

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea in Ingegneria Energetica e Nucleare

Tesi di Laurea Magistrale

Contabilizzazione del calore: ricerca della deriva dell'errore di misura mediante analisi statistiche.



Relatore:

Vittorio Verda

Correlatori:

Patriglia Sergio

Noce Guido Maria

Candidato:

Valeria La Terra

Ottobre 2018

Sommario

1. Introduzione	6
2. Strumenti di misura	7
2.1 Sottostazioni di scambio termico	7
2.2 Contatori di energia	9
2.3 Misuratori di portata.....	10
2.3.1 Ad ultrasuoni	12
2.3.2 Elettromagnetici	16
2.4 Misuratori di temperatura	18
2.4.1 Termoresistenze	18
3. Normativa.....	20
3.1 Direttiva 2004/22/CE (MID)	22
3.2 Decreto Legislativo 2 febbraio 2007, n. 22.	25
3.3 Decreto Ministeriale 21 aprile 2017, n. 93	25
3.4 Evoluzioni normative attese: 252/2016/R/TLR.....	27
4. Teoria dell'errore di misura.....	29
4.1 Definizioni	29
4.2 Taratura	30
4.3 L'errore nella misura di energia termica.....	31
4.4 Metodi di contenimento dell'errore nella misura di energia termica.....	32
5. Principi di teoria sulle analisi delle serie storiche	34
5.1 Serie storiche	34
5.2 Differenziazione e detrendizzazione	37
5.3 Applicazione: Metodo della differenziazione	38
6. Clustering dei contatori di energia termica: metodologia.....	45
6.1 Raccolta e selezione del <i>data set</i>	45
6.2 Normalizzazione dei dati	46
6.2.1 Intervallo temporale di riferimento	46
6.2.2 Volumetria.....	47
6.2.3 Condizioni climatiche.....	49
6.3 Criterio di selezione dei contatori con probabile deriva	50
6.3.1 Consumi in funzione del tempo	51
6.3.2 Approfondimento: Valutazione criterio di selezione su stagione ridotta	59
6.3.3 Approfondimento: Ricerca della deriva per marca dei contatori.....	63
6.3.4 Approfondimento: Comparazione curve a diversa correlazione-pendenza	64
6.4 Discriminazione edifici efficientati.....	66
6.4.1 Ricerca della variazione nei sistemi.....	68
6.5 Sostituzione del contatore	76

7. Prove sperimentali: verifiche della taratura dei misuratori di portata d'acqua	83
7.1 Verifiche in-situ.....	84
7.1.1 Procedura operativa: verifica misuratore di portata Iren e CSQ.....	84
7.1.2 Risultati in-situ: confronto con clamp-on Iren.....	88
7.1.3 Procedura operativa CSQ: verifica contatore di calore	89
7.1.4 Risultati in-situ: analisi CSQ	91
7.2 Verifiche in laboratorio.....	92
7.2.1 Procedura di verifica laboratorio INRIM	92
7.2.2 Risultati INRIM: confronto con l'impianto di riferimento nazionale.....	98
8. Conclusioni.....	105
9. Possibili sviluppi futuri	109
Riferimenti bibliografici	110

Indice delle tabelle

Tabella 1: Classificazione dei principali misuratori di portata di fluido.	11
Tabella 2: Termoresistenze – valori di accuratezza in funzione della temperatura.	19
Tabella 3: Riferimenti legislativi e normativi [8]	21
Tabella 4: Errori percentuali massimi tollerati (MPE) per i contatori di calore.	23
Tabella 5: Verifica periodica di cui all'Allegato IV al Decreto 93/2017.....	26
Tabella 6: Incertezze relative estese per le varie grandezze misurate all'INRIM	97
Tabella 7: Valori della portata permanente in funzione del diametro nominale, secondo prEN1434-2:2006.	103

Indice delle figure

Figura 1: Schema di una sottostazione di scambio termico.....	7
Figura 2: Schema qualitativo del circuito primario (a sinistra) e secondario (a destra) di una sottostazione di scambio termico.	7
Figura 3: Schema idraulico di montaggio di un contatore di calore	9
Figura 4: Effetto Doppler	12
Figura 5: Rappresentazione qualitativa di un misuratore di portata ad ultrasuoni	12
Figura 6: Trasduttore piezoelettrico.....	13
Figura 7: Configurazioni di montaggio del trasduttore	14
Figura 8: Andamento dell'errore di misura totale di un misuratore di portata ad ultrasuoni.....	15
Figura 9: Rappresentazione qualitativa del funzionamento di un misuratore di portata elettromagnetico. [7]	16
Figura 10: Schema esemplificativo legge di Faraday nel misuratore. [8]	16
Figura 11: Installazione della sonda di temperatura in una tubazione rettilinea	18
Figura 12: Massimi errori permessi per le tre classi di accuratezza dei sensori di flusso in funzione di q/q_p . [7].....	23
Figura 13: Massimi errori permessi per la coppia di sensori di temperatura e l'unità di calcolo in funzione di $\Delta T/\Delta T_{min}$. [7]	24
Figura 14: Massimi errori permessi per il misuratore di calore completo in funzione di $\Delta T / \Delta T_{min}$ con: a sinistra, $q/q_p=0.1$; a destra, $q/q_p= 1$. [7]	24
Figura 15: Effetti di disturbo del flusso: swirl [20].....	32
Figura 16: Effetti di disturbo del flusso: distorsione del profilo di velocità [21].....	33
Figura 17: Oscillazioni di ampiezza costante al variare del livello della serie.....	35
Figura 18: Oscillazioni di ampiezza variabile proporzionalmente al variare del livello della serie	35
Figura 19: Esempio di una rappresentazione grafica dei residui nel tempo	36
Figura 20: Differenti tipologie di risposta ad un impulso	37

Figura 21: Serie storica dei consumi specifici annuali di energia termica	38
Figura 22: Serie storica dei consumi specifici mensili di energia termica	39
Figura 23: Consumi annuali differenziati per tutte le sottostazioni selezionate	40
Figura 24: Consumi annuali differenziati per la specifica sottostazione con curva di tendenza lineare	41
Figura 25: Consumi mensili differenziati per tutte le sottostazioni selezionate	42
Figura 26: Consumi mensili differenziati per la specifica sottostazione con curva di tendenza lineare	43
Figura 27: Differenziazione percentuale dei consumi per stagione termica	44
Figura 28: Posizione di tutte le sottostazioni nell'area di Torino (2018).....	45
Figura 29: Storico dei consumi mensili rispetto alla cumulata dei GG	47
Figura 30: Storico dei consumi mensili, normalizzati per volumetria, in funzione della cumulata dei GG .	48
Figura 31: Classificazione energetica degli edifici	48
Figura 32: Correlazione e pendenza di tutte le sottostazioni	51
Figura 33: Andamento generale consumi stagionali	52
Figura 34: Schema qualitativo correlazione-pendenza in funzione delle possibili cause	53
Figura 35: Selezione grafica delle sottostazioni	54
Figura 36: Sottostazioni selezionate	54
Figura 37: Serie storiche dei consumi termici delle sottostazioni selezionate	55
Figura 38: Trend percentuale dei consumi termici delle sottostazioni selezionate	56
Figura 39: Correlazione e pendenza su base mensile, per le sottostazioni selezionate	56
Figura 40: Serie storiche dei consumi termici mensili delle sottostazioni selezionate	57
Figura 41: Disposizione delle sottostazioni selezionate, differenziate per volumetria	58
Figura 42: Andamento generale consumi per stagioni termiche ridotte (5 mesi).....	59
Figura 43: Dispersione dati analizzando stagioni termiche ridotte	59
Figura 44: Serie storiche dei consumi termici annuali delle sottostazioni selezionate (5 mesi)	60
Figura 45: Correlazione-pendenza dei consumi mensili per stagioni termiche ridotte	60
Figura 46: Serie storiche dei consumi termici mensili delle sottostazioni selezionate (5 mesi)	61
Figura 47: Correlazione e pendenza per ogni sottostazione, distinte per marca	63
Figura 48: Correlazione e pendenza per ogni sottostazione, per ciascuna marca	63
Figura 49: Selezione di tre sottostazioni con correlazione e pendenza diverse	64
Figura 50: Confronto tra 3 sottostazioni a differente correlazione e pendenza	65
Figura 51: Discriminazione edifici efficientati - Obiettivo	66
Figura 52: Discriminazione edifici efficientati – Serie temporale completa	66
Figura 53: Discriminazione edifici efficientati – Divisione della serie intorno alla variazione	67
Figura 54: Discriminazione edifici efficientati – Serie temporale completa modificata.....	67
Figura 55: Legame lineare tra energia termica e gradi giorno con intercetta positiva [26]	68
Figura 56: Legame lineare tra energia termica e gradi giorno con intercetta negativa [26].....	68
Figura 57: Legame non lineare tra energia termica e gradi giorno con pendenza crescente [26].....	69
Figura 58: Legame non lineare tra energia termica e gradi giorno con pendenza decrescente [26].....	69
Figura 59: Legame tra energia consumata e GG per una sottostazione	70
Figura 60: Valutazione degli effetti dovuti al clima e degli effetti dovuti alla modifica della firma. [27]	70
Figura 61: Serie storica dei consumi termici mensili	71
Figura 62: Diagramma di dispersione dei consumi termici mensili in funzione dei GG	72
Figura 63: diagramma della somma cumulata dei residui in funzione del tempo	73
Figura 64: Confronto tra le rette di regressione dei due periodi trovati	75
Figura 65: Serie storiche dei consumi annuali dei contatori sostituiti nel 2015.....	76
Figura 66: Serie storiche dei consumi mensili dei contatori intorno al periodo di sostituzione (2015).....	77
Figura 67: Confronto tra i valori di correlazione e pendenza prima e dopo la sostituzione	78
Figura 68: Fabbisogno termico mensile	79
Figura 69: Fabbisogno termico mensile in funzione dei GG	79
Figura 70: CUSUM applicato ai valori registrati da un contatore sostituito	80
Figura 71: Focus sostituzione - Fabbisogno termico mensile	80
Figura 72: Focus sostituzione – Caratterizzazione in funzione dei GG	81
Figura 73: Focus sostituzione – CUSUM	81
Figura 74: Focus sostituzione – Confronto delle caratteristiche di regressione.....	82
Figura 75: Sottostazioni selezionate per la verifica di taratura dei contatori.....	84
Figura 76: Indicazioni per una corretta installazione dei sensori di flusso [29]	84
Figura 77: Lunghezze di tubo rettilinee consigliate per l'installazione dei sensori di flusso (CSQ) [29]	85

<i>Figura 78: Lunghezze di tubo rettilinee consigliate per l'installazione dei sensori di flusso (CSQ) – disturbi su piani differenti [29]</i>	85
<i>Figura 79: Disposizione verticale (a sinistra) ed orizzontale (a destra) dei sensori.</i>	86
<i>Figura 80: Installazione completa del misuratore di portata clamp-on Iren</i>	87
<i>Figura 81: Errori relativi in riferimento alle misure del clamp-on Iren</i>	88
<i>Figura 82: Installazione completa del misuratore di energia termica CSQ [29]</i>	90
<i>Figura 83: Errore relativo della lettura di portata in riferimento al misuratore CSQ certificato</i>	91
<i>Figura 84: Impianto campione nazionale dell'INRIM per la misura di portata d'acqua ed energia termica</i>	92
<i>Figura 85: Campione nazionale dell'INRIM per la misura di portata d'acqua ed energia termica: a sinistra, il campione di portata; a destra, il circuito ausiliario ad elevata temperatura</i>	93
<i>Figura 86: Schema dell'impianto del campione nazionale dell'INRIM per la misura della portata d'acqua</i>	93
<i>Figura 87. Sistema di deviazione del flusso</i>	94
<i>Figura 88: Layout del pannello di controllo: schema del processo</i>	95
<i>Figura 89: Layout del pannello di controllo: valori misurati.</i>	96
<i>Figura 90: Diagramma di riferibilità per la misura di portata</i>	96
<i>Figura 91: Misuratore di portata Krohne testato all'INRIM</i>	98
<i>Figura 92: Correlazione e pendenza misuratore in prova</i>	98
<i>Figura 93: Confronto test – Misure dell'errore relativo in funzione della portata</i>	100
<i>Figura 94: Confronto test - Errore medio relativo al variare della portata e bande d'incertezza</i>	100
<i>Figura 95: Indicazioni costruttore - Errore percentuale al variare della velocità di flusso</i>	102
<i>Figura 96: Confronto test - Errore medio relativo al variare della velocità di flusso</i>	102
<i>Figura 97: Confronto test e curva di errore massimo previsto da MID.</i>	103
<i>Figura 98: Confronto errori trovati nel test 1 e con il clamp-on Iren e relative barre d'incertezza</i>	104
<i>Figura 99: Schema qualitativo correlazione-pendenza in funzione delle possibili cause</i>	106
<i>Figura 100: Andamento dei consumi di energia termica, in funzione dei gradi-giorno, per le sottostazioni del teleriscaldamento</i>	106
<i>Figura 101: Confronto errori trovati nel test 1 e con il clamp-on Iren e relative barre d'incertezza.</i>	107
<i>Figura 102: Confronto test e limite MID - Errore medio relativo al variare della portata</i>	108

1. Introduzione

A seguito dell'entrata in vigore del Decreto Ministeriale 30 ottobre 2013 n.155 (modificato dal DM 93/2017), che impone e regola i controlli degli strumenti di misura utilizzati per funzioni di misura legali, ed all'interno di un processo di miglioramento del servizio portato avanti dalla Società in un'ottica di garanzia del consumatore e professionalità aziendale, Iren Energia sta studiando la possibilità di adottare tecniche di analisi statistica per anticipare eventuali fenomeni di deriva strumentale dei contatori di energia termica del teleriscaldamento al fine di eseguire interventi mirati di sostituzione o manutenzione straordinaria in situazioni di difettosità, anche oltre le periodicità imposte dalla normativa. Su questi temi si è innestato il lavoro di tesi che ha condotto alla stesura del presente elaborato finale.

Per legge, ogni strumento di misura utilizzato per la definizione di transazioni commerciali deve rispondere ad un livello di prestazione metrologica adeguato alla tutela del consumatore. Il legislatore di conseguenza impone al detentore dello strumento l'esecuzione di una serie di verificazioni periodiche che attestino il mantenimento nel tempo delle caratteristiche minimali, verificazioni che per il teleriscaldamento sono svolte ogni 8 o 9 anni a seconda della tipologia di strumento.

Obiettivo del lavoro di tesi e del precedente stage svolto presso Iren Energia, è la valutazione di una possibile metodologia su base statistica che permetta di individuare criticità nella misura prima che questa si presenti palesemente nel corso delle verificazioni periodiche. In linea di massima si ipotizza che il consumo energetico dei clienti, una volta destagionalizzato per tenere conto delle inevitabili variabilità climatiche e al netto di eventuali interventi di efficientamento energetico, sia costante nel tempo e, attraverso l'analisi del trend di energia termica convogliata, sia possibile individuare fenomeni di deriva progressiva della misura.

La ricerca si articola in tre momenti differenti:

- ricostruzione della documentazione disponibile sullo stato dell'arte della contabilizzazione del calore;
- analisi statistiche sui dati storici di misura per la fatturazione orientate a far emergere eventuali contatori con maggiore probabilità di deriva;
- verifiche sperimentali tramite misura dell'errore strumentale.

2. Strumenti di misura

2.1 Sottostazioni di scambio termico

Le sottostazioni di scambio termico costituiscono, all'interno della rete di teleriscaldamento, l'elemento di collegamento tra la rete primaria di distribuzione del calore e l'utenza (circuiti secondario), consentendo il trasferimento dell'energia termica in funzione delle esigenze.

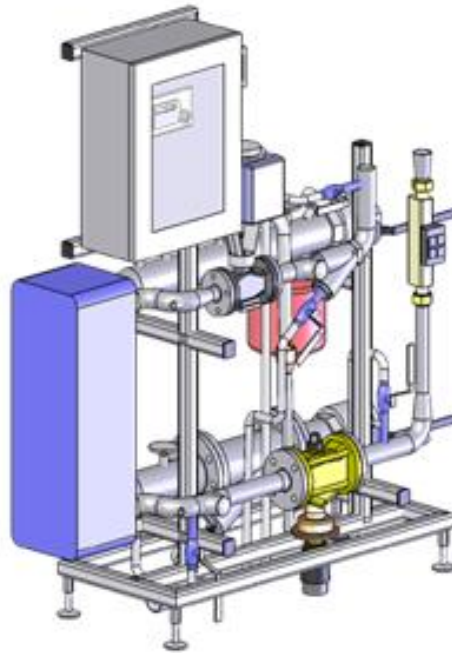


Figura 1: Schema di una sottostazione di scambio termico

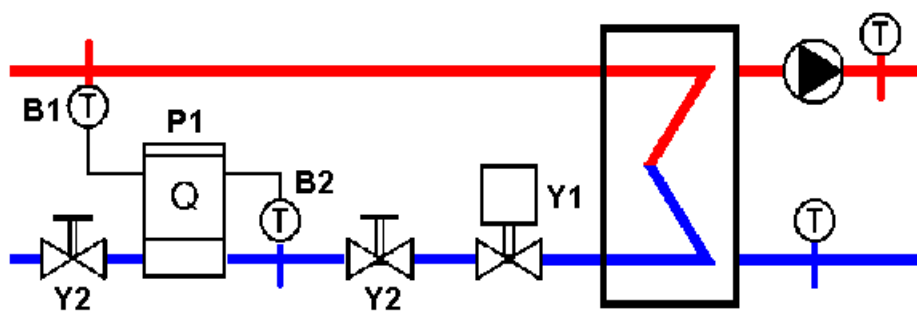


Figura 2: Schema qualitativo del circuito primario (a sinistra) e secondario (a destra) di una sottostazione di scambio termico.

Come in tutti gli impianti tecnologici, nelle sottostazioni è necessario misurare costantemente alcune grandezze allo scopo di verificare il corretto funzionamento del sistema e con l'intento di contabilizzare i consumi e regolare le transazioni commerciali tra cliente e fornitore.

Questo compito viene demandato agli strumenti di misura, in cui è possibile distinguere tre stadi:

- I. il primo (elemento sensibile o sensore) che “sente” la grandezza da misurare e la trasforma in un’altra grandezza fisica (segnale di misura) a essa collegata da legge nota, in modo da rendere possibile le successive elaborazioni;
- II. il secondo stadio che elabora e trasmette il segnale di misura, eventualmente amplificandolo;
- III. il terzo stadio costituito dagli elementi rilevatori o indicatori il cui compito è quello di fornire all’utente il valore numerico della misura. [1]

Al centro dell’analisi portata avanti in questo elaborato vi sarà uno dei principali componenti delle sottostazioni di scambio termico nonché lo strumento di misura cardine nel processo di contabilizzazione del calore: il misuratore di energia termica.

2.2 Contatori di energia

Un contatore di energia, spesso chiamato anche “contatore di calore”, è un insieme di misuratori atti a determinare l’energia termica trasferita da un fluido.

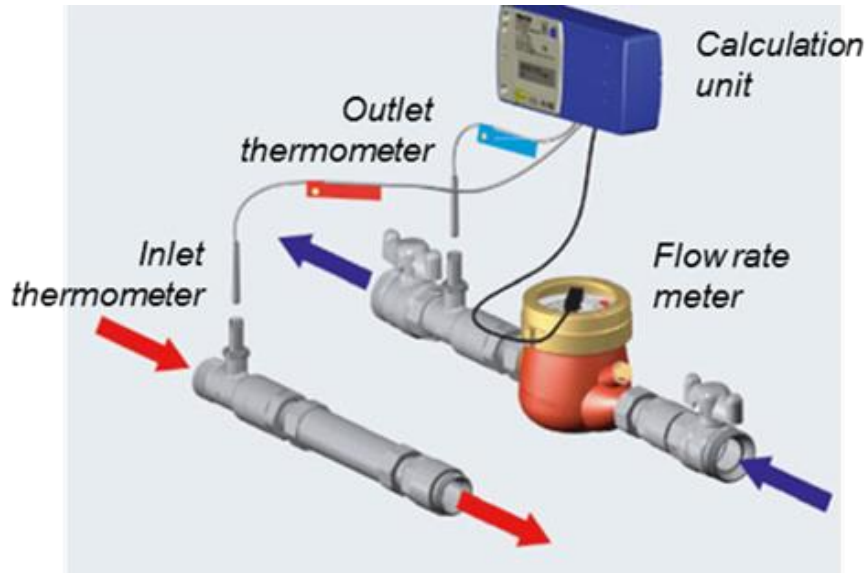


Figura 3: Schema idraulico di montaggio di un contatore di calore

La formula generale usata per il calcolo della potenza termica è:

$$\dot{E}_{th} = q * c_p * (T_2 - T_1)$$

In cui il pedice “2” indica la temperatura del fluido in ingresso mentre il pedice “1” indica la temperatura del fluido nella tubazione del ritorno.

La misura dell’energia termica è poi calcolata come integrale della potenza nel tempo:

$$E_{th} = \int_0^t (q c_p \Delta T) dt$$

Dove: q è la portata massica istantanea (kg/s), c_p il calore specifico (J/kg/K), ΔT la differenza di temperatura tra mandata e ritorno (°C), dt l’intervallo di tempo (s). Nelle sottostazioni di scambio termico degli impianti di teleriscaldamento, la misura diretta viene effettuata sul circuito primario, installando il sensore di flusso sulla tubazione di ritorno dove la temperatura solitamente è più bassa che sulla mandata.

Come richiesto dall’applicazione della formula, la misura del trasferimento del calore non può essere fatta con un singolo sensore dedicato; per questo motivo un contatore di calore consiste di 4 componenti:

- un misuratore di portata istantanea di liquido;
- una coppia di sonde di temperatura;
- un integratore elettronico, che calcola l’energia scambiata utilizzando le informazioni sulla temperatura, sulla portata ed il relativo calore specifico.

Poiché dalla misura dell’energia dipendono servizi contrattuali, la legge impone che siano rispettati precisi obblighi di precisione ed affidabilità. A tal fine, risulta necessario dedicare

attenzione anche alle operazioni di installazione nonché alla previsione di un corretto posizionamento dal punto di vista dell'accessibilità, del controllo e della manutenzione.

Le qualità richieste ad un misuratore di energia termica sono:

- precisione della misura,
- mantenimento della precisione nel tempo,
- protezione contro le manomissioni,
- indicazione della misura del calore visibile dall'utente,
- funzionamento anche in mancanza di alimentazione elettrica. [1]

2.3 Misuratori di portata

Del misuratore di portata di un contatore di calore sono in uso diverse tipologie.

La suddivisione principale per questo sensore è quella che distingue i misuratori di portata in volume da quelli di portata in massa. I primi sono dotati di tecnologie in grado di calcolare la velocità o contare le quantità unitarie del volume di fluido in transito, mentre i secondi ne rilevano direttamente la massa rendendo la misurazione indipendente dal calcolo della densità, necessario nel caso della contabilizzazione del calore. Pur risultando le prestazioni dei contatori massici più accurate delle catene di misura necessarie ai volumetrici, la maggiore diffusione di questi ultimi è dovuta principalmente alla loro economicità a parità di prestazioni.

Tra i misuratori di portata in volume vi è un'ulteriore suddivisione, basata sulle modalità di scambio energetico tra il sensore ed il fluido, che dà luogo alle due seguenti categorie:

- “*Energy Extractive*” (E.E.), nei quali la misura della portata avviene a spese dell'energia del fluido che, scorrendo nella condotta, interagisce con un organo primario, fisso o mobile;
- “*Energy Additive*” (E.A.) nei quali il sensore cede energia al fluido sotto svariate forme, come onde elettromagnetiche, ultrasuono etc.

Correlato a questa classificazione, vi è il grado di invasività della misura: un sensore si definisce “*intrusivo*” (I.) se determina una forte modifica del campo di moto del fluido, ovvero se l'interazione tra sensore e fluido comporta una considerevole deviazione dei filetti fluidi sul volume di controllo, determinando perdite di carico apprezzabili. Quando ciò non accade, si dicono, invece, misuratori “*non intrusivi*” (N.I.) che in genere risultano anche Energy Additive.

Suddividendo i misuratori di portata sulla base del principio fisico di funzionamento è possibile raggrupparli in otto differenti famiglie per un totale di oltre trenta diverse tipologie costruttive, così come riportato parzialmente in Tabella 1.

Tabella 1: Classificazione dei principali misuratori di portata di fluido.

Categoria	Intrusività	Tipo di misuratore	Classificazione energetica
A pressione differenziale	I.	Diaframma	E.E.
	I.	Boccaglio	E.E.
	I.	Venturimetro	E.E.
		...	
Volumetrici (Positive Displacement)	I.	A multi rotore	E.E.
	I.	A pistoni rotanti	E.E.
	I.	A disco naturale	E.E.
	I.	A lamelle striscianti	E.E.
	I.	A pistoni contrapposti	E.E.
	I.	A ruote ovali (lobi)	E.E.
A turbina	I.	Turbina assiale	E.E.
	I.	Turbina tangenziale	E.E.
	N.I.	Turbina ad inserzione	E.E.
Fluidodinamici	I.	A generazione di vortici	E.E.
	I./N.I.	Ad effetto Coanda	E.E.
	I.	A precessione di vortici	E.E.
	N.I.	Vortex ad inserzione	E.E.
Elettromagnetici	N.I.	Ad elettrodi interni	E.A.
	N.I.	Ad elettrodi esterni	E.A.
	N.I.	Elettromagnetici ad inserzione	E.A.
Ad ultrasuoni	N.I.	A tempo di transito (TOF)	E.A.
	N.I.	Ad effetto Doppler	E.A.
Massici	I.	A momento della quantità di moto	E.E.
	N.I.	Ad effetto Coriolis	E.A.
	I.	A doppio rotore gemello	E.E.

In generale, strumenti basati su uno stesso principio fisico, anche se di differenti tipologie, presentano prestazioni metrologiche paragonabili ed uguali limitazioni applicative. [2]

Tra tutte le categorie, quelle di interesse in questo elaborato saranno solo:

- i misuratori ad ultrasuoni a tempo di transito,
- i misuratori elettromagnetici,

in quanto risultano essere quelli impiegati da IREN S.p.a. per la contabilizzazione del calore nelle sottostazioni di scambio termico della rete di teleriscaldamento torinese. Per questo motivo ne seguirà una breve trattazione riguardo i principi fisici di funzionamento, le metodologie di calcolo della portata e gli errori di misura tipici.

2.3.1 Ad ultrasuoni

L'effetto Doppler è un cambiamento apparente della frequenza o della lunghezza di un'onda sonora percepita da un osservatore che si trova in movimento relativo rispetto alla sorgente. In presenza di un mezzo trasmettente (aria, acqua...) con una propria velocità, la velocità relativa dell'osservatore e dell'emettitore vanno considerate in relazione a quest'ultima.

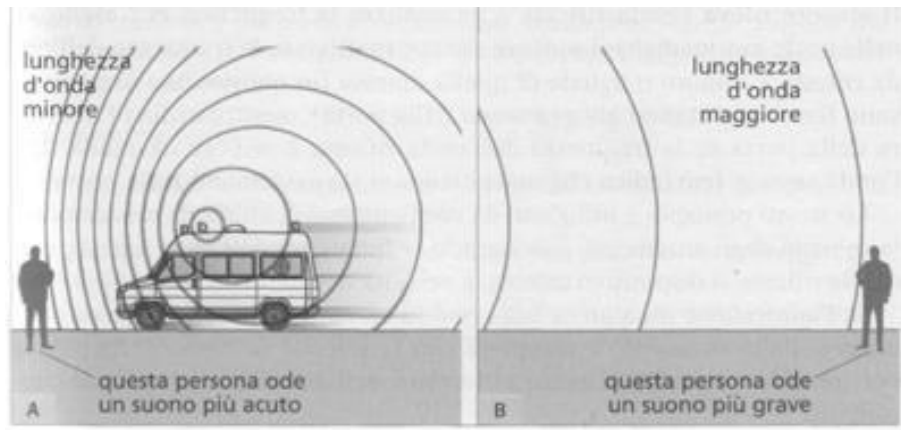


Figura 4: Effetto Doppler

L'effetto Doppler viene sfruttato per misurare la velocità dei fluidi attraverso due modalità differenti e che sono distinte in base alle caratteristiche del fluido:

- fluido omogeneo e privo di particelle e/o bolle d'aria → misuratore di portata "ad ultrasuoni" (o "a tempo di transito", TOF) → rileva un tempo;
- fluido disomogeneo e contenente particelle e/o bolle d'aria → misuratore di portata "ad effetto Doppler" → rileva una variazione di frequenza.

Nel primo caso, la velocità del flusso è proporzionale al reciproco della differenza fra i tempi di propagazione dell'onda verso e contro la direzione del flusso. Nel secondo, invece, l'effetto Doppler è utilizzato per valutare lo scostamento di fase e di frequenza delle onde ultrasoniche che vengono disperse o riflesse dalle particelle di liquido. Lo spostamento di frequenza tra il fronte d'onda riflesso, emesso e ricevuto dallo stesso trasduttore piezoelettrico è proporzionale alla velocità del flusso. [3]

I misuratori di portata "ad ultrasuoni" o "a tempo di transito" sono l'oggetto su cui si focalizzerà l'analisi.

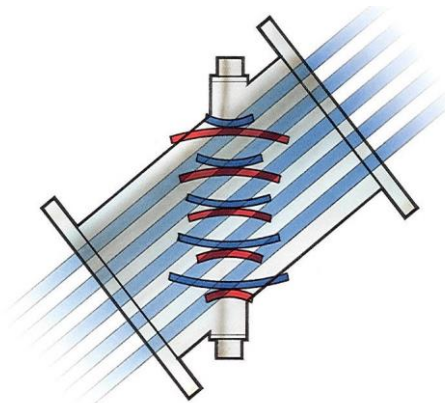


Figura 5: Raffigurazione qualitativa di un misuratore di portata ad ultrasuoni

Il funzionamento di questa tecnologia si basa sull'applicazione di un impulso elettrico su un trasduttore elettroacustico (piezoelettrico) che lo trasforma in un corrispondente impulso di energia sonora con frequenza tra 0,5 e 10 MHz. L'impulso si propaga nel fluido in esame, con velocità dipendente dalla velocità del fluido stesso ($c \pm v$, essendo "c" la velocità di propagazione del suono nel mezzo considerato e "v" la velocità del fluido), fino al ricevitore dove viene trasformato in segnale elettrico. La differenza nel tempo che impiega il segnale ad

attraversare il fluido in una direzione e poi in quella opposta è inversamente proporzionale alla sua velocità e quindi alla portata volumetrica. L'intervallo di tempo che intercorre tra l'arrivo dell'onda a favore di flusso e quella contraria al flusso dipende da: velocità del suono nel fluido, diametro della tubazione, distanza tra le sonde ed angolo di incidenza dell'onda sonora rispetto all'asse del tubo. Da notare che la velocità u è la velocità media del fluido lungo la sezione di tubo considerata e risente, quindi, del profilo stesso di velocità. [4]

Come sopra accennato, i sensori che vengono sfruttati nei misuratori di calore ad ultrasuoni (TOF) sfruttano la piezoelettricità, ovvero quella proprietà di alcuni materiali cristallini di polarizzarsi generando una differenza di potenziale quando sono soggetti a una forza meccanica e al tempo stesso di deformarsi in maniera elastica quando sono attraversati da corrente. L'effetto piezoelettrico è presente in quasi tutti i materiali cristallini che sono privi di centro di simmetria in quanto la loro struttura è costituita da microscopici dipoli elettrici. In condizioni di quiete, questi dipoli sono disposti in maniera tale che le facce del cristallo abbiano tutte lo stesso potenziale elettrico. Quando viene applicata una forza dall'esterno che comprime il cristallo, la sua struttura viene deformata e perde la condizione di neutralità elettrica, per cui una faccia del cristallo risulterà carica negativamente e la faccia opposta risulterà carica positivamente. Nel caso in cui il cristallo venga sottoposto a trazione, il segno della carica elettrica di tali facce si inverte. Esso si comporta dunque come un condensatore al quale è stata applicata una differenza di potenziale: se le due facce vengono collegate tramite un circuito esterno viene generata una corrente elettrica, detta corrente piezoelettrica. Al contrario, quando si applica una differenza di potenziale al cristallo, esso si espande o si contrae lungo un asse determinato provocando una vibrazione anche violenta. L'espansione volumetrica inoltre è facilmente pilotabile e strettamente dipendente dalla stimolazione elettrica, motivo per cui i cristalli piezoelettrici vengono attualmente usati anche per la generazione di suoni. [5]

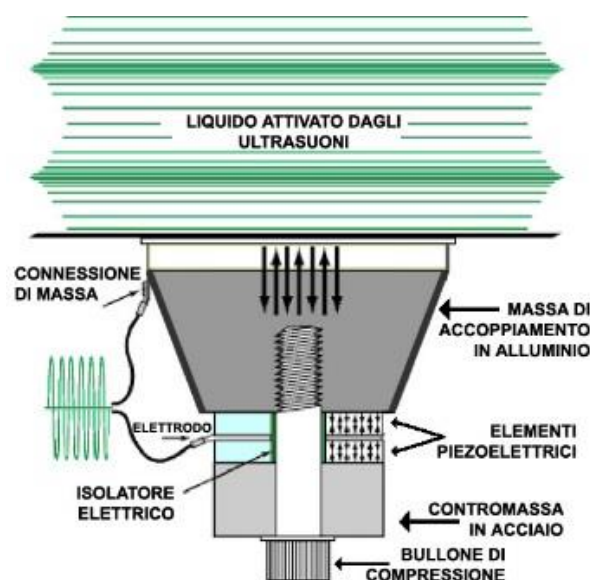


Figura 6: Trasduttore piezoelettrico

Il trasduttore piezoelettrico, quindi, è un particolare dispositivo elettronico che ha il compito di trasformare l'energia elettrica (fornita ad esempio da un generatore di tensione) in energia meccanica vibrazionale o viceversa. Questi sistemi sono di tipo clamp-on non invasivo, ovvero si installano all'esterno della tubazione, senza bisogno di

tagliarla e/o introdurre all'interno parti meccaniche che potrebbero essere potenziali cause di usura o corrosione, generare problemi di compatibilità, contaminazione o perdite di carico e richiedere di arrestare l'impianto o il processo per l'installazione e la manutenzione.

La scelta del sistema di montaggio più adatto deve essere fatta in funzione delle caratteristiche del liquido e della tubazione, poiché è da entrambi questi fattori che dipende l'intensità del segnale generato, e può essere:

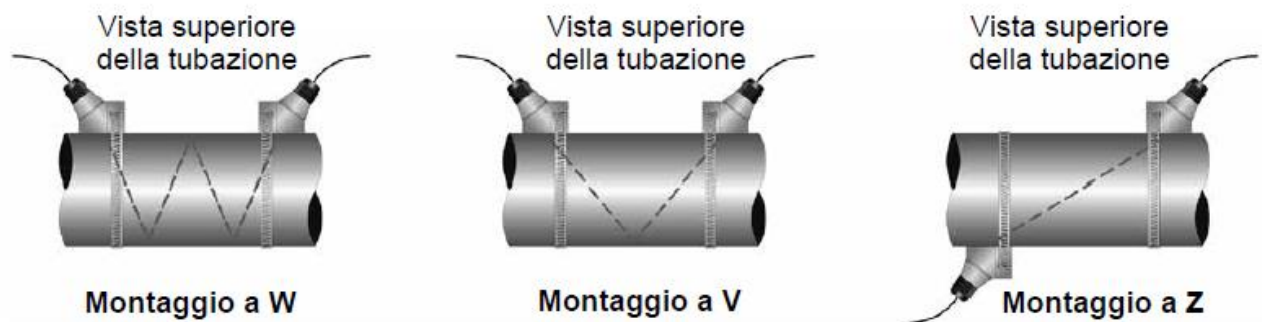


Figura 7: Configurazioni di montaggio del trasduttore

- **Configurazione a W:** i trasduttori sono montati sullo stesso lato della tubazione e l'onda acustica si propaga trasversalmente quattro volte all'interno della tubazione. Con questo tipo d'installazione, rispetto alle altre due successive, si rileva in maniera più precisa il tempo di transito del liquido nella tubazione ma la peggior intensità del segnale acustico.
- **Configurazione a V:** i trasduttori sono montati sullo stesso lato della tubazione e l'onda acustica si propaga trasversalmente due volte all'interno della tubazione. Con questo tipo d'installazione si ottiene un compromesso tra la precisione del tempo di transito e l'intensità del segnale.
- **Configurazione a Z:** i trasduttori sono montati su lati diametralmente opposti della tubazione e l'onda acustica si propaga trasversalmente all'interno della tubazione una sola volta. Con questo tipo d'installazione, rispetto alle altre due precedenti, si rileva la miglior intensità di segnale ma il peggior tempo di transito. [6]

Inoltre, per favorire il passaggio dell'energia sonora tra i trasduttori ed il materiale della tubazione sono impiegati degli *accoppianti ultrasonori* ("couplant"), che consentono una trasmissione delle onde acustiche stabile ed uniforme. Gli accoppianti possono essere liquidi, gel o paste non tossici e limitatamente viscosi ed il loro impiego è necessario in quanto l'energia sonora, alle frequenze ultrasonore utilizzate in queste applicazioni, non si trasmette nell'aria in maniera ottimale. Essa, infatti, a prescindere dagli effetti di attenuazione, rappresenta un elemento ad intensa discrepanza d'impedenza acustica rispetto agli altri materiali utilizzati.

Gli elementi piezoelettrici accanto a numerosi vantaggi, quali basso costo, piccole dimensioni, peso ridotto ed elevata sensibilità, presentano inconvenienti come la variazione di sensibilità in funzione della temperatura. Inoltre, rumori con una frequenza simile a quella ultrasonora prodotta dai sensori possono interferire con il segnale in uscita. Possono quindi sussistere interferenze acustiche posizionando vicini due sensori a ultrasuoni.

Per i misuratori di portata a tempo di transito nel loro insieme, i principali vantaggi di esercizio sono:

- misura esterna alla tubazione che permette di evitare perdite di carico ed interazione col fluido;
- insensibilità degli elettrodi al grasso e al calcare che spesso ricoprono le pareti interne del tubo: non sono quindi richiesti dispositivi per la pulizia;
- installazione e manutenzione semplici in quanto nessuna delle parti attive entra mai a contatto diretto con il fluido: non è necessario interrompere il flusso in caso di interventi;
- costi di manutenzione molto bassi: assenza di prese di pressione soggette a possibile intasamento o altri gruppi che possano perdere del liquido e di organi meccanici che possano bloccarsi.

I principali svantaggi di esercizio sono:

- sensibilità alla temperatura del fluido: la temperatura influisce sulla velocità del suono nel fluido e di conseguenza sull'errore della misura;
- sensibilità al profilo di velocità: prevedere a monte e a valle del misuratore dei tratti rettilinei di condotta, che non abbiano elementi di perturbazione di flusso (curve valvole a farfalla, saracinesche, ecc.);
- necessità di un fluido omogeneo e relativamente "pulito";
- costo. [4]

I misuratori ad ultrasuoni hanno una accuratezza che varia tra $\pm 1\%$ e $\pm 4\%$, con ripetibilità di $\pm 0,1\%$. [2] In generale, si può effettuare una distinzione tra:

- a) errore di misura dello strumento, circa dello 0,5% del valore di fondo scala;
- b) errore specifico dell'installazione, tipicamente 1,5% del valore misurato, che dipende dalle condizioni di installazione in loco, come il diametro nominale, lo spessore e la geometria del tubo, e dal fluido etc.

La somma dei due errori di misura corrisponde all'errore di misura finale (curva c del grafico). [3]

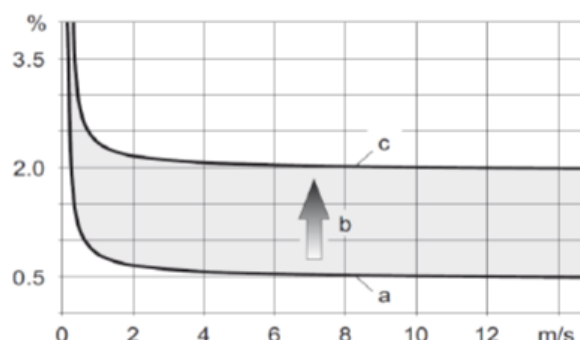


Figura 8: Andamento dell'errore di misura totale di un misuratore di portata ad ultrasuoni

2.3.2 Elettromagnetici

I misuratori di portata elettromagnetici si basano sulla legge di Faraday riguardante l'induzione magnetica: la forza elettromotrice indotta in un conduttore che si muove ortogonalmente ad un campo magnetico è proporzionale alla sua velocità.

Quando il fluido comincia a scorrere nella tubazione, la forza del campo magnetico artificiale, generato da due bobine, determina la separazione delle particelle elettricamente cariche in esso contenute (Figura 9). Questa separazione causa una tensione indotta tra il sensore e gli elettrodi, posizionati perpendicolarmente alla direzione del flusso e del campo magnetico.

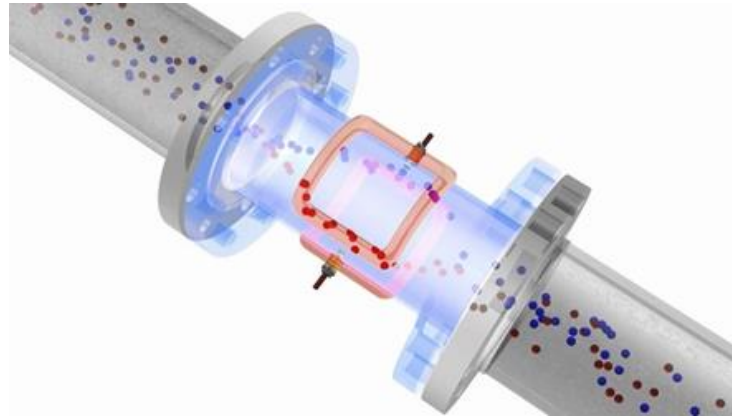


Figura 9: Rappresentazione qualitativa del funzionamento di un misuratore di portata elettromagnetico. [7]

Un misuratore elettromagnetico può essere eccitato in corrente continua o alternata. I sistemi eccitati in corrente alternata possono essere influenzati dal rumore prodotto dall'induzione elettrostatica o elettromagnetica. Nei sistemi eccitati in corrente continua si inducono però degli errori di misura a causa della polarizzazione elettrochimica fra gli elettrodi ed il fluido. Il misuratore eccitato ad onda quadra elimina gli svantaggi dei suddetti sistemi ed ha i vantaggi di entrambi. [8]

Nel caso di un flussimetro magnetico, la legge di Faraday indica che la tensione di segnale dipende dalla velocità media del liquido (v), dall'intensità del campo magnetico (B) e dalla lunghezza del conduttore (che in questo caso è la parte di liquido compresa tra gli elettrodi, L):

$$E = k * B * L * v$$

Essendo k una costante di proporzionalità.

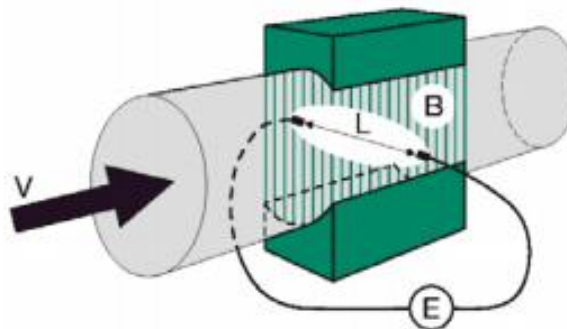


Figura 10: Schema esemplificativo legge di Faraday nel misuratore. [8]

Affinché l'unica grandezza variabile risulti la velocità di deflusso del liquido, la corrente viene controllata in modo che l'intensità del campo magnetico generato sia costante, essendo costante anche la lunghezza del conduttore. La tensione generata è così linearmente proporzionale alla velocità e, quindi, alla portata volumetrica [9]: più il fluido si muove velocemente maggiore è il voltaggio generato.

I principali vantaggi di questa tipologia di misuratori sono:

- principio di misura teoricamente indipendente dalla pressione, dalla densità, dalla temperatura e dalla viscosità;
- possibilità di misurare fluidi con elevati contenuti solidi;
- assenza di parti in movimento e perdite di carico;
- turndown elevato, fino a 1000:1;
- elevato grado di ripetibilità e buona stabilità delle letture a lungo termine.

Gli svantaggi sono da ricercarsi: nel costo, nel posizionamento del sensore tale per cui il profilo del flusso sia completamente sviluppato e non influenzato da disturbi e nella possibilità di deriva della misura nel tempo per depositi di ferrite sugli elettrodi.

La precisione tipica è dell'ordine dello $0,2 \pm 0,5$ %. [9]

2.4 Misuratori di temperatura

Il secondo elemento sensibile all'interno di un contatore di calore è legato alle temperature ed ampia è la gamma di strumenti in grado di effettuare questo tipo di misura. Analogamente al capitolo precedente, è stata descritta solo la tipologia di strumentazione vista durante le indagini: le termoresistenze.

2.4.1 Termoresistenze

I termometri a resistenza si basano sul principio che la resistenza (R) di un conduttore metallico dipende dalla temperatura in modo lineare:

$$R = R_0 * (1 + \alpha T)$$

Dove R_0 è la resistenza alla temperatura di 0°C , α è il coefficiente di temperatura e T la temperatura in $^\circ\text{C}$.

