

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE
CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA
ENERGETICA

TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN
INGEGNERIA ENERGETICA

**ANALISI ENERGETICA DI RETI
DI TELERISCALDAMENTO:
CONTROLLO PER MEZZO DI
APPROCCIO QUALITATIVO E
QUANTITATIVO**

RELATORE: Prof. Michele Decarli Dipartimento di
Ingegneria Industriale

CORRELATORE: Prof. Ferenc Kalmár Facoltà di
Ingegneria Università di Debrecen

LAUREANDO: Federico Scanagatta

ANNO ACCADEMICO 2015-2016

SOMMARIO	1
1 INTRODUZIONE ALLA TESI	2
2 INTRODUZIONE AL TELERISCALDAMENTO [2].....	4
2.1 Le basi del teleriscaldamento.....	4
2.1.1 Combustibili, Recupero di calore ed Energie Rinnovabili.....	5
2.1.2 Teleraffrescamento	6
2.2 Esigenze e vantaggi essenziali del teleriscaldamento	7
2.2.1 Soddisfare il fabbisogno energetico delle utenze	7
2.2.2 Una tecnologia che protegge l'ambiente	9
2.2.3 Economie di scala	10
2.2.4 Inquinamento a livello locale	10
2.2.5 Implicazioni su larga scala	11
2.3 Principali sfide da affrontare.....	12
2.3.1 Mancanza di attenzione al cliente.....	13
2.3.2 Bassa Efficienza	14
2.3.3 Sovradimensionamento e squilibrio fra domanda e offerta	17
2.3.4 Riduzione della domanda.....	18
2.3.5 Amministrazione scorretta e povera governance	21
2.3.6 Conclusioni	22
3 DATI CLIMATICI.....	23
3.1 Sottoperiodi di riscaldamento.....	24
3.1.1 Suddivisione per fasce temporali	24
3.1.2 Suddivisione per temperatura.....	25
4 DISSIPAZIONI DI CALORE DELLA RETE	26
4.1 Dissipazioni per tubi di mandata e ritorno dello stesso diametro interrati	27
4.2 Dissipazioni per tubi di mandata e ritorno di diametro differente interrati	29
4.3 Dissipazioni per tubi di mandata e ritorno dello stesso diametro in canale	31
4.4 Dissipazioni per tubi di mandata e ritorno di diametro differente in canale	32
4.5 Dissipazioni nella rete esistente	33
4.6 Calcolo della dissipazione termica stagionale	34
5 FABBISOGNO ENERGETICO POMPE	35
5.1 Perdite di carico della rete	35
5.2 Potenza pompe e fabbisogno energetico stagionale	39
6 METODOLOGIE DI CONTROLLO DEL SISTEMA [2]	40
6.1 Controllo qualitativo	41
6.1 Controllo quantitativo	44

7 SITO ANALIZZATO	46
7.1 Tipologie edifici	47
7.1.2 Edifici tipo A	47
7.1.2 Edifici tipo B.....	48
7.1.3 Edifici tipo C.....	48
7.1.4 Edificio tipo D	49
7.1.5 Edificio tipo E.....	50
8 FABBISOGNO TERMICO STAGIONALE	51
9 CONFIGURAZIONI GEOMETRICHE DI RETE SIMULATE	52
9.1 Rete di teleriscaldamento esistente.....	52
9.2 Reti alternative ipotizzate	53
9.2.1 Reti ramificate	53
9.2.2 Rete Tichelmann.....	55
9.2.3 Tubazioni utilizzate.....	56
10 ANALISI DELLE SIMULAZIONI EFFETTUATE.....	59
10.1 Effetti dei metodi di controllo impiegati	60
10.1.1 Perdite di calore	60
10.1.2 Perdite di carico	62
10.1.2 Fabbisogno di energia primaria.....	64
10.2 Effetto della variazione di ΔT nominale fra mandata e ritorno.....	65
10.2.1 Perdite di calore	65
10.2.2 Perdite di carico	69
10.2.3 Fabbisogno di energia primaria.....	70
10.3 Effetti della temperatura del fluido termovettore in mandata.....	72
10.3.1 Perdite di calore	72
10.3.2 Perdite di carico	74
10.3.3 Fabbisogno di energia primaria.....	76
10.4 Metodi di posa impiegati	78
10.4.1 Posa direttamente nel terreno e posa in canali	78
10.4.2 Posa in tunnel della rete esistente	80
11.5 Differenti configurazioni di rete analizzate	81
10.5.1 Perdite di calore	81
10.5.2 Perdite di carico	83
10.5.3 Fabbisogno di energia primaria stagionale	85
11 CONCLUSIONI	87
APPENDICE A	91
APPENDICE B	94

APPENDICE C	95
APPENDICE D	96
APPENDICE E	101
APPENDICE F	103
APPENDICE G	109
BIBLIOGRAFIA	115

SOMMARIO

In questo elaborato si presenta uno studio dei possibili approcci al controllo di una rete di teleriscaldamento. Sono state inoltre effettuate una serie di analisi energetiche per andare ad investigare i fabbisogni di energia primaria stagionale e l'efficienza energetica di una sezione della rete di teleriscaldamento di Debrecen, città ungherese. Gli approcci considerati sono denominati qualitativo e quantitativo e si differenziano a seconda dei parametri in utilizzo per il controllo della rete in condizioni di carico parziale. Oltre alla rete esistente sono state inoltre studiate tre configurazioni alternative che si distinguono per una diversa geometria delle condotte.

Per analizzare le diverse soluzioni proposte si è costruito un modello per mezzo di foglio di calcolo, con il quale si sono valutati diversi casi di studio differenziati in base ad una serie di parametri di interesse.

Dal punto di vista energetico si è osservato come l'approccio quantitativo ottenga le migliori prestazioni; il controllo qualitativo presenta efficienze paragonabili solo in alcuni dei casi studiati, ma ha il vantaggio di essere di più semplice applicabilità. Per questi motivi si è concluso che il controllo di una rete di teleriscaldamento è un problema di ottimizzazione, dove l'impiego di un metodo misto permette di ottenere un buon bilancio fra applicabilità ad una rete reale ed efficienza di distribuzione elevata.

Dall'analisi delle configurazioni di rete proposte si è riscontrata la correlazione fra perdite di calore e di carico con la lunghezza della rete e, in misura minore, con il diametro medio delle condotte. Per queste motivazioni la rete meno estesa fra le alternative analizzate è risultata la più efficiente.

1 INTRODUZIONE ALLA TESI

La compilazione di questo elaborato è il risultato di un interesse nei confronti della tecnologia del teleriscaldamento e dalla ricerca della massima efficienza e delle migliori prestazioni nella fornitura di calore alle utenze. Il teleriscaldamento, o District Heating, è una forma di riscaldamento che consiste nella distribuzione di energia termica sotto forma di acqua calda, acqua surriscaldata, o di vapore da una o più centrali di produzione di grande taglia alle abitazioni, per mezzo di una rete che prevede sia la mandata del fluido termovettore che il ritorno dello stesso alla centrale. Questo approccio permette un utilizzo più efficiente dell'energia primaria, grazie alla produzione di calore in grandi centrali cogenerative, e riduce l'impatto sull'ambiente per via delle ridotte emissioni e dell'utilizzo di fonti energetiche rinnovabili, quali le biomasse, il solare termico e la geotermia dove disponibile. Come ogni altra tecnologia anche il teleriscaldamento presenta una serie di svantaggi rispetto a sistemi alternativi; il costo del calore consumato dall'utente finale, in particolare, viene influenzato dalle dispersioni termiche negli estesi circuiti primari e secondari di distribuzione del fluido termovettore. La riduzione di queste perdite rimane un aspetto fondamentale nella costruzione e nelle fasi operative di ogni sistema di teleriscaldamento.

Lo scopo della tesi consiste nell'andare ad investigare la rete esistente e diverse configurazioni di rete alternative per il teleriscaldamento di un quartiere residenziale, localizzato nella municipalità di Debrecen, Ungheria. Le reti analizzate sono indirizzate al solo riscaldamento degli ambienti abitativi, in quanto la distribuzione di calore per l'approvvigionamento di acqua calda sanitaria (ACS) è presa in carico da una rete indipendente. Per ottenere i dati indispensabili per una significativa comparazione si è costruita una serie di fogli di calcolo nei quali, partendo dai dati di richiesta stagionale di calore per edificio, si sono ricavati indicatori di prestazione ed efficienza. Il calcolo delle perdite di calore e di carico in una rete di teleriscaldamento, fondamentali per l'efficienza, sono fortemente influenzati dalla portata di fluido termovettore esercita e dalla sua temperatura; per l'approvvigionamento della variabile domanda di calore delle utenze è possibile utilizzare differenti metodologie di controllo di portata e temperatura dei flussi di mandata e ritorno. In questo elaborato si è scelto di implementare l'utilizzo degli approcci qualitativo e quantitativo in modo da permettere un confronto fra due diverse filosofie di controllo della rete e da valutarne i loro pro e contro e la loro influenza sull'efficienza di rete.

Per esporre in modo chiaro e preciso l'approccio alla costruzione del modello di calcolo viene fornita una descrizione sintetica passo passo dei seguenti capitoli:

- Introduzione al teleriscaldamento: in precedenza alla trattazione squisitamente tecnica si fornisce un quadro d'insieme generale relativo alla tecnologia del teleriscaldamento; vengono evidenziati i vantaggi, in opera e potenziali, e le criticità, con particolare attenzione ai paesi in transizione economica dove i margini di miglioramento sono particolarmente ampi.
- Dati climatici: il dimensionamento del sistema di teleriscaldamento parte dalla definizione dei dati climatici dell'area di interesse; questo passo, necessario per la valutazione della domanda di calore, parte dalla descrizione delle condizioni ambientali incontrate durante la stagione fredda. Dividendo in fasce la stagione invernale, in base alla temperatura media esterna, si discretizza un problema che sarebbe altrimenti di difficile risoluzione in foglio di calcolo.
- Dissipazioni di calore della rete: vengono riportate le formule che descrivono le perdite di calore per conduzione e convezione presenti lungo la rete di distribuzione del fluido termovettore. Lo studio effettuato in questo elaborato prevede diversi metodi di posa delle tubazioni che si traducono in diversi procedimenti di calcolo delle perdite; tubi di mandata e di ritorno direttamente posati nel terreno presentano perdite calcolate in modo

fondamentalmente diverso da tubi posati in canali chiusi interrati. Si noti come la complessità dei calcoli viene accentuata per via del mutuo effetto isolante che viene a stabilirsi fra le condutture in posa adiacente.

- Fabbisogno energetico pompe: la movimentazione del fluido termovettore nella rete di distribuzione viene assicurata per mezzo di pompe; in questa sezione si quantificano le perdite di carico distribuite e localizzate e il relativo fabbisogno energetico stagionale per il funzionamento dell'impianto di teleriscaldamento.
- Metodologie di controllo del teleriscaldamento: per assicurare la adeguata fornitura di calore alle utenze in condizioni di continua variazione di richiesta, e possibile fare uso di diversi tipi di controllo dell'output termico della rete; in questo elaborato si studiano ed utilizzano il metodo qualitativo, che controlla la temperatura di mandata e ritorno mantenendo la portata costante, e il metodo quantitativo, che mantiene la temperatura di mandata costante variando la portata e la temperatura di ritorno. Entrambi gli approcci richiedono calcoli di tipo ricorsivo per ricavare le curve di controllo di portata e/o temperatura.
- Sito analizzato: vengono introdotte le utenze del quartiere in analisi servite dal sistema di teleriscaldamento cittadino, con particolare attenzione al loro posizionamento geografico e alla loro domanda di potenza di picco prevista.
- Fabbisogno termico stagionale: aggregando i dati climatici e le caratteristiche delle abitazioni servite, si ottengono le valutazioni stagionali di domanda di calore da esercire nella rete. In questa sezione si riportano i necessari passaggi che traducono le potenze richieste dalle utenze, durante la stagione invernale, in energia esercita.
- Configurazioni geometriche di rete simulate: viene riportato il tracciato della rete di distribuzione dell'acqua calda di mandata e di ritorno esistente e le configurazioni di rete alternative studiate. Oltre alle particolarità e alle logiche seguite nella scelta delle geometrie, si riportano anche le caratteristiche delle condutture impiegate.
- Analisi delle simulazioni effettuate: le simulazioni sono state effettuate non solo rispetto alle metodologie di controllo impiegate (qualitativo e quantitativo), ma anche al variare di una serie di parametri; i diversi casi di studio sono infatti identificati da variazioni di temperatura di mandata, pari a 90 80 e 70°C e da variazioni di differenza di temperatura nominale fra mandata e ritorno (30, 20 e 10°C). Questo fa sì che il totale dei casi di studio analizzati ammonti a 18. In questa sezione si vanno a riportare i più importanti risultati ottenuti e le più interessanti osservazioni effettuate.

2 INTRODUZIONE AL TELERISCALDAMENTO [2]

Il teleriscaldamento rappresenta uno fra i più importanti metodi di produzione di calore, in particolare per le economie in transizione, in quanto può fornire ad intere città calore e potenza a buon mercato e a basso impatto sull'ambiente. Nonostante questi presupposti, quadri normativi inadeguati e inefficiente utilizzo delle reti, soprattutto in paesi in transizione, fanno sì che molti impianti di teleriscaldamento fronteggino serie difficoltà tecniche e finanziarie che non permettono di realizzare appieno il potenziale di questa tecnologia. In questa introduzione ci si concentra principalmente sui paesi dell'ex Unione Sovietica, altrimenti noti come paesi in transizione economica, cosa che ci permette di ottenere una visione d'insieme pertinente allo studio effettuato in questo elaborato; Altri stati OCSE sono nominati a titolo di paragone per evidenziare le differenti normative e tecnologie impiegate importanti per lo sviluppo del settore del teleriscaldamento nei paesi in transizione.

2.1 Le basi del teleriscaldamento

Il teleriscaldamento è un sistema di produzione e dispacciamento di calore centralizzato tipicamente utilizzato in aree urbane. Un sistema di teleriscaldamento tipicamente consiste in una o più centrali di produzione di calore, una rete di distribuzione e tubazioni di ritorno del fluido termovettore. Le centrali di possono produrre unicamente calore o simultaneamente produrre sia calore che energia elettrica (la cosiddetta cogenerazione). Anche soluzioni quali i processi industriali energivori e centrali di incenerimento di rifiuti urbani possono fornire, almeno in parte, il calore necessario per il sistema di teleriscaldamento. Questi sistemi possono soddisfare il fabbisogno di calore di zone residenziali, commerciali e industriali; tipicamente gli edifici residenziali richiedono calore per riscaldamento dei volumi abitativi e per acqua calda sanitaria, mentre le industrie necessitano di acqua calda e vapore. La *Figura 2.1* riporta i classici fornitori e recipienti di calore in un sistema di teleriscaldamento.

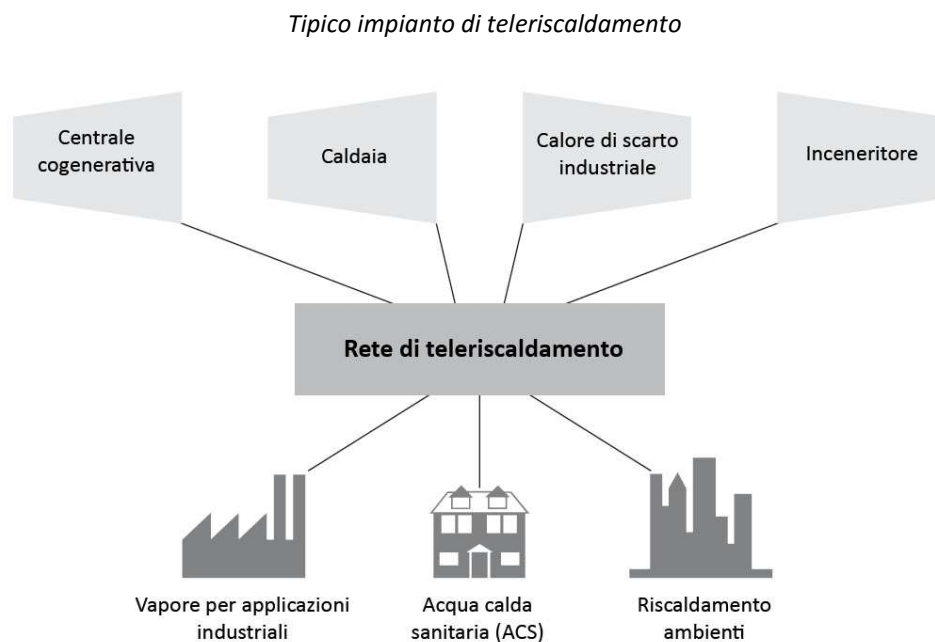


Figura 2.1 - "Coming in from the cold", IEA, 2004, pag.36

2.1.1 Combustibili, Recupero di calore ed Energie Rinnovabili

I sistemi di teleriscaldamento possono utilizzare una varietà di combustibili e fonti di calore. Gas naturale, carbone, olio combustibile e combustibili rinnovabili come le biomasse e rifiuti possono tutti servire come fonte di calore in caldaie per teleriscaldamento e in centrali cogenerative, ed è possibile affiancarli ad un recupero del calore di scarto generato in processi industriali. Alcune centrali operano o possono operare utilizzando combustibili multipli; questo è particolarmente vero nelle caldaie per la sola produzione di calore. Per esempio, una centrale di produzione di calore potrebbe bruciare biomassa con un supplemento di gas o carbone quando le temperature ambientali sono al minimo stagionale, ovvero quando la richiesta raggiunge il massimo; un'altra alternativa è rappresentata dall'utilizzo di gas naturale e oli come combustibili supplementari di emergenza. Nella maggioranza dei casi, per applicazioni di teleriscaldamento si hanno molteplici centrali di produzione di calore e una combinazione di combustibili e fonti di calore utilizzate.

La generazione di energia elettrica è spesso la più importante sorgente di calore di scarto; la cogenerazione permette di catturare e utilizzare parte di questo calore altrimenti sprecato. Paesi con economie in transizione tendono a sfruttare in modo carente la cogenerazione rispetto alla media OCSE avendo di conseguenza una ridotta quantità di calore prodotta per mezzo di processi cogenerativi. Questo rappresenta una occasione persa nella ricerca della riduzione di emissioni e costi. Nei paesi dell'Europa centrale la cogenerazione viene utilizzata per la produzione del 50-75% del calore totale, mentre nei paesi dell'ex Unione Sovietica (ex-SU) questi valori scendono al 30-50%. Anche processi industriali quali la produzione di vetro possono essere preziosi fonti di calore per sistemi di teleriscaldamento. Per quanto vi siano molti esempi di recupero di calore industriale di scarto in paesi in transizione, vi è ancora una grande possibilità di crescita.

Tabella 2.1 – Produzione di calore per combustibile (in %)

Zona	Gas	Carbone	Derivati del petrolio	Fonti rinnovabili	Altro
Media economie in transizione	61	29	8	2	0
Media dell'Europa Centrale	29	61	8	2	0
Paesi dell'ex Unione Sovietica	64	26	8	2	0
Media sud-est Europa	56	14	28	1	0
Europa OCSE	36	40	5	17	2
Totale OCSE	41	34	7	17	2

La maggior parte dei paesi con economia in transizione stanno espandendo il loro uso delle fonti energetiche rinnovabili applicate al teleriscaldamento, anche se quest'ultime ancora rappresentano solo una piccola parte del totale. L'utilizzo della biomassa rappresenta il più importante fra gli apporti dati dalle fonti rinnovabili ed è particolarmente comune nella regione del Mar Baltico e la Bielorussia. Il teleriscaldamento geotermico è invece comune in diverse regioni della Russia, ad esempio le isole Curili, la Kamchatka e nel Caucaso del Nord. La *Tabella 2.1* riassume la produzione percentuale per tipo di combustibile in diversi stati ed economie. Questi dati analizzano solo l'utilizzo di combustibile primario per unità di calore venduto, non si tiene conto se il calore è prodotto per via cogenerativa o per mezzo di calore di scarto da processi industriali.

2.1.2 Teleraffrescamento

Il teleraffrescamento è il settore del mercato dell'energia centralizzata in maggiore crescita a livello mondiale. Molte sono le similarità con il teleriscaldamento: esso fornisce energia raffrescante prodotta in modo centralizzato a edifici residenziali, commerciali e industriali per l'alimentazione di applicazioni di condizionamento di ambienti, refrigerazione e per processi industriali. L'azienda fornitrice può produrre fluido termovettore freddo per mezzo di acqua calda o vapore prodotto dalle centrali addette al teleriscaldamento raffreddando acqua o altri fluidi per mezzo di processi di assorbimento. Pertanto, cicli ad assorbimento e teleraffrescamento rappresentano una opportunità per le aziende fornitrici per vendere calore a scopo di raffreddamento quando la domanda di calore stesso è bassa. Alternativi metodi di produzione di fluidi freddi comprendono l'utilizzo di compressori di grande taglia o per mezzo dell'utilizzo di acqua di mare; un singolo impianto può fare utilizzo di tecnologie multiple, per esempio un refrigeratore ad assorbimento alimentato ad acqua calda utilizzato per carichi medio-bassi può essere coadiuvato da sistemi ciclo frigorifero a compressione nelle fasi di picco di carico. L'utilizzo di soluzioni centralizzate di raffrescamento sono generalmente meno dannose per l'ambiente degli impianti singoli di bassa taglia alternativi, inoltre permettono di migliorare l'utilizzo della capacità riscaldante installata anche in periodi nei quali la richiesta di calore è minima, e per alcuni casi anche la rete di distribuzione, portando in generale ad un miglioramento della redditività del sistema.

L'utilizzo di sistemi di teleraffrescamento rimane raro in paesi in transizione; nonostante questo la maggioranza delle economie di transizione presenta un clima continentale con inverni freddi ed estati calde, pertanto vi è un forte potenziale per queste tecnologie nel futuro. In molti sistemi di teleriscaldamento localizzati in Europa centrale, dell'est e negli stati Baltici si è iniziato a considerare il teleraffrescamento come una valida opzione, in particolare per utilizzo commerciale, ovviamente per cogliere questa opportunità saranno necessari investimenti.

2.2 Esigenze e vantaggi essenziali del teleriscaldamento

Il teleriscaldamento ammonta ad un terzo del consumo totale di energia in Russia e in molte altre economie di transizione; inoltre esso rifornisce di calore fino al 70% delle abitazioni in Russia e nei Paesi Baltici. Pertanto risulta chiaro come un gran numero di utenze si affidino al teleriscaldamento per il loro benessere e la sopravvivenza. La comprensione dei vantaggi del teleriscaldamento, e in particolare la buona rispettosità all'ambiente di questa tecnologia quando ben applicata, può aiutare a motivare riforme di politica energetica. La cogenerazione e il teleriscaldamento infatti portano una riduzione delle emissioni globali di anidride carbonica del 3-4% rispetto alle alternative; a titolo di confronto, il protocollo di Kyoto mirava a ridurre le emissioni di gas serra nei paesi industrializzati del 5% nel periodo compreso fra il 1990 e il 2012. Il teleriscaldamento può anche contribuire a migliorare la sicurezza energetica grazie alla sua efficienza, all'utilizzo di combustibili prodotti localmente e alla sua flessibilità nella tipologia di carburante utilizzabili. Dato che il teleriscaldamento ha una parte così importante nell'economia dei paesi in transizione, le riforme in questo settore possono avere un impatto significativo sullo sviluppo economico.

2.2.1 Soddisfare il fabbisogno energetico delle utenze

Il teleriscaldamento è una fonte essenziale di energia per i paesi in transizione, la maggior parte delle quali hanno lunghe stagioni di riscaldamento a causa di lunghi inverni freddi. Esso rappresenta l'11% del consumo totale di energia in Europa Centrale e in Ucraina, e oltre il 30% in Russia e Bielorussia. Per questo motivo, sei dei più grandi sistemi di teleriscaldamento del mondo si trovano in Europa centrale e dell'est (*Tabella 2.2*).

Tabella 2.2 – Maggiori Impianti di teleriscaldamento per taglia (in Petajoule, PJ)¹

CITTÀ	VENDITE
MOSCA	281
SAN PIETROBURGO	96
KIEV	55
VARSAVIA	38
STOCCOLMA	33
SEOUL	32
BERLINO	31
NEW YORK	28
HELSINKI	24
SOFIA	22
PARIGI	21
VIENNA	18
MONACO	16
PRAGA	15
COPENAGHEN	15

¹ La tabella è basata su dati rilevati nella stagione invernale 2001-2002; Le rilevazioni per alcune città, in particolare quelle Russe, sono incomplete in quanto i dati non sono disponibili.

La *Figura 2.2* mostra l'importanza del teleriscaldamento in diverse economie in transizione. Il teleriscaldamento rappresenta la dominante, o almeno una delle principali, fonti di calore per la clientela residenziale nella maggior parte delle economie in transizione. Poiché la maggior parte di questi paesi non possono permettersi di sviluppare sistemi completamente nuovi di approvvigionamento termico nel breve-medio termine, il teleriscaldamento continuerà ad essere di vitale importanza per soddisfare le loro esigenze energetiche termiche delle utenze.

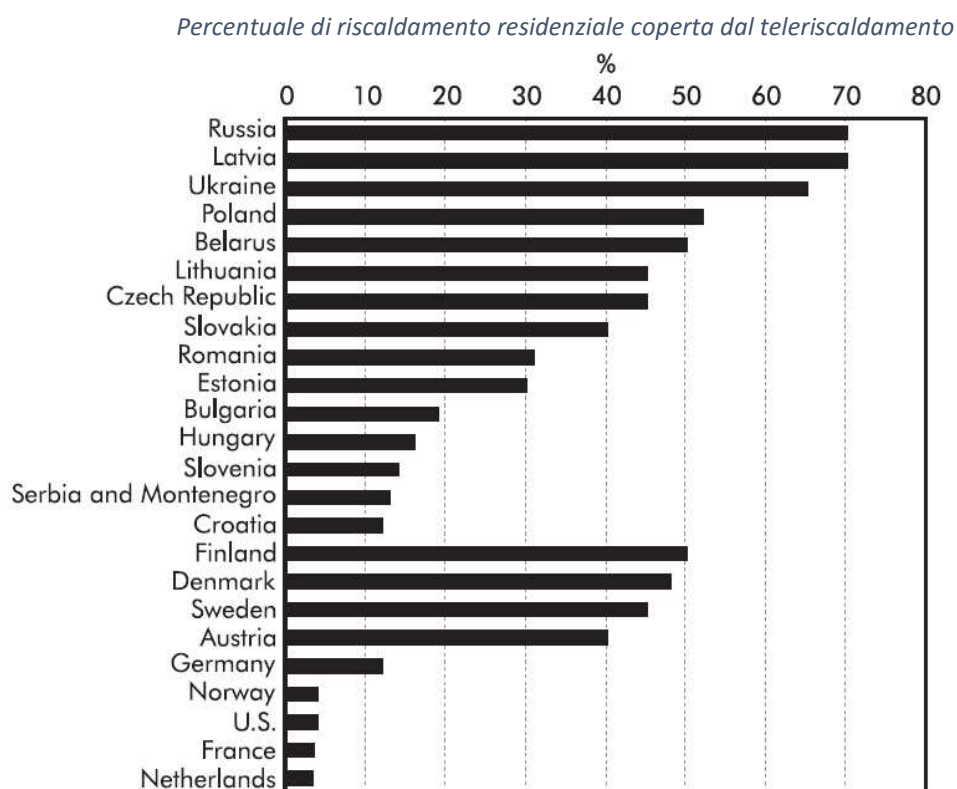


Figura 2.2 – “Coming in from the cold”, IEA, 2004, pag.41

Il teleriscaldamento è inoltre attraente dal punto di vista dei consumatori. Esso infatti libera gli utenti residenziali della spesa e delle complicazioni insiti nella manutenzione delle caldaie per singola utenza. Tende inoltre ad essere più sicuro e più affidabile rispetto alle piccole caldaie e può essere altamente competitivo rispetto ad altre fonti di calore se gestito correttamente, come in Scandinavia e in altre regioni OCSE. Per le utenze industriali, il teleriscaldamento permette di acquistare il calore senza i costi operativi e i costi di capitale insiti di un impianto in loco. Inoltre, con la crescita del teleraffrescamento, i sistemi centralizzati possono fornire una alternativa economica ed efficiente ai classici sistemi di condizionamento elettrici ad aria.

2.2.2 Una tecnologia che protegge l'ambiente

Se ben gestito, il teleriscaldamento può avere benefici ambientali ed economici significativi rispetto a soluzioni di riscaldamento e produzioni di acqua calda centralizzate a livello di edificio o di appartamento. Le economie di scala e l'elevato rendimento della cogenerazione svolgono un ruolo chiave nel creare questi benefici.

Dalla *Figura 2.3* si deduce come la cogenerazione può migliorare in modo significativo l'efficienza energetica e di conseguenza ridurre le emissioni. Essenzialmente la cogenerazione recupera il calore di scarto insito nella produzione di energia e lo riutilizza a fini di teleriscaldamento o per necessità industriali.

Comparazione di un sistema cogenerativo rispetto alla produzione separata (unità di energia)²

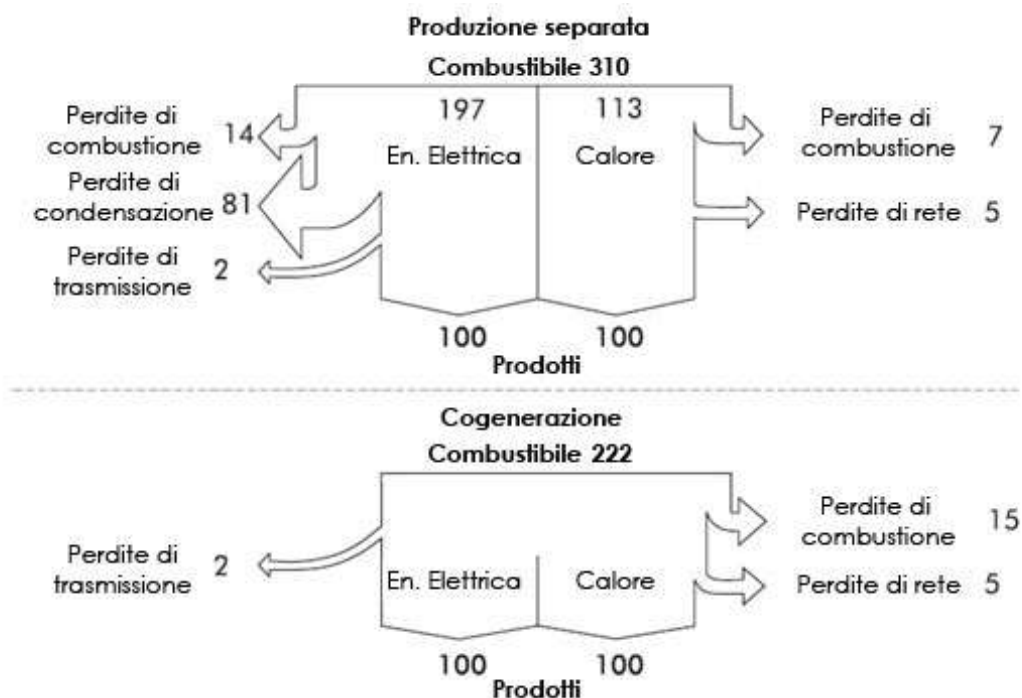


Figura 2.3 - "Coming in from the cold", IEA, 2004, pag.42

Il teleriscaldamento presenta un importante vantaggio ambientale rispetto a sistemi localizzati in quanto può utilizzare calore di scarto o calore ricavato dalla combustione di rifiuti. Oltre alla cogenerazione, il teleriscaldamento è in grado di recuperare il calore di scarto da processi industriali come la realizzazione di vetro, produzione di acciaio e lavorazione del latte. Nei paesi scandinavi vengono ampiamente utilizzati una varietà di prodotti di scarto per la produzione di calore, dai trucioli di legno ai rifiuti solidi

² Diagramma Sankey. La produzione di 100 unità di energia elettrica e di calore di questo esempio necessita di 310 unità di combustibile ad una efficienza del 64,5% per mezzo di una ordinaria centrale a gas a ciclo combinato e all'utilizzo di caldaie; Per mezzo di una centrale a gas a ciclo combinato cogenerativo si può raggiungere una efficienza del 90% necessitando pertanto di sole 222 unità di combustibile di partenza.

urbani. Anche negli stati baltici, in Bielorussia e altre economie di transizione i prodotti di scarto rinnovabili vengono sempre più utilizzati nella produzione di calore per teleriscaldamento.

In altre parole, il teleriscaldamento offre eccellenti opportunità per progetti di mitigazione delle emissioni di anidride carbonica previste nell'ambito del Protocollo di Kyoto e nel mercato delle emissioni europeo in quanto le fonti di emissione sono centralizzate. Questo accentramento a sua volta facilita il processo in corso di riduzione delle emissioni dei gas a effetto serra, in quanto consente ai fornitori del teleriscaldamento di integrare nuove tecnologie e l'utilizzo di calore di recupero nella rete in modo rapido ed efficace.

2.2.3 Economie di scala

Gli impianti di teleriscaldamento hanno generalmente rendimenti più elevati rispetto a caldaie di piccola taglia installate per edifici o singoli appartamenti a causa delle economie di scala. Questo è vero sia per centrali servite da caldaie per la sola produzione di calore che a maggior ragione per centrali cogenerative. I rendimenti delle caldaie di piccola taglia sono in aumento, ma le caldaie installate nelle economie in transizione per sostituire i sistemi di teleriscaldamento tendono ad avere bassi rendimenti. Allo stesso modo, sistemi esistenti hanno dimostrato che le centrali di produzione di calore di grande taglia mantengono mediamente un elevato rendimento anche dopo anni di servizio, in quanto sono generalmente meglio mantenute rispetto alle caldaie di dimensioni più contenute. La manutenzione di impianti di teleriscaldamento nelle economie in transizione rimane comunque problematico anche se è in via di miglioramento, in particolare in Europa centrale e nei paesi baltici. Nonostante le perdite di distribuzione delle reti di teleriscaldamento siano un problema in molte economie in transizione, quando si considerano le principali alternative in Europa centrale e dell'est si osserva che spesso non vi sono migliori alternative. Per esempio le perdite di distribuzione del gas naturale in alcune città della ex Unione Sovietica superano il 40%, un costoso spreco che crea anche un grave rischio per la sicurezza. Similarmente, la trasmissione di energia elettrica e le perdite di distribuzione sono piuttosto elevate negli stessi paesi che hanno elevate perdite di distribuzione nel teleriscaldamento. In Ucraina ad esempio, nell'anno 2003 il 19,6% dell'energia elettrica prodotta è stato perso nella sola trasmissione.

2.2.4 Inquinamento a livello locale

Il teleriscaldamento e la cogenerazione riducono le emissioni di particolato e altri inquinanti locali o regionali, come gli ossidi di azoto (NO_x) e il biossido di zolfo (SO_2), rispetto alle unità di riscaldamento individuali, in quanto tendono ad essere molto più efficienti a livello energetico e di combustione. Inoltre, è molto meno costoso e più pratico ridurre o catturare gli inquinanti in centrale che nelle piccole caldaie delle singole abitazioni. Il teleriscaldamento riduce anche l'inquinamento dell'aria all'interno delle abitazioni in quanto la produzione del calore è delocalizzata dall'utenza. Stoccolma offre un buon esempio dei benefici ambientali localizzati del teleriscaldamento: la fornitura di calore della rete di Stoccolma è aumentato di un fattore dieci nel periodo 1965-1990; su questo stesso periodo, le emissioni di anidride solforosa e particolato locali sono diminuite del 95% e 82%, rispettivamente.

2.2.5 Implicazioni su larga scala

Il teleriscaldamento può essere significativamente meno inquinante di forniture di calore di piccola taglia a causa delle maggiori efficienze riportate, la possibilità di utilizzare fonti di calore a bassa emissione di inquinanti e i sistemi di mitigazione delle emissioni. Uno studio affiliato all'IEA (International Energy Agency) relativo al teleriscaldamento e cogenerazione ha dimostrato come l'utilizzo di tecnologie di teleriscaldamento e di cogenerazione riducono le emissioni totali di anidride carbonica da combustione del 3-4% a livello globale rispetto ad un ipotetico mondo senza teleriscaldamento. La sfida per le economie in transizione sta nell'ottenere il massimo sfruttamento del potenziale di rispetto dell'ambiente e di efficienza del teleriscaldamento possibile, che richiederà nuovi approcci politici e di gestione. In questo contesto, è importante non dimenticare il valore delle infrastrutture esistenti. Nel Regno Unito, per esempio, il governo nazionale ha recentemente speso £50 milioni per incoraggiare nuovi progetti e applicazioni di teleriscaldamento per via dei benefici ambientali e sociali associati. Il carico termico esistente (perlopiù dovuto a caldaie per la produzione del solo calore) mette le economie in transizione in una posizione invidiabile per quanto riguarda la cogenerazione, in quanto la mancanza di richiesta di produzione di calore centralizzato limita il potenziale della cogenerazione in molti paesi occidentali.

2.3 Principali sfide da affrontare

Per ottenere tutti i vantaggi del teleriscaldamento è necessario affrontare a livello normativo i problemi che attualmente rallentano il progresso e minano la sostenibilità a lungo termine del settore. Le sfide fondamentali per il futuro del teleriscaldamento nei paesi in transizione includono la mancanza di attenzione alle richieste delle utenze, la bassa efficienza, l'eccesso di capacità che porta a uno squilibrio tra domanda e offerta, la mala gestione, e la scarsa coordinazione delle normative in gioco che in certi casi sfavoriscono la crescita di soluzioni quali il teleriscaldamento. Queste sfide contribuiscono ad impedire l'emergere di un settore teleriscaldamento più forte e sostenibile e hanno importanti implicazioni relative agli investimenti nel settore. La *Figura 2.4* mostra come questi problemi sono interconnessi e creano un circolo vizioso che mina le fattibilità economica e la competitività delle imprese di teleriscaldamento, mettendo a repentaglio la loro sostenibilità a lungo termine.

Principali sfide dei sistemi di teleriscaldamento nelle economie in transizione

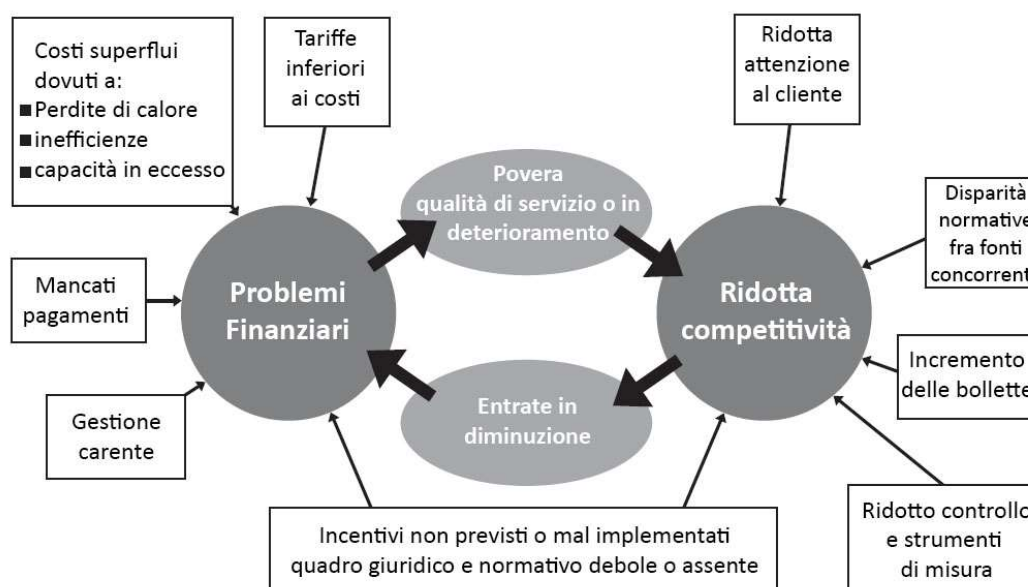


Figura 2.4 - "Coming in from the cold", IEA, 2004, pag.50

Negli ultimi venti-venticinque anni, gli stati hanno affrontato in modo diverso a queste sfide, pertanto oggi vi sono significative differenze regionali. È importante considerare che questo capitolo si concentra principalmente sulle difficoltà in cui versa il teleriscaldamento e non è destinato a fornire un quadro d'insieme equilibrato del funzionamento del teleriscaldamento nella data regione. Spesso si analizza lo scenario peggiore per illustrare al meglio problemi significativi, ma in qualche modo trascurati in altre zone. Naturalmente, molte economie in transizione hanno già effettuato cambiamenti per il meglio. Già dai primi anni 2000 in particolare, molti paesi in transizione hanno intrapreso riforme delle normative relative al teleriscaldamento con nuovo vigore.

2.3.1 Mancanza di attenzione al cliente

Buone pratiche commerciali sono fondamentali per la sostenibilità a lungo termine del teleriscaldamento in paesi in transizione. Tuttavia, al momento queste ultime non sono basate sulle richieste dei clienti e sulle loro preferenze, il che si traduce in una delle principali debolezze del settore. Questa situazione è certamente migliorabile. In Finlandia e in Svezia infatti, dove i clienti hanno a disposizione una vasta gamma di scelte per la fornitura di calore, essi scelgono spesso il teleriscaldamento per la sua comodità e prezzi competitivi, vantaggi che derivano da una gestione efficace (così come un quadro normativo adeguato).

La produzione del calore e la gestione del sistema, e non i clienti, sono spesso il focus primario dei gestori del teleriscaldamento nelle economie in transizione. Questo si verifica a causa delle povere capacità di gestione delle società che non mettono i clienti al primo posto, un approccio che porterebbe alla bancarotta la maggior parte delle aziende di qualsiasi settore nel lungo periodo. Facendo un passo indietro, è chiaro come la focalizzazione sulle attività di produzione è spesso causata da politiche che premiano la produzione stessa e danno pochi incentivi per il miglioramento del servizio ai clienti. Ad esempio, un approccio normativo che basa le tariffe sui costi più profitti con una carente revisione esterna incoraggia le imprese ad aumentare i costi e la produzione, a svantaggio del cliente. Allo stesso modo, l'introduzione di concorrenza prima che il mercato sia maturo può portare ad abuso di monopolio da parte delle aziende di teleriscaldamento, di nuovo ignorando l'importanza dei clienti.

I clienti richiedono un servizio poco costoso, semplice e affidabile. Per i consumatori industriali, il basso costo è di solito la richiesta principale, ma la semplicità rimane un fattore importante, in particolare per i piccoli produttori. L'affidabilità è sempre essenziale. Le caldaie multiple utilizzate per la produzione di calore per il teleriscaldamento sono spesso ben più affidabili delle alternative singole caldaie per la produzione in loco. Nei sistemi di teleriscaldamento ben gestiti, anche quando vi è una variazione della domanda, la qualità del prodotto rimane elevata, non andando pertanto ad intaccare la continuità dei processi industriali. Le utenze residenziali, d'altra parte, tendono a mettere l'accento sulla qualità del servizio. Essi richiedono di essere in grado di controllare la temperatura interna della casa e di scegliere quando richiedere calore alla rete, piuttosto che essere limitati alle stagioni di riscaldamento predeterminate. Anche la possibilità di risolvere problemi di servizio e di fatturazione in modo rapido e semplice svolge un ruolo nella percezione di un buon servizio. Il prezzo del servizio diventa un fattore importante soprattutto quando vi sono grandi differenze tra le possibili alternative: questo avviene, per esempio, quando i prezzi del gas restano sovvenzionati, mentre i prezzi del calore fornito aumentano, o quando l'azienda fornitrice sovrapprezza il servizio in modo significativo per coprire le loro inefficienze.

Ci sono numerosi esempi di scarsa attenzione al cliente. Ad esempio, in Repubblica Ceca e in gran parte dell'Europa centrale, gli investimenti degli anni '90 sono stati perlopiù concentrati sulla ristrutturazione dei sistemi produttivi obsoleti, piuttosto che sui miglioramenti di servizio richiesti dai clienti. È vero che i sistemi attuali sono moderni e più efficienti, ma i gestori ora stanno progettando nuovi investimenti perché le vendite sono diminuite in quanto i clienti sono passati ad altre fonti di calore. La necessità di avere un ritorno su questi investimenti ha messo pressione sui prezzi e ha ridotto la redditività. La mancanza di sistemi di misurazione peggiora ulteriormente la situazione, perché le aziende non hanno i dati per valutare le esigenze dei loro clienti. In Russia, la maggior parte delle aziende di teleriscaldamento non comunicano con la propria clientela: non sono infatti disponibili contratti diretti e contatti con i consumatori. Nella maggior parte dei casi, le aziende producono calore e richiedono pagamenti ad organizzazioni intermedie sulla base della quantità totale delle abitazioni collegate al servizio. Le utenze industriali sono invece meglio rappresentate in quanto hanno contatti diretti con la società di teleriscaldamento e possono avere una maggiore influenza sugli investimenti programmati. Mantenere bassi i prezzi può non essere la prima priorità della società fornitrice, in particolare se hanno

l'approvazione per un dati piani tariffari dato dagli organi regolatori. Una volta che le tariffe sono approvate, la società di teleriscaldamento non ha molti incentivi a ridurre i costi, approccio che, a lungo andare, riduce la competitività. In questi casi molti clienti spesso decidono di passare a fonti di calore alternative.

La ridotta attenzione al cliente è probabilmente la più grande debolezza del teleriscaldamento nel lungo termine. La tendenza che si osserva è quella di un graduale allontanamento dei consumatori dal teleriscaldamento, per quanto lentamente in gran parte delle economie in transizione. Questo calo può essere visto come un fenomeno temporaneo dovuto alle nuove alternative fornite ai consumatori e ad un conseguente riequilibrio del mercato, ma potrebbe anche portare ad una perdita di clienti difficilmente invertibile o addirittura irreversibile. Essendo questo un processo in atto, è bene chiedersi se questa tendenza possa invertirsi senza un forte intervento normativo per incoraggiare modelli di business più efficaci. Gli stessi organismi normatori possono applicarsi proattivamente per concepire norme che permettano di sfruttare al meglio i vantaggi del teleriscaldamento.

Tutto questo richiede un passaggio da un modello focalizzato sulla produzione ad un modello direttamente orientato al cliente sia all'interno società di teleriscaldamento, che negli enti regolatori e negli organismi di governo. Tale cambiamento assicura che i clienti ricevano un servizio di qualità, cosa che contribuisce ad aumentare il supporto a questa tecnologia da parte delle utenze e pertanto a sostenere e pagare il servizio di teleriscaldamento. Questo nuovo approccio inoltre consente ai fornitori del teleriscaldamento di migliorare l'equilibrio fra domanda e offerta, limitando i costi.

2.3.2 Bassa Efficienza

Il teleriscaldamento nelle economie in transizione tende ad essere meno efficiente che nei paesi dell'Europa occidentale e dell'America del Nord. La progettazione, scarsa manutenzione, attrezzature logorate, sistemi sovradimensionati, la mancanza di controlli e l'insufficiente isolamento delle tubazioni del liquido termovettore contribuiscono all'inferiore efficienza. In Europa centrale, anche la forte dipendenza dal carbone tende a produrre inefficienze, per quanto un numero sempre maggiore di sistemi si stanno convertendo alla combustione di gas naturale o biomassa.

Nei paesi che hanno seguito il modello "sovietico" di sviluppo economico, la fornitura di calore era altamente centralizzata, come anche per l'elettricità e il gas. I sistemi di teleriscaldamento esistenti nella maggior parte di questi paesi erano influenzati e basati su tecnologia sovietica.

Questa eredità tecnologica e di pianificazione, insieme con il costo storicamente basso delle forniture energetiche, ha ridotto l'incentivazione per l'introduzione di moderne tecnologie di efficienza energetica. Il grado di efficienza attuale varia da paese a paese e tra diverse regioni. Ad esempio, i paesi membri dell'UE hanno modernizzato negli ultimi anni molti sistemi di teleriscaldamento per mezzo dell'utilizzo di nuove tecnologie.

Tuttavia, è possibile trovare spazio per miglioramenti ovunque. La Banca Mondiale stima che i valori tipici di efficienza di una tipica centrale a cogenerazione raggiungono circa il 70-75% in Europa dell'est, rispetto al 80-90% nella parte dell'Europa occidentale. L'efficienza di vecchie caldaie per la sola produzione di calore è stimata circa al 60-80%. L'efficienza delle caldaie può essere aumentata all'85% per mezzo dell'introduzione di moderni sistemi di automazione e controllo, grazie alla sostituzione dei bruciatori e alla pulizia delle superfici della caldaia.

Anche le perdite di calore nella produzione, distribuzione e utilizzo finale nelle economie in transizione sono elevate rispetto all'Europa occidentale, come illustrato nella *Tabella 2.3* le perdite di calore cumulate fra la produzione, il trasporto e l'uso finale sono stimate tra il 35 e il 77% in Europa centrale, dell'est e dell'ex Unione Sovietica. In molti casi, le perdite reali sono difficilmente da stimare in quanto gli strumenti di misura sono insufficienti o inesistenti. Le perdite di calore sono generalmente elevate in estate, quando il sistema di teleriscaldamento produce solo acqua calda, e quindi funziona a regime fortemente parzializzato rispetto alla totale capacità. In inverno invece si produce calore sia per la richiesta di acqua calda sanitaria che per il riscaldamento degli ambienti. Ad esempio, le perdite stimate in Polonia ammontano al 10-15% in inverno, mentre in estate possono raggiungere anche 50%. È importante valutare queste perdite nel giusto contesto: anche l'efficienza dei sistemi di distribuzione del gas naturale può essere molto bassa, con perdite fino al 40% in alcune città.

Tabella 2.3 – Indicatori di prestazione per sistemi di teleriscaldamento

	Unità di misura	Europa centrale e dell'est, paesi dell'ex URSS	Europa occidentale
Consumo di calore alle utenze (energia spesa annualmente su spazio riscaldato)	kWh/m ³	da 70 a 90	da 45 a 50
Perdite di dispacciamento	% del calore fornito	da 15 a 25	da 5 a 10
Ricariche di fluido termovettore (quantità inserita annualmente su volume totale rete)	Ricariche annuali	da 10 a 30	da 1 a 5
Perdite sulla produzione totale	% di energia del combustibile	da 15 a 40	da 5 a 15

Le tubazioni di trasmissione e distribuzione del calore soffrono di corrosione interna ed esterna, portando a frequenti perdite. Le perdite di calore sono aggravate da un isolamento carente delle tubazioni, che spesso è di spessore scarso o comunque insufficiente. Tubi di trasmissione e distribuzione del calore di bassa qualità aumentano il costo del trasporto di calore. In Kazakhstan, per esempio, i costi di trasporto del calore arrivano ad essere percentualmente doppi dei costi totali di produzione classici dell'Europa occidentale.

Le perdite di calore dall'interno degli edifici stessi sono molto più elevate che in Europa occidentale e nel Nord America a causa di porte finestre con coefficienti di scambio termico elevato, fornitura disuniforme del calore all'interno dell'edificio, basse proprietà di isolamento termico delle pareti, sistemi di ventilazione mal progettati ed altri fattori. Le perdite di calore all'interno degli edifici in Europa dell'est sono di solito del 25-40% superiori ai valori di progetto, secondo le stime della Banca mondiale, e gli standard relativi ai valori di progetto sono in genere molto meno severi che in Occidente.

D'altra parte, il miglioramento dell'efficienza energetica negli edifici rappresenta una priorità in quasi tutte le economie di transizione. È previsto per il futuro che le perdite di calore degli edifici tendano a diminuire, per via dei sempre più comuni investimenti dei residenti per il miglioramento della efficienza energetica degli immobili. Le aziende fornitrici di teleriscaldamento devono tenerne conto di questo al fine di evitare investimenti inutili futuri.

