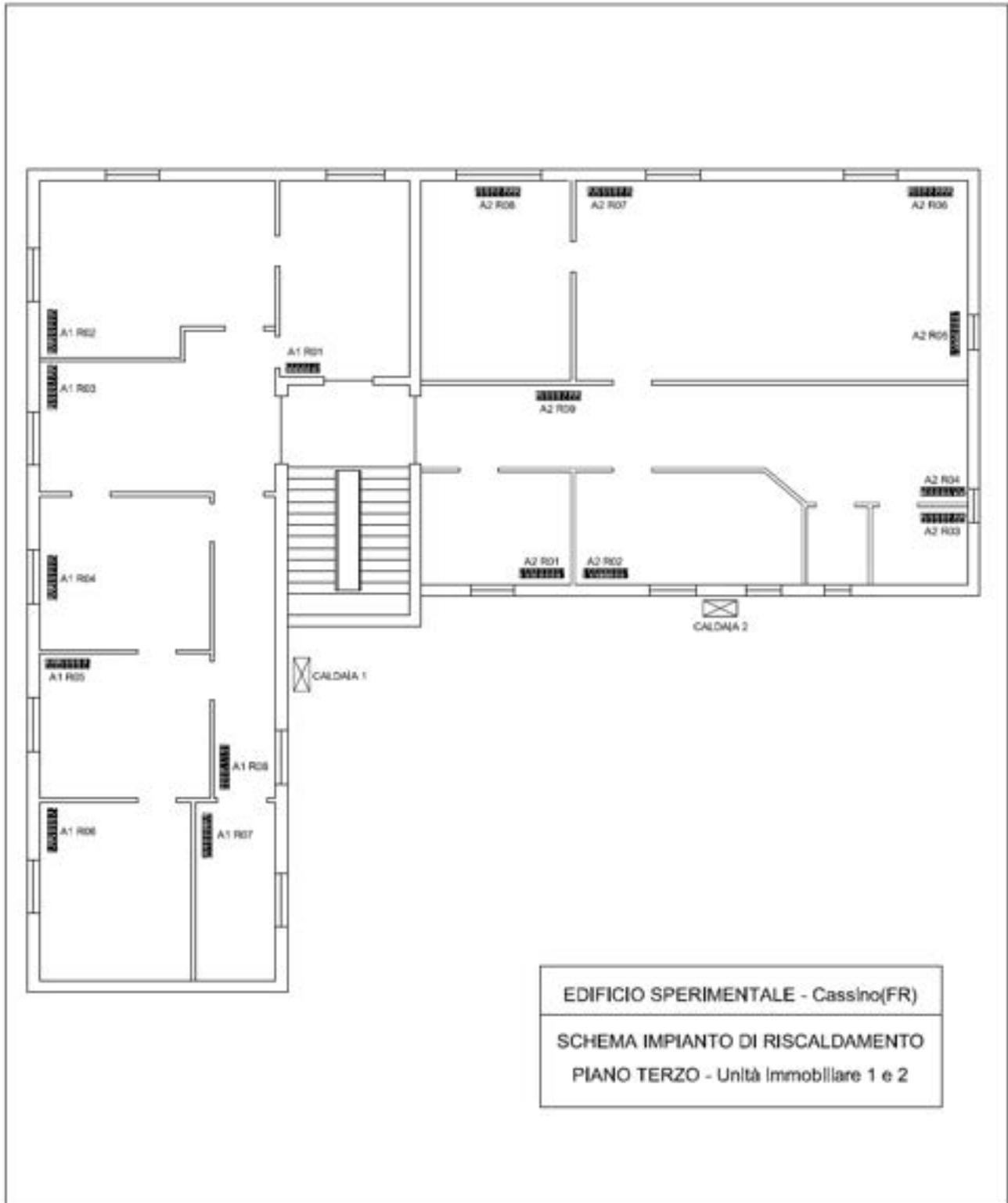
avendo indicato con:

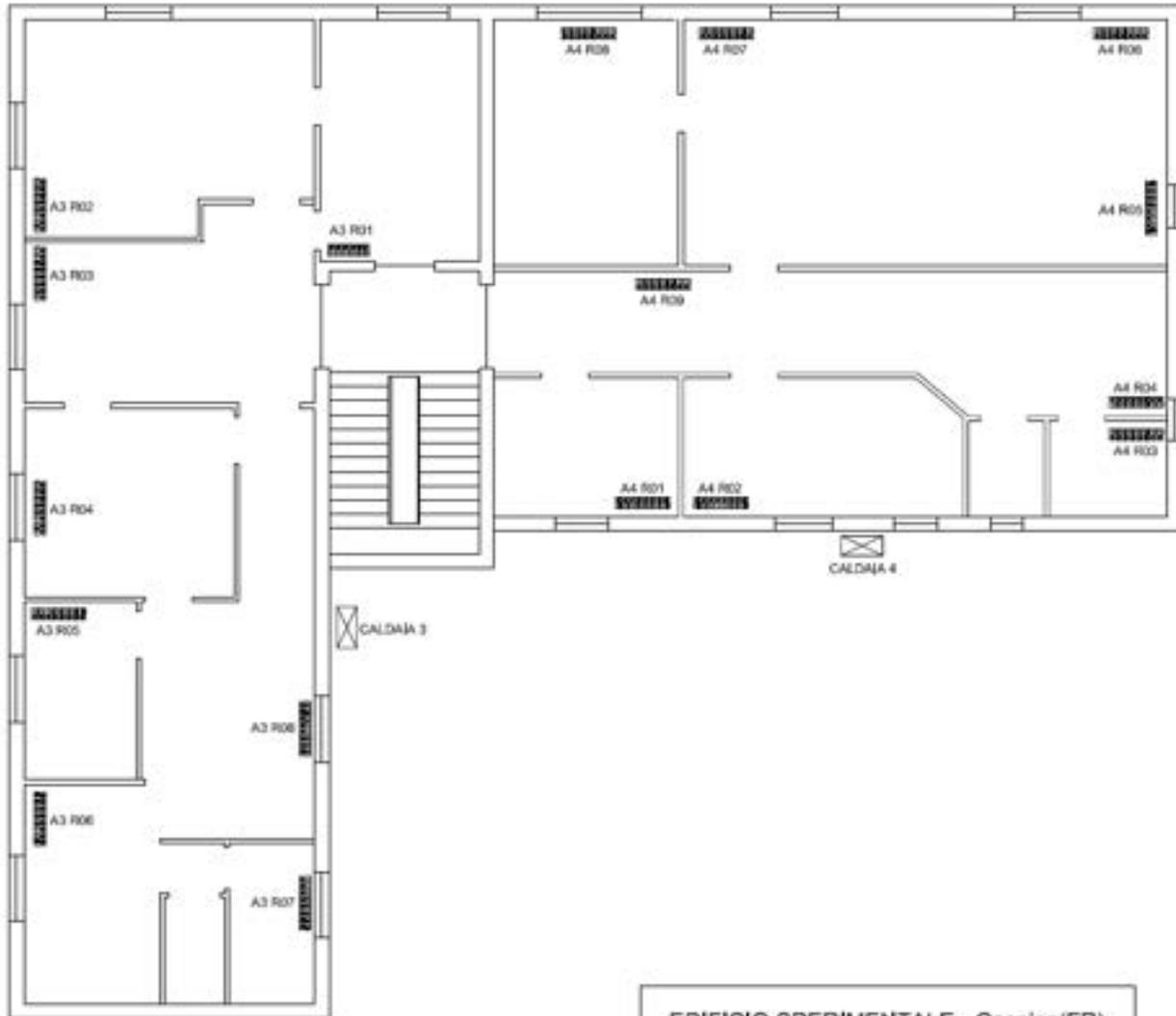
- $n_{cs}^{app}$  e  $n_{cs}^{edif}$  il numero di corpi scaldanti nel singolo appartamento e nell'intero edificio, rispettivamente;
- $i_A$  e  $i_B$  le incertezze relative di tipo A (i.e. accidentali) e di tipo B (i.e. sistematiche) delle unità di ripartizione conteggiate dai singoli corpi scaldanti, rispettivamente;
- $r_{cs,app}$ ,  $r_{cs,edif}$ , i coefficienti di correlazione tra i corpi scaldanti nello stesso appartamento e nell'intero edificio, rispettivamente;
- $r_{app}$  il coefficiente di correlazione tra i consumi dell'appartamento in esame e quelli dell'intero edificio, ricavabile da  $r_{edif}$  attraverso la relazione  $r_{app} = r_{edif} + (1 - r_{edif})/n_{app}$ ;
- $r_{edif}$  il coefficiente di correlazione tra i consumi dell'appartamento in esame e quelli degli altri appartamenti nell'edificio.