Già agli inizi dell'800 Ohm e Faraday verificarono sperimentalmente la dipendenza della resistività elettrica dei metalli dalla temperatura: per i metalli la resistività cresce sempre con la temperatura, mentre non avviene così per i semiconduttori nei quali si ha una legge di variazione inversa. [1]

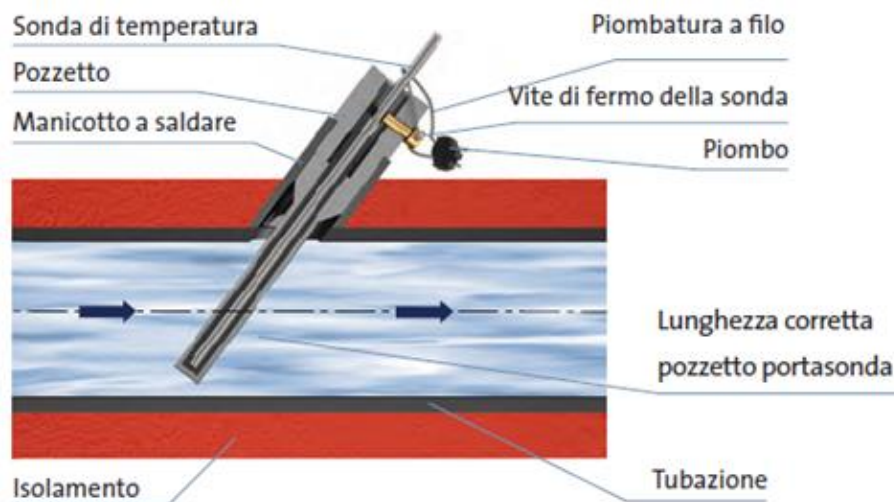


Figura 11: Installazione della sonda di temperatura in una tubazione rettilinea

Le termoresistenze sono costituite da un filo avvolto su di un supporto isolante racchiuso in un involucro, entrambi in allumina, oppure da un filo avvolto e annegato in vetro duro. Si ottiene così una buona resistenza a urti e vibrazioni. [1] In accordo alle vigenti normative sui contatori di energia termica, è inoltre prevista la piombatura dei componenti per evitare eventuali manipolazioni.

Per la costruzione di un termometro a resistenza con elemento sensibile metallico è necessario che:

- le caratteristiche elettriche siano costanti nel tempo, anche se il materiale è sottoposto a cicli termici variabili;
- sia garantita la riproducibilità della caratteristica resistenza/temperatura;

- sia elevato il valore del coefficiente di temperatura, indice della sensibilità del termometro.

A questi requisiti rispondono molto bene il platino (Pt), il nichel ed il rame. Il platino è un metallo nobile poco soggetto a corrosione (resistente all'ossidazione) e molto duttile, ha un elevato punto di fusione, è poco volatile fino a circa 1000°C e può essere ottenuto con elevati livelli di purezza, garantendo così una buona riproducibilità. Il nichel ed il rame offrono nei confronti del platino il vantaggio di un costo molto più basso. [1]

I sensori al platino più comuni hanno un valore di 100 Ohm a 0°C, per questo denominati *PT100*, e possono lavorare con temperature variabili tra -220°C e +850°C. Dalla temperatura, però, dipende l'accuratezza del sensore, come mostrato nella tabella sottostante. [10]

Tabella 2: Termoresistenze – valori di accuratezza in funzione della temperatura.

Temperatura (°C)	Accuratezza			
	Classe A		Classe B	
	(± °C)	(± Ω)	(± °C)	(± Ω)
-200	0,55	0,24	1,3	0,56
-100	0,35	0,14	0,8	0,32
0	0,15	0,06	0,3	0,12
100	0,35	0,13	0,8	0,30
200	0,55	0,20	1,3	0,48
300	0,75	0,27	1,8	0,64
400	0,95	0,33	2,3	0,79
500	1,15	0,38	2,8	0,93
600	1,35	0,43	3,3	1,06
650	1,45	0,46	3,6	1,13
700	-	-	3,8	1,17
800	-	-	4,3	1,28
850	-	-	4,6	1,34

La misura della differenza di temperatura e del relativo errore dipendono principalmente dalle caratteristiche costruttive delle sonde. Per questo motivo risulta necessario che la loro lunghezza ed il loro diametro, oltre al materiale impiegato, risultino perfettamente uguali e tali da sopportare le sollecitazioni meccaniche a cui vengono sottoposti, dovute alla velocità del fluido ed alle pulsazioni generate dalle pompe di circolazione.

Inoltre, per assicurare il corretto esito del processo di misura si deve fare attenzione all'inclinazione delle sonde di temperatura, comunque in direzione contraria a quella del flusso, ed alla corretta profondità di installazione delle stesse.

3. Normativa

Poiché dalla misura dell'energia dipendono dei servizi contrattuali, i sistemi di contabilizzazione *diretta* del calore sono strumenti regolati dalla Metrologia Legale, tenuti a rispondere a precisi requisiti tecnici, legali e prestazionali. Tali sistemi sono infatti utilizzati sia per la misura dell'energia termica al punto di fornitura, sia per la misura dei consumi individuali dei singoli clienti finali in edifici con più unità immobiliari o polifunzionali. [11]

Affinché cliente e fornitore di energia possano reputare affidabile il risultato della misurazione, in modo da regolare e tutelare le loro transazioni commerciali, ogni strumento di misura deve garantire un elevato livello di prestazione metrologica: con il Decreto Ministeriale 30 ottobre 2013 n. 155 (abrogato dal DM 93/2017) vengono quindi regolamentati i controlli degli strumenti di misura utilizzati per funzioni di misura legali.

Il D.lgs. 2 Febbraio 2007 n. 22, invece, recepisce la direttiva europea MID 2004/22/CE, che regola le fasi di progettazione e produzione degli strumenti di misura, approfondendo i requisiti specifici per i contatori di calore. Tali requisiti sono desunti dalla norma tecnica UNI EN 1434. [12] Il sesto capitolo della norma, inoltre, specifica le modalità di installazione dei contatori di calore, individuando le più frequenti criticità. In ogni caso, le operazioni di installazione e messa in servizio dei contatori di calore devono essere effettuate in conformità alle istruzioni fornite dal fabbricante. [11]

Lo scopo di questo capitolo dedicato alla parte legislativa è quello di prendere contezza della grandezza degli errori ammessi nelle misure, delle procedure designate alla verifica dei contatori di energia e delle periodicità fissate, in modo da avere dei chiari riferimenti a cui rivolgersi e con cui poter confrontare i valori trovati alla fine di questa analisi.

Tabella 3: Riferimenti legislativi e normativi [8]

Riferimenti comunitari:

- Direttiva CEE 71/316 (DPR 798/82): per il ravvicinamento delle legislazioni degli Stati membri relative alle disposizioni comuni agli strumenti di misura ed ai metodi di controllo metrologico.
- Direttiva CEE 79/830 contatori acqua calda (D.P.R. 855/82).
- Direttiva CEE 77/313 relativa ai complessi di misurazione per liquidi diversi dall'acqua.
- Direttiva Europea 2004/22/CE - MID: regola gli obblighi previsti per le fasi di progettazione e produzione degli strumenti di misura.

Leggi nazionali:

- “Legge sui pesi e sulle misure”, n. 132, 28 luglio 1861
- “Testo Unico delle leggi sui pesi e sulle misure”, Regio Decreto 23 Agosto 1890 n.7088 (nascita della metrologia legale)
- “Regolamento per la fabbricazione dei pesi, delle misure e degli strumenti ...”, Regio Decreto 12 giugno 1902 n.226: Caratteristiche funzionali dei contatori, modalità per la verifica e la bollatura dei contatori; indicazioni sui banchi prova.
- Regolamento sul Servizio Metrico R.D. n.242 del 31.01.1909
- D.P.R. 23/8/1982 n.855 Attuazione della direttiva (CEE) n. 79/830 relativa ai contatori di acqua calda
- D.P.R. 23/8/1982, n. 856 Attuazione della direttiva (CEE) n. 77/313 relativa ai complessi di misurazione per liquidi diversi dall'acqua
- Legge n.236/91: modifiche al Testo Unico delle leggi sui pesi e sulle misure; delega al ministero dell'industria per definire le modalità per la effettuazione delle operazioni di verifica e di legalizzazione degli strumenti metrici.
- D.Lgs. 2 febbraio 2007, n. 22: recepimento Direttiva Europea 2004/22/CE (MID).
- DM n. 155 30/10/2013: regolamento recante criteri per l'esecuzione dei controlli metrologici successivi sui contatori dell'acqua e sui contatori di calore.
- Decreto Ministeriale 21 aprile 2017, n. 93: regolamentazione controlli degli strumenti di misura (modifica del DM 155/2013).

Norme tecniche:

- ISO 4064 (1,2,3)
- CEN TC92 WG21
- prEN 13917-1 e 2,
- EN14154: 2011 1, 2 e 3, Contatori d'acqua
- UNI 8349:1982 Contatori per acqua calda per uso sanitario. Prescrizioni e prove.
- UNI EN 1434-2007 Contatori di calore

3.1 Direttiva 2004/22/CE (MID)

Il 31 marzo 2004 il parlamento europeo ha emanato la direttiva 2004/22/CE, detta direttiva MID (Measuring Instrument Device). La direttiva si applica ai dispositivi e ai sistemi con funzioni di misura tra cui i contatori dell'acqua, i contatori del gas e i contatori di calore, con lo scopo di regolare e tutelare le transazioni commerciali: essa è relativa esclusivamente alla fasi di progettazione e produzione degli strumenti di misura e prevede che il costruttore omologhi il contatore con il marchio CE-M. [13]

“Lo strumento di misura deve garantire un elevato livello di tutela metrologica affinché il cliente possa reputare affidabile il risultato della misurazione effettuata dal fornitore di energia: in condizioni di funzionamento nominali e in assenza di disturbi, l'errore di misurazione non deve superare il valore dell'errore massimo tollerato riportato nei requisiti specifici relativi allo strumento in questione.”

I “requisiti essenziali” degli strumenti di misura sono da ricercarsi tra:

- Errori massimi tollerati;
- Riproducibilità: *“qualora un medesimo misurando sia applicato in un luogo differente o da parte di un utilizzatore differente, a parità di tutte le altre condizioni, si deve ottenere una successione di risultati di misurazione strettamente analoghi.”* La differenza tra i risultati della misurazione deve essere di scarsa entità in rapporto all'errore massimo tollerato.
- Ripetibilità: *“Qualora il medesimo misurando sia applicato nelle medesime condizioni di misurazione, si deve ottenere una successione di risultati di misurazione strettamente analoghi.”* La differenza tra i risultati della misurazione deve essere minima in rapporto all'errore massimo tollerato.
- Discriminazione e sensibilità: *“lo strumento di misura deve essere sufficientemente sensibile e la sua soglia di discriminazione deve essere sufficientemente bassa in relazione ai compiti di misurazione cui esso è destinato.”*
- Durabilità: *“lo strumento di misura deve essere progettato in modo da mantenere un'adequata stabilità delle proprie caratteristiche metrologiche in un periodo di tempo stabilito dal fabbricante, a patto che la sua installazione, manutenzione e impiego siano effettuati in modo corretto conformemente alle istruzioni del fabbricante, nelle condizioni ambientali cui lo strumento stesso è destinato.”*
- Affidabilità: *“uno strumento di misura deve essere progettato in modo da ridurre, per quanto possibile, gli effetti di un difetto che potrebbe indurre ad una minore accuratezza del risultato della misurazione, a meno che la presenza di tale difetto sia ovvia.”*

Le prestazioni degli strumenti di misura sono sensibili all'ambiente circostante, motivo per cui il fabbricante deve specificare gli “ambienti” climatici, meccanici ed elettromagnetici in cui il misuratore è destinato ad essere impiegato, l'alimentazione elettrica e le altre grandezze d'influenza suscettibili di pregiudicarne l'accuratezza.

Al fine di tener conto delle differenze delle condizioni climatiche o dei diversi livelli di protezione dei consumatori applicabili sul piano nazionale, i requisiti essenziali possono dar luogo alla definizione di classi ambientali o di accuratezza: classe 1, classe 2 e classe 3. [13]

Nell'allegato MI-004, si trovano tutti i requisiti specifici per i contatori di calore:

Tabella 4: Errori percentuali massimi tollerati (MPE) per i contatori di calore.

Errori massimi tollerati	Sensore di flusso ε_f [%]	Coppia di sensori di temperatura ε_t [%]	Calcolatore ε_c [%]
Classe 1	$(1 + 0,01 q_p/q)$	$(0,5 + 3 \Delta T_{min}/\Delta T)$	$(0,5 + \Delta T_{min}/\Delta T)$
Classe 2	$(2 + 0,02 q_p/q)$	$(0,5 + 3 \Delta T_{min}/\Delta T)$	$(0,5 + \Delta T_{min}/\Delta T)$
Classe 3	$(3 + 0,05 q_p/q)$	$(0,5 + 3 \Delta T_{min}/\Delta T)$	$(0,5 + \Delta T_{min}/\Delta T)$

Dove q_p è il valore nominale della portata (q) consentita in permanenza ai fini del corretto funzionamento del contatore, ΔT è la differenza tra la temperatura del liquido termovettore in entrata e quella in uscita nel circuito di scambio termico, ΔT_{min} è il limite inferiore di ΔT ai fini del corretto funzionamento del contatore entro l'errore massimo tollerato. In linea con le leggi della fisica, quindi, la norma prescrive limiti di errore più bassi all'aumentare dei parametri operativi, ovvero con ΔT e q maggiori.

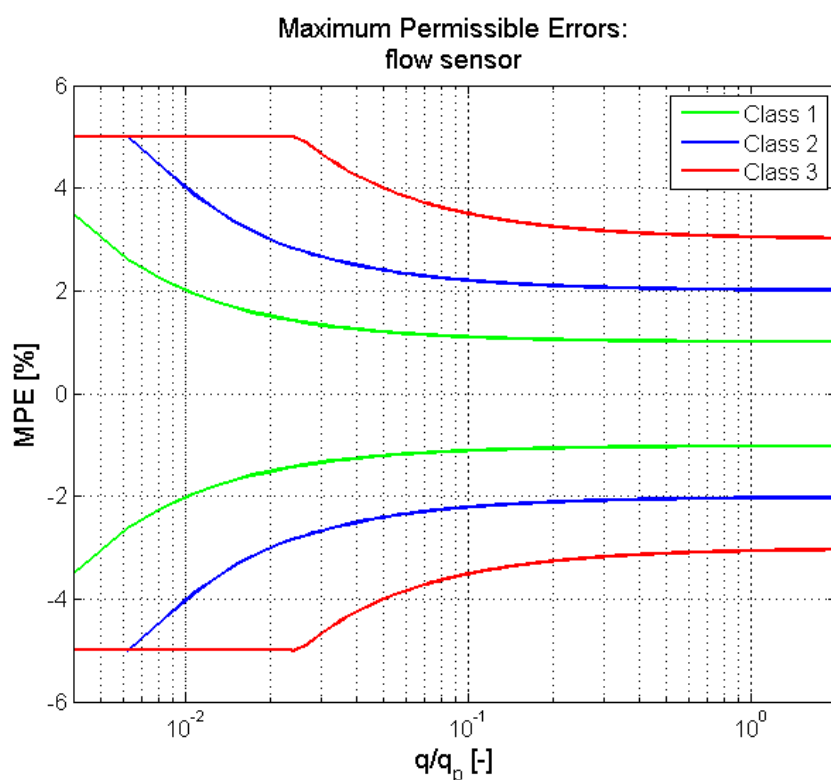


Figura 12: Massimi errori permessi per le tre classi di accuratezza dei sensori di flusso in funzione di q/q_p . [7]

Figura 12 mostra gli errori massimi permessi per le tre classi di accuratezza dei sensori di flusso, in funzione del rapporto tra la portata misurata (q) e la portata permanente (q_p), secondo l'equazione desunta dalla norma. L'errore permesso per la portata non può superare il 5%.

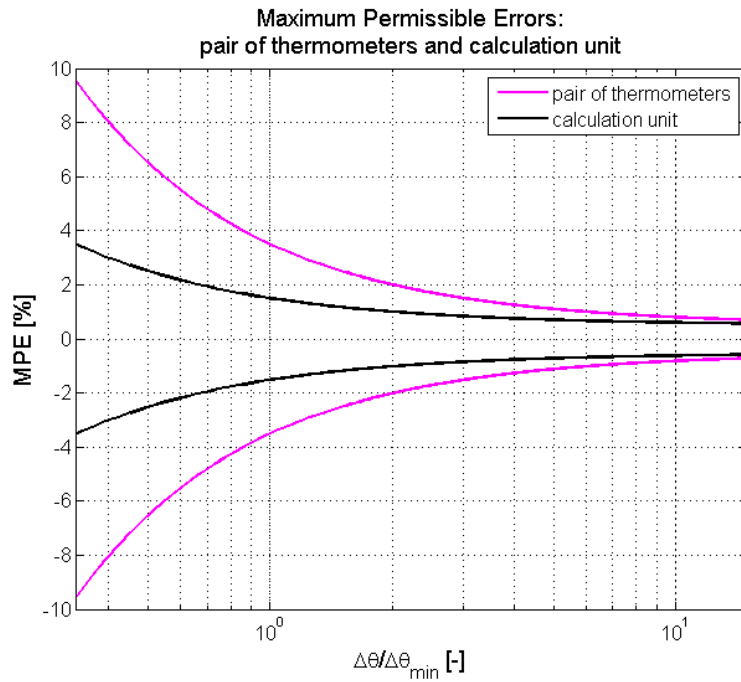


Figura 13: Massimi errori permessi per la coppia di sensori di temperatura e l'unità di calcolo in funzione di $\Delta T/\Delta T_{min}$. [7]

In Figura 13, invece, sono mostrati gli errori massimi permessi per la coppia dei sensori di temperatura e per l'unità di calcolo, in funzione del rapporto tra la differenza di temperatura misurata (ΔT) e la differenza di temperatura minima (ΔT_{min}).

Infine, gli errori massimi tollerati applicabili agli strumenti completi si calcolano, per tutte e tre le classi di accuratezza, come la somma degli errori dei singoli componenti:

$$\varepsilon = \varepsilon_f + \varepsilon_t + \varepsilon_c = [\%] \quad [13]$$

In Figura 14 viene mostrato l'andamento degli errori massimi tollerati, per ciascuna classe di accuratezza, al variare di $\Delta T/\Delta T_{min}$ per valori di q/q_p fissati, rispettivamente a 0,1 nel grafico a sinistra e ad 1 nel grafico a destra.

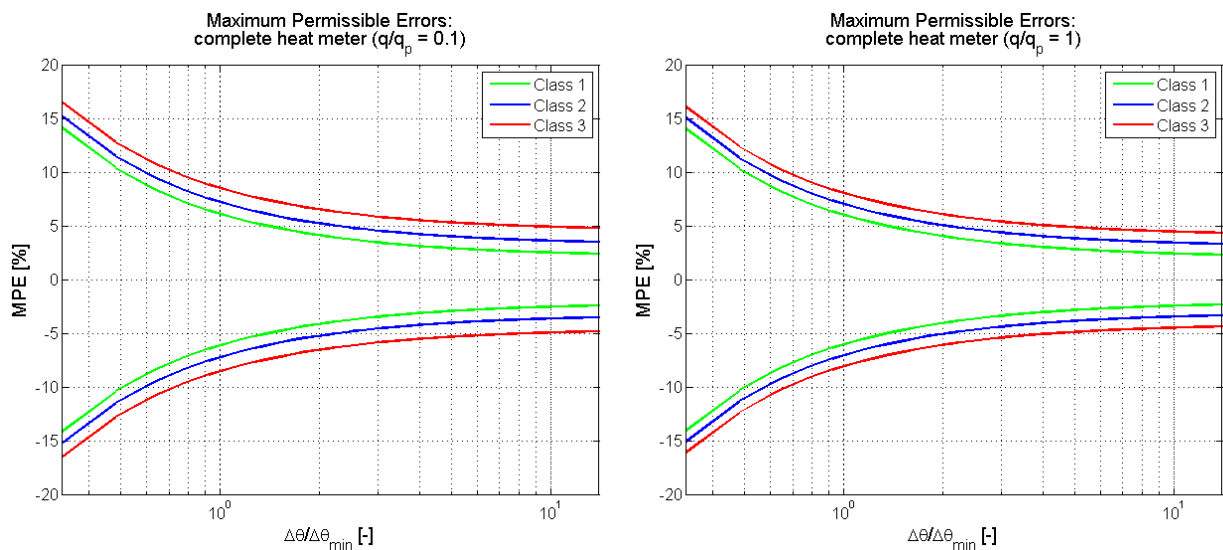


Figura 14: Massimi errori permessi per il misuratore di calore completo in funzione di $\Delta T / \Delta T_{min}$ con: a sinistra, $q/q_p=0.1$; a destra, $q/q_p=1$. [7]

“Per quanto riguarda la messa in servizio dei misuratori diretti di calore, l'allegato MI-004 del MID stabilisce che, se uno stato membro richiede la misurazione dell'energia termica per il settore residenziale, allora consente di utilizzare qualsiasi contatore di classe di precisione 3. Mentre, per quanto riguarda la misurazione dei consumi di calore nel settore commerciale o dell'industria leggera, gli stati membri possono richiedere l'uso di qualsiasi dispositivo di classe di precisione 2.” [13]

3.2 Decreto Legislativo 2 febbraio 2007, n. 22.

A livello nazionale, la direttiva europea MID è stata recepita ed attuata attraverso il D.lgs. 22/2007. Questo prevedeva un periodo transitorio durante il quale è stato possibile continuare a commercializzazione e mettere in servizio strumenti di misura che soddisfacevano le norme precedenti alla MID, fino alla scadenza della validità dell'omologazione di tali strumenti.

In caso di omologazione di validità indefinita, il termine fissato per il periodo transitorio è stato il 30 ottobre 2016.

3.3 Decreto Ministeriale 21 aprile 2017, n. 93

La Direttiva MID 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 aveva emesso il Decreto 30 ottobre 2013 n. 155 che definiva i criteri e le periodicità delle verifiche programmate e dei controlli metrologici casuali per i soli contatori di calore approvati MID. [14]

In data 18 settembre 2017 è entrato in vigore il Decreto Ministeriale 21 aprile 2017 n. 93, che abroga il precedente decreto (DM 155/2013) e regola i controlli degli strumenti di misura, soggetti alla normativa nazionale ed europea, utilizzati per funzioni di misura legali.

Gli strumenti di misura sono soggetti alle seguenti tipologie di controlli:

- a) verifica periodica;
- b) controlli casuali o a richiesta;
- c) vigilanza sugli strumenti.

Per “*verifica periodica*” si intende il controllo legale periodico effettuato sugli strumenti di misura dopo la loro messa in servizio, secondo una programmazione definita in funzione delle caratteristiche metrologiche e di eventuali riparazioni che abbiano comportato la rimozione dei sigilli di protezione. La verifica periodica ha lo scopo di accertare il rispetto di specifici requisiti, come l'apposizione dei bolli di verifica nazionale, la marcatura CE e quella supplementare M ed il mantenimento degli errori

massimi tollerati, ed esclude qualsiasi operazione che comporti l'alterazione dei parametri di lavoro, lo smontaggio di componenti e la rimozione di sigilli, con eccezione di quelli a protezione delle sonde. [15]

Le periodicità di verifica, che decorrono dalla data di messa in servizio degli strumenti, sono definite in funzione della portata permanente (q_p) e del tipo di sensore per la misura del volume, come mostrato in Tabella 5. [14]

Tabella 5: Verificazione periodica di cui all'Allegato IV al Decreto 93/2017.

Tipo di strumento		Controllo
Contatori di calore (portata $\leq 3 \text{ m}^3/\text{h}$)	con sensore di flusso meccanico	entro 6 anni
	con sensore di flusso statico	entro 9 anni
Contatori di calore (portata $> 3 \text{ m}^3/\text{h}$)	con sensore di flusso meccanico	entro 5 anni
	con sensore di flusso statico	entro 8 anni

La verificazione periodica viene effettuata da organismi di ispezione accreditati ai sensi della norma ISO 17020 da Accredia, ente unico di accreditamento, e riconosciuti da Unioncamere. [16] Ove non vi abbia già provveduto il fabbricante, l'organismo che esegue la prima verificazione periodica deve dotare lo strumento di misura di un libretto metrologico.

Per “*vigilanza sugli strumenti*”, invece, si intende quella serie di controlli atti a dimostrare che gli strumenti soddisfano i requisiti ad essi applicabili.

Infine, i *controlli casuali* degli strumenti in servizio sono verifiche effettuate dagli Uffici Metrici dalle Camere di Commercio, a intervalli casuali, e, compatibilmente con le esigenze di sicurezza e continuità dei servizi, senza preavviso, pur garantendo il contraddittorio. I costi dei controlli in contraddittorio, in caso di esito positivo del controllo, sono a carico del soggetto richiedente. [15]

I valori degli errori massimi tollerati stabiliti dal decreto sono:

- in verifica periodica, pari a quelli stabiliti per la valutazione della conformità MID;
- per i controlli casuali, maggiorati del 50% rispetto a quelli stabiliti per la valutazione della conformità MID.

Gli strumenti utilizzati come riferimento non devono essere affetti da un errore superiore ad un terzo dell'errore massimo tollerato previsto per la tipologia di controllo che si esegue. [14]

3.4 Evoluzioni normative attese: 252/2016/R/TLR

Documento per la consultazione - “Regolazione in materia di obblighi di fornitura e installazione di sistemi di misura nel settore del teleriscaldamento e del teleraffrescamento”

Negli edifici forniti da una rete di teleriscaldamento (o da altro sistema centralizzato di climatizzazione), l'impresa di fornitura del servizio ha l'obbligo di installare contatori di fornitura in corrispondenza dallo scambiatore di calore collegato alla rete ed è anche il responsabile dell'impianto termico.

“I sistemi di contabilizzazione diretta dell'energia termica oggi installati si suddividono, in tre principali categorie:

- *contatori installati presso i punti di fornitura delle utenze civili per la fatturazione dei consumi energetici: generalmente di tipo combinato, con misuratori di portata per lo più statici, sensori di temperatura a stelo lungo montati direttamente sulla tubazione o su tasca e con una classe di accuratezza 2 ai sensi della EN 1434;*
- *contatori installati presso i punti di fornitura delle grandi utenze per la fatturazione dei consumi energetici e sulle reti per il bilancio e controllo delle reti stesse: teleletti, di tipo combinato, classe 2, ai sensi della norma EN 1434;*
- *contatori installati all'interno degli edifici residenziali per la ripartizione dei consumi energetici: non teleletti, di tipo completo e dimensioni ridotte, economici, con misuratori di portata meccanici monogetto e sensori di temperatura a stelo corto montati direttamente sulla tubazione, e classe di accuratezza 3, ai sensi della norma EN 1434.”*

A prescindere dalla classe di accuratezza, l'installazione e la manutenzione del contatore, se non correttamente effettuate, ne influenzano negativamente le prestazioni metrologiche e ne determinano il decadimento nel tempo. Ad esempio, nella scelta del misuratore, portate o temperature di esercizio eccessivamente elevate (o ridotte) rispetto a quelle di fondo scala (o inizio scala) del contatore determinano un inaccettabile decadimento delle prestazioni metrologiche, come anche condizioni di installazione dei contatori non conformi con i requisiti della norma EN 1434-6 e condizioni di esercizio anomale (e.g. scarsa manutenzione, impurità nel fluido, variazioni della potenza richiesta).

Per quanto riguarda l'installazione e l'esercizio, pertanto, l'Autorità ritiene importante che i contatori di calore siano:

- a) *scelti* in conformità con i limiti dichiarati dal costruttore relativamente ai seguenti parametri di funzionamento richiesti al cliente finale: minimo e massimo valore di portata, perdita di carico, temperature di mandata e di ritorno, potenza nominale;
- b) *installati*, oltre che in conformità alle istruzioni del fabbricante e ai requisiti della norma EN 1434-6, in conformità alle seguenti ulteriori specifiche:
 - per il calcolatore, in modo tale da: rendere la misura facilmente accessibile e leggibile all'utente ed assegnare il corretto coefficiente termico;
 - per il sensore di flusso, in modo tale da: prevedere idonei tratti rettilinei a monte e a valle o, in alternativa, l'installazione di un raddrizzatore di flusso immediatamente a monte del misuratore e, se necessario, l'installazione di degasatori e filtri;

- per i sensori di temperatura, in modo tale da assicurare: un buon contatto termico con il fluido, un adeguato isolamento, una corretta lunghezza di immersione in conformità con le specifiche del fabbricante (incluso l'utilizzo del liquido di accoppiamento appropriato se sono utilizzate tasche termometriche) ed una identica installazione dei sensori di temperatura di mandata e di ritorno in conformità alla norma UNI EN 1434-6;
- c) *utilizzati* all'interno del proprio campo di misura assicurando che la potenza, la portata e le temperature di mandata e ritorno nominali del misuratore coprano l'intero campo di funzionamento dell'utenza.

Da notare che in impianti condominiali il fluido può cambiare notevolmente la sua composizione nel tempo, arricchendosi di sospensioni solide e altri contaminanti solubili, ed influenzando le prestazioni metrologiche dei contatori.

Per quanto concerne i dati misurati e calcolati, il documento per la consultazione propone che venga acquisito e registrato il solo dato quantitativo dell'energia termica prelevata, al fine di contenere i costi del contatore. [11]

Sebbene la telelettura non sia obbligatoria ai sensi della direttiva MID e della norma EN 1434, l'Autorità ritiene questa funzione di fondamentale importanza in quanto fornisce in tempo reale al gestore del servizio di teleriscaldamento e ai clienti finali le informazioni necessarie per migliorare l'efficienza del sistema e la qualità del servizio.

4. Teoria dell'errore di misura

Preso atto dell'esistenza di un errore intrinseco alla misurazione, noti gli errori massimi permessi per legge nella contabilizzazione del calore e le modalità di verifica previste per accertare l'accuratezza degli strumenti, in questo capitolo si definiscono i concetti principali riguardanti gli errori di misura che stanno alla base delle analisi proposte nel seguito della trattazione.

4.1 Definizioni

La *stabilità* di una misura è definita come *l'attitudine a mantenere costante il suo valore*. A causa di vari fenomeni, la misura può subire delle *variazioni del valore letto*, le quali possono essere discontinue, con direzioni e ampiezze casuali, oppure anche *lente, continue e monodirezionali*. In quest'ultimo caso, si parla di "*deriva*".

Normalmente in campo metrologico ci si riferisce a tre tipi di stabilità:

- stabilità della lettura: "*attitudine di una misurazione a mantenere il valore letto entro i limiti di risoluzione dello strumento*." Se le variazioni indicano una deriva, si può cercare un'eventuale grandezza d'influenza da stabilizzare, altrimenti, si dovrà tenere in considerazione un errore di ripetibilità.
- stabilità della misura (nel tempo): "*attitudine di una misurazione a mantenersi di valore costante durante un lungo periodo*."
- stabilità della strumentazione: "*attitudine di uno strumento di misura a mantenere costanti le sue caratteristiche metrologiche*."" Per cause interne (deperimento e consumo dei componenti, difettosità nella realizzazione etc.) o esterne (variazione delle condizioni ambientali, cattivo uso etc.), infatti, la strumentazione varia le proprie caratteristiche metrologiche in maniera più o meno significativa.

Comunemente, quando si parla di "stabilità" di uno strumento senza specificare altro, si intende la stabilità delle sue caratteristiche nel lungo periodo (nota anche come *deriva nel tempo*). [17]

Le caratteristiche richieste ad uno strumento di misura sono:

- **accuratezza**: "*capacità di uno strumento di indicare o registrare il valore esatto della grandezza misurata, quantificata attraverso il suo errore di misura*." In ogni misura si commette un errore, casuale o sistematico. Del primo tipo si può presumere l'ordine di grandezza ma non il segno, mentre, gli errori sistematici seguono leggi note ed hanno un segno determinato, essendo legati al procedimento ed ai mezzi di misura.
- **precisione** (o ripetibilità della misura): "*capacità di uno strumento di indicare, nel caso di misure ripetute con lo stesso metodo e nelle stesse identiche condizioni, sempre lo stesso valore della grandezza misurata*." Uno strumento può essere preciso pur non essendo accurato.
- **sensibilità**: "*più piccola variazione della grandezza misurata che lo strumento permette di osservare*." [1]

4.2 Taratura

L'utilizzazione e l'invecchiamento agiscono sugli strumenti in modo tale da farne derivare nel tempo, in maniera peggiorativa, le caratteristiche di qualità ed affidabilità. Solo attraverso una manutenzione preventiva e la verifica periodica della taratura è possibile tenere sotto controllo le caratteristiche metrologiche dello strumento e dunque eventuali fenomeni di deriva nel tempo della misura. [10]

Per taratura si intende *“l'insieme delle operazioni che stabiliscono, sotto condizioni specificate, la relazione tra i valori indicati da uno strumento di misurazione, o da un sistema per misurazione, o i valori rappresentanti da un campione materiale e i corrispondenti valori noti di un misurando”*. (VIM 6.11) [18]

L'insieme delle operazioni richieste per garantire che un'apparecchiatura per misurazione sia conforme ai requisiti per l'utilizzazione prevista è, invece, detta *“conferma metrologica”*, la quale generalmente comprende:

- taratura e verifica;
- aggiustamenti o riparazioni;
- nuova taratura, confronto con i requisiti metrologici ed apposizione di ogni sigillatura ed etichettatura richiesta. [19]



L'aggiustamento è definito come *“l'insieme di operazioni volte a portare uno strumento per misurazione nelle condizioni di funzionamento e di accuratezza adatte per la sua utilizzazione”*, motivo per il quale viene spesso confuso con la taratura stessa. (VIM 4.33) [18]

Le condizioni nominali di funzionamento di un contatore di calore diretto sono definite dal limite minimo e massimo entro cui possono variare le grandezze misurate senza che siano superati gli errori massimi ammissibili. Tra queste ci sono:

- $T_{min} - T_{max}$, valori entro i quali deve mantenersi la temperatura del fluido termovettore, sia in mandata che in ritorno, definiti dal campo di misura dei sensori;
- $\Delta T_{min} - \Delta T_{max}$, valori della differenza di temperatura fra mandata e ritorno entro i quali deve mantenersi il fluido termovettore;
- q_{min} , valore minimo di portata;
- q_{nom} , portata massima accettabile per un tempo determinato, detta *“portata permanente o nominale”*;
- q_{max} , portata massima accettabile per un breve periodo;

Raggiungere elevati livelli di accuratezza per le misure di temperatura e portata è difficile, in particolare se effettuate attraverso sensori elettronici. [1]

4.3 L'errore nella misura di energia termica

Il calcolo dell'energia effettuato dal contatore è proporzionale alla relazione:

$$E_{th} \propto \Delta T * q$$

Essendo ΔT la differenza di temperatura del fluido termovettore tra mandata e ritorno nel circuito primario (2.2 Contatori di energia) e q la portata massica. Il relativo errore di misura, quindi, dipende da:

$$\varepsilon\% = \frac{dE_{th}}{E_{th}} = \frac{d\Delta T}{\Delta T} + \frac{dq}{q}$$

Al fine di ridurre l'errore di misura, occorre prevedere una portata il più vicino possibile al valore nominale ed un differenziale di temperatura il più ampio possibile. [12]

Quando la misura di un valore si ottiene quale risultato di un'operazione matematica, dalla combinazione di più grandezze, l'errore che si commette si propaga ed aumenta secondo delle regole precise:

- per l'addizione $(A \pm a) + (B \pm b)$

$$R = \pm \sqrt{a^2 + b^2}$$

- per la sottrazione $(A \pm a) - (B \pm b)$

$$R = \pm \sqrt{a^2 + b^2}$$

- per la moltiplicazione $(A \pm a) * (B \pm b)$

$$R = \pm \sqrt{(Ab)^2 + (Ba)^2}$$

- per la divisione $(B \pm b) / (A \pm a)$

$$R = \pm \sqrt{\frac{(ba/A)^2 + b^2}{A^2}}$$

Da queste formule si può notare, ancora una volta, come l'errore dipenda dalla differenza delle due misure e risulti più elevato, percentualmente, quanto più piccola è tale differenza. A tal proposito, la scelta della scala dello strumento è importante e richiede la conoscenza del campo di variabilità della grandezza da misurare: le letture migliori sono effettuate a circa 2/3 del valore di fondo scala, mentre quelle effettuate all'inizio della scala sono affette da errori molto alti. [1]

In generale, riguardo l'errore di misura, si definiscono:

- l'*errore assoluto*, pari alla semidifferenza tra il valore massimo e il valore minimo misurati, utilizzato nel caso in cui il numero di letture sia basso:

$$\varepsilon_{assoluto} = \frac{V_{max} - V_{min}}{2}$$

- l'*errore relativo*, pari al rapporto tra l'errore assoluto e il valore medio della misura:

$$\varepsilon_{relativo} = \frac{\varepsilon_{assoluto}}{V_{medio}} = [-]$$

Permette di valutare la precisione di una misura rispetto ad un valore di riferimento.

- l'errore percentuale, pari all'errore relativo espresso in percentuale:

$$\varepsilon_{percentuale} = \varepsilon_{relativo} * 100 = [\%]$$

L'errore relativo e l'errore percentuale sono adimensionali, mentre l'errore assoluto è associato all'unità di misura della grandezza misurata. Per questo motivo, non si sommano gli errori assoluti (dimensionalmente non omogenei) ma gli errori relativi.

4.4 Metodi di contenimento dell'errore nella misura di energia termica

Nell'ambito della contabilizzazione del calore nella rete del teleriscaldamento, oltre alla precisione dello strumento, si deve tenere conto dei disturbi legati all'installazione, tali da poter incrementare l'errore di misura o causare prematura usura dei componenti.

Gli effetti sono rappresentati principalmente da:

- 1) effetti fluidodinamici sul sensore di flusso;
- 2) effetti sulla coppia di sensori di temperatura;
- 3) effetti sul fluido termovettore.

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. Il sensore, però, integra il dato di velocità sulla base di un determinato profilo di velocità nel tubo: se questo non corrisponde a quello ipotizzato si introduce un errore non controllabile.

Lo *swirl* si trova a seguito di alcune configurazioni di installazione ed all'uscita delle pompe e per evitarlo, o perlomeno attenuarlo, risulta importante che 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 loro connessioni idrauliche non risultino tangenziali alla linea principale sulla quale è installato il misuratore.

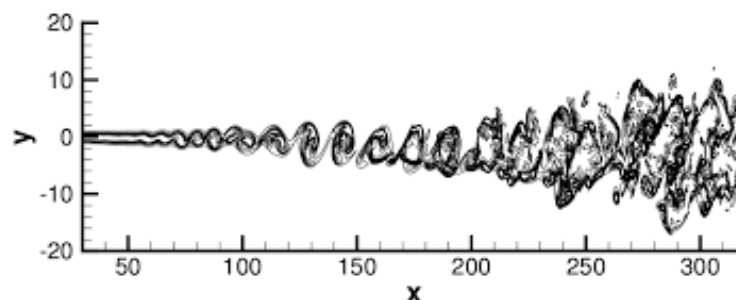


Figura 15: Effetti di disturbo del flusso: swirl [20]

Una distorsione del profilo di velocità, invece, è tipicamente causata da un'ostruzione parziale della tubazione (valvole parzialmente chiuse, valvole a farfalla, regolatore di

portata o pressione, etc.) o da una singola curva della tubazione e sono più facilmente eliminabili adottando opportuni accorgimenti: evitare brusche riduzioni di sezione, utilizzare guarnizioni adeguate e che non causino ostruzioni, impiegare a monte e a valle valvole che, in posizione aperta, non creino disturbi al flusso.

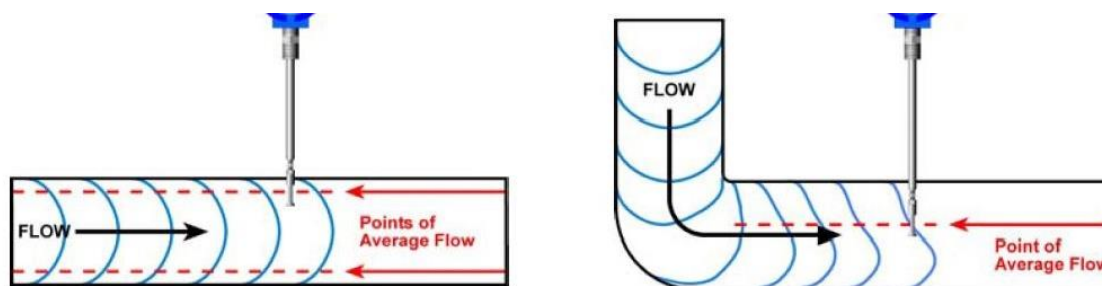


Figura 16: Effetti di disturbo del flusso: distorsione del profilo di velocità [21]

Infine, la direzione dell'installazione (orizzontale o verticale) del misuratore può determinare sensibili effetti sulle sue prestazioni metrologiche e questo dovrebbe essere sempre indicato dal costruttore. Il costruttore dovrebbe altresì specificare la lunghezza dei tratti rettilinei a monte e a valle dello stesso a garanzia delle prestazioni metrologiche.

Nella misura della temperatura in un fluido in movimento, i flussi di calore scambiati tra sonda e ambiente circostante possono provocare ulteriori errori, legati agli scambi conduttivi e radiativi tra la sonda e le pareti della condotta, normalmente a temperatura più alta o più bassa del fluido che scorre all'interno. Mentre i flussi radiativi sono poco influenti, per limitare 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 le termoresistenze siano installate in maniera identica ed in modo simmetrico su tubi di uguale dimensione e profilo di velocità. Ulteriori accorgimenti nell'installazione dovrebbero essere adottati per l'isolamento termico della testa dei sensori di temperatura ed eventualmente della tubazione in corrispondenza del sensore volumetrico. Tutti questi effetti di disturbo possono diventare determinanti nel caso in cui i contatori di energia termica operino su ridotte differenze di temperatura, come avviene per la contabilizzazione dell'energia di raffrescamento o nella climatizzazione invernale a bassa temperatura (impianti radianti a pavimento, a parete, etc.).

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 del calore scambiato. Le proprietà del fluido termovettore (come la densità ed il calore specifico) sono infatti generalmente stimate dal calcolatore, secondo quanto previsto dalle relative norme armonizzate, in funzione delle sole temperature misurate, senza tenere conto della sua reale composizione e del fatto che le caratteristiche del fluido in impianti condominiali possano cambiare notevolmente nel tempo, arricchendosi di sospensioni solide o gas. [16]

5. Principi di teoria sulle analisi delle serie storiche

Attraverso un'analisi delle serie storiche dei consumi di energia termica, registrati dai contatori delle sottostazioni allacciate al teleriscaldamento, se ne vuole rilevare l'andamento: trend più o meno accentuati potrebbero infatti essere legati alla deriva dell'errore nel tempo dei misuratori.

5.1 Serie storiche

Per *serie storica* (o temporale) si intende una *successione di dati osservati su un determinato fenomeno ordinati secondo la variabile tempo*. Le serie storiche presentano, in genere, oscillazioni intorno ad un andamento di lungo periodo, denominate componenti ("virtuali"). Queste sono di quattro tipi principali:

- i) Trend (T): *movimento tendenziale monotono di fondo, di lungo periodo*, che mette in evidenza un'evoluzione strutturale del fenomeno dovuta a cause che agiscono in modo sistematico sullo stesso.
- ii) Ciclo (C) o *movimento congiunturale: espansioni e contrazioni originate dal presentarsi di condizioni più o meno favorevoli del contesto nel quale si colloca il fenomeno*. Solitamente il trend e il ciclo vengono considerati come un'unica componente, detta "componente sistematica".
- iii) Stagionalità (S): *oscillazioni originate da fattori climatici (come l'alternanza delle stagioni) e/o di organizzazione sociale*.
- iv) Accidentalità (e) o *componente di disturbo: movimenti irregolari, erratici o accidentali provocati da una serie di circostanze ciascuna di entità trascurabile*. L'errore accidentale, completamente casuale e dunque non prevedibile, spiega la differenza tra il valore "teorico" della serie, ossia il valore che la serie dovrebbe assumere sulla base di aggiustamenti di calendario, trend, ciclo e componente stagionale, e il valore effettivamente osservato. [22]

L'analisi di una serie storica comincia da un'opportuna rappresentazione grafica, detta *time plot*, che permette di verificare l'andamento delle osservazioni e l'eventuale presenza di oscillazioni: si riportano in ordinata tutti i valori del fenomeno osservato (y) e sulle ascisse i relativi tempi (t). Se nel periodo osservato il livello della serie rimane grosso modo lo stesso, ovvero la serie è stazionaria in media, la spezzata del time plot dovrebbe oscillare intorno ad un valore costante uguale alla media della serie; viceversa, se la serie è evolutiva, il time plot mette in evidenza il trend che può essere crescente o decrescente, lineare o non lineare.