I progressi nella ristrutturazione e ammodernamento di sistemi obsoleti varia significativamente da paese a paese. In particolare vari stati dell'Europa centrale e del Baltico hanno attuato programmi per riammodernare le reti di teleriscaldamento per mezzo di finanziamenti privati o grazie al sostegno di organizzazioni internazionali quali la Banca Mondiale o la Banca Europea per la Ricostruzione e lo Sviluppo. Nella maggior parte dei paesi saranno necessari ingenti investimenti per assicurare l'operatività dei sistemi di teleriscaldamento in condizioni competitive rispetto ad altre fonti di calore. La Banca Mondiale stima che sarebbe necessario un investimento di 25 miliardi di dollari nell'arco di un periodo di 5-7 anni per migliorare l'efficienza energetica nel teleriscaldamento del 20% nelle undici economie in transizione per i quali i necessari dati erano disponibili. Gli investimenti totali necessari sarebbero chiaramente ancora più elevati se i restanti paesi in transizione fossero inclusi nell'analisi.

2.3.3 Sovradimensionamento e squilibrio fra domanda e offerta

Gli impianti di teleriscaldamento nelle economie di transizione sono, nel complesso, in eccesso di capacità. In altre parole, presentano una infrastruttura di produzione e distribuzione che è più grande di quanto necessario per soddisfare la domanda attuale. In questa sezione si prende in esame più da vicino alle cause di questo eccesso di capacità e le implicazioni per la sostenibilità del settore. L'equilibrio tra domanda ed offerta è di primaria importanza: quando i sistemi hanno capacità in eccesso, i loro costi sono maggiori. Quando i sistemi vengono operati a capacità parziale le perdite sono percentualmente più rilevanti e il mantenimento stesso di un sistema di grandi dimensioni costa più del mantenimento di un sistema di più piccole dimensioni. Tali sistemi hanno anche costi fissi elevati, il che rende ancor più difficile ridurre i costi quando la domanda diminuisce.

Sistemi mal dimensionati tendono inoltre ad essere meno flessibili ed affidabili. Il bilanciamento dell'offerta sulla domanda su base giornaliera è basato sulla lettura delle previsioni meteorologiche del giorno successivo e sulla impostazione manuale dei bruciatori per ottenere il livello di produzione desiderato. Se questa stima di base è maggiore o minore della domanda effettiva, le utenze verranno più o meno riscaldate ottenendo condizioni diverse da quelle di target. Questa mancanza di flessibilità riduce l'affidabilità di questi impianti rispetto a sistemi più modulari con caldaie di più piccola taglia. Ridotta flessibilità e affidabilità, naturalmente, non solo rendono i sistemi di teleriscaldamento più difficili e costosi da gestire, ma riducono anche la soddisfazione del cliente. Le attuali normative nelle economie in transizione spesso premia la sovraccapacità, consentendo alle aziende di teleriscaldamento di ottenere maggiori profitti quando la capacità ed i costi sono elevati.

Le implicazioni dello squilibrio fra domanda e dell'offerta sono significativi anche a livello di produzione del calore. Se la taglia dell'impianto è eccessiva, la produzione del calore richiederà più carburante di quanto necessario in un sistema meglio dimensionato in quanto le caldaie e gli altri componenti del sistema sono meno efficienti in condizioni di carico parziale. Sistemi flessibili e ben controllati, con numerose caldaie di varia taglia, possono mantenere una elevata efficienza anche quando la domanda è bassa grazie alla possibilità date dallo spegnimento delle caldaie in eccesso, invece di ricorrere a funzionamenti a carico parziale.

Quando aziende di teleriscaldamento si trovano ad operare un sistema sovradimensionato, vengono poste sotto una maggiore pressione a vendere più calore per giustificare e coprire i costi della rete; allo stesso modo hanno meno incentivo a promuovere il risparmio energetico, sia presso i loro stabilimenti che a livello dell'utente finale. La generazione di quantità maggiori di calore aumenta le loro entrate, perché possono giustificare alle autorità di regolamentazione i costi del combustibile utilizzato. I margini di profitto garantiti alle aziende di teleriscaldamento sono spesso predeterminati in base ad una percentuale dei costi sostenuti, pertanto maggiori sono i costi, maggiore è il profitto. Per questo motivo gli investimenti necessari per la riparazione di perdite e, più in generale, sull'efficienza energetica, anche se altamente redditizi in linea generale, sono meno allettanti per una società che presenta un eccesso di capacità. Le aziende di teleriscaldamento in sovraccapacità possono anche cercare di mettere un freno alle richieste dei loro clienti che richiedono un maggiore controllo sulla loro fornitura di calore, come ad esempio per mezzo dell'installazione di misuratori e regolatori di flusso. Il costo della generazione inefficiente e lo spreco di energia che ne deriva crea un salasso finanziario sulla società di teleriscaldamento e sulle municipalità ed è un fattore primario che porta al rialzo delle tariffe. Tale spreco di energia inoltre porta ad un maggiore, ed inutile, inquinamento dell'ambiente.

2.3.4 Riduzione della domanda

La richiesta di teleriscaldamento è effettivamente diminuita nella maggior parte dei paesi in transizione dal 1990 ad oggi (vedi *Tabella 2.4*). In Russia, ad esempio, si è registrato un calo del 31% nel consumo di calore da teleriscaldamento dal 1993 al 2002. La maggior parte di questa diminuzione nelle economie in transizione si è verificata nel periodo 1990-1994, e molti paesi hanno visto un effettivo aumento della richiesta di calore nei successivi anni. Nonostante questo raramente si tiene conto del calo della domanda in considerazione per la pianificazione futura. In contrasto con questo trend, la domanda di teleriscaldamento nell'Europa occidentale è effettivamente cresciuta negli stessi anni.

Tabella 2.4 – Produzione di calore in alcune delle economie in transizione, 1990-2002 (Petajoule PJ)³

	1990	1995	2000	2002
Polonia	739,6	420,8	340,7	351,4
Ungheria	73,8	60,9	68,8	61,7
Lituania	97,7	64,6	43,1	43,9
Lettonia	85,1	43,4	31,8	33,0
Estonia	91,9	30,6	26,5	26,6
Russia	9466	8052	6486	6297
Ucraina*	1722	1076	794,7	728,3
Moldavia*	28,6	14,9	7,5	6,5
Kazakistan*	527	347	274	304

Il calo della domanda di calore è principalmente il risultato di tre fattori: riduzione dei consumi nel settore industriale e residenziale, e riduzione dei consumi forzata a causa di interruzione delle forniture. Il calo della domanda industriale è legata a più generali tendenze economiche ed industriali. Le industrie che acquistano teleriscaldamento per le loro esigenze di processo si rendono conto che possono permettersi l'acquisto di meno calore in quanto vendendo e producono meno loro stessi. La situazione Moldava per esempio, mostra come una diminuzione del consumo di calore industriale ha avviato un forte calo della produzione di calore da teleriscaldamento che ha portato ad una crisi finanziaria a lungo termine del settore. In molti casi è improbabile che la domanda di teleriscaldamento per applicazioni industriali ritorni a livelli pre-transizione in quanto la struttura stessa della produzione industriale è variata da industria pesante ad industria leggera, con un parallelo aumento dell'efficienza energetica anche negli impianti esistenti. Come diretta conseguenza del calo dei consumi, la quota percentuale

³ I dati per relativi ai paesi contrassegnati con asterisco sono incompleti e pertanto basati parzialmente su stime

coperta dalle applicazioni industriali nel consumo totale di calore è diminuito in molti paesi, mentre il settore residenziale è diventato il settore principale per domanda di calore. In Russia ed Ucraina, invece, la domanda di calore ha seguito l'andamento della produzione industriale, e pertanto la quota del settore non è diminuita drasticamente. Le figure 2.5 e 2.6 confrontano la variazione della domanda per settore in Russia e Polonia nel periodo 1993-2002.

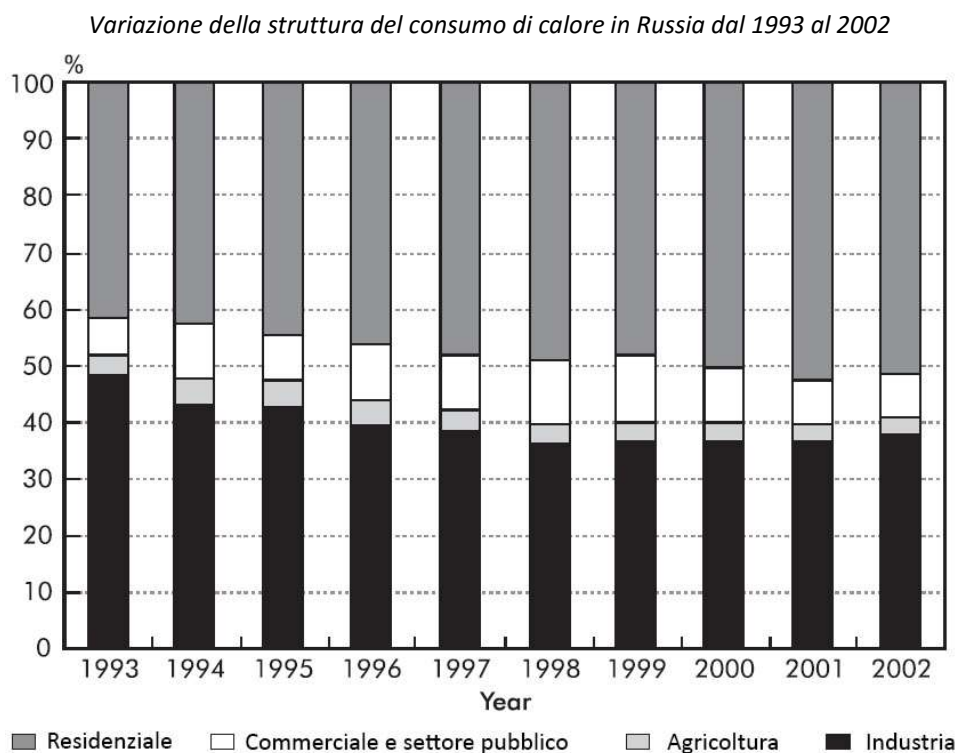


Figura 2.5 - "Coming in from the cold", IEA, 2004, pag.58

La seconda tendenza è il calo della domanda di teleriscaldamento residenziale; quest'ultima si è verificata a causa del miglioramento dell'efficienza energetica negli edifici, per via una tendenza al passaggio all'utilizzo di gas o di riscaldamento elettrico oltre che a diminuzioni nette del consumo di calore per esigenze di risparmio. In generale, questo declino è più diffuso in Europa centrale e nei paesi baltici. Ad esempio, in Repubblica Ceca il consumo di calore a fini residenziali è diminuito del 40%. Il consumo di calore da teleriscaldamento potrebbe diminuire ulteriormente per effetto dell'incremento degli investimenti in efficienza energetica. Quando le economie crescono, però, l'espansione del settore residenziale e terziario che ne deriva fa sì che vi sia un aumento nella domanda di energia, fra cui anche un incremento nella domanda di calore. La domanda di teleriscaldamento nel settore terziario e per applicazioni residenziali è già iniziato ad aumentare in paesi come l'Ungheria, la Croazia e l'Ucraina.

L'approvvigionamento incostante è la terza ragione che contribuisce al calo della domanda. In molti casi, le interruzioni si verificano perché il sistema di teleriscaldamento non può permettersi o non può ottenere il necessario combustibile; in altri casi, gestori degli impianti senza scrupoli arrivano a vendere carburante acquistato a tariffe agevolato a scapito del servizio di teleriscaldamento. Le interruzioni del servizio hanno raggiunto livelli critici in alcune città della Siberia orientale dove i residenti rimangono senza riscaldamento per lunghi periodi durante l'inverno; le forniture di carburante infatti non arrivano a causa di mancati pagamenti. Le stesse consegne sono problematiche in zone ad elevata tensione politica o situazione di conflitto aperto. In Asia centrale, nel Caucaso e nel sudest Europeo, il calo della

produzione di teleriscaldamento è stata aggravata dal deterioramento fisico delle stesse reti di teleriscaldamento. È difficile valutare il reale impatto di interruzioni delle forniture sul consumo totale. Le interruzioni del servizio, tuttavia, sono influenti abbastanza da poter generare cambiamenti permanenti alla domanda: anche se i fornitori potessero contare su sistemi più affidabili e miglior accesso al combustibile, è più che probabile che i livelli di domanda rimangano inferiori rispetto alla situazione precedente alle interruzioni di servizio per via degli investimenti che i clienti effettuano in fonti alternative di calore.

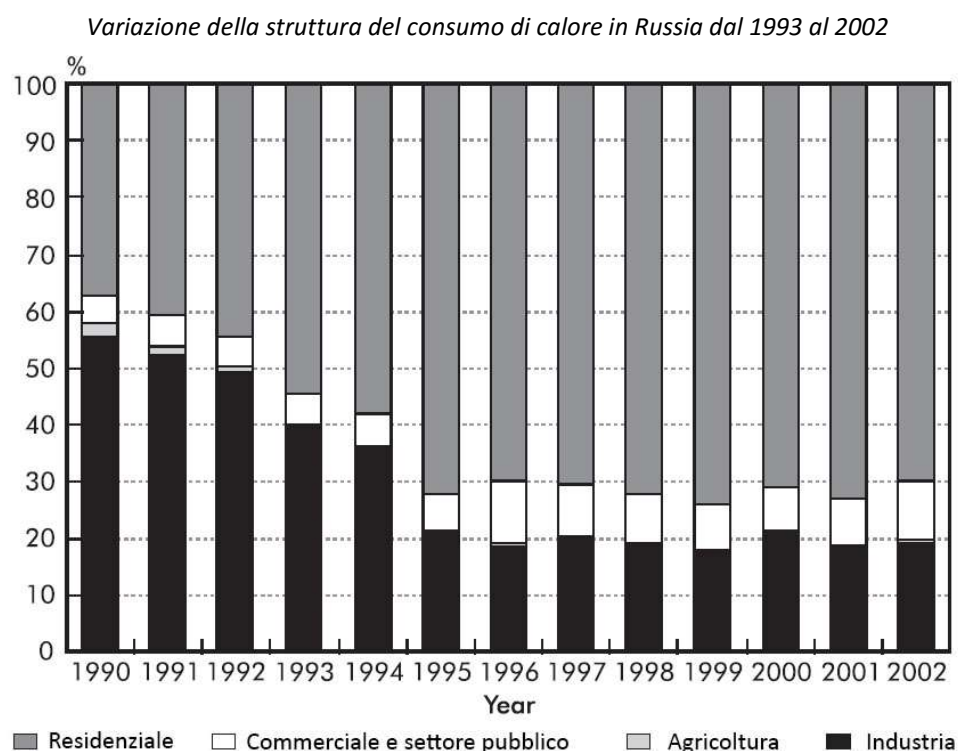


Figura 2.6 - "Coming in from the cold", IEA, 2004, pag.59

Il problema della sovraccapacità del sistema può essere aggravato da nuovi investimenti. In Bulgaria, ad esempio, la capacità termica dei sistemi di teleriscaldamento è cresciuta del 32% nel periodo 1999-2001 ma la domanda totale è effettivamente scesa negli stessi periodo. In alcuni casi, l'aumento della capacità è frutto di investimenti mal programmati da parte delle aziende di teleriscaldamento, ma in altri casi la capacità viene espansa per via di un aumento della capacità termica industriale. Le imprese industriali possono inoltre aumentare la produzione propria di calore e ridurre il consumo di teleriscaldamento acquistato. Se la domanda sia destinata a diminuire o meno dipende molto dalle normative. La Figura 2.7 mostra le proiezioni relative alla domanda di calore in assenza di interventi normativi. Ci si aspetta che la richiesta di calore industriale diminuisca del 18% in Russia e del 15% in altre economie di transizione tra il 2000 e il 2030, mentre nel residenziale e altri tipi di domanda la riduzione sarebbe nell'ordine del 13% e 5%, rispettivamente. Queste proiezioni si basano sullo scenario business-as-usual, con nessun intervento politico né cambiamenti sostanziali dei regimi tariffari, sussidi, livelli di concorrenza o variazione dei casi di mancato pagamento attuali. In altre parole, questo è ciò che è possibile aspettarsi che accada senza riforme. Riforme politiche possono avere forte influenza su queste proiezioni, ma anche fattori di sviluppo economico e condizioni di mercato svolgeranno un ruolo importante.

Proiezioni di domanda in assenza di nuove normative ed incentivazioni

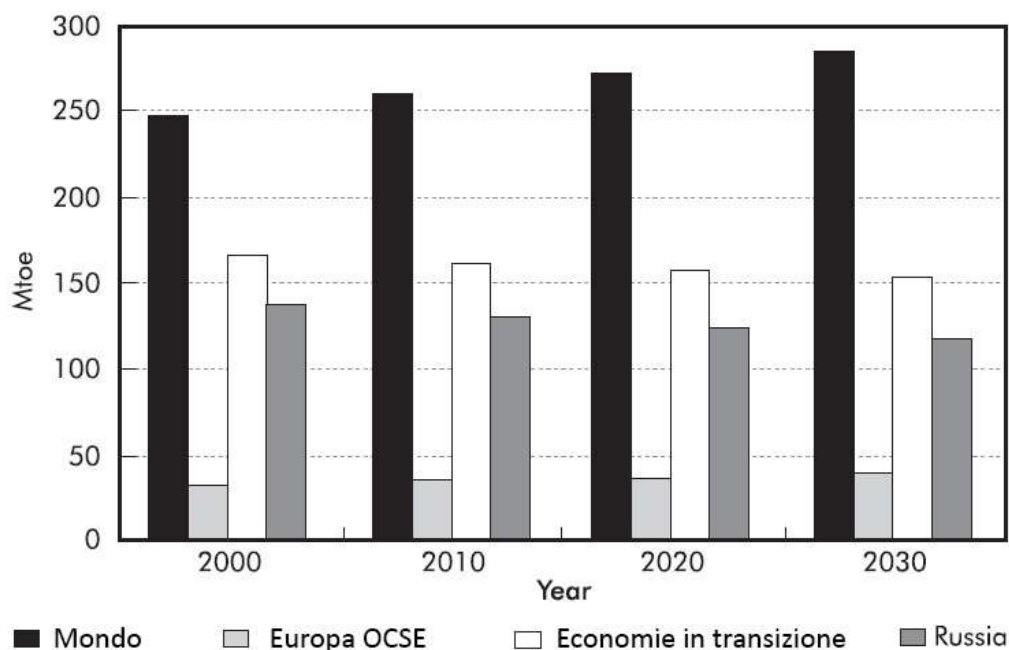


Figura 2.7 - "Coming in from the cold", IEA, 2004, pag.61

2.3.5 Amministrazione scorretta e povera governance

Informazioni sulla povera governance tende ad essere basata su aneddoti ed è difficile da confermare, ma molti esperti che lavorano sul campo possono darne esempi. L'ammontare di fenomeni di corruzione varia da paese a paese e da città a città. Nel complesso, si tratta di un problema significativo ma relativamente poco rilevante per la fattibilità del teleriscaldamento nel lungo termine rispetto alla mancanza di attenzione alle richieste del cliente e alle altre sfide descritte in precedenza. È importante considerare, tuttavia, che casi di amministrazione scorretta possono allontanare i clienti in particolare se sentono di essere stati trattati ingiustamente. Alcuni esempi includono:

- società di teleriscaldamento che caricano sui clienti costi relativi ad una quantità di calore più elevata di quanto realmente consegnata e che si oppone alle richieste di installare misuratori che permetterebbero di rilevare la quantità esatta di calore spacciato.
- società di teleriscaldamento che gonfiano i costi o produzione di calore per ricevere maggiori sussidi statali.
- organi regolatori che consentono aziende monopoliste di esercitare eccessiva influenza nel processo di definizione delle tariffe. Questo avviene più comunemente quando le municipalità sono sia gli organi regolatori delle tariffe sia proprietari delle reti di teleriscaldamento, ma può accadere anche in altri contesti. Il problema principale è che la volontà di proteggere il regime di monopolio diventa prioritario rispetto agli interessi dei consumatori.
- sistemi di sovvenzione estremamente complessi che rendono il trasferimento e l'utilizzo dei finanziamenti opaco e pertanto crea opportunità per distrazione di fondi.

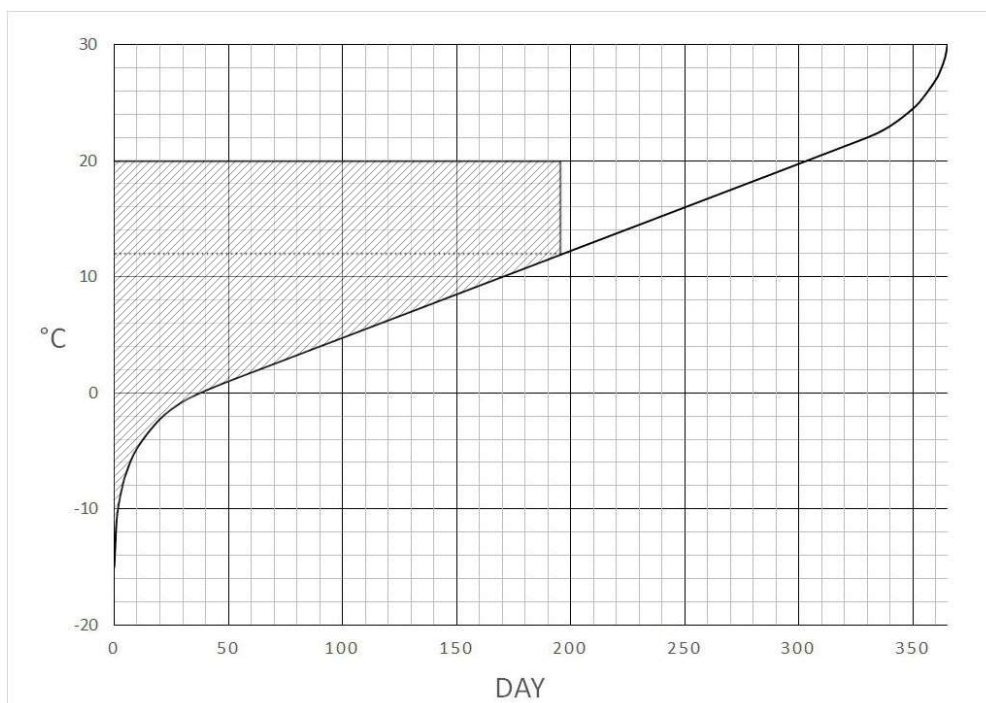
2.3.6 Conclusioni

Molte aziende titolari di reti di teleriscaldamento nelle economie in transizione si trovano ad affrontare problematiche in seguito al passaggio da sistemi di pianificazione energetica statale al libero mercato. La portata di questi ostacoli variano tra i paesi e le città ma nel complesso si osserva che, rispetto alle controparti dell'Europa occidentale, vi è una maggiore focalizzazione sulla produzione piuttosto che sulle richieste dei clienti, vi è una tendenza all'inefficienza e sistemi generalmente in sovraccapacità. Ciò di per sé non significa che il teleriscaldamento sia una forma inefficiente di fornitura di calore. Ristrutturazione e modernizzazione degli impianti possono migliorare l'efficienza, ma questo richiede significativi investimenti; alcuni paesi hanno già compiuto notevoli progressi in questo campo, mentre altri sono appena agli inizi. La mancanza di investimenti dovuti a difficoltà finanziarie delle società di teleriscaldamento è, o è stato, un grave problema nella maggior parte dei paesi in transizione. Stabilità finanziaria e competitività sono correlate e spesso formano un circolo vizioso che in casi estremi può portare al collasso delle società. Normative ben strutturate possono aiutare le aziende di teleriscaldamento a rompere questi circoli viziosi e, allo stesso tempo, permettere di raccogliere tutti i benefici che il teleriscaldamento ha da offrire.

3 DATI CLIMATICI

Si inizia la trattazione tecnica a partire dai dati climatici necessari per lo sviluppo dei modelli di calcolo. Essi sono disponibili sotto forma di grafico indicante la temperatura media giornaliera per ogni giorno dell'anno (*Grafico 3.1*). Il grafico è costruito ordinando i dati di temperatura media in ordine crescente, e pertanto non in ordine cronologico; questa conformazione permette di individuare il numero di giorni facenti parte del periodo di accensione degli impianti di riscaldamento, ovvero tutti quelli a temperatura media giornaliera inferiore a $T=12^{\circ}\text{C}$. Viene utilizzato un grafico mediato sulle rilevazioni effettuate nel periodo 1900-1980 per ottenere valutazioni il più possibile accurate rispetto alla zona di interesse e per evitare inaccuranze dovute a eventuali eccezionalità metereologiche.

Grafico 3.1 – Gradi giorno



MACSKÁSY, Á. *Központi fűtőberendezésekkel kapcsolatos előtanulmányok (Studies related to central heating systems)*, Tankönyvkiadó, Budapest, 1952

L'area evidenziata nel *Grafico 3.1* è una rappresentazione dei Gradi Giorno [GG] definiti nella formula (3.1) come la somma delle sole differenze positive giornaliere tra la temperatura dell'ambiente riscaldato, fissata convenzionalmente a 20°C , e la temperatura esterna media giornaliera, nel periodo facente parte della stagione di riscaldamento.

$$GG = \sum_{e=1}^n (T_0 - T_e) \quad (3.1)$$

3.1 Sottoperiodi di riscaldamento

Una analisi ideale della stagione fredda richiederebbe un approccio di calcolo giornaliero, con le difficoltà connesse all'implementazione del modello di calcolo a ognuno dei 195 giorni nei quali vi è riscaldamento. La soluzione usata per ridurre la mole di dati è data dalla suddivisione della stagione in più sotto periodi, o fasce, ognuno dei quali con una sua temperatura media, ai quali viene applicato il modello di calcolo.

Diversi sono gli approcci possibili per questa suddivisione, fra i più interessanti vi sono l'individuazione di fasce della stessa ampiezza in giorni e fasce definite in modo tale da valutare in modo più uniforme le diverse temperature esterne.

3.1.1 Suddivisione per fasce temporali

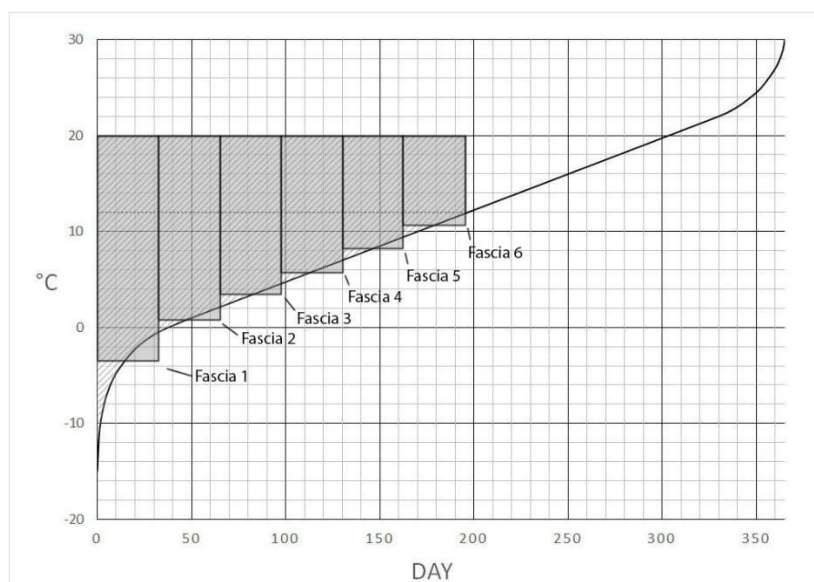


Grafico 3.2 – Suddivisione per fasce temporali

Tabella 3.1

	Fascia 1	Fascia 2	Fascia 3	Fascia 4	Fascia 5	Fascia 6
Giorni [d]	32,5	32,5	32,5	32,5	32,5	32,5
Temperatura [°C]	-3,5	0,9	3,5	5,8	8,2	10,7

Si osserva come questa suddivisione porta ad una forte approssimazione nelle fasce relative ai giorni più freddi della stagione. In particolare questo approccio non risulta interessante in quanto la fascia individuata a temperatura inferiore viene valutata ad una temperatura di $T = -3,5$ °C, come dalla Tabella 3.1, nonostante nella realtà si raggiungano temperature medie giornaliere ben inferiori.

3.1.2 Suddivisione per temperatura

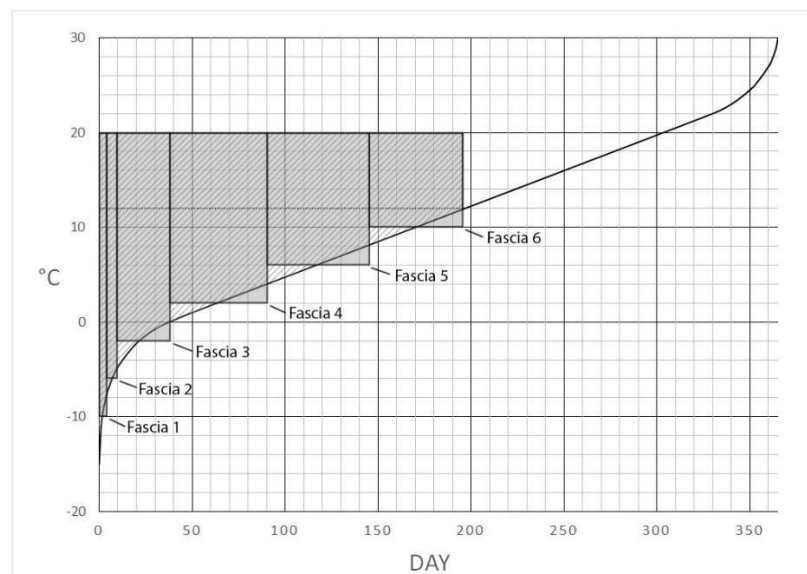


Grafico 3.3 – Suddivisione per temperatura

Tabella 3.2

	Fascia 1	Fascia 2	Fascia 3	Fascia 4	Fascia 5	Fascia 6
Giorni [d]	3	7	27	53	55	50
Temperatura [°C]	-10	-6	-2	2	6	10

Per mezzo della suddivisione per temperatura si ottengono fasce temporali di durata variabile come da *Tabella 3.2*. Questo approccio ha il grande vantaggio di permettere una migliore copertura delle differenti temperature medie esterne sperimentate, andando a migliorare l'accuratezza del modello e riducendo gli errori di approssimazione relativi al calcolo dei GG della stagione di riscaldamento. I vantaggi sopraelencati lo rendono l'approccio scelto.

4 DISSIPAZIONI DI CALORE DELLA RETE

Il fluido termovettore della rete di teleriscaldamento, per permettere lo scambio di calore all'utenza, deve essere esercito ad una temperatura superiore a quella dell'ambiente riscaldato. Risulta pertanto chiaro come l'acqua calda utilizzata nell'impianto in esame si trovi a temperatura più elevata rispetto alla temperatura ambientale esterna. Questa differenza fra la temperatura del fluido di mandata e del fluido di ritorno dalle utenze e la temperatura ambientale provoca una dissipazione di calore che riduce l'efficienza del sistema di teleriscaldamento. Per ridurre questa perdita di calore si utilizzano condutture isolate per mezzo dell'applicazione di strati di materiali a bassa conducibilità termica λ espressa in W/m^2K .

La potenza di dissipazione termica data da una conduttura di lunghezza L a temperatura interna T_i e temperatura esterna T_e , viene espressa in kW ed è ricavabile dalla formula:

$$Q = \frac{T_i - T_e}{\sum R} \cdot L \quad (4.1)$$

Dove al denominatore troviamo la sommatoria di tutte le resistenze termiche R che riducono il passaggio di calore fra l'interno della condotta e l'ambiente esterno. Per una condotta cilindrica possiamo individuare queste resistenze dovute, in ordine:

- Allo scambio convettivo fra fluido termovettore e parete del tubo, calcolato per mezzo del coefficiente di scambio termico convettivo α del fluido, valutato in W/m^2K e il diametro del tubo d_i secondo la formula:

$$R_{conv,in} = \frac{1}{\alpha_i \cdot \pi \cdot d_i} \quad (4.2)$$

- Allo scambio di calore per conduzione all'interno di ogni strato di materiale, strutturale o a fini isolanti, per mezzo della conducibilità termica λ_j e del diametro interno d_j ed esterno d_{j+1} secondo la formula:

$$R_{cond,i} = \frac{1}{2\pi \cdot \lambda_j} \ln \frac{d_{j+1}}{d_j} \quad (4.3)$$

- Allo scambio di calore per convezione fra la pellicola di protezione esterna della condotta con l'aria esterna, in caso di installazione aerea della condotta, secondo la formula:

$$R_{conv,out} = \frac{1}{\alpha_e \cdot \pi \cdot D_e} \quad (4.4)$$

Combinando le formule (4.1) (4.2) (4.3) (4.4) otteniamo quindi la formula completa (4.5)

$$Q = \frac{T_i - T_e}{\frac{1}{\alpha_i \cdot \pi \cdot d_i} + \sum_{j=1}^n \frac{1}{2\pi \cdot \lambda_j} \ln \frac{d_{j+1}}{d_j} + \frac{1}{\alpha_e \cdot \pi \cdot D_e}} \cdot L \quad (4.5)$$

Si osservi che questo metodo di calcolo è valido per condotte singole, non influenzate dalla presenza di altre tubazioni nelle vicinanze; la presenza di più condotte, in particolare in caso di posa direttamente nel terreno o in canali, fa sì che le dissipazioni di una vadano a ridurre le dissipazioni dell'altra per effetto del riscaldamento a cui vengono sottoposti gli immediati dintorni del luogo di posa. Questo influsso reciproco può essere espresso per mezzo di una ulteriore resistenza allo scambio termico denominata R_{12} .

4.1 Dissipazioni per tubi di mandata e ritorno dello stesso diametro interrati

Le configurazioni alternative di rete ramificate analizzate prevedono che le tubazioni di mandata e ritorno siano accoppiate e trasportino uguali portate; questo si traduce nella possibilità di utilizzare condutture dello stesso diametro, condizione che semplifica i calcoli relativi alle dissipazioni termiche presenti.

Come descritto nella sezione precedente si individua la resistenza allo scambio termico della condotta in esame per mezzo della somma della (4.2) e della (4.3); si noti come non è necessario sommare la (4.4) in quanto la posa diretta nel terreno fa sì che non vi sia scambio convettivo fra la parete esterna della tubazione ed un fluido esterno. Sviluppando la (4.3) in quanto è presente conduzione attraverso lo spessore del tubo (λ_t), dell'isolante (λ_{ins}) e della pellicola di protezione esterna (λ_p) si ottiene:

$$R_{pipe} = \frac{1}{\alpha_i \cdot \pi \cdot d_i} + \frac{1}{2\pi \cdot \lambda_t} \ln \frac{D}{d_i} + \frac{1}{2\pi \cdot \lambda_{ins}} \ln \frac{D_{ins}}{D} + \frac{1}{2\pi \cdot \lambda_p} \ln \frac{D_e}{D_{ins}} \quad (4.6)$$

Per i pedici si fa riferimento alla *Figura 9.4*.

Ulteriore componente resistiva che si oppone al flusso di calore dissipato è data dal terreno frapposto fra tubazione ed aria esterna. Tale valore, indicato come R_g o resistenza del terreno, viene ricavato secondo la (4.7) facendo uso delle variabile $\lambda_f (=1,6 \text{ W/m}^2\text{K})$ conducibilità del terreno, della profondità di posa H (*Fig.4.1*) e del parametro di resistenza termica equivalente $\alpha_{eq} (=0,0685 \text{ m}^2\text{K/W})$.

$$R_g = \frac{1}{2\pi \cdot \lambda_f} \cosh^{-1} \left(\frac{2 \cdot H}{D_e} + \alpha_{eq} \cdot \lambda_f \right) \quad (4.7)$$

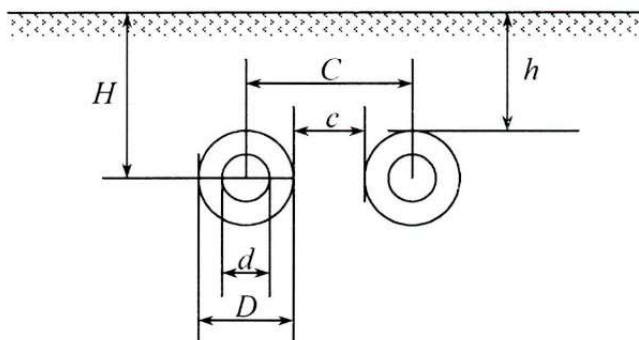


Figura 4.1 – Tubazioni interrate

L'ultima componente, già citata precedentemente, è rappresentata dalla resistenza R_{12} dovuta alla influenza delle tubazioni posate nelle vicinanze una dell'altra; per il calcolo di R_{12} viene utilizzata la conducibilità del terreno λ_f , la profondità di posa H e la distanza di posa C , calcolata come la distanza degli assi delle condotte, entrambe definite in Fig.4.1.

$$R_{12} = \frac{1}{2\pi \cdot \lambda_f} \cdot \ln \left[1 + \frac{(2 \cdot H)^2}{C^2} \right] \quad (4.8)$$

Si osservi che per le simulazioni effettuate si è scelta una profondità di posa determinata dal parametro h (Fig.4.1) pari a 0,8 m. Il parametro H utilizzato nelle precedenti formule è calcolato come la distanza fra l'asse della condotta e il livello del terreno, pertanto:

$$H = h + \frac{D_e}{2} \quad (4.9)$$

I valori di potenza termica dissipata per unità di lunghezza possono quindi essere identificati come q_f per la condotta di mandata e q_r per la condotta di ritorno, entrambi espressi in W/K e calcolati secondo la (4.10) e la (4.11).

$$q_f = \frac{(T_f - T_{amb}) \cdot (R_g + R_{pipe,r}) - (T_r - T_{amb}) \cdot R_{12}}{(R_g + R_{pipe,r}) \cdot (R_g + R_{pipe,f}) - R_{12}^2} \quad (4.10)$$

$$q_r = \frac{(T_r - T_{amb}) \cdot (R_g + R_{pipe,f}) - (T_f - T_{amb}) \cdot R_{12}}{(R_g + R_{pipe,r}) \cdot (R_g + R_{pipe,f}) - R_{12}^2} \quad (4.10)$$

Pertanto il valore totale ottenuto sarà

$$q_{tot} = q_f + q_r \quad (4.11)$$

4.2 Dissipazioni per tubi di mandata e ritorno di diametro differente interrati

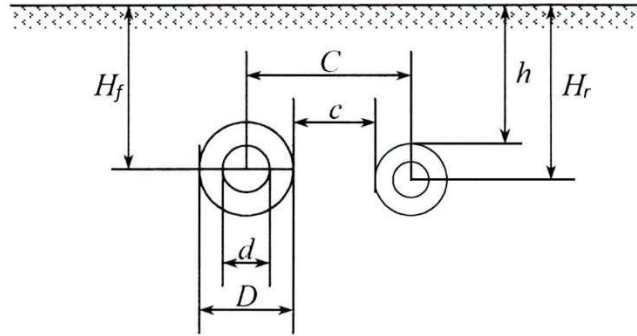


Figura 4.2 – Tubazioni interrate

Quando, come nella configurazione Tichelmann, si hanno portate differenti fra mandata e ritorno nella stessa sezione di tracciato, non è possibile utilizzare direttamente la (4.7) per definire la profondità di posa comune in quanto i diametri delle condotte sono differenti. Si dovranno pertanto calcolare i nuovi valori di profondità di posa (H_f , H_r come da Fig.4.2) di mandata e di ritorno come:

$$H_f = h + \frac{D_{e,f}}{2} \quad (4.12)$$

$$H_r = h + \frac{D_{e,r}}{2} \quad (4.13)$$

Similarmente sarà necessario ricalcolare i valori di resistenza del terreno (4.7) differenziando per condotte di mandata e di ritorno:

$$R_{g,f} = \frac{1}{2\pi \cdot \lambda_f} \cosh^{-1} \left(\frac{2 \cdot H_f}{D_e} + \alpha_{eq} \cdot \lambda_f \right) \quad (4.14)$$

$$R_{g,r} = \frac{1}{2\pi \cdot \lambda_f} \cosh^{-1} \left(\frac{2 \cdot H_r}{D_e} + \alpha_{eq} \cdot \lambda_f \right) \quad (4.15)$$

Differenti valori di H influiscono anche sul calcolo del valore mutuo di resistenza termica R_{12} , modificato per tenere conto di un valore medio di profondità di posa:

$$R_{12} = \frac{1}{2\pi \cdot \lambda_f} \cdot \ln \left[1 + \frac{(H_f + H_r)^2}{C^2} \right] \quad (4.16)$$

Infine si potranno ottenere i valori di potenza termica dissipata per unità di lunghezza come

$$q_f = \frac{(T_f - T_{amb}) \cdot (R_{g,r} + R_{pipe,r}) - (T_r - T_{amb}) \cdot R_{12}}{(R_{g,r} + R_{pipe,r}) \cdot (R_{g,f} + R_{pipe,f}) - R_{12}^2} \quad (4.17)$$

$$q_r = \frac{(T_r - T_{amb}) \cdot (R_{g,f} + R_{pipe,f}) - (T_f - T_{amb}) \cdot R_{12}}{(R_{g,r} + R_{pipe,r}) \cdot (R_{g,f} + R_{pipe,f}) - R_{12}^2} \quad (4.18)$$

4.3 Dissipazioni per tubi di mandata e ritorno dello stesso diametro in canale

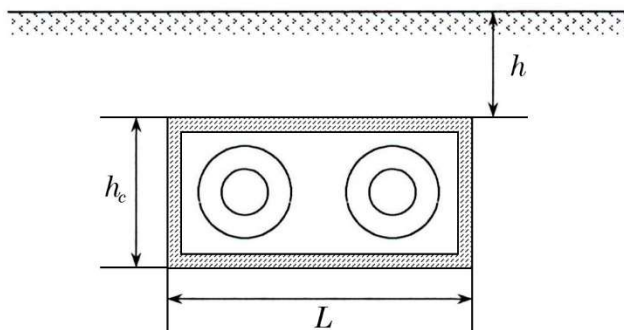


Figura 4.3 – Tubazioni in canale

Il secondo metodo di posa considerato consiste nel racchiudere entrambe le condotte in un canale sotterraneo. Questa configurazione garantisce migliore protezione alle tubazioni, introducendo un ulteriore strato di protezione per il materiale isolante, le cui prestazioni e integrità strutturale possono essere pregiudicate da infiltrazioni.

Il canale utilizzato presenta larghezza $L = 1,3$ ed altezza $h_c = 0,8$ come da *Figura 4.3*, dimensioni scelte per permettere l'alloggiamento delle più larghe condotte utilizzate lungo il tracciato della rete. Per il calcolo della resistenza del terreno, che richiede l'utilizzo di canali circolari, è necessario definire il diametro idraulico d_h del canale:

$$d_h = \frac{4 \cdot (L \cdot h_c)}{[2 \cdot (L + h_c)]} \quad (4.19)$$

La relativa profondità di posa della condotta H_c sarà:

$$H_c = h + \frac{d_h}{2} \quad (4.20)$$

È quindi possibile calcolare la resistenza del terreno come:

$$R_g = \frac{1}{2\pi \cdot \lambda_f} \cosh^{-1} \left(\frac{2 \cdot H_c}{d_h} + \alpha_{eq} \cdot \lambda_f \right) \quad (4.21)$$

L'approccio per la valutazione del mutuo influsso termico delle condotte non si basa sulla definizione di una resistenza R_{I2} come nel caso della posa diretta nel terreno; essendo infatti le tubazioni poste all'interno di un condotto, l'effetto delle dissipazioni termiche porta ad un incremento della temperatura che interessa l'intero volume del canale in modo approssimativamente costante. La temperatura dell'aria occupante il volume libero della condotta t_{cs} è ricavabile secondo la (4.22) utilizzando la (4.6) con l'aggiunta del termine convettivo (4.4) in quanto la tubazione è sospesa in aria e non a contatto con il terreno:

$$t_{cs} = \frac{(R_{pipe,r} \cdot R_g \cdot T_f) + (R_{pipe,f} \cdot R_g \cdot T_r) + (R_{pipe,f} \cdot R_{pipe,r} \cdot T_e)}{(R_{pipe,f} \cdot R_{pipe,f}) + (R_{pipe,r} \cdot R_g) + (R_{pipe,f} \cdot R_g)} \quad (4.22)$$

Una volta identificata la temperatura interna della condotta si ricavano i valori di potenza termica dissipata per unità di lunghezza come:

$$q_f = \frac{T_f - T_{cs}}{R_{pipe,f}} \quad (4.23)$$

$$q_r = \frac{T_r - T_{cs}}{R_{pipe,r}} \quad (4.24)$$

A titolo di controllo dei calcoli effettuati si osserva che il valore di potenza dissipata totale per unità di lunghezza dovrà essere pari a:

$$q_f + q_r = q_{tot} = \frac{T_{cs} - T_e}{R_g} \quad (4.25)$$

4.4 Dissipazioni per tubi di mandata e ritorno di diametro differente in canale

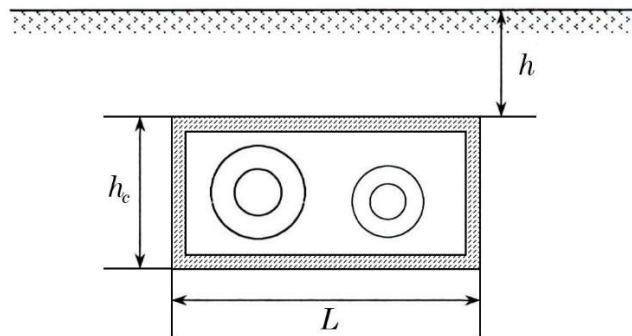


Figura 4.4 – Tubazioni in canale

In presenza di condutture di differente diametro all'interno della stesse sezione di canale il metodo di calcolo delle perdite rimane lo stesso di quello descritto nel sottocapitolo precedente. La differenza principale è da imputare al maggior numero di combinazioni di diametri di condutture, il che equivale ad una maggior varietà di temperature T_{cs} individuate e ad una più elevata complessità da gestire al foglio di calcolo.

4.5 Dissipazioni nella rete esistente



Figura 4.5 – Rete esistente

La rete esistente è, come riportato in precedenza e raffigurato in *Figura 4.5*, posta in tunnel interrati che coprono l'intero quartiere in analisi. In figura sono presenti anche le tubazioni decommissionate della vecchia rete, poi sostituite con le condotte attuali di maggiore diametro.

L'elevato volume d'aria contenuto in questi passaggi e la presenza di numerose grate e condotti di ventilazione fa sì che la temperatura misurata al loro interno sia affetta in modo trascurabile dalle perdite di calore provenienti dalle tubazioni; essa viene perlopiù determinata dalle temperature medie esterne mitigate dalla forte inerzia termica propria degli ambienti posti al di sotto del livello del terreno. Per una migliore accuratezza si è proposto alla azienda fornitrice e proprietaria di installare un rilevatore automatico delle temperature ambientali in modo da tracciarne l'andamento durante la stagione del riscaldamento; difficoltà tecniche e logistiche hanno però impedito l'utilizzo di questo approccio, pertanto si è scelto di assumere una temperatura media stagionale interna al tunnel $T_t = 5^\circ\text{C}$, calcolando le dissipazioni termiche delle condutture secondo la formula (4.5) che, valutata per unità di lunghezza, viene scritta come:

$$q_f = \frac{T_f - T_t}{\frac{1}{\alpha_i \cdot \pi \cdot d_i} + \frac{1}{2\pi \cdot \lambda_t} \ln \frac{D}{d_i} + \frac{1}{2\pi \cdot \lambda_{ins}} \ln \frac{D_{ins}}{D} + \frac{1}{2\pi \cdot \lambda_p} \ln \frac{D_e}{D_{ins}} + \frac{1}{\alpha_e \cdot \pi \cdot D_e}} \quad (4.26)$$

$$q_r = \frac{T_r - T_t}{\frac{1}{\alpha_i \cdot \pi \cdot d_i} + \frac{1}{2\pi \cdot \lambda_t} \ln \frac{D}{d_i} + \frac{1}{2\pi \cdot \lambda_{ins}} \ln \frac{D_{ins}}{D} + \frac{1}{2\pi \cdot \lambda_p} \ln \frac{D_e}{D_{ins}} + \frac{1}{\alpha_e \cdot \pi \cdot D_e}} \quad (4.27)$$

4.6 Calcolo della dissipazione termica stagionale

Per ricavare l'ammontare di energia termica dissipata durante la stagione invernale da uno dei circuiti di teleriscaldamento analizzati è necessario calcolare le perdite localizzate temporalmente in ognuna delle fasce termiche individuate nel capitolo 3.

Ad ogni fascia corrispondono differenti valori di q_f e q_r calcolati per ogni sottosezione di rete per mezzo delle formule relative alla modalità di posa utilizzata descritte nei paragrafi da 4.1 a 4.5. Questi valori vengono moltiplicati per le lunghezze dei segmenti di rete corrispondenti e sommate per ottenere un singolo valore rappresentante la potenza dissipata di rete totale. La moltiplicazione di quest'ultimo per il numero di ore di durata della fascia restituisce la dissipazione termica di fascia in kWh. Per ottenere il valore finale di dissipazione termica stagionale viene infine effettuata la sommatoria delle dissipazioni di fascia.

In sede di calcolo si è scelto di mantenere separate le componenti di energia termica dissipata di mandata e di ritorno in modo tale da permettere un'analisi dell'influsso che le differenti modalità di posa e le differenti configurazioni di rete hanno sulle perdite nei circuiti di mandata e ritorno.

I grafici ricavati per mezzo dei calcoli di dissipazione termica in tutte le configurazioni alternative e in tutte le accoppiate di temperature di mandata e ritorno nominali scelte sono riportati nell'appendice D.

5 FABBISOGNO ENERGETICO POMPE

5.1 Perdite di carico della rete

Un fluido che scorre dentro una tubazione è soggetto alle cosiddette perdite di carico distribuite e localizzate. Le perdite di carico distribuite sono dovute all'attrito viscoso che si esercita fra le particelle aventi diversa velocità a causa dell'aderenza tra il fluido e la superficie del condotto, sono presenti pertanto lungo tutto il percorso e per questo sono anche denominate perdite di carico continue. Le perdite di carico localizzate sono invece dovute all'energia dissipata a causa degli urti tra le particelle che si verificano in presenza delle turbolenze del moto generate dalla presenza di accidentalità lungo il percorso del fluido; le perdite di carico localizzate si hanno pertanto in presenza di variazioni di direzione o di sezione del condotto.

Il modo in cui il fluido si muove in una condotta influisce sulle perdite e varia in funzione della sua velocità, della viscosità, della densità che lo caratterizzano e dal diametro del tubo entro cui esso fluisce. Si è soliti ricorrere a due modelli per descrivere un fluido in moto: il regime laminare e quello turbolento; il primo prevede che questo sia suddivisibile in tante lamelle che scorrono, generando attrito, una sull'altra e parallelamente al tubo; il secondo, invece, si basa sull'idea che le varie molecole si muovono in modo caotico, formando vortici. Si differisce fra un modello e l'altro a seconda del valore di un parametro chiamato numero di Reynolds, un gruppo adimensionale proporzionale al rapporto fra forze d'inerzia e forze viscosive, calcolato come:

$$Re = \frac{w \cdot d_i \cdot \rho}{\mu} = \frac{w \cdot d_i}{\nu} \quad (5.1)$$

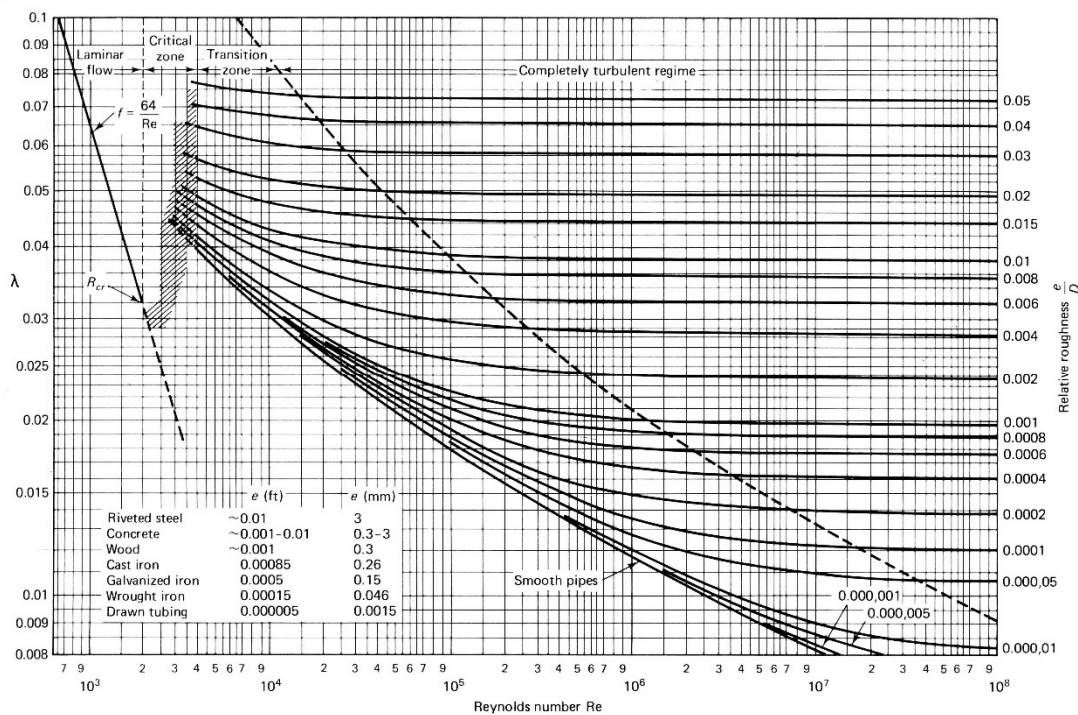
Dove w indica la velocità media del fluido nella condotta, d_i il diametro della condotta, ρ la densità del fluido, μ la viscosità dinamica e ν la viscosità cinematica. A seconda del valore calcolato di Re si andrà ad utilizzare uno dei due modelli distinguendo come regime laminare per $Re < 2100$ e regime turbolento per $Re > 3000$. Il range intermedio, nel quale non vale nessuno dei due modelli indicati, è denominato zona di transizione. Relativamente al modello di calcolo costruito per questo elaborato si è verificato che in nessun caso ci si avvicina a condizioni di regime laminare.

