

POLITECNICO DI TORINO

FACOLTÀ DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

CORSO DI LAUREA SPECIALISTICA IN INGEGNERIA
ENERGETICA E NUCLEARE

Analisi energetica ed economica per il
miglioramento dell'efficienza di un impianto di
teleriscaldamento

Tesi di Laurea Magistrale



Studente:
NICOLÒ GENTA

Docente:
Prof. MARCO BADAMI

Tutor aziendale:
Ing. PAOLO TRENTINI

ANNO ACCADEMICO 2017-2018

Alla mia famiglia.

INDICE

INDICE DELLE FIGURE	6
SIGLE E ABBREVIAZIONI	8
ABSTRACT.....	9
INTRODUZIONE.....	10
CAPITOLO 1 IL MONDO DELLE ESCO	12
1.1 Definizione e ruoli di una ESCo	12
1.2 Le normative di riferimento: UNI CEI 11352:2014 e UNI CEI 11339:2009..	14
1.3 Il Finanziamento Tramite Terzi (FTT) e l'Energy Performance Contract (EPC).....	16
1.4 Gli incentivi legati agli interventi di efficientamento energetico	20
1.4.1 I certificati bianchi	20
1.4.2 Le detrazioni fiscali : l' Ecobonus	24
1.4.3 Il Conto Termico	25
CAPITOLO 2 INTRODUZIONE AL TELERISCALDAMENTO	27
2.1 Schema del funzionamento di una rete di teleriscaldamento.....	29
2.2 Teleraffrescamento e reti a bassa temperatura.....	34
2.2.1 Il Teleraffrescamento	35
2.2.2 Reti a bassa temperatura.....	35
2.3 Vantaggi e svantaggi del teleriscaldamento.....	40
2.3.1 Una tecnologia che protegge l'ambiente.....	40
2.3.2 I vantaggi per l'utente	42
2.3.3 Gli svantaggi	43
2.3.4 Case study: Analisi dei consumi di un condominio prima e dopo l'allacciamento alla rete di teleriscaldamento	44
CAPITOLO 3 L'IMPIANTO DI TELERISCALDAMENTO DI LEINÌ	49
3.1 La centrale di produzione del calore.....	49
3.1.1 Il caricamento del biocombustibile	51

3.1.2 Il sistema di trattamento dei fumi.....	52
3.2 La rete di distribuzione del calore.....	54
3.3 Caratterizzazione climatica.....	57
3.4 Valutazione delle dispersioni termiche.....	58
3.4.1 Ipotesi di partenza ai fini del calcolo delle dispersioni.....	61
3.4.2 Risultati.....	64
3.5 Pompe di rete e fabbisogno energetico stagionale.....	65
CAPITOLO 4 INTERVENTO DI EFFICIENTAMENTO PRESSO L'IMPIANTO DI PRODUZIONE DEL CALORE: METODI ALTERNATIVI PER LA REGOLAZIONE DELLA RETE DI DISTRIBUZIONE.....	69
4.1 Regolazione tramite controllo della temperatura del fluido termovettore a portata costante.....	72
4.2 Regolazione tramite controllo della portata a temperatura di mandata costante	75
4.3 Comparazione dei risultati.....	78
4.3.1 Perdite di calore.....	79
4.3.2 Perdite di carico.....	81
4.3.3 Risparmio economico e emissioni di CO ₂ evitate.....	83
4.4 Analisi di sensitività.....	87
4.4.1 Effetto della variazione di ΔT nominale tra mandata e ritorno.....	87
4.4.2 Effetto della variazione della temperatura del fluido termovettore in mandata.....	92
CAPITOLO 5 INTERVENTI DI EFFICIENTAMENTO ENERGETICO PRESSO L'UTENZA	96
5.1 Il riscaldamento a bassa temperatura: perché conviene.....	97
5.2 Riqualificazione energetica degli edifici.....	98
5.3 Case Study: intervento di efficientamento energetico presso un condominio allacciato alla rete di teleriscaldamento; contratto EPC.....	103
5.3.1 Caratteristiche dell'edificio e Base dei consumi.....	103
5.3.2 Tipo di intervento e costo.....	105
5.3.3 Valutazioni economiche.....	105
5.3.4 Le detrazioni fiscali come incentivi.....	108
5.3.5 La stipula del contratto.....	109
CONCLUSIONI.....	112
BIBLIOGRAFIA.....	114