Al fine di stimare le componenti virtuali sopra indicate occorre stabilire il modo con il quale le stesse interagiscono tra loro e decidere il metodo con cui stimare le singole componenti. I modi principali di interazione sono:

- modello *additivo*: $y_t = T_t + S_t + e_t$,
si basa sull'ipotesi che le componenti siano tra loro indipendenti e quindi è applicabile quando l'ampiezza dell'oscillazione non dipende dal livello della serie;

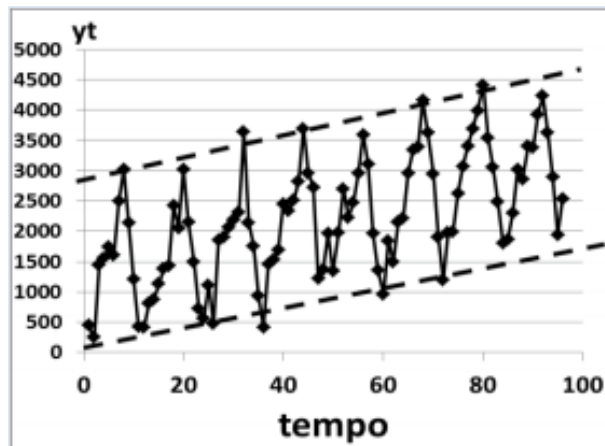


Figura 17: Oscillazioni di ampiezza costante al variare del livello della serie

- modello *moltiplicativo*: $y_t = T_t * S_t * e_t$, adeguato quando le grandezze sono tra loro legate da una relazione di proporzionalità, ovvero quando la fluttuazione stagionale aumenta o diminuisce proporzionalmente alla variazione del livello della serie;

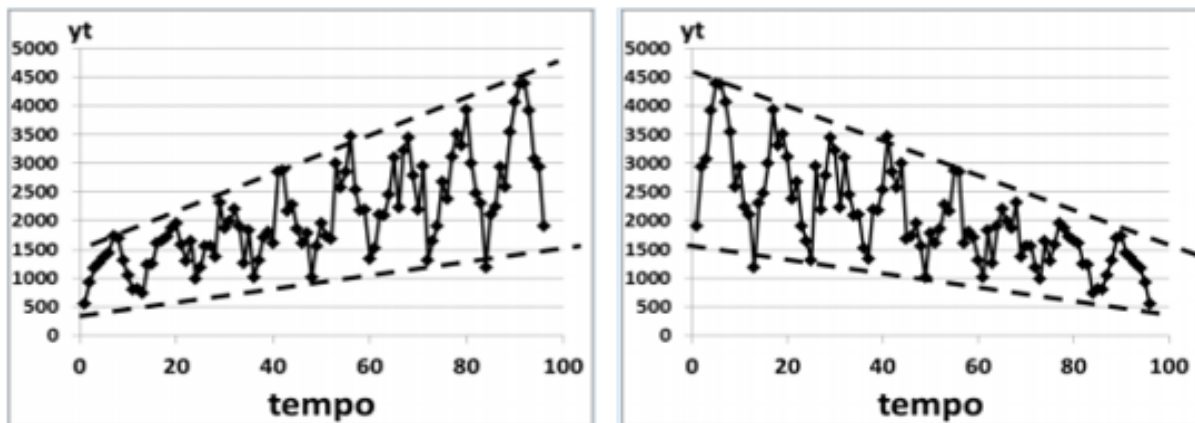


Figura 18: Oscillazioni di ampiezza variabile proporzionalmente al variare del livello della serie

- modello *misto*, in cui una parte è additiva e l'altra moltiplicativa.

Le singole componenti possono poi essere stimate utilizzando metodi empirici (perequativi) oppure metodi analitici (ovvero di interpolazione). Nel primo caso, l'impiego delle medie mobili consente di eliminare le oscillazioni e stimare le componenti sistematiche, ma non consente di per sé di effettuare estrapolazioni. L'effetto principale è quindi quello di smussare le oscillazioni di qualunque tipo, permettendo anche l'eliminazione degli effetti stagionali.

Nel caso di utilizzo dei metodi analitici, invece, si impiega una funzione analitica per la quale è possibile stimare i parametri e che consente di effettuare estrapolazioni al futuro (metodo applicato al paragrafo 6.3 Criterio di selezione dei contatori con probabile deriva). Ad esempio, un modo per effettuare una stima del movimento tendenziale di fondo di una serie è il modello di regressione, tuttavia insufficiente a cogliere tutti gli aspetti della serie.

Per questo motivo, si analizza anche la struttura dei residui, i quali non sono altro che la differenza tra i valori effettivamente osservati della serie (y_t) ed i valori stimati con la retta dei minimi quadrati:

$$\varepsilon_t = y_t - \beta_0 + \beta_1 t$$

L'analisi dei residui, infatti, permette di identificare almeno a livello intuitivo i movimenti ciclici dei fenomeni. Come per la serie completa, essa inizia con un'opportuna rappresentazione grafica dei residui in funzione del tempo: nel caso in cui questi siano effettivamente casuali, ci si aspetta un andamento erratico, tale che ogni singola osservazione sia indipendente dalle altre.

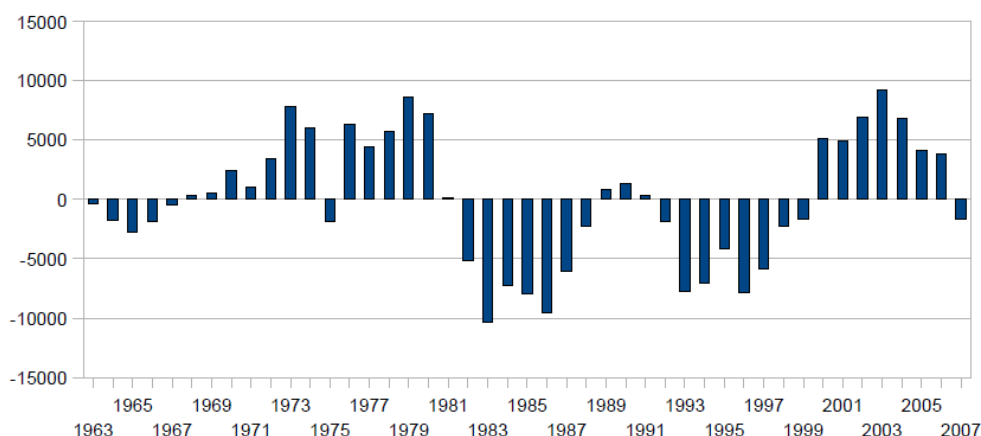


Figura 19: Esempio di una rappresentazione grafica dei residui nel tempo

Nell'esempio, l'andamento presenta delle evidenti caratteristiche cicliche: all'inizio si ha qualche residuo negativo, poi si osserva una serie di valori positivi, intervallati da un solo valore negativo, poi una serie di valori negativi, intervallati da tre piccoli valori positivi, poi di nuovo valori positivi. In questo caso, si dice che la serie dei residui è caratterizzata da una forte memoria: il fatto che un dato valore residuo sia positivo e di un certo livello rende molto frequente che sia positivo, e di intensità analoga, anche il valore successivo; ciò è confermato dal fatto che su 45 osservazioni si contano solamente 8 cambi di segno. [23]

Sulla base del modello scelto, quindi, si stimano i valori teorici della serie da confrontare con i valori osservati, al fine di capire quanto il modello sia aderente al fenomeno reale. Si parla in questo caso di *goodness of fit* o *errore di stima*. Una volta verificata l'aderenza del modello, interessa vedere con che precisione il modello stimato riesca a riprodurre i dati futuri e lo si effettua attraverso il confronto tra i valori futuri e le previsioni del fenomeno. In questo caso si misura la *goodness of forecast*, che in termini formali indica un *errore di previsione*.

Infatti, il fine dell'analisi delle serie storiche è dare una spiegazione quantitativa all'andamento di un fenomeno rispetto al tempo, in modo da poter formulare delle ipotesi realistiche sul suo andamento futuro. Tutto questo, indipendentemente da eventuali variabili che possano influenzare l'andamento della serie, sia nel passato che in ottica previsiva.

Affinché un modello possa essere considerato adeguato, però, è necessario che i residui, ovvero le differenze tra i valori teorici e quelli reali, abbiano una struttura grosso modo casuale: non deve essere riscontrata nessuna sistematicità. Questa è una condizione

necessaria ma non sufficiente: non tutti i modelli che presentano residui casuali sono buoni. [24]

5.2 Differenziazione e detrendizzazione

Per evidenziare i trend ricercati attraverso gli approcci sopra descritti, si possono applicare due metodologie, in grado di rendere stazionaria una serie con un andamento lineare: la detrendizzazione e la differenziazione.

Attraverso la *detrendizzazione* una serie viene resa stazionaria in media mediante sottrazione del trend, ovvero facendo la differenza tra il valore osservato realmente ed il valore stimato, riferiti al medesimo tempo.

La *differenziazione*, invece, rende la serie stazionaria in media sottraendo al valore corrente il valore assunto dalla serie stessa al tempo precedente. In questo caso, la serie diventa più erratica ed è pressoché impossibile osservare movimenti di carattere strutturale. Si intuisce, quindi, come le due procedure non siano alternative a libera scelta ma vadano seguite a seconda del modo che ha una serie di reagire agli impulsi.

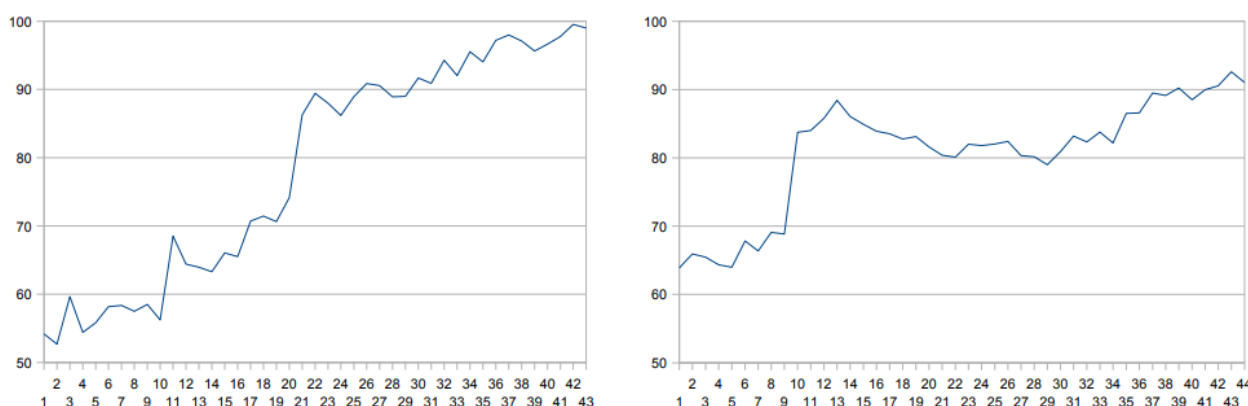


Figura 20: Differenti tipologie di risposta ad un impulso

Nella serie di sinistra, a seguito dell'evento che fa istantaneamente aumentare i valori, il trend risulta spostato verso l'alto in modo definitivo. Ciò significa che la serie risponde all'impulso modificando la propria struttura tendenziale: è quindi definita *a shock permanenti*. Nella figura a destra, invece, l'evento traumatico esaurisce i propri effetti nel corso di qualche osservazione, mantenendo il valore originario del trend: è una serie *a shock transitori*. Le due serie, quindi, mostrano una differente risposta ad impulso ed un diverso carattere.

Per questo motivo, per rendere stazionaria in media una serie a shock transitori si usa la detrendizzazione, mentre per una serie a shock permanenti la differenziazione. In generale, però, il criterio di massima è quello più prudente e quindi la differenziazione. [25]

5.3 Applicazione: Metodo della differenziazione

L'applicazione di questi due approcci alle serie storiche dei consumi di alcune sottostazioni, selezionate attraverso l'analisi effettuata al capitolo 6 Clustering dei contatori di energia termica: metodologia obiettivo di mettere in evidenza sotto una nuova prospettiva le tendenze di fondo del fenomeno.

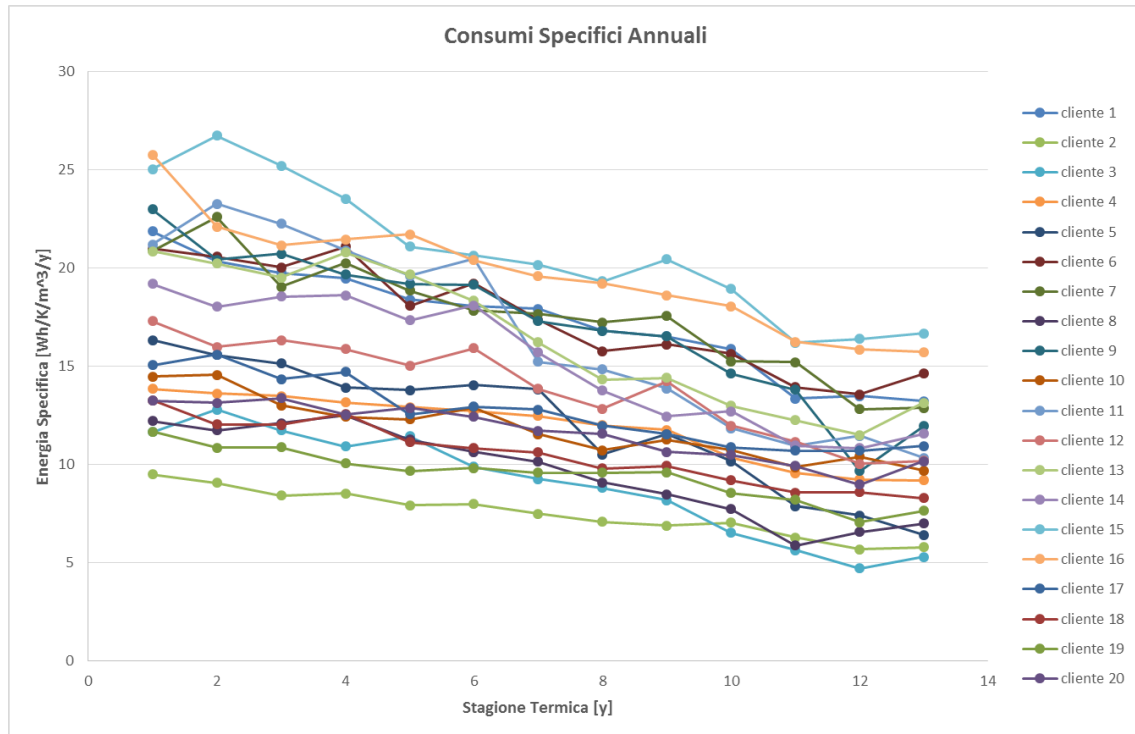


Figura 21: Serie storica dei consumi specifici annuali di energia termica

In Figura 21, è rappresentato l'andamento del fabbisogno di energia termica specifica su base annuale: questo grafico non risulta soggetto alle oscillazioni periodiche legate alle stagioni termiche e mostra in maniera netta il trend delle serie storiche dei consumi.

Figura 22, invece, mostra l'andamento del fabbisogno di energia termica specifica su base mensile per le varie sottostazioni, permettendo di vedere il comportamento dettagliato dei consumi e l'effetto ciclico della stagionalità.

Dall'analisi su base mensile si evince che le serie sono fortemente legate alla stagionalità con alcuni shock transitori, mentre su base annuale (Figura 23) non si registra nessun impulso ma solo un chiaro trend decrescente quasi lineare.

Andrebbe applicata, quindi, la detrendizzazione, la quale ha un procedimento che sta alla base della caratterizzazione energetica dei sistemi e della costruzione del diagramma CUSUM, trattati nel paragrafo 6.4.1 Ricerca della variazione nei sistemi e per questo motivo qui tralasciati. Inoltre, la detrendizzazione permette di vedere se nel sistema c'è stato un cambiamento strutturale, significativo, mentre il fine di questa analisi risiede nel valutare il trend delle serie.

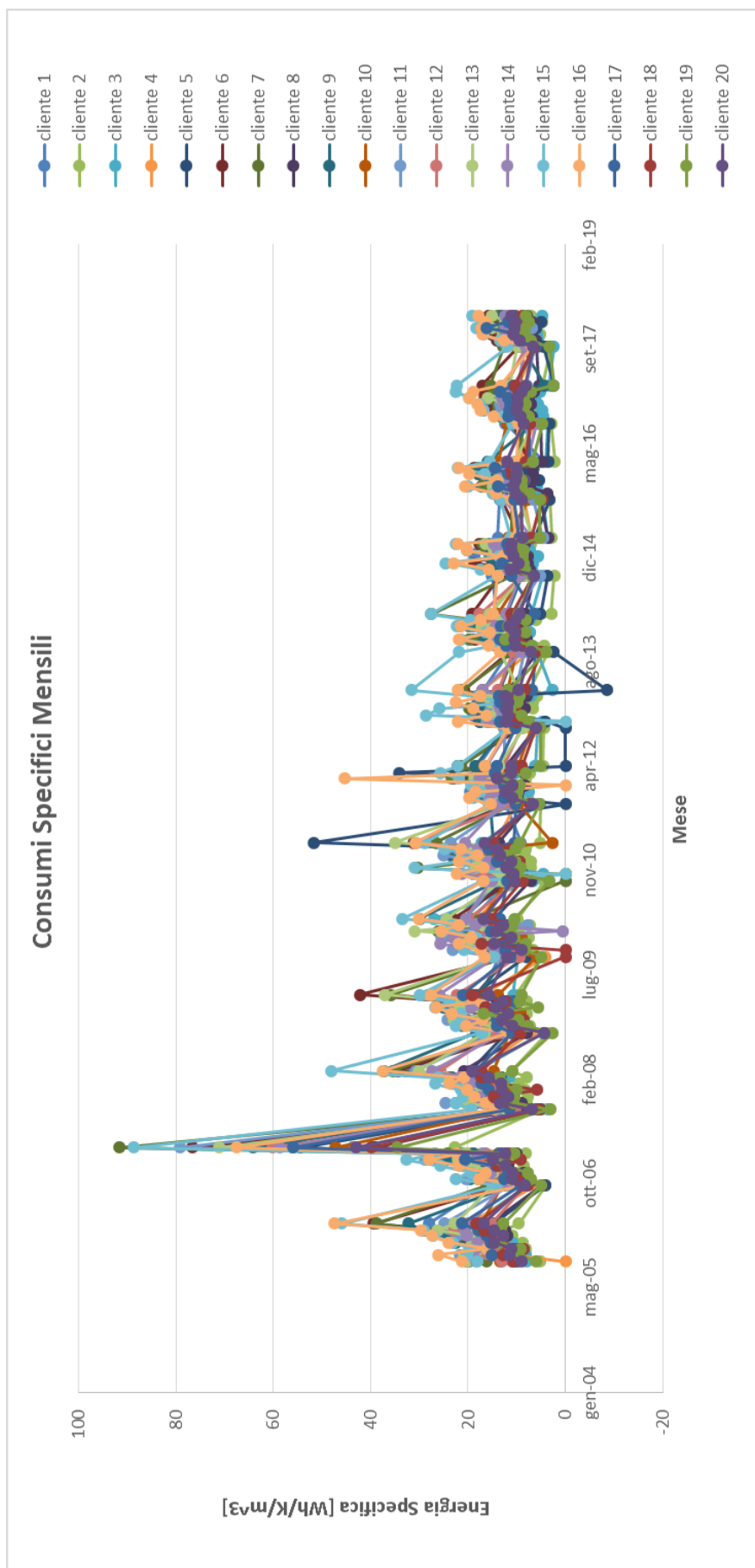


Figura 22: Serie storica dei consumi specifici mensili di energia termica

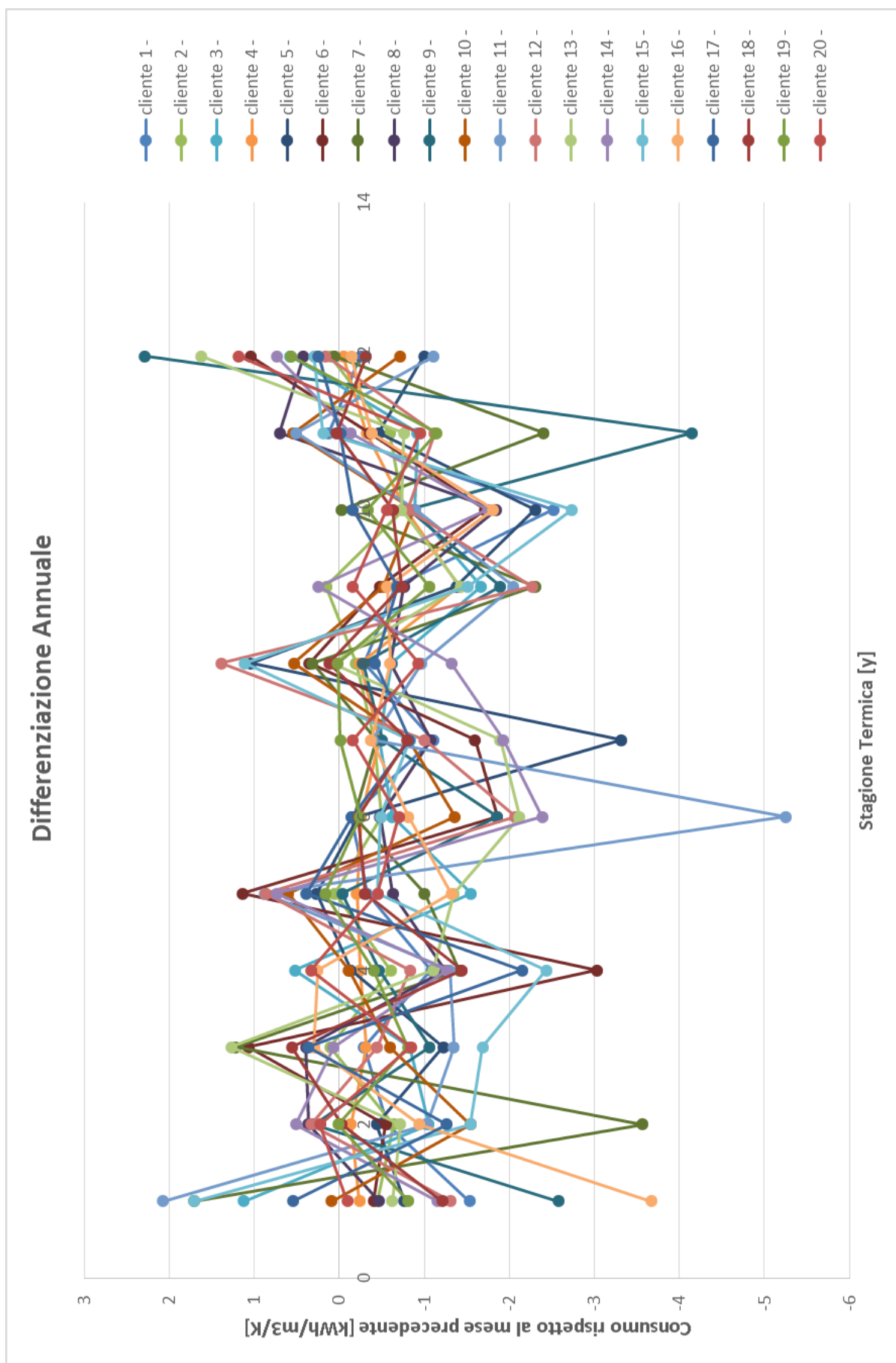


Figura 23: Consumi annuali differenziati per tutte le sottostazioni selezionate

L'esempio di questo paragrafo verrà quindi affrontato usando solo la differenziazione, applicata alla serie storica dei consumi di energia termica pesati sul volume riscaldato e sui gradi giorno, prima in termini annuali e successivamente mensili.

Tra tutte le sottostazioni selezionate e qui analizzate, quella che presenta punti riferiti ai valori di differenziazione con una maggior correlazione e quindi maggior pendenza è quella del cliente 16. Ciò significa che essa è caratterizzata da differenze dei consumi tra anni attigui molto simili e che quindi la relativa serie, composta dai consumi annuali, sta seguendo un trend ben specifico.

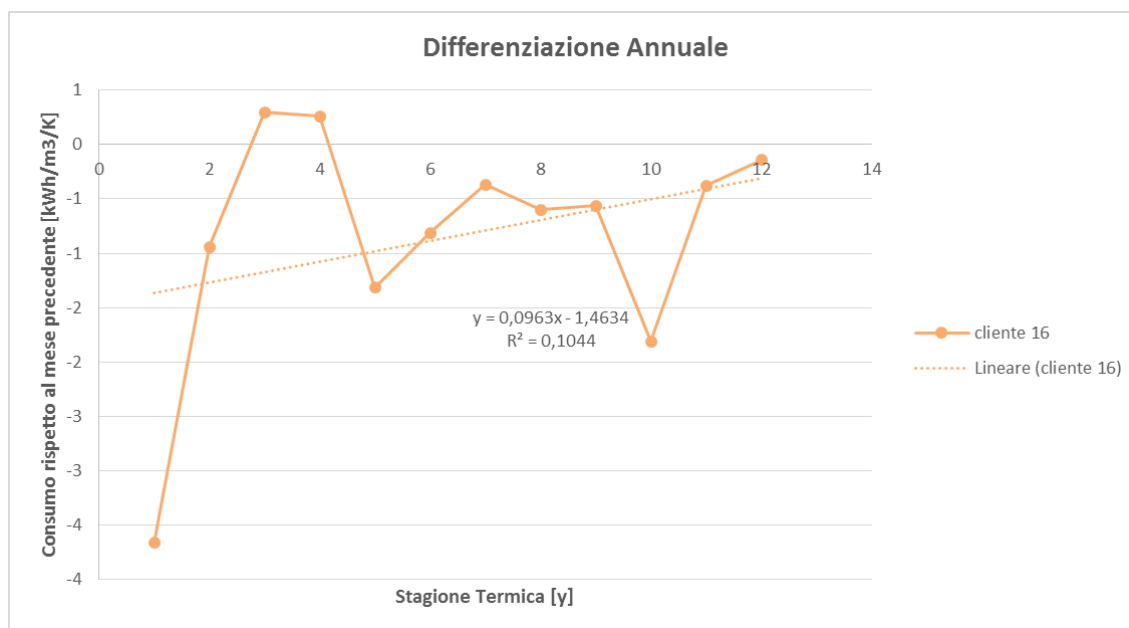


Figura 24: Consumi annuali differenziati per la specifica sottostazione con curva di tendenza lineare

Il grafico sovrastante rappresenta la differenza tra i consumi di energia termica dell'anno considerato rispetto al precedente, in funzione del tempo. Ne risulta un rallentamento della riduzione dei consumi di energia termica negli ultimi anni, dato confermato dalla positività della pendenza della retta di regressione. Ciò significa che i consumi per questa sottostazione stanno continuando a diminuire nel tempo, ma negli ultimi anni questa decrescita è diminuita.

A livello mensile, l'analisi risulta meno significativa in quanto i dati sono più variabili ed il delta consumi molto maggiore. In tutte le sottostazioni si nota un'anomalia nei mesi di aprile – ottobre 2007.

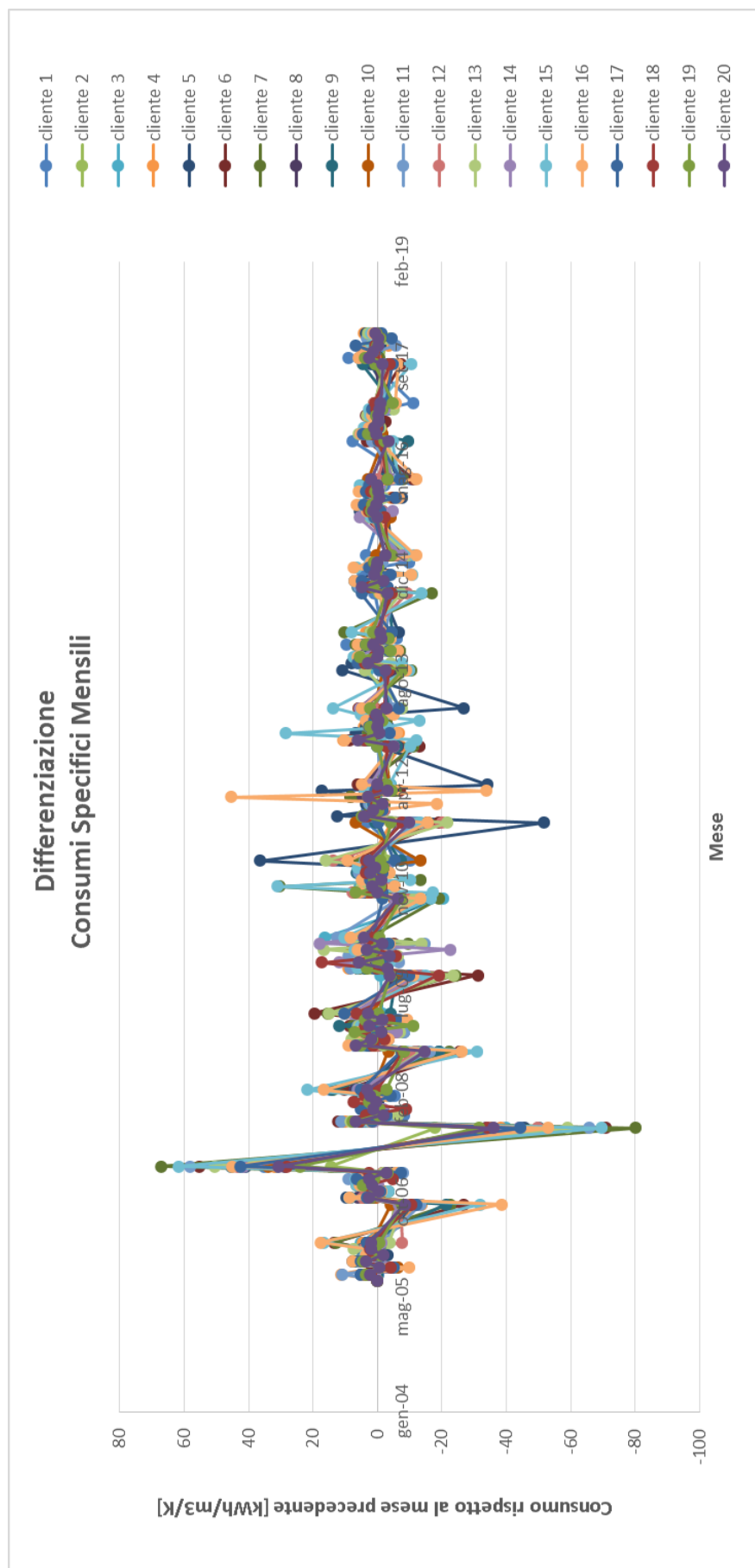


Figura 25: Consumi mensili differenziati per tutte le sottostazioni selezionate

Tra tutte le sottostazioni selezionate, quella che presenta una maggior correlazione tra i delta mensili è quella del cliente 4.

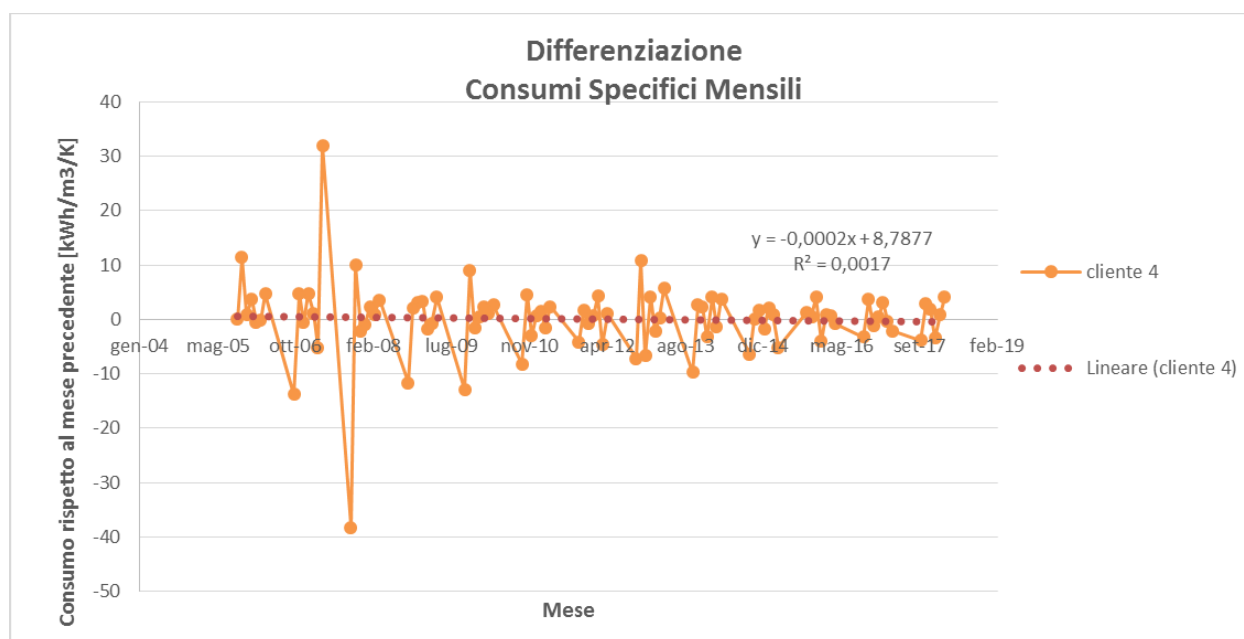


Figura 26: Consumi mensili differenziati per la specifica sottostazione con curva di tendenza lineare

In questo caso, nonostante l'elevata dispersione delle osservazioni, la linea di tendenza è quasi perfettamente orizzontale (coefficiente angolare non significativo), ovvero si può considerare una variazione dei consumi costante, e quindi un trend monotono della serie storica dei consumi. Ciò significa che i consumi stanno diminuendo in maniera lineare nei mesi.

Infine, la procedura di differenziazione è stata applicata in modo da avere dei valori percentuali delle variazioni annuali, per tutte le sottostazioni selezionate (Figura 27). In media si trovano: una decrescita annua percentuale che va dal -2% al -6% e dei valori del coefficiente di determinazione (R^2) molto bassi, quasi nulli, dovuti ad una dispersione dei punti intorno alla curva molto elevata. Anche tutti i coefficienti angolari sono vicini allo zero, motivo per cui in linea di massima i vari trend di decrescita possono essere considerati costanti nel tempo.

Trend di decrescita costanti sono da monitorare con attenzione, in questa analisi, in quanto sono proprio quelli che potrebbero portare all'individuazione delle sottostazioni in cui i contatori sono affetti da deriva della misura: una pendenza prossima allo zero della retta di regressione, calcolata sui dati differenziati a livello mensile, potrebbe essere un nuovo criterio di selezione. Questo approccio, viene quindi proposto come uno dei possibili metodi di analisi dei consumi.

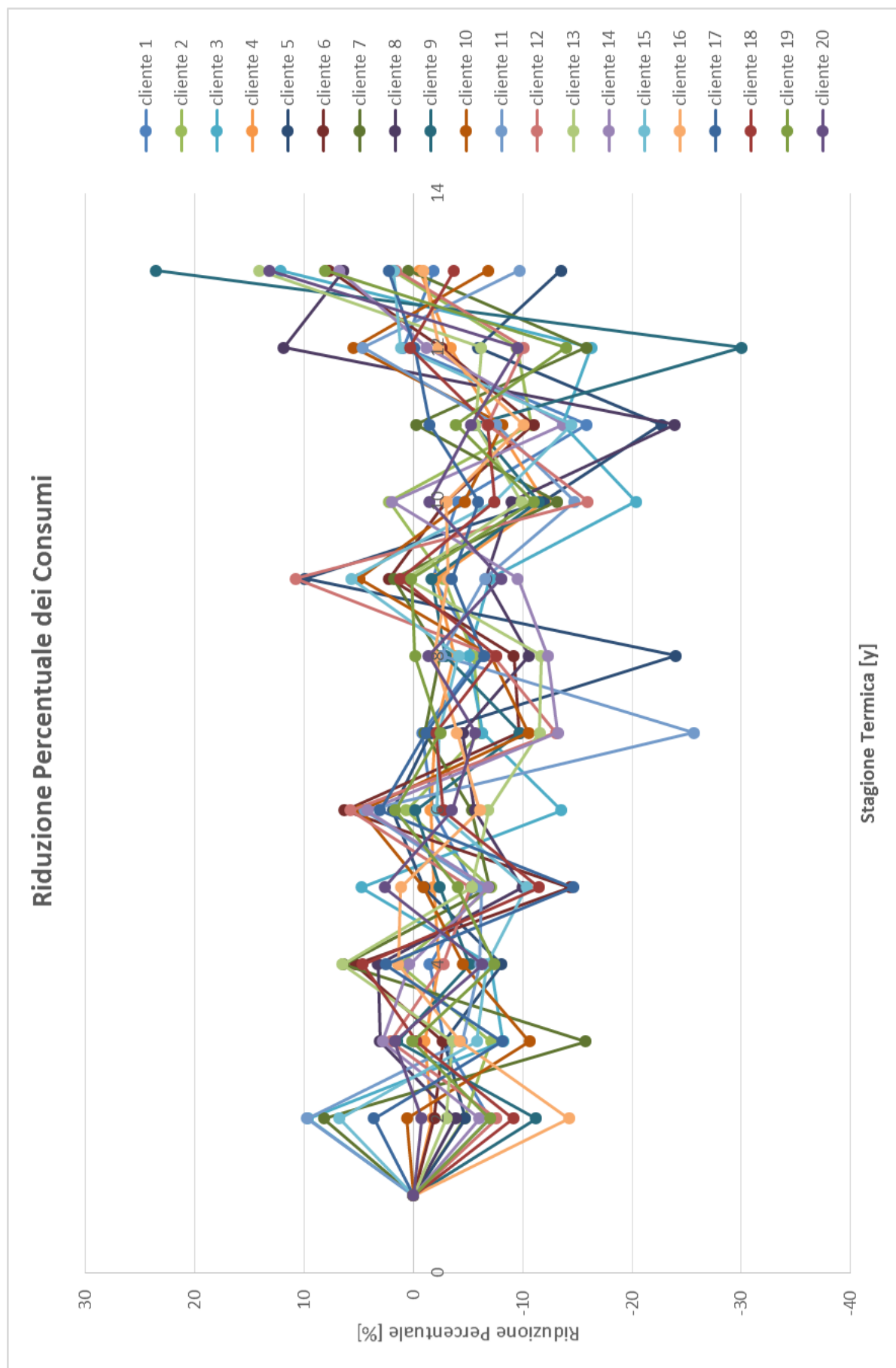


Figura 27: Differenziazione percentuale dei consumi per stagione termica

6. Clustering dei contatori di energia termica: metodologia

Obiettivo di questo capitolo è la costruzione di uno strumento di analisi statistica che permetta di escludere la deriva strumentale dai contatori di energia termica, al fine di individuare gli strumenti per i quali risulti opportuna una sostituzione o una manutenzione straordinaria, oltre le periodicità già imposte dalla normativa. La bontà di questa metodologia verrà poi valutata attraverso successive analisi teoriche e verifiche sperimentali di taratura, su campo o in laboratorio.

6.1 Raccolta e selezione del *data set*

Dall'estrazione dati delle letture sui consumi di energia termica gennaio 2005 - marzo 2018, si vuole selezionare un data-set di contatori per approfondimenti in merito alla deriva della misura nel tempo.

I dati presentano delle disarmonie legate a:

- modalità di acquisizione (automatica tramite telelettura o manuale);
- conguagli;
- errore di misura strumentale.

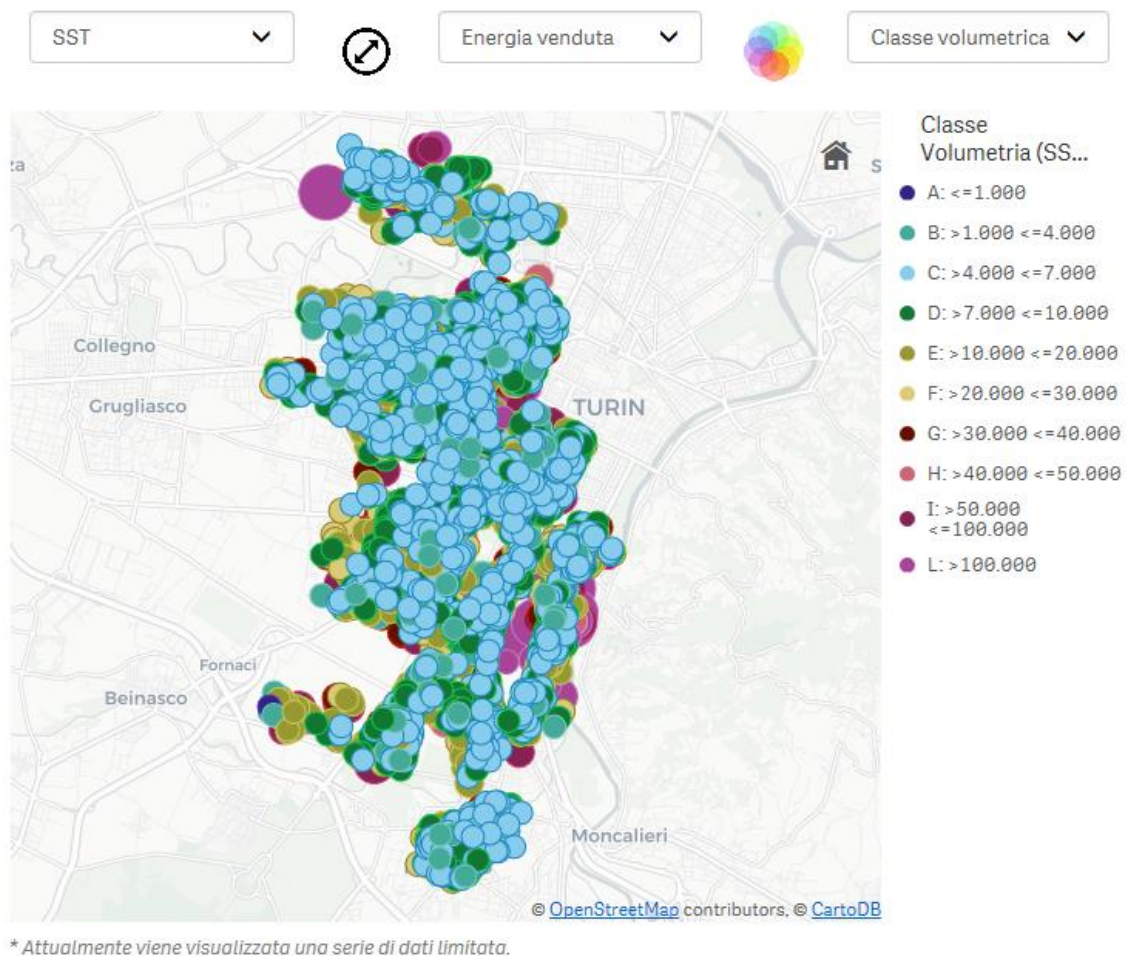


Figura 28: Posizione di tutte le sottostazioni nell'area di Torino (2018)

Delle oltre seimila sottostazioni attualmente esistenti, sono state prese in considerazione le 1975 presenti già da gennaio 2005, caratterizzate da:

- località: *Torino*;
- tipo utenza: *condominio*;
- tipo fornitura: *solo riscaldamento*, ovvero riscaldamento per i soli ambienti domestici (senza produzione di acqua calda sanitaria) previsto a Torino nei mesi che vanno da ottobre ad aprile;

Delle sottostazioni iniziali, 1938 hanno soddisfatto i criteri e solo 36 sono state scartate.

Una seconda fase di cernita è stata effettuata escludendo le sottostazioni con:

- contatore sostituito dopo il 2007,
- volumetria non nota,
- ripetuti consumi nulli o negativi, per i quali sono ipotizzabili “giro-contatore” o congruagli,

in modo da considerare solo i casi in funzione da più tempo con misure stabili ed affidabili. Le sottostazioni rimanenti su cui effettuare le analisi sono **1077**.

6.2 Normalizzazione dei dati

Per rendere i dati sui consumi di energia termica confrontabili, è stato necessario normalizzarli per: intervallo temporale di riferimento, tipologia di edificio (in riferimento alla sua capacità di disperdere il calore) e condizioni climatiche.

6.2.1 Intervallo temporale di riferimento

La scelta dell'intervallo temporale di riferimento è un elemento rilevante all'interno delle analisi sui *consumi* energetici e può richiedere l'attuazione di modifiche dei dati in input.

A seconda della lunghezza del periodo di riferimento, si possono infatti vedere oscillazioni cicliche delle serie dei consumi di energia termica ad uso riscaldamento visualizzati su base mensile, essendo i mesi invernali quelli con *fabbisogno* più elevato rispetto agli estivi. Il “fabbisogno” indica infatti la quantità di energia termica necessaria a soddisfare i requisiti di comfort climatico per ogni abitazione ed è strettamente dipendente dalle condizioni climatiche e quindi dalla stagionalità, mentre nel formare i “consumi” sono coinvolti anche altri parametri di gestione più difficili da quantificare.

Ulteriore elemento da considerare è il numero di giorni a cui fanno riferimento le letture dei consumi: volendo confrontare la domanda di energia del mese di gennaio con quella relativa al mese di febbraio, bisognerebbe tenere in considerazione che febbraio ha tre giorni in meno di gennaio. Le differenze di calendario, però, deterministiche, potrebbero essere affrontate preliminarmente a qualunque tipo di analisi. Essendo un anno composto da 12 mesi e 365 giorni, la lunghezza media di un mese è pari a $365/12=30,42$ giorni. I dati relativi a qualunque mese possono pertanto essere normalizzati dividendo per il numero di giorni che ha il mese e moltiplicando per 30,42. [23]

Per risolvere l'effetto di disturbo legato alla stagionalità ed avere consumi confrontabili, in questo elaborato si è effettuata la prima parte dello studio utilizzando come base temporale la *stagione termica*, ottenuta sommando i consumi mensili dal mese di ottobre al mese di aprile di due anni consecutivi. In questo modo, non sono stati necessari aggiustamenti sui mesi e tutte le stagioni presenteranno analogo andamento.

Simili motivazioni hanno portato all'esclusione dell'*anno solare* come intervallo temporale di riferimento: variazioni di qualche giorno nei mesi di dicembre-gennaio in cui i consumi sono maggiori, potrebbero introdurre delle differenze rilevanti nella contabilizzazione dell'energia. Inoltre, concludendosi la stagione di riscaldamento ad aprile, l'attuazione di lavori importanti sugli impianti risulta preferibile durante i mesi estivi. L'adozione della stagione termica (ottobre-aprile) permette quindi di vedere chiaramente eventuali modifiche tra l'anno precedente e quello successivo.

Il problema relativo alla lunghezza dei vari mesi invece non sussiste se si confronta la domanda relativa a stessi periodi di anni diversi: in questo caso l'aggiustamento potrebbe riguardare il numero di giorni lavorativi. [23] Questa normalizzazione è stata però trascurata in quanto si ipotizza percentualmente non rilevante.