Per il calcolo delle perdite di carico distribuite si utilizza la correlazione di Colebrook la quale con un approccio ricorsivo permette di ricavare il coefficiente di attrito di Darcy λ . La correlazione nasce dalla combinazione di risultati empirici riferiti a studi di flusso laminare e turbolento nelle tubature ed è definita come:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon}{3,71 \cdot d_i} \cdot \frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{\lambda}} \right) \quad (5.2)$$

Dove ε/d_i rappresenta la scabrezza relativa della condotta.

L'equazione di Colebrook (5.2) è rappresentata nel diagramma di Moody (*Grafico 5.1*), che permette la risoluzione grafica.



(From L. F. Moody, *Trans. ASME*, Vol. 66, 1944.)

Grafico 5.1 – Diagramma di Moody

Per tradurre il coefficiente di attrito in effettive perdite di carico si fa uso della equazione di Darcy-Weisbach nella sua forma generale:

$$\Delta H = \frac{\lambda \cdot \rho \cdot w^2}{2 \cdot d_i} L \quad (5.3)$$

Dove d_i è il diametro interno della condotta e L la lunghezza della stessa.

Il risultato ottenuto è espresso in Pascal (Pa), si è scelto di trasformarlo in metro di colonna d'acqua (m_{H_2O}) e di valutarlo per unità di lunghezza, pertanto la formula effettivamente utilizzata sarà:

$$\Delta h = \frac{\lambda \cdot w^2}{2 \cdot g \cdot d_i} \quad (5.4)$$

L'implementazione del calcolo delle perdite di carico comporta, per ogni configurazione di rete considerata, la compilazione di una tabella contenente tutti i possibili percorsi di mandata e ritorno percorribili dal fluido termovettore (pari al numero di sottostazioni secondarie servite). Per ognuno di essi si calcolano e sommano le perdite di carico subite in ogni sezione attraversata nel tragitto sottostazione primaria-utenza di andata e utenza-sottostazione primaria di ritorno. L'individuazione del tragitto che comporta le maggiori perdite indica l'ammontare del delta di pressione che sarà necessario fornire per mezzo della/e pompa/e di circolazione.

Per assicurare l'ottimizzazione della distribuzione del fluido termovettore sarà necessario posizionare valvole di bilanciamento idraulico per creare dissipazioni localizzate controllate in tutti i percorsi a minore perdita di carico, andando ad eguagliare il delta di pressione per ogni percorso di mandata-ritorno. Si osservi che le perdite di carico localizzate non vengono direttamente calcolate; per tenerne

conto si fa invece uso di un coefficiente moltiplicativo (che apporta un incremento del 20%) applicato alle perdite di carico distribuite, che valuta l'impatto medio tipico delle perdite concentrate nelle reti di distribuzione.

Si riporta (*Tabella 5.1*) a titolo di esempio del processo descritto, il caso di una configurazione di rete successivamente proposta, in fascia termica 1 ($T_e = -10\text{ }^\circ\text{C}$); evidenziato in rosso è indicato il valore di Δh_{tot} dell'utenza che corrisponde alla massima perdita di carico e il tracciato relativo (*Fig.5.1*):

Tabella 5.1 – esempio perdita di carico e bilanciamento

Es. Configurazione Ramificata 2, $T_f = 90\text{ }^\circ\text{C}$, $T_r = 60\text{ }^\circ\text{C}$, fascia termica 1 ($T_e = -10\text{ }^\circ\text{C}$)				
Sottostazione sec.	Δh_f	Δh_r	Δh_{tot}	Settaggio valv. bilan.
	[mH ₂ O]	[mH ₂ O]	[mH ₂ O]	[mH ₂ O]
Derék u. 120.	0,47	0,50	0,97	4,6
Derék u. 126.	1,19	1,25	2,44	3,2
Derék u. 130.	1,45	1,53	2,98	2,6
Derék u. 134.	1,55	1,64	3,19	2,4
Derék u. 138.	2,15	2,27	4,42	1,2
Derék u. 142.	2,72	2,87	5,60	-
Tócsóskert tér 5.	0,66	0,70	1,36	4,2
Tócsóskert tér 6.	0,54	0,57	1,12	4,5
Tócsóskert tér 7.	0,77	0,81	1,58	4,0
Tócsóskert tér 8.	1,23	1,30	2,53	3,1
Vincellér u. 4.	1,20	1,27	2,47	3,1
Vincellér u. 6.	2,34	2,47	4,81	0,8
Tócsóskert tér 4. ABC	0,42	0,45	0,87	4,7
István u. 135.	1,99	2,10	4,09	1,5
Tócsóskert tér 3.	0,93	0,98	1,91	3,7
Vincellér u. 2	1,43	1,51	2,94	2,7
Tócsóskert tér 2.	1,15	1,21	2,37	3,2
Tócsóskert tér 1.	1,81	1,91	3,72	1,9

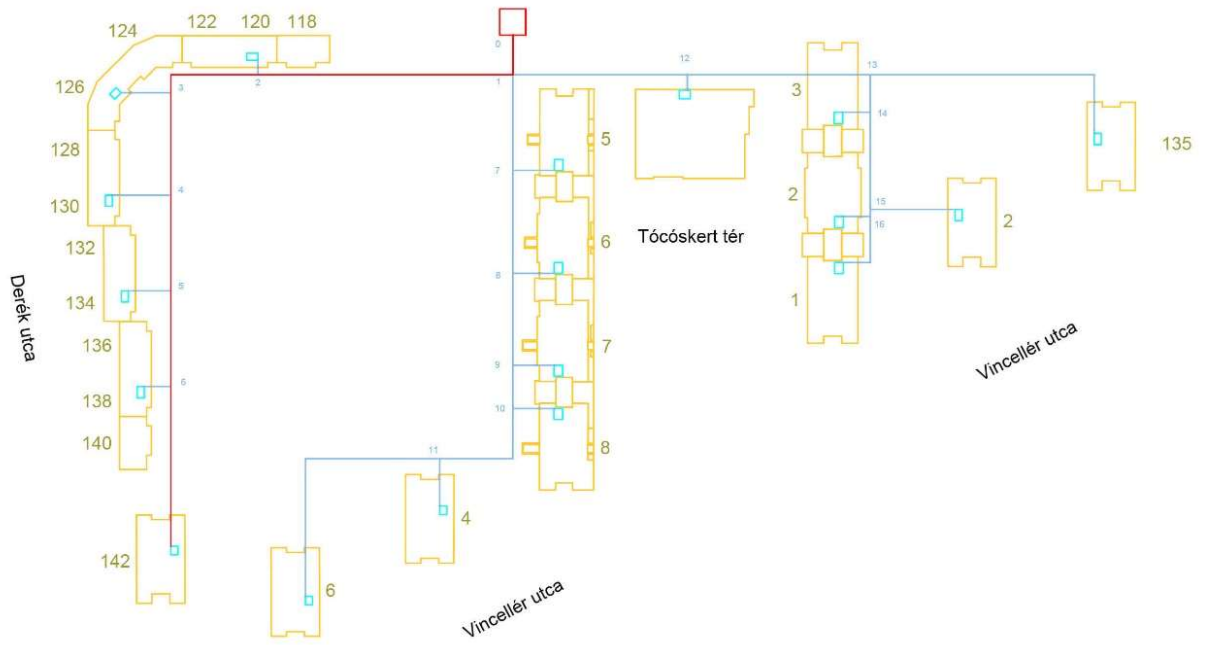


Figura 5.1 – Tracciato di massima perdita di carico, rete Ramificata 1

5.2 Potenza pompe e fabbisogno energetico stagionale

La potenza della pompa di circolazione necessaria per far fronte alle perdite di carico nel circuito di mandata e ritorno è individuata a partire dal valore di Δh massimo ottenuto nell'arco della stagione di riscaldamento; tipicamente tale valore è individuato nei giorni più freddi durante i quali la maggiore richiesta di calore alle utenze comporta la massima portata stagionale di fluido termovettore alle condutture.

La potenza della pompa in Watt viene individuata dalla (5.5) dove ρ è la densità del fluido (per l'acqua considerata pari a 1000 kg/m^3), $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ è l'accelerazione di gravità, Q rappresenta la portata in m^3/s e η_p è il rendimento della pompa.

$$P_p = Q \cdot \frac{\rho \cdot g \cdot h}{\eta_p} \quad (5.5)$$

Questa rappresenta la potenza all'asse della pompa e, per fini di valutazione della spesa energetica, deve essere trasformata in potenza elettrica spesa per mezzo della efficienza di trasmissione η_t e del rendimento del motore η_m :

$$P_E = P_p \cdot \eta_t \cdot \eta_m \quad (5.5)$$

Il fabbisogno energetico elettrico della data fascia risulta pertanto calcolabile come il valore della potenza P_E moltiplicato per il numero di ore della fascia, restituendo un risultato in kWh. Il fabbisogno energetico stagionale per l'alimentazione delle pompe, similamente a quanto fatto per le dissipazioni termiche stagionali, sarà pertanto pari alla sommatoria di tutti i fabbisogni delle sei fasce individuate nel sottocapitolo 3.1.2.

I grafici ricavati per mezzo dei calcoli di fabbisogno energetico delle macchine di pompaggio, a seconda delle configurazioni di rete nelle quali sono utilizzate e delle accoppiate di temperature di mandata e ritorno nominali scelte sono riportati nell'appendice E.

6 METODOLOGIE DI CONTROLLO DEL SISTEMA [2]

Per assicurare la fornitura di calore alle utenze in condizioni di continua variazione di richiesta, sono impiegati sofisticati sistemi di controllo. A seconda del parametro di controllo utilizzato per effettuare le regolazioni il metodo utilizzato viene denominato qualitativo, quantitativo o misto.

Per semplificare la compilazione delle seguenti formule si fa uso della notazione espressa nelle (6.1), (6.2), (6.3) e (6.4).

$$T_e = t_i - t_e \quad (6.1)$$

$$T_f = t_f - t_i \quad (6.2)$$

$$T_r = t_r - t_i \quad (6.3)$$

$$T_R = \frac{T_f - T_r}{\ln \frac{T_f}{T_r}} \quad (6.4)$$

Dove t_i identifica la temperatura interna di design, t_e la temperatura esterna, t_f la temperatura di mandata del fluido termovettore, t_r la temperatura di ritorno, T_R la differenza di temperatura medio logaritmica

L'equazione di bilancio termico è:

$$Q_N = Q_R = Q_{TA} \quad (6.5)$$

dove:

$$Q_N = T_e \cdot \sum_i A_i \cdot U_i \quad (6.6)$$

$$Q_R = k_R \cdot A_R \cdot T_R \quad (6.7)$$

$$Q_{TA} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_f - T_r) \quad (6.8)$$

dove: Q_N rappresenta la richiesta di calore nella stanza; Q_R - il calore trasferito dal radiatore; Q_{TA} - il calore trasferito dal fluido termovettore; A_i - l'elemento di superficie dell'edificio i-esimo; U_i - il coefficiente di scambio termico dell'elemento di superficie i-esimo; \dot{m} - la portata di massa del fluido termovettore; c_p il calore specifico del fluido termovettore.

6.1 Controllo qualitativo

In questo caso il parametro di controllo utilizzato è la temperatura del fluido termovettore, mentre la portata viene mantenuta costante ($\dot{m} = \text{costante}$) durante il periodo di funzionamento. Scrivendo le equazioni (6.4) e (6.5) per i loro valori nominali dei parametri di controllo (T_{e0} ; T_{R0}) e per un'altra coppia di valori (T_e ; T_R) inferiore ai valori di design, e facendo uso della relazione (6.7) si ottiene:

$$T_{e0} \cdot \sum_i A_i \cdot k_i = k_R \cdot A_R \cdot T_{R0} \quad (6.9)$$

$$T_e \cdot \sum_i A_i \cdot k_i = k_R \cdot A_R \cdot T_R \quad (6.10)$$

Si osservi che la variazione del coefficiente di scambio termico k_R , dipendente dalla temperatura medio logaritmica Δt agente sul radiatore, è ricavata come:

$$k_R = k_{R0} \cdot \left(\frac{\Delta t}{60}\right)^{\frac{1}{m}} \quad (6.11)$$

dove m è un esponente ricavato a sua volta dall'esponente n (che per i radiatori tipici oscilla fra 1,24...1,36) come:

$$m = \frac{1}{n - 1} \quad (6.12)$$

Usando pertanto le (6.9), (6.10) e (6.11) si ricava:

$$T_R = T_{R0} \cdot \left(\frac{T_e}{T_{e0}}\right)^{\frac{m}{m+1}} \quad (6.13)$$

Nel *Grafico 6.1* si osserva come la variazione della differenza di temperatura medio logaritmica viene influenzata da differenti valori dell'esponente n .

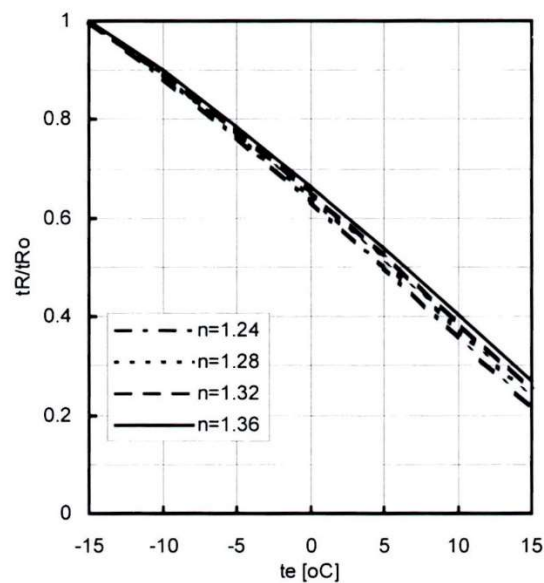


Grafico 6.1 – F.Kalmár, "Energy conscious heating", Akadémiai Kiadó, p.53, 2011

Allo stesso modo, utilizzando le relazioni (6.5), (6.7) e (6.8) al valore nominale di temperatura esterna (T_{e0}) e per un altro valore (T_e) risulta:

$$\frac{T_f - T_r}{T_{f0} - T_{r0}} = \frac{T_e}{T_{e0}} \quad (6.14)$$

dalla quale si ricava:

$$T_f = T_r + \frac{T_e}{T_{e0}} \cdot (T_{f0} - T_{r0}) \quad (6.15)$$

Di conseguenza unendo la (6.14) con la (6.15) si ricava che la differenza fra la temperatura di mandata e la temperatura dell'ambiente riscaldato sarà:

$$T_f = T_r \cdot \exp \left[\left(\frac{T_e}{T_{e0}} \right)^{\frac{1}{m+1}} \ln \frac{T_{f0}}{T_{r0}} \right] \quad (6.16)$$

quindi:

$$T_r = \frac{\frac{T_e}{T_{e0}} \cdot (T_{f0} - T_{r0})}{\exp \left[\left(\frac{T_e}{T_{e0}} \right)^{\frac{1}{m+1}} \ln \frac{T_{f0}}{T_{r0}} \right] - 1} \quad (6.17)$$

$$T_f = \frac{\frac{T_e}{T_{e0}} \cdot (T_{f0} - T_{r0}) \cdot \exp \left[\left(\frac{T_e}{T_{e0}} \right)^{\frac{1}{m+1}} \ln \frac{T_{f0}}{T_{r0}} \right]}{\exp \left[\left(\frac{T_e}{T_{e0}} \right)^{\frac{1}{m+1}} \ln \frac{T_{f0}}{T_{r0}} \right] - 1} \quad (6.18)$$

Dalle (6.16), (6.17) e (6.18) si ricavano pertanto i valori di temperatura di mandata e di ritorno del fluido termovettore inviato alle utenze al variare della temperatura esterna, nelle differenti condizioni di temperatura di mandata e di ritorno nominali ipotizzate. In *Tabella 6.1* e *Grafico 6.2* si riporta un esempio delle curve ricavate per mezzo di questo metodo di controllo.

Tabella 6.1 – Esempio $t_{f0}-t_{r0}$ 90-70°C

t_e	t_f	t_r
[°C]	[°C]	[°C]
-15	90,00	70,00
-10	81,53	64,39
-5	72,83	58,55
0	63,85	52,42
5	54,50	45,93
10	44,63	38,91
15	33,86	31,00
20	20,00	20,00

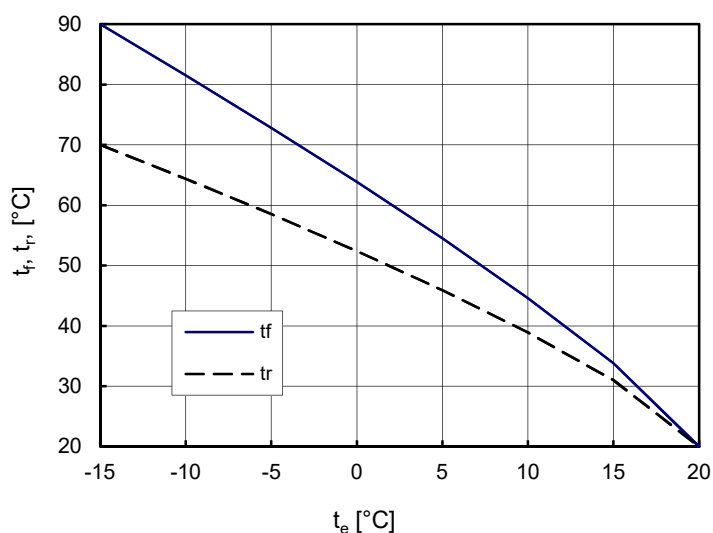


Grafico 6.2 – Esempio andamento temperature di mandata e ritorno

L'effetto ottenuto per mezzo del calcolo delle T_f e T_r con la (6.17) e la (6.18) viene evidenziato dal *Grafico 6.2*. La differenza fra la temperatura di mandata e di ritorno diminuisce all'aumentare delle temperature medie giornaliere in modo proporzionale alla riduzione del fabbisogno energetico di riscaldamento richiesto dagli edifici, effettivamente rendendo la portata costante durante tutta la stagione di attività della rete.

Nell'appendice A vengono riportati i grafici di andamento delle temperature ricavati per tutti i casi analizzati, identificati dalle diverse accoppiate di temperatura di mandata e ritorno.

6.1 Controllo quantitativo

In questo caso il parametro di controllo utilizzato è la portata di fluido termovettore, mentre la temperatura di mandata viene mantenuta costante ($t_f = \text{cost.}$) durante il periodo di funzionamento. La temperatura di ritorno è influenzata dalla temperatura esterna e dalla portata circolante nella rete. Utilizzando le equazioni (6.4) e (6.13) per un valore iniziale pari al parametro nominale di temperatura esterna T_{e0} e per un altro valore T_e qualunque si ottiene:

$$\frac{T_e}{T_{e0}} = \left(\frac{T_f - T_r}{\ln \frac{T_f}{T_r}} \cdot \frac{\ln \frac{T_f}{T_{r0}}}{\frac{T_f}{T_{r0}}} \right)^{\frac{m+1}{m}} \quad (6.19)$$

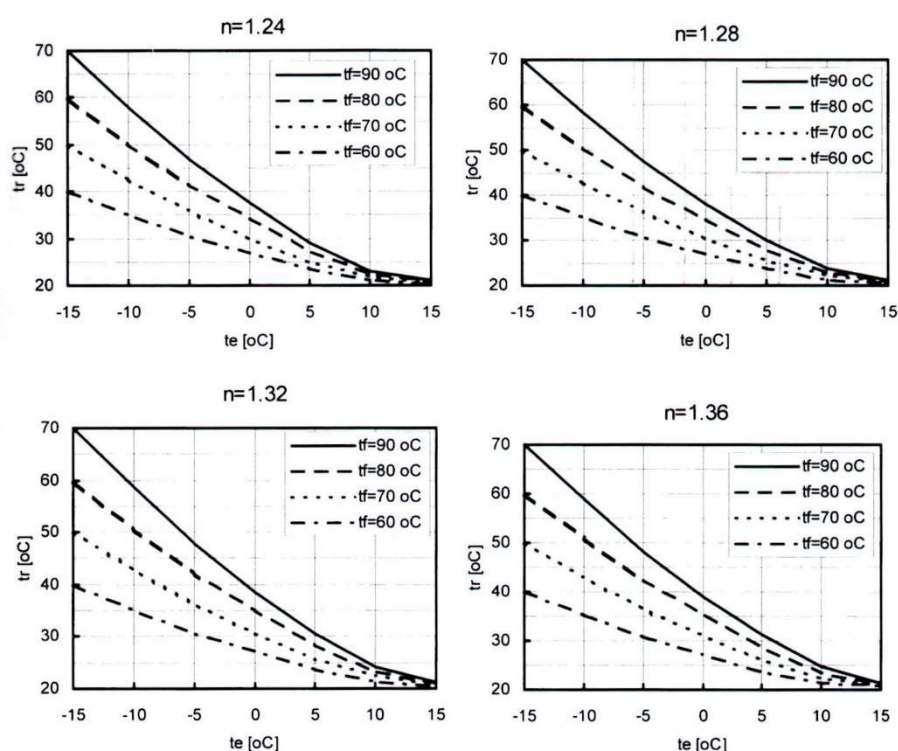


Grafico 6.2 – F.Kalmár, “Energy conscious heating”, Akadémiai Kiadó, p.55, 2011

In Grafico 6.2 viene proposto un esempio della variazione della temperatura di ritorno del fluido termovettore in base alla temperatura esterna e per differenti valori della temperatura di mandata t_f e di esponente n .

Sostituendo all’equazione (6.5) le (6.6) (6.8) per un valore iniziale di temperatura esterna T_{e0} e per un qualsiasi altro valore T_e si ottiene:

$$\frac{m}{m_0} \cdot \frac{T_f - T_r}{T_f - T_{r0}} = \frac{T_e}{T_{e0}} \quad (6.20)$$

pertanto:

$$\frac{m}{m_0} = \left(\frac{T_f - T_r}{T_f - T_{r0}} \right)^{\frac{1}{m}} \cdot \left(\frac{\ln \frac{T_f}{T_{r0}}}{\ln \frac{T_f}{T_r}} \right)^{\frac{m+1}{m}} \quad (6.21)$$

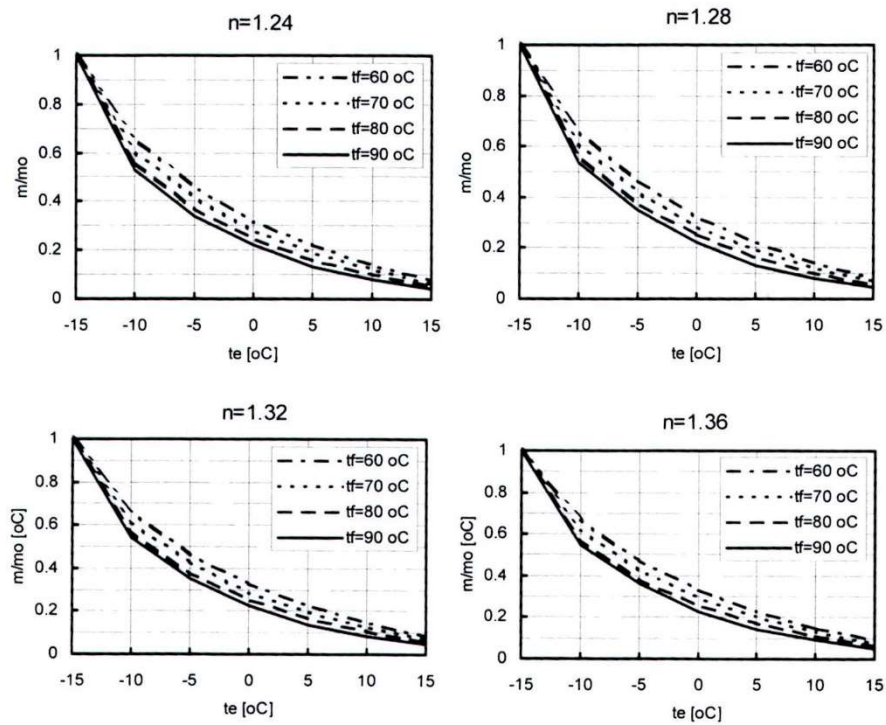


Grafico 6.3 – F.Kalmár, “Energy conscious heating”, Akadémiai Kiadó, p.56, 2011

Nel Grafico 6.3 sono riportate a titolo di esempio le portate del fluido termovettore rispetto al valore nominale m_0 per differenti valori di temperatura di mandata e per differenti esponenti n .

Negli appendici B e C vengono riportati i grafici di andamento delle temperature e delle portate di massa ricavati per tutti i casi analizzati, identificati dalla diversa scelta di temperatura di mandata e di ΔT fra temperature nominali di mandata e ritorno.

7 SITO ANALIZZATO

Il sito oggetto dello studio è il quartiere di Tócoskert tér localizzato nel comune di Debrecen, Ungheria. L'agglomerato di edifici in evidenza nella *Figura 7.1* è composto da quattordici condomini serviti dalla rete di teleriscaldamento gestita dall'azienda fornitrice Debreceni Hőszolgáltató Zrt. Le condotte dell'acqua calda di mandata e dell'acqua fredda di ritorno sono connesse ai condomini per mezzo di sottostazioni secondarie interrate.



Figura 7.1 – Quartiere di Tócoskert tér



Figura 7.2 – Evidenziazione edifici e sottostazioni secondarie

L'analisi delle potenze e fabbisogni energetici per il riscaldamento è stata incentrata sulle sottostazioni secondarie, indicate in rosso nella *Figura 7.2*. Da esse sono stati ricavati i dati di assorbimento energetico per edificio. Come primo indicatore di richiesta energetica degli edifici si è rilevato il valore di potenza di progetto P [kW], ovvero la potenza richiesta alla sottostazione in caso di temperatura esterna pari alla temperatura di progetto che per l'Ungheria è fissata a -15°C .

7.1 Tipologie edifici

7.1.2 Edifici tipo A



Tabella 7.1 – Edifici tipo A

Denominazione sottostazione	Numero Appartamenti	Volume riscaldato [m ³]	P [kW]
Derék u. 142.	87	14437	523
Vincellér u. 6.	87	14433	523
Vincellér u. 4.	87	14419	523
István u. 135.	87	14162	523
Vincellér u. 2.	87	14162	523

7.1.2 Edifici tipo B



Tabella 7.2 – Edifici tipo B

Denominazione sottostazione	Numero Appartamenti	Volume riscaldato [m ³]	P [kW]
Tócsóskert tér 8.	80	13524	398
Tócsóskert tér 5.	80	14266	398
Tócsóskert tér 3.	80	13718	398
Tócsóskert tér 1.	80	13779	398

7.1.3 Edifici tipo C



Tabella 7.4 – Edifici tipo D

Denominazione sottostazione	Numero Appartamenti	Volume riscaldato [m ³]	P [kW]
Tócsóskert tér 4. ABC	-	4129	120

7.1.4 Edificio tipo D



Tabella 7.3 – Edifici tipo C

Denominazione sottostazione	Numero Appartamenti	Volume riscaldato [m ³]	P [kW]
Tócóskert tér 7.	80	13701	460
Tócóskert tér 6.	80	13787	460
Tócóskert tér 2.	80	12883	460

7.1.5 Edificio tipo E



Tabella 7.5 – Edifici tipo E

Denominazione sottostazioni	Numero Appartamenti	Volume riscaldato [m ³]	P [kW]
Derék u. 120.	96	16242	511
Derék u. 126.	64	13381	403
Derék u. 130.	64	10349	301
Derék u. 134.	52	8575	263
Derék u. 138.	60	10180	360

8 FABBISOGNO TERMICO STAGIONALE

La determinazione delle potenze termiche richieste da ciascun edificio facente parte della rete di teleriscaldamento del complesso di Tócoskert tér è di primaria importanza per ricavare le portate e le temperature dell'acqua di mandata e di ritorno dalle utenze. Dalle schede descrittive delle tipologie degli edifici *Tabella 7.1 – Tabella 7.5* abbiamo a disposizione i valori di potenza necessaria per il riscaldamento in condizioni di progetto (o nominali), che per la normativa ungherese corrispondono al mantenimento della temperatura interna T_a di 20°C con condizioni di temperatura esterna T_{e0} di -15°C. Come indicato nella (8.1), queste potenze sono variabili durante la stagione di riscaldamento in quanto proporzionali alla differenza fra la temperatura ambiente fissata T_a e la temperatura esterna T_e .

$$P = U \cdot A \cdot (T_a - T_e) \quad (8.1)$$

Pertanto la potenza termica di fascia è ricavabile come

$$P_{fascia,i} = \frac{P_{nom}}{(T_a - T_{e0})} \cdot (T_a - T_{e,i}) \quad (8.2)$$

Facendo riferimento alla *Tabella 3.2* per la durata in giorni delle fasce, viene ricavato il fabbisogno di energia termica richiesto alle sottostazioni secondarie secondo la (8.2); la moltiplicazione della potenza richiesta per il numero di ore ci fornisce il risultato voluto.

$$P_{th} = Q \cdot d \cdot 24 \quad (8.3)$$

A titolo di esempio si riportano nella *Tabella 8.1* le potenze e le relative quantità di energia termica richieste alla rete dagli edifici di tipo A nelle diverse fasce stagionali:

Tabella 8.1 – Energia termica per fascia, edifici tipo A

	P [kW]	Giorni [d]	Qth [MWh]
Fascia 1	448	3	32,3
Fascia 2	389	7	65,3
Fascia 3	329	27	213
Fascia 4	269	53	342
Fascia 5	209	55	276
Fascia 6	149	50	179

Ripetendo questi calcoli per i rimanenti edifici e sommando i risultati viene ricavata la totale energia termica stagionale richiesta per il riscaldamento, pari a $Q_{th.st.} = 15,96$ TWh.

9 CONFIGURAZIONI GEOMETRICHE DI RETE SIMULATE

9.1 Rete di teleriscaldamento esistente

Come rappresentato nella *Figura 9.1* tratta dalle mappe fornite dalla Debreceni Hőszolgáltató Zrt. la totalità dei condomini del quartiere di Tócoskert tér sono connessi per mezzo di tunnel che alloggiavano le tubature di mandata e di ritorno dell'acqua adibita al teleriscaldamento. Le condutture principali utilizzate presentano un diametro nominale interno di 15 cm, il diametro totale raggiunge i 29,8 cm per via della presenza di uno spesso strato isolante e di una pellicola di protezione da agenti esterni; si osserva che alcuni degli edifici vengono serviti da condutture secondarie che si diramano dal tracciato primario, in questo caso le tubazioni presentano un diametro nominale interno di 5 cm e da un diametro totale di 10,2 cm dovuto anch'esso alla presenza di isolante e pellicola. Il collegamento fra la rete primaria e la stazione secondaria Tócoskert ABC (*Figura 7.2*) è attuato per mezzo di tubazioni ISOPLUS di diametro interno 3,2 cm e diametro esterno 10 cm. Ogni edificio è servito da almeno una sottostazione secondaria posta in un locale direttamente adiacente al tunnel.

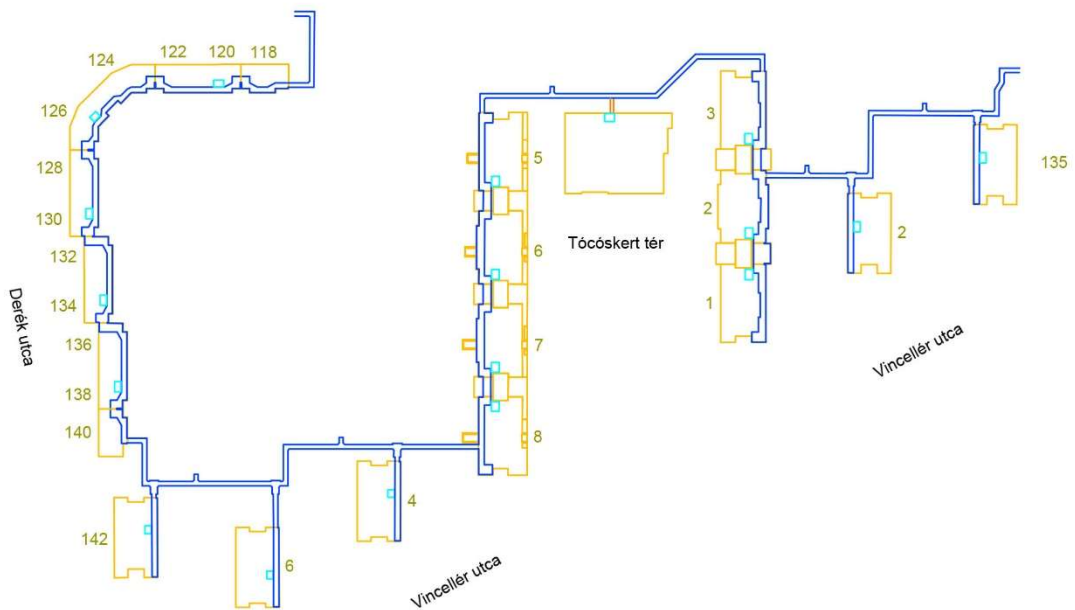


Figura 9.1 – Rete esistente

9.2 Reti alternative ipotizzate

Sono state ipotizzate tre ulteriori reti di distribuzione per effettuare comparazioni relative alle perdite di calore verso l'esterno e alle cadute di pressione lungo le tubazioni in modo da indagare possibili miglioramenti della rete esistente. Si è deciso di utilizzare come origine delle reti fittizie una singola sottostazione primaria indicata dal punto 0 in *fig. 9.2*, *fig. 9.3*, *fig. 9.4*; questa condizione pone le reti fittizie in condizioni di partenza identiche e di conseguenza dà maggiore significato alle comparazioni effettuate.

Questa configurazione è accettabile anche per comparazioni fra rete esistente e reti fittizie. Essa è il risultato di un compromesso fra la posizione dei collegamenti alla rete nel caso reale (*fig. 9.1*) e la possibilità di andare ad ottenere portate paragonabili nelle tubazioni in tutti i casi analizzati. Si osservi infatti come la rete reale utilizza una sola conduttura di mandata primaria e una di ritorno per fornire tutti gli edifici del quartiere; se nelle reti alternative si fosse scelto un approccio a più sottostazioni primarie la richiesta di calore, e quindi a parità di temperature anche la portata, sarebbe stata divisa fra le sottostazioni. Questo comporterebbe una fondamentale differenza fra la rete esistente e le reti alternative (in particolare per la configurazione Tichelmann), ben più importante delle minori differenze di geometria dovute alla presenza di una singola sottostazione primaria.

I diametri delle condutture di ogni sezione delle reti alternative sono stati scelti in modo tale da cercare di mantenere la velocità del fluido in condizioni nominali compreso nell'intervallo 1,3-2,2 m/s; in questo modo si cerca di evitare di incappare sia in elevate perdite di carico che in fenomeni di stagnazione.

9.2.1 Reti ramificate

Vengono proposte due configurazioni di rete Ramificata: la seconda configurazione alternativa (configurazione Ramificata 2) come da *Figura 9.3* è disegnata a partire dall'impiego di due ramificazioni principali dalle quali si diramano le condutture di collegamento alle sottostazioni secondarie; si osserva come in questo caso le condotte di collegamento dalle ramificazioni sono molto lunghe. Con la prima configurazione alternativa (configurazione Ramificata 1) illustrata in *Figura 9.2*, invece, si cerca di ridurre la lunghezza delle condutture di collegamento verso gli edifici utilizzando una ulteriore ramificazione. Entrambe queste configurazioni fanno utilizzo di condutture di mandata e di ritorno accoppiate che seguono lo stesso tracciato e che presentano, a parità di posizione nella rete, lo stesso diametro.

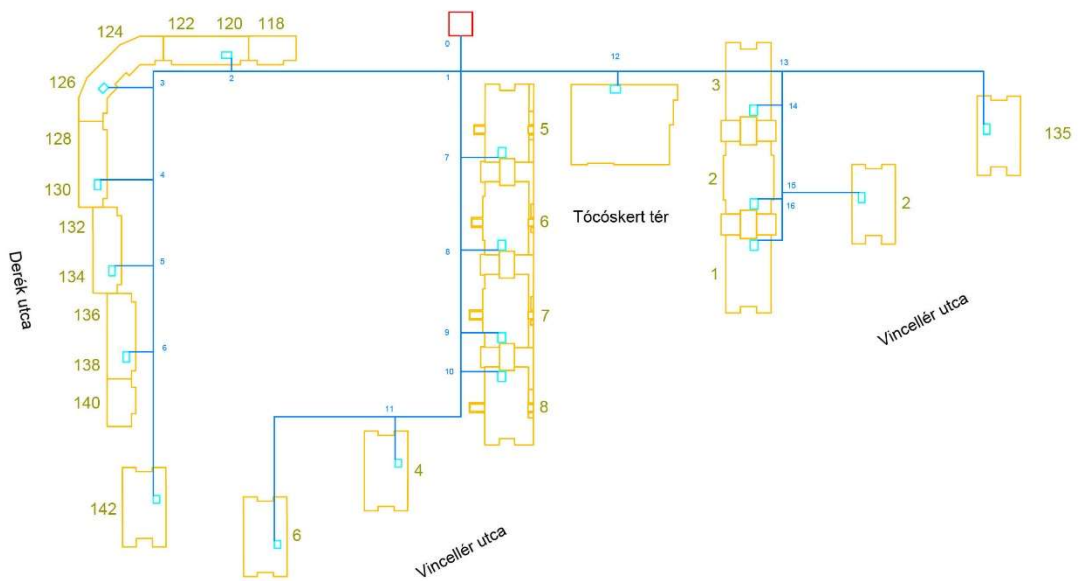


Figura 9.1 – Configurazione Ramificata 1

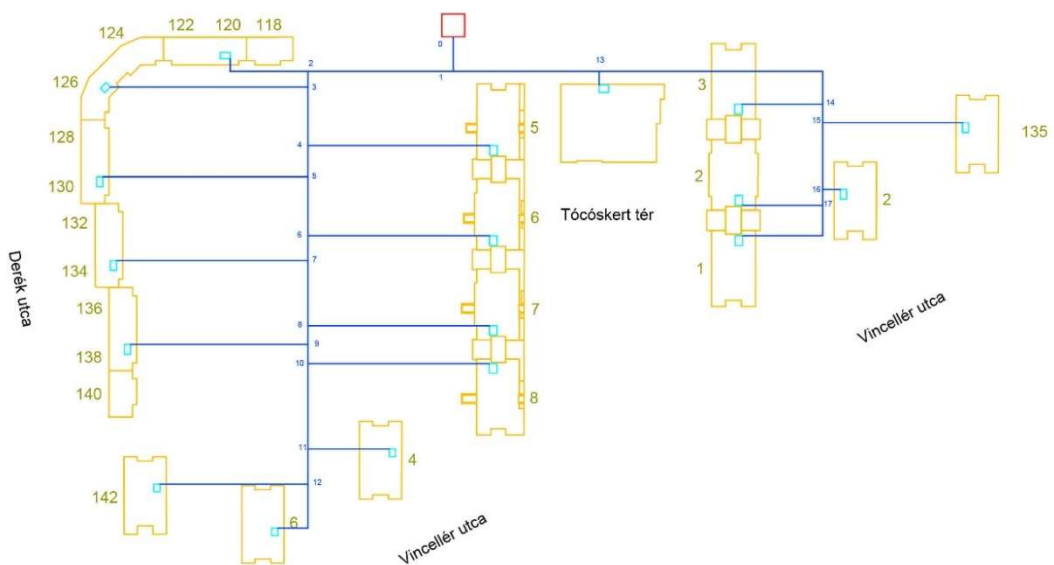


Figura 9.3 – Configurazione Ramificata 2

Ogni rete fittizia analizzata viene scomposta in una serie di sottosezioni all'interno delle quali la portata è costante. Per identificarle si fa uso delle coppie di nodi che racchiudono ogni sezione evidenziati in blu nelle Fig.9.2, Fig.9.3, e Fig.9.4. Questa identificazione è necessaria in quanto permette di suddividere la rete in sezioni di dimensione finita nelle quali le variabili necessarie per il calcolo delle perdite di calore e pressione sono, o possono essere approssimate, costanti.

9.2.2 Rete Tichelmann

Il sistema Tichelmann è un particolare metodo di installazione dei tubi, usato perlopiù in ambiti di riscaldamento e per il collegamento di pannelli solari, che permette di ottenere la somma delle lunghezze delle tubazioni di mandata e di ritorno di ogni utenza approssimativamente uguali. Utenze con una corta condotta di mandata avranno una lunga condotta di ritorno e viceversa, questo assicura che le perdite di carico per i differenti tracciati di mandata-ritorno siano uguali e di conseguenza viene assicurato un flusso uniforme di liquido termovettore in ogni utenza. Questo sistema permette di evitare l'utilizzo di valvole di bilanciamento idraulico, riducendo pertanto le relative perdite che vengono a formarsi sotto forma di potenza dissipata. Lo svantaggio generalmente imputato a questo sistema è dovuto al percorso seguito dalle tubazioni che spesso non è il più diretto possibile e che porta verso costi di installazione maggiori rispetto ad un sistema tradizionale.

La configurazione proposta illustrata in *Figura 9.4* non è totalmente identificabile con la definizione di rete Tichelmann in quanto per ridurre fortemente la lunghezza totale delle condutture impiegate si è scelto di utilizzare una ramificazione delle tubazioni di mandata, che di conseguenza corrisponde ad una doppia condotta di ritorno. Questo fa sì che le somme delle lunghezze delle tubazioni di mandata e di ritorno non siano uguali utenza per utenza, pertanto rimane necessario utilizzare valvole di bilanciamento idraulico.

Si noti che a differenza delle configurazioni ramificate in questo caso non abbiamo, per ogni tratto del tracciato, una condotta di mandata accoppiata con una condotta di ritorno; è inoltre necessario notare che anche dove mandata e ritorno sono entrambi presenti, non hanno necessariamente uguale diametro. Questo metodo di stesura della rete comporta pertanto complicazioni di calcolo delle perdite di calore, in particolare rispetto all'influsso che le condotte hanno l'una con l'altra.

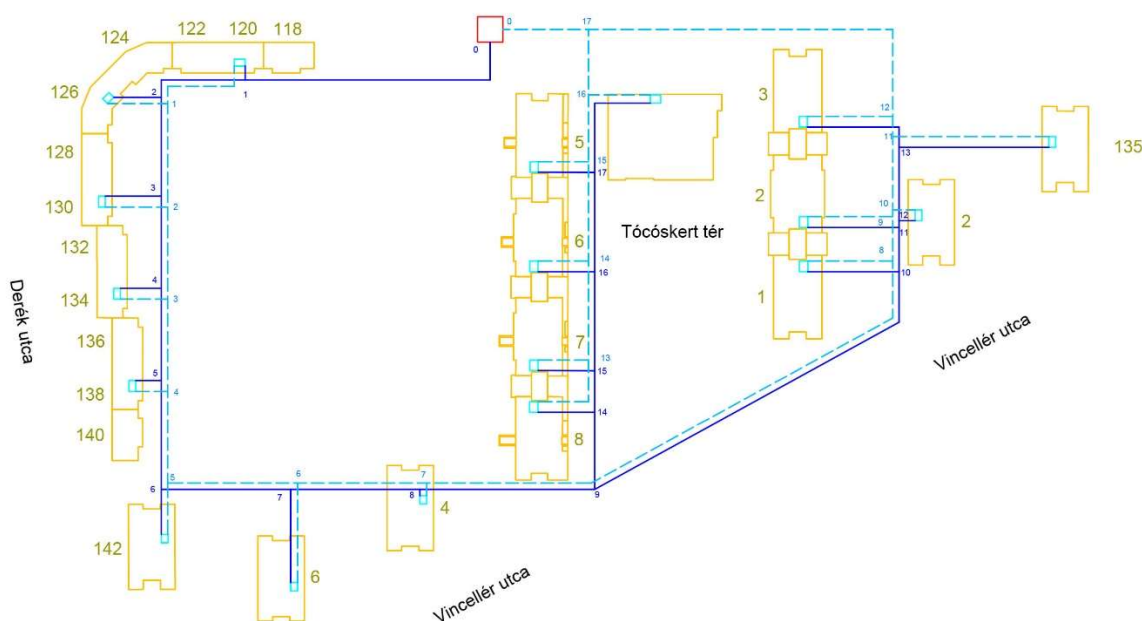


Figura 9.4 – Configurazione Tichelmann

9.2.3 Tubazioni utilizzate

Le tubazioni utilizzate per la costruzione e simulazione delle reti alternative sono le condotte proposte dalla azienda ISOPLUS. Il gruppo, con sede a Rosenheim, consiste in una serie di società di produzione e vendita che operano indipendentemente in tutta Europa. Isoplus produce direttamente in fabbrica tubazioni preisolate per scopi che spaziano dal teleriscaldamento ai più disparati utilizzi industriali. La qualità del processo di produzione viene assicurata da un continuo controllo di qualità e sulla base di certificazioni internazionali e standard riconosciuti; pertanto tutti gli impianti di produzione Isoplus sono certificati secondo la norma DIN EN ISO 9001, oltre che a numerose certificazioni ambientali secondo la norma DIN EN ISO 14001.

Le tubazioni utilizzate sono specificatamente progettate per impiego a fini di riscaldamento, in *Fig.9.4* è riportata una immagine di un segmento esemplificativo delle condotte impiegate, in *Tabella 9.1* e *Tabella 9.2* sono riportate rispettivamente le dimensioni e i coefficienti di scambio termico rispettivi.

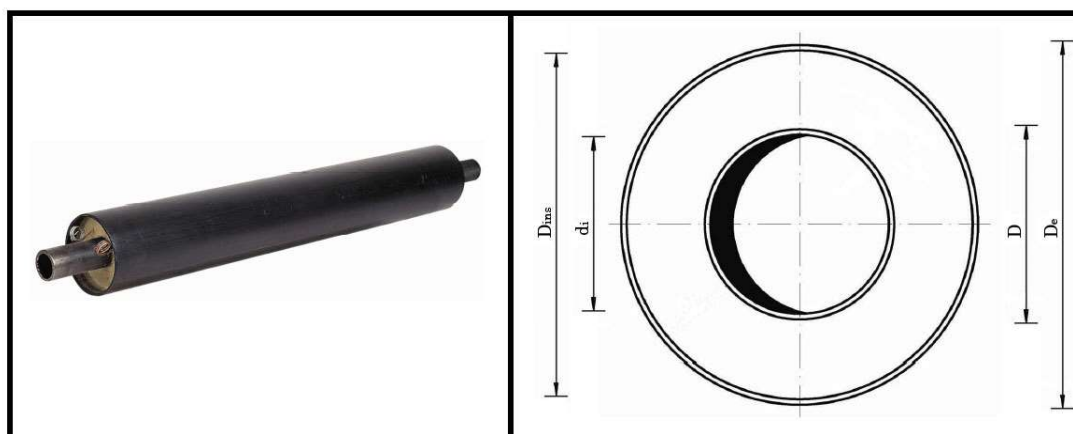


Figura 9.4 –Esempio di tubazioni impiegate

Tabella 9.1

Dimensione tubazioni			Lunghez. sezione L [m]	Diametro esterno tubazioni D_e [mm]		
Diam. nomin. DN [mm]	Diam. esterno D [mm]	Spessore parete s [mm]		Classe d'isolamento		
				Standard	Spes. mag. x1	Spes. mag. x2
20	26,9	2,3	6	90	110	125
25	33,7	2,6	6	90	110	125
32	42,4	2,6	6/12	110	125	140
40	48,3	2,6	6/12	110	125	140
50	60,3	2,9	6/12	125	140	160
65	76,1	2,9	6/12	140	160	180
80	88,9	3,2	6/12	160	180	200
100	114,3	3,6	6/12	200	225	250
125	139,7	3,6	6/12	225	250	280
150	168,3	4,0	6/12	250	280	315
175 *	193,7	4,5	6/12	280	315	355
200	219,1	4,5	6/12/16	315	355	400
225 *	244,5	5,0	6/12/16	355	400	450
250	273,0	5,0	6/12/16	400	450	500
300	323,9	5,6	6/12/16	450	500	560
350	355,6	5,6	6/12/16	500	560	630
400	406,4	6,3	6/12/16	560	630	670
450	457,2	6,3	6/12/16	630	670	710
500	508,0	6,3	6/12/16	670	710	800
550 *	558,8	6,3	12/16	710	800	900
600	610,0	7,1	12/16	800	900	1000
650 *	660,0	7,1	12/16	900	1000	---
700	711,0	8,0	12/16	900	1000	---
750 *	762,0	8,0	12/16	1000	1100	---
800	813,0	8,8	12/16	1000	1100	---
850 *	864,0	8,8	12/16	1100	1200	---
900	914,0	10,0	12/16	1100	1200	---
1000	1016,0	11,0	12/16	1200	1300	---

Tabella 9.2

Diametro nomin. [mm]	Diametro esterno tubazioni D_e [mm]			Coefficiente di scambio termico k [W/(m·K)]		
	Classe d'isolamento			Classe d'isolamento		
	Standard	Spes. mag. x1	Spes. mag x2	Standard	Spes. mag. x1	Spes. mag x2
20	90	110	125	0,1359	0,1169	0,1074
25	90	110	125	0,1652	0,1379	0,1249
32	110	125	140	0,1688	0,1498	0,1362
40	110	125	140	0,1935	0,1688	0,1518
50	125	140	160	0,2155	0,1885	0,1644
65	140	160	180	0,2527	0,2111	0,1844
80	160	180	200	0,2606	0,2211	0,1970
100	200	225	250	0,2762	0,2322	0,2037
125	225	250	280	0,3179	0,2668	0,2275
150	250	280	315	0,3746	0,3014	0,2512
200	315	355	400	0,4075	0,3203	0,2637
250	400	450	500	0,3969	0,3141	0,2649
300	450	500	560	0,4557	0,3590	0,2922
350	500	560	630	0,4453	0,3470	0,2820
400	560	630	670	0,4742	0,3606	0,3206
450	630	670	710	0,4781	0,4103	0,3618
500	670	710	800	0,5472	0,4642	0,3537
600	800	900	1000	0,5655	0,4086	0,3274
700	900	1000	---	0,6407	0,4614	---
800	1000	1100	---	0,7186	0,5158	---
900	1100	1200	---	0,7929	0,5689	---
1000	1200	1300	---	0,8730	0,6227	---

10 ANALISI DELLE SIMULAZIONI EFFETTUATE

Per ottenere una trattazione il più possibile comprensiva, in questo elaborato si è andati ad analizzare un gran numero di casi di studio. Questa ampia trattazione porta, come diretta conseguenza, alla produzione di una quantità di dati di difficile leggibilità; nei seguenti sotto capitoli si riportano pertanto le più interessanti osservazioni legate all'analisi dei risultati e alla valutazione delle particolarità dei metodi di calcolo impiegati. Si evidenziano inoltre le più importanti differenze che emergono fra i differenti casi di studio e configurazioni analizzate.