SITOGRAFIA..... 115

INDICE DELLE FIGURE

1-1 SCHEMA EPC CON FTT A RISPARMI CONDIVISI (FONTE: FIRE).....	17
1-2 FASI OPERATIVE DEL FINANZIAMENTO TRAMITE TERZI (FONTE: FIRE)	18
1-3 ANDAMENTO DEL VALORE DEI CERTIFICATI BIANCHI (FONTE: FIRE SU DATI GME).....	21
1-4 MECCANISMO PER L'OTTENIMENTO DEI CERTIFICATI BIANCHI	24
2-1 ENERGIA TERMICA PRODOTTA PER TECNOLOGIA DI PRODUZIONE (FONTE: GSE)	28
2-2 FONTI ENERGETICHE UTILIZZATE PER IL TELERISCALDAMENTO IN ITALIA (FONTE: GSE).....	28
2-3 SCHEMA DI FUNZIONAMENTO DI UNA RETE DI TELERISCALDAMENTO	29
2-4 POTENZA RICHIESTA DA UN IMPIANTO DI TELERISCALDAMENTO E SCELTA DELLA POTENZA OTTIMALE DI COGENERAZIONE	30
2-5 SCHEMA DI PRINCIPIO DI UNA RETE DI TELERISCALDAMENTO	31
2-6 CONFIGURAZIONI DELLE RETI DI TELERISCALDAMENTO	33
2-7 SCHEMA FUNZIONALE DI UNA SOTTOCENTRALE ALLACCIATA ALLA RETE DI TELERISCALDAMENTO	34
2-8 SCHEMA DEL VOLUME DI CONTROLLO DEL SISTEMA ANALIZZATO	38
2-9 COMPARAZIONE DI UN SISTEMA COGENERATIVO RISPETTO ALLA PRODUZIONE SEPARATA	40
2-10 ANDAMENTO DEI CONSUMI SPECIFICI DI ENERGIA TERMICA.....	45
2-11 CONSUMO DI ENERGIA TERMICA E RELATIVO COSTO IN BOLLETTA PER OGNI STAGIONE DI RISCALDAMENTO	46
2-12 COSTO DEL KWh TERMICO PER OGNI STAGIONE DI RISCALDAMENTO	47
3-1 SCHEMA DI FUNZIONAMENTO DELL'IMPIANTO DI PRODUZIONE DEL CALORE.....	51
3-2 SILOS PER LO STOCCAGGIO DELLA BIOMASSA	52
3-3 IL SISTEMA DI TRATTAMENTO DEI FUMI	53
3-4 PLANIMETRIA DELLA RETE DI TUBAZIONI.....	54
3-5 SPACCATO E SEZIONE TRASVERSALE DELLE TUBAZIONI.....	56
3-6 TUBAZIONI UTILIZZATE E RELATIVE MISURE	56
3-7 QUANTITÀ DI TUBAZIONI UTILIZZATE IN BASE AL DIAMETRO NOMINALE	56
3-8 GRADI GIORNO PER IL COMUNE DI LEINÌ NEL PERIODO 2005-2017.....	58
3-9 TUBAZIONI INTERRATE	61
3-10 CONDUCIBILITÀ TERMICA MATERIALI E TERRENO	62
3-11 TABELLA RIASSUNTIVA	63
3-12 CONFRONTO DELLE DISPERSIONI TERMICHE A DIFFERENTI TEMPERATURE DI MANDATA E RITORNO	65
3-13 DIAGRAMMA DI MOODY	67