6.2.2 Volumetria

Figura 29 mostra lo storico dei consumi mensili in funzione della cumulata dei gradi giorno e permette di avere un'idea della varietà dei consumi del parco edilizio torinese.

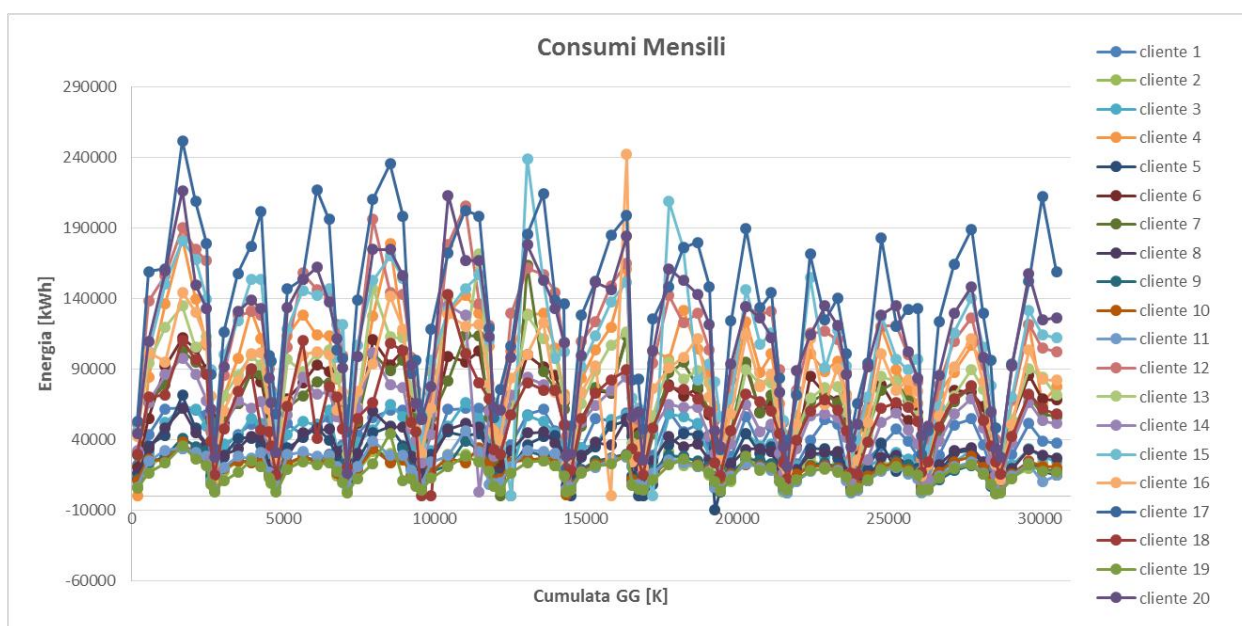


Figura 29: Storico dei consumi mensili rispetto alla cumulata dei GG

Per rendere confrontabili i consumi di edifici diversi occorre però normalizzare sull'*edificio*. Si considera, infatti, esistente una relazione di proporzionalità tra il fabbisogno termico e le superfici disperdenti degli ambienti climatizzati, di cui però non si dispone di informazioni specifiche. Per questo motivo nell'analisi si è scelto di normalizzare l'energia termica misurata sulla volumetria legata alla sottostazione stessa.

I dati sui consumi verranno quindi convertiti nel rapporto:

$$q_{edificio} = \frac{E_{th}}{V} = \frac{kWh}{m_{risc}^3}$$

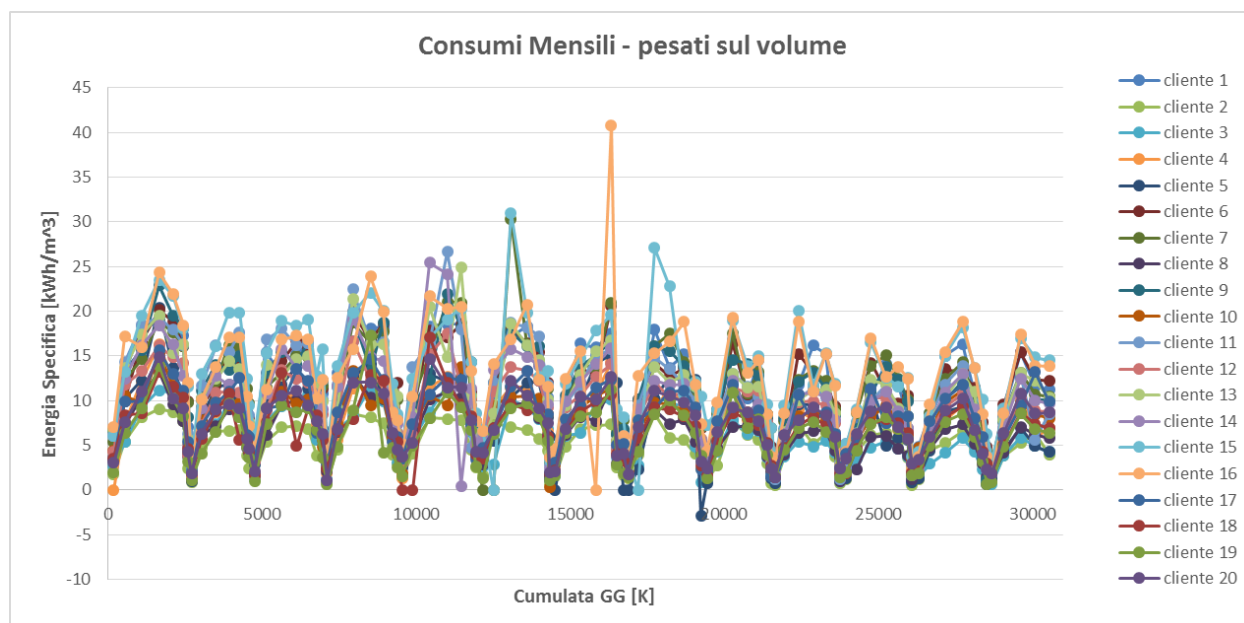


Figura 30: Storico dei consumi mensili, normalizzati per volumetria, in funzione della cumulata dei GG

Parametri simili a “ $q_{edificio}$ ” sono attualmente usati a livello normativo per la classificazione energetica degli edifici: il Decreto Legislativo 192/2005 stabilisce l’obbligo di redazione di un Attestato di Prestazione Energetica (APE) che assegna la classe energetica alla casa in base ai suoi valori medi di consumo per unità di superficie calpestabile. Per consumo in questo caso si intende solo il *fabbisogno energetico annuale* globale, in energia primaria non rinnovabile, per: riscaldamento, raffrescamento, ventilazione, produzione di acqua calda sanitaria.

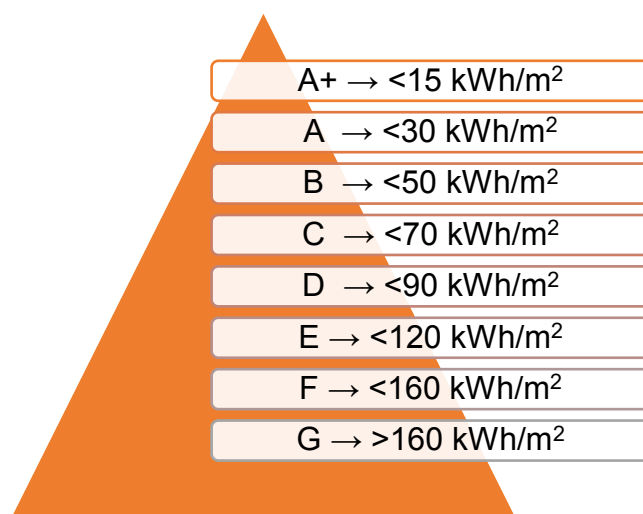


Figura 31: Classificazione energetica degli edifici

6.2.3 Condizioni climatiche

Driver principali nei processi in cui si parla di riscaldamento sono le condizioni climatiche: da esse dipende il fabbisogno energetico necessario per mantenere il comfort degli ambienti.

Le condizioni climatiche sono caratterizzate principalmente da:

- temperatura dell'aria esterna,
- irraggiamento solare,
- vento,
- umidità.

Di questi solo la modalità di calcolo della “temperatura dell'aria ambiente” risulta regolato da norme. Il DPR 412/93, infatti, ha formalizzato l'uso dei gradi-giorno (GG) come descrizione sintetica delle temperature invernali di una certa località: essi sono calcolati come la somma, giorno per giorno, delle differenze fra la temperatura di riferimento T_i di 20°C e la temperatura media dell'aria esterna T_{em} :

$$GG = \sum_{j=1}^{ng} (T_i - T_{em,j})$$

I gradi-giorno sono influenzati da molti parametri come l'orografia, la quota altimetrica, l'esposizione al sole ed ai venti per cui il loro valore può essere differente per ogni edificio della stessa città. [23]

Questo grado di dettaglio però esula dai fini dell'elaborato e può essere proposto come un ulteriore sviluppo dell'indagine. Si considereranno, quindi, i consumi di energia termica ad uso riscaldamento funzione solo dei gradi giorno, i quali sono assunti costanti sull'intera città di Torino.

Per destagionalizzare i dati di consumo degli edifici se ne calcola la firma energetica dividendo il consumo di energia termica per i gradi-giorno relativi al periodo considerato. I valori così trovati, saranno indicati con il termine “*consumo specifico di energia*” SEC (*Specific Energy Consumption*).

$$q = \frac{E_{th}}{GG} = \frac{kWh}{K}$$

Spesso normalizzati pure sulla base della volumetria riscaldata (V):

$$q = \frac{E_{th}}{V * GG} = \frac{kWh}{m^3_{risc} * K}$$

Questo indice di efficienza energetica è stato utilizzato come variabile dipendente nell'analisi che segue.

6.3 Criterio di selezione dei contatori con probabile deriva

L'approccio utilizzato per lo studio statistico dei dati storici rilevati dai contatori di calore (elaborati nei precedenti paragrafi) si basa sul *Sistema di Gestione dell'Energia* (GSE), secondo la norma ISO 50001 del 2011, e si propone di analizzare le misure di energia termica degli edifici serviti dal teleriscaldamento e le loro variazioni nel tempo attraverso la modellizzazione matematica del comportamento dei consumi.

Il riscaldamento domestico è infatti caratterizzato da un consumo di energia prevalentemente determinato dalla fisica del processo e può essere espresso attraverso relazioni del tipo:

$$E = E_0 + f_1(t) + f_2(t) + \dots + \varepsilon$$

In cui: E_0 rappresenta il termine fisso; f_1 e f_2 dei termini variabili in funzione del tempo legati, oltre che al comportamento degli utenti, all'evoluzione dell'edificio ed alla deriva di misura strumentale; ε è la variabile casuale che comprende la componente d'errore tipica dei fenomeni reali.

Uniche condizioni necessarie per la costruzione del modello sono:

- informazioni relative all'energia ed ai relativi driver temporalmente sincronizzate;
- base temporale costante.

Nel caso specifico della contabilizzazione del calore relativa al solo riscaldamento domestico, i valori di consumo possono essere correlati al tempo attraverso una *retta di regressione*, composta da tre elementi:

- Intercetta: termine fisso corrispondente alla *quota dei consumi al tempo zero*, ovvero alla prima osservazione. Determina la posizione della retta che, a parità di pendenza, verso l'alto (maggiori consumi) o verso il basso (minori consumi), dipende da fattori come la presenza di calore endogeno e la variazione della temperatura di set point interna.
- Pendenza o coeff. angolare: *quantità di energia aggiuntiva richiesta al variare del tempo*; permette di stimare l'efficienza del sistema in quanto dipende dalle perdite di calore del fabbricato e dal comportamento più o meno virtuoso dei suoi abitanti.
- Dispersione dei punti (coeff. di determinazione, R^2): evidenza come la quantità di energia necessaria, a parità di condizioni, possa variare da un periodo all'altro; dipende da fattori operativi. Il suo valore è compreso tra 0 ed 1.

Una maggiore dispersione dei punti (valore tendente allo 0) implica un'aderenza minore alla caratteristica, le cui cause possono essere: una gestione dell'energia poco attenta, inadeguatezza della variabile utilizzata, periodi di rilevamento dei dati troppo brevi, uso dell'energia misurata anche per scopi diversi da quelli considerati, cambiamento del sistema durante un lungo periodo temporale. [26] Non si ritengono invece imputabili a fenomeni di deriva metrologica, caratterizzati da un processo lungo e graduale.

Lo scopo dell'analisi di regressione, quindi, è di produrre una stima dei parametri di pendenza e dispersione delle misure, in modo da poter poi interpretare l'evoluzione dei consumi nel tempo per uno stesso fabbricato o confrontare i consumi di fabbricati diversi.

6.3.1 Consumi in funzione del tempo

Calcolati i consumi di ogni sottostazione per tutte le 13 stagioni termiche (ottobre-aprile dal 2005 al 2018) e normalizzati per gradi-giorno e volumetria, sono state tracciate le linee di tendenza. Attraverso di esse i consumi termici stagionali sono stati correlati agli anni in modo da avere un modello della loro evoluzione nel tempo.

Di particolare interesse nell'analisi sono la pendenza e la correlazione caratteristiche di ogni campione di misure, legate tra loro da una relazione di proporzionalità diretta.

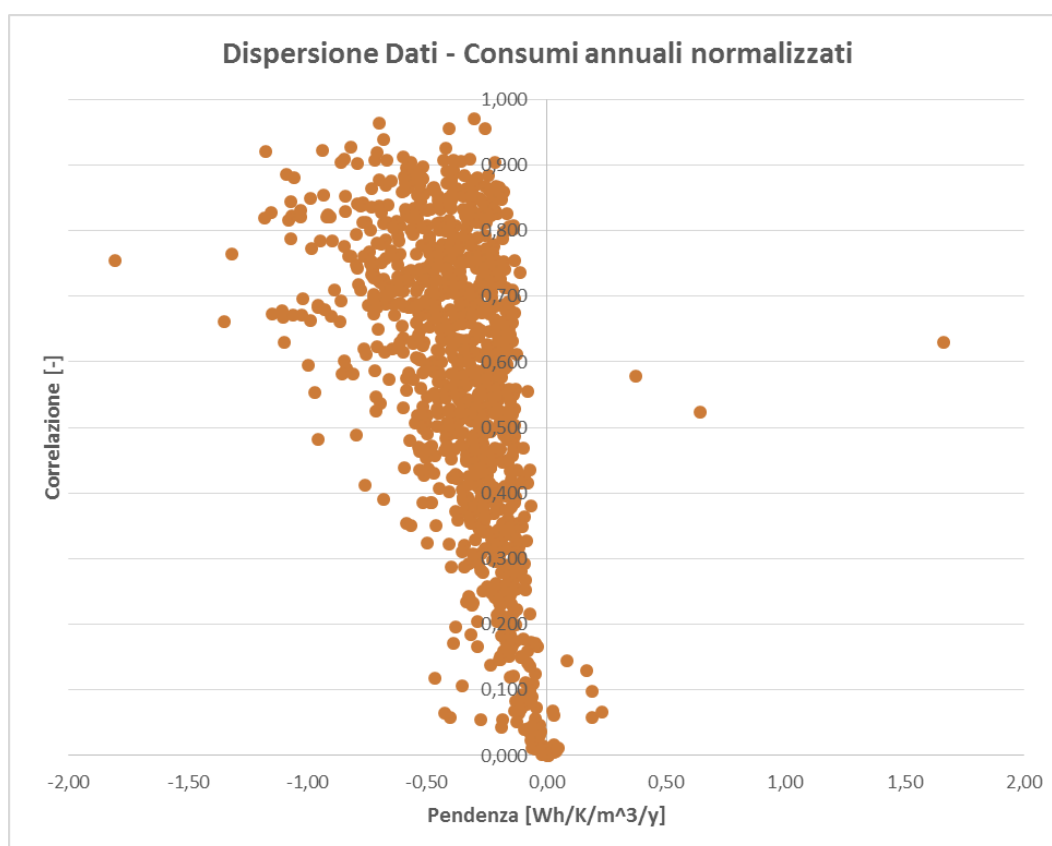


Figura 32: Correlazione e pendenza di tutte le sottostazioni

Il primo risultato osservabile da Figura 32 è che la maggior parte delle sottostazioni presenta dei consumi con andamento caratterizzato da una buona correlazione ed una bassa pendenza negativa, sintomo di un trend di decrescita.

La verifica della diminuzione dei consumi nel tempo è stata riscontrata, anche a livello generale, tracciando la serie storica della cumulata dei consumi di tutte le sottostazioni per ogni stagione termica (Figura 33).

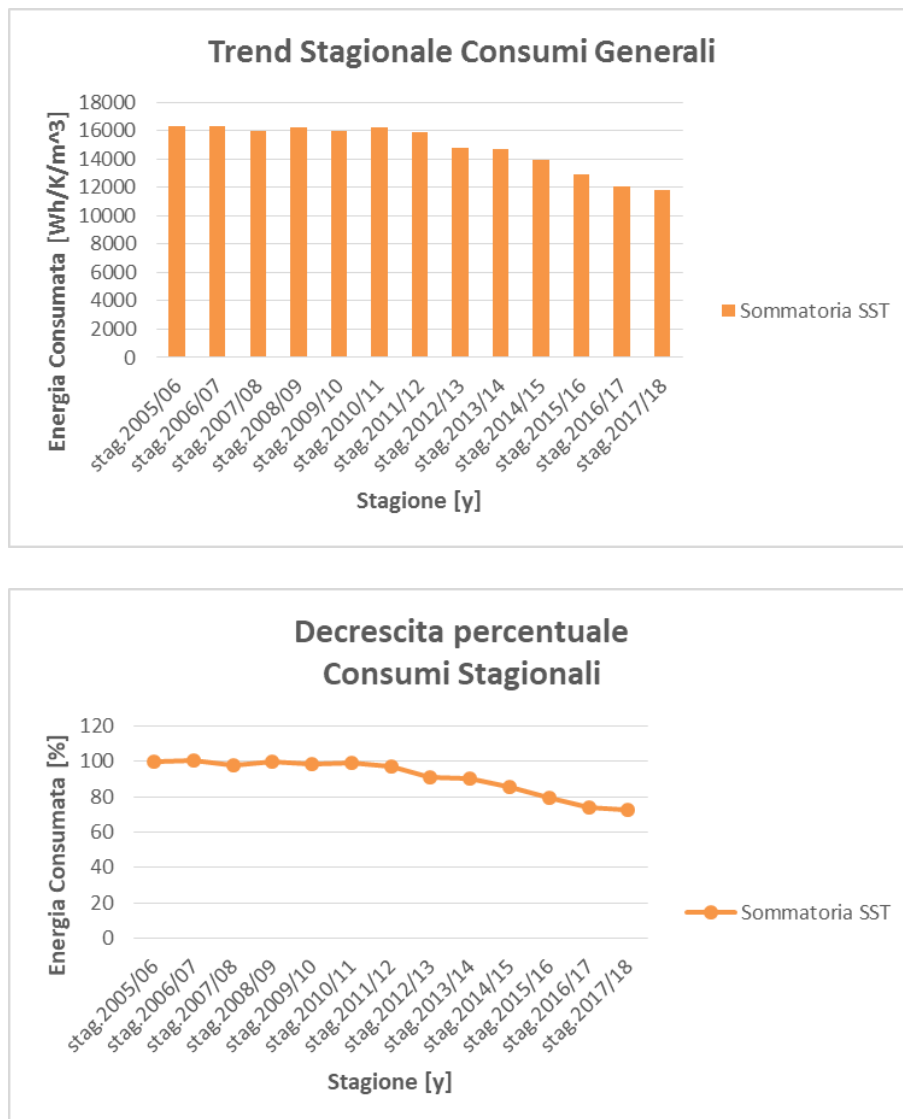


Figura 33: Andamento generale consumi stagionali

Considerando l'andamento dei consumi specifici sommati per tutte le 1077 sottostazioni inizialmente selezionate, se ne vede una diminuzione del quasi 30% dal 2005 ad oggi, probabilmente acuita dall'introduzione delle valvole termostatiche, che avrebbero dovuto essere installate entro la fine del 2016 in tutti gli edifici (D.lgs.102/2014 modificato dal D.lgs.141/2016).

Sulla base della dispersione dei punti, si può immaginare di suddividere qualitativamente il grafico correlazione-pendenza (Figura 32) in varie aree (Figura 34):

- bassa correlazione e bassa pendenza → i dati non sono regolari e non evidenziano alcun trend. Cause tipiche possono essere quelle elencate al paragrafo 6.3 Criterio di selezione dei contatori con probabile deriva per i dati con basso coefficiente di determinazione (R^2);
- bassa correlazione ed alta pendenza → i dati variano in maniera significativa nel tempo portando ad un aumento o diminuzione dei consumi. Questo potrebbe essere sintomo, nel caso in cui la firma energetica dell'edificio migliori, di efficientamento;

- alta correlazione e bassa pendenza → il sistema rientra in una condizione di funzionamento regolare e stazionaria;
- alta correlazione ed alta pendenza → i dati presentano un'ottima regolarità e indicano precisi trend dei consumi.

Quest'ultimo è il caso di maggior interesse nella ricerca della deriva strumentale. Infatti, oltre ad un margine percentuale di variazione dovuto all'errore di misura intrinseco dello strumento, differenze più ampie potrebbero essere attribuite ad un peggioramento continuativo delle condizioni del contatore nel tempo.

Si ipotizza:

- che la deriva possa influenzare il comportamento del misuratore in modo continuo e monotono nel tempo, portando ad un andamento dei consumi crescente/decrecente lineare;
- che l'efficientamento faccia rilevare un andamento dei consumi “a gradini”;

nel caso in cui la deriva dovesse invece portare ad una situazione di discontinuità, attraverso questo tipo di analisi non si è in grado di individuarla.

Sono quindi stati applicati dei filtri in modo da considerare solo quelle sottostazioni che presentano:

- alta pendenza, simbolo di un maggiore cambiamento dei consumi nel tempo;
- alta correlazione, ovvero maggiore stabilità dei valori ed esclusione efficientamento energetico.

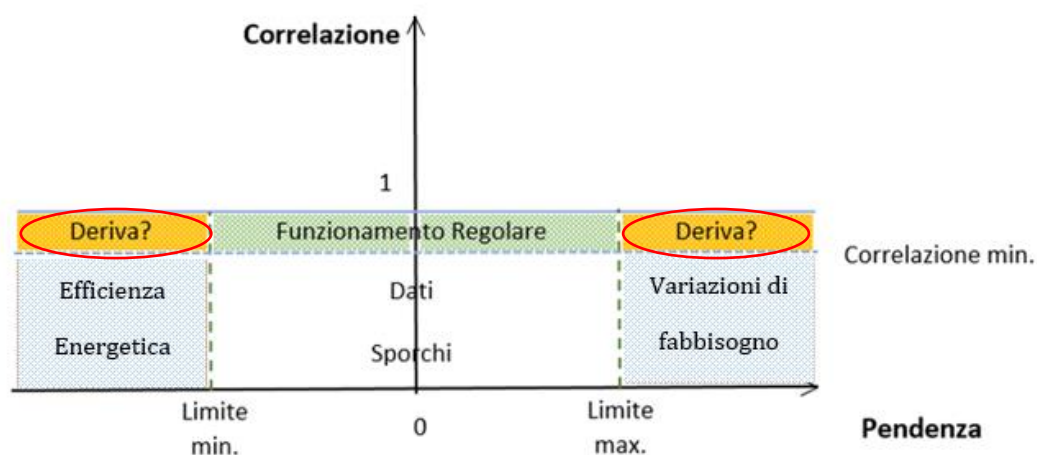


Figura 34: Schema qualitativo correlazione-pendenza in funzione delle possibili cause

L'idea quindi è quella di scegliere i contatori più vecchi che abbiano avuto una “storia” più regolare possibile, in modo da poter verificare se esiste una differenza nella misura dei contatori rispetto agli standard, dovuta a deriva in condizioni di normale funzionamento.

Attraverso l'imposizione di limiti arbitrari sugli indici (minimo 0,9 per la correlazione e $\pm 0,3$ per la pendenza) calcolati su base annuale, sono state selezionate **20** sottostazioni, da sottoporre ad ulteriori analisi sia di natura teorica che sperimentale. I limiti imposti sulla pendenza dovrebbero essere legati all'errore strumentale, ma in questo caso si è scelto di fissarli in modo tale da considerare solo i casi in cui la deriva potesse essere più probabile.

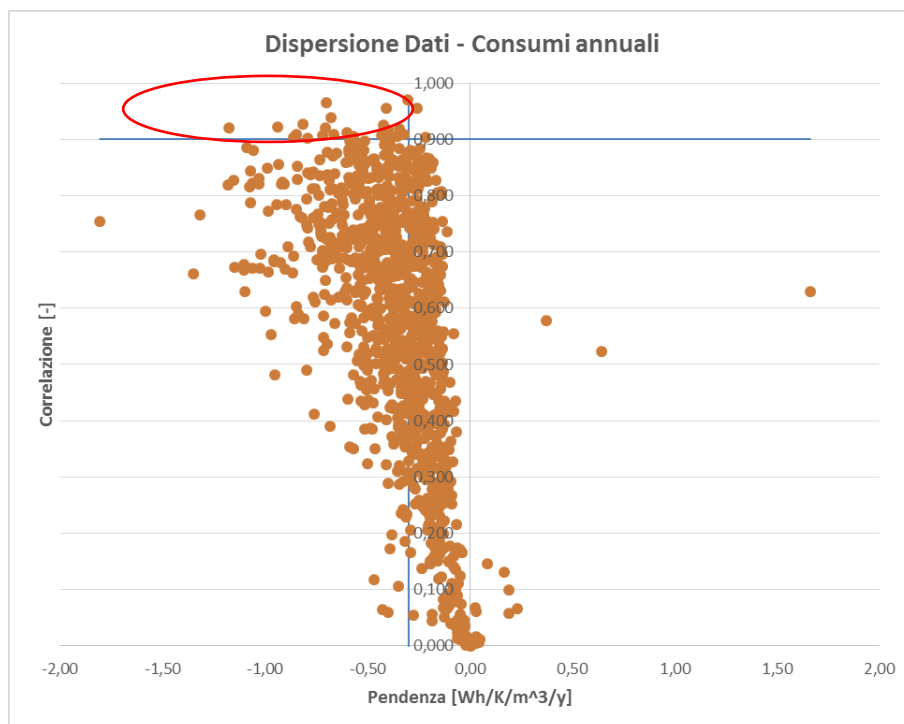
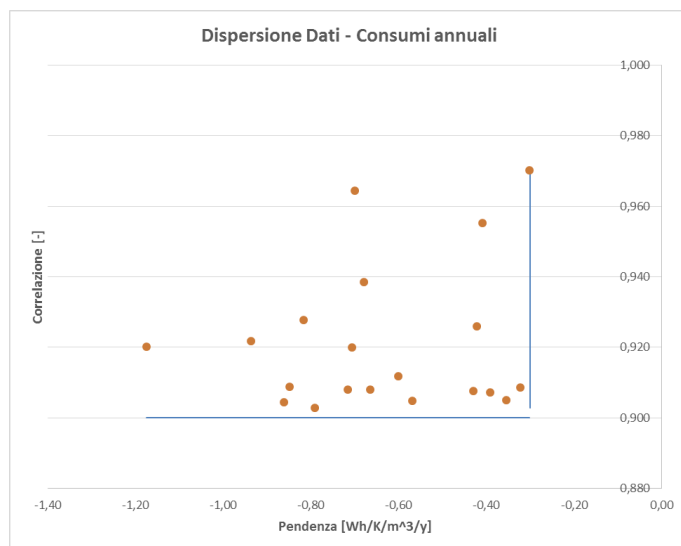


Figura 35: Selezione grafica delle sottostazioni

Come mostrato da Figura 35, rientrano nei limiti sopra specificati solo sottostazioni che si trovano nella parte sinistra del grafico.

Caratteristiche delle sottostazioni selezionate:



SEDE TECNICA	Corr.	Pend.	Intercetta
cliente 1	0,965	-0,70	22,22
cliente 2	0,970	-0,30	9,64
cliente 3	0,938	-0,68	13,75
cliente 4	0,926	-0,42	14,83
cliente 5	0,928	-0,82	17,76
cliente 6	0,908	-0,67	22,13
cliente 7	0,908	-0,72	22,57
cliente 8	0,905	-0,57	13,63
cliente 9	0,922	-0,94	23,70
cliente 10	0,907	-0,39	14,58
cliente 11	0,920	-1,18	24,86
cliente 12	0,912	-0,60	18,11
cliente 13	0,904	-0,86	22,51
cliente 14	0,903	-0,79	20,75
cliente 15	0,909	-0,85	26,74
cliente 16	0,920	-0,71	24,64
cliente 17	0,908	-0,43	15,68
cliente 18	0,955	-0,41	13,40
cliente 19	0,909	-0,32	11,74
cliente 20	0,905	-0,36	14,11

Figura 36: Sottostazioni selezionate

L'andamento dei consumi termici specifici annuali per le 20 sottostazioni selezionate è mostrato in Figura 37 e si dispone, come ipotizzato, su di una retta in forte decrescita (percentualmente dal 20 al 60% in meno).

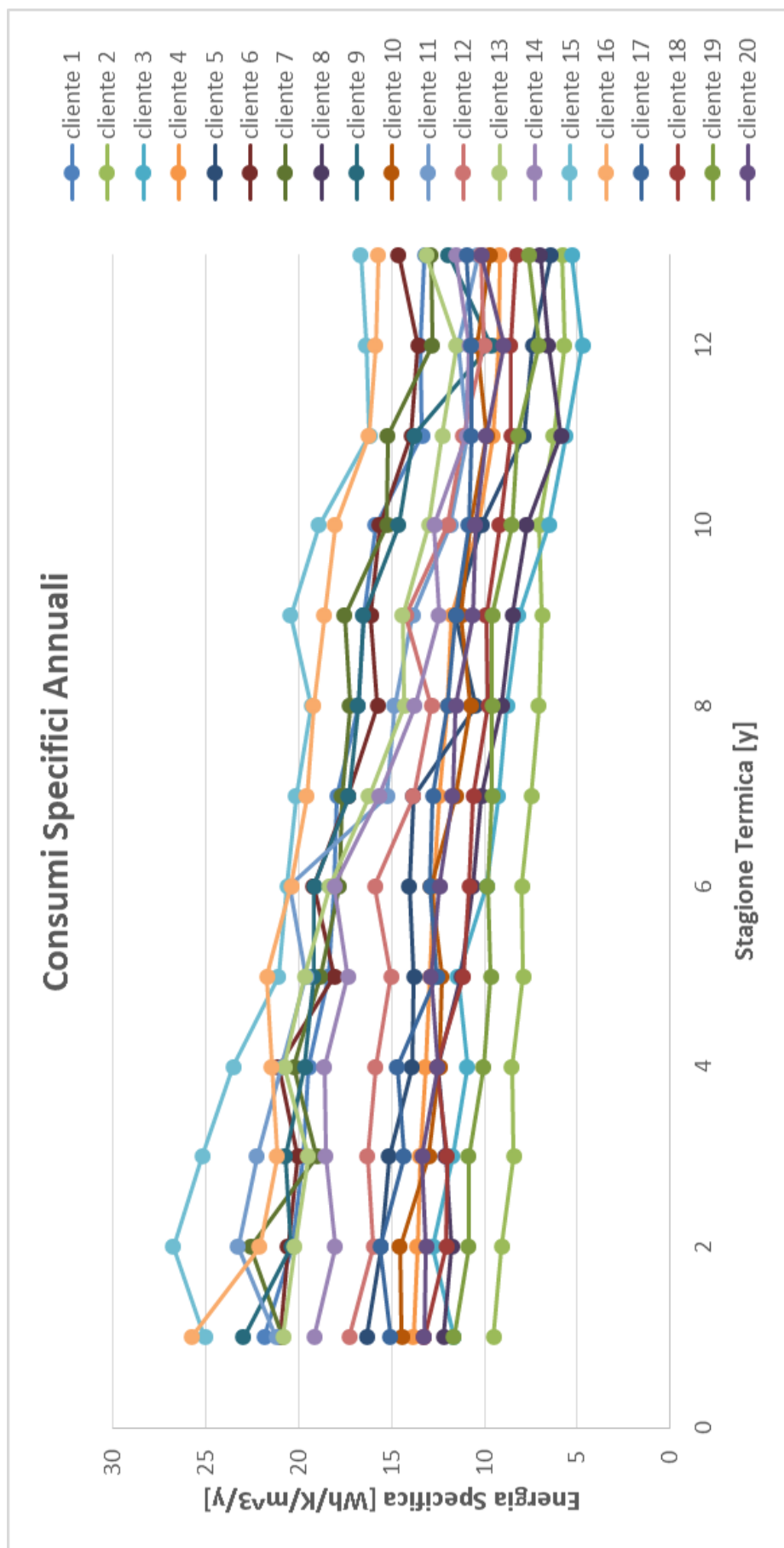


Figura 37: Serie storiche dei consumi termici delle sottostazioni selezionate

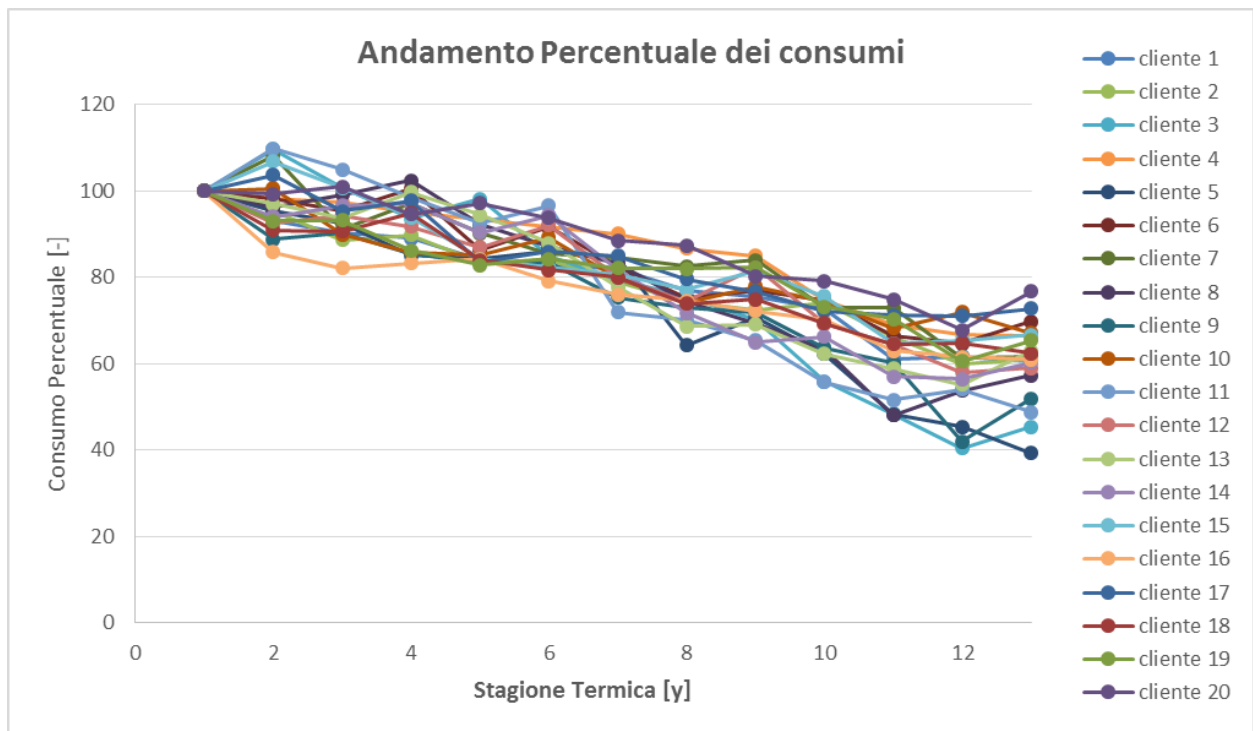


Figura 38: Trend percentuale dei consumi termici delle sottostazioni selezionate

Applicando la stessa procedura di analisi su base mensile, i parametri risultano peggiori (Figura 39) rispetto a quelli precedentemente calcolati (Figura 36), motivo per cui si è deciso di effettuare la selezione solo in base ai valori di correlazione e pendenza calcolati su stagioni termiche.

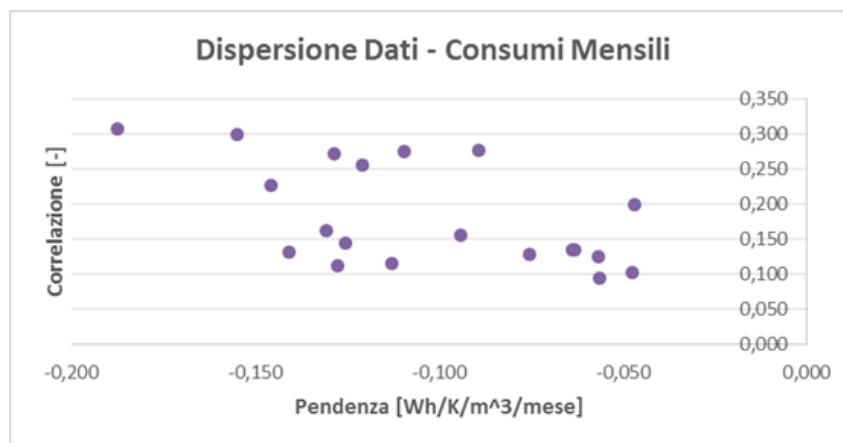


Figura 39: Correlazione e pendenza su base mensile, per le sottostazioni selezionate

Ciò conferma l'esattezza dell'assunzione fatta in fase di normalizzazione riguardo la scelta dell'intervallo temporale di riferimento.

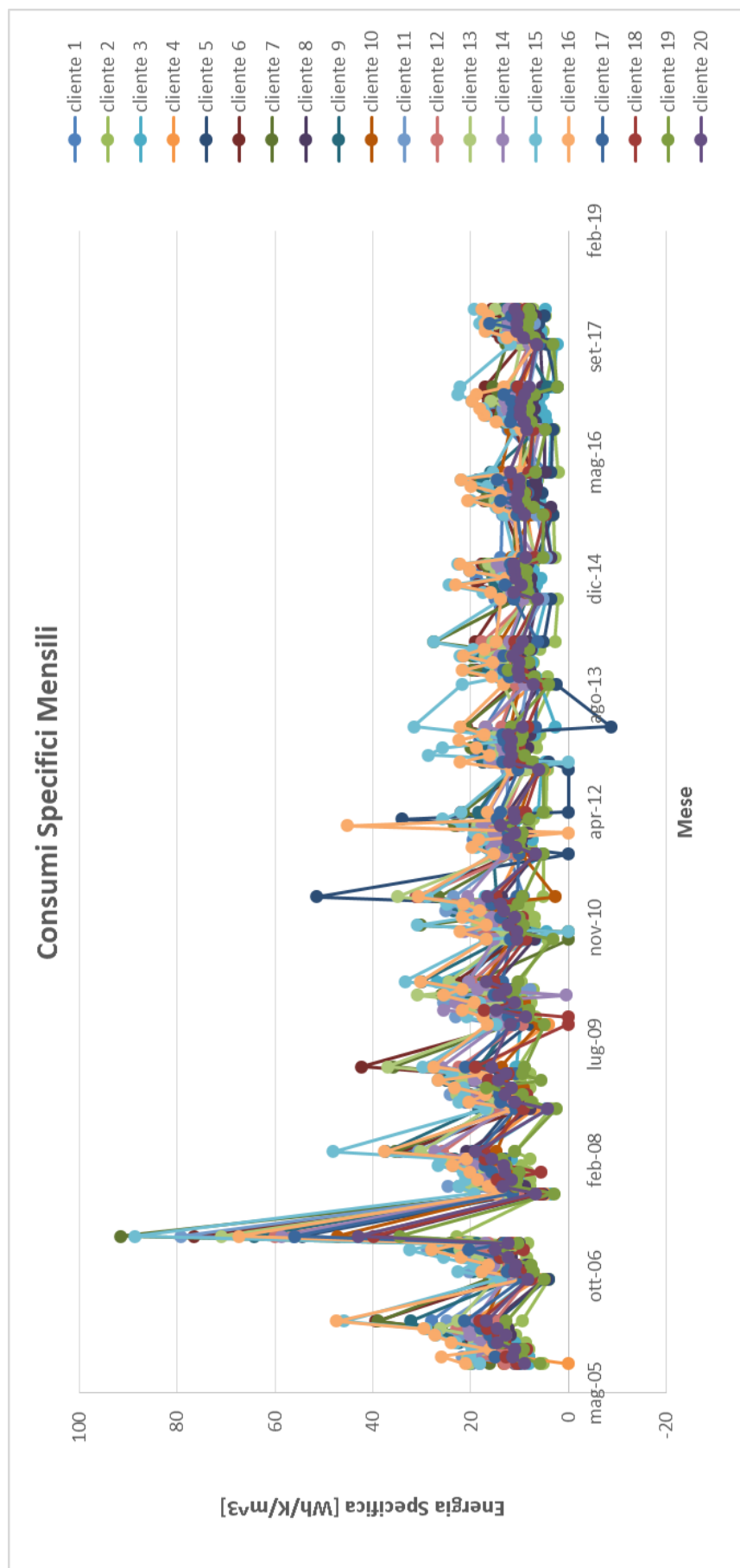


Figura 40: Serie storiche dei consumi termici mensili delle sottostazioni selezionate

Infine, si è verificato che la disposizione spaziale di queste sottostazioni sia abbastanza varia, in modo da escludere fenomeni di disturbo strettamente legati alla zona della città.

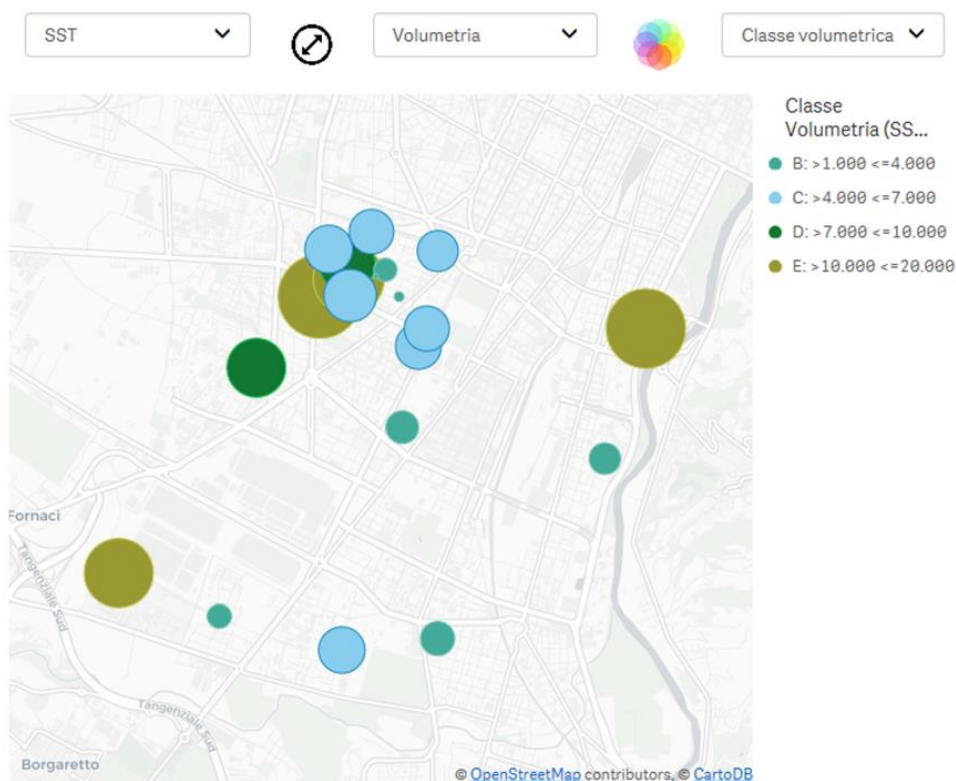


Figura 41: Disposizione delle sottostazioni selezionate, differenziate per volumetria

A queste sottostazioni sono legati diversi tipi di impianto secondario di riscaldamento (pannelli, radiatori e termoconvettori) e diverse marche di contatori di calore (Cazzaniga, Arcaterm, Kamstrup). Inoltre, da una osservazione di massima su Google Earth (foto risalenti alla fine del 2017), i palazzi relativi alle suddette sottostazioni sembrano essere per la maggior parte di vecchia costruzione e senza interventi di ristrutturazione dell'involucro (si notano infissi originali). Questo avalla l'idea di una riduzione dei consumi indipendente dall'efficientamento energetico.

Partendo, quindi, da una caratterizzazione che lega i consumi al tempo, si è fatta una selezione dei contatori di energia in cui si ritiene più probabile l'esistenza di una deriva della misura, al fine di approfondire la ricerca attraverso ulteriori analisi sia teoriche che di verifica sperimentale.

6.3.2 Approfondimento: Valutazione criterio di selezione su stagione ridotta

Lo stesso tipo di analisi del paragrafo 6.3.1 Consumi in funzione del tempo è stato svolto considerando una *stagione termica ridotta* da novembre a marzo, in modo da tagliare tutte quelle fluttuazioni dovute ai ritardi di accensione/spegnimento presenti ad aprile ed ottobre e quindi anche al peso dei relativi gradi giorno.

Partendo dalle 1077 sottostazioni filtrate, si procede al calcolo della retta di regressione e dei relativi parametri su base “stagionale” e mensile.