Le osservazioni sono organizzate in modo tale da fare sì che le considerazioni effettuate nei primi sotto capitoli siano pertinenti in tutti i sotto capitoli successivi; questa suddivisione permette di mantenere una buona leggibilità e di apprezzare in modo più completo i risultati ottenuti nonostante la grande quantità di variabili in gioco.

I casi di studio che sono stati simulati per mezzo del modello di calcolo vengono differenziati su più livelli in base ad una serie di parametri e scelte effettuate. Una prima suddivisione è dovuta alla metodologia di calcolo impiegata, ovvero all'utilizzo del controllo qualitativo o quantitativo. Ulteriori parametri utilizzati per definire diversi casi di studio sono la differenza di temperatura ΔT nominale fra il fluido termovettore in mandata e in ritorno, che va ad influenzare direttamente la portata nella rete, e la temperatura di mandata nominale del fluido termovettore T_f . Sulla base di tali parametri si sono ottenute una serie di simulazioni, ognuna delle quali va ad investigare le diverse configurazioni di rete alternative e la rete esistente, differenziando a seconda dei metodi di posa.

L'intero schema delle simulazioni effettuate è riportato nella seguente tabella 10.1:

Tabella 11.1 – Definizione parametri di distinzione fra simulazioni

1	Metodologia di controllo	Controllo qualitativo		Controllo quantitativo	
2	Differenza di temperatura nominale	$\Delta T=30^{\circ}\text{C}$	$\Delta T=20^{\circ}\text{C}$	$\Delta T=10^{\circ}\text{C}$	
3	Temperatura di mandata	$T_f=90^{\circ}\text{C}$	$T_f=80^{\circ}\text{C}$	$T_f=70^{\circ}\text{C}$	
4	Metodo di posa	Tubi interrati		Tubi in canali	
5	Configurazione di rete	Configurazione Ramificata 1	Configurazione Ramificata 2	Configurazione Tichelmann	Configurazione Esistente

Si osservi che, più precisamente, i metodi di posa simulati sono di tre tipi differenti in quanto la configurazione di rete esistente è posta in tunnel. Per motivi di semplicità di rappresentazione dei grafici, si riportano le casistiche legate alla configurazione esistente nei grafici relativi alla posa in canali.

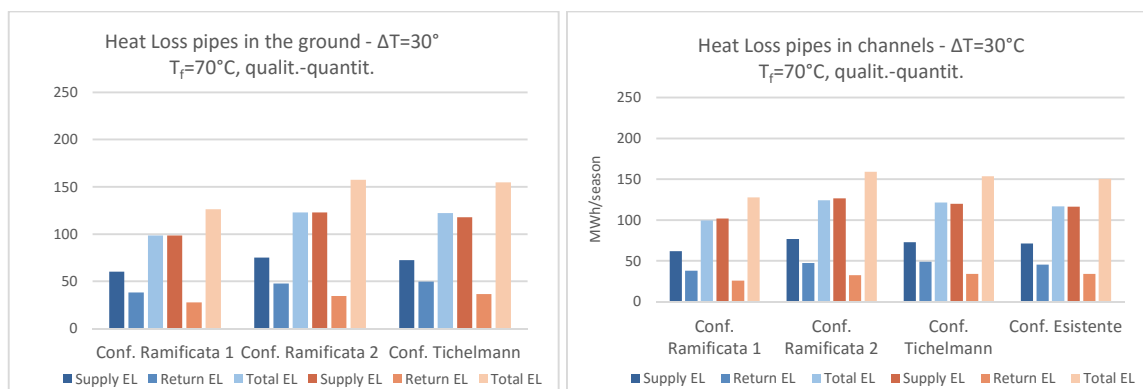
Prima di riportare la trattazione dei risultati ottenuti si osserva inoltre che in una rete di teleriscaldamento la temperatura del fluido termovettore diminuisce in modo continuo per via delle perdite di calore distribuite. Per semplificare il modello di calcolo utilizzato si è invece scelto di supporre le temperature di mandata e di ritorno fisse ai valori indicati dai metodi di controllo in utilizzo. È stato quindi necessario accertarsi che l'errore introdotto nelle simulazioni non andasse ad incidere eccessivamente sulla qualità dei risultati ottenuti; per questo motivo sono stati predisposti alcuni casi di esempio per il calcolo della variazione del fabbisogno di calore fra studio semplificato e reale. Da queste analisi risulta che la variazione delle perdite di calore stagionali fra il modello semplificato e il modello reale nella sezione di rete analizzata sono quasi inesistenti, ammontando mediamente allo 0,05% sul totale. La semplificazione effettuata risulta pertanto giustificabile.

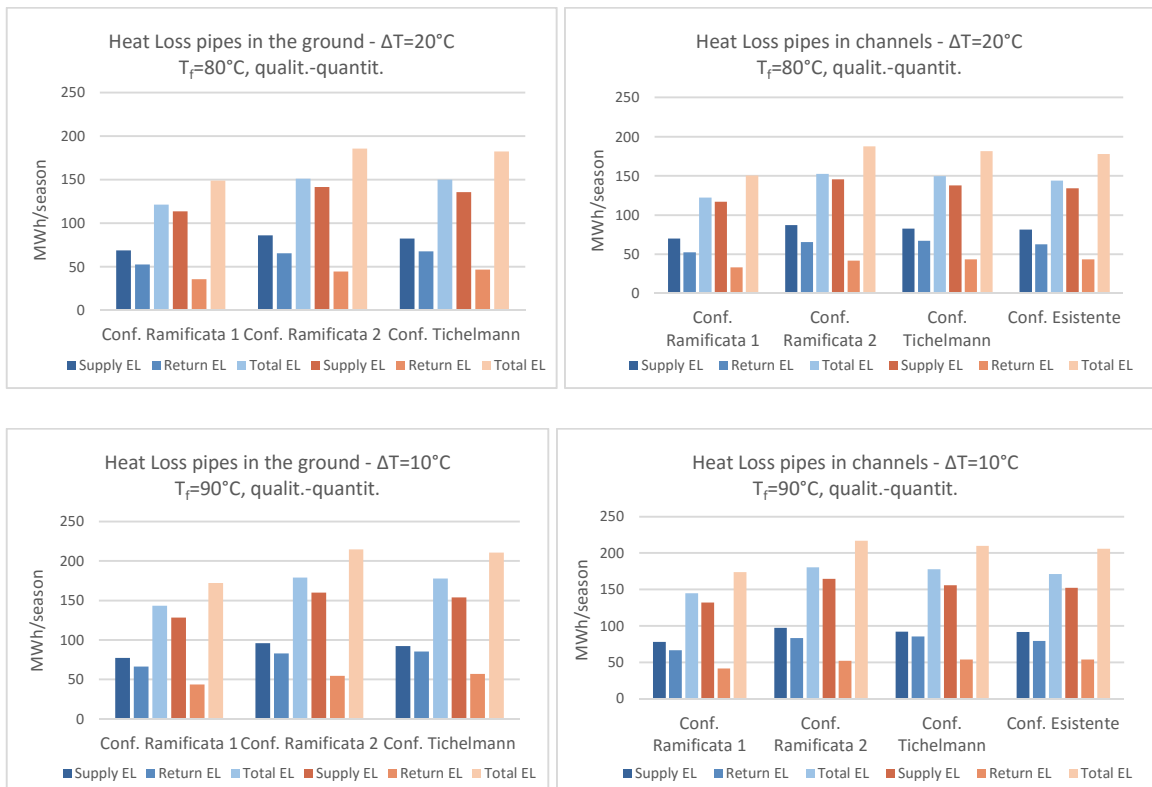
10.1 Effetti dei metodi di controllo impiegati

La variabilità delle temperature durante la stagione del riscaldamento fa sì che sia necessario fare utilizzo di metodi di controllo per regolare la disponibilità di calore che viene spacciata alle utenze. L'approccio qualitativo sfrutta la temperatura del fluido di mandata e di ritorno come parametri di controllo della rete per fare fronte alle parzializzazioni del carico, mantenendo invece la portata sempre costante; l'approccio quantitativo, diversamente, agisce sia sulla portata che sulla temperatura di ritorno del fluido termovettore, mantenendo la temperatura di mandata al valore nominale scelto. La diversa filosofia seguita dai metodi di controllo ha un impatto molto evidente sulla prestazione del sistema di teleriscaldamento, andando ad incidere profondamente sia sulle perdite di calore alle condutture che sulle perdite di carico.

10.1.1 Perdite di calore

Vengono riportati in seguito i *Grafici 10.1* con i quali si comparano i risultati relativi alle perdite di calore ottenuti nelle simulazioni. Per ottenere una comparazione significativa sono stati fissati i parametri di T_f e ΔT , in tal modo ogni differenza osservata è da ricondurre alla differente metodologia di controllo applicata. Dal punto di vista grafico si sono affiancati i risultati dei casi di studio per semplificarne la comparazione configurazione per configurazione. Per una più completa visione dei risultati ottenuti si consulti l'appendice D.



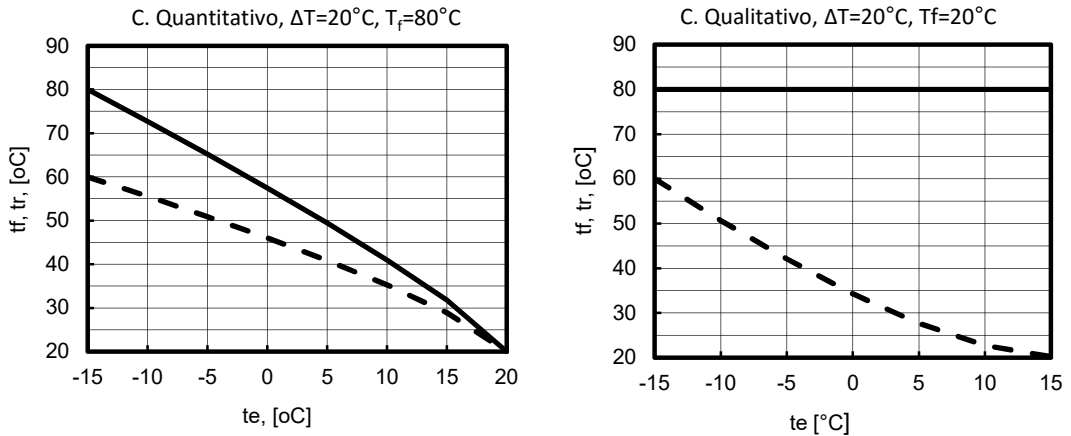


Grafici 11.1 – Comparazione perdite di calore fra controllo quantitativo e qualitativo

Si è scelto di riportare questi particolari casi di studio in quanto vanno a coprire un ampio range delle temperature di mandata e ritorno esaminate: nel caso a $\Delta T=30^\circ\text{C}$ e $T_f=70^\circ\text{C}$ ci troviamo alle più basse temperature simulate, mentre per $\Delta T=10^\circ\text{C}$ e $T_f=90^\circ\text{C}$ ci troviamo nel caso opposto.

Dai tre casi di studio sopra riportati una prima conclusione che si può trarre è che l'utilizzo dell'approccio qualitativo dà luogo ad una rete che dal punto di vista delle perdite di calore è complessivamente più efficiente. Si osserva infatti come in tutti i casi analizzati le perdite di calore per rete controllata quantitativamente siano consistentemente superiori delle controparti a controllo qualitativo, con aumenti quantificabili mediamente al 28-29% per tutti i casi a $\Delta T=30^\circ\text{C}$, al 21-23% per $\Delta T=20^\circ\text{C}$ e al 19-20% per quelli a $\Delta T=10^\circ\text{C}$.

È inoltre osservabile una delle più importanti differenze fra metodo qualitativo e quantitativo, ovvero la diversa gestione delle temperature in mandata e ritorno dalle utenze. Come riportato in seguito, con estratti dagli appendici A e B, sotto controllo qualitativo le temperature alla mandata e al ritorno vengono entrambe modificate per adattarsi alla temperatura ambientale; questo non avviene nel controllo quantitativo, dove la temperatura di mandata viene mantenuta fissa al valore nominale in ogni condizione di funzionamento. In questo modo si spiega pertanto la disuniformità fra le perdite in mandata e ritorno osservabili nell'approccio quantitativo, dove le prime arrivano a coprire l'80% del totale; nell'approccio qualitativo le perdite totali sono suddivise in modo apprezzabilmente più uniforme.



Grafici 10.2 – Esempio del controllo quantitativo e qualitativo delle T_f e T_r , estratti dagli appendici A e B

10.1.2 Perdite di carico

Il metodo di controllo scelto per la simulazione della rete di teleriscaldamento è uno dei principali fattori che vanno ad influenzare le perdite di carico sostenute. Questo è dovuto al differente approccio al controllo della portata esercita. Nel qualitativo la portata del fluido termovettore viene mantenuta costante in ogni condizione di funzionamento della rete, andando a controllare la potenza dispacciata variando la temperatura di mandata e ritorno; al contrario, in approccio quantitativo, la portata viene attivamente modificata a seconda della potenza richiesta dalla rete, come mostrato dal *Grafico 10.3* estratto dall'appendice C.

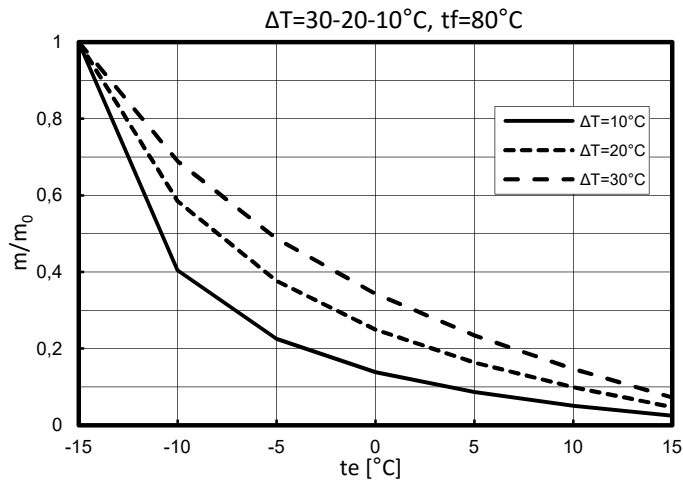


Grafico 10.3 – controllo della portata in approccio quantitativo, estratto dall'appendice C

La riduzione della portata dispacciata in controllo quantitativo all'aumentare della temperatura ambientale comporta una minore velocità del fluido termovettore nella rete, andando a limitare le perdite di carico sostenute. Questo effetto è particolarmente evidente in quanto le condizioni di funzionamento tipiche della rete sono di forte parzializzazione rispetto al carico di picco *Grafico 10.4*. Una efficace visualizzazione può essere ottenuta andando a sovrapporre al grafico di controllo della portata con la suddivisione giornaliera della stagione di riscaldamento in fasce utilizzata nel modello di calcolo e riportata nel capitolo 3.1.2.

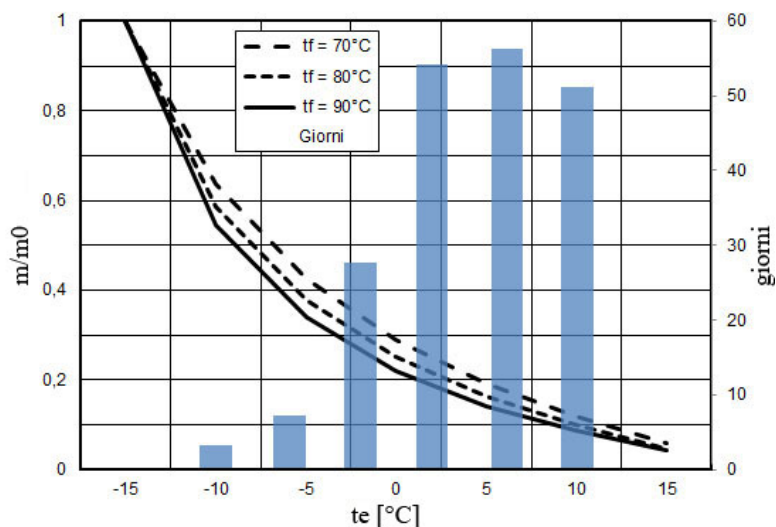


Grafico 10.4 – Sovrapposizione portata al carico parziale per $\Delta T=20^{\circ}\text{C}$ e suddivisione giornaliera stagione di risc.

È così spiegata la forte disuniformità delle perdite di carico sostenute dalla rete di teleriscaldamento al variare del metodo di controllo implementato. Come riportato dai *Grafici 10.5* restituiti dalle simulazioni le perdite in controllo qualitativo sovrastano le corrispondenti ottenute in controllo quantitativo in ogni caso di studio analizzato. Si osserva inoltre un incremento del divario crescente in funzione della riduzione del delta T nominale ipotizzato; l'approccio quantitativo infatti soffre un incremento superiore delle perdite di carico tanto più viene incrementata la portata nominale. Questo suggerisce che con una adeguata diminuzione della portata (corrispondente ad un aumento del ΔT fra mandata e ritorno) le perdite di carico ottenute con i due approcci potrebbero rientrare nello stesso ordine di grandezza. Tali casi non rientrano però nelle simulazioni effettuate.

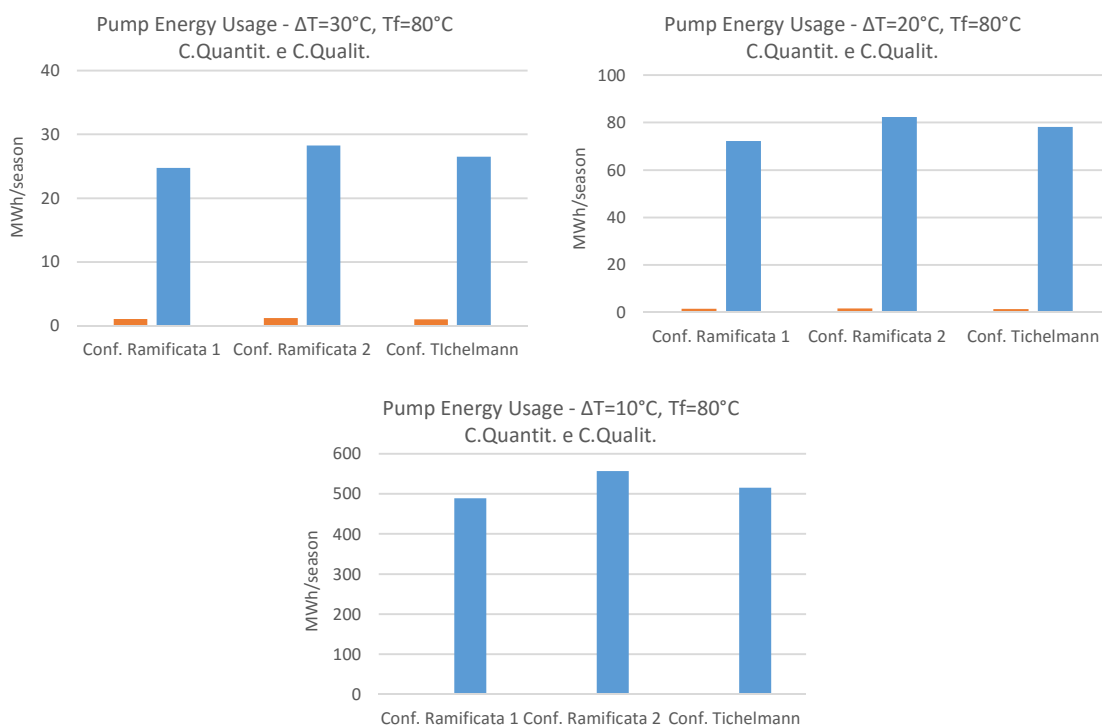
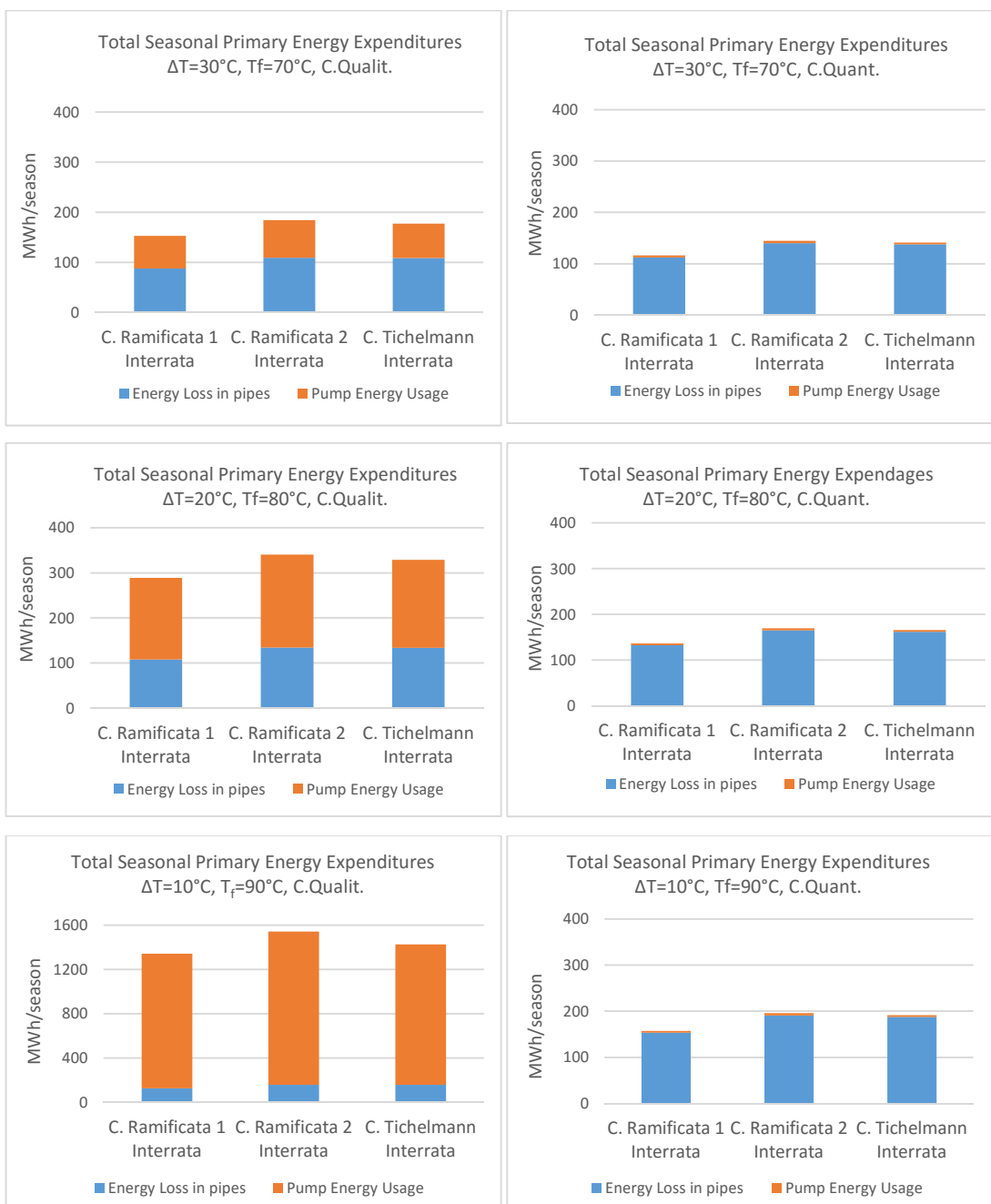


Grafico 10.5 – Perdite di carico in controllo quantitativo e qualitativo

10.1.2 Fabbisogno di energia primaria

I seguenti grafici sono stati ottenuti andando a sommare i fabbisogni stagionali dovuti alle perdite di calore e di carico nella rete, opportunamente pesati in modo da esprimerli sotto forma di energia primaria. Il "peso" delle perdite di calore è ridotto per mezzo di un fattore 0,89; esso tiene conto della parziale produzione del calore immesso nella rete a partire da fonti rinnovabili nelle caldaie in utilizzo dalla rete di teleriscaldamento di Debrecen; allo stesso modo devono essere pesate le perdite di carico, considerate come fabbisogni di energia elettrica necessari per il funzionamento del sistema di teleriscaldamento. Esse devono essere moltiplicate per un fattore 2,5 legato all'efficienza media della produzione dell'energia elettrica (per il caso in esame si fa uso dei dati relativi all'Ungheria).



Grafici 10.6 – Fabbisogni di energia primaria stagionale

La conclusione immediata che si trae dall'osservazione dei dati in uscita dalle simulazioni è di una complessiva migliore efficienza delle configurazioni in controllo quantitativo. In precedenza si è rilevato come l'approccio qualitativo presenti perdite di calore inferiori rispetto al quantitativo posto alle stesse condizioni di funzionamento; d'altra parte è vero il contrario per quanto riguarda le perdite di carico, dove l'approccio qualitativo presenta un fabbisogno stagionali ben superiori. Ulteriore peso alle perdite di carico viene dato dai fattori di conversione in energia primaria menzionati precedentemente che non fanno altro che incrementare il divario fra i fabbisogni di energia primaria fra i due metodi di controllo.

In via generale si osserva come l'utilizzo di qualsiasi configurazione a $\Delta T < 30^\circ\text{C}$ in controllo qualitativo appaia difficilmente giustificabile di fronte alla maggiore efficienza delle controparti a controllo quantitativo. In quest'ultime invece le differenti configurazioni sopra proposte, per quanto mostrino differenze percentuali rilevanti, non soffrono di una tale divario le une dalle altre a livello del fabbisogno di energia primaria, dove le perdite di carico hanno una influenza sul totale quasi irrilevante.

10.2 Effetto della variazione di ΔT nominale fra mandata e ritorno

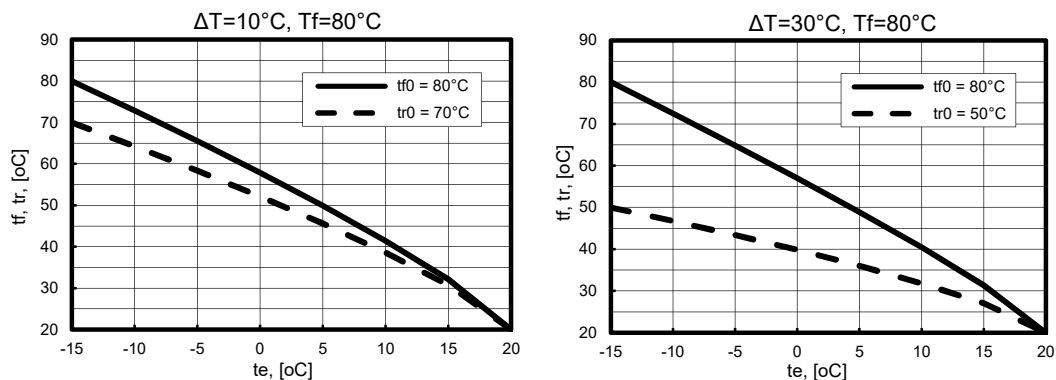
Perché la rete di teleriscaldamento possa fornire calore, è necessario che vi sia una variazione di temperatura fra il fluido in mandata e il fluido di ritorno dalle utenze servite. Sono state indagate configurazioni fra le quali tale differenza di temperatura nominale viene modificata; è importante notare come la ΔT riportata è quella valida solo in condizioni nominali di funzionamento della rete, ovvero nelle ipotetiche condizioni di picco della richiesta di calore. Tali condizioni, nel caso in esame, sono regolate dalle normative ungheresi e corrispondono a temperature medie giornaliere dell'ambiente esterno di -15°C . Al di fuori delle condizioni nominali di funzionamento le ΔT reali variano rispetto a una serie di parametri, fra cui la temperatura media giornaliera esterna e il metodo di controllo impiegato.

10.2.1 Perdite di calore

Supponendo di mantenere la temperatura nominale di mandata fissa, ci si aspetta che minore sia la differenza di temperatura ΔT maggiori siano le perdite di calore riscontrate; è possibile infatti intuitivamente arrivare a questa conclusione osservando che per una ΔT bassa la temperatura media del fluido termovettore in mandata e ritorno risulti superiore alla corrispettiva ottenuta per una ΔT maggiore.

10.2.1.1 Influenza del controllo qualitativo

Vengono riportati i *Grafici 10.7* estrapolati dall'appendice A che rappresentano la temperatura di mandata e di ritorno ottenuti per mezzo dell'applicazione del controllo qualitativo, si osservi come all'aumentare della delta ΔT nominale le temperature medie diminuiscono. Questo effetto è di piccola entità per la temperatura di mandata T_f mentre è particolarmente evidente per le curve della temperatura T_r di ritorno dalle utenze. Per questo motivo si è deciso di riportare, oltre ai valori totali, anche le perdite dovute alla mandata e al ritorno; ci si aspetta infatti che le condutture in mandata abbiano una influenza sulla variazione delle perdite al variare del ΔT inferiore alle corrispondenti al ritorno.



Grafici 10.7 – Temperature di mandata e ritorno al variare del carico e della ΔT nominale, controllo qualitativo

Possiamo pertanto confrontare i risultati di perdita di calore ottenuti per mezzo dell'applicazione del modello di calcolo; si riportano i Grafici 10.8 nei quali si accostano i valori ottenuti riducendo il ΔT da 30°C a 20°C ed infine a 10°C .

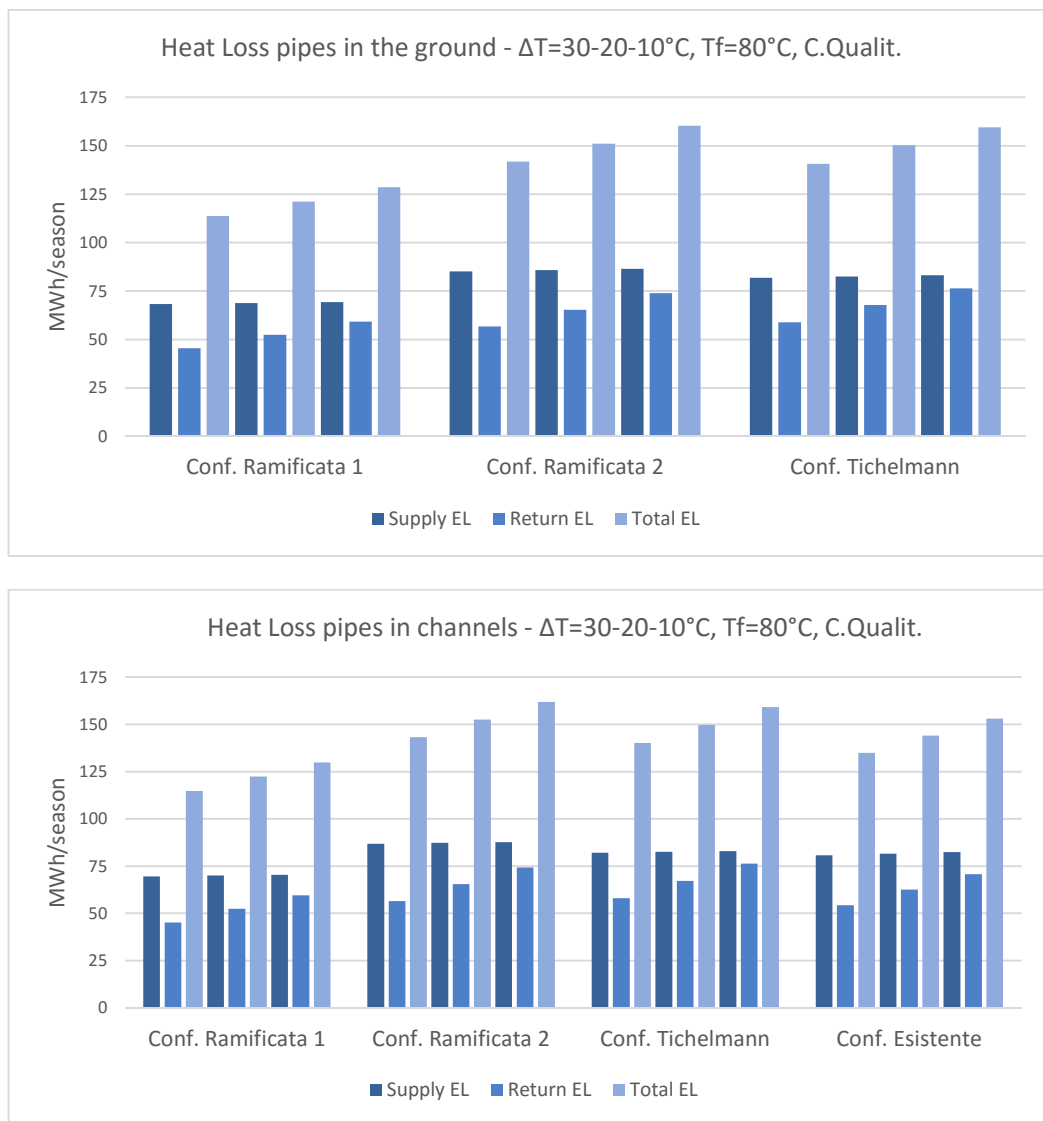
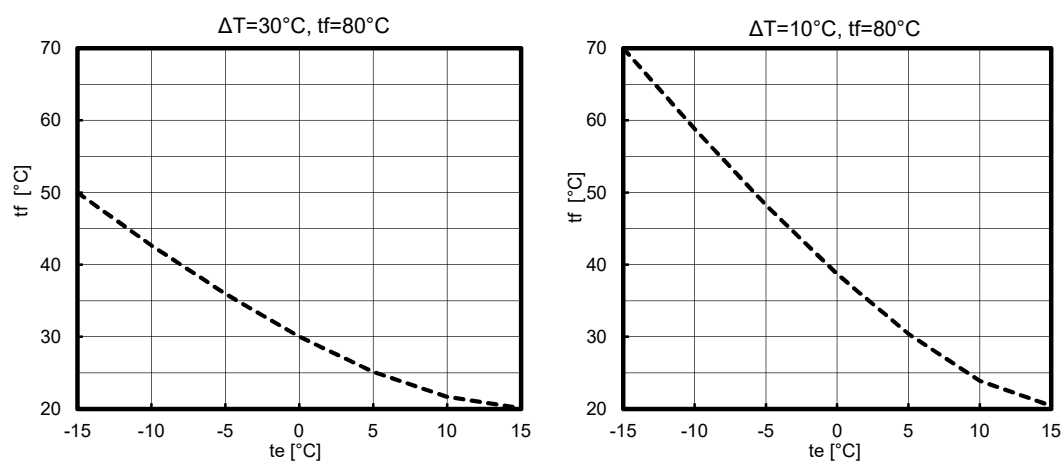


Grafico 10.8 – Perdite di calore al variare del ΔT nominale per configurazione di rete, controllo qualitativo

Come previsto si osservano perdite di calore in aumento al diminuire della differenza di temperatura delta T nominale imposta alla rete, con un aumento fra $\Delta T=30^{\circ}\text{C}$ e $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$ che per tutte le configurazioni è compreso fra il 12% e il 13%, senza differenze notabili fra posa nel terreno o posa in canali. Come fatto precedentemente notare è immediatamente chiaro come queste variazioni sono da imputare quasi totalmente all'incremento delle perdite nelle condotte di ritorno del fluido termovettore per le quali l'incremento percentuale si attesta fra il 29% e il 32%; gli incrementi corrispondenti alla mandata sono infatti ininfluenti al di sotto del punto percentuale.

10.2.1.2 Influenza del controllo quantitativo

Anche per l'approccio quantitativo valgono le considerazioni generali effettuate precedentemente. Rispetto al controllo qualitativo, però, il controllo della temperatura viene effettuato in modo differente; si riportano I grafici estrapolati dall'appendice B.

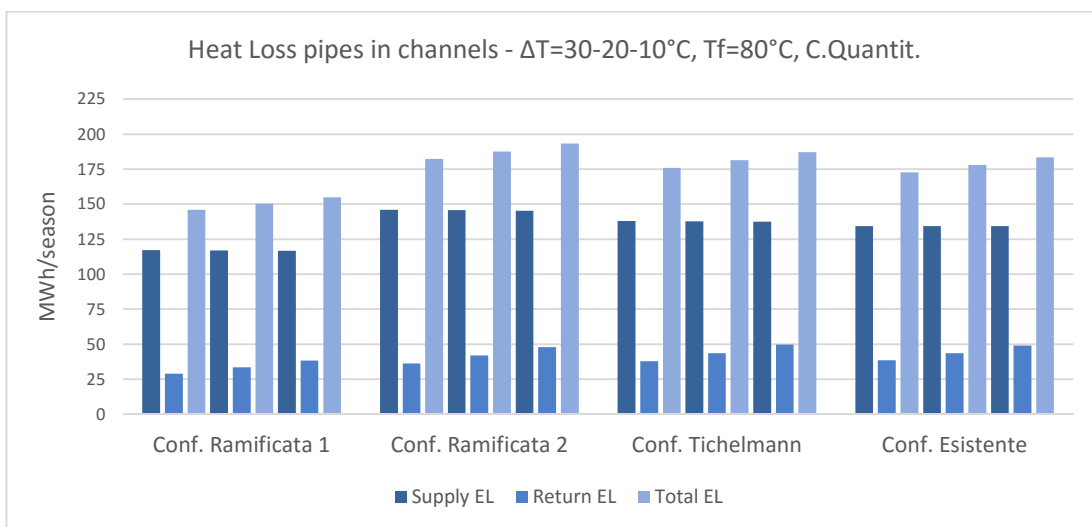
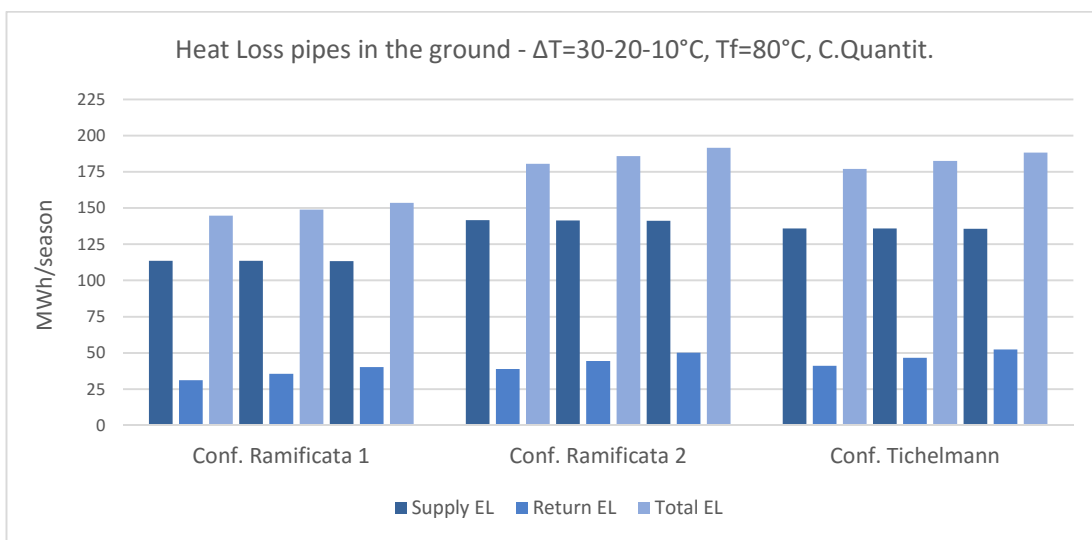


Grafici 10.9 - Temperatura di ritorno al variare del carico e della ΔT nominale, controllo quantitativo

Le temperature di mandata del fluido termovettore non sono rappresentate nei grafici precedenti, in quanto sono un parametro mantenuto costante nel controllo quantitativo,

Come già osservato nei capitoli precedenti la temperatura del fluido termovettore in ritorno dall'utenza è sensibilmente inferiore a quella ottenuta con controllo qualitativo; Ci si aspetta che questa differenza vada ad impattare sulla effettiva possibilità di ridurre le perdite di calore per mezzo della variazione della differenza di temperatura nominale ΔT . Si ricordi inoltre che nel controllo quantitativo la temperatura di mandata viene effettivamente mantenuta fissa al valore nominale per tutta la stagione di riscaldamento, pertanto non ci aspetta una variazione delle perdite di calore dovute alle condotte di mandata, se non piccole oscillazioni dovute alla variazione dell'ammontare del mutuo isolamento.

Si riportano i grafici riassuntivi ottenuti (Grafici 10.10), questa volta simulando con controllo quantitativo:



Grafici 10.10 - Perdite di calore al variare del ΔT nominale per configurazione di rete, controllo quantitativo

Dai risultati ottenuti si osserva come l'aumento delle perdite al diminuire del ΔT nominale sia ancora presente, per quanto meno accentuato rispetto a quanto visto con controllo qualitativo. Questo è legato direttamente al fatto che ad essere maggiormente influenzate dalla variazione di ΔT siano le perdite alle condutture di ritorno del fluido termovettore; come è osservabile dai grafici però allo stesso tempo le perdite dei tubi di ritorno in controllo quantitativo rappresentano una frazione minoritaria del totale, andando a ridurre l'effetto sul totale. È possibile osservare anche numericamente quanto appena espresso: per quanto, infatti, le perdite alle condutture di ritorno rimangono percentualmente comparabili a quelle dell'approccio qualitativo oscillando fra il 25% e il 32%, la variazione delle totali perdite fra $\Delta T=30^{\circ}\text{C}$ e $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$ risulta pari al 6-7% per tutte le configurazioni. Da notare inoltre come le perdite di calore alla mandata rimangono quasi stabili, come previsto precedentemente, riportando una leggera diminuzione (comunque inferiore al punto percentuale) al diminuire delle ΔT . Tale riduzione è dovuta all'incrementato effetto isolante dato dalle maggiori perdite delle condotte di ritorno.

10.2.2 Perdite di carico

La variazione del parametro ΔT non ha solo ripercussioni riguardanti le perdite di calore, esso va infatti a modificare fortemente le portate che devono essere trasportate dalla rete di teleriscaldamento. La portata, direttamente proporzionale alla velocità del fluido nella condotta, rientra direttamente nel calcolo delle perdite di carico, e un suo aumento porta ad incrementi esponenziali della potenza richiesta alle pompe di circolazione della rete. Si riportano i risultati ottenuti in approccio qualitativo nel *Grafico 10.11*:

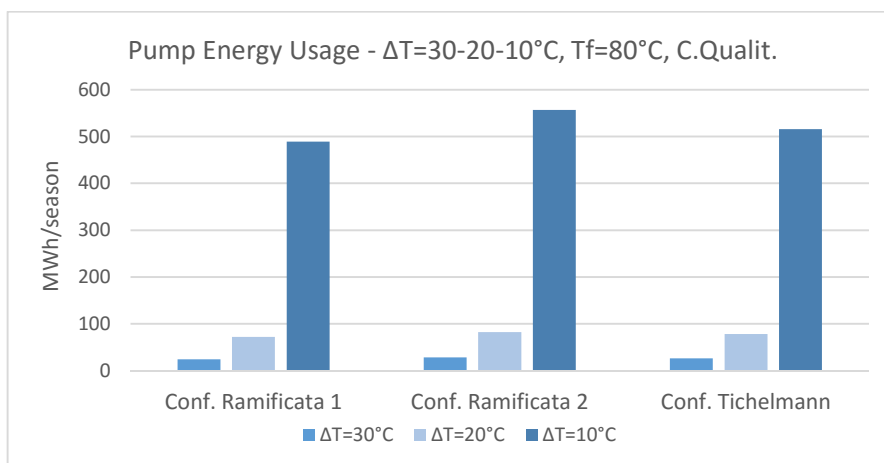


Grafico 10.11 – Fabbisogno stagionale pompe al variare di ΔT , controllo qualitativo

Dal grafico si osserva chiaramente come la differenza di temperatura nominale sia uno dei più importanti parametri da controllare in una rete controllata qualitativamente. Abbiamo infatti visto come il mantenimento della portata nominale per tutta la stagione di riscaldamento fa sì che le perdite di carico stagionali siano già di per sé elevate; andando a considerare poi eventuali riduzioni di ΔT , che vanno ad aumentare la portata nelle condotte, si ottengono valori di perdite di carico insostenibili come nel caso riportato a $\Delta T=10^\circ\text{C}$. In linea generale si riscontrano incrementi della perdita di carico esponenziali con la riduzione del parametro ΔT , non influenzati significativamente dalla T_f fissata per la comparazione. I risultati ottenuti nelle simulazioni a controllo quantitativo (*Grafico 10.12*) si discostano in parte da quanto riportato precedentemente:

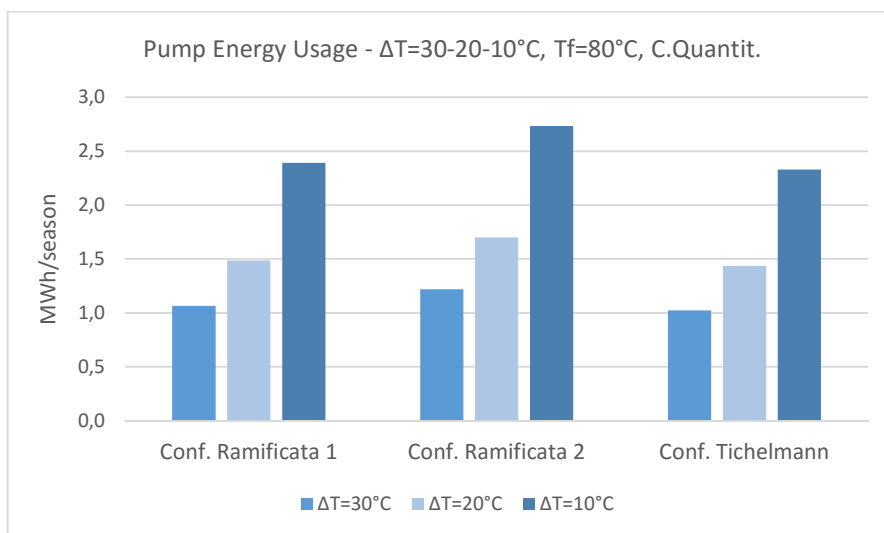


Grafico 10.12 - Fabbisogno stagionale pompe al variare di ΔT , controllo quantitativo

L'incremento delle perdite di carico ottenuto è molto elevato al ridurre del ΔT nominale, per quanto risulta decisamente meno pronunciato rispetto alla controparte a controllo qualitativo. Questo è dovuto principalmente a quanto riportato nei capitoli precedenti rispetto alla variazione di portata a carico parziale propria del controllo quantitativo; tale effetto fa sì che le ridotte portate non diano luogo ad un incremento di perdite di carico comparabile a quello del controllo qualitativo.

10.2.3 Fabbisogno di energia primaria

Al diminuire della differenza di temperatura nominale fra fluido termovettore in mandata e in ritorno si è osservato un incremento sia delle perdite di calore che delle perdite di carico, pertanto è lecito prevedere un corrispettivo incremento del fabbisogno di energia primaria stagionale.

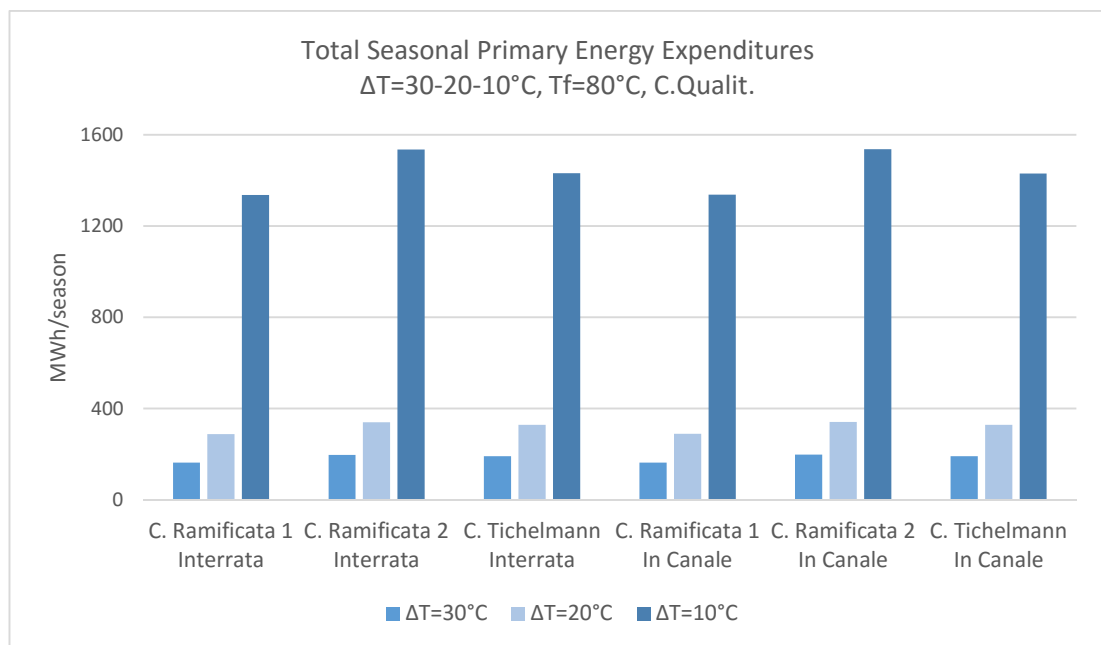


Grafico 10.13 – Fabbisogno stagionale di energia primaria al variare della ΔT nominale, controllo qualitativo

Risulta apparente nel *Grafico 10.13* come le differenze di fabbisogno di energia primaria al variare del ΔT in approccio qualitativo viene influenzato primariamente dalle perdite di carico, che sovrastano le perdite di calore. In aggiunta si ricordi che per ottenere il bilancio di energia primaria le perdite di carico devono essere pesate in quanto richieste sotto forma di energia elettrica, aumentando ulteriormente il loro peso sul fabbisogno.