4-1 FLUSSI TERMICI DI UN'UTENZA	71
4-2 CONTROLLO A PORTATA COSTANTE	75
4-3 CONTROLLO A TEMPERATURA DI MANDATA COSTANTE	76
4-4 VARIAZIONE DELLA PORTATA IN BASE ALLA TEMPERATURA ESTERNA	78
4-5 CONFRONTO DEI METODI DI PARZIALIZZAZIONE	80
4-6 ANDAMENTO DELLA PORTATA E "RIGIDITÀ" STAGIONALE PER LA STAGIONE 2016/2017 NEL COMUNE DI LEINÌ.....	82
4-7 ENERGIA SPESA PER IL FUNZIONAMENTO DELLE POMPE DI RETE	83
4-8 GRAFICO RIASSUNTIVO: SOMMA DELLE PERDITE DI RETE E FABBISOGNO DELLE POMPE.....	84
4-9 SPESA ECONOMICA PER LE DISPERSIONI DI CALORE E POMPAGGIO DEL FLUIDO TERMOVETTORE NELLA RETE.	85
4-10 EMISSIONI DI CO ₂ PER I DIVERSI METODI ANALIZZATI	86
4-11 VARIAZIONE DELLE PERDITE DI CALORE NELLA RETE IN BASE A DIVERSI ΔT - METODO "B"	88
4-12 VARIAZIONE DELLE PERDITE DI CALORE NELLA RETE IN BASE A DIVERSI ΔT - METODO "C"	89
4-13 VARIAZIONE DELLA POTENZA NECESSARIA PER L'ALIMENTAZIONE DELLE POMPE IN BASE A DIVERSI ΔT - METODO "B"	90
4-14 VARIAZIONE DELLA POTENZA NECESSARIA PER L'ALIMENTAZIONE DELLE POMPE IN BASE A DIVERSI ΔT - METODO "C".....	91
4-15 VARIAZIONE DELLE PERDITE DI CALORE NELLA RETE IN BASE A DIVERSE TEMPERATURE DI MANDATA - METODO "B".....	92
4-16 VARIAZIONE DELLE PERDITE DI CALORE NELLA RETE IN BASE A DIVERSE TEMPERATURE DI MANDATA- METODO "C"	93
4-17 VARIAZIONE DELLA POTENZA NECESSARIA PER L'ALIMENTAZIONE DELLE POMPE IN BASE A DIVERSE TEMPERATURE DI MANDATA- METODO "B"	94
4-18 VARIAZIONE DELLA POTENZA NECESSARIA PER L'ALIMENTAZIONE DELLE POMPE IN BASE A DIVERSE TEMPERATURE DI MANDATA- METODO "C"	94
5-1 COIBENTAZIONE DELLE PARETI PERIMETRALI ESTERNE	100
5-2 ESEMPI DI INTERVENTI SU ABITAZIONE UNIFAMILIARE IN ZONA CLIMATICA E	102
5-3 ESEMPI DI INTERVENTI SU CONDOMINIO IN ZONA CLIMATICA E	103
5-4 INTERVENTI A BASSO COSTO PER GLI INFISSI	103
5-5 CONSUMI STORICI E GRADI GIORNO RELATIVI ALLA STAGIONE	104
5-6 COSTI DELL'INTERVENTO DI EFFICIENTAMENTO ENERGETICO	105
5-7 TEMPO DI RITORNO DELL'INVESTIMENTO	107
5-8 ANDAMENTO DEL VAN CON DIVERSI VALORI DI TASSO I ED E	108
5-9 ECOBONUS	109
5-10 PREVISIONE DEI GUADAGNI DELLA ESCO E DEI RISPARMI DEGLI UTENTI.....	110