L'equazione (12), nelle ipotesi di  $i_A$  e  $i_B$  uguali per ciascun corpo scaldante e di  $n_{cs}^{app}$  e  $UR_{app}$  uguali per ciascun appartamento, può semplificarsi nella equazione (13)

$$\begin{aligned}
 i_{app}^2 \left( \frac{UR_{app}}{UR_{edif}} \right) &= \frac{i_A^2(UR_{cs}) + i_B^2(UR_{cs})}{n_{cs}^{app}} + \frac{i_A^2(UR_{cs}) + i_B^2(UR_{cs})}{n_{cs}^{edif}} + r_{cs,app} \frac{(n_{cs}^{app} - 1)}{n_{cs}^{app}} i_B^2(UR_{cs}) \\
 &+ r_{cs,edif} \frac{(n_{cs}^{edif} - 1)}{n_{cs}^{edif}} i_B^2(UR_{cs}) - r_{app} \left( \frac{1}{n_{cs}^{app}} + \frac{n_{cs}^{app} - 1}{n_{cs}^{app}} r_{cs,app} \right) i_B^2(UR_{cs}) \\
 &- r_{edif} \left( \frac{1}{n_{cs}^{edif}} + \frac{n_{cs}^{edif} - 1}{n_{cs}^{edif}} r_{cs,edif} \right) i_B^2(UR_{cs})
 \end{aligned} \tag{13}$$