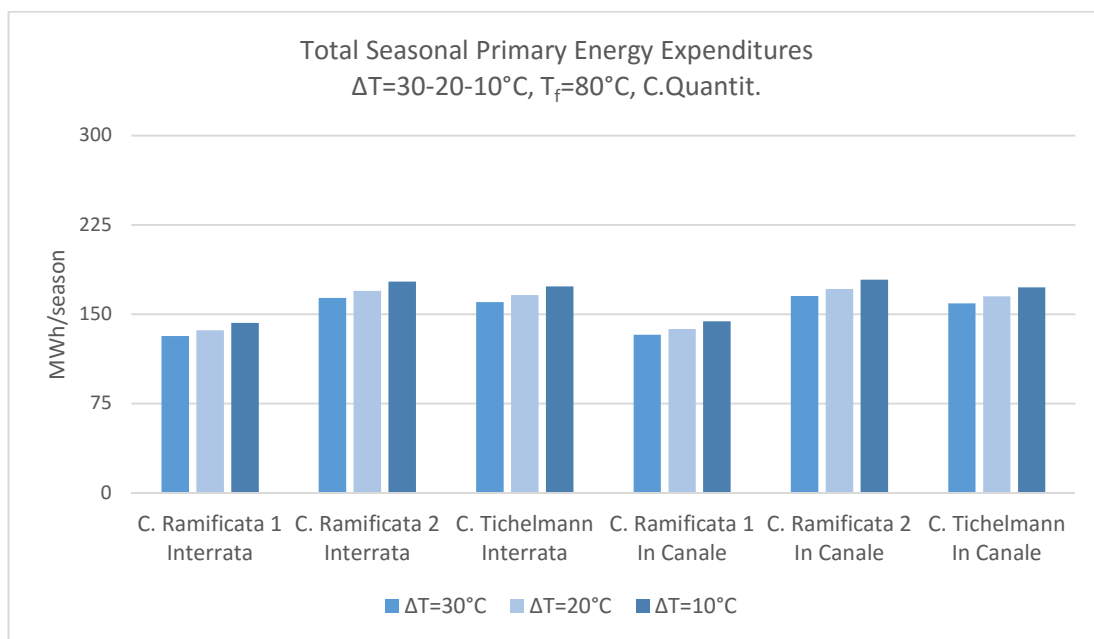


Grafico 10.14 - Fabbisogno stagionale di energia primaria al variare della ΔT nominale, controllo quantitativo

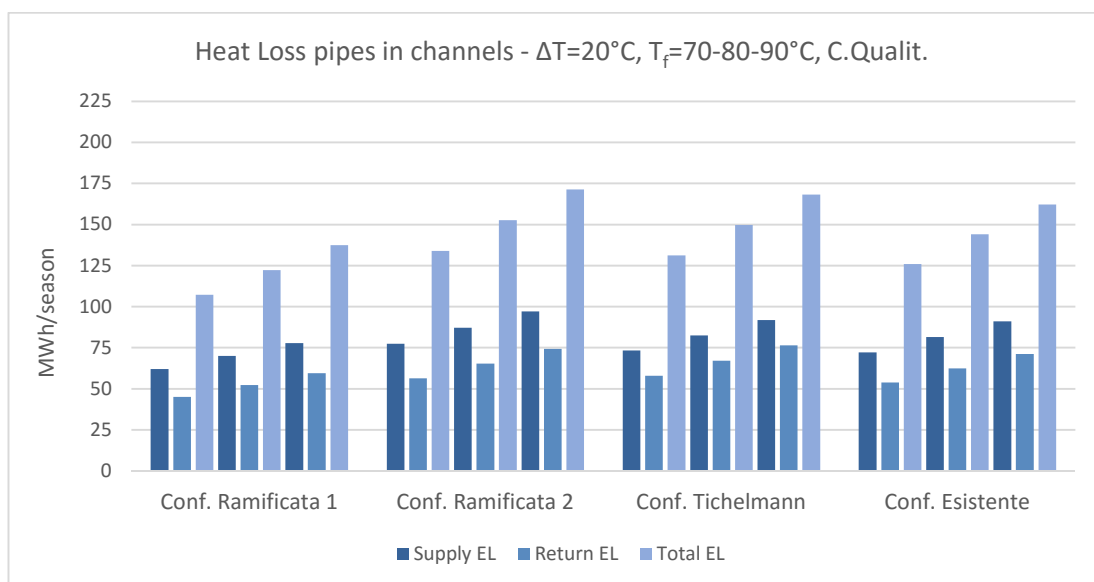
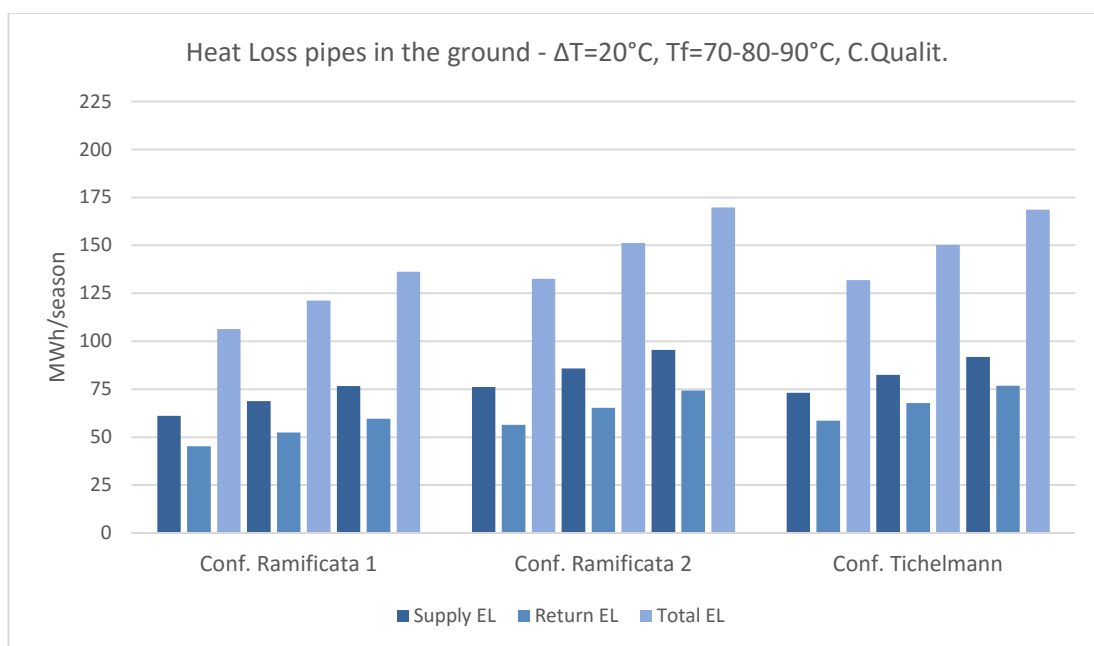
In contrapposizione a quanto visto nell'analisi ad approccio qualitativo, con l'approccio quantitativo si osserva un incremento lineare del fabbisogno di energia primaria stagionale. L'incremento medio ottenuto fra le simulazioni a $\Delta T=30^{\circ}\text{C}$ e $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$ è pari all'8%. Questa differenza è da ricondurre alle considerazioni effettuate sulle perdite di calore e di carico, in particolare sui loro moduli; si nota come le prime siano di ben due ordini di grandezza maggiori delle seconde, andando pertanto ad incidere sulle variazioni del fabbisogno energetico stagionale in modo dominante.

10.3 Effetti della temperatura del fluido termovettore in mandata

Per le simulazioni effettuate si è scelto di valutare tre diverse temperature di mandata nominali T_f , a 90°C, 80°C e 70°C, per valutarne le conseguenze a livello di perdite di calore e di perdite di carico sulla rete di teleriscaldamento.

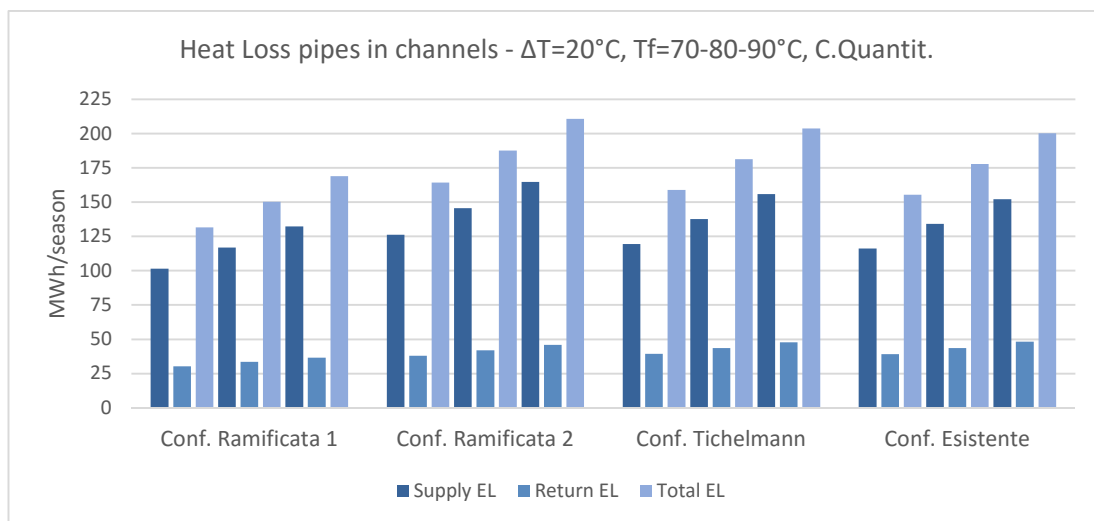
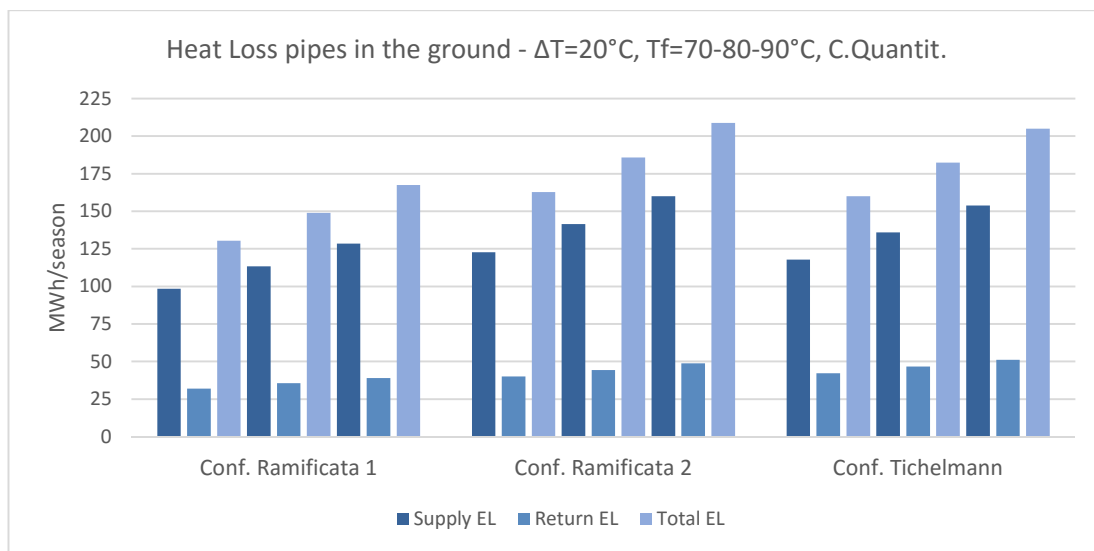
10.3.1 Perdite di calore

Successivamente si riportano sotto forma di grafico (*Grafici 10.15*) i risultati ottenuti nelle simulazioni, andando a variare unicamente il valore di temperatura di mandata T_f fra di esse.



Grafici 10.15 – Perdite di calore al variare del T_f nominale per configurazione di rete, controllo qualitativo

Si osserva che, come ci si può aspettare, ad un incremento di temperatura di mandata del fluido termovettore corrisponde un incremento delle perdite di calore alla rete. Tali incrementi vanno a influenzare in modo simile tanto le perdite di calore in mandata tanto quelle al ritorno e, sia per posa diretta nel terreno che per posa in canali e per tutte le configurazioni osservate, seguono un andamento di fatto lineare. Le differenze percentuali osservate sono molto simili al variare delle configurazioni di rete e posa ed ammontano ad un incremento del 28% fra i casi a $T_f=70^\circ\text{C}$ e $T_f=90^\circ\text{C}$.



Grafici 10.16 – Perdite di calore al variare del T_f nominale per configurazione di rete, controllo quantitativo

Similarmente alle considerazioni effettuate per le simulazioni in controllo qualitativo, anche per l'approccio quantitativo si osserva un incremento di perdite di calore all'aumentare della temperatura nominale di mandata. Si osserva anche in questo caso la peculiarità del metodo di controllo quantitativo, ovvero le elevate perdite di calore alla mandata; è interessante notare che a differenza di quanto visto in controllo qualitativo, dove l'incremento percentuale delle perdite era simile fra le tubazioni di mandata e di ritorno, in questa trattazione l'incremento percentuale alla mandata eccede significativamente il corrispondente al ritorno. Questa è una diretta conseguenza dei diversi approcci al controllo delle temperature del flusso termovettore già trattati nei capitoli precedenti e riportati negli appendici A e B. Per entrambe le metodologie di controllo in ogni caso si osserva un incremento medio delle perdite fra

la trattazione a $T_f=70^\circ\text{C}$ e quella a $T_f=90^\circ\text{C}$ pari al 28%; si sono inoltre indagate eventuali variazioni rispetto al ΔT utilizzato e osservato che sono presenti per quanto limitate, con un incremento del 30% per $\Delta T=10^\circ\text{C}$, 28% per $\Delta T=20^\circ\text{C}$ e 26% per $\Delta T=30^\circ\text{C}$.

10.3.2 Perdite di carico

Si riportano nei seguenti *Grafici 10.17* le valutazioni relative all'energia richiesta alle pompe durante la stagione di riscaldamento al variare della T_f nominale.

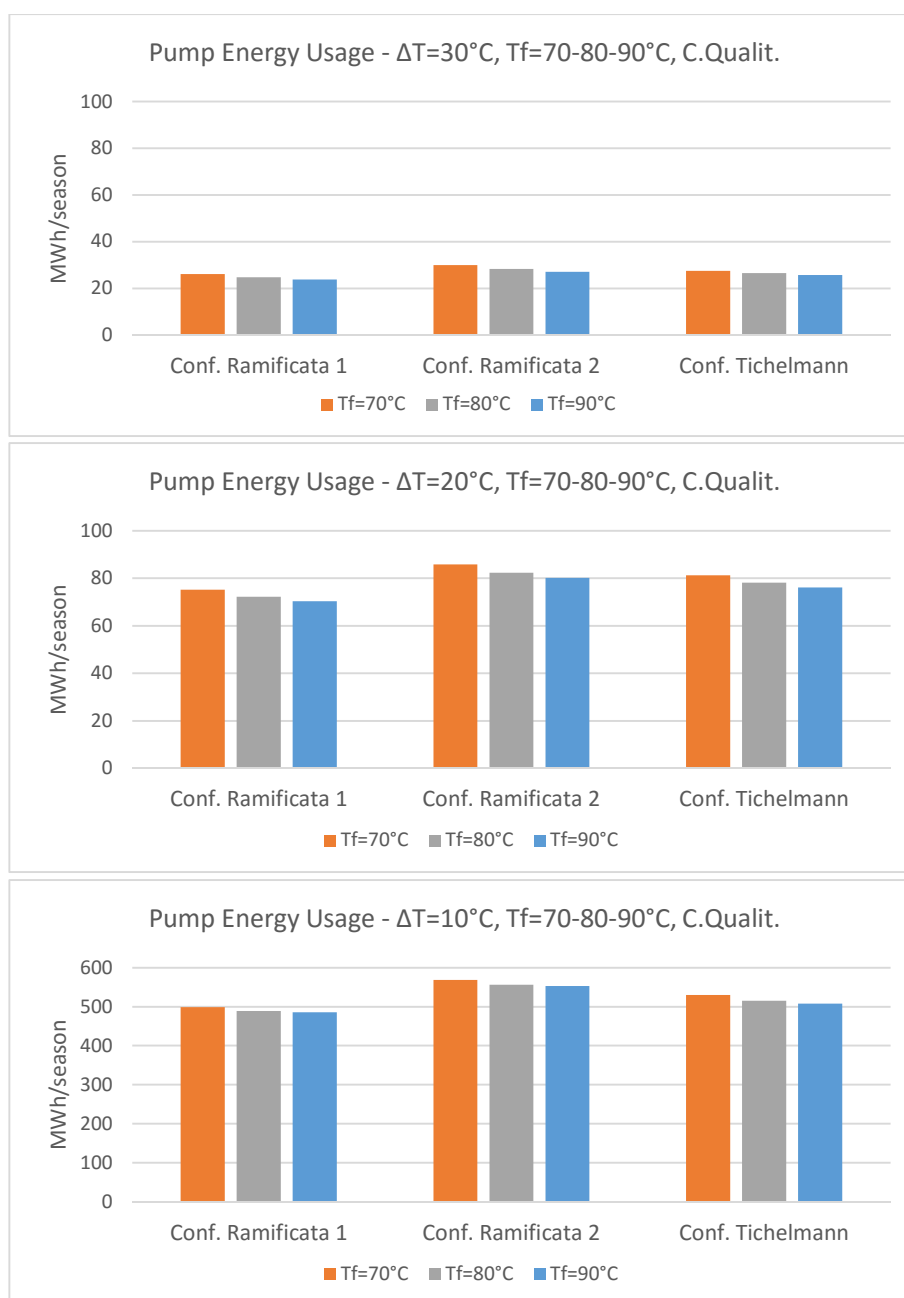


Grafico 10.17 – Perdite di carico al variare del T_f nominale per conf. di rete e ΔT , controllo qualitativo

Come mostrato dai grafici riportati all'aumentare della temperatura nominale del fluido termovettore corrisponde una riduzione delle perdite di carico stagionali nell'ordine dei 5 punti percentuali per step, ovvero una riduzione del 10% fra il caso di studio a $T_f=90^\circ\text{C}$ e il caso di studio a $T_f=70^\circ\text{C}$. La causa di queste diminuzioni è da ricercare nella riduzione della viscosità dell'acqua utilizzata come fluido termovettore all'aumentare della temperatura in questo range; la ridotta viscosità, come trattato nel capitolo 5, va a ridurre gli attriti provocati dal movimento del fluido termovettore nella condotta, riducendo a sua volta le perdite di carico.

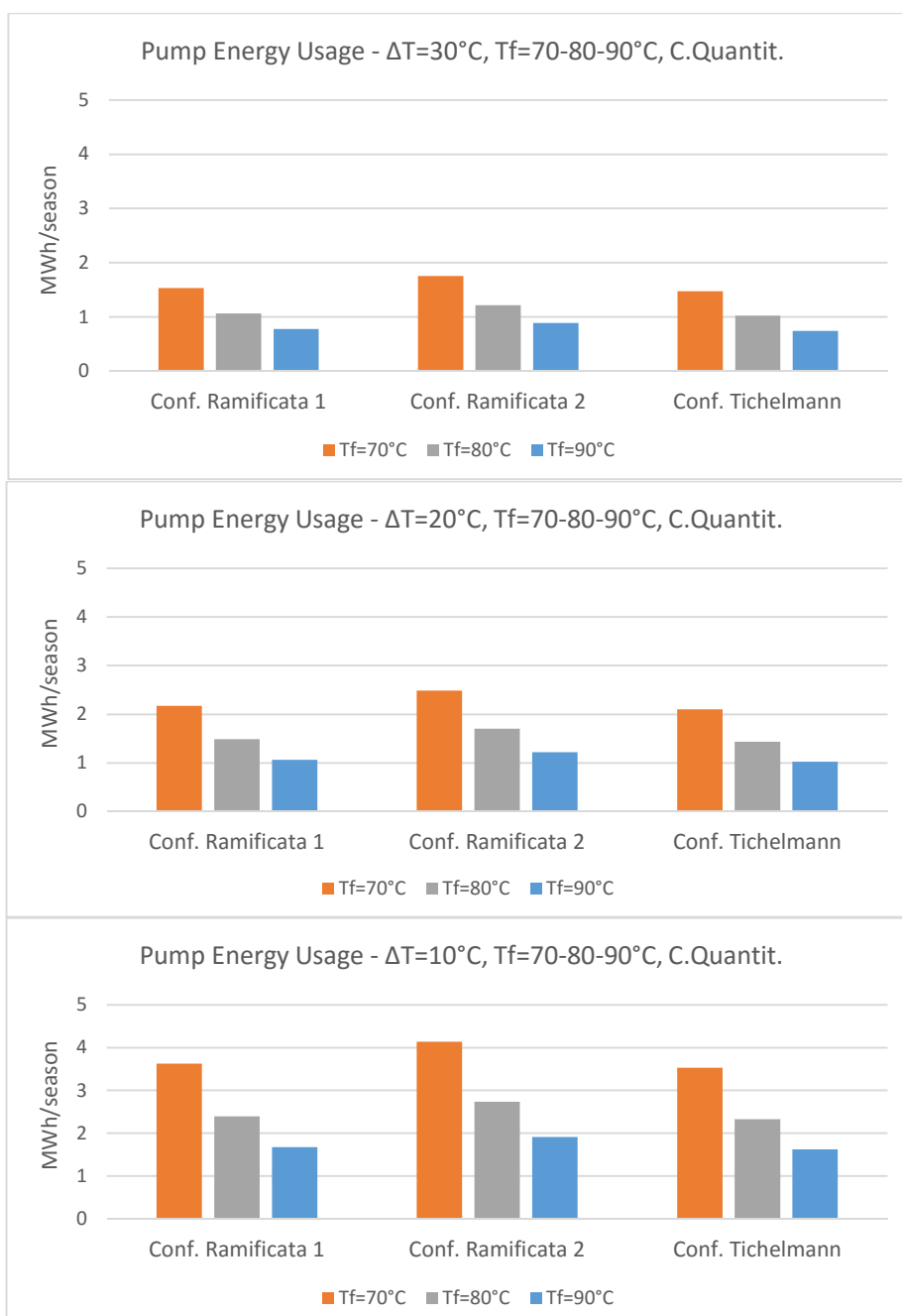
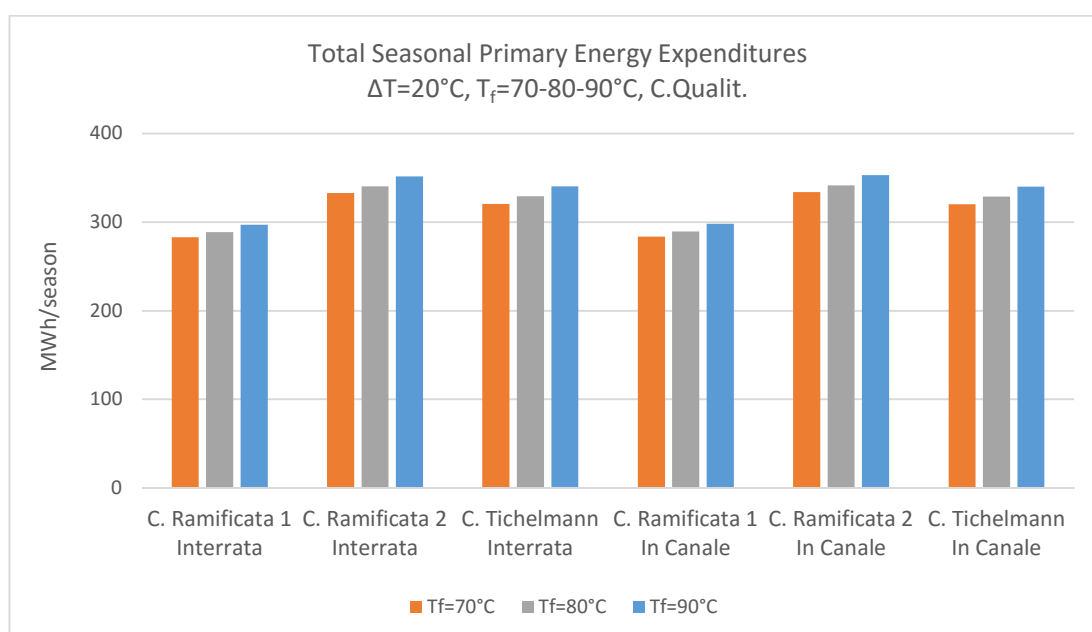


Grafico 10.18 – Perdite di carico al variare del T_f nominale per conf. di rete e ΔT , controllo quantitativo

Similarmente a quanto visto in approccio qualitativo, anche nelle simulazioni con controllo quantitativo (*Grafici 10.18*) si ottiene una riduzione delle perdite di carico all'aumentare della temperatura nominale di mandata. Si osserva come questa riduzione sia molto più pronunciata per via della diversa gestione delle curve di temperatura del fluido termovettore fra il controllo quantitativo e qualitativo già mostrate nei *Grafici 10.2*, in particolare la differente concavità delle curve di controllo del T_f . Il controllo quantitativo infatti mantiene la temperatura fissa in mandata, andando a ridurre fortemente la temperatura al ritorno. A parità di condizioni di funzionamento la temperatura in mandata risulta superiore rispetto alla corrispondente in controllo qualitativo, ed è di conseguenza meno affetta dalla riduzione della viscosità dell'acqua, che è apprezzabile sola a temperature inferiori. Il contrario avviene per il flusso di ritorno dove la forte riduzione delle temperature in controllo quantitativo nel ritorno fa sì che la variazione di viscosità al variare del parametro T_f sia molto elevata. La forte preponderanza del secondo effetto sul primo comporta che l'aumento di temperatura nominale porti ad una riduzione delle perdite di carico ben superiore a quella vista in approccio qualitativo, arrivando a variazioni del 50% fra $T_f=70^\circ\text{C}$ e $T_f=80^\circ\text{C}$ e del 43% fra $T_f=80^\circ\text{C}$ e $T_f=90^\circ\text{C}$.

10.3.3 Fabbisogno di energia primaria

Si è osservato come l'incremento della temperatura nominale di mandata del fluido termovettore porti ad un aumento delle perdite di calore alla rete di distribuzione del sistema di teleriscaldamento, creando un effetto negativo per l'efficienza della rete. Al contrario, aumentare la temperatura di mandata porta ad una riduzione della viscosità del fluido termovettore, riducendo pertanto le perdite di carico dovute alla movimentazione del fluido nelle condotte. La somma di questi effetti contrapposti portano ai seguenti risultati:



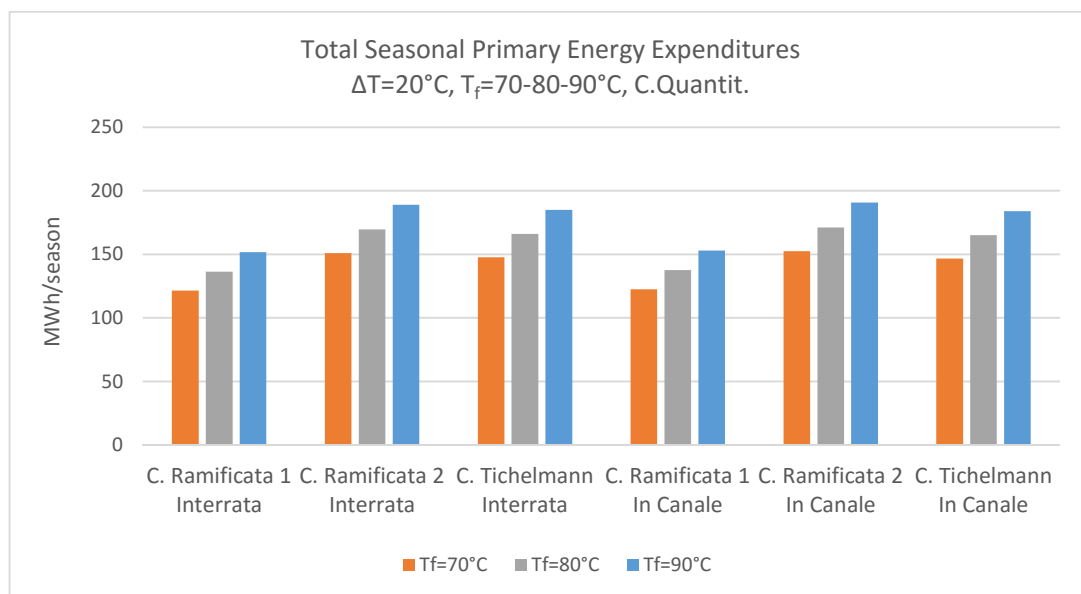


Grafico 10.19 – Fabbisogno di energia primaria stagionale al variare della T_f nominale

I grafici riportati mostrano come l'aumento delle perdite di calore dovuto all'incremento della temperatura del fluido termovettore sia l'effetto predominante, determinando maggiori spese energetiche per T_f crescente. Si osserva inoltre come questi incrementi siano nell'ordine del 2-3% per step nelle reti controllate qualitativamente, variazioni che salgono considerevolmente nelle reti controllate per mezzo dell'approccio quantitativo fino al 11-12% per step. Di primo acchito queste conclusioni possono sembrare incongruenti con le considerazioni effettuate precedentemente analizzando singolarmente le perdite di calore e le perdite di carico; in particolare se da una parte l'aumento delle perdite di calore era percentualmente simile per entrambi i metodi di controllo simulati, dall'altro le variazioni (in decrescendo) del carico richiesto alle pompe all'aumentare della T_f nominale era percentualmente molto più elevato per le reti controllate quantitativamente. Il risultato complessivo ottenuto è però giustificato dal fatto che le perdite di carico hanno un peso molto inferiore sul fabbisogno energetico totale stagionale nelle simulazioni a controllo quantitativo rispetto alle simulazioni a controllo qualitativo.

10.4 Metodi di posa impiegati

Nelle simulazioni effettuate si sono considerati tre differenti metodi di posa delle condutture facenti parte della rete di teleriscaldamento analizzata. Per le configurazioni di rete alternative, identificate come configurazioni Ramificata 1, 2 e la Tichelmann, si sono valutate la posa direttamente nel terreno e la posa in canali, trattate in dettaglio nel capitolo 4. Si è inoltre studiato il metodo di posa della rete esistente, posta in tunnel.

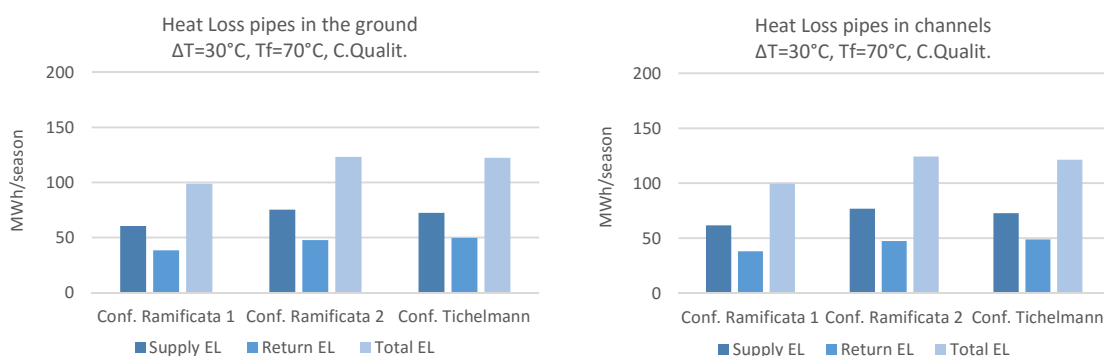
In primo luogo si osserva come il metodo di posa non vada ad influire in alcun modo sulla perdita di carico rilevata all'interno delle condutture della rete; al variare della tipologia di posa infatti, il tracciato delle condutture e i tubi impiegati rimangono i medesimi, non andando a incidere sugli attriti e le inefficienze che provocano tali perdite. Per questo motivo tutti i grafici precedentemente proposti per analizzare le variazioni delle perdite di carico non vengono riportati rispetto al metodo di posa simulato, in quanto tali precisazioni sarebbero superflue e non darebbero alcuna informazione aggiuntiva.

I metodi di posa impiegati vanno invece a influire sulle perdite di calore alla rete. Essi, infatti, incidono sullo scambio termico fra le condutture e l'ambiente e sull'ammontare del mutuo isolamento fra tubazioni dovuto all'adiacenza delle condutture di mandata e ritorno.

Una ulteriore osservazione riguarda le variazioni del fabbisogno energetico stagionale della rete di teleriscaldamento. Come visto nelle analisi delle simulazioni riportate nei precedenti capitoli, il fabbisogno della rete è calcolato come una somma pesata delle perdite di calore e delle perdite di carico. Per via dell'assenza di variazioni delle perdite di carico in seguito a modifiche del metodo di posa, si sceglie di non riportare la trattazione del fabbisogno energetico; tale trattazione sarebbe superflua in quanto le considerazioni riportabili sarebbero identiche a quelle relative alle perdite di calore.

10.4.1 Posa direttamente nel terreno e posa in canali

Si riportano nei *Grafici 10.20* una serie di risultati ottenuti al variare delle configurazioni di posa studiate; per valutazioni a più ampio spettro si riportano simulazioni per vari metodi di controllo, T_f e ΔT .



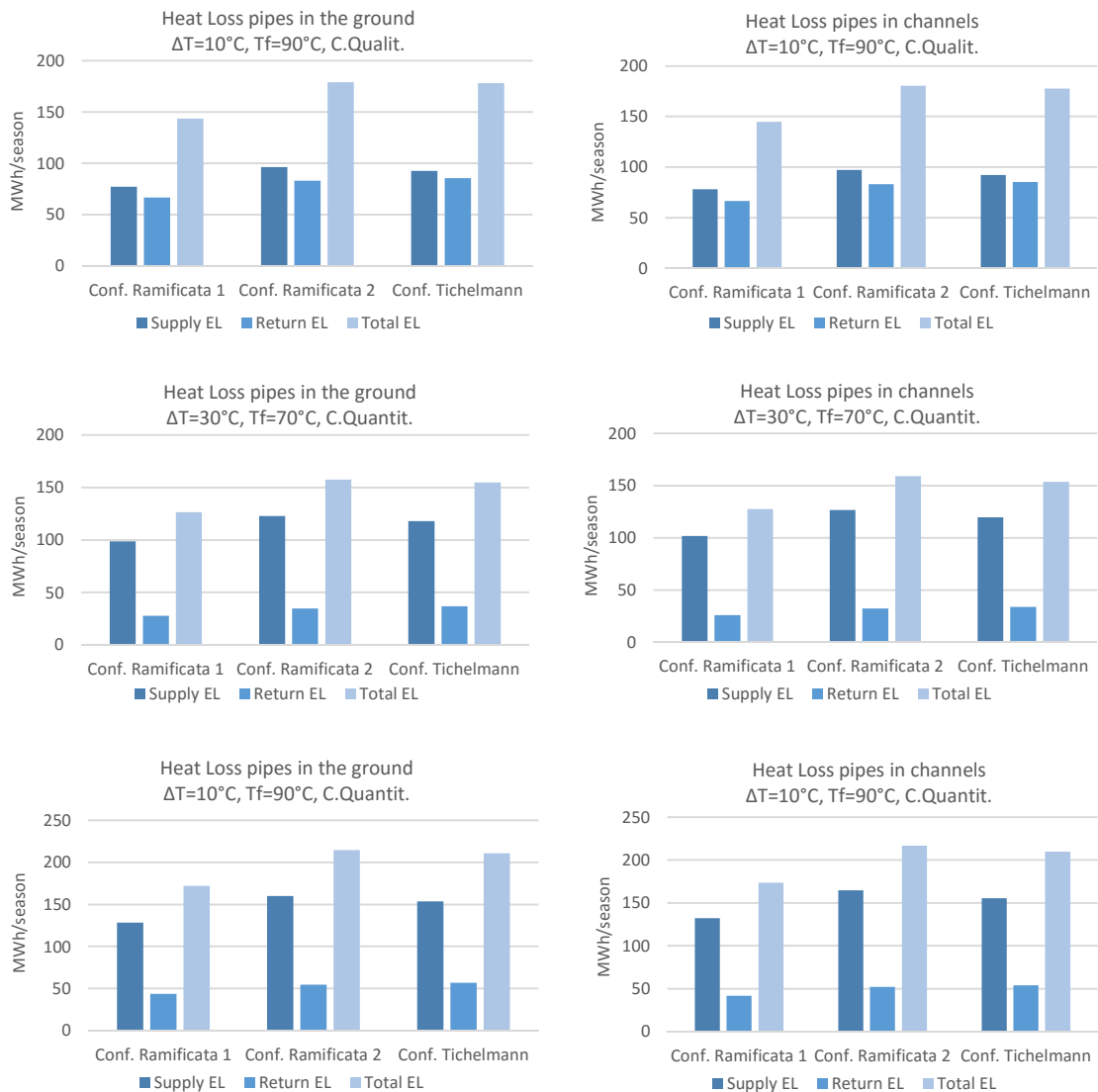


Grafico 10.20 – Perdite di calore stagionali al variare del metodo di posa (interrata, in canali)

Come si riscontra dai grafici riportati, la variazione del metodo di posa, nei casi considerati, non ha un influsso significativo sulle perdite di calore. Andando infatti a indagare i grafici ottenuti sia per mezzo del controllo qualitativo che quantitativo si osserva che raramente si ottiene un discostamento superiore all'1% per la configurazione Ramificata 1 e la Tichelmann al variare del metodo di posa, mentre per la Ramificata 2 le differenze oscillano raggiungendo il 3% a favore della posa direttamente nel terreno.

I risultati ottenuti possono sembrare contro intuitivi, con la posa direttamente in terreno che, per quanto di poco, presenta perdite di calore inferiori alla posa in canali. Ci si poteva infatti aspettare che l'aggiunta di uno strato isolante costituito dall'aria circostante le condutture nella posa in canali andasse ad incrementare la resistenza allo scambio di calore fra fluido termovettore ed ambiente. Andando ad investigare i valori delle resistenze termiche ottenute al variare delle pose si osserva come nel caso di posa in canali la resistenza del terreno viene fortemente ridotta; questo è dovuto principalmente al fatto che la profondità di posa delle condotte è la stessa di quella prevista per la posa interrata, e la dimensione del canale ospitante le tubazioni fa sì che lo strato di terreno separante il canale dall'ambiente sia molto inferiore di quello visto nella posa interrata. Questo è particolarmente vero per quelle sezioni di rete dove le condotte presentano piccoli diametri, in quanto il dimensionamento dei canali è basato sulle più grandi condotte in uso nella sotto rete studiata. Il bilancio fra la riduzione della resistenza del terreno e

l'introduzione dello strato isolante dovuto all'aria fa sì che le resistenze totali fra posa in canali e posa direttamente in terreno calcolate siano molto simili.

10.4.2 Posa in tunnel della rete esistente

Lo studio della rete esistente è basato sul metodo di posa realmente in uso. Tutte le utenze del quartiere di Tócsóskert tér sono connesse alla rete per mezzo di tunnel che alloggiano le tubature di mandata e di ritorno del fluido termovettore. Una particolarità della posa in tunnel è data dall'assenza del parametro di mutuo isolamento fra condutture adiacenti presente nelle altre tipologie di posa. Infatti, come riportato in precedenza, da osservazioni effettuate sul luogo si è ritenuto che il ricambio d'aria e le dissipazioni del calore dal tunnel verso l'ambiente non permettano un riscaldamento dovuto al calore rilasciato dalle condutture al tunnel tale da andare ad incidere significativamente sulle perdite di calore stesse.

Simili osservazioni e la mancanza di rilevazioni di dati di temperatura durante la stagione del riscaldamento all'interno della struttura hanno fatto sì che fosse necessario andare ad ipotizzare una temperatura media ambientale del tunnel. Tale temperatura, fissata nelle simulazioni effettuate a $T_t=5^\circ\text{C}$, è evidentemente di primaria importanza per il calcolo delle perdite di calore della rete. Per quanto si ritenga la stima della T_t relativamente accurata, con essa si va ad introdurre un errore di approssimazione. Grazie al grafico riportato in seguito (*Grafico 10.21*), nel quale si riportano le perdite nella rete esistente al variare del parametro T_t , si dimostra come eventuali oscillazioni di $\pm 1^\circ\text{C}$ introducono un errore compreso fra il $\pm 2,5\%$.

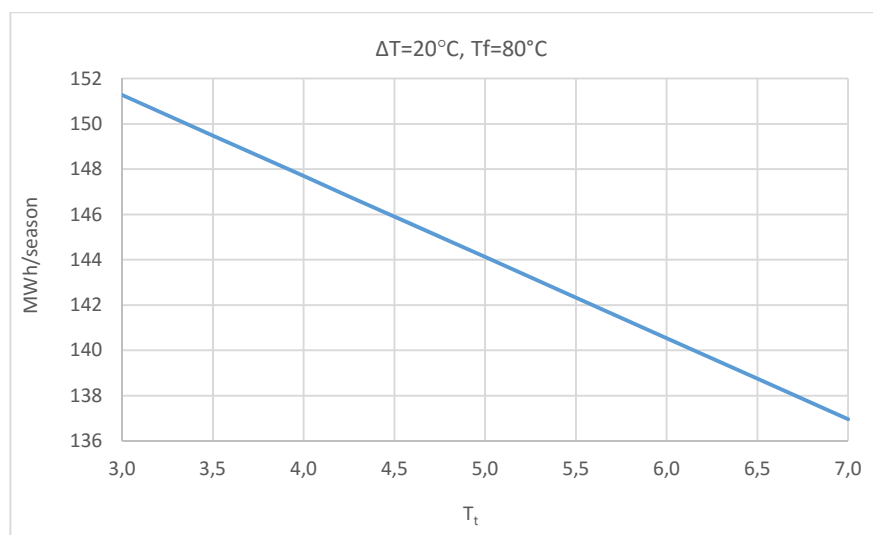


Grafico 10.21 – Variazione delle perdite di calore stagionali al variare della T_t

11.5 Differenti configurazioni di rete analizzate

Si ricorda come, per questioni di semplicità di rappresentazione dei grafici, si riportano i risultati relativi alla configurazione esistente assieme alle configurazioni poste in canali, quando il reale metodo di posa è in tunnel.

10.5.1 Perdite di calore

Nei seguenti *Grafici 10.22* sono rappresentati alcuni esempi di perdite di calore ottenuti nelle simulazioni al variare delle configurazioni di rete:

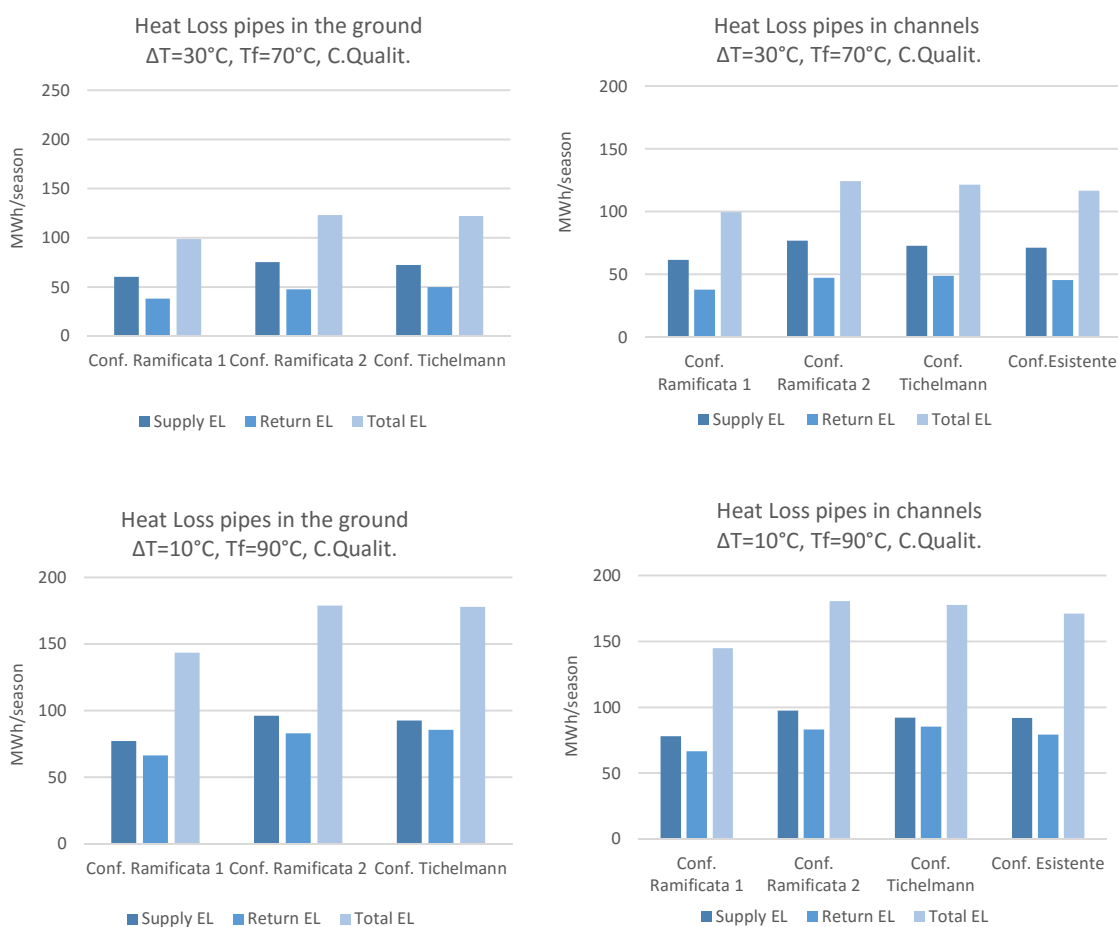


Grafico 10.22 – Perdite di calore al variare della configurazione di rete, esempi in controllo qualitativo

Quello che si osserva è un generale incremento delle perdite equivalente a differenze del 25% fra la configurazione Ramificata 1 e la 2, che si riducono al 23% fra la Ramificata 1 e la configurazione Tichelmann. Queste differenze non variano apprezzabilmente modificando il metodo di posa; si ottiene infatti solo una lieve riduzione della differenza di prestazione nella posa in canale.

Il perché di queste cospicue differenze è da ricercare nella minore lunghezza del tragitto medio cabina-utenza fra la prima configurazione Ramificata e la seconda; la Tichelmann, invece, secondo questa logica dovrebbe trovarsi in una situazione intermedia. La lunghezza totale della rete di mandata e ritorno ammonta infatti a 2250 metri per la configurazione Ramificata 1, 2980 metri per la configurazione Ramificata 2 (un aumento del 32% rispetto alla precedente) e a 2540 per la Tichelmann. Come visto però, e contrariamente a quanto ci si possa aspettare, la prestazione della configurazione Tichelmann si

avvicina a quella della rete Ramificata 2. Questo è dovuto alla logica costruttiva della configurazione Tichelmann stessa, che rispetto ad una rete Ramificata presenta diametri medi delle tubazioni che la costituiscono maggiori (145 mm medi rispetto ai 104 mm e 96 mm delle configurazioni ramificate) e pertanto maggiore area disperdente che porta ad un incremento delle perdite di calore.

La configurazione esistente è anch'essa efficiente dal punto di vista della lunghezza delle condutture utilizzate, ammontando ad un totale di 2350 metri; le sue prestazioni di perdita di calore stagionale sono le più vicine alla configurazione Ramificata 1, ma la posa in tunnel ne riduce ultimamente le prestazioni, con perdite di calore mediate del 20% superiori.

Successivamente si riportano i grafici ottenuti in simulazioni con controllo quantitativo (*Grafici 11,23*):

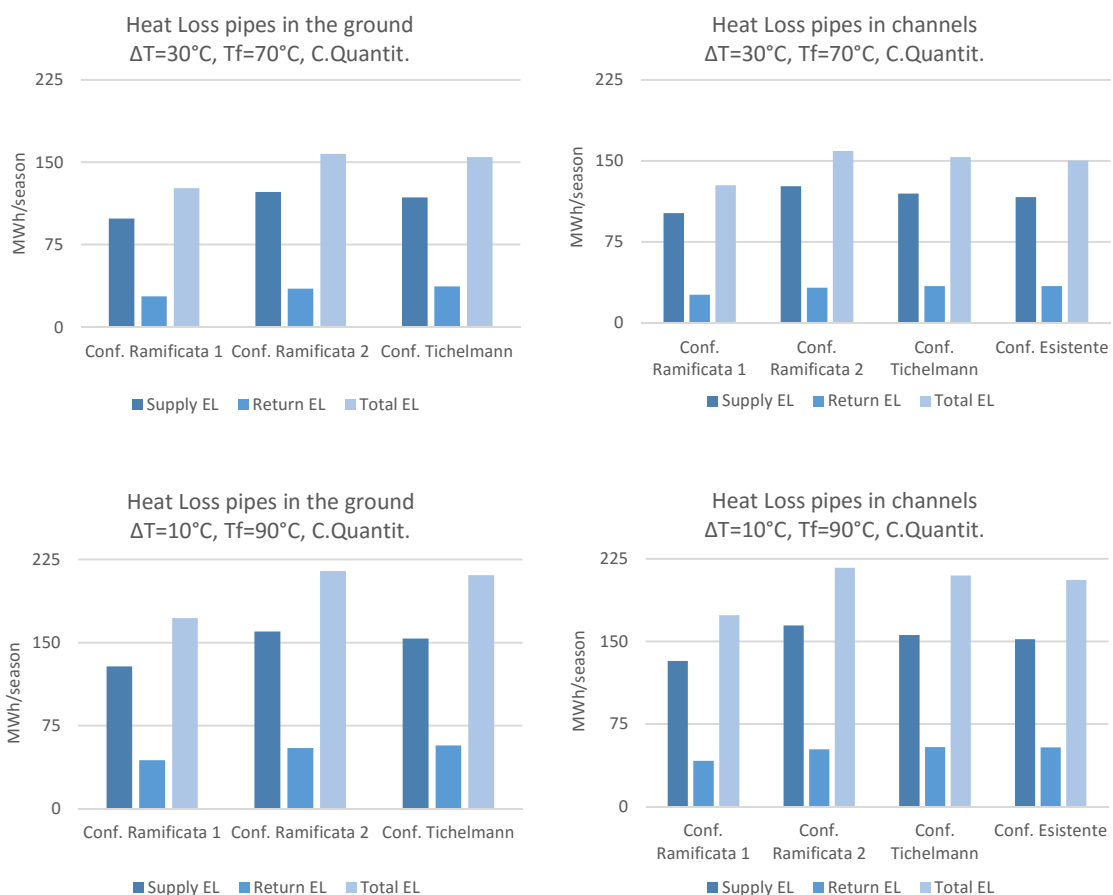


Grafico 10.23 – Perdite di calore al variare della configurazione di rete, esempi in controllo quantitativo

Come nei casi visti precedentemente, anche per in controllo quantitativo si possono fare considerazioni simili. Le differenze di lunghezza della rete e i differenti diametri di condutture in utilizzo fanno sì che la rete Ramificata 1 sia la configurazione dalle migliori prestazioni dal punto di vista termico, le differenze rispetto alle altre soluzioni sono le stesse riportate in precedenza.

10.5.2 Perdite di carico

Dal punto di vista delle perdite di carico si è accertato come le maggiori differenze misurate sono dovute alla variazione delle portate dispacciate dalla rete, con forti variazioni dei fabbisogni al variare delle ΔT . Le diverse configurazioni simulate vanno ad influire sul fabbisogno delle pompe soprattutto a seconda della loro estensione, similmente a quanto visto nelle perdite di calore. Si riportano alcuni dei risultati ottenuti nelle simulazioni effettuate; questi ultimi sono stati scelti in modo da rappresentare sia le tre differenze di temperatura nominale (e pertanto le forti differenze di portate circolanti) indagate che per coprire casi a temperature di mandata e di ritorno particolarmente differenti (*Grafici 10.24*):

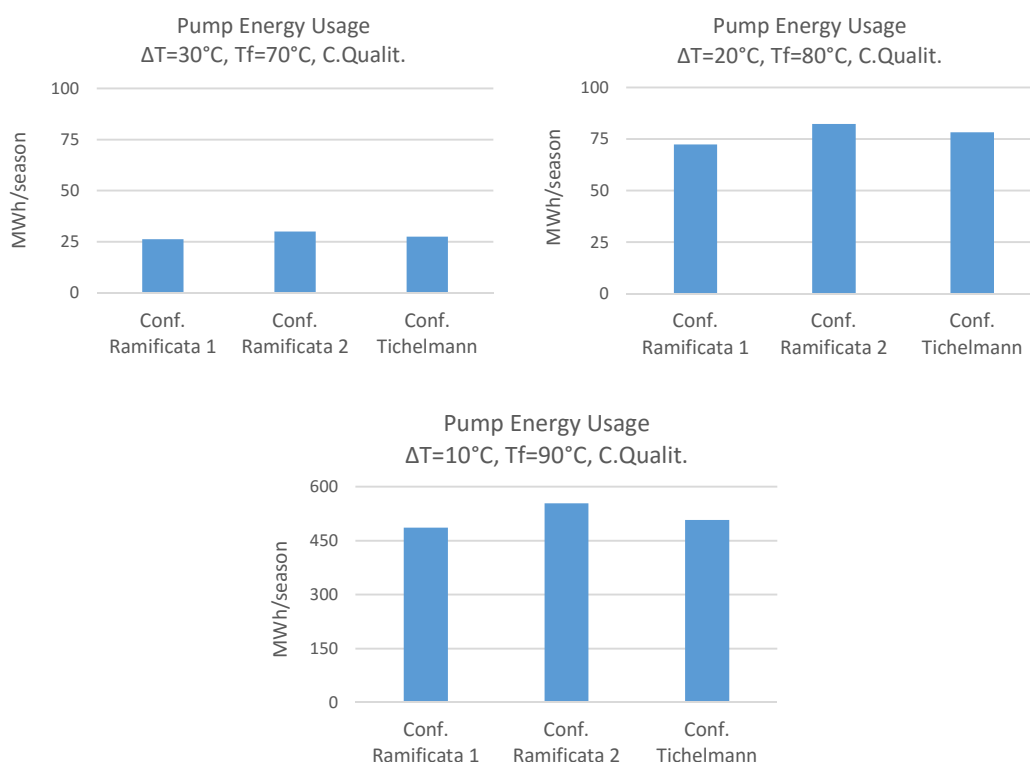


Grafico 10.23 – Perdite di carico per le diverse configurazioni considerate, simulazione in controllo qualitativo

Si osserva come la prestazione della rete in configurazione Tichelmann sia leggermente peggiore della Ramificata 1 con un incremento delle perdite di carico compreso fra il 5 e l'8% a seconda delle portate dispacciate dalla rete, in tutti i casi sopra riportati. La rete Ramificata 2 soffre visibilmente la maggiore lunghezza delle condutture di rete e presenta perdite incrementate del 13-14% rispetto alla configurazione Ramificata 1.