SIGLE E ABBREVIAZIONI

SIMBOLO	GRANDEZZA	UNITA' DI MISURA
\dot{m}	portata in massa	kg/s
h	entalpia specifica	kJ/kg
ϕ	flusso termico scambiato	kW
T	temperatura	°C, K
W	potenza meccanica	kW
U	energia interna	kJ
p	pressione	Pa
V	volume	m ³
S	entropia	kJ/K
s	entropia specifica	kJ/kgK
Σ_i	tasso di generazione di entropia	kW/K
E_c	energia cinetica	kJ
E_p	energia potenziale	kJ
e_c	energia cinetica specifica	kJ/kg
e_p	energia potenziale specifica	kJ/kg
η_{II}	efficienza di secondo principio	-
c	calore specifico	kJ/kgK
η	rendimento	-
b	exergia specifica	kJ/kg
GG	gradi giorno	gg
R	resistenza termica	K/W
α	coefficiente scambio termico convettivo	W/m ² K
λ	conducibilità termica	W/m ² K
\dot{V}	portata volumica	m ³ /s
A	sezione trasversale	m ²

ABSTRACT

Negli ultimi anni, il problema del cambiamento climatico e la necessità di ridurre i consumi hanno posto un forte interesse sull'efficienza energetica. In questo campo le Energy service company (ESCO) svolgono un ruolo fondamentale. Nella prima parte di questo elaborato viene introdotto il mondo delle ESCo : una descrizione di quelle che possono rappresentare un valido sostegno al mondo delle imprese e dei cittadini che vogliono intraprendere la strada della riqualificazione energetica. A seguire viene esaminato dal punto di vista energetico il controllo della rete di teleriscaldamento della città di Leinì. Dopo aver preso le condizioni di funzionamento attuali come riferimento, si è intervenuti andando a modificare la modalità di controllo della rete: il primo metodo prevede un controllo a portata costante e temperatura del fluido variabile mentre il secondo a temperatura di mandata costante e portata variabile. Una volta concluse le simulazioni si è passati al confronto dei risultati, basandosi sulle perdite di calore nella rete e sull'energia richiesta dalle pompe di rete.

Dal punto di vista energetico si è osservato come il controllo a temperatura di mandata costante ottenga le migliori prestazioni, anche se quello a portata costante 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.

Le basse temperature introdotte dai nuovi metodi di controllo della rete hanno indotto la necessità di utilizzare dei terminali a bassa temperatura o il miglioramento dell'involucro edilizio degli edifici: nell'ultima parte dell'elaborato è riportata l'analisi economica di un esempio di intervento di "cappottatura" su un edificio allacciato alla rete esaminata, tramite un contratto a prestazioni garantite, effettuato da una ESCo.

INTRODUZIONE

Il presente elaborato è il frutto di una collaborazione con l'azienda "*Gruppo 2G-Management Consulting*" presso il quale ho effettuato un tirocinio accademico finalizzato alla stesura della presente tesi di Laurea Magistrale. Tale azienda offre consulenze di vario genere ad imprese operanti in tutti i settori, compreso quello energetico. Nella stesura di questa tesi mi sono immedesimato in una Energy Service Company (ESCO), la quale viene chiamata in causa per effettuare un'analisi energetico/economica al fine di efficientare la rete di teleriscaldamento della città di Leinì. L'azienda responsabile della gestione dell'impianto di teleriscaldamento ha provveduto a fornirmi tutti i dati e le planimetrie necessarie allo svolgimento dell'analisi, in modo tale che il lavoro fosse quanto più possibile vicino alla realtà. Nel primo capitolo di questo elaborato viene introdotto il mondo delle ESCo, partendo dai ruoli che ricoprono queste società nell'ambito energetico, passando poi alle normative di riferimento che le riguardano, e concludendo infine con due strumenti di fondamentale importanza che caratterizzano le ESCo: il finanziamento tramite terzi (FTT) e l' Energy performance contract (EPC). Il capitolo si conclude con un'ampia spiegazione di quelli che sono gli incentivi a livello nazionale per quanto riguarda gli interventi di efficientamento energetico: i Certificati Bianchi, il Conto Termico e l'Ecobonus.

Il secondo capitolo propone un'ampia argomentazione di quello che è il teleriscaldamento: caratteristiche, schema di funzionamento e configurazioni possibili. Il capitolo prosegue con una breve trattazione di due interessanti applicazioni secondarie del teleriscaldamento: il teleraffrescamento e le reti a bassa temperatura. Dopo aver elencato vantaggi e svantaggi del teleriscaldamento, il capitolo si conclude con un'analisi dei consumi di energia termica di un condominio, prima e dopo l'allacciamento alla rete.