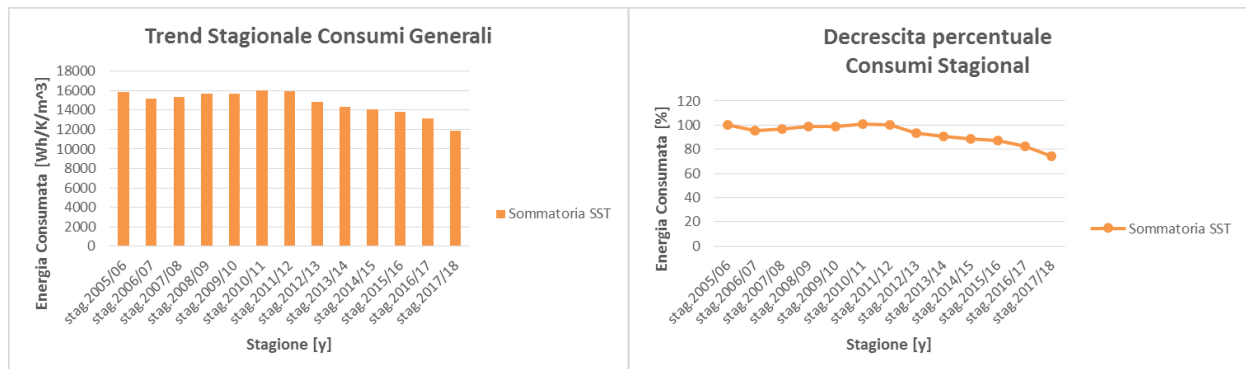


Figura 42: Andamento generale consumi per stagioni termiche ridotte (5 mesi)

In questo caso i consumi totali mostrano una riduzione media del 25%.

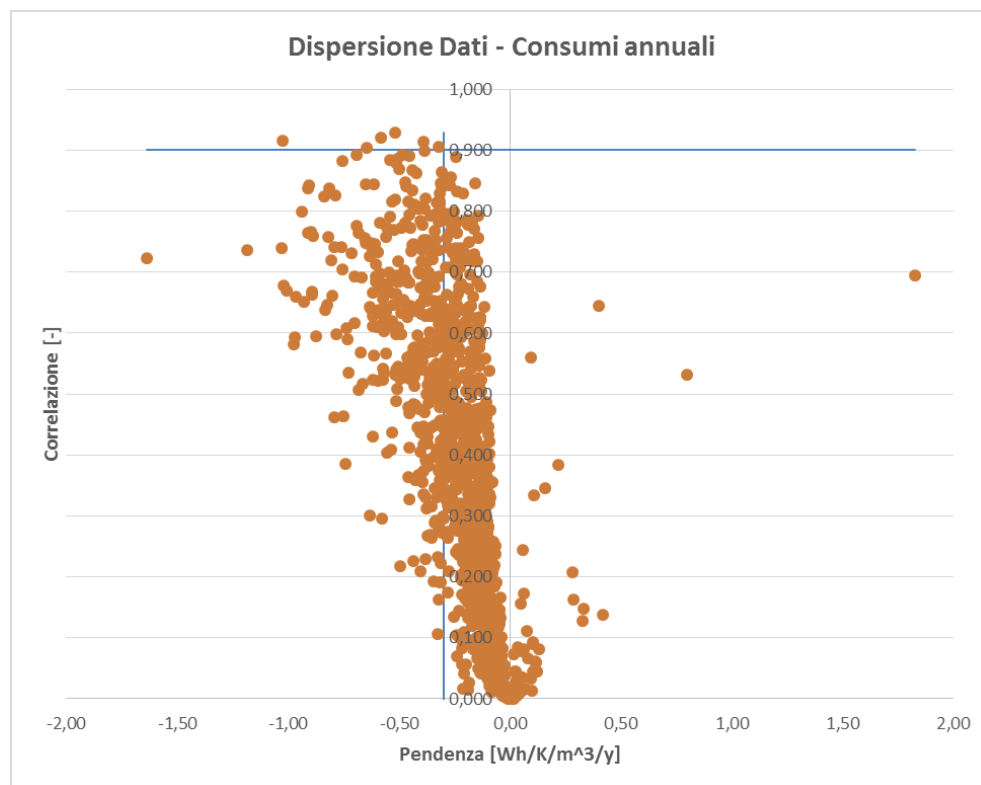


Figura 43: Dispersione dati analizzando stagioni termiche ridotte

Confrontando i punti di dispersione tra il caso a 7 mesi (Figura 35) e quello a 5 mesi, questi ultimi risultano avere in media valori di correlazione e pendenza leggermente minori. Ciò dimostra che, in questo caso, l'idea di escludere ottobre ed aprile per rendere i dati più stabili non è esatta, anzi, per via della riduzione del numero di dati, si ha un

peggioramento delle condizioni. Infatti questa volta le sottostazioni in grado di soddisfare i requisiti di correlazione $>0,9$ e pendenza $<-0,3$ o $>0,3$ sono solamente 6, mentre nel caso a 7 mesi erano ben 20. Si imposta, allora, un nuovo limite minimo di correlazione ad un valore arbitrario pari a $0,85$, in modo da trovare un numero maggiore di sottostazioni (18).

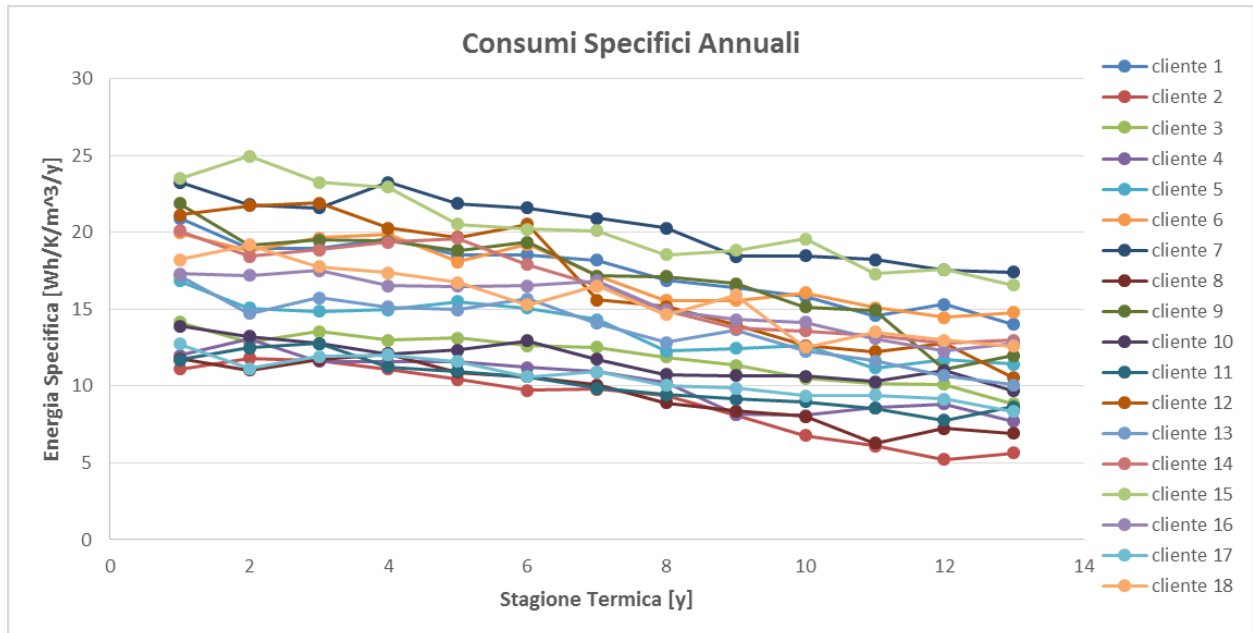


Figura 44: Serie storiche dei consumi termici annuali delle sottostazioni selezionate (5 mesi)

Sviluppando l'analisi a livello mensile, si ha invece un netto miglioramento del coefficiente di determinazione (Figura 45) rispetto allo studio effettuato su 7 mesi (Figura 39).

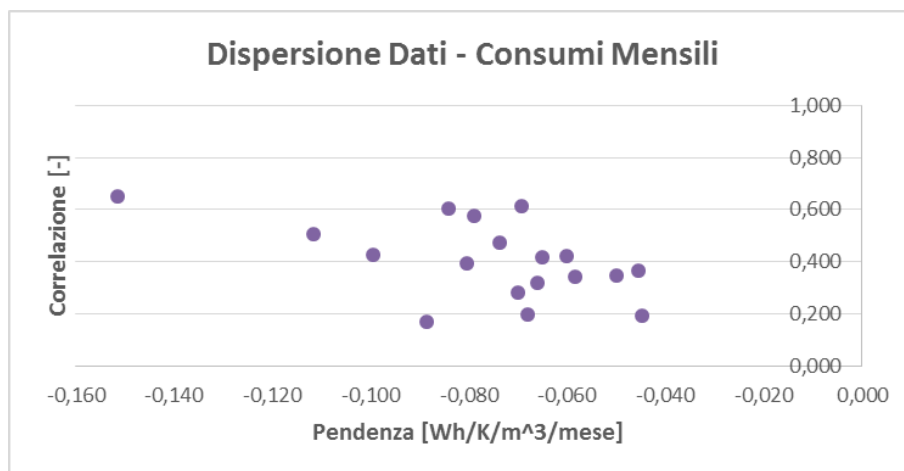


Figura 45: Correlazione-pendenza dei consumi mensili per stagioni termiche ridotte

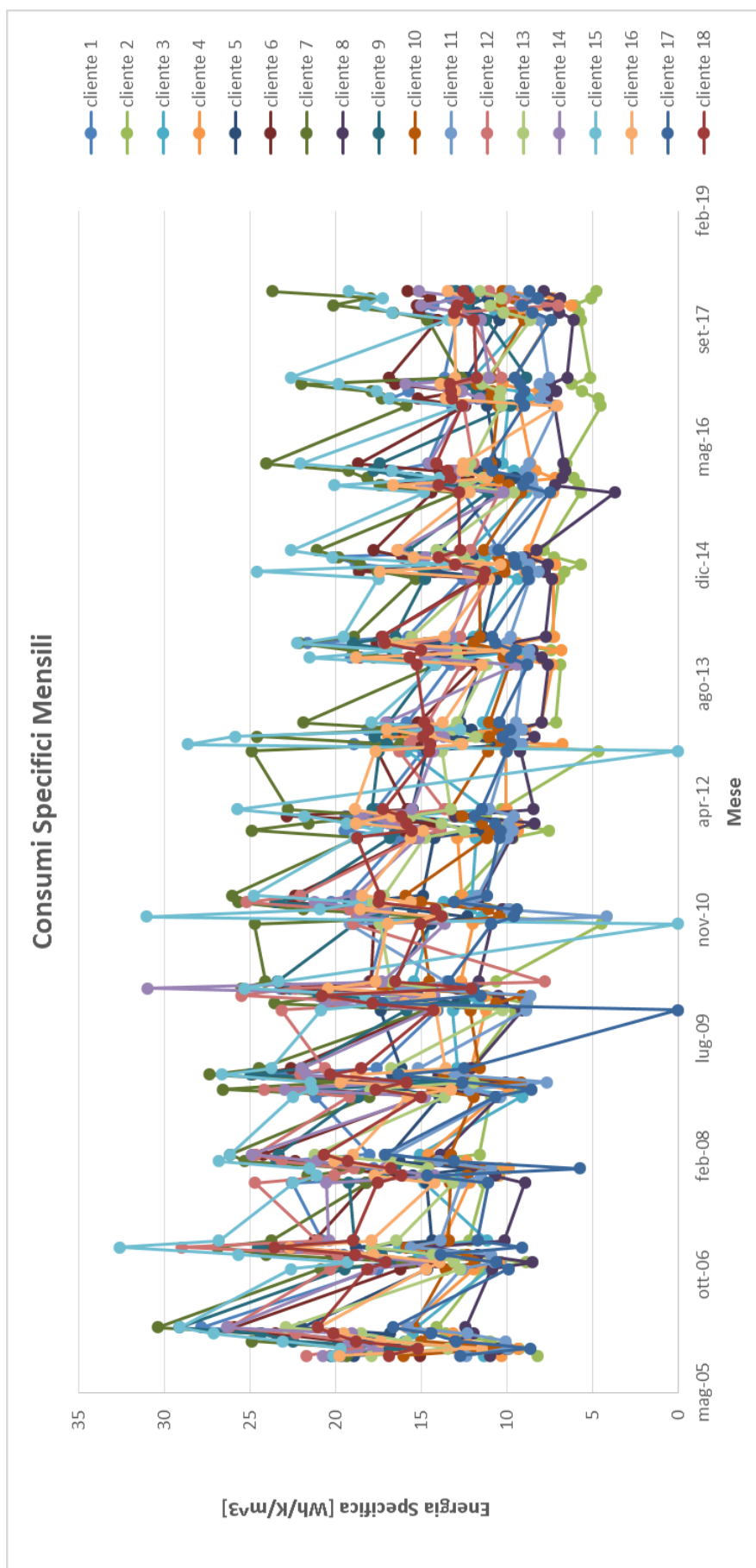


Figura 46: Serie storiche dei consumi termici mensili delle sottostazioni selezionate (5 mesi)

Confrontando le sottostazioni selezionate nelle analisi dei consumi a cinque ed a sette mesi, dodici risultano le stesse.

Tra le due tipologie, il metodo scelto è quello che si basa sui calcoli effettuati sull'intera stagione termica (7 mesi). Esso, infatti, a meno dei fenomeni di sporcamento dovuti alla variabilità delle date di accensione/spegnimento degli impianti, riporta dei consumi più precisi e l'incidenza della singola misura influisce di meno.

Ciò conferma ancora una volta l'esattezza dell'assunzione fatta in fase di normalizzazione riguardo la scelta dell'intervallo temporale di riferimento.

6.3.3 Approfondimento: Ricerca della deriva per marca dei contatori

Ci si è chiesto se la marca del contatore potesse essere una discriminante nella ricerca della deriva, ma l'analisi non ha mostrato alcuna evidenza.

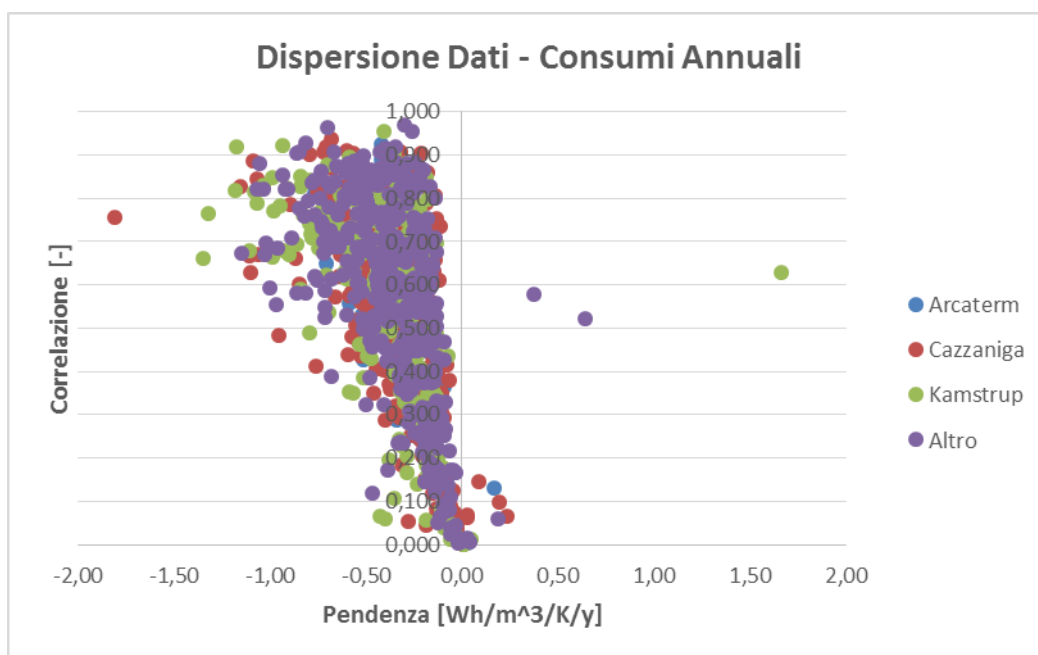


Figura 47: Correlazione e pendenza per ogni sottostazione, distinte per marca

La distribuzione dei dati risulta simile per tutte le marche di contatori: non verranno quindi effettuate analisi separando per marca i misuratori.

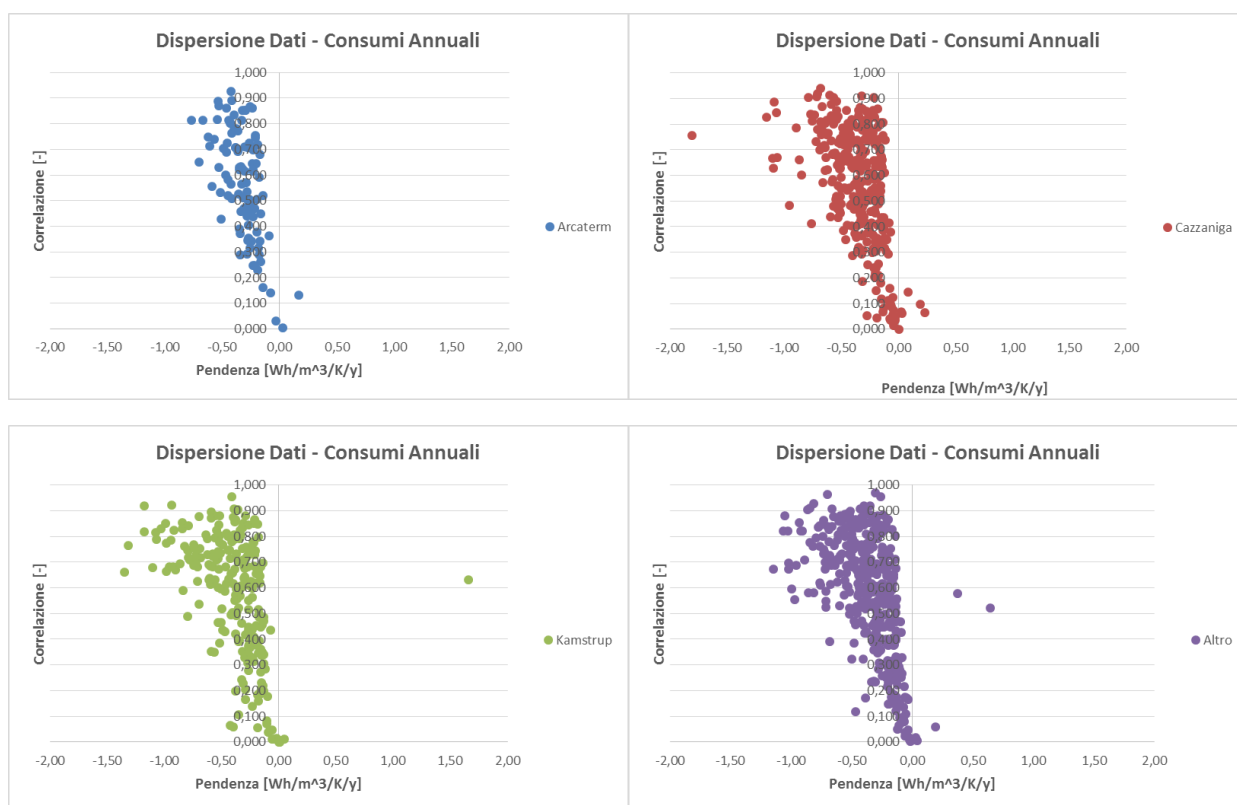


Figura 48: Correlazione e pendenza per ogni sottostazione, per ciascuna marca

6.3.4 Approfondimento: Comparazione curve a diversa correlazione-pendenza

In riferimento a Figura 32, si vogliono confrontare tre sottostazioni per avere un'idea qualitativa dei diversi comportamenti dei relativi consumi, differenti per valori di pendenza e correlazione.

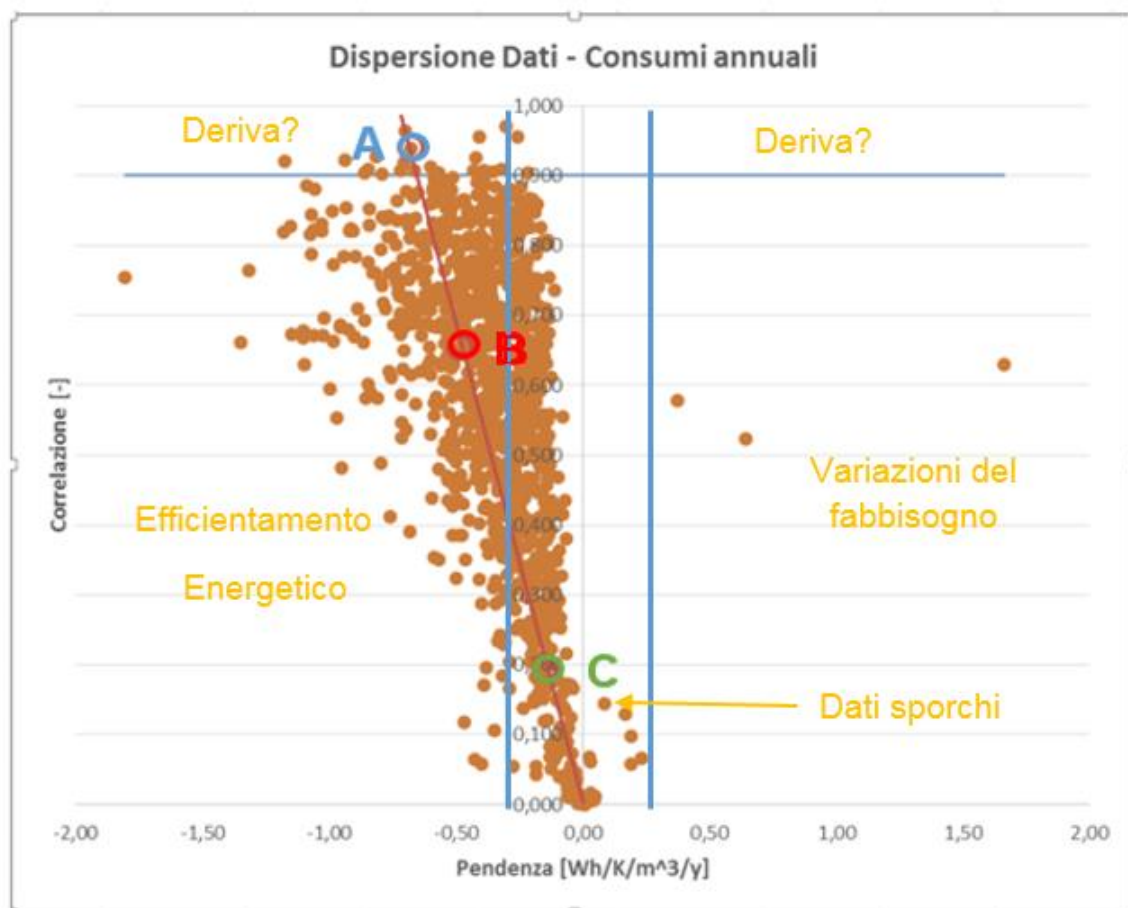
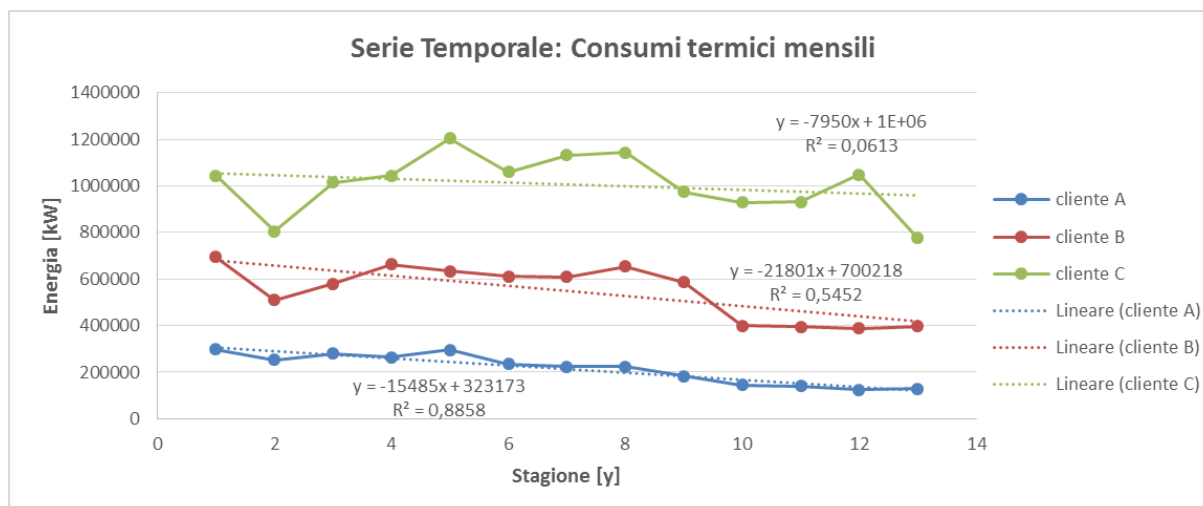


Figura 49: Selezione di tre sottostazioni con correlazione e pendenza diverse

Lo stesso grafico, è stato proposto in tre versioni differenti considerando rispettivamente: i consumi termici grezzi, i consumi termici normalizzati per volumetria ed infine i consumi termici normalizzati sia per volumetria che per gradi giorno.



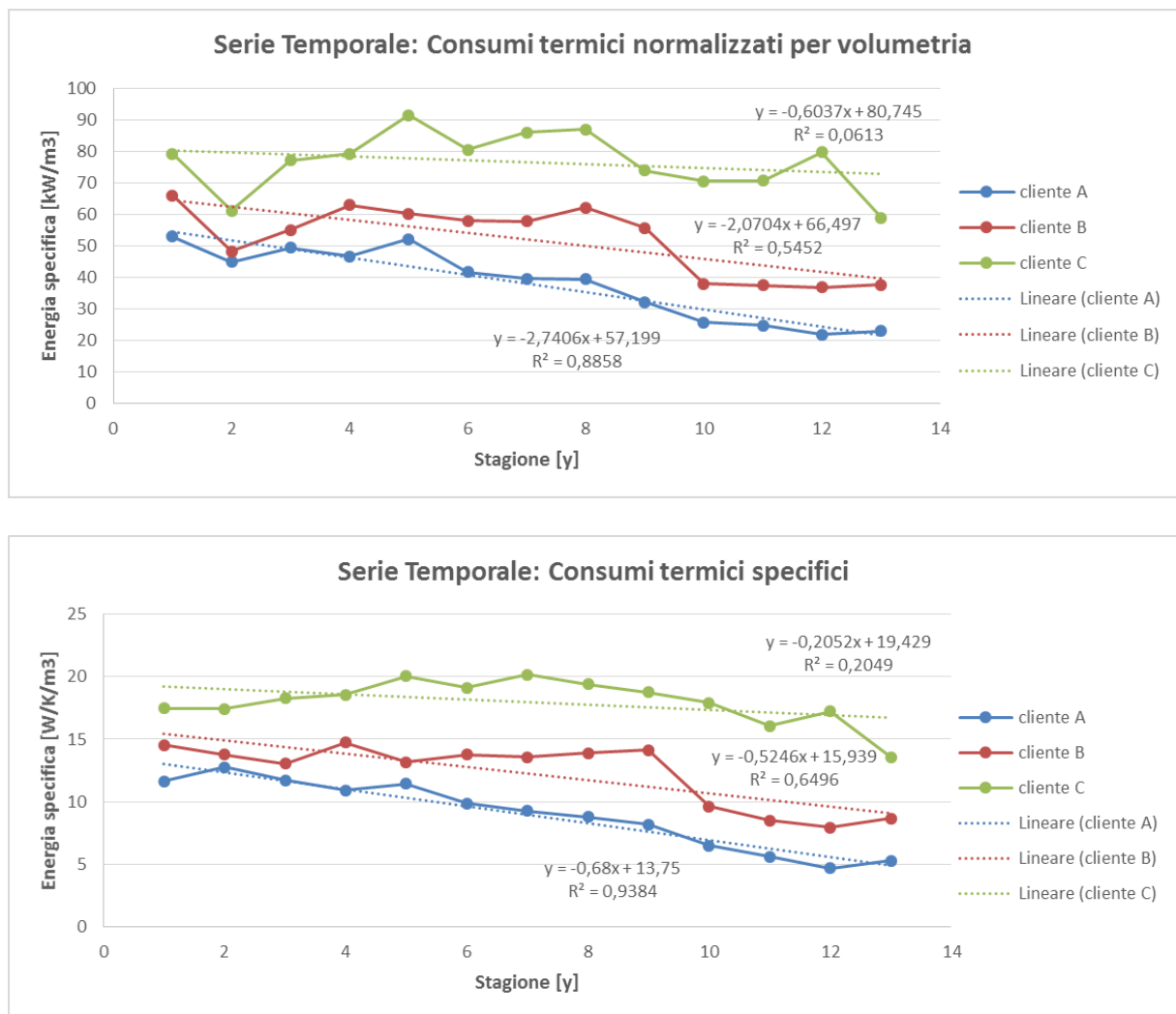


Figura 50: Confronto tra 3 sottostazioni a differente correlazione e pendenza

Come ipotizzato in Figura 34, si vede che:

- la curva blu (cliente A) presenta un elevato grado di aderenza alla retta di regressione, essendo quasi tutti i punti allineati sulla linea di tendenza, e permette di vedere un marcato trend dei consumi nel quale si possono ricercare effetti legati alla deriva;
- la curva rossa (cliente B) mostra un comportamento meno regolare ma soprattutto un “gradino” tra la stagione 9 e 10, per il quale è possibile ipotizzare efficientamento energetico, data la diminuzione netta dei consumi;
- la curva verde (cliente C) ha una varianza più elevata rispetto alle altre ed il trend è meno marcato, in quanto la pendenza ha modulo minore.

Le ipotesi effettuate durante la costruzione del modello di selezione dei contatori risultano quindi verificate in questa analisi, effettuata su tre campioni scelti in maniera casuale.

6.4 Discriminazione edifici efficientati

Nei paragrafi seguenti verrà valutato il comportamento delle singole sottostazioni in funzione dei gradi-giorno e non più rispetto al tempo, al fine di individuare e studiare eventuali cambiamenti della firma energetica.

Viene infatti proposta una metodologia per esaminare il comportamento delle sottostazioni con consumi caratterizzati da basso coefficiente di determinazione (R^2), in modo da poter rieffettuare le selezioni descritte nel paragrafo 6.3.1 Consumi in funzione del tempo escludendo o separando i periodi relativi al cambiamento strutturale.

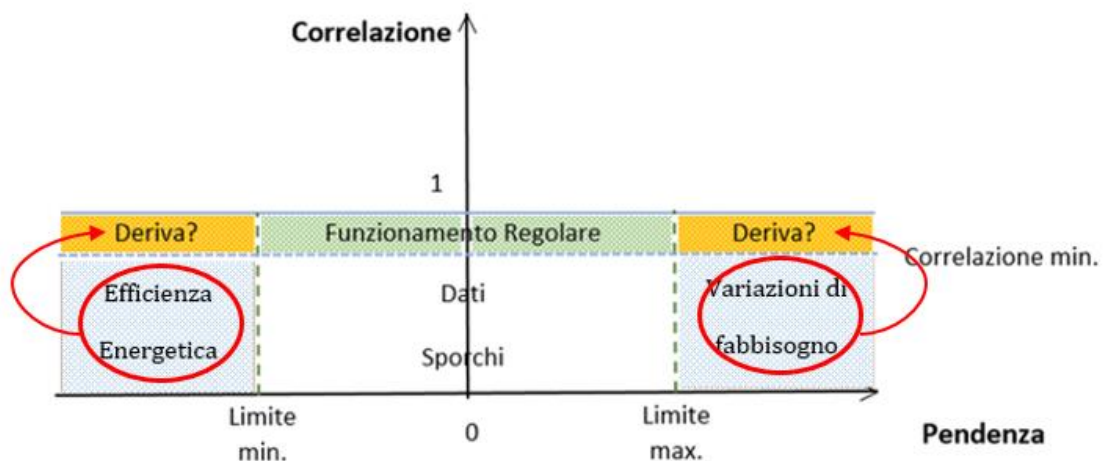


Figura 51: Discriminazione edifici efficientati - Obiettivo

Si vogliono ricondurre, quindi, i casi classificati come “*efficienza energetica*” o “*variazione del fabbisogno*” a casi con più alta correlazione e pendenza in cui andare a ricercare eventuali fenomeni di “*deriva*”.

Segue un esempio qualitativo, su cui non è stato effettuato alcuno studio preventivo con il CUSUM e sul quale quindi non si hanno certezze statistiche, ma che permette di avere un’idea del procedimento proposto:

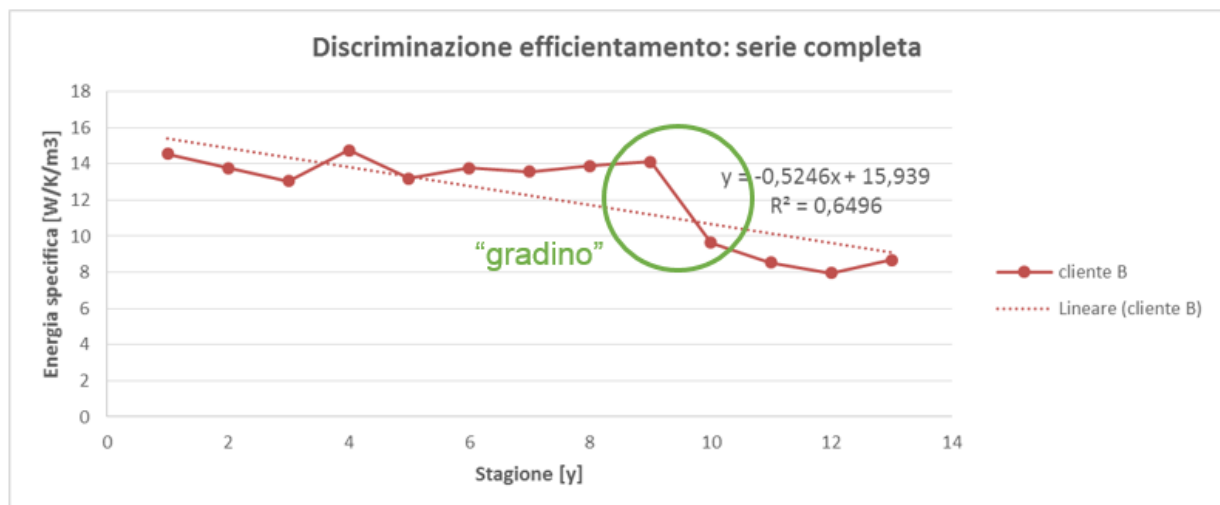


Figura 52: Discriminazione edifici efficientati – Serie temporale completa

In questo caso, la serie classificata come “efficienza energetica” nel paragrafo 6.3.4 è stata divisa in corrispondenza del gradino, generando due curve differenti.

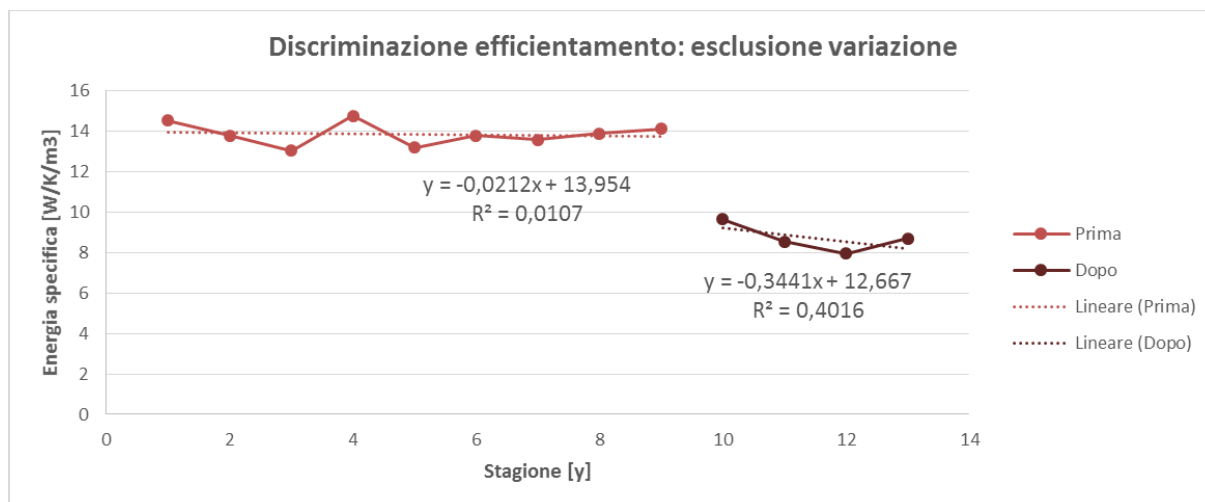


Figura 53: Discriminazione edifici efficientati – Divisione della serie intorno alla variazione

Il secondo periodo è stato poi traslato in modo da creare continuità tra le due curve.

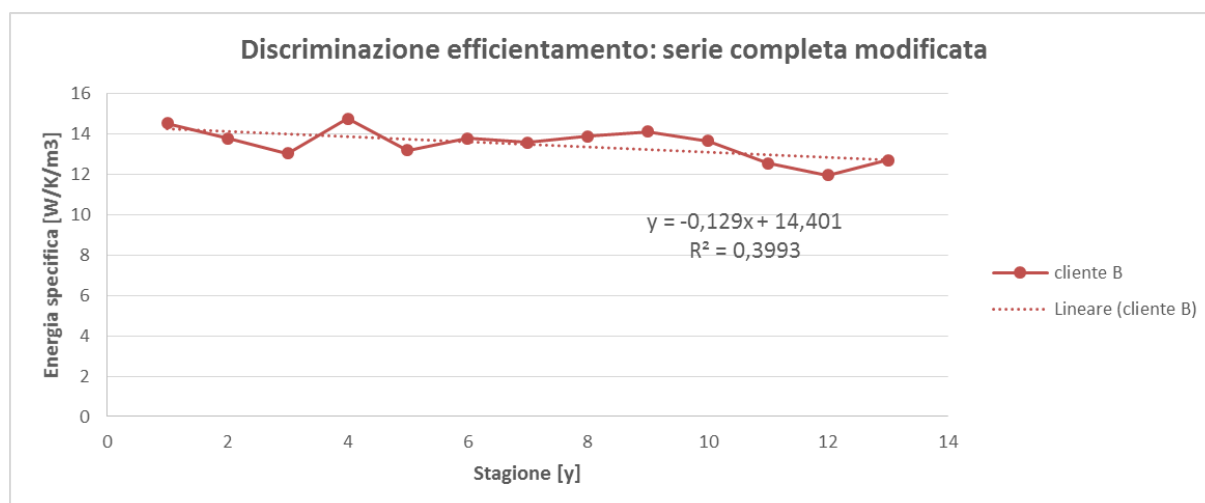


Figura 54: Discriminazione edifici efficientati – Serie temporale completa modificata

La serie è ora classificabile, secondo lo schema qualitativo prima descritto, come un caso con “*dati sporchi*”: rimarrà quindi esclusa dalla selezione delle sottostazioni con probabile deriva strumentale.

6.4.1 Ricerca della variazione nei sistemi

I possibili scenari di andamento dei consumi in funzione dei gradi-giorno sono 4:

- legame lineare ed intercetta positiva: l'intercetta mette in evidenza un consumo non legato ai GG come per la produzione di acqua calda sanitaria (ACS);

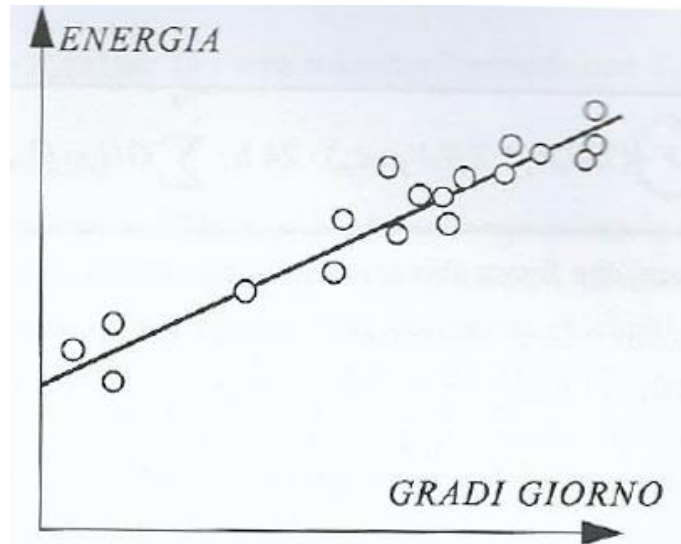


Figura 55: Legame lineare tra energia termica e gradi giorno con intercetta positiva [26]

- legame lineare ed intercetta negativa: l'energia non è richiesta finché la temperatura esterna scende al di sotto di un certo livello di GG;

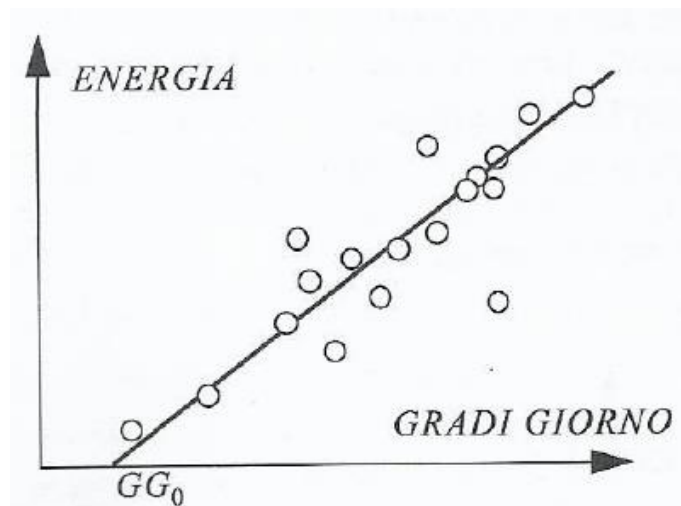


Figura 56: Legame lineare tra energia termica e gradi giorno con intercetta negativa [26]

- legame non lineare con pendenza positiva decrescente: il sistema non è in grado di produrre calore oltre un certo valore;

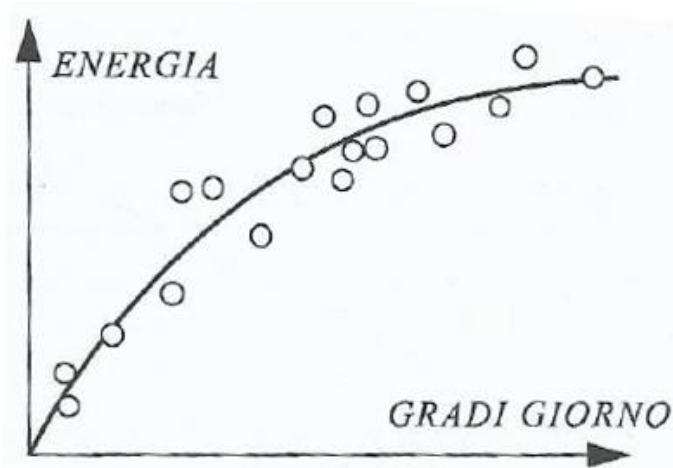


Figura 57: Legame non lineare tra energia termica e gradi giorno con pendenza crescente [26]

- legame non lineare con pendenza positiva crescente: caso di edifici con elevata altezza interna, in cui è presente una stratificazione termica, e con elevate superfici vetrate.

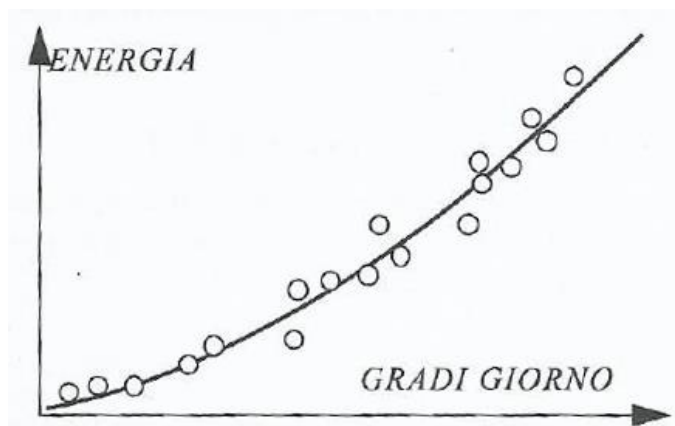


Figura 58: Legame non lineare tra energia termica e gradi giorno con pendenza decrescente [26]

Il caso più frequente è quello di andamento lineare con termine noto negativo (Figura 56) che, nel caso specifico del riscaldamento domestico, può essere formulato come:

$$E_{th} = A * GG - \frac{Q_{sole} + Q_{int}}{\eta}$$

Nella figura che segue è possibile vedere un esempio di retta di regressione calcolata sui consumi mensili di una sottostazione in funzione dei gradi giorno.

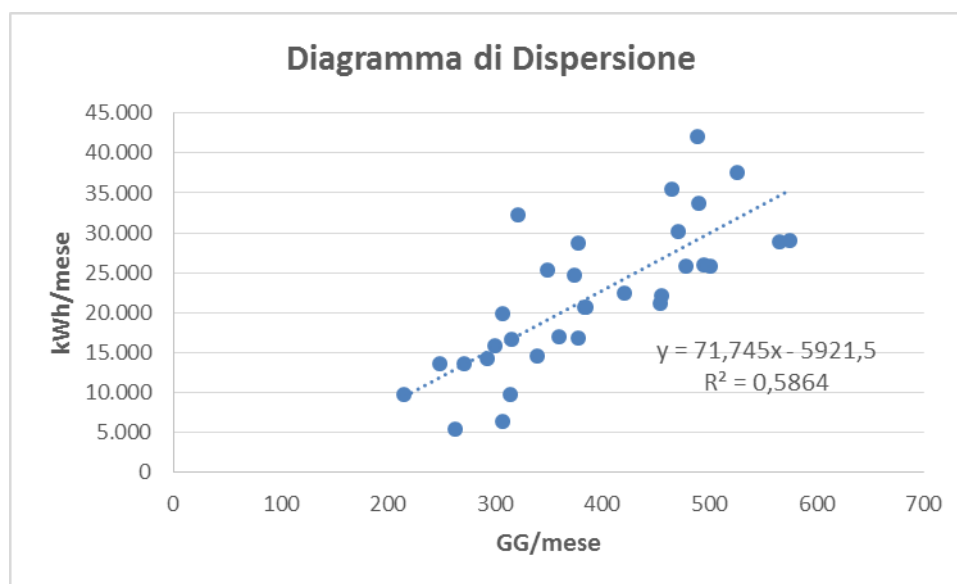


Figura 59: Legame tra energia consumata e GG per una sottostazione

Attraverso la pendenza della curva si può conoscere l'efficienza del processo: una maggiore pendenza corrisponde ad una minore efficienza, ovvero a consumi più elevati, viceversa per valori più piccoli del coefficiente angolare si hanno consumi minori. [26]

Questo ragionamento può essere chiarito meglio da Figura 60 in cui si evidenzia, per il mese di gennaio di due anni diversi, la quota della variazione legata "all'innovazione", ovvero ad un efficientamento del sistema, e la quota legata alle diverse condizioni ambientali esterne.