Nei *Grafici 10.24* vengono riportati i corrispondenti risultati ottenuti in controllo quantitativo:

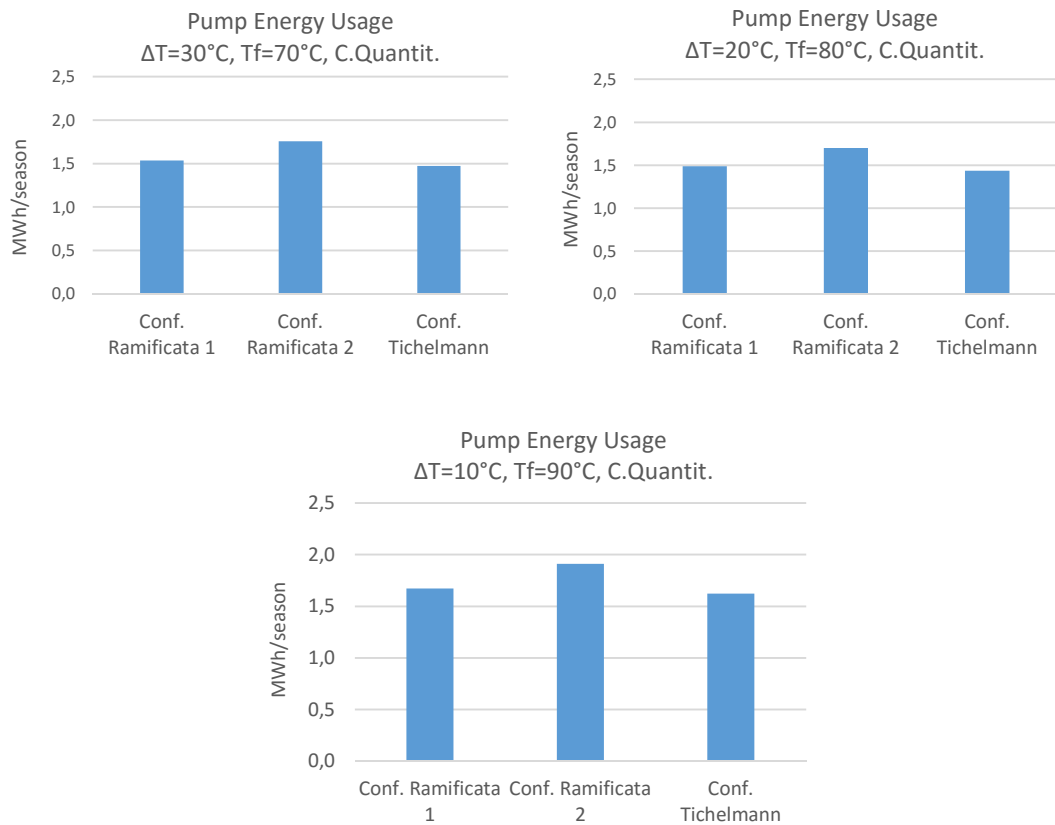


Grafico 10.24 – Perdite di carico per le configurazioni considerate, simulazione in controllo quantitativo

L'utilizzo del controllo quantitativo comporta forti riduzioni delle perdite di carico totali, come già visto nei sotto capitoli precedenti. Si osserva come la configurazione Tichelmann, diversamente dai casi a controllo qualitativo, risulti la più performante, con perdite di carico leggermente inferiori alla configurazione Ramificata 1 ed equivalenti ad una riduzione dell'energia stagionale richiesta del 3-4%. La Ramificata 2 si conferma la configurazione meno performante con una dissipazione del 20% superiore alla Tichelmann. È bene tenere in considerazione come le differenze appena riportate sono praticamente poco significative per via della bassa portata circolante propria del controllo quantitativo e dei risultanti fabbisogni stagionali risibili.

10.5.3 Fabbisogno di energia primaria stagionale

Si riportano pertanto i grafici rappresentanti i fabbisogni di energia primaria delle simulazioni mostrate nei sotto capitoli precedenti, con l'eccezione del caso a $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$, i cui fabbisogni totali lo rendono effettivamente privo di ogni interesse pratico:

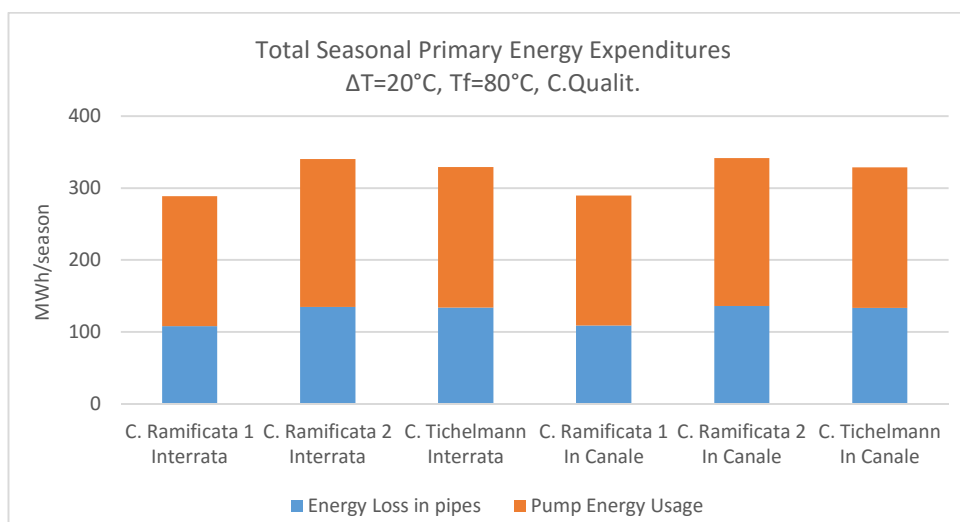
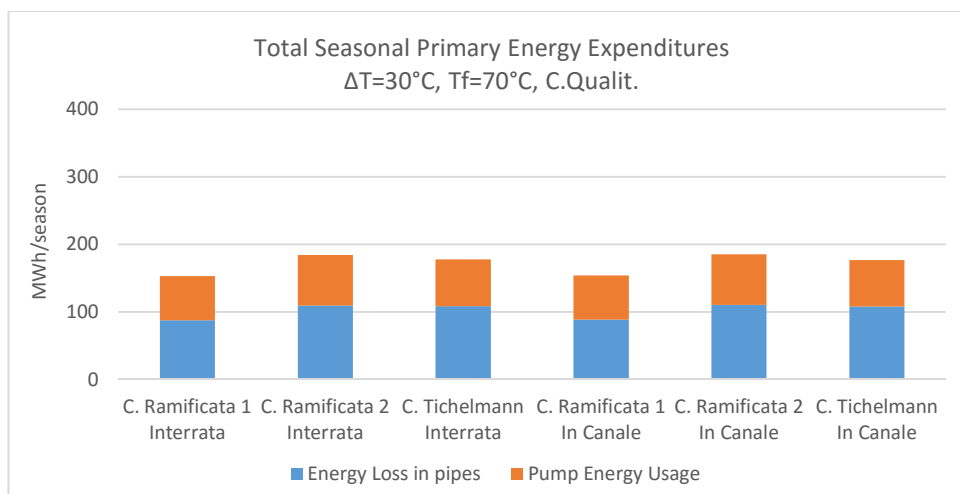
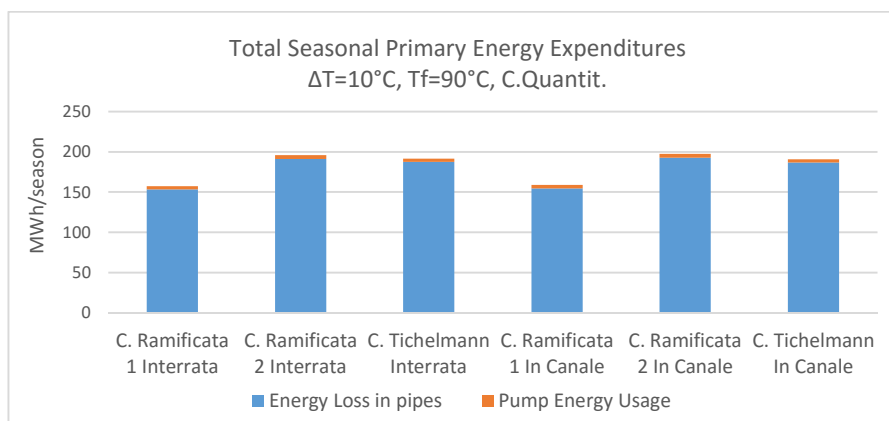
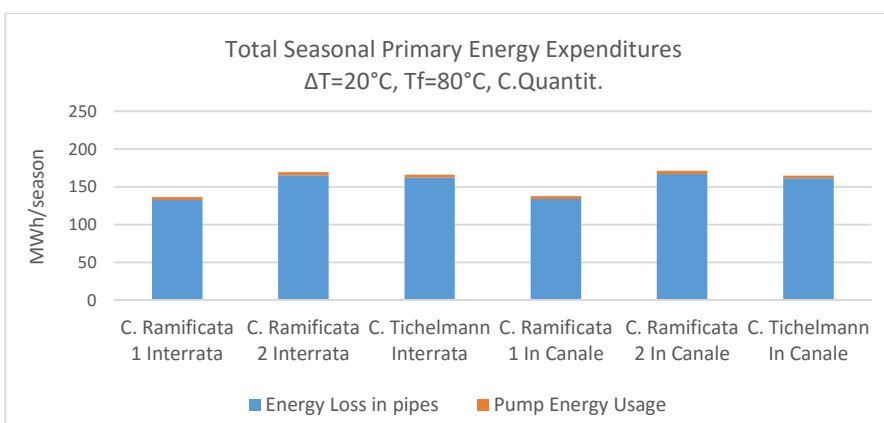
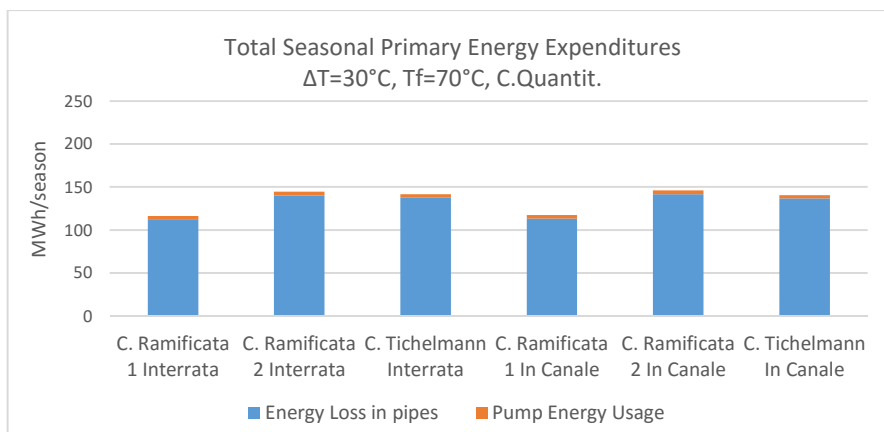


Grafico 10.25 - Fabbisogno di energia primaria stagionale per le configurazioni considerate

Come ci si può aspettare i vantaggi dimostrati sia nelle perdite di carico che nelle perdite di calore dalla configurazione Ramificata 1 si convertono anche sul livello del fabbisogno di energia primaria stagionale necessaria per il funzionamento della rete di teleriscaldamento. Si riporta come l'aumento di energia primaria richiesto dalla configurazione Ramificata 2 è quantificabile al 18-20%, mentre per la rete Tichelmann questo valore scende al 14-15% grazie alle inferiori perdite di carico.

Infine si riportano i corrispettivi grafici relativi alle simulazioni in controllo quantitativo:

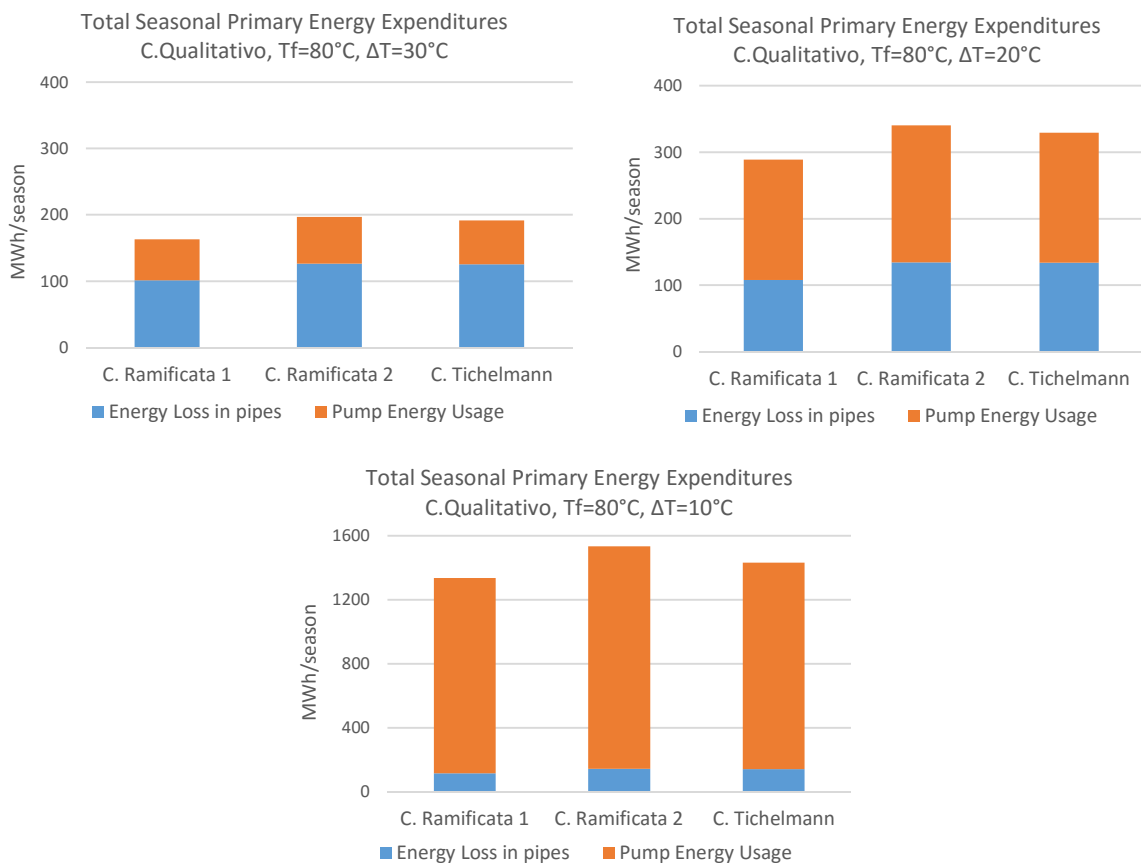


La situazione non cambia nelle simulazioni con controllo quantitativo. Come nella controparte qualitativa si ottiene una configurazione Ramificata 1 con minori fabbisogni di energia primaria, alla quale seguono la configurazione Tichelmann con un incremento del 22% e la configurazione Ramificata 2 con aumenti del 24-25%. Si nota pertanto una differenza fra le configurazioni superiore rispetto a quanto visto nelle simulazioni in controllo qualitativo; queste differenze sono da ricercarsi nel minore peso delle perdite di carico per via della natura stessa del controllo quantitativo. In approccio qualitativo infatti si può osservare come le perdite di carico vadano a “mitigare” le maggiori perdite di calore della configurazione Ramificata 2 e della Tichelmann. Questo effetto viene meno nelle simulazioni a controllo quantitativo.

11 CONCLUSIONI

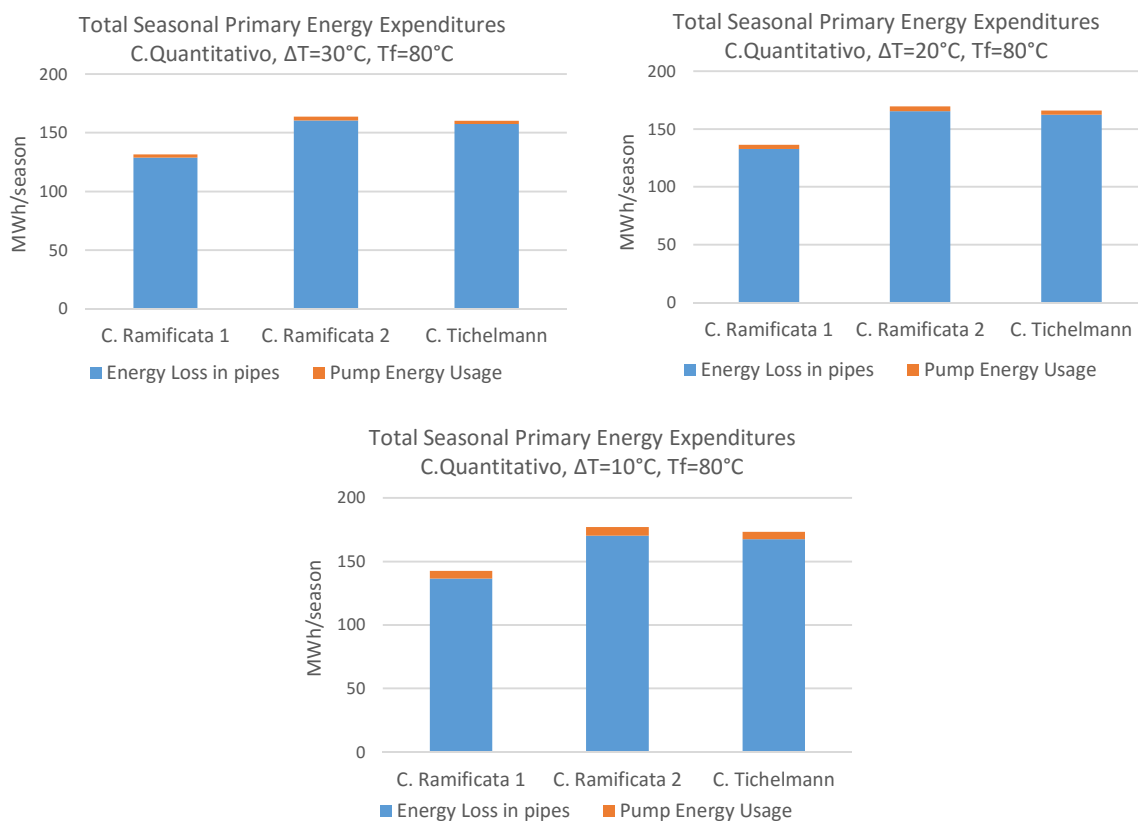
In questo elaborato è stato effettuato uno studio dei possibili approcci al controllo di una rete di teleriscaldamento. Sono state inoltre effettuate una serie di analisi energetiche per andare ad investigare i fabbisogni di energia primaria stagionale di una sezione della rete di teleriscaldamento esistente di Debrecen, città ungherese. La rete in questione spaccia il calore richiesto per il riscaldamento delle utenze del quartiere di Tócsóskert tér, l'acqua calda sanitaria viene invece fornita da un sistema indipendente. Oltre alla rete esistente sono state studiate tre alternative che si distinguono per una diversa geometria delle condotte; queste sono state denominate configurazioni Ramificata 1, Ramificata 2 e Tichelmann.

La scelta dell'approccio al controllo della rete assume elevata importanza, andando ad influire fortemente sui fabbisogni energetici stagionali del sistema di teleriscaldamento. Dalle simulazioni effettuate si è ricavato come con l'utilizzo del controllo qualitativo una parte consistente delle totali perdite sono da imputare all'energia richiesta dalle pompe per la movimentazione del fluido termovettore:

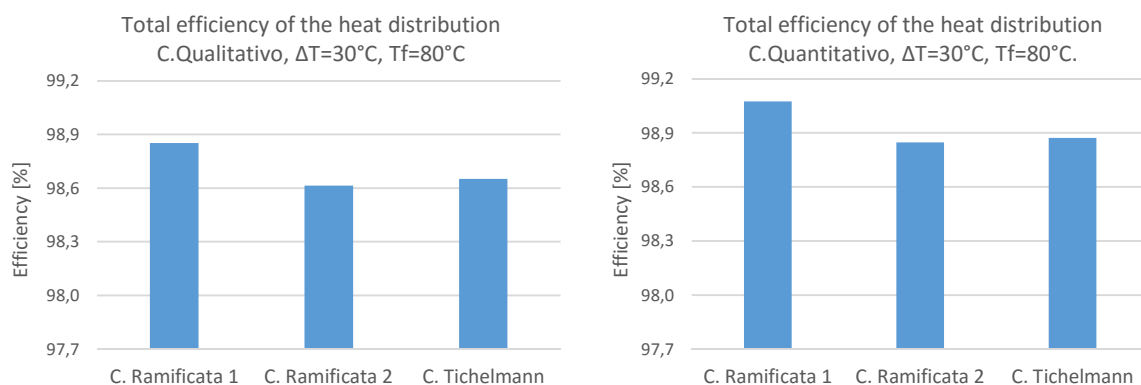


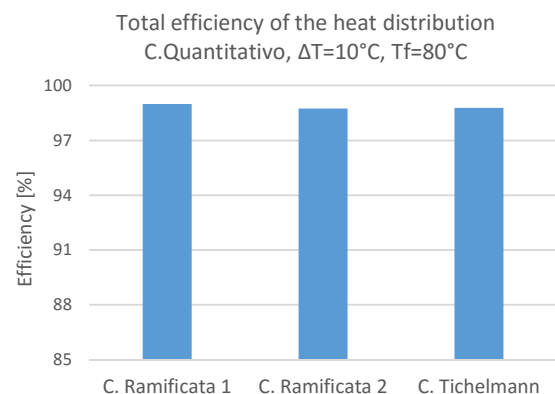
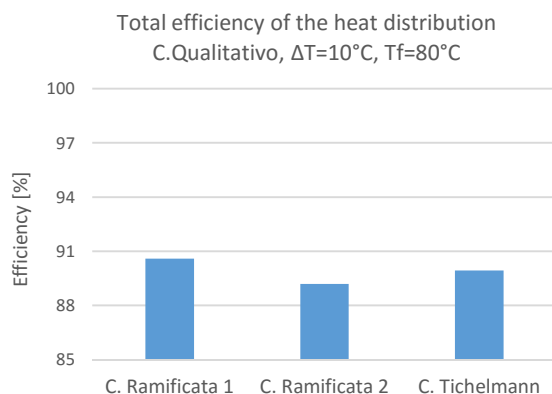
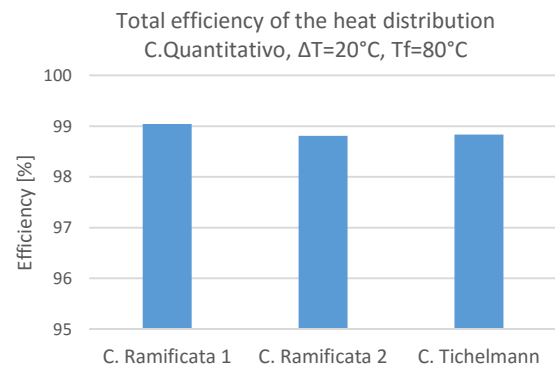
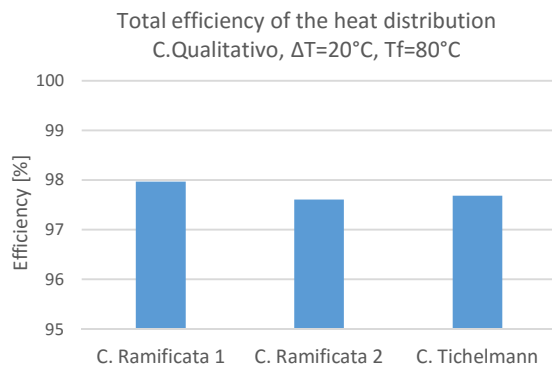
Al diminuire della ΔT nominale fra mandata e ritorno, che comporta un incremento della portata esercita, si è osservato un forte incremento delle perdite di carico. Per questi motivi l'utilizzo di qualsiasi configurazione a $\Delta T < 30^\circ\text{C}$ in controllo qualitativo appare difficilmente giustificabile.

Differentemente, con l'utilizzo dell'approccio quantitativo, il controllo sulla portata disaccoppiata di fluido termovettore porta ad una forte riduzione delle perdite di carico sostenute dalla rete, al costo di un incremento delle perdite di calore. Di conseguenza, come mostrato nei seguenti grafici riassuntivi, le perdite di calore assumono una posizione dominante nel fabbisogno totale stagionale della rete di teleriscaldamento.



Le differenze riportate fra reti controllate qualitativamente e quantitativamente si riflettono sulla loro efficienza stagionale valutata sul totale calore dispacciato alle utenze. Si conclude come le configurazioni in controllo quantitativo restituiscano efficienze superiori in tutte le condizioni di funzionamento simulate. Anche andando a valutare il best case scenario, le reti controllate qualitativamente possono al più avvicinarsi con prestazioni di qualche frazione di punto percentuale inferiori rispetto alle corrispettive in controllo qualitativo. Si riportano alcuni esempi significativi:

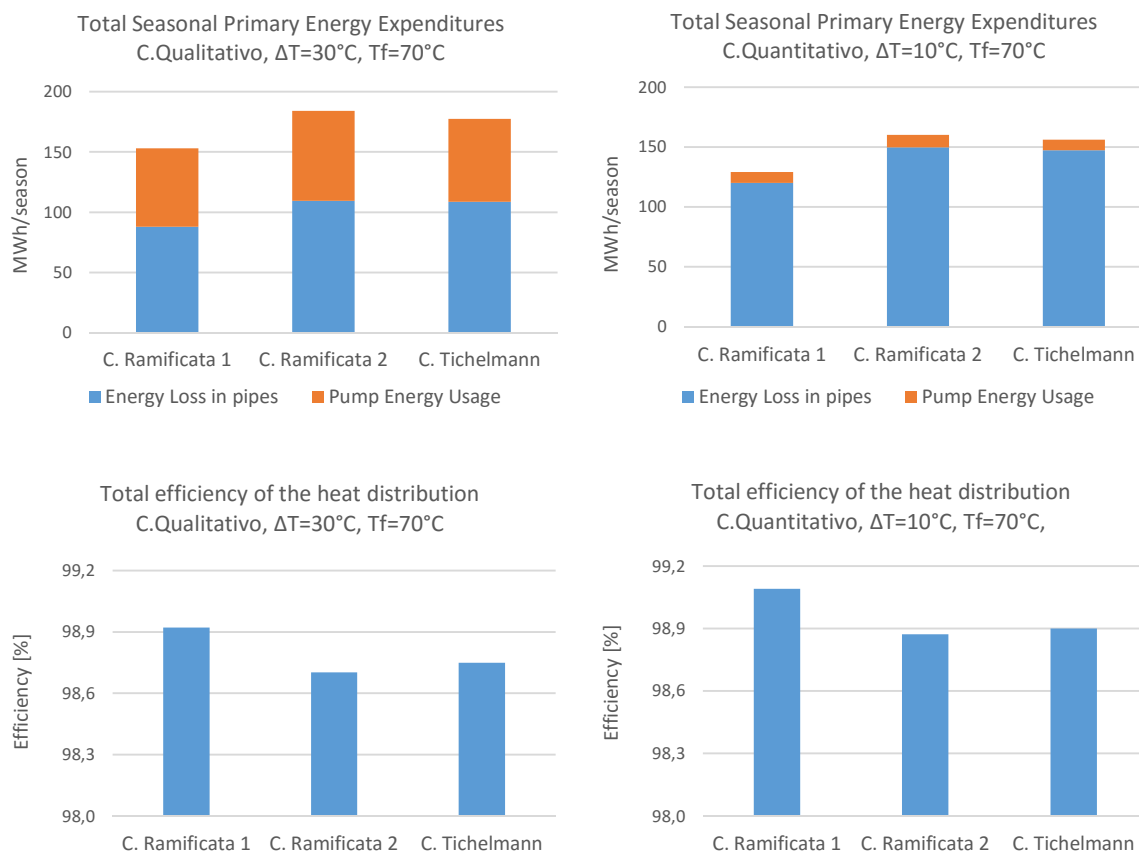




D'altro canto, se l'approccio quantitativo presenta indubbi vantaggi dal punto di vista energetico, e in particolare una maggiore flessibilità rispetto alle condizioni di funzionamento della rete, è però di difficile impiego in applicazioni reali. Il controllo della portata, infatti, comporta velocità di scorrimento del fluido termovettore nelle tubazioni molto basse, con conseguenti possibili problemi di formazione di bolle d'aria e di depositi nelle condotte; inoltre le temperature di ritorno dalle utenze sono mediamente inferiori a quelle ottenute in controllo qualitativo, rendendo più stretti i vincoli di funzionamento dei terminali di impianto.

Si conclude che nella applicazione pratica ci si dovrebbe approcciare al problema del controllo della rete con un metodo misto. I due approcci studiati presentano caratteristiche quasi opposte; in un più equilibrato approccio misto si deve intervenire sulle curve di controllo delle temperature e della portata per smussarne le peculiarità. In questo modo è possibile sfruttare sia i vantaggi dati dal controllo qualitativo, ovvero le ridotte perdite di calore e la sua applicabilità, che dal controllo quantitativo, ovvero le ridotte perdite di carico e la maggiore efficienza. Alcune linee guida per il miglioramento dell'approccio qualitativo sono da ricercarsi nella riduzione della portata e nell'incremento delle temperature di mandata in condizioni di carico parziale; per il controllo quantitativo, invece, un miglioramento della fattibilità viene dall'incremento della portata esercita e della temperatura di ritorno.

Nei raffronti finali non sono state comprese le misurazioni al riguardo della configurazione esistente. Non è stato infatti possibile calcolarne i fabbisogni di energia primaria per via della mancanza di dati relativi alla portata, cruciali per il calcolo delle perdite di carico. Dal punto di vista delle perdite di calore si è invece rilevato come la configurazione esistente presenti prestazioni intermedie fra le due configurazioni ramificate alternative studiate.

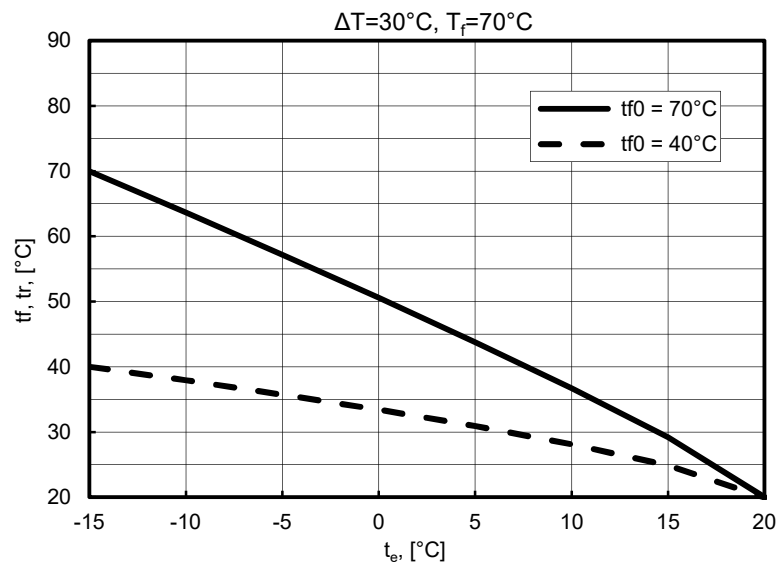
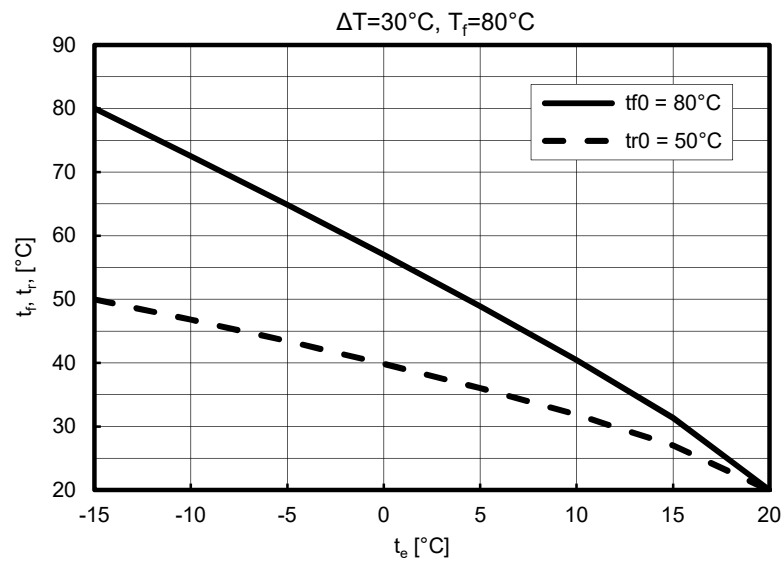
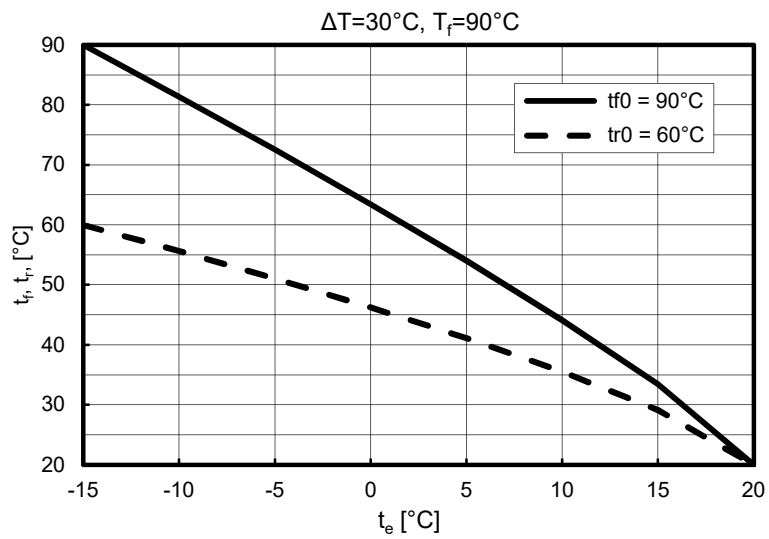


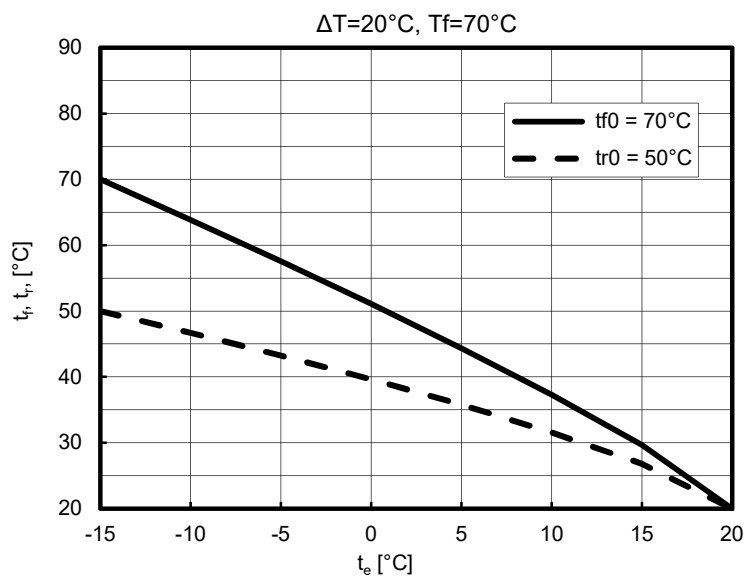
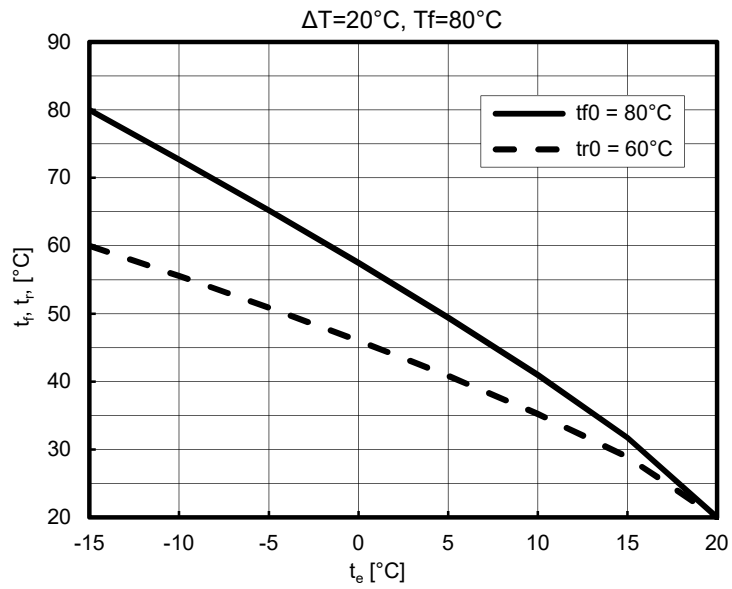
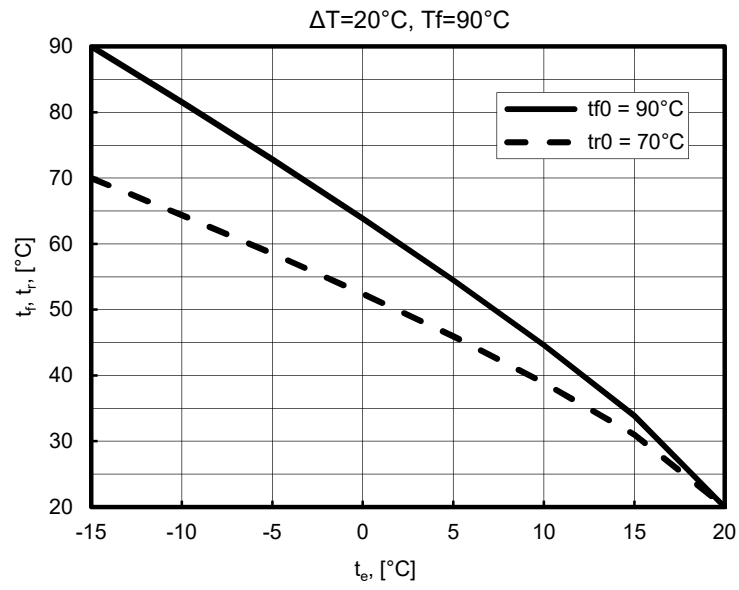
Dall'analisi delle configurazioni di rete simulate si conclude che la Ramificata 1 sia la più efficiente dal punto di vista energetico. A seconda dei casi di studio simulati, l'utilizzo della configurazione Ramificata 2 comporta infatti un incremento del fabbisogno stagionale di energia primaria compreso fra il 20-25%, mentre per la Tichelmann questo divario scende al 15-22%. La causa principale di queste diverse prestazioni è da ricercarsi nella lunghezza delle tubazioni utilizzate, pari a 2250 metri per la Ramificata 1, 2980 metri per la Ramificata 2 e a 2540 per la Tichelmann. Un ruolo secondario, che va ad incrementare il divario prestazionale fra le configurazioni ramificate e la Tichelmann, è svolto dal diametro medio delle condotte.

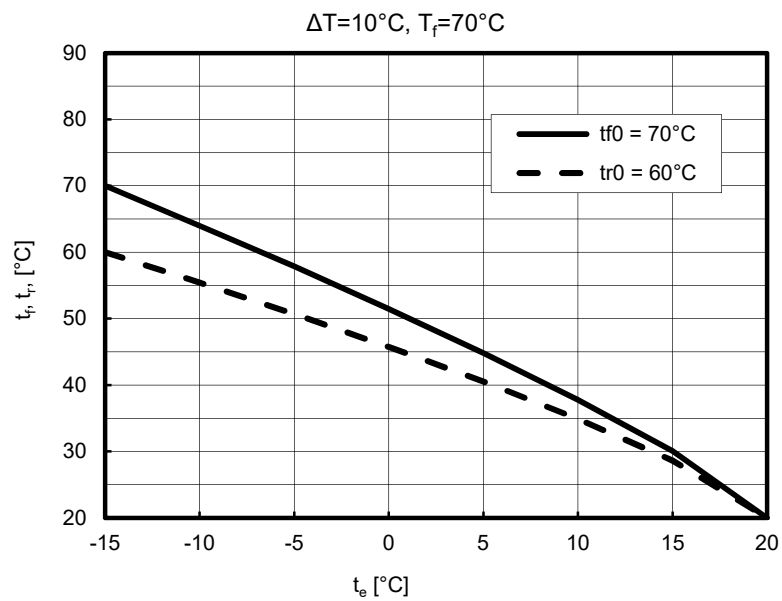
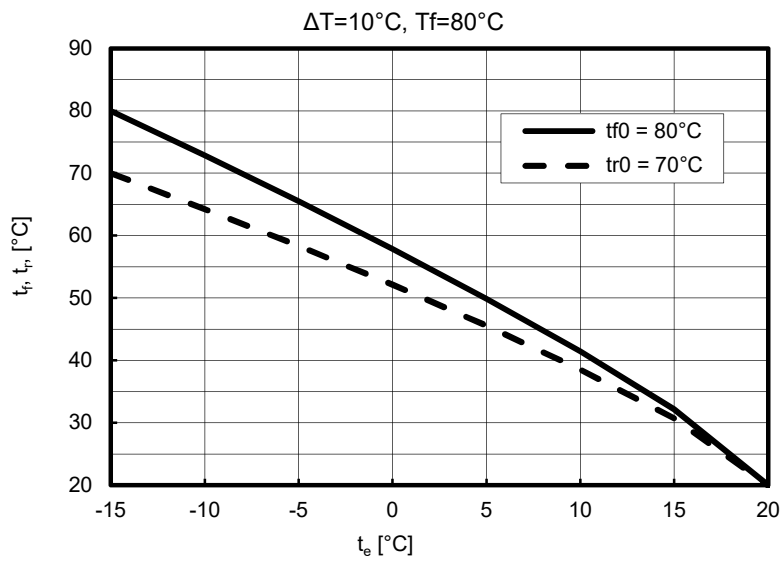
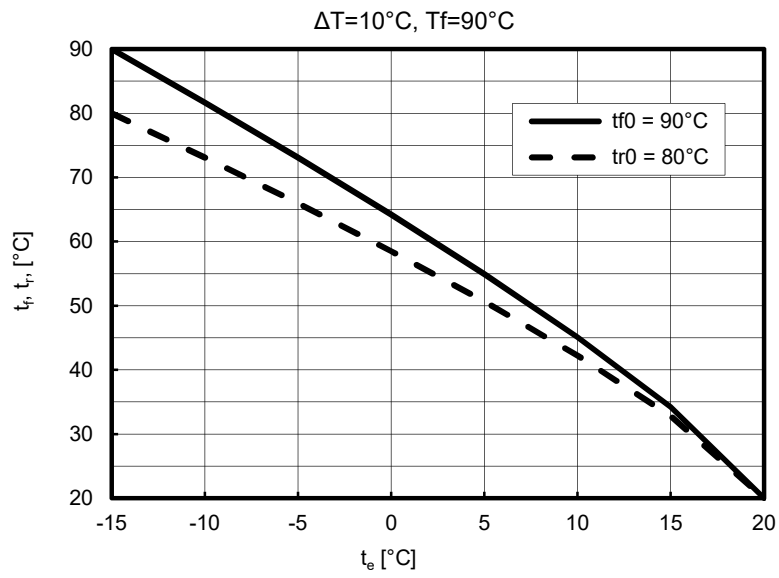
Si è osservato inoltre come a livello di efficienza energetica i diversi metodi di posa siano perlopiù equivalenti. La reale differenza fra la posa interrata e in canali è da ricercarsi nella migliore protezione data da quest'ultima alle condotte; non essendo a contatto col terreno tale metodo di posa incrementa la vita operativa delle tubazioni.

APPENDICE A

Qualitative control - Temperature control curves

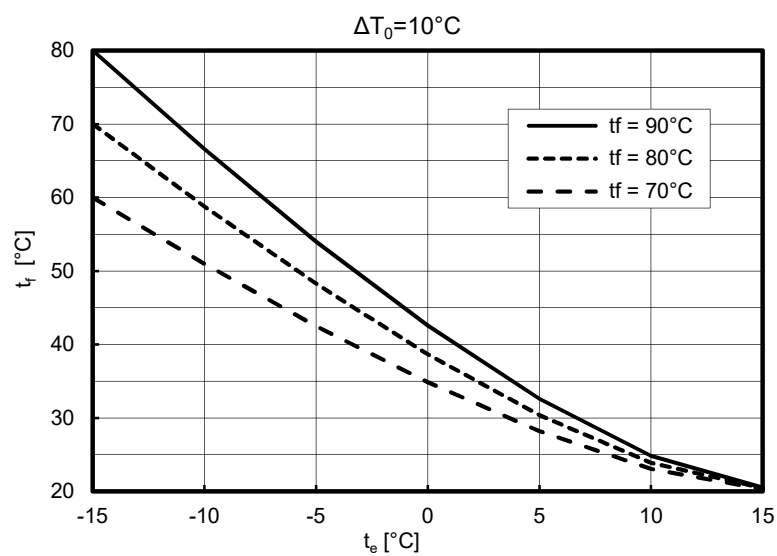
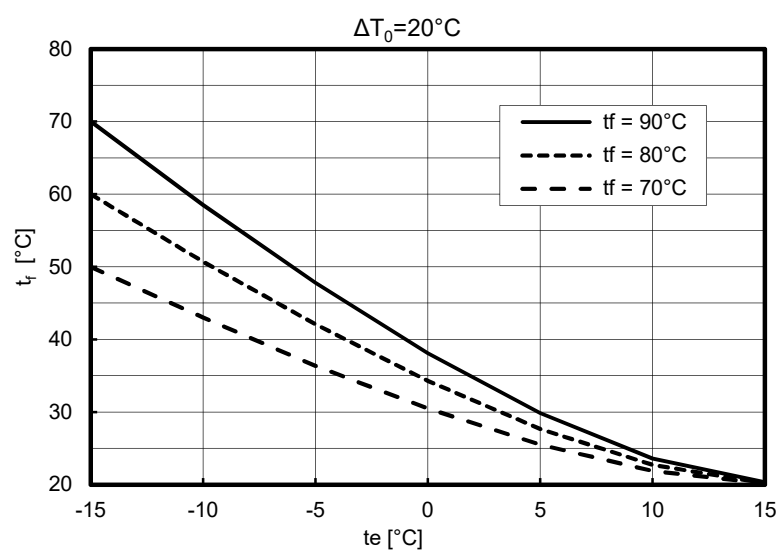
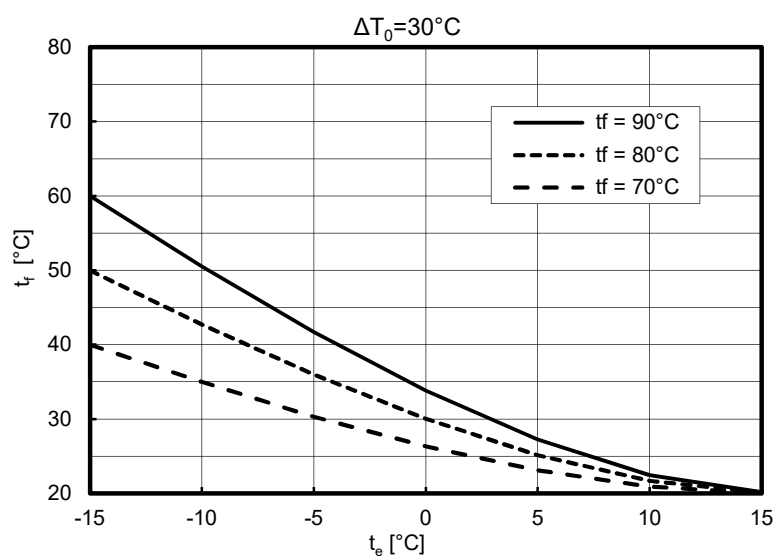






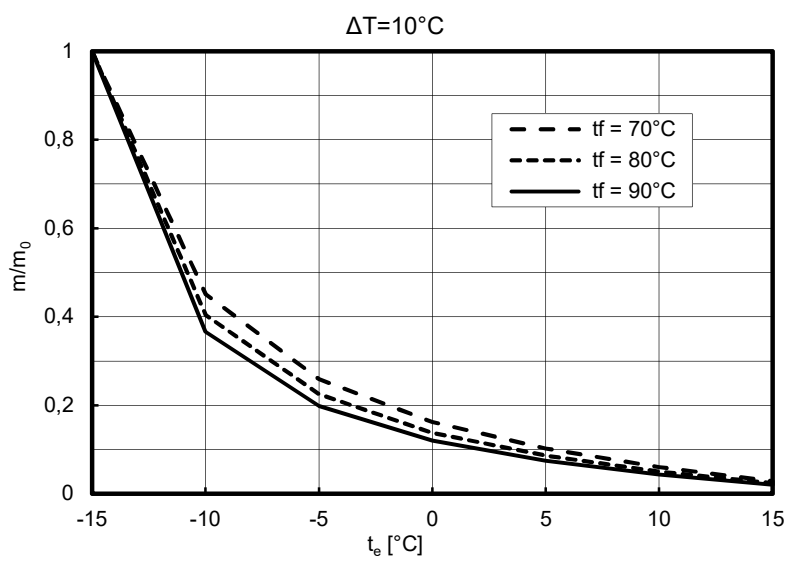
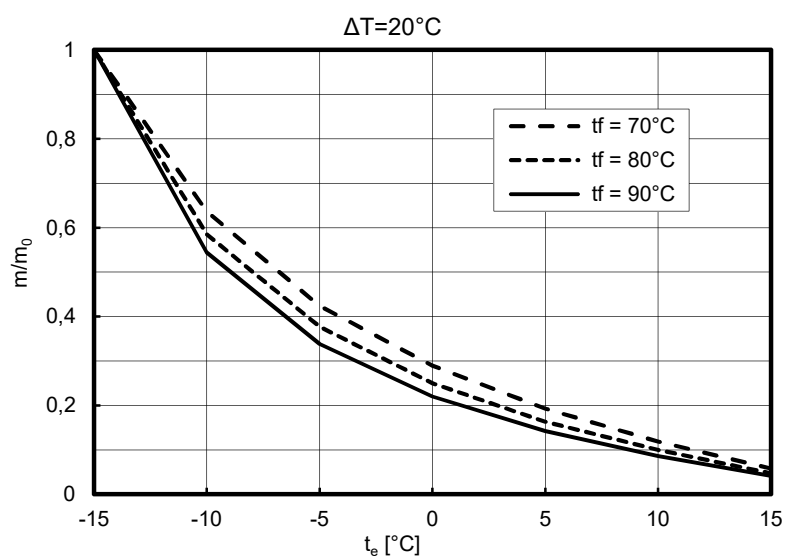
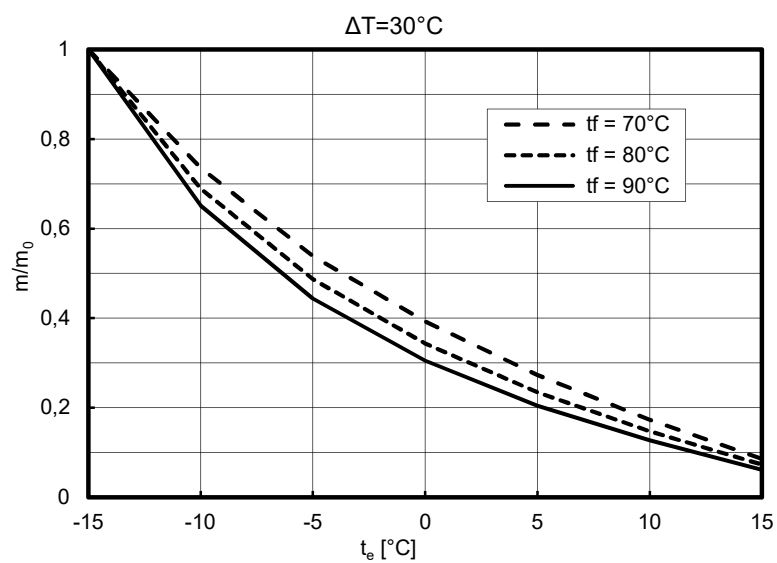
APPENDICE B

Quantitative control - Temperature control curves



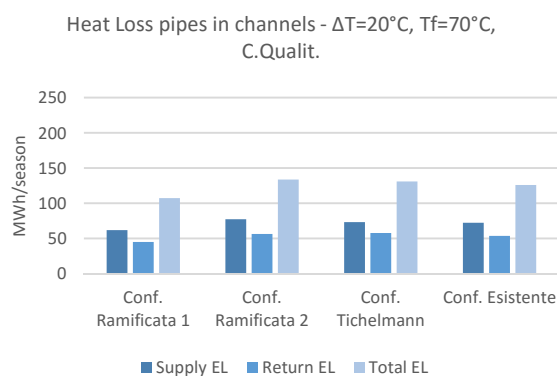
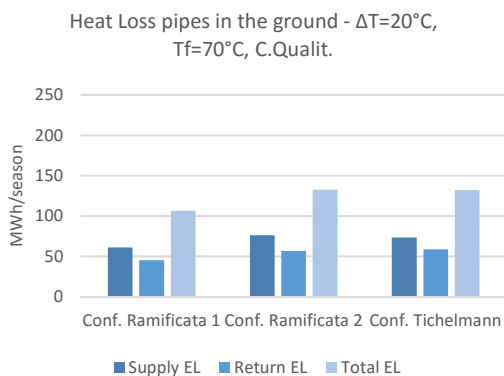
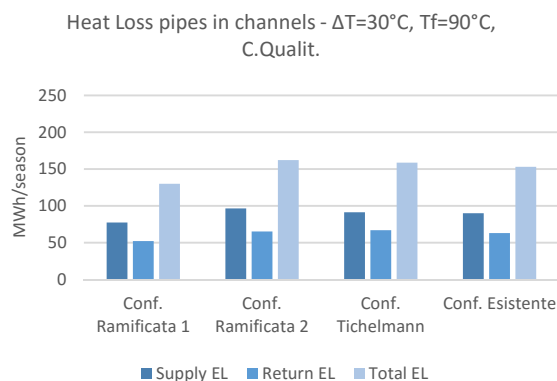
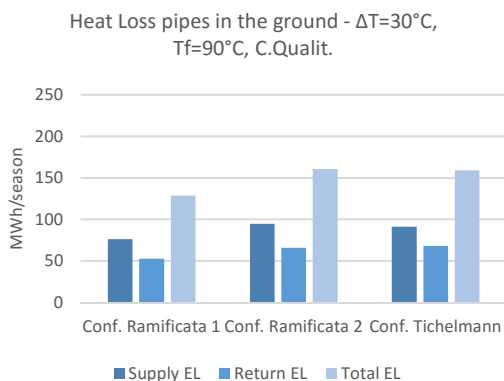
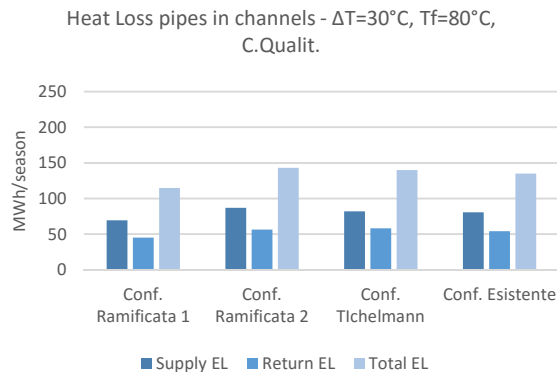
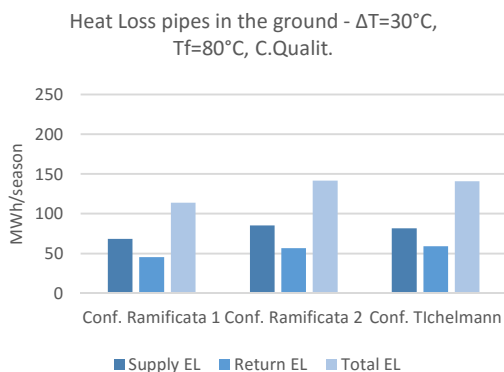
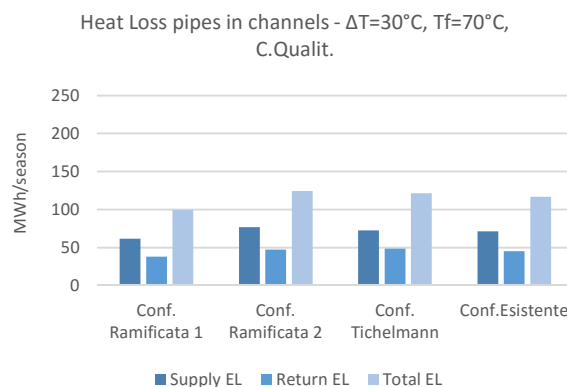
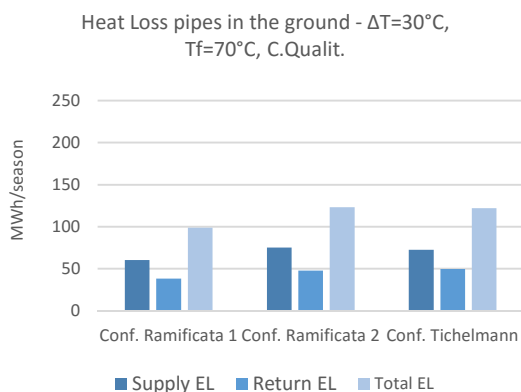
APPENDICE C

Quantitative control - Mass flow control curves

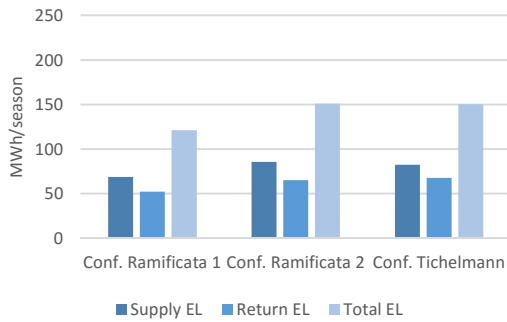


APPENDICE D

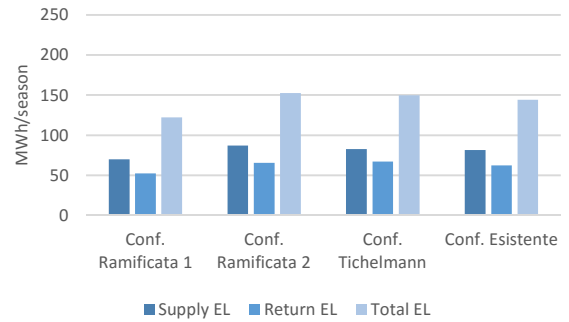
Heat loss graphs



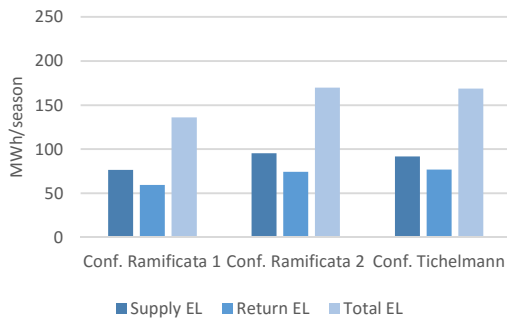
Heat Loss pipes in the ground - $\Delta T=20^{\circ}\text{C}$,
 $T_f=80^{\circ}\text{C}$, C.Qualit.