Nel terzo capitolo inizia la vera e propria analisi della rete: la prima parte è dedicata alla descrizione dell'impianto di produzione del calore, costituito da due caldaie a

biomassa, successivamente viene presa in considerazione la rete di distribuzione vera e propria. Dopo aver esaminato la rete dal punto di vista costruttivo e funzionale, si è passati alla valutazione delle dispersioni termiche e del fabbisogno energetico delle pompe di rete nelle condizioni di funzionamento attuali. Le condizioni di funzionamento attuali prevedono un esercizio a portata costante, mentre la temperatura di ritorno dalle utenze viene riportata al valore nominale di mandata e quindi ridistribuita alle utenze. L'energia termica dispersa dalla rete e quella elettrica necessaria per utilizzo delle pompe viene presa come riferimento per valutare il risparmio a seguito delle nuove condizioni di funzionamento che verranno introdotte nel capitolo successivo.

Il quarto capitolo propone un intervento di efficientamento della rete di distribuzione basato su di una diversa gestione dell'impianto rispetto all'assetto attuale. Vengono esaminate due configurazioni, l'una alternativa all'altra: il primo metodo prevede un controllo a portata costante e temperatura del fluido variabile mentre il secondo a temperatura di mandata costante e portata variabile. Lo scopo di tale studio è quello di valutare, sotto il punto di vista energetico/economico, il risparmio che si otterrebbe attuando l'uno o l'altro assetto rispetto alle condizioni di funzionamento attuali, valutate nel capitolo precedente. Il capitolo termina con un'analisi di sensitività in cui vengono variati i parametri di funzionamento al fine di valutarne l'incidenza sui consumi.

L'elaborato si conclude con un'analisi prettamente economica su quello che può rappresentare un intervento-tipo di efficientamento energetico su di un edificio. L'intervento consiste in un miglioramento dell'involucro edilizio di un condominio allacciato alla rete in esame, tramite "cappottatura", e, in base ai risparmi di energia e agli incentivi statali, viene calcolato il tempo di ritorno dell'investimento.

Capitolo 1

IL MONDO DELLE ESCO

Il continuo aumento dei consumi di energia, sia a livello industriale che domestico, comporta un aumento inesorabile dell'inquinamento atmosferico e un'accelerazione dei processi di impoverimento delle riserve energetiche, oltre che un incremento dei costi di gestione per le aziende. Molto si sta facendo nella direzione dell'uso razionale delle risorse, ma ciò non basta. Per questo motivo, il raggiungimento dell'efficienza energetica è un obiettivo imprescindibile nel contesto economico-imprenditoriale dei nostri giorni. In questo scenario, le ESCo svolgono un ruolo fondamentale.

1.1 Definizione e ruoli di una ESCo

Le Energy Service Company (ESCO), ovvero società per la fornitura di servizi energetici, sono diventate, negli ultimi anni, soggetti di fondamentale importanza in ambito energetico ed economico, soprattutto in seguito all'emanazione dei decreti ministeriali sull'efficienza energetica. Queste società possono operare in ambito energetico, fornendo numerosi servizi, tra cui diagnosi energetiche, interventi di efficientamento energetico e fornitura di energia. Le ESCo hanno la possibilità di certificarsi secondo la norma italiana UNI CEI 11352, offrendo così al cliente maggiori garanzie circa le proprie competenze e capacità e assicurandosi la possibilità di partecipare a bandi pubblici. Ciò che caratterizza e pone un grande interesse verso queste nuove realtà è la modalità con cui esse operano; in sostanza garantiscono i risultati sugli interventi effettuati (tramite un particolare tipo di contratto chiamato *Energy Performance Contract*) e operano tramite il finanziamento tramite terzi, con o senza assunzione dei rischi finanziari da parte della ESCo. Queste caratteristiche appena descritte verranno approfondite nei paragrafi successivi ma è fondamentale sottolinearne già da subito l'importanza: questo significa che aziende,