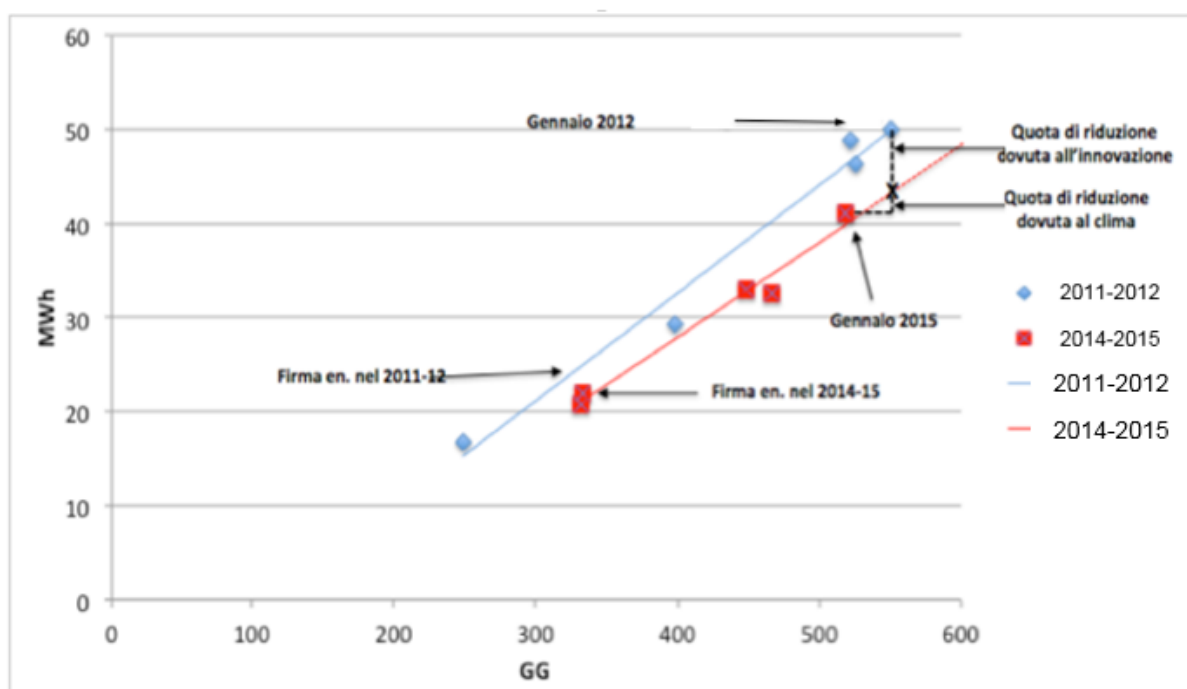


Figura 60: Valutazione degli effetti dovuti al clima e degli effetti dovuti alla modifica della firma. [27]

I requisiti per avere una buona caratterizzazione energetica sono:

- *stabilità*: i coefficienti della curva di regressione non cambiano nel tempo;
- *attualità*: far riferimento al periodo più recente, in cui il sistema è stabile.

Una tecnica usata per aumentare la precisione e l'affidabilità della caratterizzazione è quella del CUSUM o delle *somme cumulate dei residui*.

Proprietà del CUSUM è la conservazione in memoria di tutti i punti della serie temporale dei residui, ovvero degli scarti tra i valori di consumo effettivi ed i valori previsti, assunti come variabile di qualità. Tali residui saranno caratterizzati da un valor medio nullo e da una certa varianza fintanto che il processo è in controllo, cioè la curva di regressione è stabile, mentre nel momento in cui assumeranno ripetutamente valori di un solo segno, la somma cumulata devierà indicando una possibile variazione del modello. Si può immaginare, quindi, il diagramma CUSUM come una linea spezzata composta da segmenti i cui vertici sono posti in corrispondenza delle variazioni di pendenza (Figura 63).

L'obiettivo dell'analisi è individuare cause assegnabili (sistematiche) che ne giustifichino la deviazione, dopo aver verificato che ogni serie è in maniera significativa diversa (in media o varianza) da quella seguente. Può accadere, infatti, che la variazione riscontrata sia contenuta all'interno del range di variazione naturale dei dati e sia quindi dovuta al caso. [26]

Presa come esempio una generica sottostazione, verrà portata avanti un'analisi statistica dei suoi dati di consumo storici ed indicata la procedura di costruzione del CUSUM. L'andamento della serie storica del fabbisogno termico mensile della sottostazione è riportato nel grafico sottostante: esso presenta un trend di fondo decrescente con forti oscillazioni stagionali.

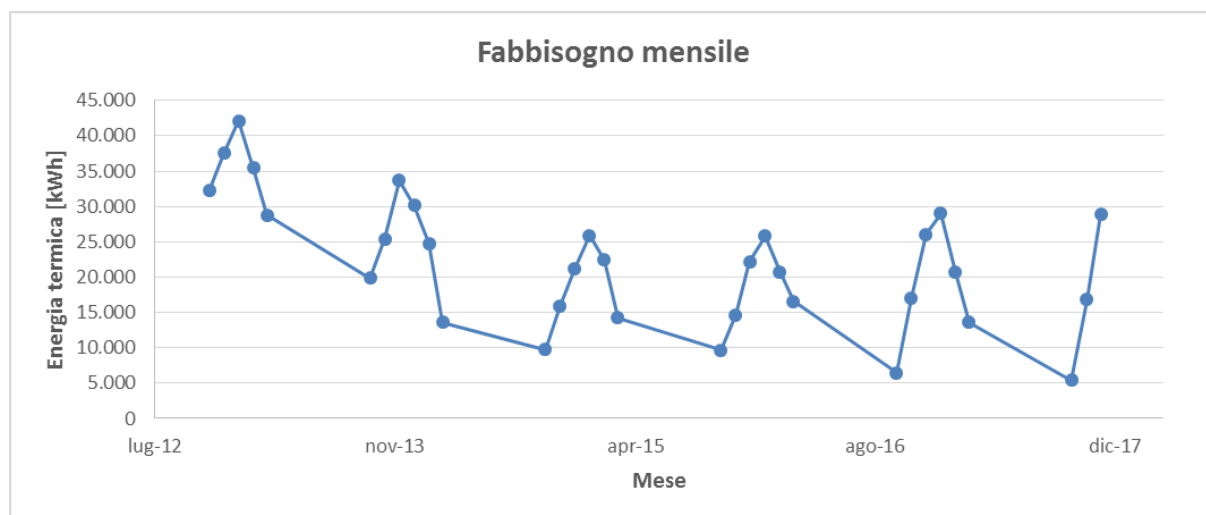


Figura 61: Serie storica dei consumi termici mensili

Per vedere il comportamento qualitativo delle variabili, le si può plottare in un diagramma di dispersione: il consumo di energia termica rappresenta la variabile dipendente dai gradi giorno, entrambi misurati su base mensile.

Nello stesso grafico, si può vedere anche la retta di regressione (*equazione di best fit*) calcolata sui dati mensili compresi tra novembre 2012 e dicembre 2017. Il coefficiente di

correlazione non è ottimale in quanto il suo valore si discosta di molto dall'unità ($R^2=0,5864$).

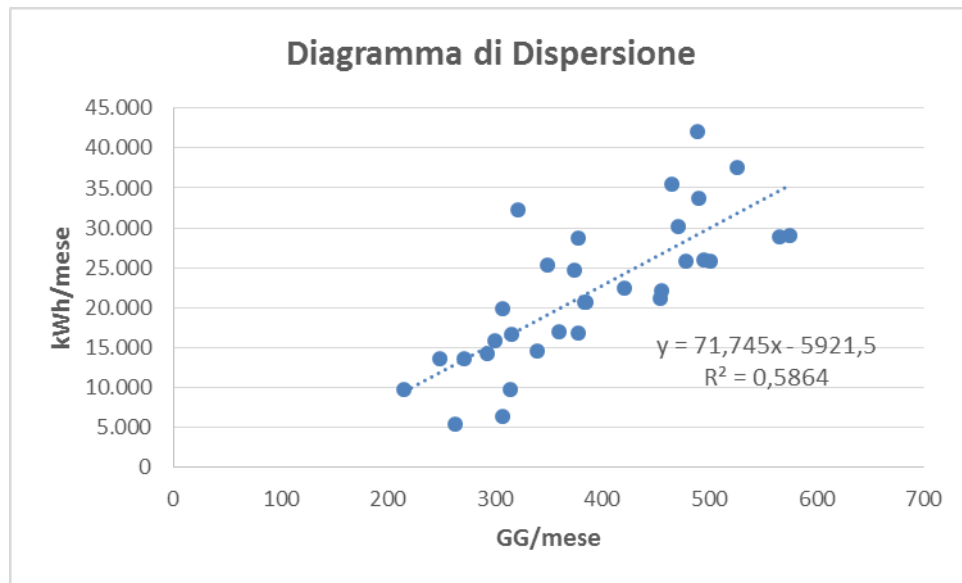


Figura 62: Diagramma di dispersione dei consumi termici mensili in funzione dei GG

A questo punto, è possibile procedere con la costruzione del diagramma CUSUM:

1. calcolo della retta di regressione su tutti i mesi, applicando il metodo dei minimi quadrati (vedi Figura 62);
2. calcolo del consumo previsto, attraverso l'equazione, per ogni mese i ;

$$E_{th,prevista,i} = A * GG_i - costante$$

3. calcolo della differenza tra i consumi effettivi e quelli previsti per ogni mese i ;

$$e_i = E_{th,consumata,i} - E_{th,prevista,i}$$

4. calcolo della cumulata nel tempo delle differenze tra i consumi effettivi e quelli previsti per ogni punto;

$$CUSUM = \sum_{i=1}^{n. mesi} e_i$$

5. diagramma della somma cumulata dei residui in funzione del tempo (Figura 63). [26]

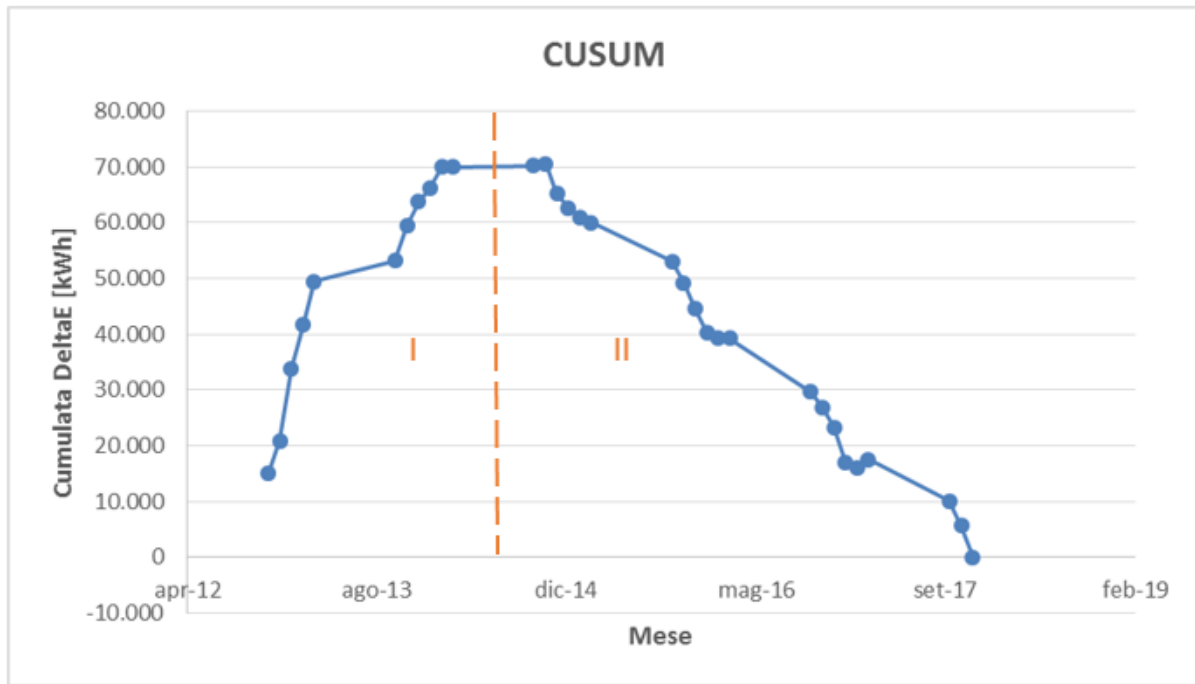


Figura 63: diagramma della somma cumulata dei residui in funzione del tempo

I tratti orizzontali corrispondono a mesi di funzionamento regolare, in cui il comportamento del sistema è aderente alla caratterizzazione.

Dal grafico emergono due possibili modelli:

- I. crescente da novembre 2012 a marzo 2014,
- II. decrescente da aprile 2014 a dicembre 2017.

Prima di poter asserire che sono diversi, però, sarà necessario verificare la media (attraverso i residui medi) e la varianza (attraverso le deviazioni standard) nei due periodi ed effettuare dei test d'ipotesi, assumendo un livello di significatività dei test del 95% (ovvero lasciando un margine di errore α del 5%).

Si ipotizza, inoltre, una distribuzione normale (gaussiana) dei residui.

Le medie dei residui nei due periodi risultano:

$$\bar{e}_I = \frac{\sum_{i=1}^{11} e_i}{n_I} = 6360,4 \frac{kWh}{mese}$$

$$\bar{e}_{II} = \frac{\sum_{i=12}^{32} e_i}{n_{II}} = -3331,7 \frac{kWh}{mese}$$

Le deviazioni standard:

$$s_I = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{11} (e_i - \bar{e}_I)^2}{n_I - 2}} = \sqrt{\frac{197.811.170}{11 - 2}} = 4688,2 kWh$$

$$s_{II} = \sqrt{\frac{\sum_{i=12}^{32} (e_i - \bar{e}_{II})^2}{n_{II} - 2}} = \sqrt{\frac{197.811.170}{21 - 2}} = 3030,3 kWh$$

Condizione sufficiente per concludere che si sia verificato un cambiamento è che le due popolazioni di dati presentino varianze (s_I^2 ed s_{II}^2) “diverse”: come regola pratica si considerano diverse se una è maggiore del doppio dell'altra, ovvero se F_{calc} è maggiore di due (metodo chiamato *test F*).

Il rapporto tra le due varianze risulta:

$$F_{calc} = \frac{s_I^2}{s_{II}^2} = 2.4$$

In questo caso, quindi, essendo le varianze *significativamente* diverse, si può affermare che tra le due serie di dati è avvenuto un cambiamento del modello.

Nel caso in cui F_{calc} fosse stato minore di 2, invece, si sarebbe dovuta approfondire l'analisi valutando l'uguaglianza delle medie attraverso il *test Student t* (tipologia di test scelta per via dell'esiguità del numero di dati). Il valore della *statistica test*, detto t_{calc} , si calcola attraverso l'equazione:

$$t_{calc} = \frac{\bar{e}_I - \bar{e}_{II}}{s * \sqrt{\frac{1}{n_I} + \frac{1}{n_{II}}}} = 7,14$$

Dove s è la stima della deviazione standard σ (incognita):

$$s = \sqrt{\frac{(n_I - 2) * s_I^2 + (n_{II} - 2) * s_{II}^2}{n_I + n_{II} - 4}} = 3646.3$$

Il parametro t_{calc} è una particolare determinazione di una variabile casuale che segue la *distribuzione t* di Student con n_1+n_2-4 gradi di libertà, essendo n_1 ed n_2 il numero di osservazioni (ovvero di dati) relative a ciascun periodo in esame.

Le medie possono essere considerate significativamente differenti se il parametro t_{calc} ha un valore di modulo maggiore rispetto a quello limite, ricavato dalla specifica tavola cumulativa. [26]

$$|t_{lim}| = t_{1-\frac{\alpha}{2}}(n_I + n_{II} - 4) = t_{0.975}(28) = 2.048$$

$$t_{calc} = 7,14 > |t_{lim}| = 2.048$$

In questo caso anche le medie risultano differenti.

Verificate numericamente le differenze tra i vari parametri, si può effettuare una decisione statistica: gli effetti osservati non sono dovuti al caso ma si ha un cambiamento strutturale del sistema e quindi dell'equazione della retta di caratterizzazione. I consumi dell'edificio dopo marzo 2014 sono quindi cambiati in maniera significativa e ciò può essere dovuto ad importanti interventi con efficientamento energetico oppure ad una diversa gestione dell'immobile, magari accompagnata dall'introduzione di valvole termostatiche.

La serie risulta così composta da due periodi distinti: si sostituisce la caratteristica iniziale con due nuove rette di regressione, ciascuna relativa ad un singolo periodo.

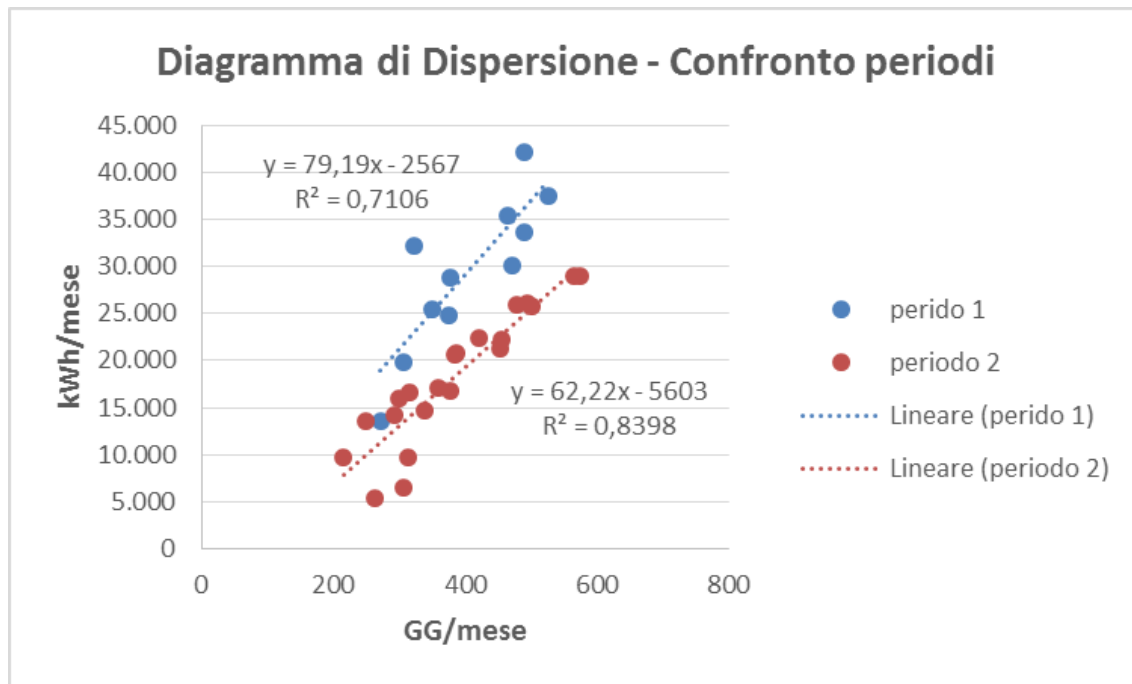


Figura 64: Confronto tra le rette di regressione dei due periodi trovati

Come si vede dal diagramma CUSUM e dal diagramma di dispersione che mette a confronto le due rette di regressione, il secondo periodo è più efficiente del primo e mostra un miglioramento sotto tutti i punti di vista, ovvero in termini di pendenza, quota fissa e correlazione tra i dati.

L'equazione di regressione del periodo più attuale, nonché più stabile, diventerà il nuovo trend di riferimento (*periodo di set up*) per la fase successiva di previsione (*periodo di monitoraggio*) dei consumi futuri. Si potrà così mostrare anche quanta energia è stata risparmiata o consumata in più nel tempo a partire da un dato evento o cambiamento nel processo. [26]

Questo approccio permette quindi di evidenziare cambiamenti strutturali nel modo di consumare energia delle sottostazioni ma non di distinguere eventuali fenomeni di deriva della misura, caratterizzati da un peggioramento lento e continuo delle prestazioni, con variazioni percentuali dei valori registrati molto piccole.

6.5 Sostituzione del contatore

Di seguito è stata proposta l'analisi statistica di una selezione di sottostazioni i cui contatori sono stati sostituiti nel 2015, al fine di valutare la differenza tra la misura dei consumi prima e dopo la sostituzione stessa. L'idea di base è la stessa di quella presentata nel paragrafo 6.4 Discriminazione edifici efficientati, solo che questa volta interessa solamente confrontare i due periodi per ricercare la deriva.

Il problema verrà approcciato con la caratterizzazione energetica dei due periodi mediante regressione lineare: verranno quindi valutati i parametri delle rette di regressione prima e dopo la sostituzione del contatore, per cercare eventuali differenze attribuibili a deriva della misura nel tempo.

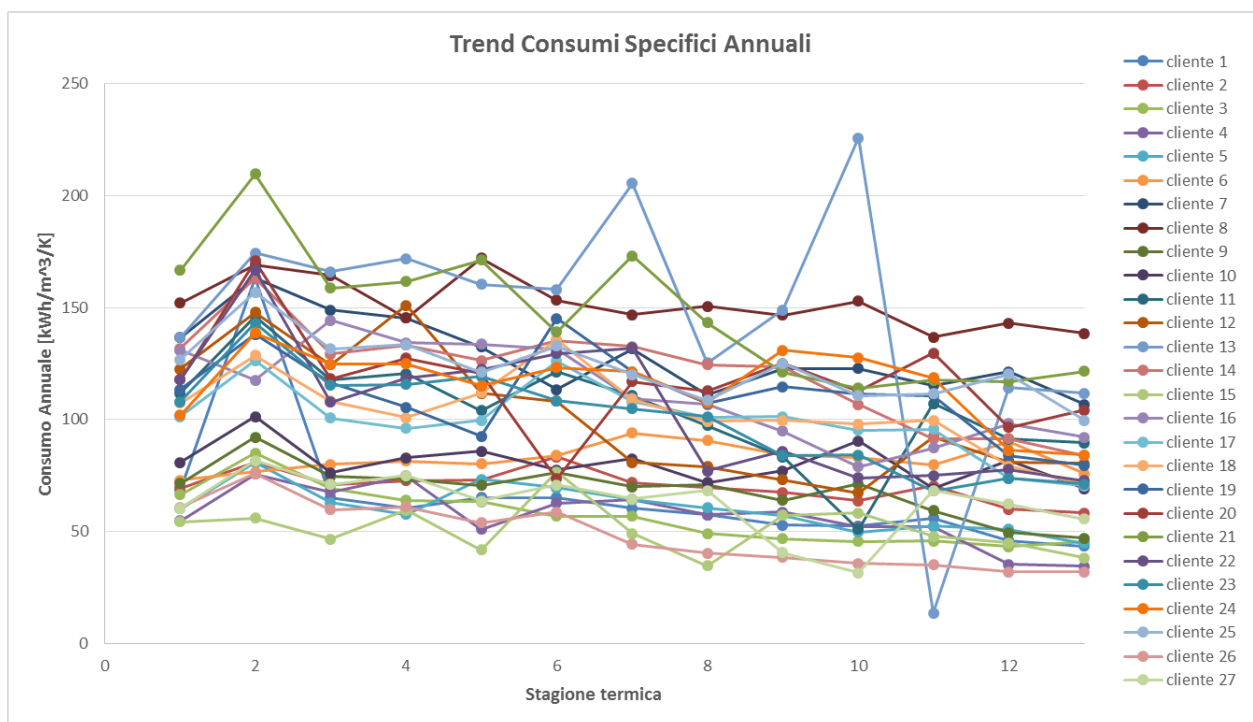


Figura 65: Serie storiche dei consumi annuali dei contatori sostituiti nel 2015

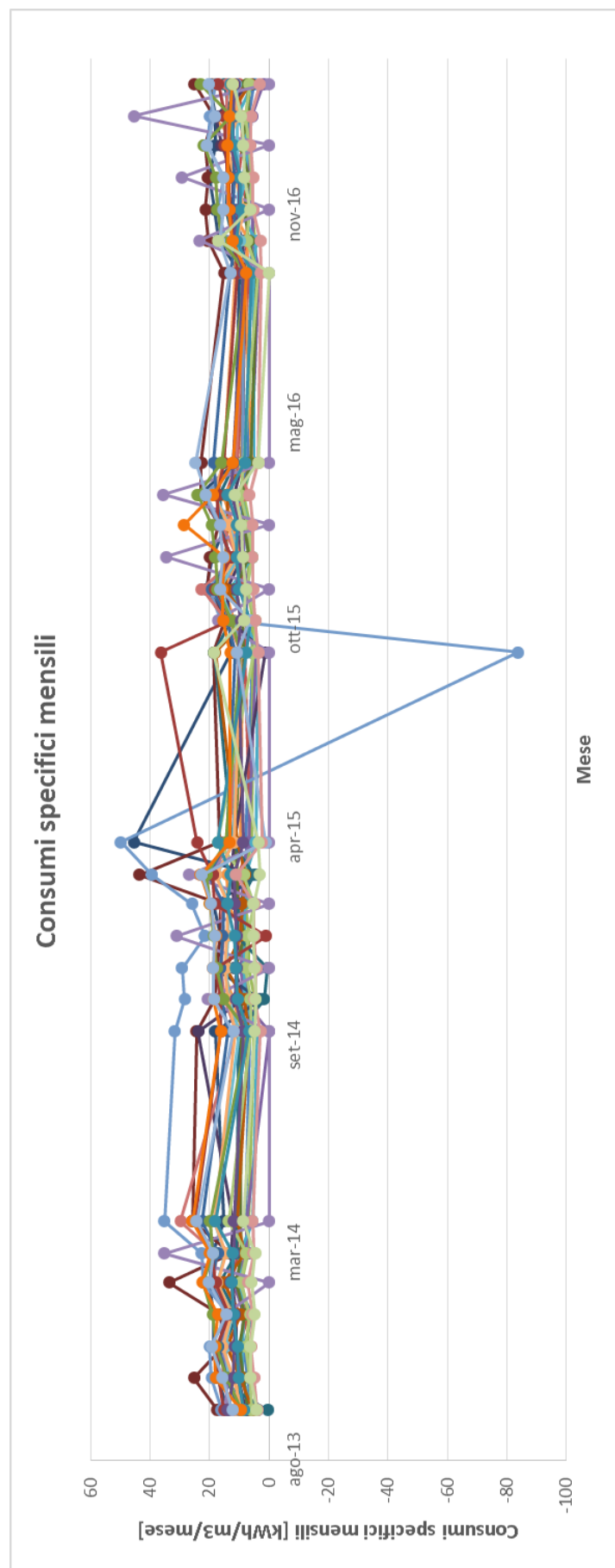


Figura 66: Serie storiche dei consumi mensili dei contatori intorno al periodo di sostituzione (2015)

Se si analizzano le serie temporali tracciate nel grafico precedente su uno a dispersione correlazione-pendenza (Figura 67), si vede che tra il periodo precedente e quello successivo alla sostituzione il cambiamento maggiore è riportato dalla pendenza delle rette di regressione (calcolate sui consumi mensili).

Ciò significa che vi è una variazione dell'efficienza dei sistemi: valori maggiori del modulo della pendenza sono sintomo di una crescita/decrecita sempre più significativa dei consumi specifici, mentre per moduli tendenti allo zero si volge verso una situazione stazionaria. Il segno della pendenza, invece, indica se si ha un risparmio energetico nel tempo (se negativo) o un aumento dei consumi (se positivo).

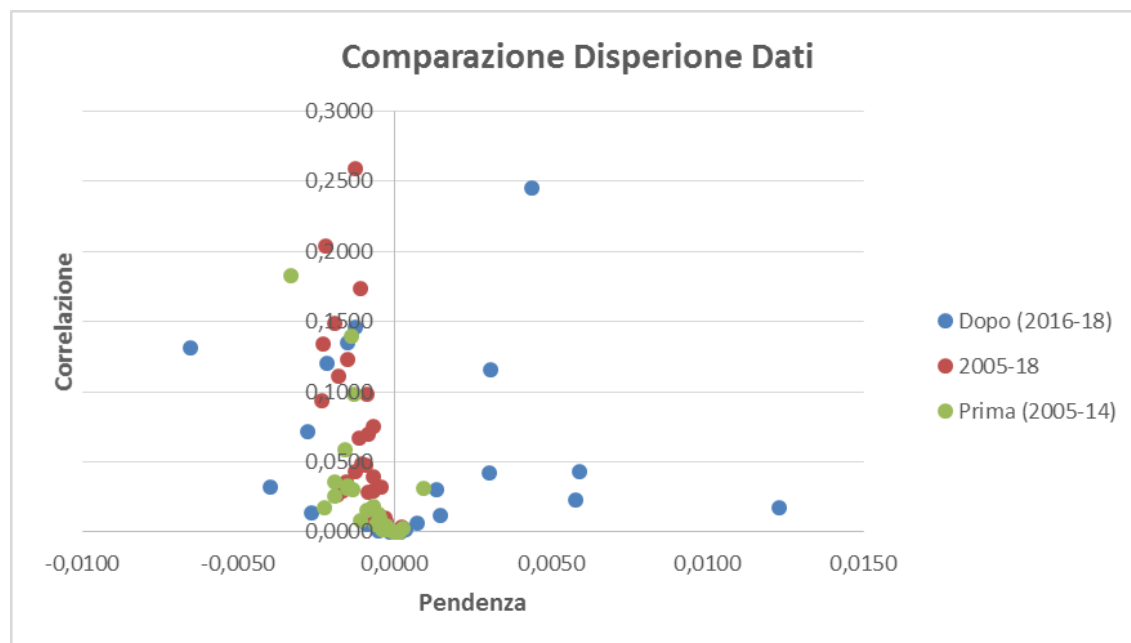


Figura 67: Confronto tra i valori di correlazione e pendenza prima e dopo la sostituzione

Delle difficoltà, però, nascono in merito alla distinzione tra i mesi “prima” ed “dopo” la sostituzione, non essendo specificato il momento in cui è avvenuto il guasto tale da richiedere l'intervento. Per questo motivo, per tutte le sottostazioni sono state escluse le stagioni termiche più vicine al periodo della sostituzione (2014-15 e 2015-16), per evitare eventuali anomalie legate a malfunzionamenti o all'assestamento seguente l'installazione.

Analisi così generiche non permettono di comprendere il comportamento dei singoli sistemi: si propone quindi di estendere su tutto il campione uno studio più approfondito, come quello che verrà mostrato di seguito per una sola sottostazione.

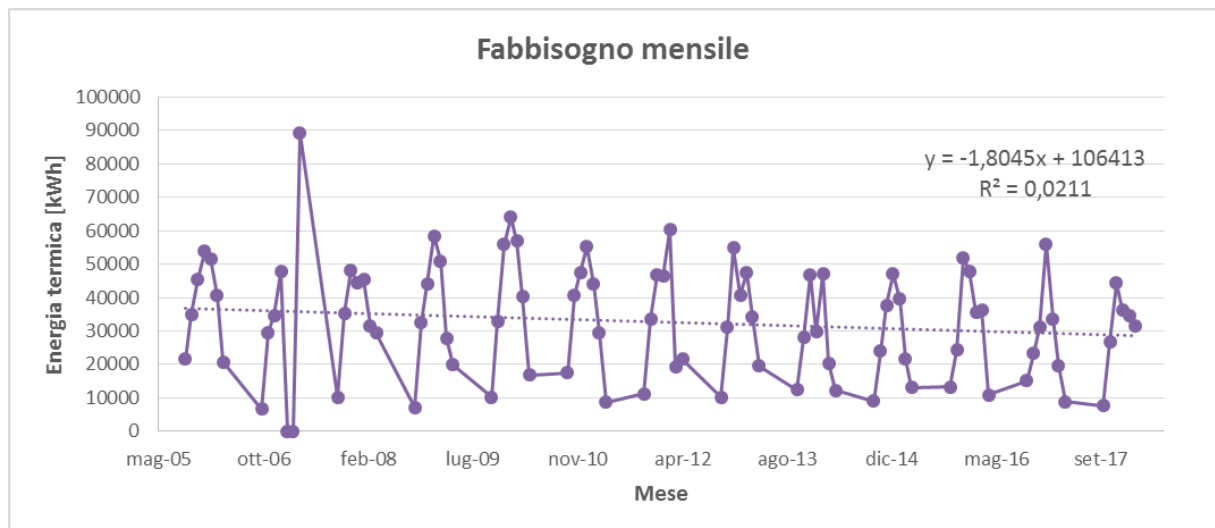


Figura 68: Fabbisogno termico mensile

Tracciando la linea di tendenza per l'intera serie temporale del fabbisogno termico, si trova una correlazione molto bassa a causa delle oscillazioni stagionali, ma si può comunque apprezzare il trend che rivela una leggera diminuzione dei consumi (pendenza negativa).

Caratterizzando i consumi rispetto ai gradi giorno, invece, il coefficiente di determinazione (R^2) diventa più significativo, ovvero il suo valore è maggiore, indicando che i punti seguono meglio l'andamento della retta.

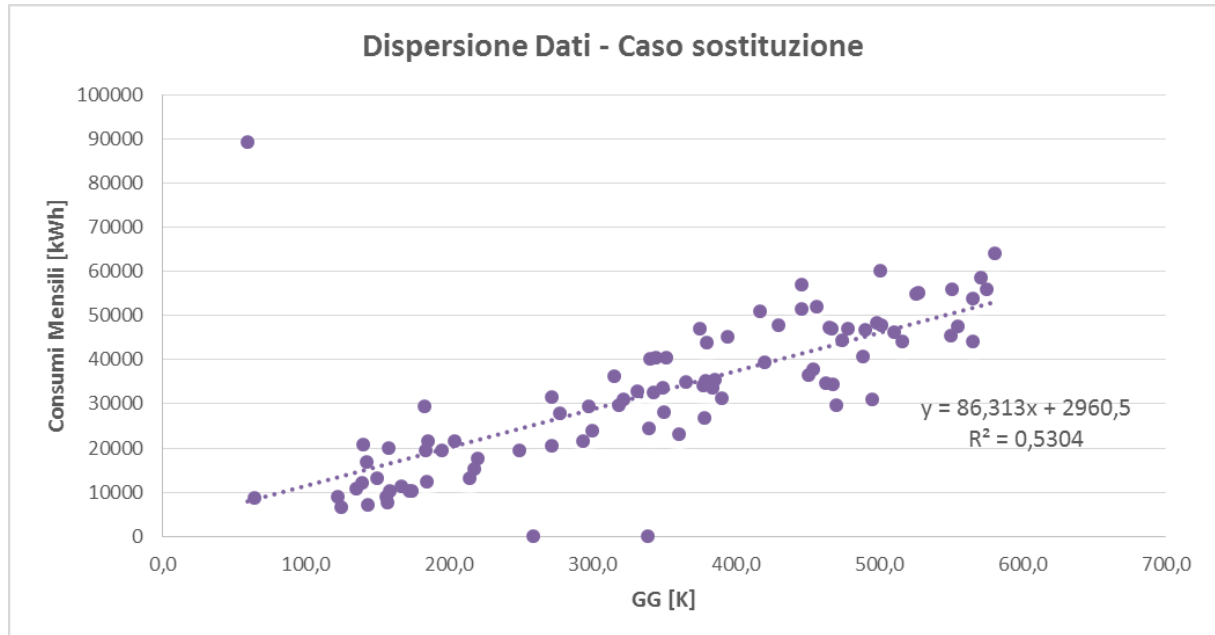


Figura 69: Fabbisogno termico mensile in funzione dei GG

Applicando poi la metodologia di costruzione della somma cumulata dei residui, si ottiene:

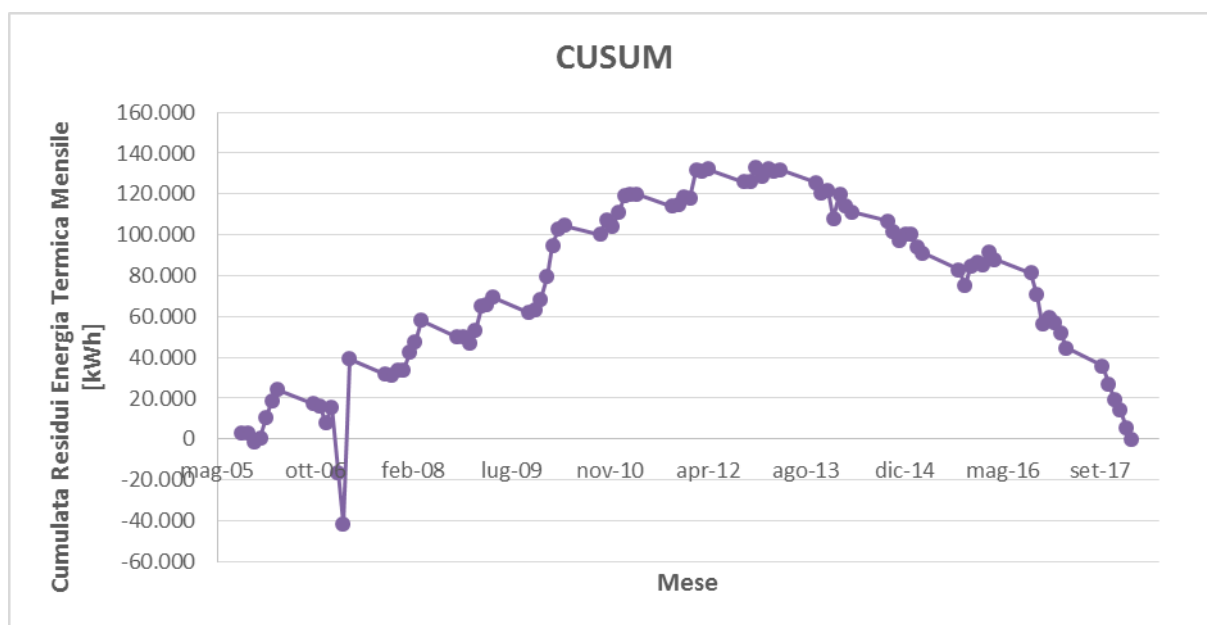


Figura 70: CUSUM applicato ai valori registrati da un contatore sostituito

Il grafico mostra in modo netto un momento di variazione interna del sistema (2012-2013) dal punto di vista dei consumi energetici, il quale non corrisponde al periodo di sostituzione del contatore (2015). Si individuano quindi un primo modello da ottobre 2005 ad aprile 2013 ed un secondo tra aprile 2013 e marzo 18.

Lo stesso procedimento è stato poi applicato solo sul secondo periodo (focus: aprile 2013 - marzo 2018), al fine di valutare se la sostituzione del contatore possa portare ad una ulteriore modifica della caratterizzazione del sistema.

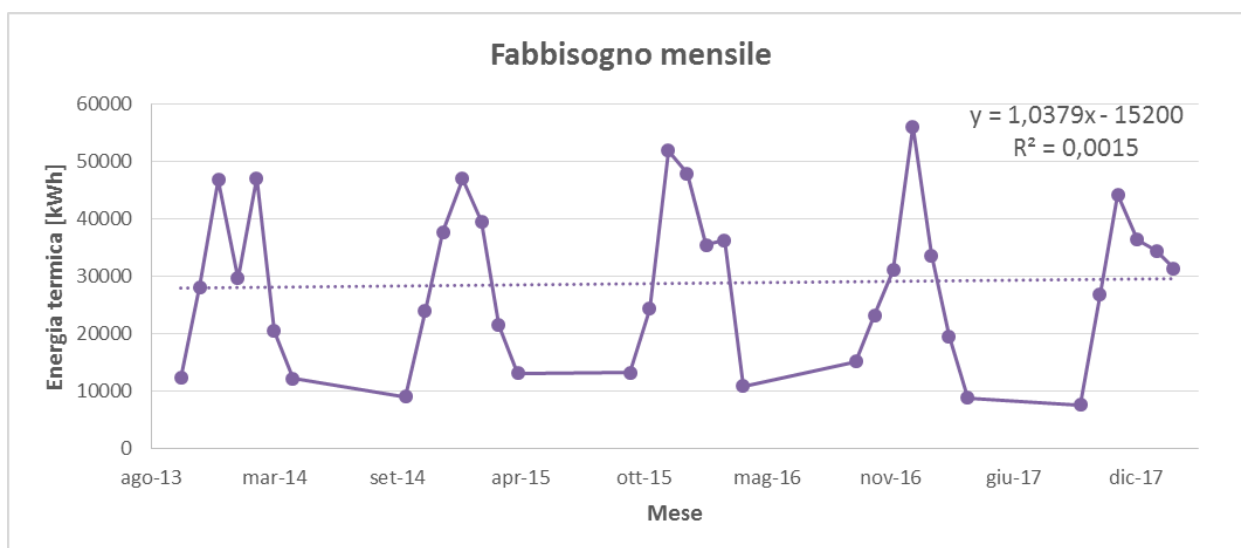


Figura 71: Focus sostituzione - Fabbisogno termico mensile

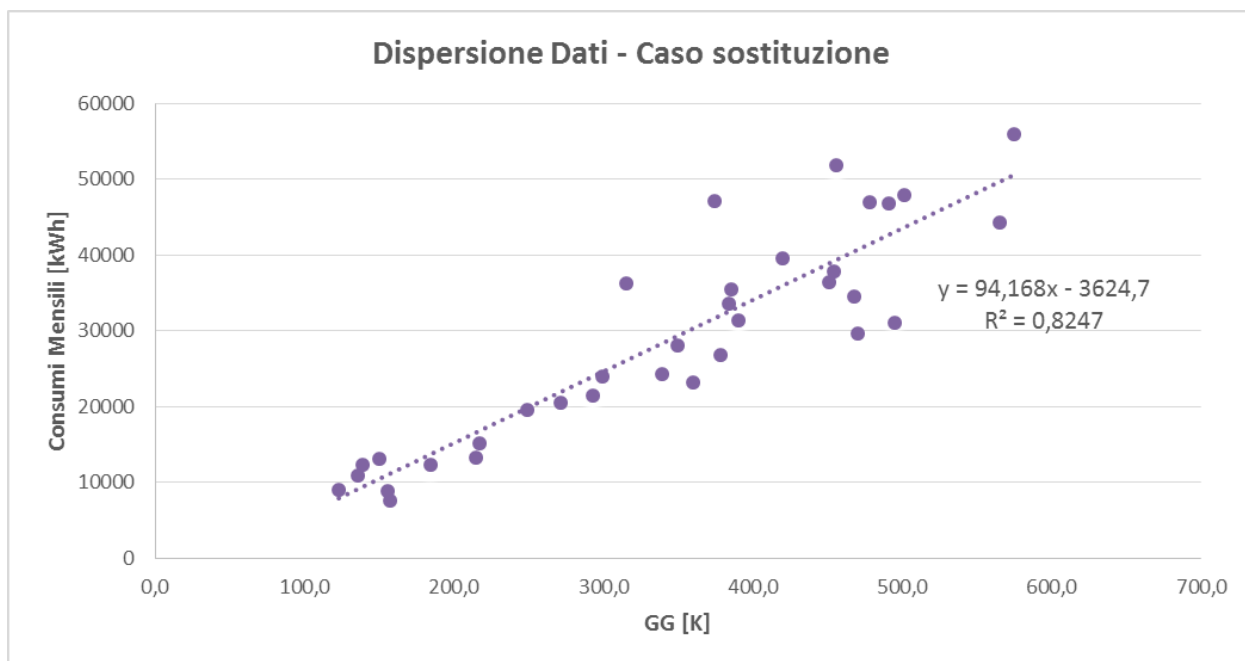


Figura 72: Focus sostituzione – Caratterizzazione in funzione dei GG

In questo caso si nota una caratterizzazione del sistema attraverso la retta di regressione molto più significativa rispetto a quella di Figura 69, grazie all'elevato valore di R^2 . Attraverso la retta, si può quindi tracciare il CUSUM.