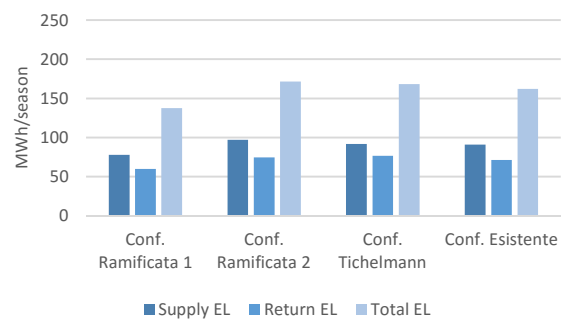
Heat Loss pipes in channels - $\Delta T=20^{\circ}\text{C}$, $T_f=80^{\circ}\text{C}$,
 C.Qualit.



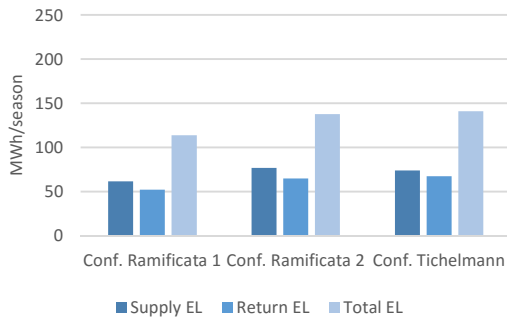
Heat Loss pipes in the ground - $\Delta T=20^{\circ}\text{C}$,
 $T_f=90^{\circ}\text{C}$, C.Qualit.



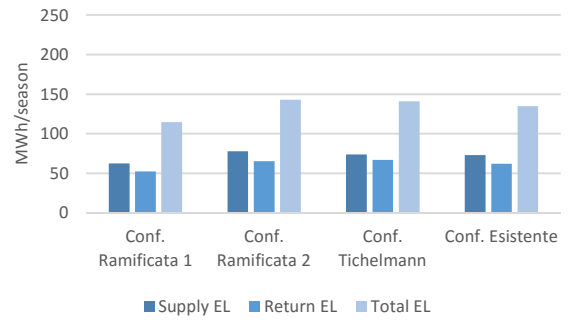
Heat Loss pipes in channels - $\Delta T=20^{\circ}\text{C}$, $T_f=90^{\circ}\text{C}$,
 C.Qualit.



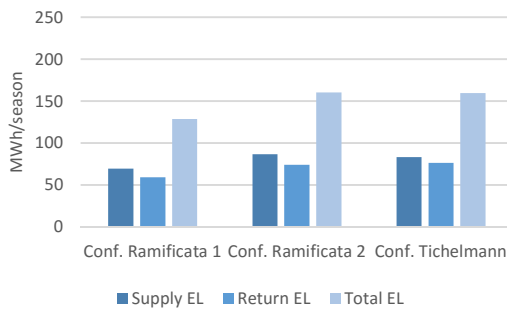
Heat Loss pipes in the ground - $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$,
 $T_f=70^{\circ}\text{C}$, C.Qualit.



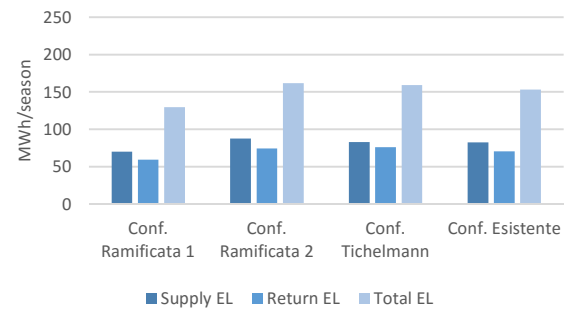
Heat Loss pipes in channels - $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$, $T_f=70^{\circ}\text{C}$,
 C.Qualit.



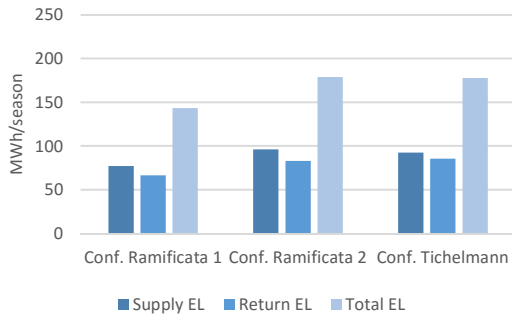
Heat Loss pipes in the ground - $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$,
 $T_f=80^{\circ}\text{C}$, C.Qualit.



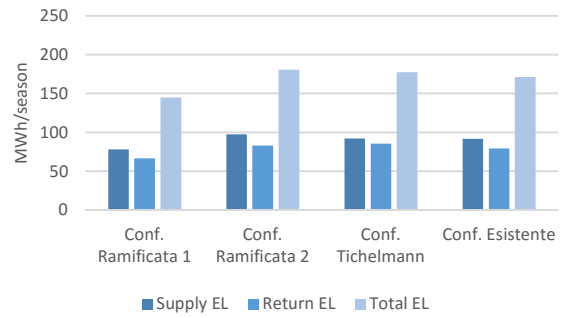
Heat Loss pipes in channels - $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$, $T_f=80^{\circ}\text{C}$,
 C.Qualit.



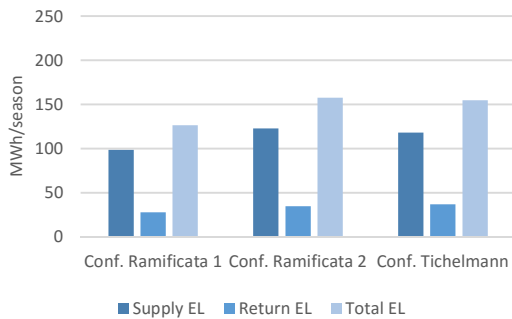
Heat Loss pipes in the ground - $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$,
 $T_f=90^{\circ}\text{C}$, C.Qualit.



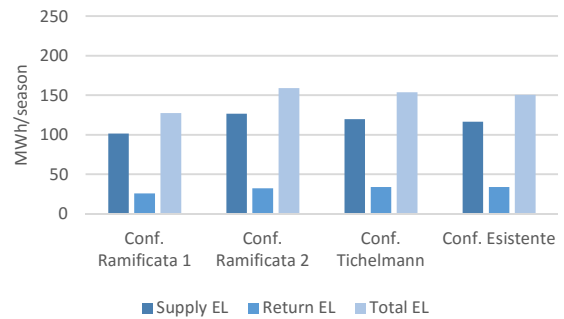
Heat Loss pipes in channels - $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$, $T_f=90^{\circ}\text{C}$,
 C.Qualit.



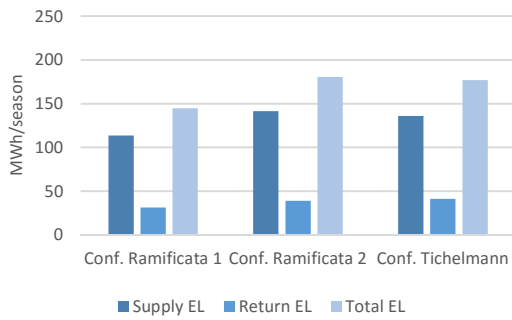
Heat Loss pipes in the ground - $\Delta T=30^{\circ}\text{C}$,
 $T_f=70^{\circ}\text{C}$, C.Quantit.



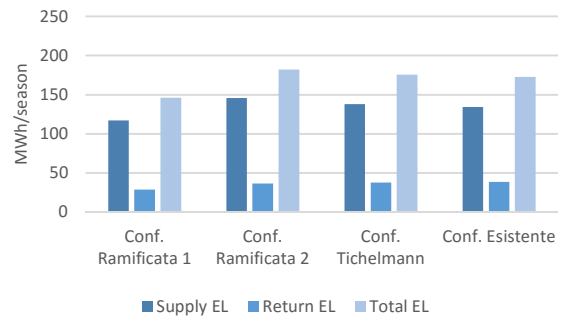
Heat Loss pipes in channels - $\Delta T=30^{\circ}\text{C}$, $T_f=70^{\circ}\text{C}$,
 C.Quantit.



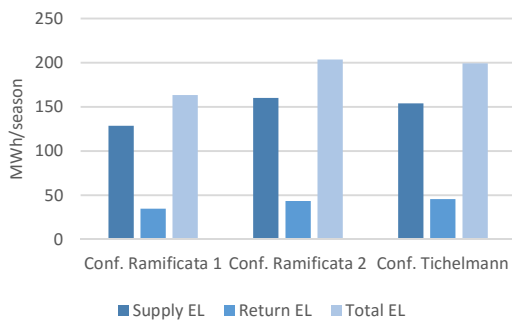
Heat Loss pipes in the ground - $\Delta T=30^{\circ}\text{C}$,
 $T_f=80^{\circ}\text{C}$, C.Quantit.



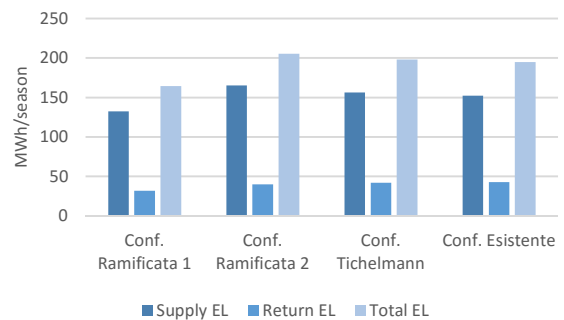
Heat Loss pipes in channels - $\Delta T=30^{\circ}\text{C}$, $T_f=80^{\circ}\text{C}$,
 C.Quantit.



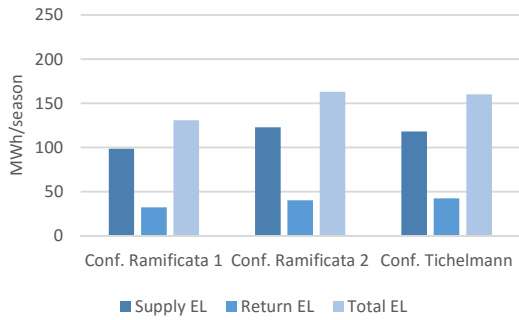
Heat Loss pipes in the ground - $\Delta T=30^{\circ}\text{C}$,
 $T_f=90^{\circ}\text{C}$, C.Quantit.



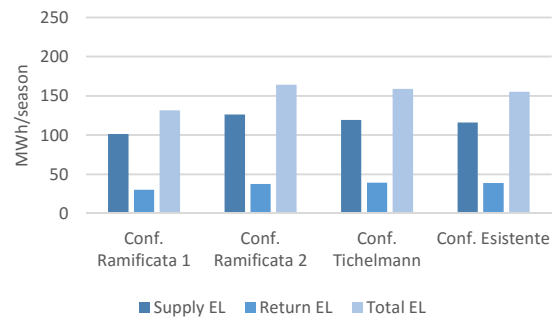
Heat Loss pipes in channels - $\Delta T=30^{\circ}\text{C}$, $T_f=90^{\circ}\text{C}$,
 C.Quantit.



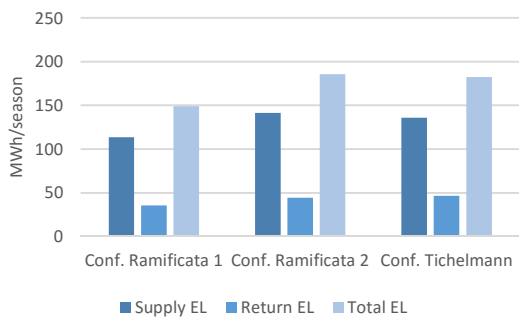
Heat Loss pipes in the ground - $\Delta T=20^{\circ}\text{C}$,
 $T_f=70^{\circ}\text{C}$, C.Quantit.



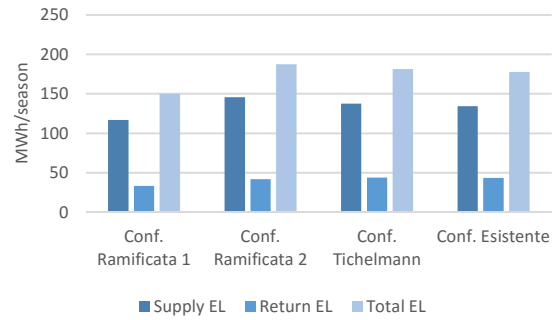
Heat Loss pipes in channel - $\Delta T=20^{\circ}\text{C}$, $T_f=70^{\circ}\text{C}$,
 C.Quantit.



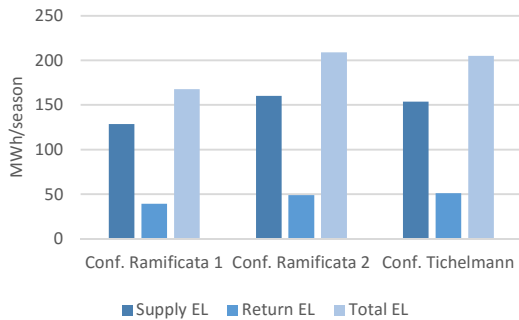
Heat Loss pipes in the ground - $\Delta T=20^{\circ}\text{C}$,
 $T_f=80^{\circ}\text{C}$, C.Quantit.



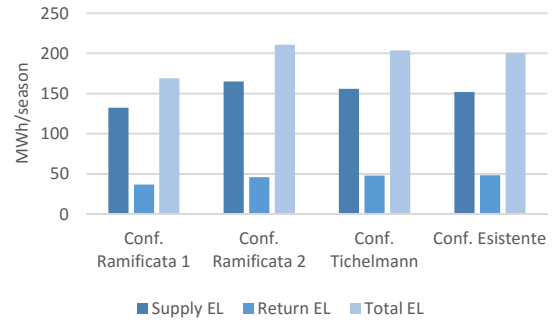
Heat Loss pipes in channels - $\Delta T=20^{\circ}\text{C}$, $T_f=80^{\circ}\text{C}$,
 C.Quantit.



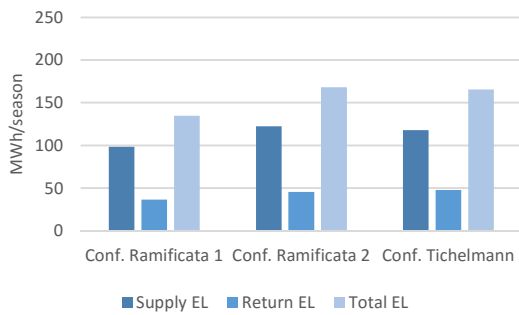
Heat Loss pipes in the ground - $\Delta T=20^{\circ}\text{C}$,
 $T_f=90^{\circ}\text{C}$, C.Quantit.



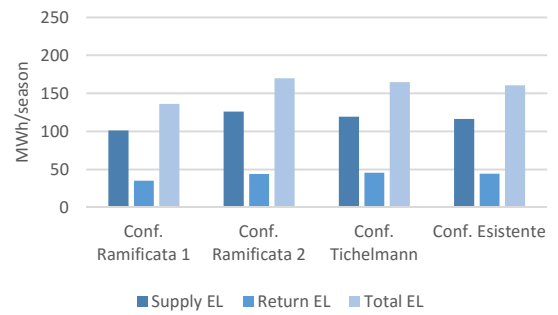
Heat Loss pipes in channels - $\Delta T=20^{\circ}\text{C}$, $T_f=90^{\circ}\text{C}$,
 C.Quantit.



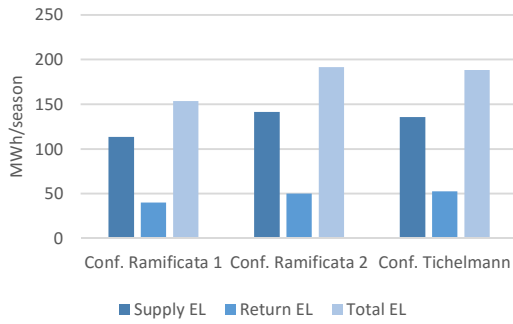
Heat Loss pipes in the ground - $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$,
 $T_f=70^{\circ}\text{C}$, C.Quantit.



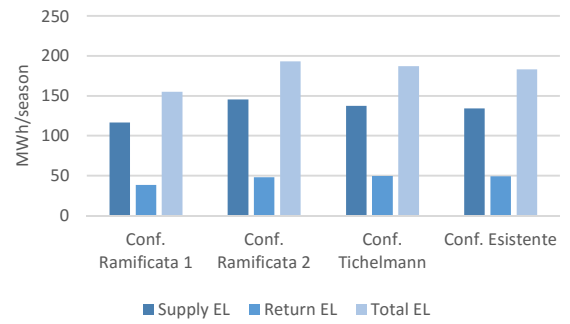
Heat Loss pipes in channels - $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$, $T_f=70^{\circ}\text{C}$,
 C.Quantit.



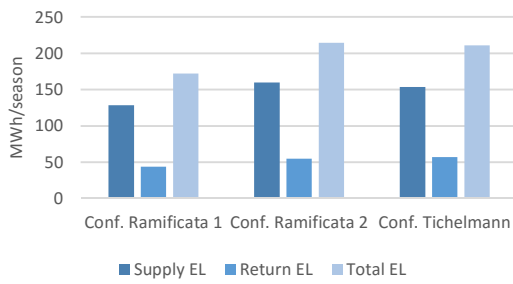
Heat Loss pipes in the ground - $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$,
 $T_f=80^{\circ}\text{C}$, C.Quantit.



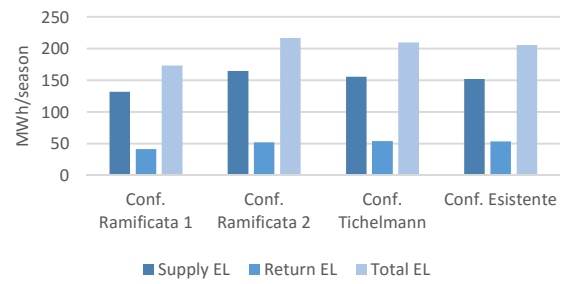
Heat Loss pipes in channels - $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$, $T_f=80^{\circ}\text{C}$,
 C.Quantit.



Heat Loss pipes in the ground - $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$,
 $T_f=90^{\circ}\text{C}$, C.Quantit.

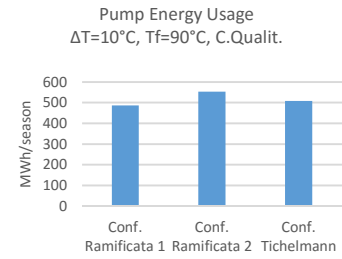
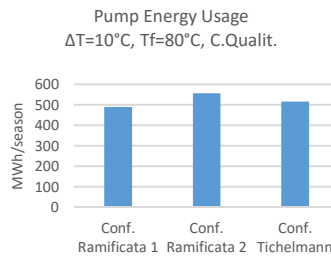
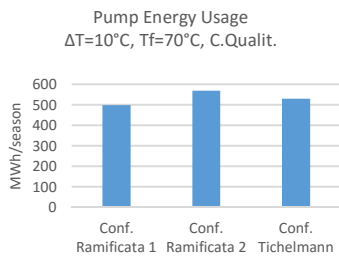
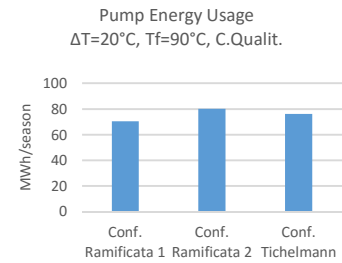
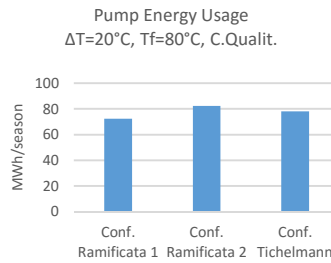
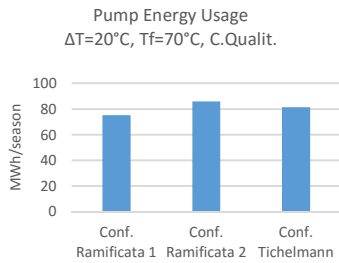
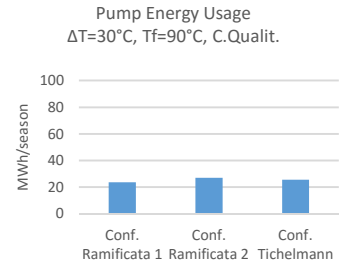
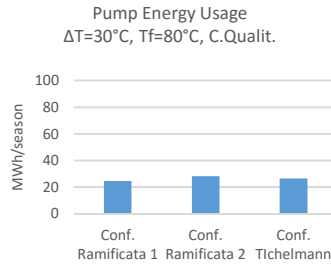
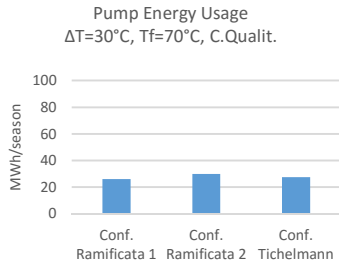


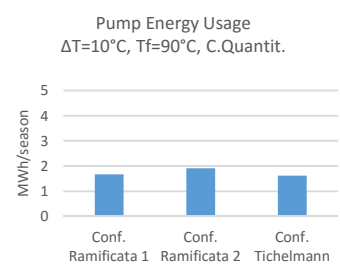
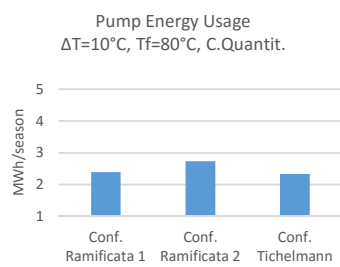
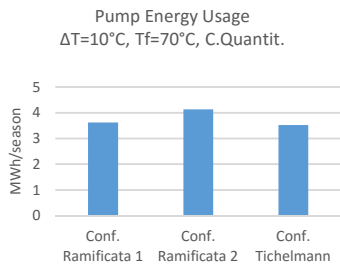
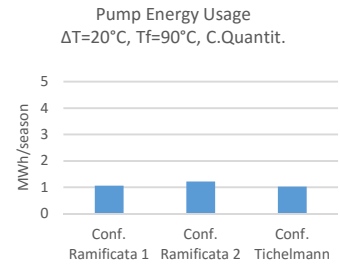
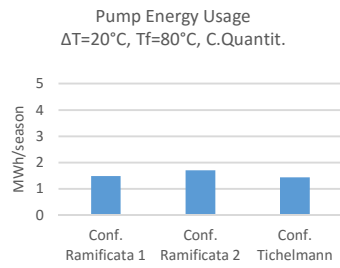
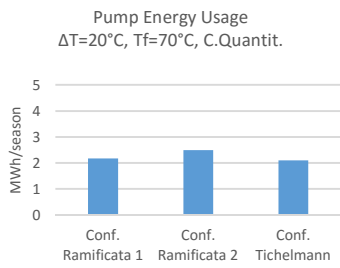
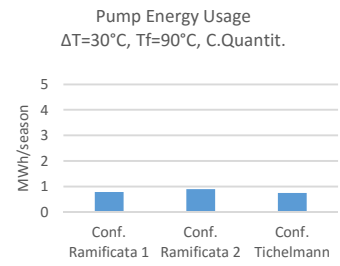
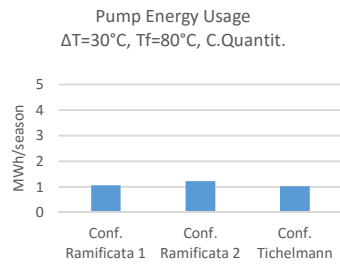
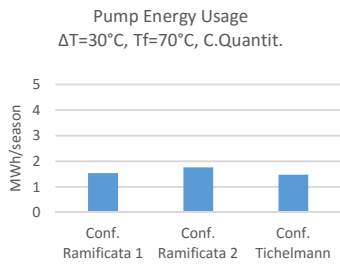
Heat Loss pipes in channels - $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$, $T_f=90^{\circ}\text{C}$,
 C.Quantit.



APPENDICE E

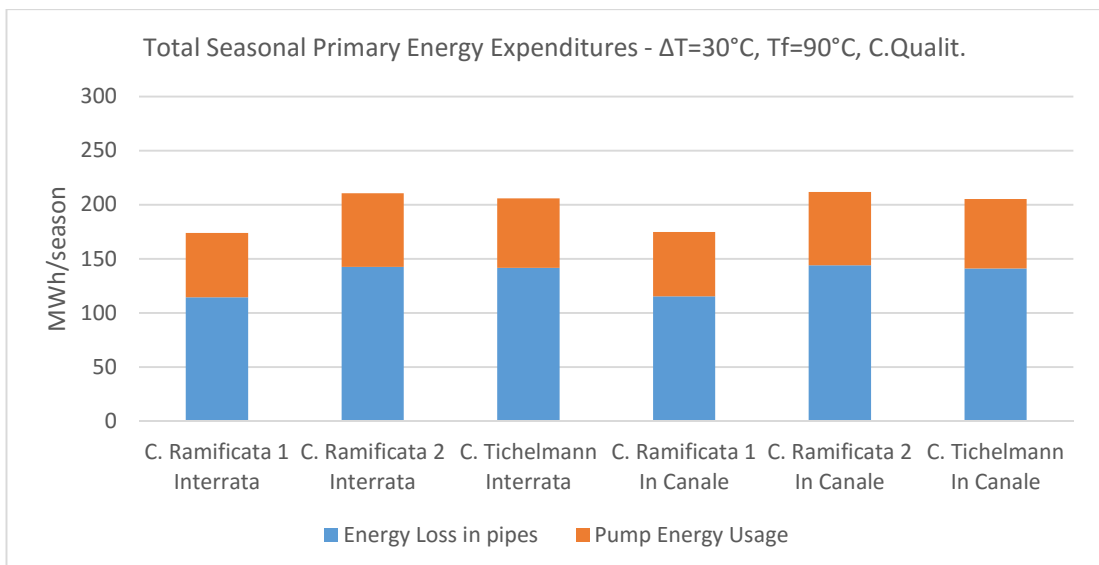
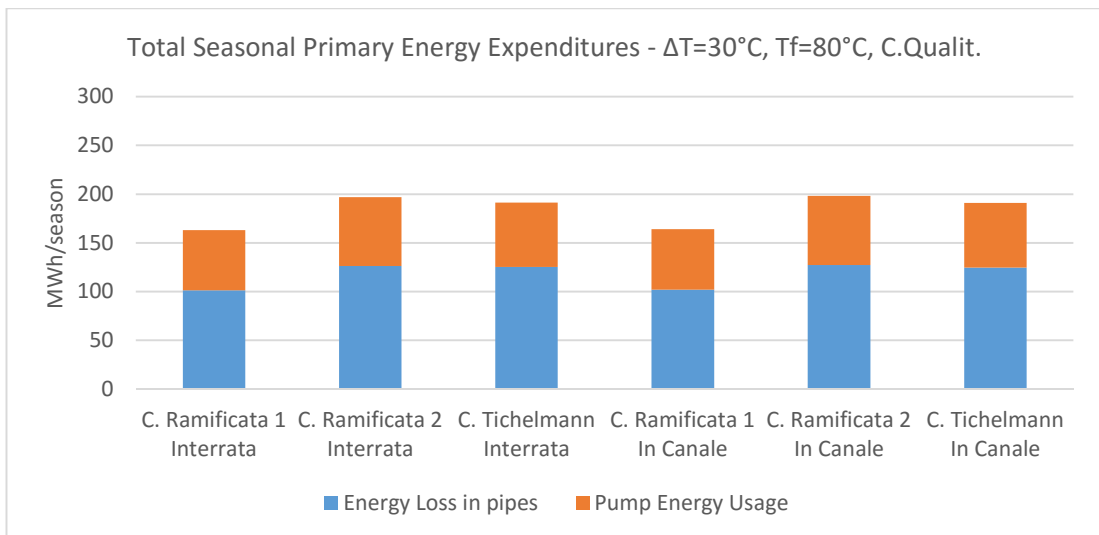
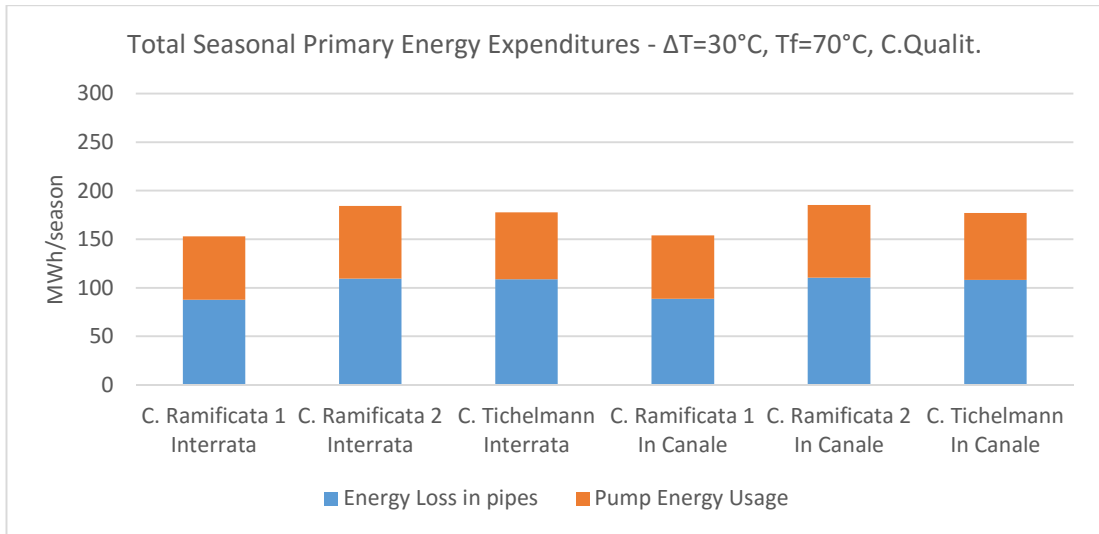
Pump energy usage

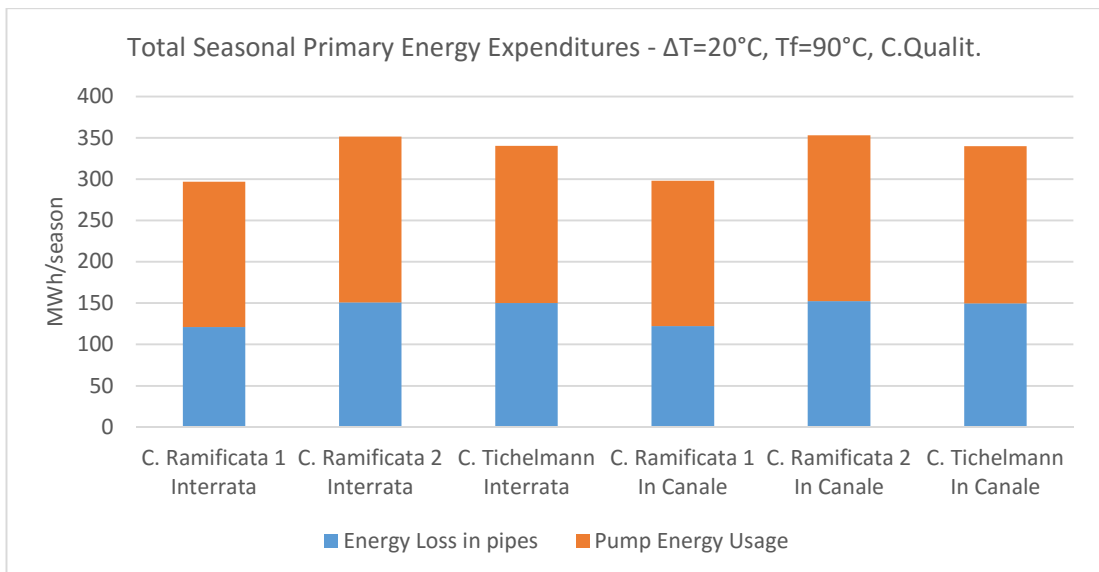
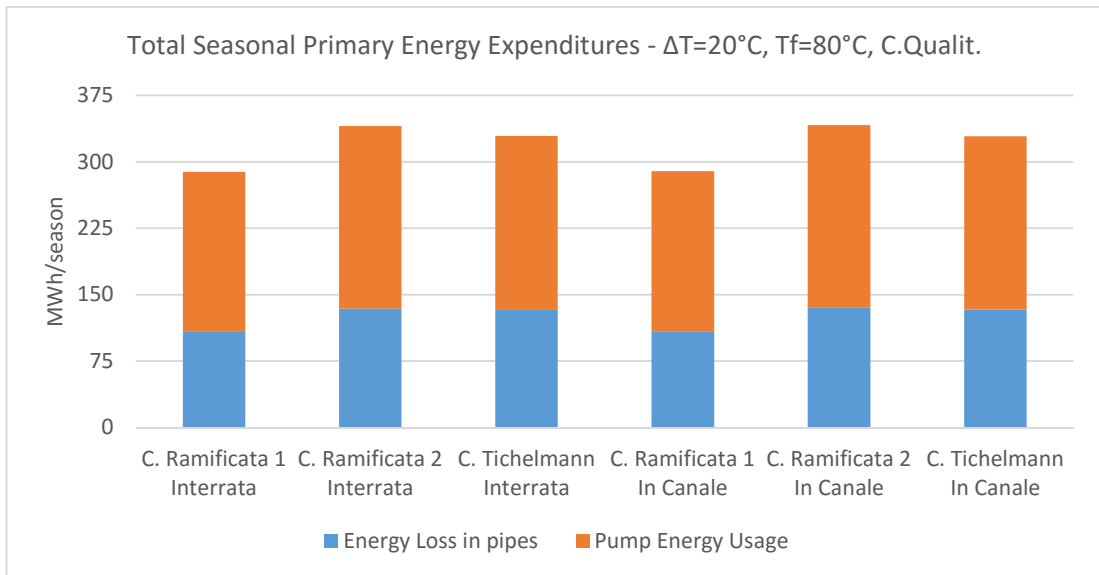
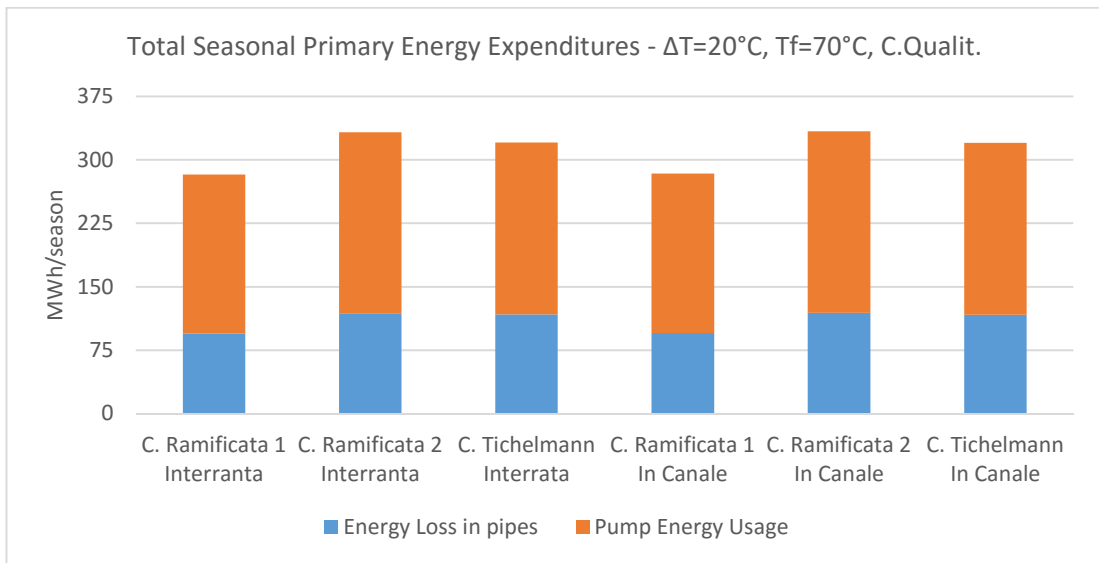


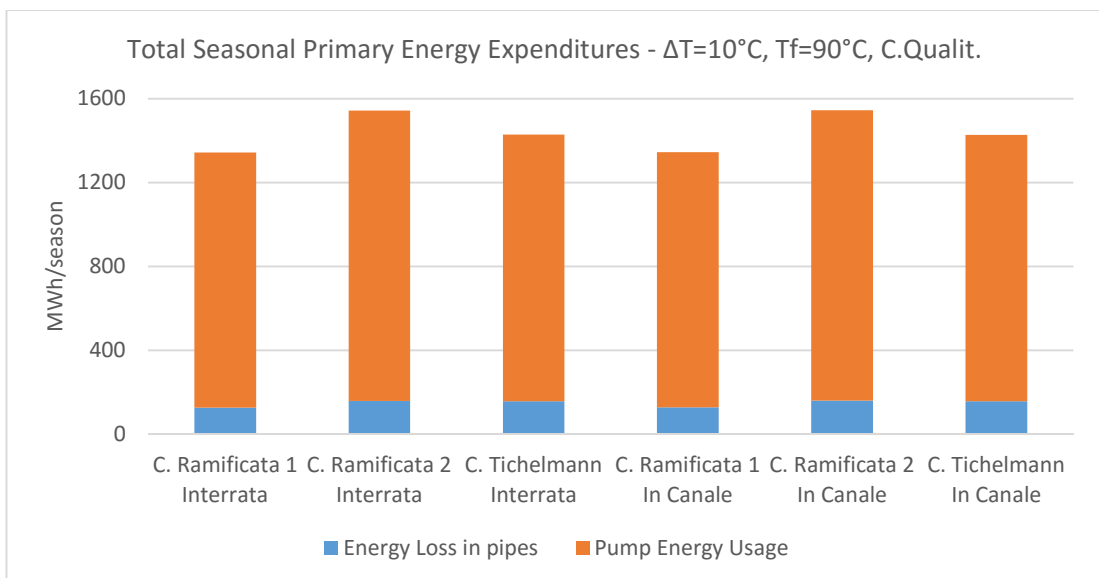
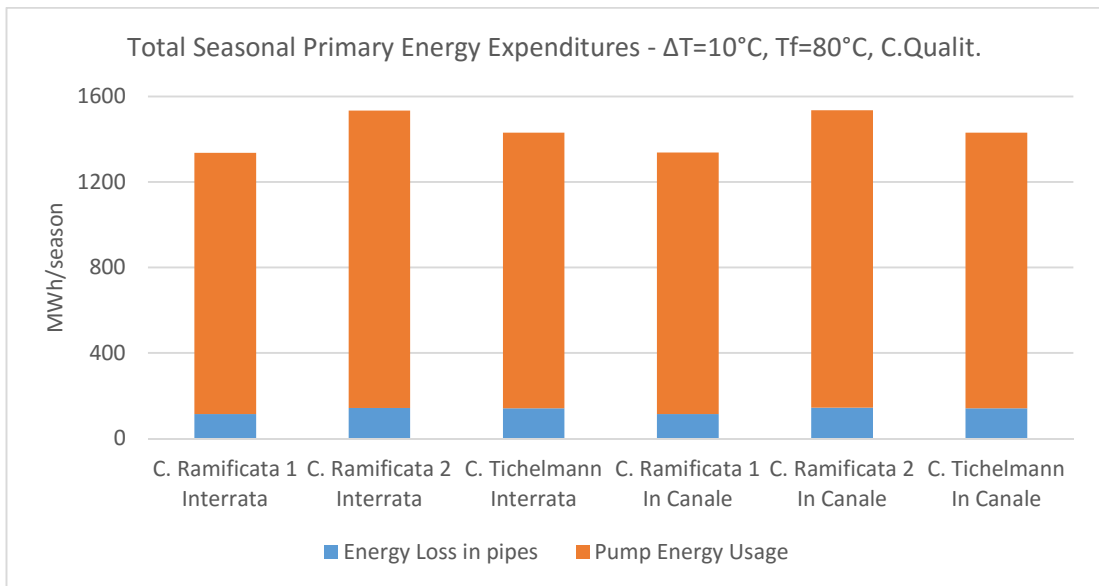
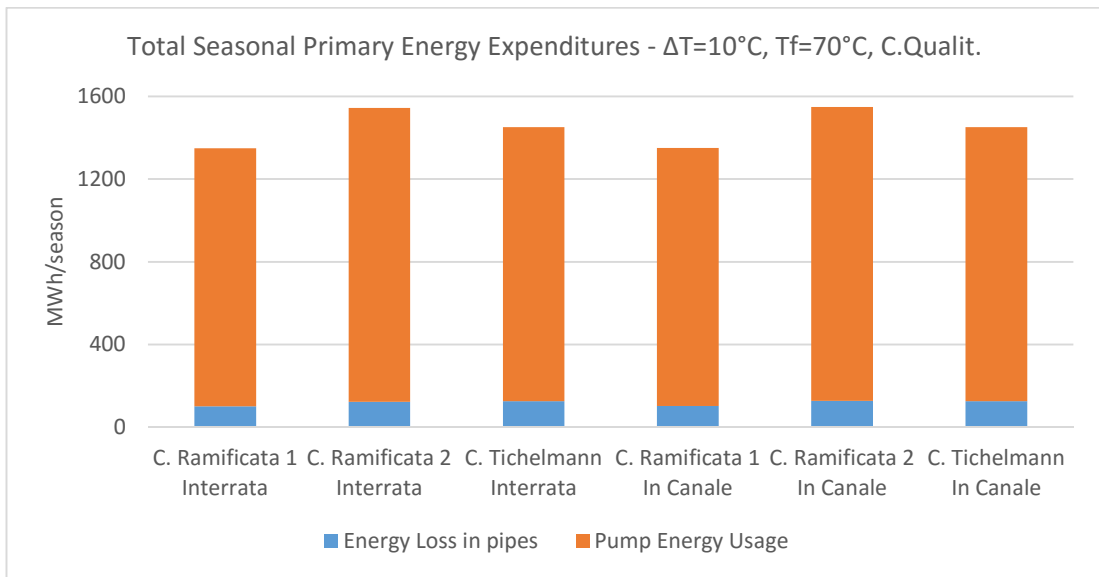