## 7 Allegato

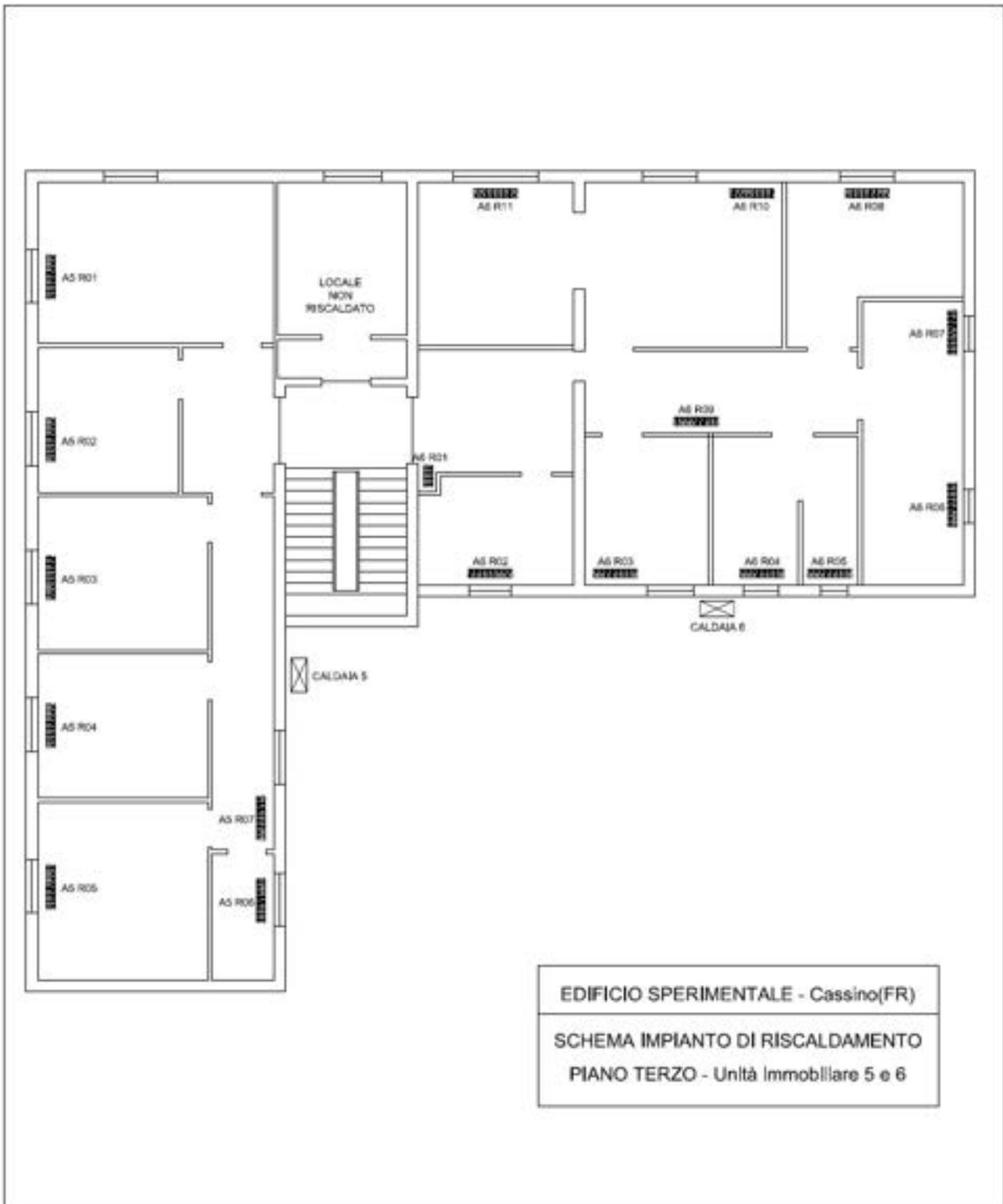




EDIFICIO SPERIMENTALE - Cassino(FR)

SCHEMA IMPIANTO DI RISCALDAMENTO

PIANO TERZO - Unità Immobiliare 3 e 4



## 8 Bibliografia

- [1] *Direttiva 2002/91/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 16 dicembre 2002 sul rendimento energetico nell'edilizia.*, Gazzetta ufficiale delle Comunità europee, L 1/65 del 4.1.2003, 2002.
- [2] *Direttiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 19 maggio 2010 sulla prestazione energetica nell'edilizia (rifusione).*, Gazzetta ufficiale dell'Unione europea, L 153/13 del 18.6.2010 , 2010.
- [3] *Direttiva 2012/27/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 25 ottobre 2012, sull'efficienza energetica, che modifica le direttive 2009/125/CE e 2010/30/UE e abroga le direttive 2004/8/CE e 2006/32/CE.* Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea n. L 31, 2012.
- [4] L. Celenza, M. Dell'Isola, G. Ficco, B.I. Palella, G. Riccio. *Heat accounting in historical buildings*, Energy and Buildings, Volume 95, pp. 47-56, 2015.
- [5] G. Ficco, P. Vigo. *Contabilizzazione dell'energia termica, un mercato da regolare.* AICARR Journal, #30, 22-26. 2015.
- [6] L. Celenza, M. Dell'Isola, R. D'Alessio, G. Ficco, P. Vigo, A. Viola. *Metrological analysis of smart heat meter*, in 16th International Flow Measurement Conference, FLOMEKO 2013, Code 105418, 546-550, Paris, 24-26th September 2013.
- [7] *Decreto del Presidente della Repubblica 28 giugno 1977, n. 1052 "Regolamento di esecuzione alla Legge 30 Aprile 1976, n.373, relativa al consumo energetico per usi termici negli edifici".*, Gazzetta Ufficiale n. 36 del 06/02/1978, 1978.
- [8] *Legge ordinaria del Parlamento 30 aprile 1976, n. 373 "Norme per il contenimento del consumo energetico per usi termici negli edifici".*, Gazzetta Ufficiale n.148 del 07/06/1976, 1976.
- [9] *Legge 9 gennaio 1991, n. 10 "Norme per l'attuazione del Piano energetico nazionale in materia di uso razionale dell'energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia".*, 1991: Gazzetta Ufficiale n. 13 del 16/01/1991, suppl. ord. 6.
- [10] *D.P.R. 21 dicembre 1999, n. 551 "Regolamento recante modifiche al D.P.R. 26 agosto 1993, n. 412, in materia di progettazione, installazione, esercizio e manutenzione degli impianti termici negli edifici, ai fini del contenimento dei consumi di energia"*, Gazzetta Ufficiale n.81 del 06/04/2000, 2000.
- [11] *Decreto Legislativo 19 agosto 2005, n. 192 "Attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia"*, Gazzetta Ufficiale n. 222 del 23/09/2005, suppl. ord. 158, 2005.
- [12] *D.P.R. 2 aprile, n. 59 "Regolamento di attuazione dell'articolo 4, comma 1, lettera a) e b), del decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, concernente attuazione della direttiva 2002/91/CE sul rendimento energetico in edilizia"*, Gazzetta Ufficiale n.132 del 10/06/2009, 2009.
- [13] *Decreto Legislativo 4 luglio 2014, n. 102, Attuazione della direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica, che modifica le direttive 2009/125/CE e 2010/30/UE e abroga le direttive 2004/8/CE e 2006/32/CE*, Gazzetta Ufficiale n. 165 del 18/7/2014, 2014.
- [14] *UNI 10200:2015, Impianti termici centralizzati di climatizzazione invernale e produzione di acqua calda sanitaria - Criteri di ripartizione delle spese di climatizzazione invernale ed acqua calda sanitaria*, Milano: Ente nazionale di Unificazione, 2015.
- [15] *EN 834, Heat cost allocators for the determination of the consumption of room heating radiators, Appliances with electrical energy supply*, European Committee for Standardization, 2013.
- [16] *UNI EN 835:1998, Ripartitori dei costi di riscaldamento per la determinazione del consumo dei radiatori - Apparecchiature basate sul principio di evaporazione, senza l'ausilio di energia elettrica*, Milano: Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 1998.
- [17] *UNI 11388:2015, Sistemi di contabilizzazione indiretta del calore basati sui tempi di inserzione dei corpi scaldanti compensati dalla temperatura media del fluido termovettore*, Milano: Ente Nazionale Italiano di unificazione, 2015.