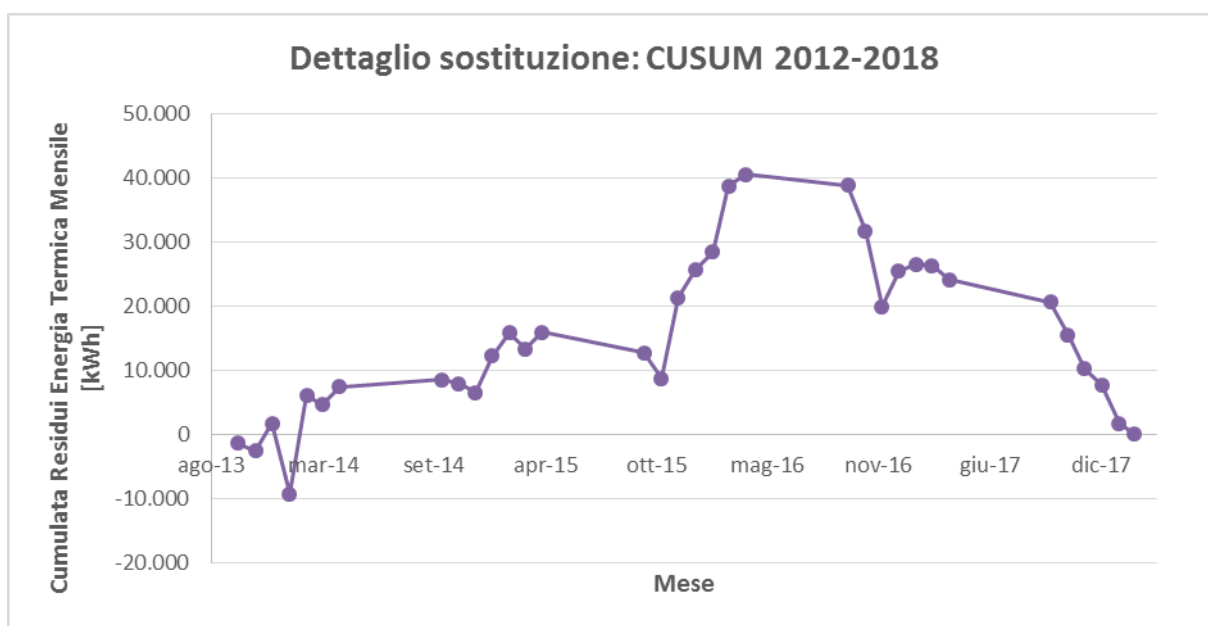


Figura 73: Focus sostituzione – CUSUM

Il grafico mostra nuovamente l'esistenza di due periodi: il primo considerato da aprile 2013 a dicembre 2014 ed il secondo preso da ottobre 2016 a marzo 2018, essendo state nuovamente escluse dallo studio le due stagioni termiche (2014-15 e 2015-16) a cavallo della sostituzione, per i motivi precedentemente elencati.

Vengono poi confrontate le curve di regressione lineare relative ad ogni periodo.

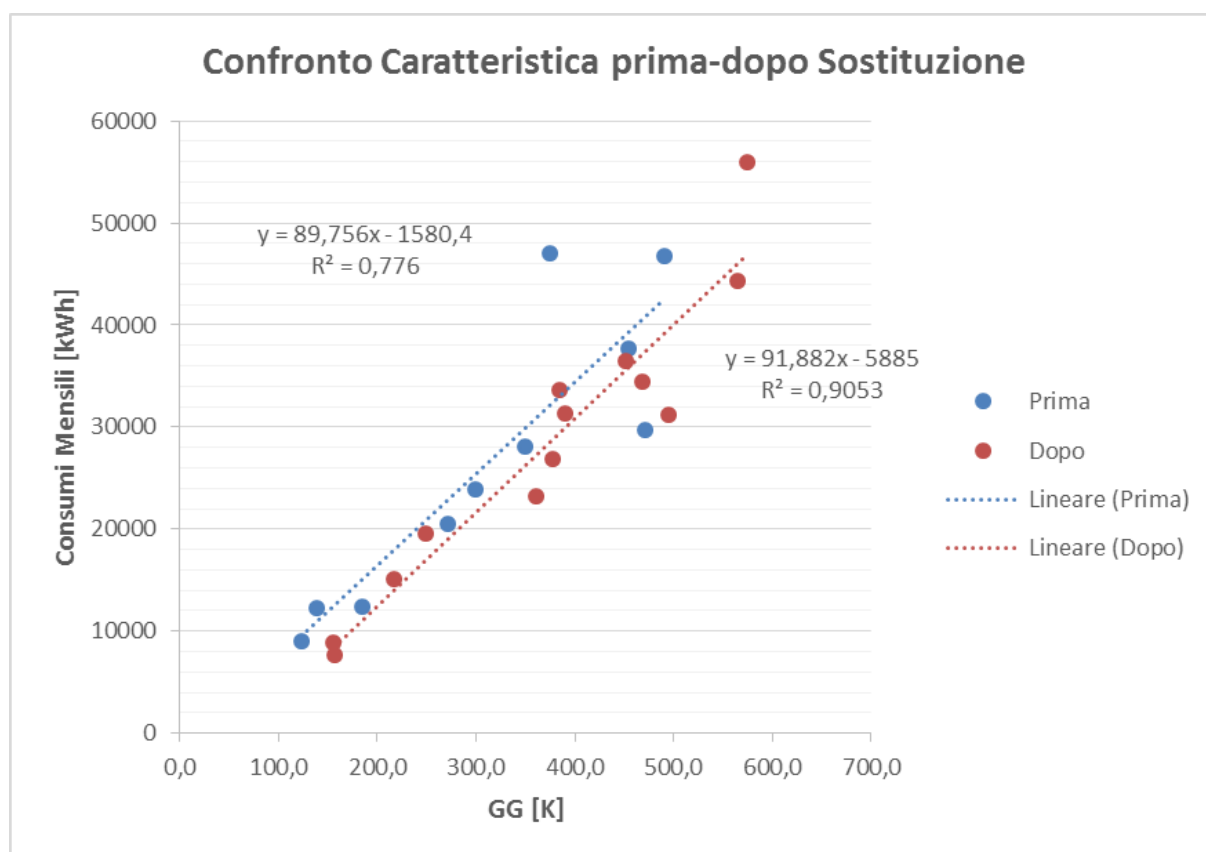


Figura 74: Focus sostituzione – Confronto delle caratteristiche di regressione

Effettuati i test d'ipotesi sulle medie e sulle varianze nei due periodi, viene confermata una significativa (strutturale) differenza tra i due. Il risultato dell'analisi, in questo specifico caso, è quindi che la sostituzione del contatore è stata accompagnata da un'alterazione significativa delle misure registrate, ma ciò non vuol dire che la causa sia stata necessariamente la variazione (deriva) dello strumento.

Le nuove caratteristiche ottenute risultano con andamento simile nei due periodi: nello specifico, nel caso chiamato “dopo” si hanno sia una pendenza che un'intercetta maggiore ed un'ottima correlazione tra i dati ($R^2 \approx 0.9$). Ciò significa che il sistema risulta meno efficiente dal punto di vista dei consumi, perché in aumento, ma i dati rispettano meglio il modello, ovvero sono più allineati alla retta di caratterizzazione.

Parte della differenza tra le due pendenze, e quindi del maggior consumo, potrebbe in questo caso essere ricollegato a fenomeni di deriva, che nel tempo avrebbe portato ad un peggioramento lento e continuo delle capacità metrologiche dello strumento. Vi è quindi la possibilità che il vecchio contatore misurasse meno proprio per via del suo naturale invecchiamento, ma possono essere fatte solo supposizioni: per attestare l'esistenza di una deriva servono delle verifiche di taratura periodiche dello strumento ed il monitoraggio nel tempo del suo errore di misura in riferimento agli standard.

Questo metodo, qui applicato su un solo contatore, potrebbe quindi essere esteso su tutti i misuratori sostituiti in modo da avere altri esempi comportamentali ed eventuali conferme. In questo paragrafo, infatti, si è solo voluta portare alla luce la validità di questa metodologia d'indagine.

7. Prove sperimentali: verifiche della taratura dei misuratori di portata d'acqua

Una volta selezionato il cluster di contatori desiderato attraverso le analisi descritte al capitolo 6 Clustering dei contatori di energia termica: metodologia, sono state effettuate tre diverse tipologie di verifica della taratura degli strumenti, in modo da vedere se le ipotesi inizialmente fatte sulla possibilità di avere una deriva della misura avessero qualche riscontro sperimentale. Dei 20 contatori scelti: 5 sono stati testati dagli strumentisti di Iren Energia S.p.a e gli altri da CSQ, unico ente finora accreditato da ACCREDIA per le verifiche periodiche dei misuratori di calore. Inoltre, uno dei cinque contatori controllati da Iren è stato poi sottoposto ad ulteriori analisi presso il banco campione di riferimento nazionale per la misura dell'energia termica dell'INRIM.

Si sottolinea che i test sono stati effettuati solo sul misuratore di portata in quanto la letteratura e interviste ai produttori degli strumenti tenderebbero ad escludere fenomeni di deriva strumentale continua sui sensori di temperatura e sugli integratori.

A prescindere dallo specifico iter di verifica, si possono individuare delle fasi comuni del processo di controllo di uno strumento di misura:

- fissazione dei set point delle grandezze tipiche dell'impianto (temperatura, pressione, conducibilità elettrica etc.);
- misurazione dei risultati;
- calcolo degli scostamenti tra i valori letti dallo strumento in taratura e dallo strumento campione;
- analisi degli errori relativi;
- comparazione dei risultati ottenuti da prove effettuate sotto diverse condizioni o con diversa strumentazione di riferimento.

La norma specifica di riferimento per le verifiche di taratura è la UNI 1434-6 riguardante le operazioni di installazione, messa in servizio, monitoraggio operativo e manutenzione dei misuratori di calore.

7.1 Verifiche in-situ

Per questioni logistiche la maggior parte delle verifiche sono state svolte in campo, sia da strumentisti Iren che dall'ente CSQ.

Entrambi hanno basato le loro misurazioni sull'uso di un contatore di portata clamp-on ad ultrasuoni e hanno usato i valori ottenuti come riferimento per le letture di portata registrate dai contatori in prova. Nonostante il procedimento di acquisizione dei dati nelle sottostazioni sembri piuttosto semplice, la preparazione della strumentazione richiede una procedura di installazione dei sensori puntuale.



Figura 75: Sottostazioni selezionate per la verifica di taratura dei contatori

7.1.1 Procedura operativa: verifica misuratore di portata Iren e CSQ

La prima fase del procedimento di verifica di un contatore di calore consiste nell'individuazione della corretta posizione di montaggio del misuratore di riferimento clamp-on. Per evitare un aumento degli errori di misura, è richiesta, innanzitutto, una sezione del tubo piena senza la presenza di aria o bolle di gas, per cui risultano da escludere: i punti posti più in alto nella tubazione, l'ingresso di una bocca di scarico libera in una tubazione verticale, le zone prossime ad elementi come valvole, giunzioni a T, gomiti etc. [28]

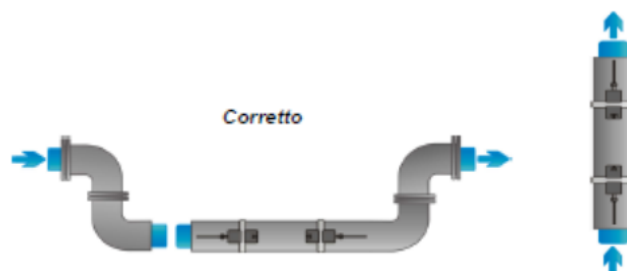


Figura 76: Indicazioni per una corretta installazione dei sensori di flusso [29]

La misura con sensori di portata ultrasonici esterni necessita, inoltre, di un profilo di flusso quanto meno disturbato possibile all'interno della tubazione e quindi di un tratto rettilineo sufficiente alla stabilizzazione delle condizioni del flusso.

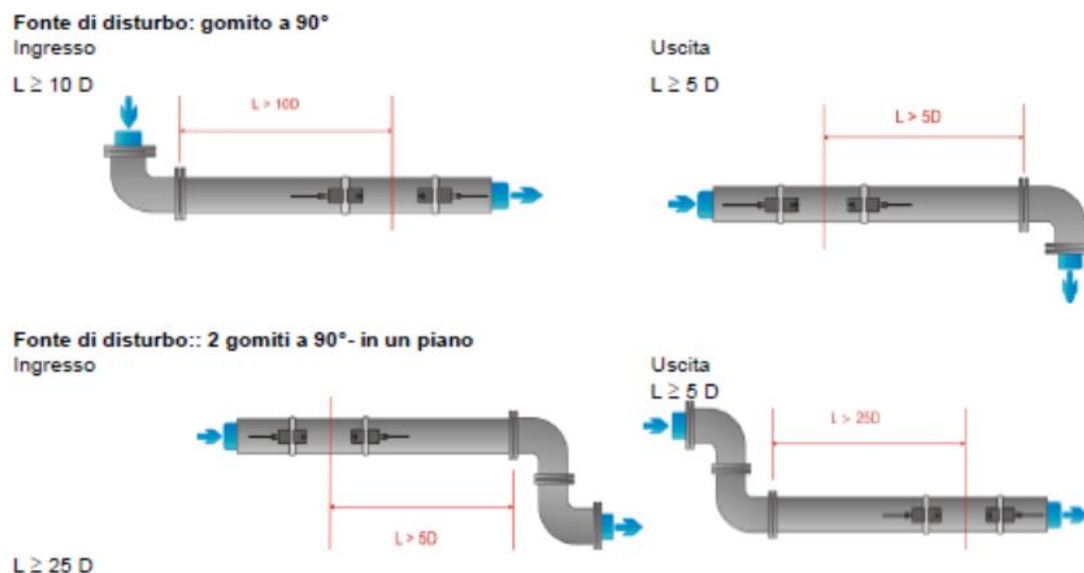


Figura 77: Lunghezze di tubo rettilinee consigliate per l'installazione dei sensori di flusso (CSQ) [29]

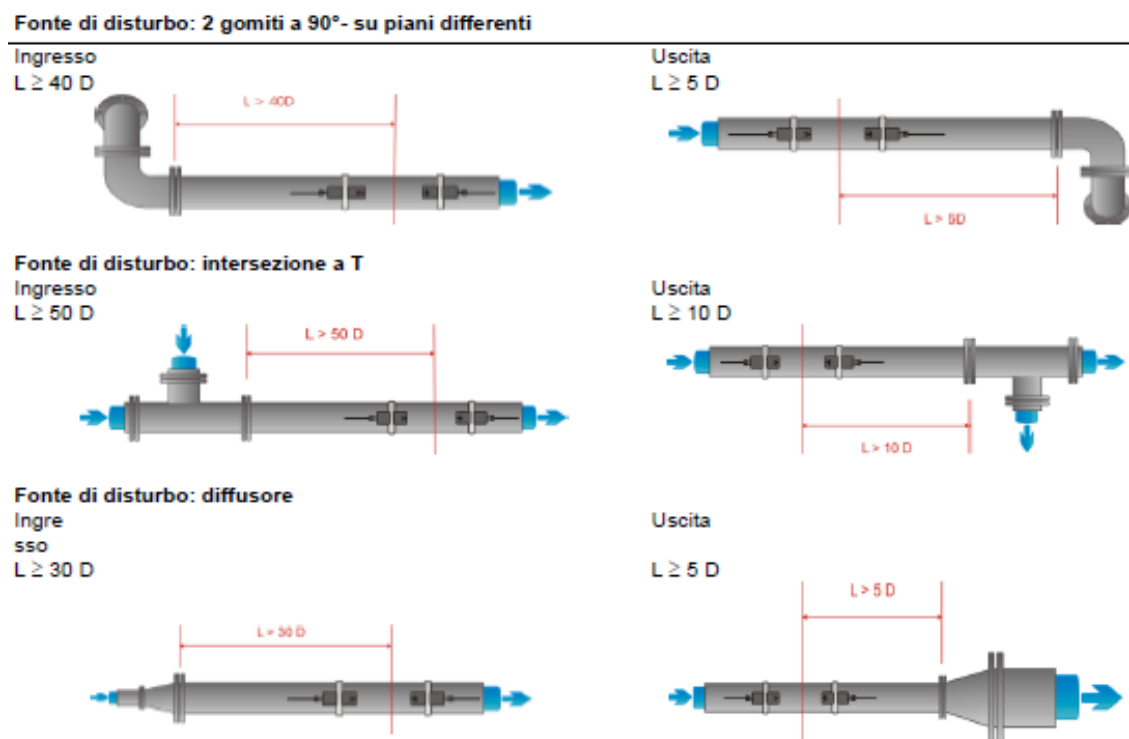


Figura 78: Lunghezze di tubo rettilinee consigliate per l'installazione dei sensori di flusso (CSQ) – disturbi su piani differenti [29]

In base alle condizioni effettive dell'impianto, deve poi essere stabilito l'orientamento del misuratore esterno. Nel caso si scelga la configurazione verticale, il sensore andrà montato in modo tale che il flusso risulti rispetto ad esso ascendente, mentre, nel caso di orientamento orizzontale, i sensori andranno montati con un'angolazione di $\pm 60^\circ$ rispetto al piano orizzontale. In questo modo, i solidi presenti nell'acqua si depositeranno in basso ed i gas che potrebbero essere rilasciati non si soffermeranno nel punto in cui si esegue la misura, ma raggiungeranno l'area superiore del tubo. [28]



Figura 79: Disposizione verticale (a sinistra) ed orizzontale (a destra) dei sensori.

Una volta individuato il punto idoneo per l'installazione del sensore di flusso clamp-on si può quindi procedere all'effettuazione di una serie di operazioni preliminari all'installazione vera e propria dei sensori:

- rimozione della coibentazione e di eventuali residui di vernice dalla tubazione, possibili cause di disturbo al segnale ultrasonoro;
- montaggio del supporto mobile e delle fascette di fissaggio per i sensori;
- determinazione della distanza di installazione dei sensori;
- applicazione di uno strato uniforme di pasta di accoppiamento acustico sulla superficie di contatto dei sensori. [28]

In particolare, per il calcolo della distanza di posizionamento della coppia di sensori piezoelettrici (di flusso), è necessario inserire una serie di dati in input al misuratore di portata:

- materiale e rugosità della tubazione;
- diametro della tubazione (misurato tramite calibro digitale);
- spessore della tubazione (misurato tramite spessimetro digitale): in particolare, lo spessimetro viene passato sopra la tubazione in maniera circolare nel punto dove si esegue la misura, in modo da rilevarne eventuali anomalie/deformazioni interne;
- temperatura del fluido;
- composizione del fluido;
- numero di riflessioni del segnale ultrasonoro (2,4,6...).

Al termine dell'inserimento dei dati lo strumento è in grado di calcolare la distanza ricercata, la cui bontà verrà valutata dall'operatore in relazione al segnale espresso in dB del sensore di mandata e ritorno. [29]

Può infine avvenire il montaggio dei sensori sugli appositi supporti, attraverso l'ausilio della guida di posizionamento, e l'inizio della lettura dei dati. Per le verifiche svolte nelle sottostazioni da Iren, in particolare, i sensori usati sono stati montati nella "configurazione a V" (paragrafo 2.3.1) e quindi sullo stesso lato del tubo, con una sola riflessione del raggio ultrasonoro sulla parete. Questa soluzione corrisponde al tipo di installazione più semplice e pratico, permettendo le misure anche nel caso in cui l'accessibilità sia limitata ad un solo lato della tubazione.



Figura 80: Installazione completa del misuratore di portata clamp-on Iren

7.1.2 Risultati in-situ: confronto con clamp-on Iren

I risultati ottenuti dalle verifiche effettuate direttamente da Iren nelle varie sottostazioni sono mostrati nel grafico seguente sotto forma di errori relativi percentuali, in riferimento alla lettura acquisita con un misuratore di flusso clamp-on ad ultrasuoni, la cui incertezza dichiarata è del 1,6%.

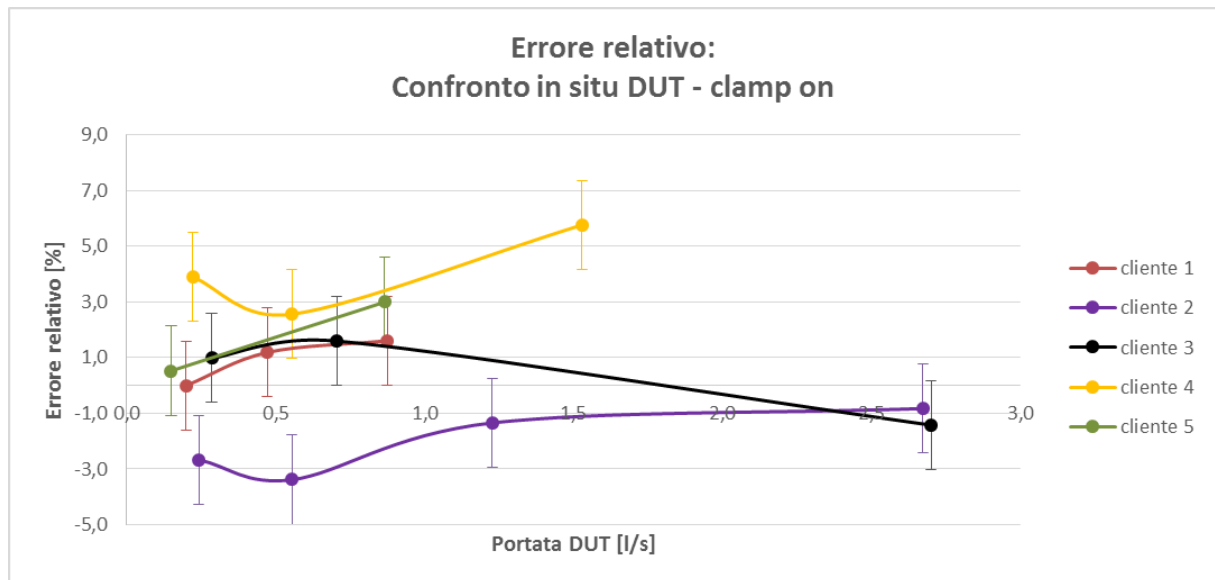


Figura 81: Errori relativi in riferimento alle misure del clamp-on Iren

Come appare chiaramente visibile, in questo tipo di verifiche sorgono numerose difficoltà che non permettono di valutare correttamente il comportamento dei misuratori indagati né tantomeno di apprezzare il livello di incertezza delle singole letture legato al solo contatore. Il misuratore clamp-on, infatti, viene solitamente usato da Iren per effettuare delle indagini di tipo qualitativo e funzionale. Tra i numerosi fattori di disturbo per la misurazione si possono annoverare: l'impossibilità di attendere dopo ogni variazione dei parametri che il flusso si sia nuovamente stabilizzato, la non simultaneità nella registrazione dei dati, le diverse modalità di installazione del sensore clamp on, l'incertezza dello stesso misuratore di riferimento etc.

Si può concludere, quindi, che questa tipologia di test non può portare alla formulazione di opinioni in merito all'esistenza di fenomeni di deriva nel tempo o di una eventuale staratura, ma permette solo di capire se il contatore sta funzionando in maniera pressoché corretta.

Vengono proposte ulteriori analisi per approfondire i risultati.

7.1.3 Procedura operativa CSQ: verifica contatore di calore

La verifica dei contatori di calore sul luogo di funzionamento prevede l'esecuzione di diverse prove integrate tra di loro, ovvero effettuando in contemporanea la misura dei sensori di temperatura e di quelli di portata, al fine di determinare se l'errore complessivo dell'energia erogata nell'intervallo di tempo rientra nel valore dell'errore massimo tollerato.

Per questo tipo di verifiche l'Organismo di Ispezione CSQ si è dotato di una serie di "strumenti campione" opportunamente tarati presso Laboratori Accreditati ai sensi della UNI 17025, come richiesto dal Decreto Ministeriale 93 del 2017, che regola l'operato e definisce i criteri della strumentazione degli Organismi di Metrologia Legale.

Nello specifico ogni operatore dovrà essere in possesso di uno strumento per la misura della portata, con principio di misura ad ultrasuoni di tipologia CLAMP-ON, caratterizzato/tarato su una gamma di diametri specifici, al fine di poter conoscere i limiti di portata sui quali è possibile effettuare la misurazione in relazione al diametro della tubazione di installazione. Appare infatti non trascurabile la determinazione della velocità per cui il sensore ad ultrasuoni non raggiunge i limiti di accuratezza descritti dal suddetto Decreto (1/3 MPE).

Il sensore di portata è direttamente collegato ad un calcolatore di energia termica, avente calcolo validato ai sensi della UNI1434 e MI004, e connesso ad una coppia di sensori di temperatura di riferimento (muniti anch'essi di certificato di taratura) per la determinazione dell'energia "convenzionalmente vera".

In ogni singola prova, ed in relazione al sistema di misura utilizzato, occorre che l'effettuazione della misura avvenga dopo aver atteso il tempo di stabilizzazione della strumentazione utilizzata, come specificato dalle istruzioni (*IO 6.00_Istruzioni operative per la verifica periodica dei contatori di calore*).

La prima verifica da effettuare è quella della portata, del tutto simile al procedimento descritto nel capitolo precedente e quindi qui non ripetuto.

La successiva verifica è quella dei sensori di temperatura. Essa prevede l'inserimento delle sonde del contatore sottoposto a prova all'interno di una coppia di forni termostatici a secco (stabilità 0,05°C), parallelamente alle sonde dello strumento campione, al fine di simulare le temperature caratteristiche dei circuiti di mandata e ritorno in maniera stabile e mantenere costante l'errore massimo tollerato (MPE).

Una volta installata la strumentazione campione ed atteso i tempi di stabilizzazione necessari, si può quindi procedere all'acquisizione dei dati di energia e potenza termica. Condizione necessaria è che la lettura di inizio del misuratore sottoposto a prova avvenga simultaneamente rispetto alla lettura del contatore di riferimento (*prova al volo*): tale pratica è fattibile tramite l'acquisizione di impulsi, oppure tramite documentazione fotografica qualora non sia disponibile un'uscita impulsiva.

L'errore effettivo misurato, espresso in percentuale, è infine calcolato mediante la relazione:

$$\varepsilon_{eff}\% = \frac{E_{th,m} - E_{th,ref}}{E_{th,ref}} * 100 < MPE$$

Dove:

- $E_{th,m}$ è l'energia termica misurata dal contatore in prova;
- $E_{th,ref}$ è l'energia termica misurata dal contatore di riferimento;
- *MPE (Maximum Permissible Error)* indica l'errore massimo tollerato ai sensi del D.M. 93/2017 e allegato MI-004.

Per i *controlli successivi* (verifiche periodiche) dei contatori in servizio l'errore massimo tollerato è considerato doppio rispetto alla verifica prima (come da raccomandazione OIML R 75). [29]



Figura 82: Installazione completa del misuratore di energia termica CSQ [29]

7.1.4 Risultati in-situ: analisi CSQ

I tredici contatori restanti, tra quelli selezionati al capitolo 6, sono stati soggetti alle verifiche di taratura da parte dell'Organismo di Ispezione di Consorzio Servizi Qualificati (CSQ). Il metodo di analisi adoperato è stato quello del confronto tra i risultati letti in simultanea dal misuratore in prova e dal loro strumento campione, un misuratore di portata Isoil ad ultrasuoni, con incertezza certificata dello 0,408%.

I risultati delle prove, effettuate a diverse temperature, sono stati riportati nel grafico sottostante.

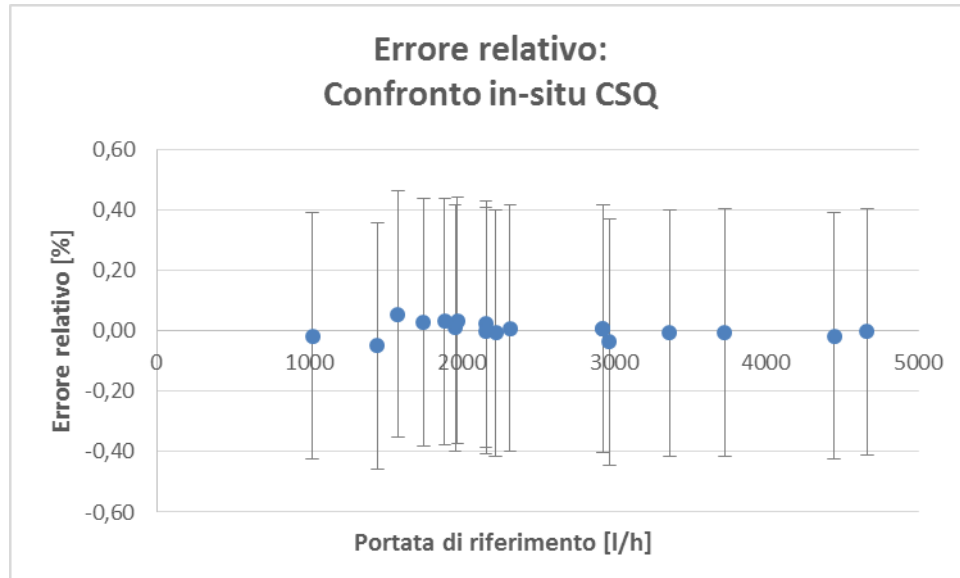


Figura 83: Errore relativo della lettura di portata in riferimento al misuratore CSQ certificato

In questo caso, come certificato da CSQ, si può dire valido per tutti i contatori analizzati che: *“Il sensore di flusso del contatore di calore in prova opera secondo le indicazioni del fabbricante ed all'interno del range di funzionamento dichiarati dallo stesso.”*. [29]

7.2 Verifiche in laboratorio

7.2.1 Procedura di verifica laboratorio INRIM

Gli Istituti Nazionali Metrologici (NMI) sono responsabili dello sviluppo, del funzionamento e della manutenzione dei campioni di riferimento nazionali ed il reciproco riconoscimento delle loro caratteristiche metrologiche (campi di misura, accuratezza, incertezza) viene periodicamente effettuato attraverso confronti inter-laboratorio. Presso l'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRIM), sito in Torino, è stato realizzato l'impianto campione italiano per la misura della portata d'acqua e dell'energia termica, che permette di tarare e verificare misuratori di portata e contatori di calore diretti in condizioni analoghe a quelle operative.



Figura 84: Impianto campione nazionale dell'INRIM per la misura di portata d'acqua ed energia termica

L'Impianto Campione Nazionale di portata, denominato con la sigla identificativa *ICN-1*, opera utilizzando come liquido acqua deionizzata, cui può essere aggiunto fino a 0,005% di NaOH allo scopo di aumentarne la conducibilità elettrica e consentire quindi il funzionamento dei misuratori di portata elettromagnetici. Il sistema è interamente realizzato in acciaio inossidabile nelle sue parti bagnate ed è coibentato, potendo così lavorare a temperature comprese fra 18°C e 80°C, mentre il valore di pressione massimo di progetto per tubazioni e componenti è di 1 MPa. L'intervallo di portata misurabile è compreso tra 0,01 kg/s a 7 kg/s.

L'impianto per la taratura e la verifica dei contatori di calore diretti è costituito da due circuiti idraulici separati:

- l'Impianto Campione Nazionale di portata *ICN-1*, in cui possono essere verificati il misuratore di portata ed uno dei due termometri del contatore di calore;
- un circuito ausiliario ad alta temperatura, in cui viene verificato l'altro termometro del contatore di calore, immerso in un flusso d'acqua a una temperatura diversa rispetto a quella realizzata nel campione di portata (Figura 85); il circuito ausiliario ad alta temperatura opera in un intervallo di temperatura tra 18 °C e 90 °C ed è utilizzato, insieme al campione di portata, per la verifica dei contatori di calore completi, ovvero con tutte le componenti assemblate (misuratore di portata, coppia

di termometri e unità di calcolo) e verificate simultaneamente (potenza termica massima misurabile pari a circa 2 MW).

Le prove sperimentali condotte per questo elaborato si sono concentrate solo sulla verifica del misuratore di portata, motivo per cui il circuito ausiliario ad elevata temperatura non è stato utilizzato, né verrà analizzato nello specifico.



Figura 85: Campione nazionale dell'INRiM per la misura di portata d'acqua ed energia termica: a sinistra, il campione di portata; a destra, il circuito ausiliario ad elevata temperatura

Il metodo di misura primario, adottato dal campione di portata dell'INRiM, è il metodo gravimetrico, detto anche “a pesata e cronometraggio”, secondo quanto prescritto dalla Norma UNI EN 24185 "Misurazione della portata dei fluidi in condotti chiusi - Metodo per pesata" (1995). Il metodo gravimetrico utilizzato è del tipo “Flying Start and Stop”; esso consiste, sostanzialmente, nella realizzazione di una portata costante di liquido attraverso il misuratore in taratura e nella deviazione del flusso, per un determinato intervallo di tempo, all'interno di un serbatoio per la successiva pesata.

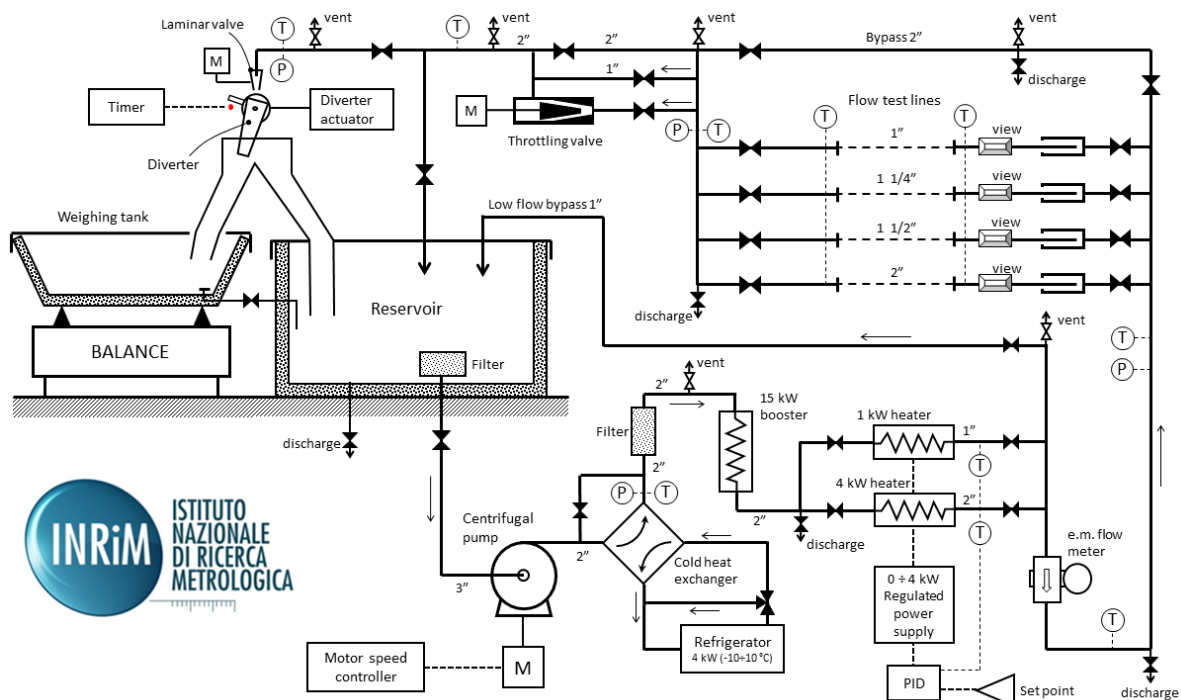


Figura 86: Schema dell'impianto del campione nazionale dell'INRiM per la misura della portata d'acqua

La misura della massa d'acqua transitata in un certo intervallo di tempo attraverso il misuratore in taratura ed accumulata all'interno del serbatoio di pesata, è effettuata mediante una bilancia elettronica a lettura automatica ad alta precisione (con risoluzione pari a 0,1 g). Il serbatoio di pesata ha un volume totale di 144 l, è chiuso da un coperchio metallico ed è munito di coibentazione termica e guarnizioni in gomma per limitare l'evaporazione del liquido contenuto ed il riscaldamento della sottostante bilancia. Il deviatore di flusso, utilizzato per convogliare la portata d'acqua dalla vasca di recupero (capacità di circa 900 l) al serbatoio di pesata e viceversa, è essenzialmente una valvola a tre vie, composta da un ingresso, un'uscita verso il serbatoio di pesata ed una seconda uscita verso la vasca di recupero. Il sistema di deviazione del flusso esegue la commutazione dal serbatoio di recupero a quello di pesata (e viceversa) in un tempo pari a circa 6 ms. Il deviatore è azionato da un motore elettrico su comando del calcolatore o dell'operatore e, tramite il segnale di un sensore fotoelettrico posizionato lungo la corsa del deviatore, viene azionato il cronometro per la misura del tempo di raccolta (incertezza tipo della misura di tempo non superiore a 0,001%).

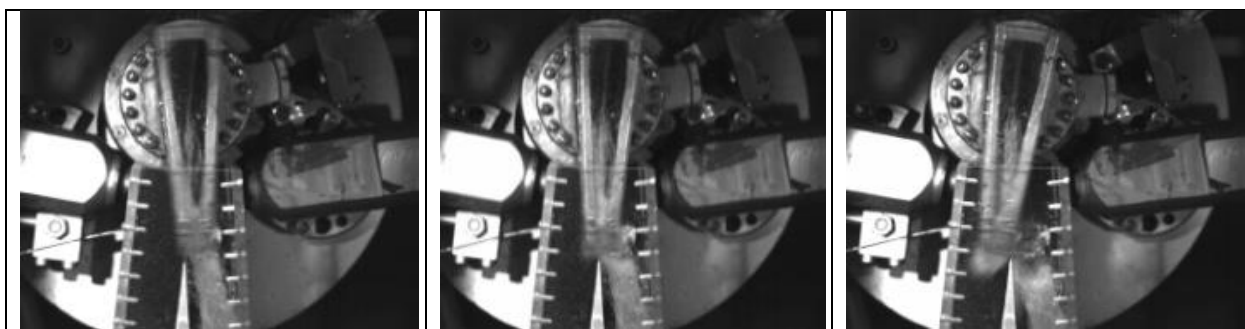


Figura 87. Sistema di deviazione del flusso

Come il serbatoio di pesata, anche il sistema di deviazione del flusso è parzialmente schermato per limitare le perdite per evaporazione e spruzzi; tuttavia nessuno dei due può essere sigillato perfettamente, perché entrambi devono poter operare a pressione atmosferica.

La regolazione della portata circolante nell'impianto campione è effettuata mediante la regolazione del numero di giri della pompa centrifuga, l'utilizzo di valvole di laminazione o il by-pass di parte della mandata. A partire dal serbatoio di recupero, l'acqua viene spinta dalla pompa verso:

- uno scambiatore di calore (escludibile) connesso ad un impianto frigorifero;
- sei riscaldatori elettrici in linea, ognuno da 2,5 kW, ed altri due riscaldatori elettrici modulanti da 4 kW e da 1 kW, per la regolazione fine della temperatura (entro $\pm 0,02^\circ\text{C}$);
- un collettore di monte, da cui si dipartono le linee di misura che costituiscono la "sezione di prova" dell'impianto;
- un collettore terminale di valle, cui fan capo tutte le linee di misura, prima di tornare nel serbatoio di recupero o nel serbatoio di pesata.

Le quattro tubazioni orizzontali di prova hanno diametro rispettivamente di DN25, DN32, DN40 e DN50, lunghezza sufficiente per garantire lo sviluppo idrodinamico del flusso (6 m circa) e sono munite di giunto telescopico e passaggio visivo. Solo in una di queste

viene inserito il misuratore di portata da tarare, mentre le altre vengono escluse chiudendo coppie di valvole di intercettazione.

Diverse valvole sono posizionate lungo il circuito idraulico, come quelle di strozzamento per la regolazione fine della pressione e della portata, quella di intercettazione servocomandata che permette di ottenere portate di prova superiori ai 4 kg/s e quelle per lo spurgo dell'aria ed il drenaggio dell'acqua. Analogamente, dei termometri a resistenza di platino PT100, la cui incertezza di taratura è di 0,01 °C, sono distribuiti in numerosi punti dell'impianto.

In aggiunta, due misuratori di portata massica ad effetto Coriolis di diverso diametro (DN50 e DN25) sono periodicamente tarati presso il campione di portata dell'INRIM ed utilizzati a loro volta come riferimento (master meter), in funzione del campo di misura (generalmente sono utilizzati per la misura di volumi totalizzati compresi tra 100 e 1000 l). Essi vengono sempre installati a valle rispetto al sensore di flusso in taratura per evitare disturbi del profilo di velocità, ma, nonostante le varie accortezze di installazione e l'elevata precisione di questa tipologia di strumenti, tale metodo basato sul confronto con master meter è caratterizzato da una maggiore incertezza rispetto al metodo gravimetrico.

Un multimetro esegue la lettura del segnale (in tensione, corrente o impulsi a frequenza variabile) proveniente dallo strumento in taratura e lo invia al sistema di acquisizione dati, che provvede, inoltre, alla registrazione di tutti i parametri operativi dell'impianto ed al comando degli attuatori presenti sullo stesso (elettrovalvole, deviatore di flusso, comando della velocità di rotazione del motore, etc.). Il sistema funziona in modo completamente automatico e si interfaccia con l'operatore grazie al programma di supervisione SCADA/HMI Movicon™.

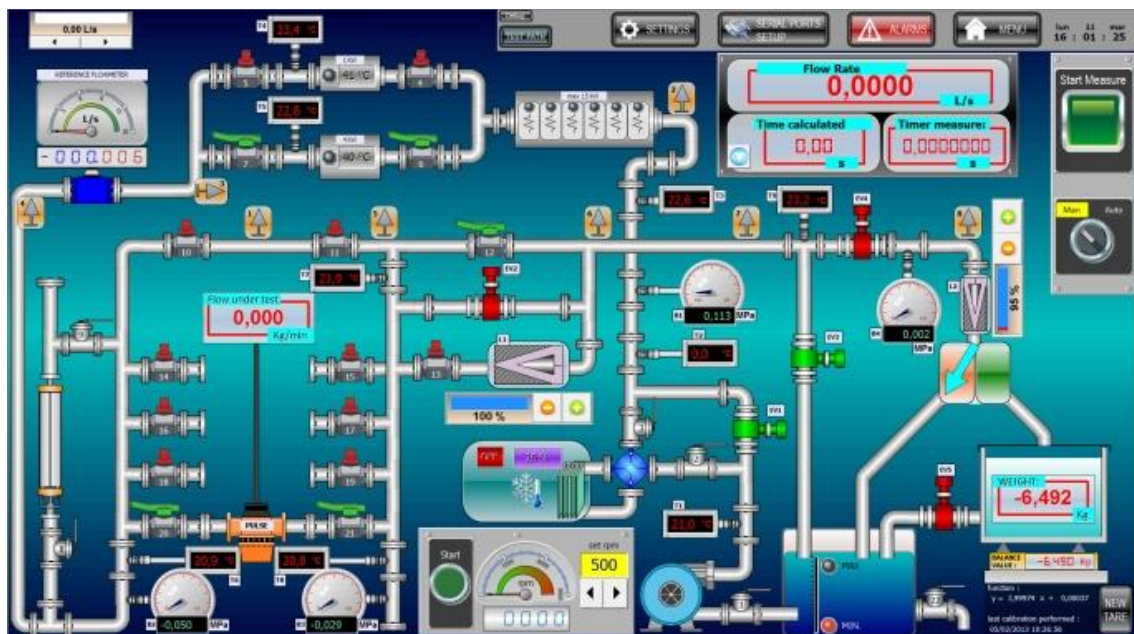


Figura 88: Layout del pannello di controllo: schema del processo



Figura 89: Layout del pannello di controllo: valori misurati.

Tale software, inoltre, implementa il calcolo delle proprietà termofisiche dell'acqua (densità, entalpie specifiche), secondo l'equazione di stato fornita dall'Associazione Internazionale per le Proprietà di Acqua e Vapore (IAPWS IF-97), a partire dalle misure di temperatura e pressione.

La misura della densità dell'acqua dell'impianto viene effettuata all'inizio e/o alla fine di ogni taratura, mediante un densimetro a tubo vibrante (incertezza relativa estesa pari a 0,001%) ed è utilizzata per correggere la densità calcolata mediante l'equazione di stato.

Ovviamente, la determinazione della densità dell'acqua in corrispondenza del misuratore in taratura è necessaria per la taratura o la verifica di misuratori di portata volumetrici con metodo gravimetrico.

La figura seguente mostra il diagramma di riferibilità per la misura della portata massica e volumetrica.

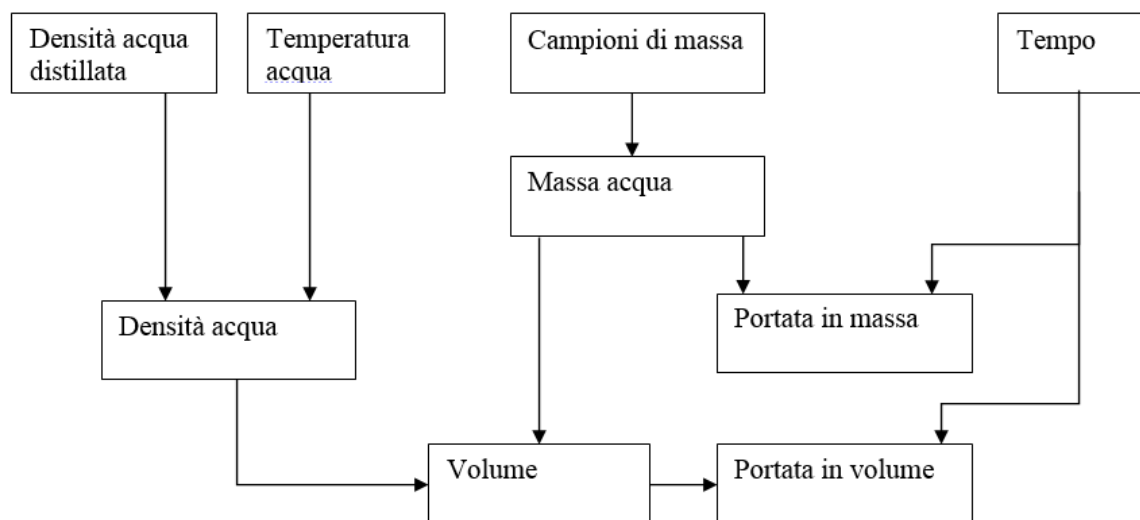


Figura 90: Diagramma di riferibilità per la misura di portata

Come si evince dal grafico precedente, il metodo primario per la misura della portata in massa (q) si basa sul rapporto tra la massa d'acqua raccolta nel serbatoio di pesata e il tempo di raccolta misurato dal cronometro:

$$q = \frac{\varphi(M^* + C)}{\tau}$$

Dove M^* è la massa di fluido indicata dalla bilancia, τ è il tempo di raccolta dell'acqua, φ indica il fattore di correzione per il fenomeno di galleggiamento esercitato dall'aria sul fluido e per le perdite di acqua dovute all'evaporazione e agli spruzzi durante il riempimento della vasca, C indica la correzione da applicare alle letture della massa dopo la taratura della bilancia.