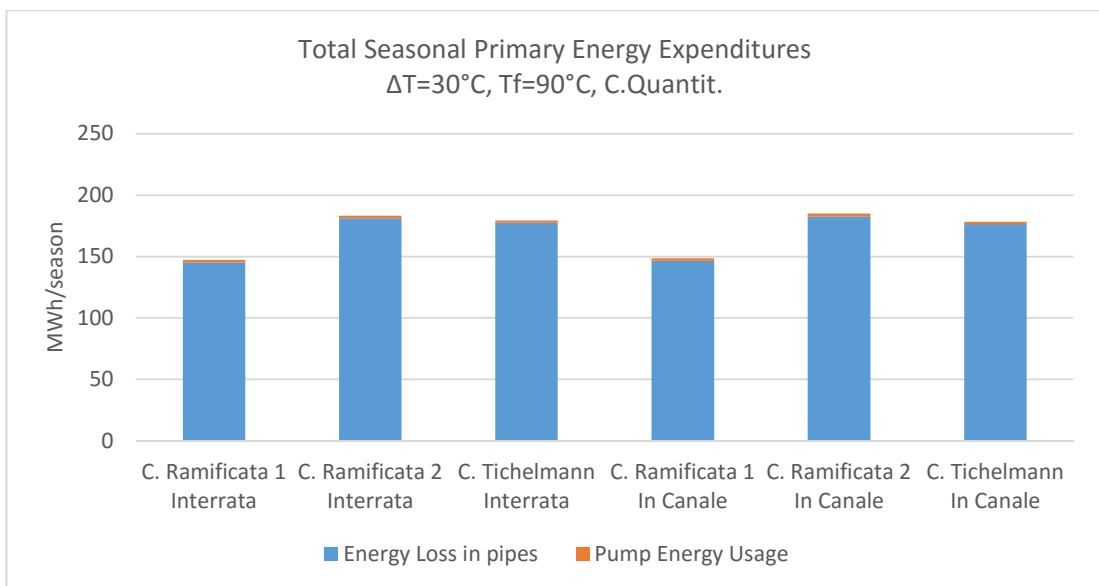
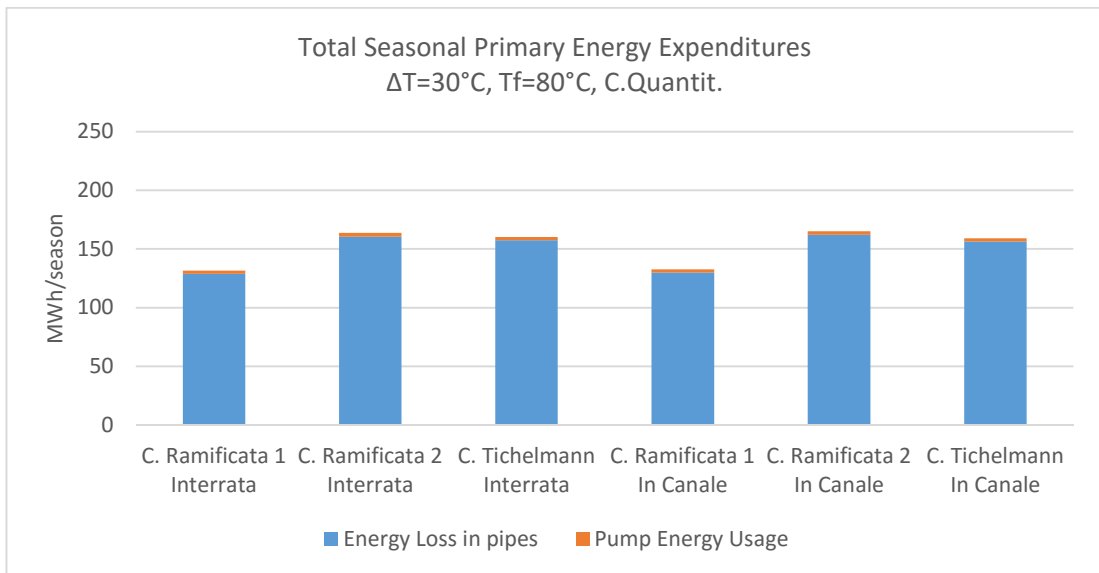
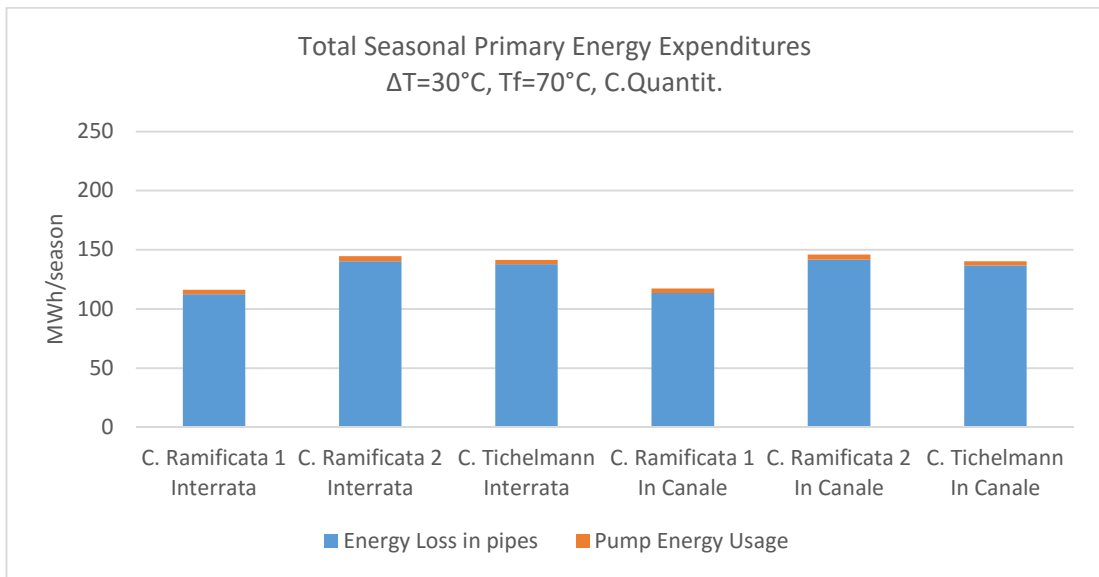
APPENDICE F

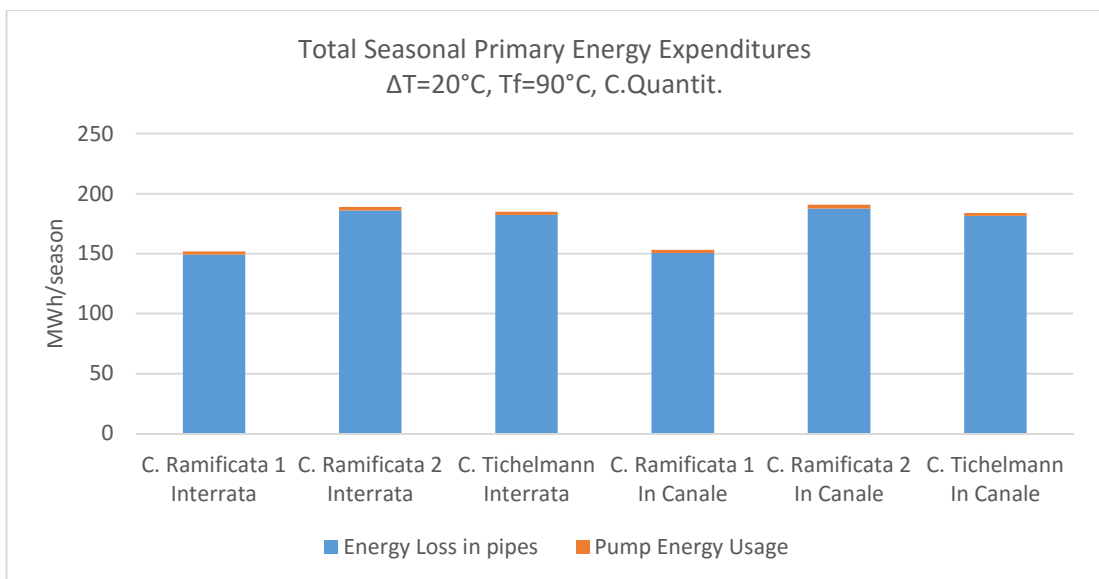
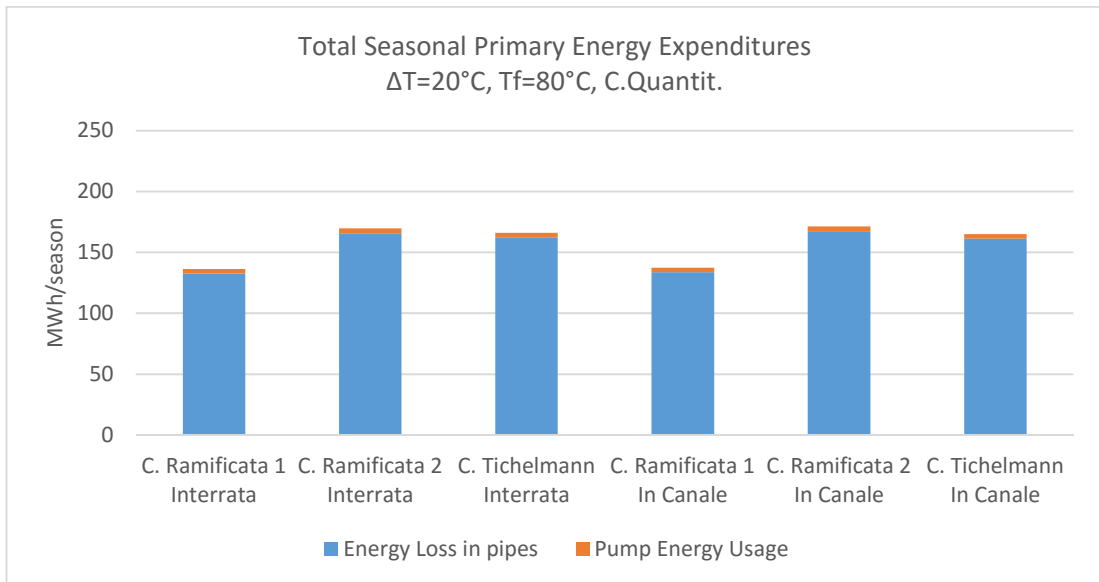
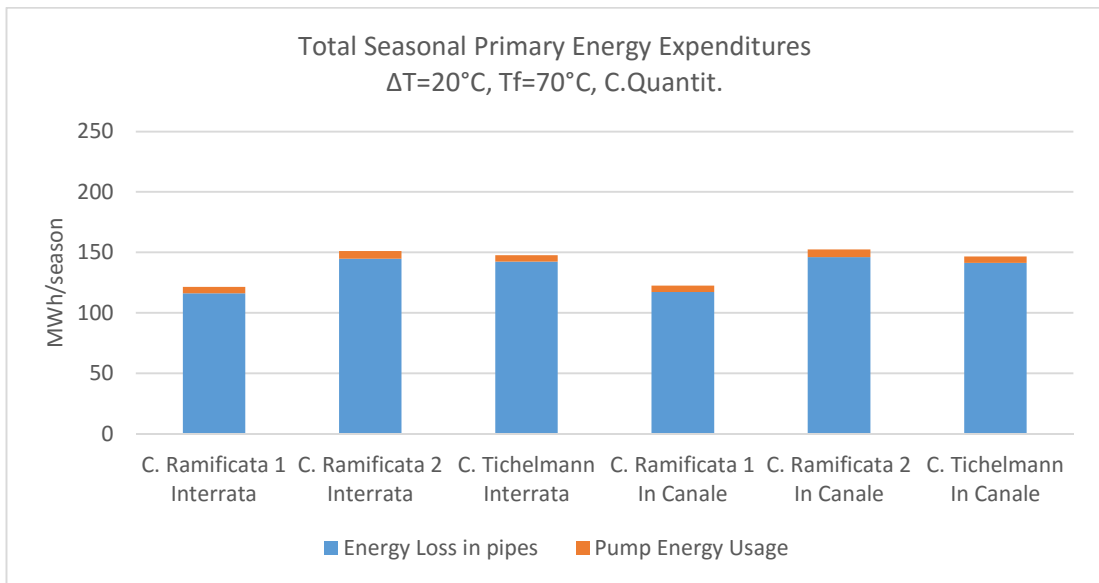
Seasonal primary energy expenditures

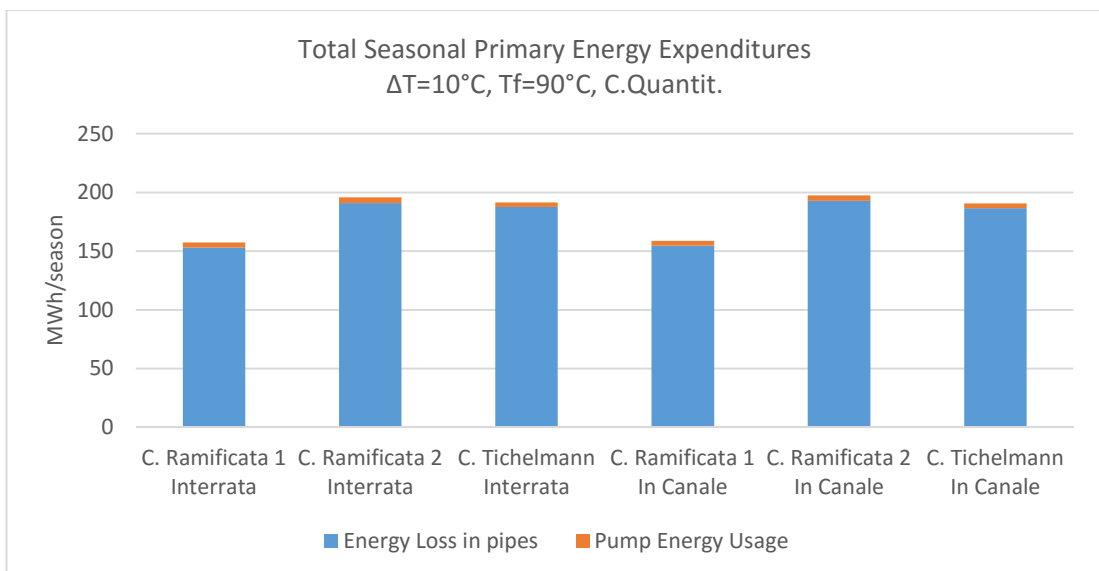
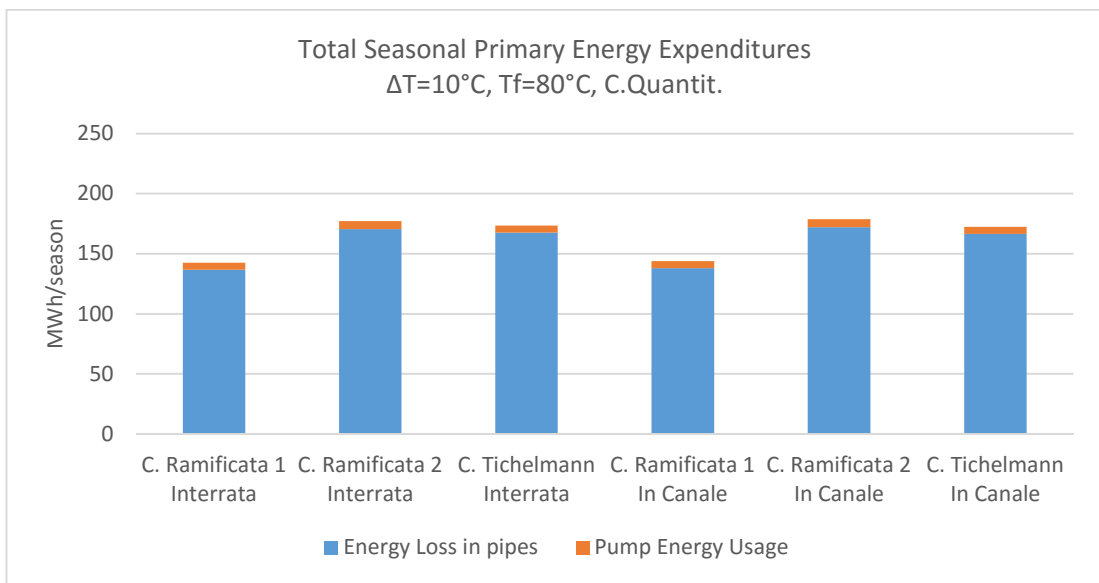
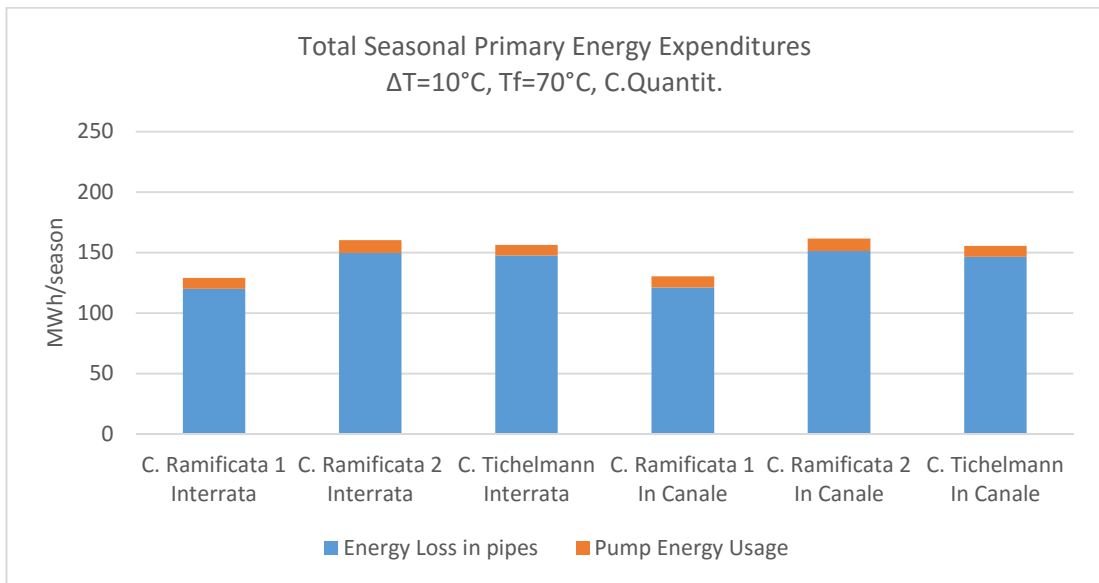






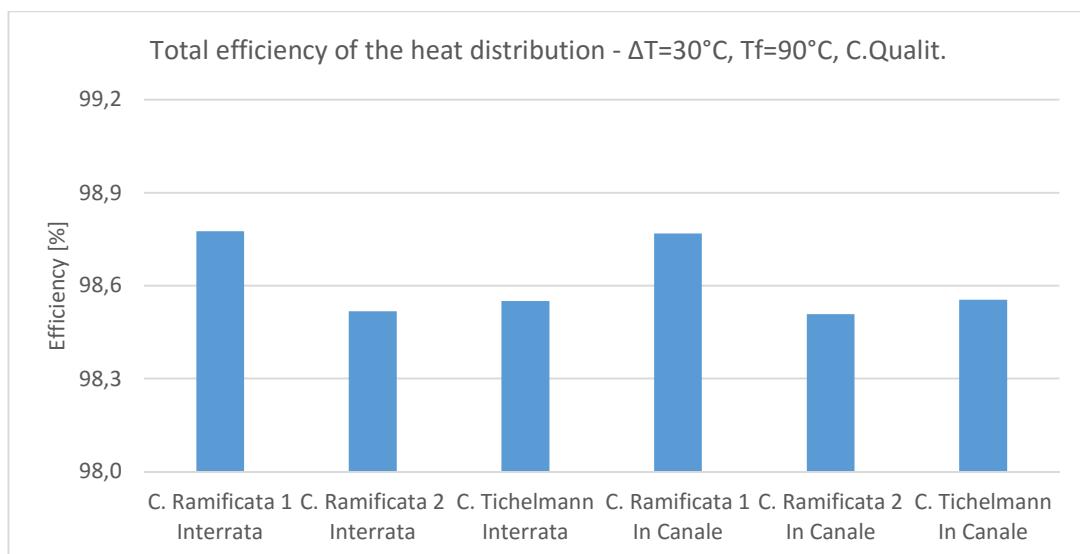
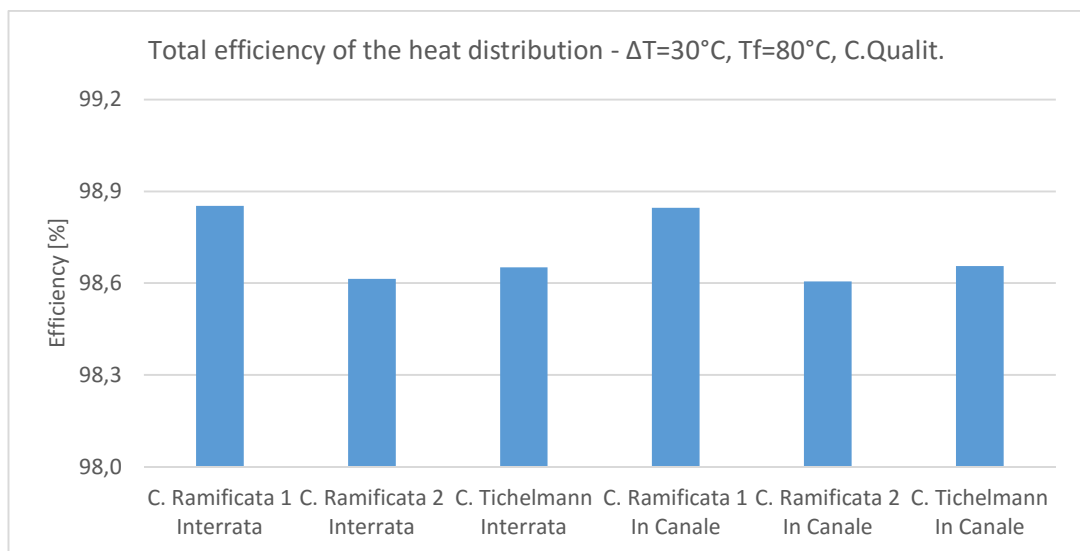
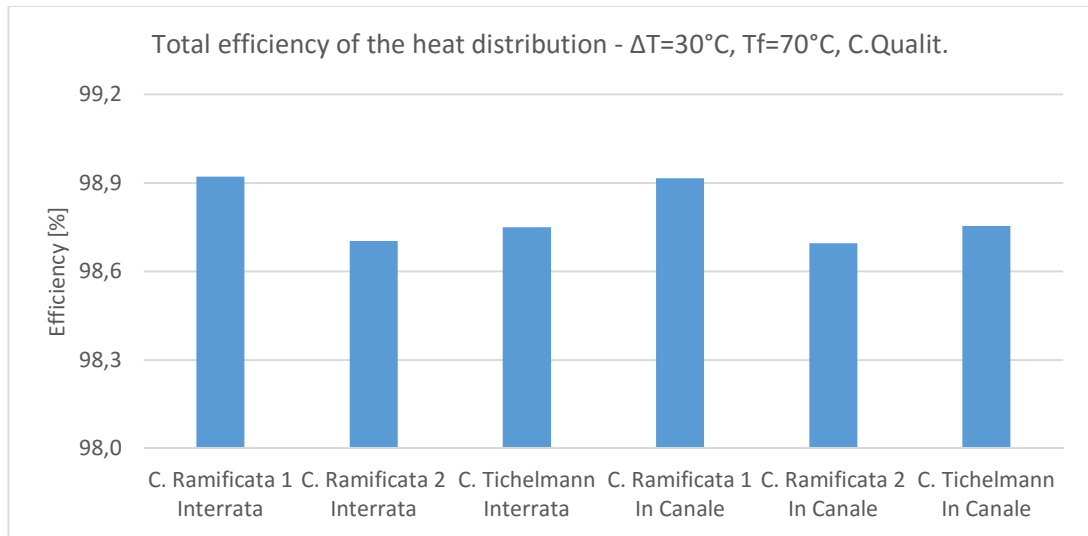


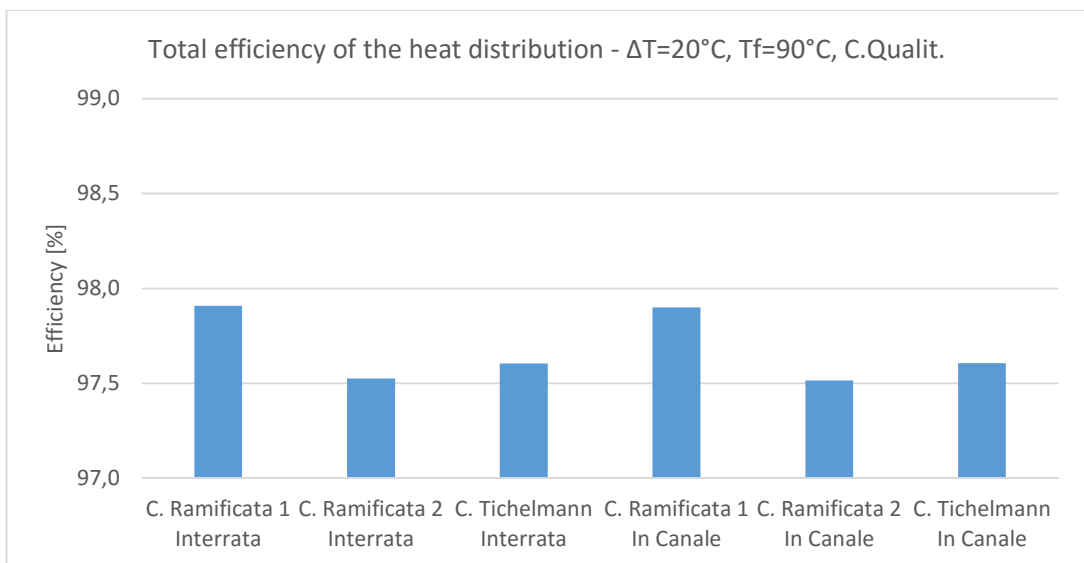
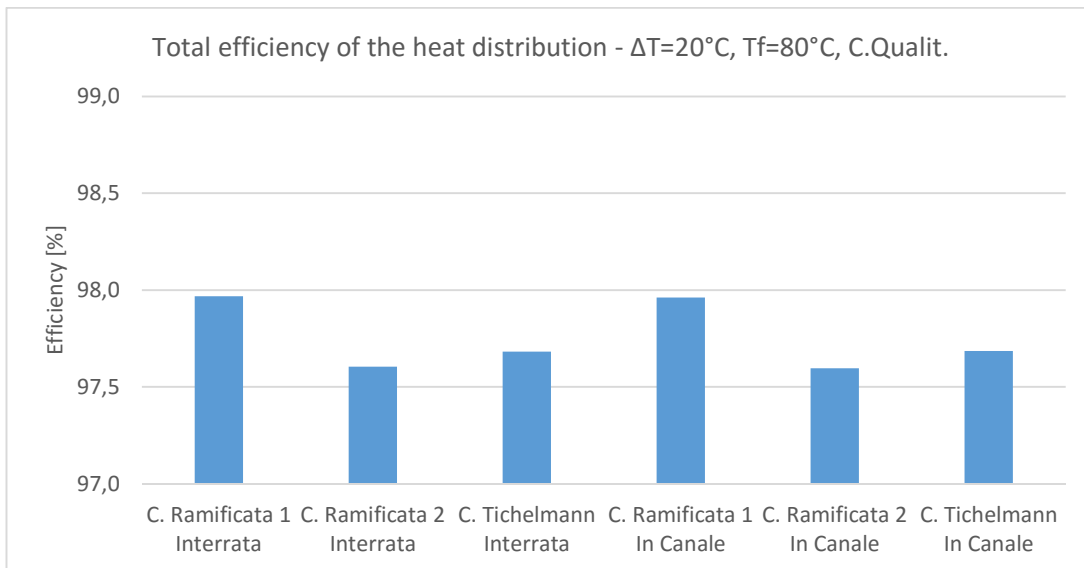
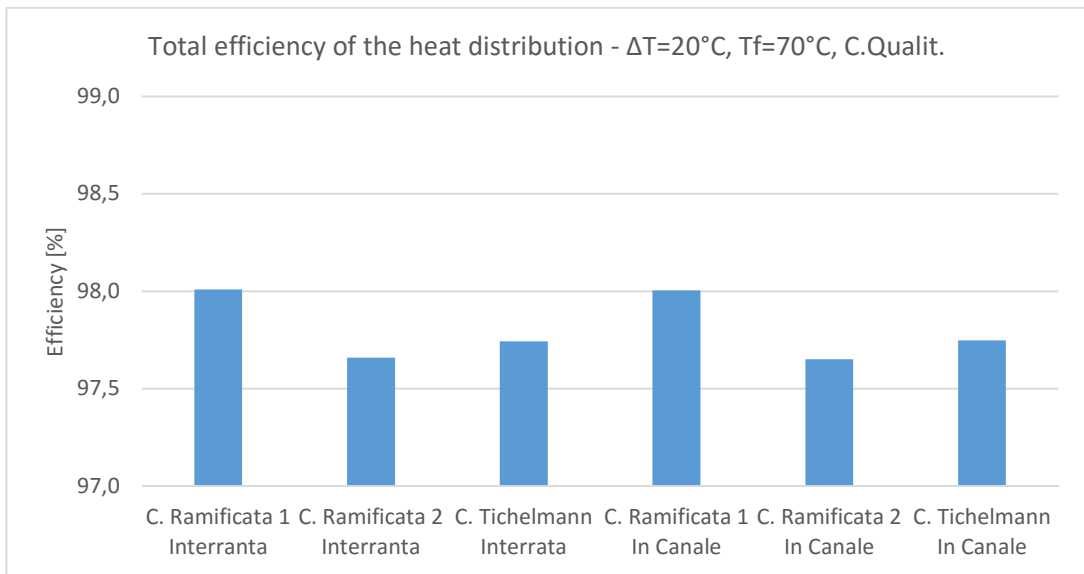


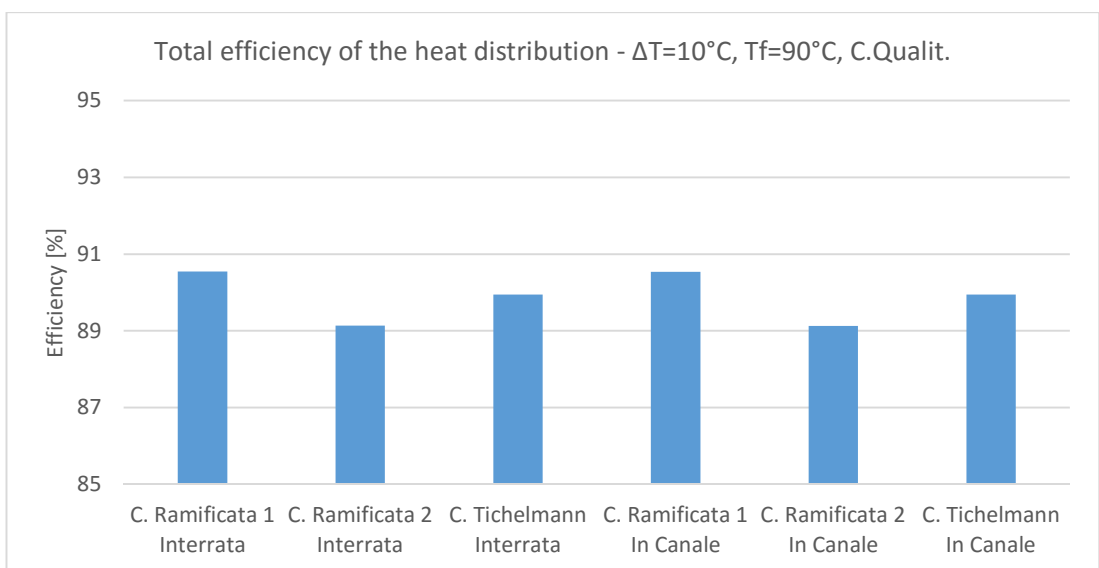
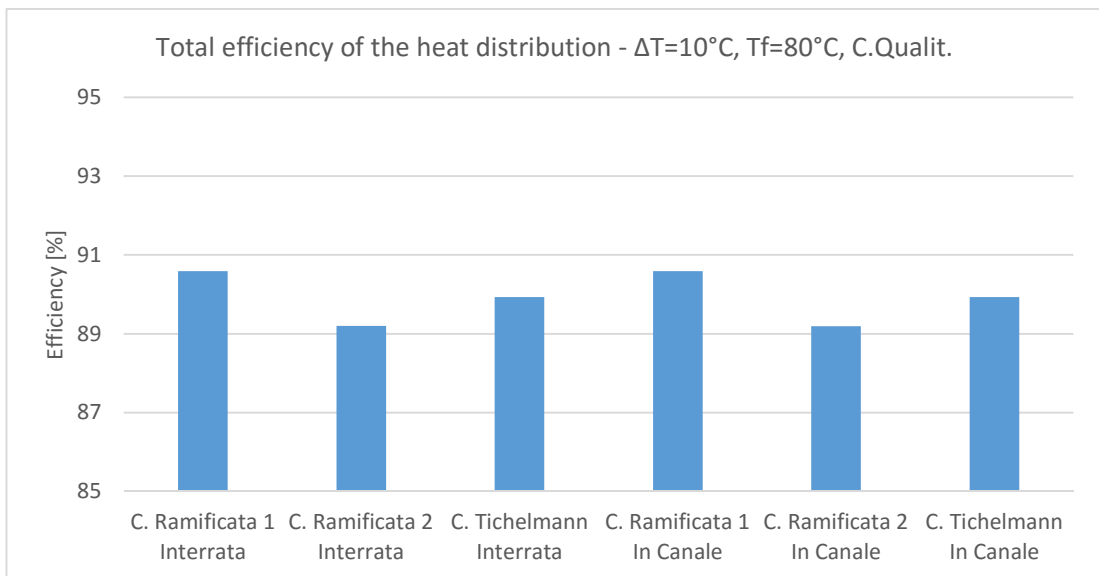
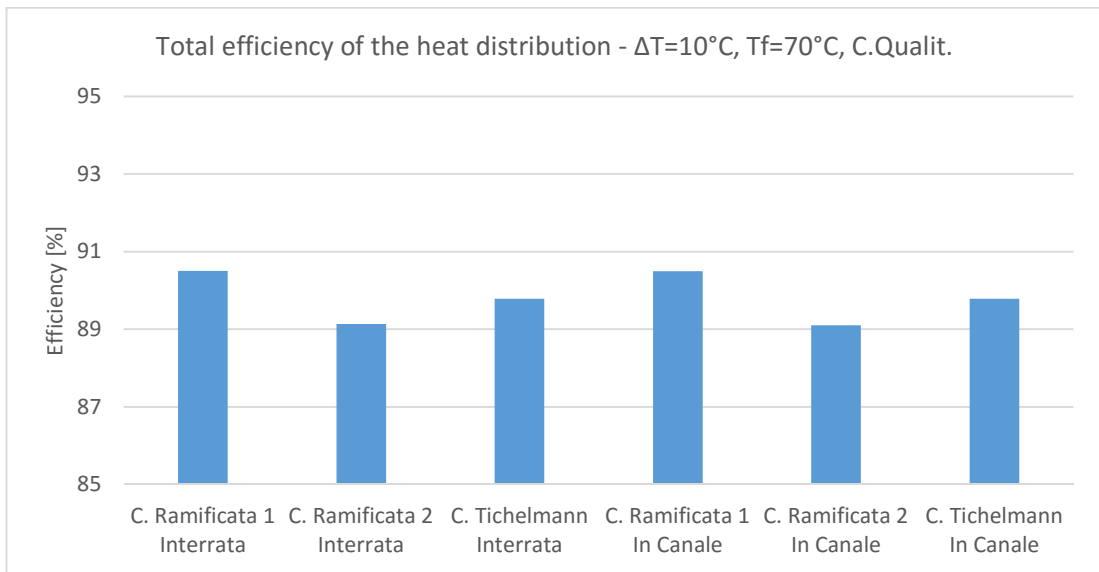


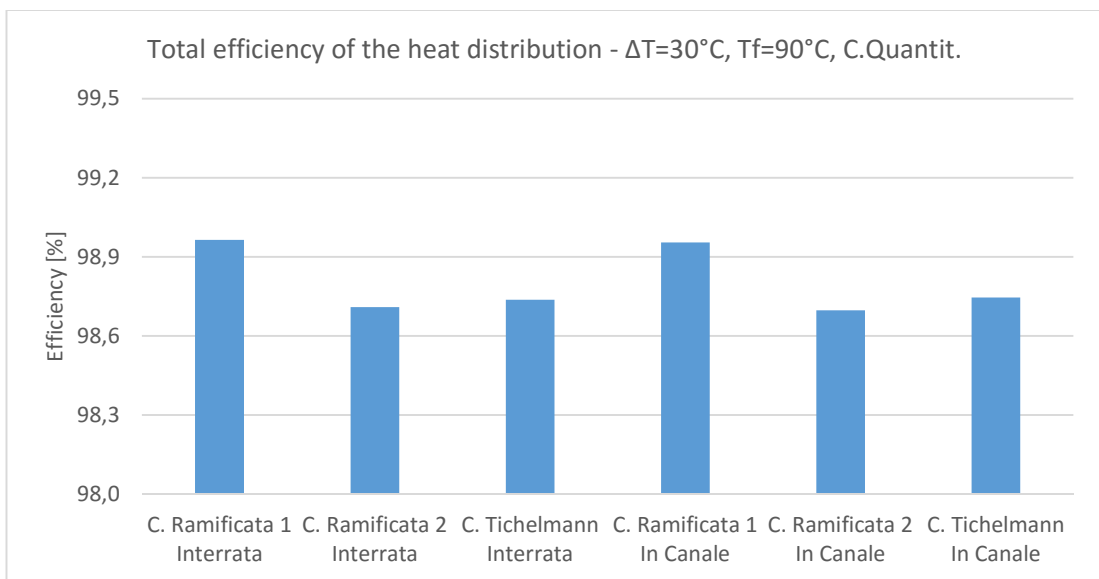
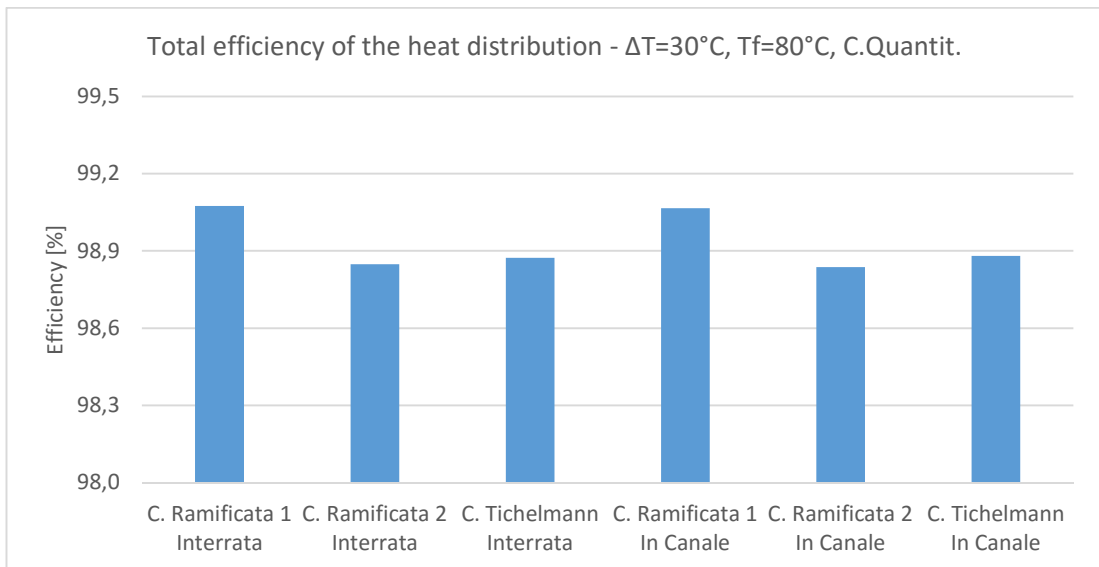
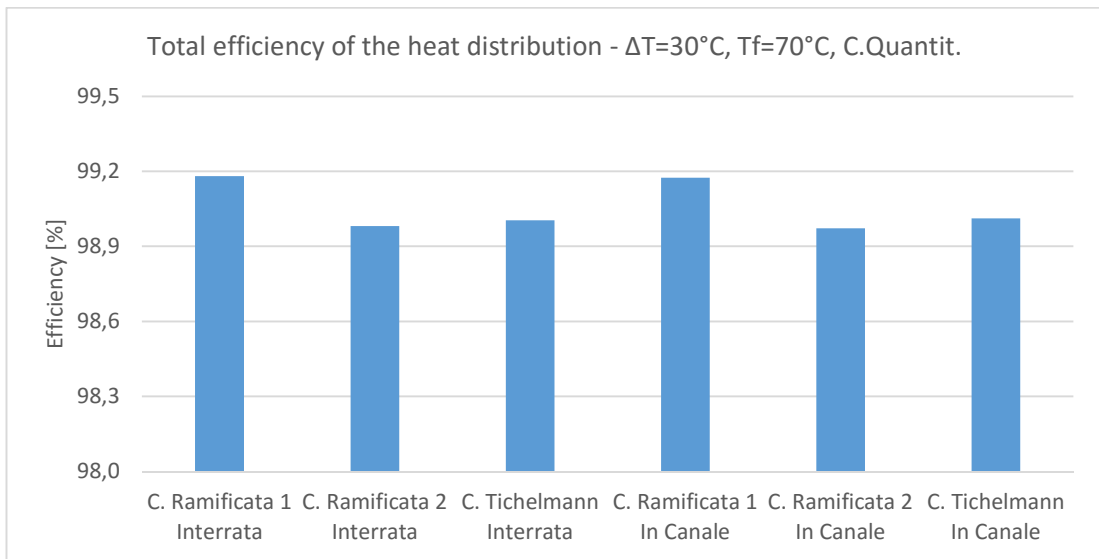
APPENDICE G

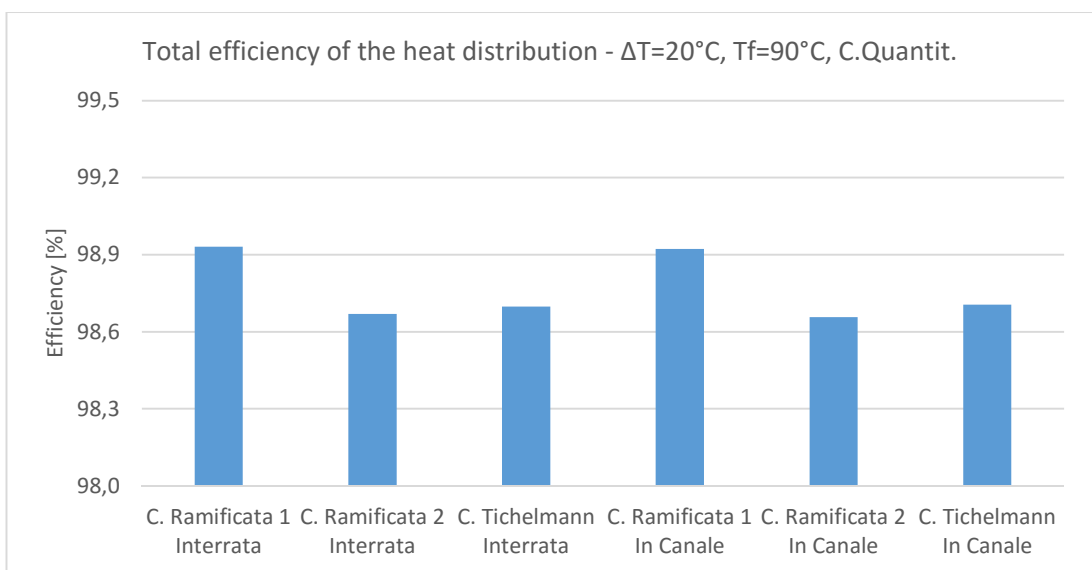
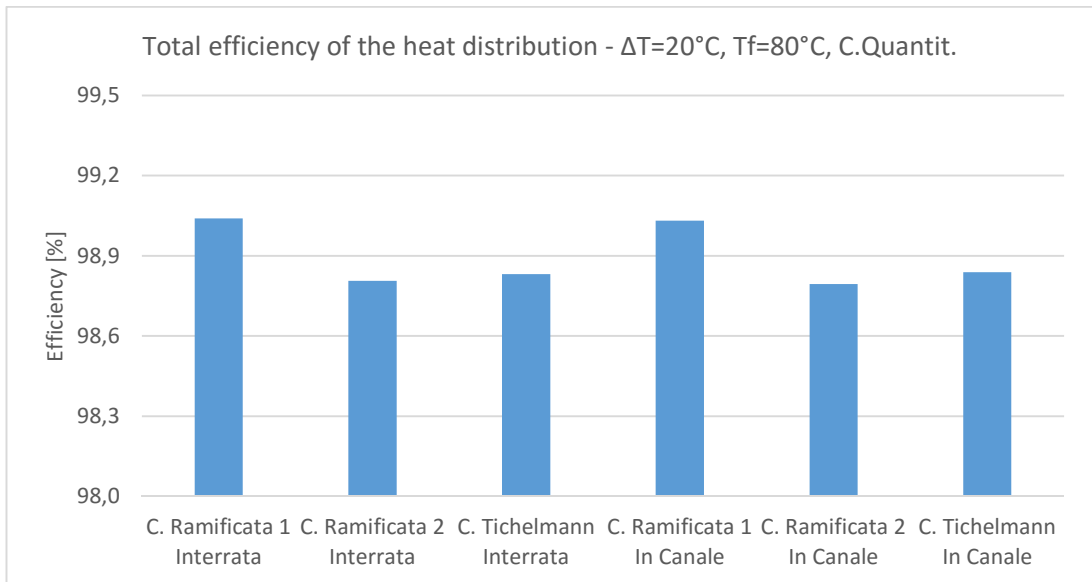
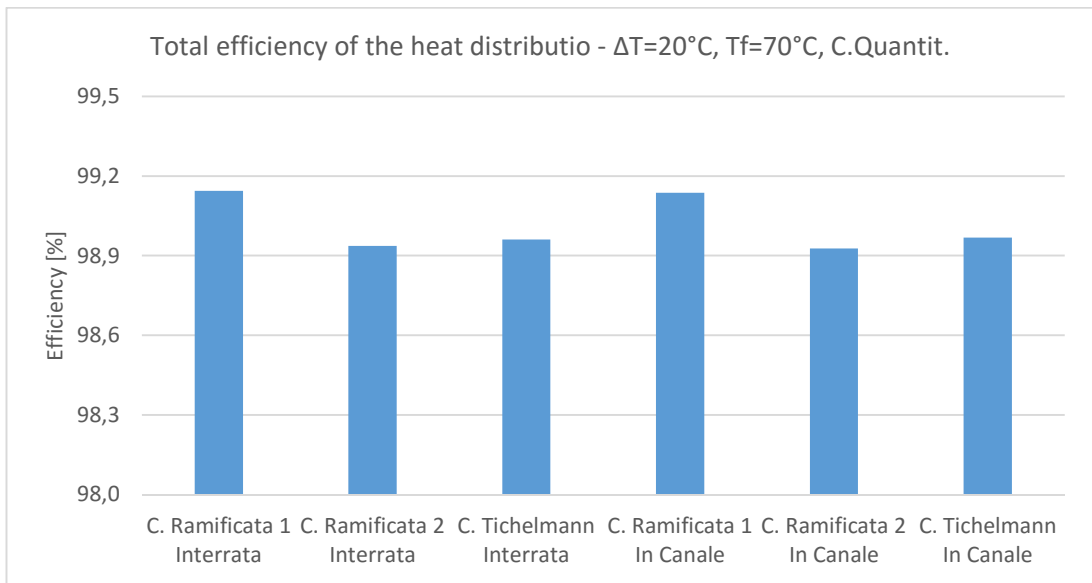
Efficiency of heat distribution

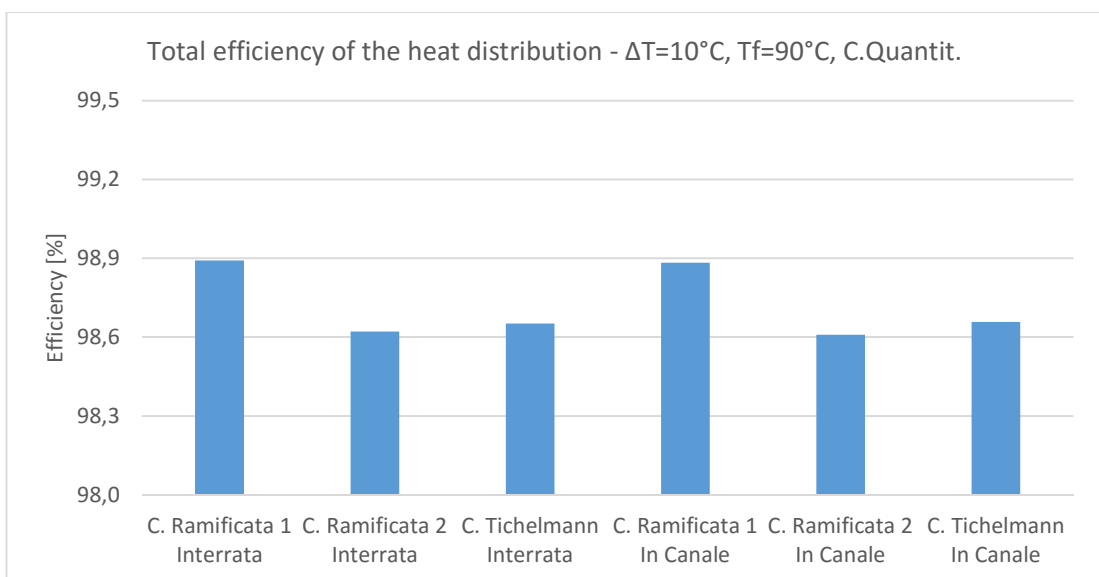
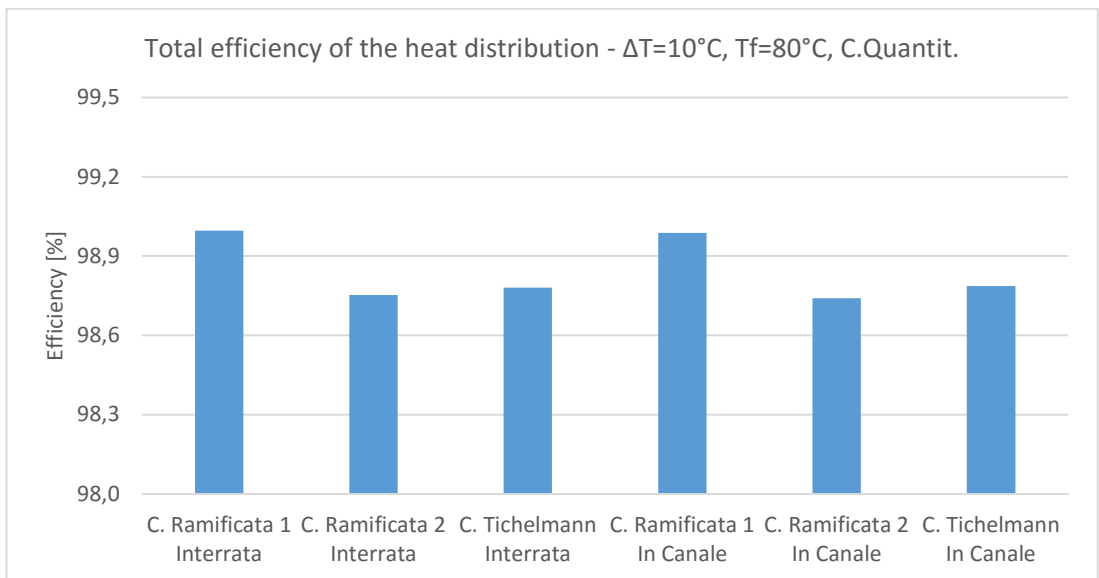
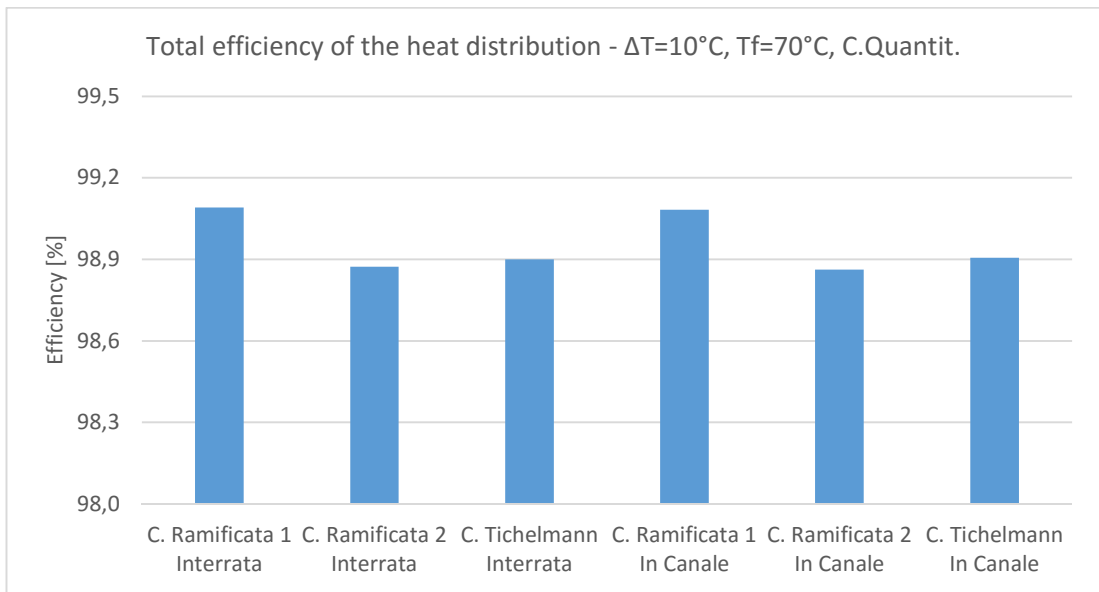












BIBLIOGRAFIA

- [1] Coming in from the cold - Improving district heating policy in transition economies, International Energy Agency, 2004
- [2] F. Kalmár, *Energy Conscious Heating*, Akadémiai Kiadó, Budapest, 2011
- G. Homonnay, *Távfűtések*, Tankönyvkiadó Vállalat, Budapest, 1977
- A. Macskásy, *Központi fűtőberendezésekkel kapcsolatos előtanulmányok*, Tankönyvkiadó, Budapest, 1952
- ALSTOM Power FlowSystems A/S design manual
- ISOPLUS, Rigid compound systems, 04/2015 Edition
- An introduction to energy consumption in pumps, Elsevier Ltd. 2008
- Substation data, Debreceni Hőszolgáltató Zrt.
- Heat Volume data Tócsóskert tér, Debreceni Hőszolgáltató Zrt.
- Táv hő-hálózat nyomvonal, Debreceni Hőszolgáltató Zrt.
- Outside temperature in Debrecen 2010-2014, Debreceni Hőszolgáltató Zrt.