- [18] *UNI 9019, Sistemi di contabilizzazione indiretti basati sul totalizzatore di zona termica e/o unità immobiliare per il calcolo dell'energia termica utile tramite i tempi di inserzione del corpo scaldante compensati dai gradi-giorno dell'unità immobiliare*, Milano: Ente Nazionale Italiano di unificazione, 2013.
- [19] *Direttiva 2004/22/CE Del Parlamento Europeo e del Consiglio del 31 marzo 2004 relativa agli strumenti di misura*, Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea n. L 135/1 del 30.04.2004, 2014.
- [20] *UNI EN 1434-1:2007, Contatori di calore - Parte 1: Requisiti generali*, Milano: Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 2007.
- [21] *UNI EN 1434-2:2007, Contatori di calore - Parte 2: Requisiti costruttivi*, Milano: Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 2007.
- [22] *UNI EN 1434-3:2009, Contatori di calore - Parte 3: Scambio di dati e interfacce*, Milano: Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 2009.
- [23] *UNI EN 1434-4:2007, Contatori di calore - Parte 4: Prove per l'approvazione del modello*, Milano: Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 2007.
- [24] *UNI EN 1434-5:2007, Contatori di calore - Parte 5 : Prove per la verifica prima*, Milano: Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 2007.
- [25] *UNI EN 1434-6:2007, Contatori di calore - Parte 6: Installazione, messa in servizio, controllo e manutenzione*, Milano: Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 2007.
- [26] *OIML R 75-1, Heat meters - Part 1: General requirements*, Parigi: International Organization of Legal Metrology (OIML), 2002.
- [27] *OIML R 75-2, Heat meters - Part 2: Type approval tests and initial verification tests*, Parigi: International Organization of Legal Metrology (OIML), 2002.
- [28] *OIML R 75-3, Heat meters - Part 3: Test Report Format*, Parigi: International Organization of Legal Metrology (OIML), 2006.
- [29] *Ingagine consociativa sul settore del teleriscaldamento*, Autorità garante della concorrenza e del mercato, Marzo 2014.
- [30] *Decreto Legislativo 2 febbraio 2007, n. 22 "Attuazione della direttiva 2004/22/CE relativa agli strumenti di misura"*, Gazzetta Ufficiale n.64 del 17-3-2007, Supplemento Ordinario n. 73, 2007.
- [31] *Decreto 30 ottobre 2013 , n. 155. Regolamento recante criteri per l'esecuzione dei controlli metrologici successivi sui contatori dell'acqua e sui contatori di calore, ai sensi del decreto legislativo 2 febbraio 2007, n. 22, attuativo della direttiva*, 2013: 2004/22/CE (MID). Gazzetta Ufficiale del 08/01/2014, serie generale n.5, 2014.
- [32] *A technical consultation on the present status of heat meters in western Europe*, Goulden Reports.
- [33] *Il riscaldamento urbano. Annuario 2014.*, Associazione Italiana Riscaldamento Urbano, 2014.
- [34] GR. F. Babus'Haq, G. Overgaard & S. D. Probert, Babus'Haq, Heat-Meter Developments for CHP-DH Networks, Applied Energy 53 (1996) 193-207 , 1996.
- [35] H.M. Choi et al., Technical report AECOM, An Investigation into Heat Meter Measurement Errors Final Report, 2013 Evaluation of flowmeters for heat metering, Flow Measurement and Instrumentation 22 (2011) 475–481, 2011.
- [36] IEA, *District Heating and Cooling Connection Handbook*.
- [37] *ISO/IEC 17020:2012 - Conformity assessment - Requirements for the operation of various types of bodies performing inspection*, Geneve: International Organization for Standardization, 2012.
- [38] *Masoero et al., 2015. Masoero M., Silvi C., Toniolo J. Ispezione e monitoraggio degli impianti di refrigerazione e di condizionamento: opportunità e problemi applicativi. AICARR Journal, #32, 28-32.*
- [39] *UNI EN 442-1:2015, Radiatori e convettori - Parte 1: Specifiche tecniche e requisiti*, Milano: Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 2015.
- [40] *UNI EN 442-2:2015, Radiatori e convettori - Parte 2: Metodi di prova e valutazione*, Milano: Ente