La portata volumetrica è quindi calcolata attraverso il rapporto tra la portata in massa e la densità del fluido alla temperatura misurata in corrispondenza dello strumento in taratura:

$$\dot{V} = \frac{q}{\rho(T)}$$

Le misure di riferimento di portata massica o volumetrica vengono confrontate con il segnale d'uscita (lettura) del misuratore di portata in taratura, permettendo di calcolarne l'errore relativo.

Le incertezze relative estese (intervallo di confidenza del 95%) associate alle misure di portata e di massa/volume d'acqua totalizzato, fornite dal campione di portata dell'INRIM, sono riassunte in Tabella 6. Esse definiscono le capacità metrologiche e di taratura dell'impianto (CMC, Calibration and Measurement Capabilities), riconosciute in ambito MRA (Mutual Recognition Arrangement). [30]

Tabella 6: Incertezze relative estese per le varie grandezze misurate all'INRIM

Metodo	Grandezza	Range di portata	Range di temperatura dell'acqua	Incertezza relativa estesa (95% c.i.) U
Gravimetrico (Flying Start and Stop)	Portata in massa	0,01 kg/s – 7 kg/s	(18 - 30) °C	0,1 %
		0,01 kg/s – 3 kg/s	(30 - 80) °C	0,2 %
	Portata in volume	0,01 l/s – 7 l/s	(18 - 30) °C	0,1 %
		0,01 l/s – 3 l/s	(30 - 80) °C	0,2 %
	Massa totalizzata (da 1 kg a 100 kg)	0,01 kg/s – 7 kg/s	(18 - 30) °C	0,1 %
		0,01 kg/s – 3 kg/s	(30 - 80) °C	0,2 %
	Volume totalizzato (da 1 l a 100 l)	0,01 l/s – 7 l/s	(18 - 30) °C	0,1 %
		0,01 l/s – 3 l/s	(30 - 80) °C	0,2 %
Master meter	Portata in massa o in volume, massa o volume totalizzato (fino a 1000 l)		(18 - 30) °C	0,2 %
			(30 - 80) °C	0,4 %

7.2.2 Risultati INRIM: confronto con l'impianto di riferimento nazionale

Uno dei sensori di portata testato in campo dall'IREN è stato poi verificato presso l'INRIM. Si tratta di un misuratore elettromagnetico Krohne del 1999, diametro DN25, proprietà di Iren Energia S.p.a..



Figura 91: Misuratore di portata Krohne testato all'INRIM

Di questo vengono evidenziati in Figura 36 i valori di correlazione e pendenza emersi dalle analisi precedenti.

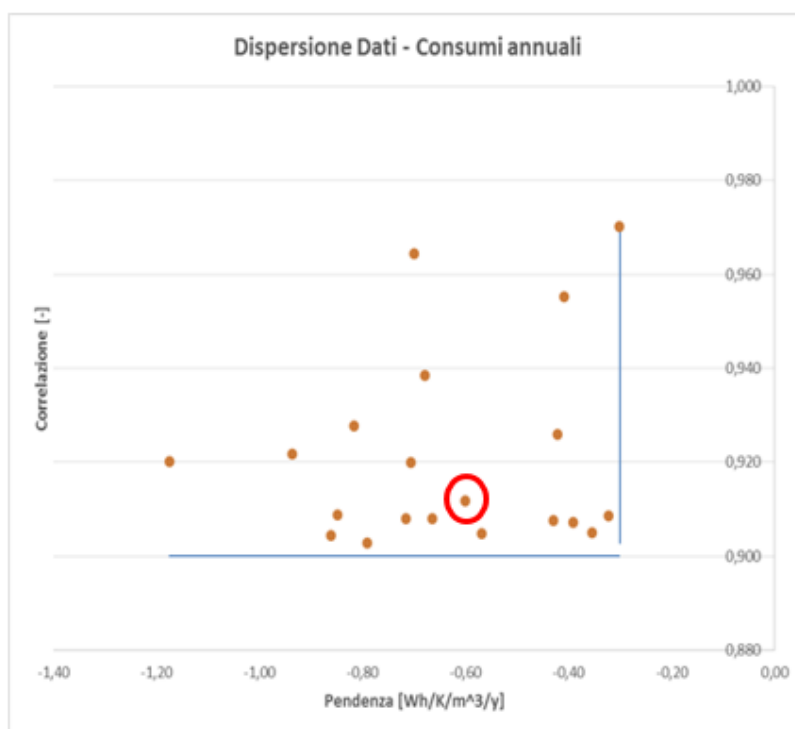


Figura 92: Correlazione e pendenza misuratore in prova

Il misuratore è stato installato lungo la tubazione di diametro DN25 del campione nazionale di portata e la lettura della portata volumetrica è stata effettuata mediante

l'acquisizione dell'uscita in frequenza del misuratore, configurata impostando una frequenza di fondo scala pari a 1000 Hz, cui corrisponde una portata di fondo scala pari a 5 l/s (18 m³/h).

Il segnale in uscita dal misuratore, quindi, è una frequenza f (in Hz) proporzionale alla portata in volume $\dot{V}$ (in l/s) attraverso la relazione:

$$f = \frac{1000}{5} \dot{V} l$$

I punti di misura, ovvero le portate a cui si vogliono effettuare le prove del misuratore, sono realizzati attraverso la regolazione della pompa e delle valvole dell'impianto e il tempo di pesata è impostato in funzione della portata, in modo tale da garantire l'accumulo di una quantità d'acqua nel serbatoio di pesata compresa tra 70-75 kg. Alla fine di questo tempo di prova e di un successivo intervallo di tempo necessario all'assestamento del moto dell'acqua all'interno del serbatoio di pesata (circa 100 s), mediante l'interfaccia Movicon™ vengono generati automaticamente dei file Excel con tutte le letture e le misure di riferimento necessarie per la verifica del misuratore.

Le tipologie di test effettuate sono state tre:

- *Test 1*, temperatura ambiente e conducibilità elettrica media di 438 $\mu\text{S}/\text{cm}$;
- *Test 2*, temperatura di circa 50°C e conducibilità elettrica media di 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$;
- *Test 3*, temperatura ambiente, sensore di flusso pulito e conducibilità elettrica media di 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$;

Per quanto riguarda le condizioni ambientali del laboratorio durante i tre test, la temperatura è stata mantenuta entro 23 ± 2 °C mentre la pressione, determinata dalla pompa, è variata tra 0,137 e 0,620 MPa.

I risultati delle prove sperimentali sono espressi in termini di errore relativo, per ogni punto di misura della portata:

$$\varepsilon = \frac{\dot{V}_{DUT} - \dot{V}_{ref}}{\dot{V}_{ref}} * 100$$

Dove $\dot{V}_{DUT}$ è la portata in volume misurata dal sensore in taratura (*Device Under Test*) e $\dot{V}_{ref}$ è la misura di riferimento di portata volumetrica.

Confrontando i risultati sperimentali dei tre test su uno stesso grafico, si potrà avere un'idea più chiara del comportamento dell'errore al variare delle condizioni di misura.

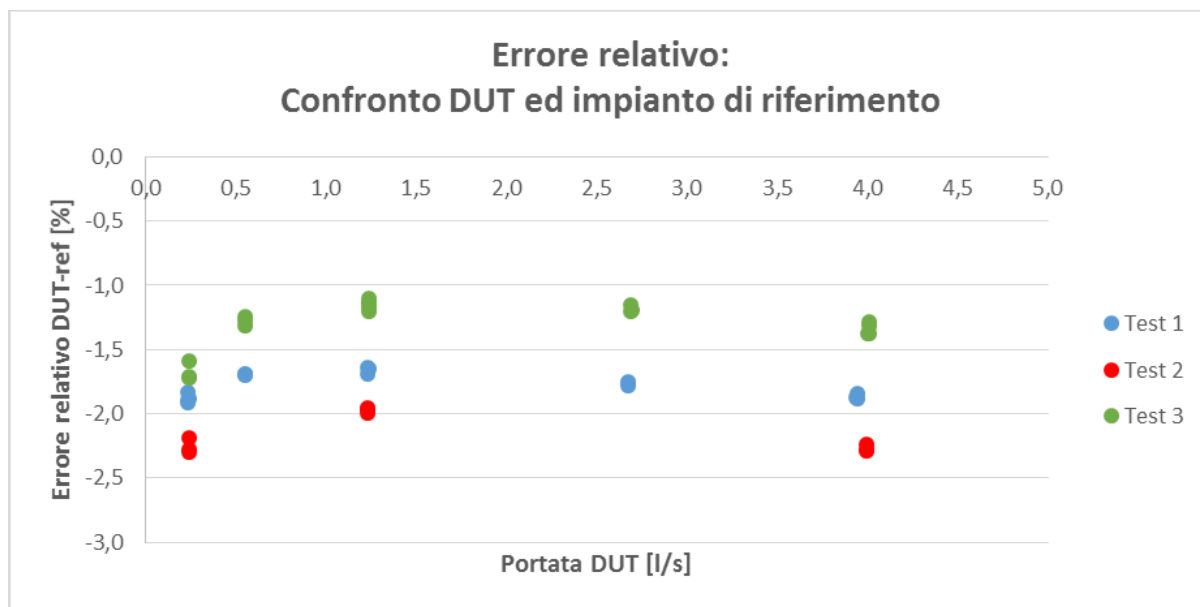


Figura 93: Confronto test – Misure dell'errore relativo in funzione della portata

La ripetibilità dell'errore relativo, a parità di portata e delle altre condizioni di misura, è stata valutata come deviazione standard degli errori relativi per ciascuna portata esaminata, e risulta compresa tra lo 0,059% e lo 0,009% per tutti e tre i test. Si può affermare, anche alla luce dell'incertezza estesa associata alla misura di riferimento della portata fornita dal campione nazionale dell'INRIM (0,1% - 0,2%), che lo strumento testato si ripete molto bene e che il suo funzionamento è ottimale.

Per evidenziare meglio l'andamento dell'errore al variare della portata, se ne è poi calcolato il valore medio per ogni set di punti.

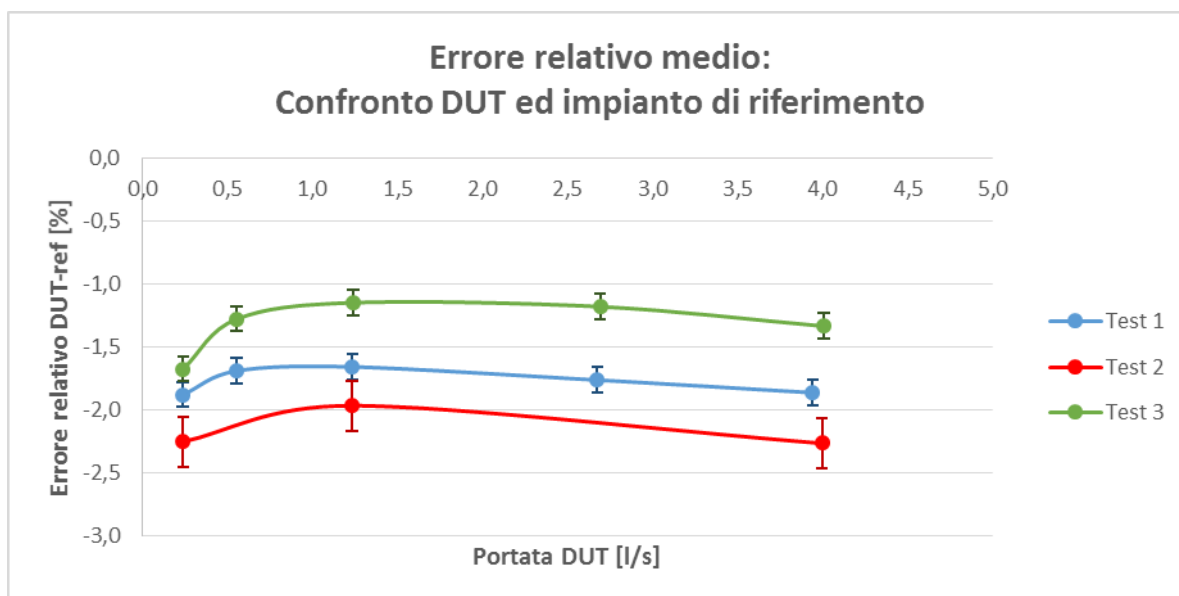


Figura 94: Confronto test - Errore medio relativo al variare della portata e bande d'incertezza

Dal primo test, si evince che l'andamento dell'errore relativo tra lo strumento da verificare e l'impianto campione è decrescente solo nei valori centrali del suo campo di misura. L'errore relativo varia tra -1,642% e -1,916%, quindi, considerando l'incertezza della misura di portata di riferimento e la ripetibilità del misuratore di portata, la curva potrebbe essere considerata quasi orizzontale, anche se intorno a valori diversi dallo 0.

I risultati del secondo test, effettuato ad una temperatura dell'acqua di circa 50 °C ed elevata conducibilità elettrica, hanno evidenziato una ulteriore diminuzione dei valori dell'errore relativo (circa -0,36%) e quindi un piccolo peggioramento della qualità della misurazione, nonostante l'aumento della conducibilità del fluido che avrebbe dovuto favorire la sensibilità dei sensori elettromagnetici. Questo fenomeno, però, rientra nelle aspettative e può essere dovuto al fatto che in genere la taratura dei misuratori di portata dei contatori di calore, specialmente prima della normativa MID, avveniva a temperatura ambiente.

Le ultime prove sperimentali (Test 3) sono state effettuate alle medesime condizioni del primo test, ma questa volta è stata pulita la superficie interna della sezione di misura del sensore di portata elettromagnetico (in corrispondenza degli elettrodi) con della carta ottica, in modo da valutare l'effetto dello sporco sulla misura. Si sottolinea che l'acqua era già stata abbondantemente additivata (conducibilità elettrica pari a circa 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$) per cercare di prevenire l'eventuale scarsa sensibilità e stabilità del sensore dovuta a fenomeni di cortocircuitazione attraverso le incrostazioni formatesi nel tempo sulle pareti del misuratore. Anche in queste condizioni l'errore relativo mantiene lo stesso andamento riscontrato negli altri due casi ma con valori di modulo minore, ovvero la curva risulta più traslata in alto verso lo 0, mediamente di uno +0,45%. Proprio in questo ultimo caso, quindi, si riscontra un andamento più simile a quello teoricamente ipotizzato, ovvero con un errore relativo maggiore alle basse portate che tende a diminuire fino a stabilizzarsi all'aumentare della portata. Ciò conferma l'influenza negativa che lo sporco dei sensori ha sulla misura della portata.

Si conclude che sia la temperatura che lo sporco interno delle tubazioni hanno un effetto peggiorativo, seppur minimo, delle prestazioni dello strumento. Il sensore, però, ha dimostrato un'ottima ripetibilità ed un ristretto intervallo di variazione dell'errore relativo nelle varie condizioni di misura in cui sono stati effettuati i test, motivo per cui le curve ottenute possono essere considerate quasi delle rette orizzontali. Queste, nella comparazione avvenuta con l'impianto nazionale di riferimento, compaiono tutte al di sotto dello zero, indicando che il sensore ha misurato lievemente meno di quanto avrebbe dovuto. Possibili cause del fenomeno possono dunque essere ricercate nei lenti fenomeni di deriva metrologica nel tempo o nelle diverse condizioni operative e di installazione rispetto a quelle cui il contatore è soggetto nella pratica e per cui era stato tarato.

Secondo quanto dichiarato dal costruttore (Figura 95), a temperatura ambiente, l'errore massimo per questa tipologia di misuratore dovrebbe essere compresa tra 0,3% ed 1,1%. Da questa analisi, quindi, questo specifico strumento risulta fuori dal range dichiarato dal costruttore: nel tempo (data di messa in servizio 1999) si è verificato un peggioramento delle sue caratteristiche metrologiche.

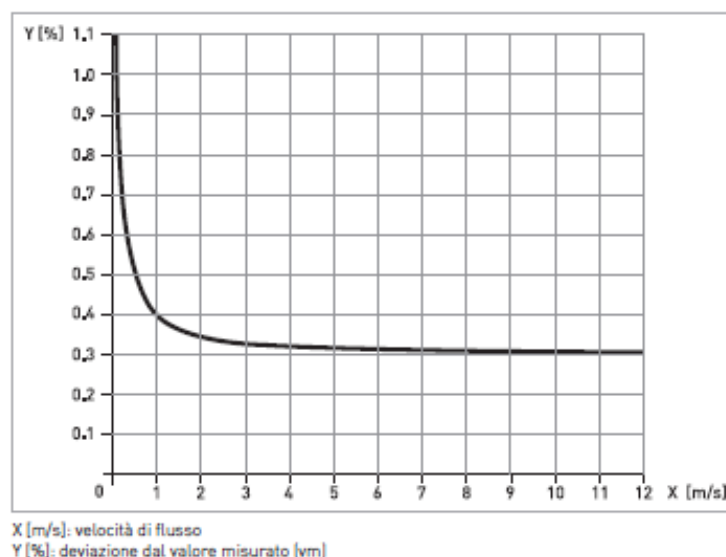


Figura 95: Indicazioni costruttore - Errore percentuale al variare della velocità di flusso

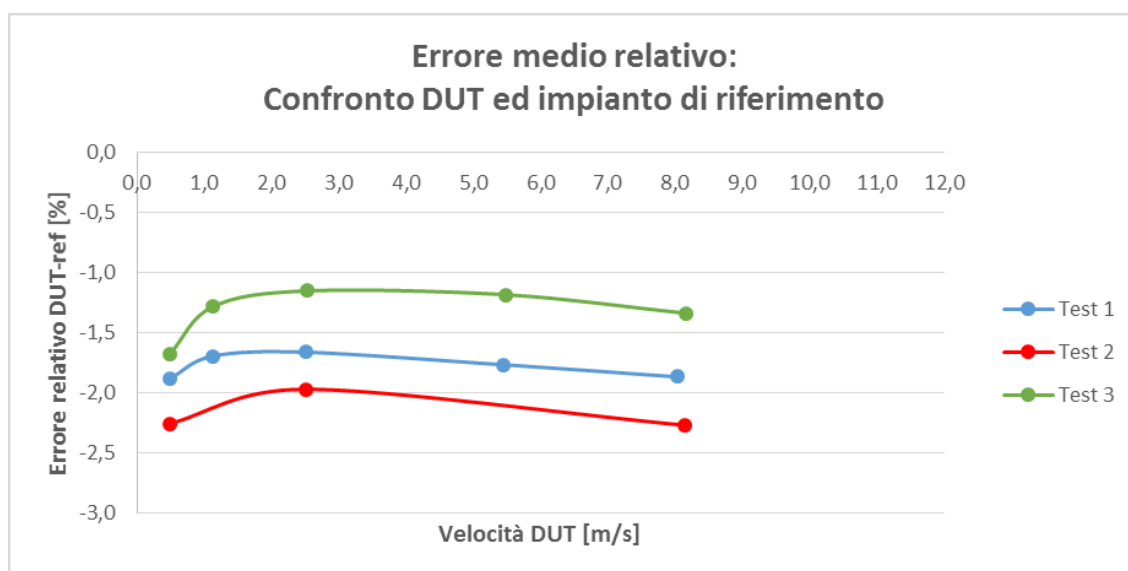


Figura 96: Confronto test - Errore medio relativo al variare della velocità di flusso

Invece, secondo quanto previsto da normativa, l'errore massimo permesso per questa tipologia di contatore (certificato in classe di precisione 2) si ottiene ricavando l'andamento dello stesso in funzione del rapporto tra la portata effettiva ed il suo valore nominale (o permanente, q_p):

$$\varepsilon_f [\%] = \left(2 + 0,02 * \frac{q_p}{q} \right)$$

La portata permanente, a sua volta, in assenza del libretto di costruzione dello strumento, può essere scelta dalla tabella sottostante. Il diametro nominale è noto e pari a 25mm e le connessioni flangiate.

Tabella 7: Valori della portata permanente in funzione del diametro nominale, secondo prEN1434-2:2006.

q_p m ³ /h	Preferred			Also acceptable			Also acceptable	
	Overall length mm	Threaded end connections	Flanged connections DN	Overall length mm	Threaded end connections	Flanged connections DN	Overall length mm	Threaded end connections
0,6	110	G 3/4 B	15	190	G 1 B	20		
1,0	130	G 3/4 B	15	190	G 1 B	20	110	G 3/4 B
1,5	165	G 3/4 B	15	190	G 1 B	20	110	G 3/4 B
2,5	190	G 1 B	20				130	G 1 B
3,5	260	G 1 1/4 B	25					
6,0	260	G 1 1/2 B	32	260	G 1 1/4 B	25		
10	300	G 2 B	40					
15	300		50	270		50		
25	300		65					
40	350		80	300		80		
60	350		100	360		100		
100	350		125					
150	500		150					
250	500		200					
400	600		250					

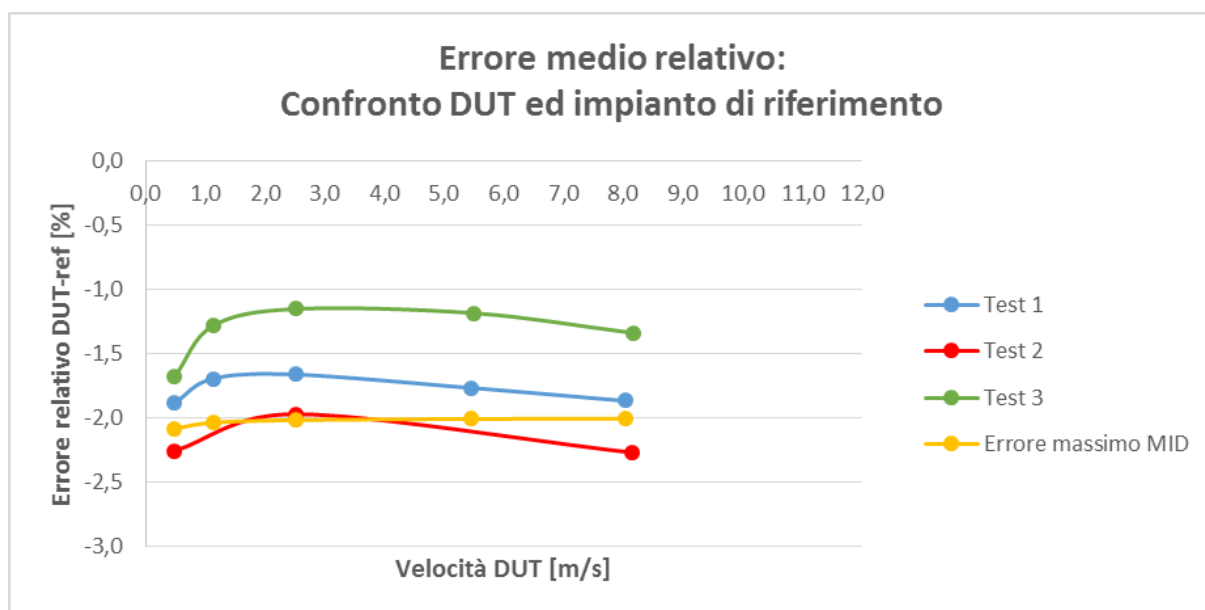


Figura 97: Confronto test e curva di errore massimo previsto da MID.

Nonostante la variazione dell'errore rispetto alle condizioni iniziali fornite dal costruttore, si vede che nelle prove di verifica a temperatura e pressione ambiente ed in parte anche in quelle a più elevata temperatura, i limiti imposti dalla direttiva MID sarebbero rispettati.

Gli errori relativi misurati presso il campione di portata dell'INRIM sono stati confrontati con gli errori relativi ottenuti dalle misure effettuate in sottostazione prima che il contatore venisse prelevato, usando come riferimento il valore di portata fornito da un misuratore ad ultrasuoni di tipo clamp on.

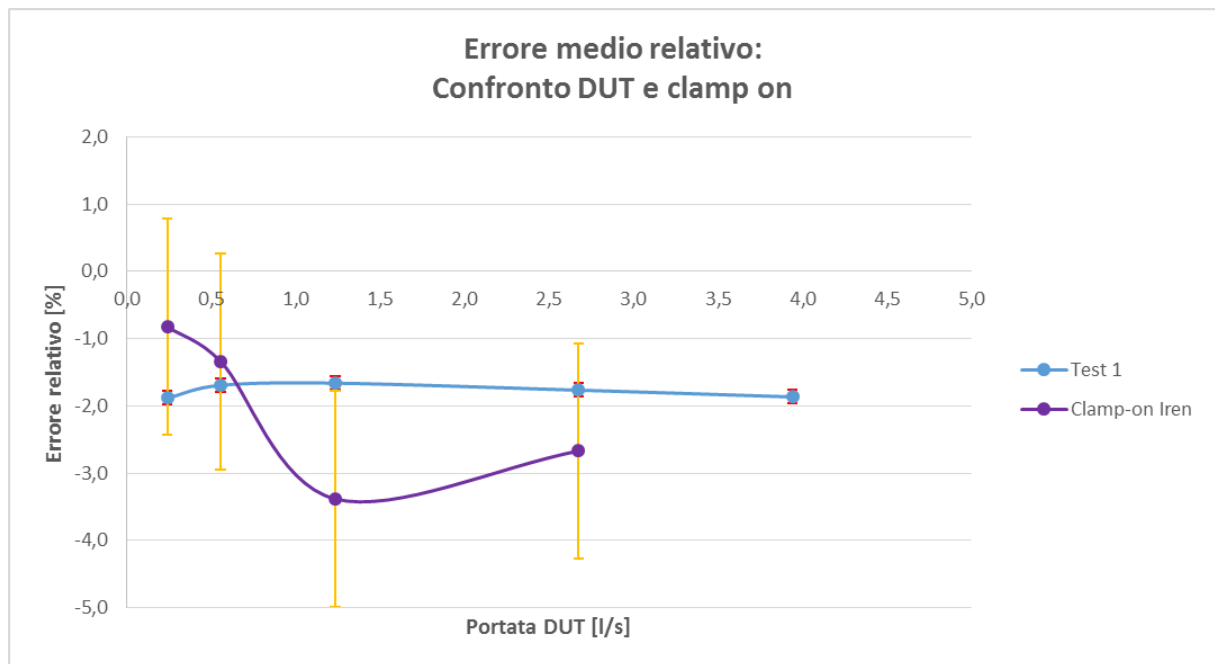


Figura 98: Confronto errori trovati nel test 1 e con il clamp-on Iren e relative barre d'incertezza

Come mostrato in Figura 98, si osservano differenze elevate tra gli errori relativi ottenuti in laboratorio e quelli ottenuti in campo, anche dell'ordine del 2%; ciò può essere dovuto, verosimilmente, ad una procedura non completamente automatizzata per le prove in campo, alla precisione degli operatori e all'impossibilità di leggere contemporaneamente tutti i valori da registrare, oltre che all'elevata incertezza associata alle misure di portata con sensori clamp-on. Inoltre, le ragioni di tali scostamenti potrebbero anche essere ricercate nella differenza tra effettive condizioni operative (installazione) e condizioni di misura realizzate in laboratorio e nella stabilità del misuratore stesso.

8. Conclusioni

La ricerca della deriva dell'errore di misura, seguita all'interno dell'elaborato, è consistita in tre fasi:

- individuazione del *data set* di contatori di calore e normalizzazione dei dati;
- applicazione di vari metodi di indagine statistica sui consumi di energia termica;
- verifiche sperimentali sulla taratura dei misuratori selezionati nella prima fase.

Il criterio di selezione dei contatori di calore, costruito in modo da individuare gli strumenti con maggiore probabilità di presentare deriva dell'errore di misura, è composto dai seguenti passaggi:

1. Calcolo dei *consumi specifici annuali* per tutto il data set di contatori:

$$q = \frac{E_{th,annua}}{V * GG} = \left[\frac{kWh}{m^3_{risc} * K} \right]$$

dove con energia termica *annua* si intende la sommatoria dei consumi mensili ad uso riscaldamento per ogni stagione termica, la quale per Torino va da ottobre ad aprile.

Questo indice permette di confrontare i consumi delle varie sottostazioni grazie alla destagionalizzazione sui gradi giorno (GG) ed alla normalizzazione per volumetria riscaldata (V).

2. Calcolo della retta di regressione lineare sui valori annuali dei consumi specifici rispetto al tempo e stima dei parametri di correlazione e pendenza.
L'andamento dei consumi in funzione del tempo è stato espresso attraverso equazioni del tipo:

$$E = E_0 + f_1(t) + f_2(t) + \dots + \varepsilon$$

In cui:

- E_0 rappresenta il termine fisso;
 - f_1 e f_2 dei termini variabili in funzione del tempo legati, oltre che al comportamento degli utenti, all'evoluzione dell'edificio ed alla deriva di misura strumentale;
 - ε è la variabile casuale che comprende la componente d'errore tipica dei fenomeni reali.
3. Limitazione all'accettabilità delle sottostazioni in base ai valori di correlazione e pendenza; si ricercano le serie storiche dei consumi caratterizzate da:
 - *alta pendenza* (limite inferiore arbitrariamente fissato a $\pm 0,3$), simbolo di un maggiore cambiamento dei consumi nel tempo;
 - *alta correlazione* (limite inferiore arbitrariamente fissato a 0,9), sintomo di una maggiore stabilità dei valori ed esclusione efficientamento energetico.

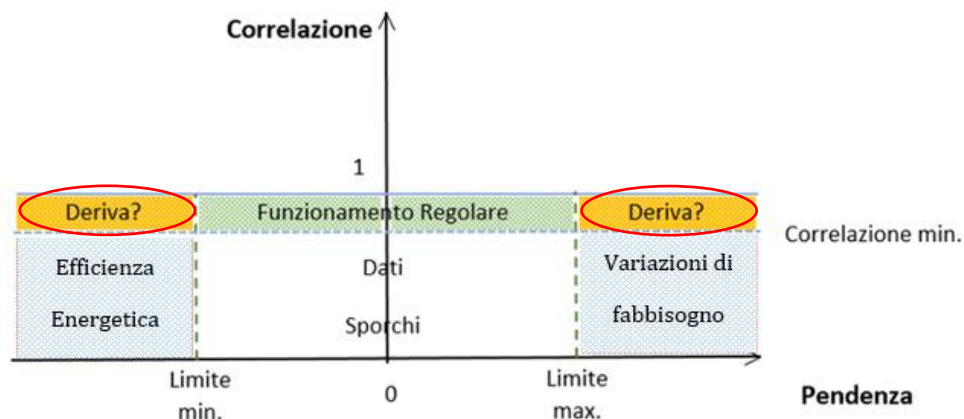


Figura 99: Schema qualitativo correlazione-pendenza in funzione delle possibili cause

Le ipotesi di validità del criterio sono:

- la deriva influenza il comportamento del misuratore in modo continuo e monotono nel tempo, portando ad un andamento dei consumi crescente/decescente lineare;
- l'efficientamento energetico introduce dei "gradini" nell'andamento dei consumi.

Nel caso in cui la deriva dovesse portare ad una situazione di discontinuità, attraverso questo tipo di analisi non si è in grado di individuarla.

4. Discriminazione edifici efficientati attraverso la valutazione del comportamento delle letture dei singoli contatori in funzione dei gradi-giorno e costruzione del diagramma CUSUM (o delle *somme cumulate dei residui*), in modo da poter rieffettuare le selezioni descritte nei punti precedenti escludendo o separando i periodi relativi al cambiamento strutturale.

L'andamento dei consumi è stato considerato come:

$$E_{th} = A * GG - \text{costante}$$

dove il termine noto negativo indica l'esistenza di un fabbisogno termico solo al superamento di determinate condizioni climatiche (Figura 100).

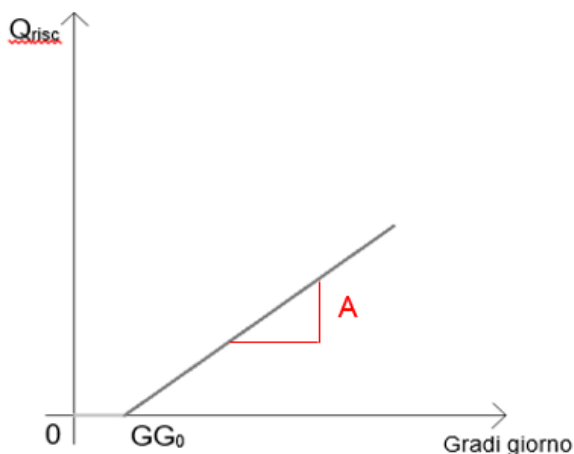


Figura 100: Andamento dei consumi di energia termica, in funzione dei gradi-giorno, per le sottostazioni del teleriscaldamento

Il diagramma *CUSUM* ha permesso di verificare che:

- la somma cumulata dei residui può denunciare delle differenze significative (strutturali) tra i consumi di periodi diversi, ma ciò non è sufficiente per affermare che la causa della modifica del comportamento del sistema sia la variazione delle capacità metrologiche dello strumento, ovvero la sua deriva;
- nelle sottostazioni in cui è avvenuta la sostituzione del contatore di energia termica, si è rilevata una differenza tra le pendenze delle rette di caratterizzazione, ovvero tra i consumi specifici, del periodo precedente e quello successivo alla sostituzione stessa. Questo differente comportamento può essere in parte dovuto a fenomeni di deriva, che nel tempo ha causato un peggioramento lento e continuo dell'accuratezza dello strumento. Possono, però, essere fatte solo supposizioni in quanto per attestare l'esistenza di una deriva servono verifiche di taratura dello strumento periodiche ed il monitoraggio nel tempo del suo errore di misura.

Invece, dalle verifiche sperimentali puntuali sulla taratura dei misuratori di portata selezionati attraverso il metodo prima descritto, risulta che:

- le verifiche effettuate in campo con il misuratore clamp-on di Iren non consentono di apprezzare il livello di incertezza delle singole letture legato al solo contatore, presentando degli errori relativi grandi e molto variabili, e quindi di poter formulare opinioni in merito all'esistenza di fenomeni di deriva nel tempo o di una eventuale staratura dello strumento stesso.

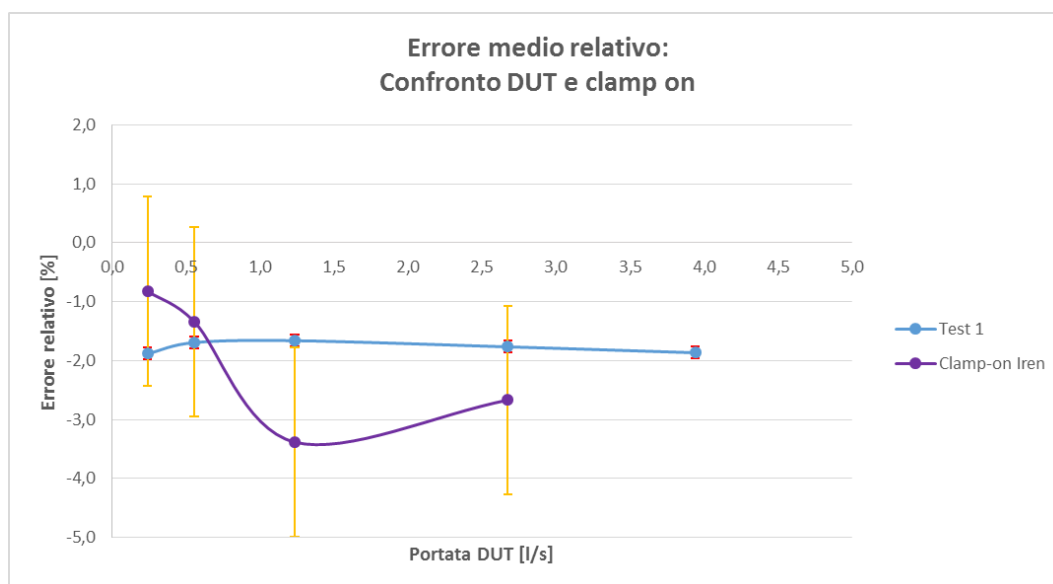


Figura 101: Confronto errori trovati nel test 1 e con il clamp-on Iren e relative barre d'incertezza.

Il misuratore clamp-on, infatti, viene solitamente usato da Iren per effettuare delle indagini di tipo qualitativo e funzionale. Tra i numerosi fattori di disturbo per la misurazione si possono annoverare: l'impossibilità di attendere dopo ogni variazione dei parametri che il flusso si sia nuovamente stabilizzato, la non simultaneità nella registrazione dei dati, le diverse modalità di installazione del sensore clamp on e la sua l'incertezza etc.

Si consigliano, quindi, ulteriori approfondimenti.

- il sensore verificato presso l'impianto nazionale di riferimento dell'INRIM presenta un'ottima ripetibilità ed un ristretto intervallo di variazione dell'errore relativo nelle varie condizioni di misura in cui sono stati effettuati i test, motivo per cui le curve ottenute possono essere considerate come delle rette orizzontali. Queste, compaiono tutte al di sotto dello zero (Figura 102), fuori dal range dichiarato dal costruttore, indicando che il sensore ha misurato meno di quanto avrebbe dovuto. Il criterio di selezione sopra definito sembrerebbe dunque confermato quanto meno da questa evidenza sperimentale.

Possibili cause del fenomeno possono essere ricercate nei lenti fenomeni di deriva metrologica nel tempo o nelle diverse condizioni operative e di installazione rispetto a quelle cui il contatore era soggetto nella pratica e per cui era stato tarato. Nelle prove di verifica a temperatura e pressione ambiente ed in parte anche in quelle a più elevata temperatura, i limiti imposti dalla direttiva MID sono tuttavia rispettati.

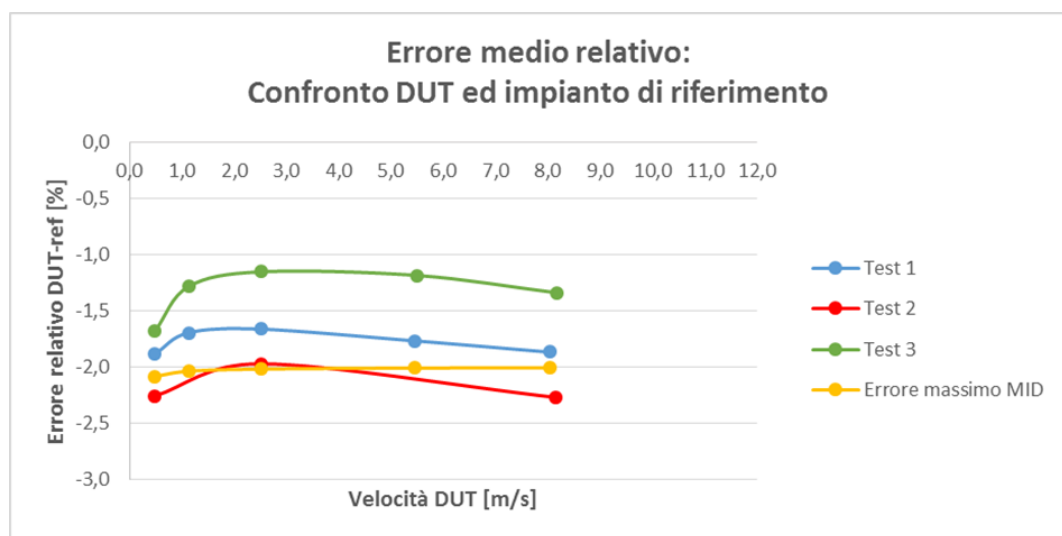


Figura 102: Confronto test e limite MID - Errore medio relativo al variare della portata

Si vede, inoltre, che sia la temperatura che lo sporcamento interno delle tubazioni sembrerebbero indurre ad un effetto peggiorativo delle prestazioni metrologiche dello strumento.

- per i tredici contatori soggetti alle verifiche di taratura da parte dell'Organismo di Ispezione di Consorzio Servizi Qualificati (CSQ) vale che *"Il sensore di flusso del contatore di calore in prova opera secondo le indicazioni del fabbricante ed all'interno del range di funzionamento dichiarati dallo stesso"*. [29]

9. Possibili sviluppi futuri

Ulteriori approfondimenti possono essere svolti a seguito delle indagini proposte in questo elaborato, ad esempio:

- costruzione di una nuova metodologia di selezione delle sottostazioni in base ai valori del coefficiente di determinazione R^2 , ricavato dalle rette di regressione sui consumi di energia termica in funzione dei gradi giorno (vedi paragrafo 6.4 Discriminazione edifici efficientati). Si potrebbero scegliere, infatti, tutte le sottostazioni che presentano i valori più alti di R^2 al fine di trovare casi molto ben aderenti al proprio modello di caratterizzazione energetica nei quali potrebbe essere più semplice vedere l'effetto legato ad una eventuale deriva della misura nel tempo.
- costruzione di nuova metodologia di selezione delle sottostazioni in base ai valori della pendenza della retta di regressione, calcolata sui dati ottenuti attraverso la tecnica di differenziazione (vedi paragrafo 5.3 Applicazione: Metodo della differenziazione). Questo approccio permetterebbe di individuare trend di decrescita costanti nel tempo, corrispondenti ai casi con pendenza quasi nulla della retta di regressione, che potrebbero essere sintomo di deriva della misura.
- caratterizzazione energetica di tutte le sottostazioni, in funzione dei GG, per valutare i cambiamenti strutturali nel modo di consumare energia dei vari sistemi e l'evoluzione del parco edilizio negli anni (vedi paragrafo 6.4.1 Ricerca della variazione nei sistemi).
- caratterizzazione energetica di tutte le sottostazioni in cui è stato sostituito il contatore, in funzione dei GG, per avere confronti ed eventuali conferme sulla modifica del modello collegata alla sostituzione stessa del misuratore (vedi paragrafo 6.5 Sostituzione del contatore), di cui la deriva dell'errore di misura potrebbe essere una delle cause.
- ulteriori verifiche presso il laboratorio di taratura dei misuratori di portata INRIM (vedi Paragrafo 7.2.1 Procedura di verifica laboratorio INRIM) su contatori a campione, scelti in tutte e quattro le aree tracciate in Figura 35, in modo da confrontare gli errori relativi ad ognuna di esse.

Riferimenti bibliografici

- [1] N. Rossi, *Manuale del Termotecnico*, Seconda ed. 2003.
- [2] Università degli studi di Cassino, “Gli strumenti di misura, cap. II,” in *Contabilizzazione portata dei liquidi*, .
- [3] C. Sacconi, A. Bianchini, and M. Pellegrini, “Misuratori di portata - Modulo 4.2,” in *Corso di strumentazione ed automazione*, pp. 1–87.
- [4] Maddalena S.p.a., “Misuratore di portata ad ultrasuoni.”
- [5] Wikipedia, “Piezoelettricità.” .
- [6] Spirax-Sarco S.r.l., “Misuratore di portata ed energia ad ultrasuoni transit-time serie UTM10 - Istruzioni di installazione e manutenzione,” pp. 1–132, 2016.
- [7] Emerson, “Misuratori di portata magnetica.” [Online]. Available: <http://www.emerson.com/it-it/automation/measurement-instrumentation/flow-measurement/about-magnetic>.
- [8] Bio Mass Impianti (BMI), “Misuratori di portata ad induzione elettromagnetica - Manuale di installazione,” 2008.
- [9] R. Mendolicchio, “I contatori di calore.” .
- [10] M. Badami, “Strumenti di misura - Dispense,” 2018.
- [11] ARERA, “Documento per la consultazione 252/2016/R/TLR.” 2016.
- [12] F. Soma, “La contabilizzazione del calore.”
- [13] Gazzetta ufficiale dell'Unione Europea, “Direttiva 2004/22/CE,” vol. 2003, no. 9, pp. 1–80, 2004.
- [14] Ministero dello sviluppo economico, “Decreto 30 ottobre 2013, n. 155,” 2014.
- [15] Ministero dello Sviluppo Economico, “Decreto 21 aprile 2017, n. 93,” pp. 1–33, 2018.
- [16] M. D. Isola, P. Vigo, G. Ficco, and L. Celenza, “Analisi e caratterizzazione metrologica dei sistemi di misura delle reti termiche distribuite,” 2015.
- [17] Wikipedia, “Stabilità Metrologica.” .
- [18] OIML, *International Vocabulary of Metrology (VIM)*, 3rd ed. 2007.
- [19] *UNI EN ISO 10012:2004*. .
- [20] T. Putignano, “Simulazione di un flusso confinato con moto di swirl mediante codice di calcolo open-source,” 2014.
- [21] Tecnovaht, “Fat flow averaging tube.” [Online]. Available: <https://tecnovaht.it/fat-flow-averaging-tube/>.
- [22] Wikipedia, “Serie storica.” .
- [23] S. Celant, “L’analisi delle serie storiche: un’introduzione alle tecniche statistiche classiche.”
- [24] G. Marliani, “L’approccio classico per l’analisi delle serie storiche,” in *Statistica Economica*, pp. 1–46.
- [25] S. Celant, “Analisi classica delle serie storiche.”

- [26] P. Gabriele, E. Giaccone, and S. Mancò, *Dispense del corso di Gestione dei Sistemi Energetici*. 2017.
- [27] E. Biele, D. Di Santo, and G. Tomassetti, "Analisi dell'impatto delle valvole termostatiche sui consumi finali degli utenti collegati alle reti di teleriscaldamento dei Comuni montani delle zone climatiche E ed F," 2015.
- [28] Endress+Hauser, "Istruzioni di funzionamento Proline Prosonic Flow 93T - Portatile. Sistema a ultrasuoni, portatile per la misura di portata." 2017.
- [29] Organismo di Ispezione CSQ, "Verifica dei contatori di calore sul luogo di funzionamento," 2018.
- [30] INRIM, "Procedura taratura misuratori di portata," 2017.