Nazionale Italiano di Unificazione, 2015.

- [41] Marchesi, R. and C. Farini, *Certificazione della potenza di una gamma di corpi scaldanti. La Termotecnica, 1994.*
- [42] Marchesi, R., *La camera termostatica di riferimento europeo. La Termotecnica, 1998. 2: p. 75-89.*
- [43] Bozzini G., Caon S., Lombardi C., Sacchi A., Soma F., *Incertezze strumentali nella contabilizzazione del calore con metodi indiretti. 2000. CDA, n.1, 149-155.*
- [44] *ISO/IEC Guide 98-3, Uncertainty of measurement. Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)*, Geneva: International Standardization Organization, ISO, 2009.
- [45] Dell'Isola M., Arpino F., Celenza L., Ficco G., Vigo P. *I ripartitori di calore nella contabilizzazione dei consumi di energia. Problematiche applicative della contabilizzazione dell'energia termica alla luce delle recenti novità normative.*, AICARR Journal, #32, 22-26, 2015.
- [46] *FprCEN/TR 16911, Heat meters - Recommendations for circulation water in industrial and district heating systems and their operation*, CEN/TC 176, 2015.
- [47] Y. Jomni, *Improving Heat Measurement Accuracy in District Heating Substations*, EISLAB Dept. of Computer Science and Electrical Engineering Lulea University of Technology, 2004.
- [48] *Glossario Relazione annuale dei servizi ed attività svolta*, 1998: Autorità per l'Energia Elettrica e il Gas, AEEG.
- [49] *Decreto Ministeriale 24 ottobre 2005, Direttive per la regolamentazione dell'emissione dei certificati verdi alle produzioni di energia di cui all'articolo 1, comma 71, della L. 23 agosto 2004, n. 239*, Gazzetta Ufficiale n. 265 del 14 novembre 2005, 2005.
- [50] *Decreto 5 settembre 2011, Definizione del nuovo regime di sostegno per la cogenerazione ad alto rendimento*, Gazzetta Ufficiale Serie Generale n.218 del 19.9.2011, 2011.
- [51] *Studio e caratterizzazione di reti termiche distribuite*, Ricerca di sistema elettrico, ENEA, MiSE, 2013.
- [52] *ISO 14511:2001, Measurement of fluid flow in closed conduits - Thermal mass flowmeters*, Geneva: International Organization for Standardization, 2001.

## 9 Abbreviazioni ed acronimi

ACS	Acqua Calda Sanitaria
AEEGSI	Autorità per l'Energia Elettrica, il Gas ed il Sistema Idrico
AGCM	Autorità Garante della Concorrenza e del Mercato
AIRU	Associazione Italiana Riscaldamento Urbano
DAQ	Sistema Acquisizione Dati
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
EED	Direttiva Europea sull'efficienza energetica
EMT	Errore Massimo Tollerato
FER	Fonte di Energia Rinnovabile
HCA	Ripartitore di calore
HM	Contatore di energia termica
ITC-DDC	sistema di contabilizzazione del calore basato sui tempi di inserzione compensati con i gradi giorno effettivi dell'unità immobiliare
ITC-TC	Sistema di contabilizzazione del calore basato sui tempi di inserzione compensati con la temperatura media del fluido termovettore
LAMI	Laboratorio di Misure Industriali dell'Università di Cassino e del Lazio Meridionale
MID	Direttiva Europea sugli strumenti di misura
OIML	Organizzazione Internazionale della Metrologia Legale
TRP	Termoresistenza al Platino
VI	Virtuale
WELMEC	European Cooperation in Legal Metrology