privati o pubbliche amministrazioni che siano interessati ad investire nell'efficienza energetica potranno effettuare i lavori senza la necessità di sborsare denaro. In alcuni casi, come per la Pubblica Amministrazione, i potenziali interventi sono difficili da implementare per la carenza di fondi rispetto alle esigenze complessive, rispetto alle quali l'energia occupa spesso un ruolo secondario. Tali inconvenienti possono essere superati in molti casi proprio grazie alle ESCo ed al finanziamento tramite terzi. Una ESCo è dunque un'impresa in grado di fornire innumerevoli servizi con il fine di realizzare un intervento di efficienza energetica, assumendo su di se l'onere dell'investimento e il rischio di un mancato risparmio, il che si traduce con mancato guadagno.

La prerogativa fondamentale che deve possedere una ESCo è quella di essere competente il che significa avere al suo interno personale altamente qualificato in ambito tecnico, in modo tale da ridurre al minimo i rischi dei mancati risparmi. A tal fine esiste la normativa UNI CEI 11339 la quale definisce e stabilisce i requisiti perché una persona possa diventare Esperto in Gestione dell' Energia. Questa normativa è strettamente collegata con la UNI CEI 11352 in quanto, nella lista di controllo per la verifica dei requisiti e delle capacità di una ESCo, contenuta nella norma appena citata, è richiesta la presenza nel suo organico di almeno un soggetto con adeguate competenze, certificate appunto dalla UNI CEI 11339: <<La verifica di cui sopra [riferita a competenze organizzative, diagnostiche, progettuali, gestionali, economiche e finanziarie] si può considerare soddisfatta qualora il responsabile del requisito sia una figura certificata da un organismo accreditato di certificazione in conformità ai requisiti della UNI CEI 11339>>¹.

Nonostante il modello delle ESCo sia ampiamente diffuso e praticato in gran parte dell'Europa, soprattutto in Germania, altrettanto non lo è in Italia; le ESCo sono state riconosciute formalmente solo dopo il Decreto ministeriale del 20 luglio 2004, e da allora il loro mercato non è decollato come previsto. Si può ritenere che ciò avvenga segnatamente in riferimento a due criticità strettamente interconnesse: mancanza di informazione e incertezza normativa. La prima è certamente quella che impedisce

¹ UNI CEI 11352: aprile 2014, Società che forniscono servizi energetici (ESCo), appendice A , pp. 8.

maggiormente il dispiegarsi delle potenzialità del mercato delle ESCo italiane: visto ancora come un settore pionieristico nonostante i grandi risultati di risparmio conseguiti all'estero, l'affidarsi a un'impresa per stipulare un EPC (Energy performance Contract) è guardato con sospetto e scetticismo dai possibili beneficiari, pubblici e privati. Ma, soprattutto, grande incertezza è avvertita nel sistema bancario, con conseguenze drammatiche: esso assume il ruolo essenziale di fornire liquidità alle ESCO, che i più delle volte non dispongono nell'immediato delle risorse necessarie ad anticipare le spese dell'intervento. Dunque, senza lo strumento del finanziamento tramite terzi, la diffusione degli strumenti più efficienti di risparmio energetico resta amaramente compromessa².

1.2 Le normative di riferimento: UNI CEI 11352:2014 e UNI CEI 11339:2009

Come già anticipato nel capitolo precedente, le ESCo, in Italia, hanno la possibilità di certificarsi secondo la norma UNI CEI 11352 dell'aprile 2014. Diventare una società certificata non è obbligatorio ma i benefici che essa ne può trarre sono numerosi, a partire dalle maggiori garanzie che può offrire ai soggetti terzi; a tal proposito nella norma è contenuta (nell'appendice A) una lista di controllo per la verifica dei requisiti e delle capacità della ESCo. Come viene riportato all'inizio dell'appendice: <<La lista può essere utilizzata sia dal cliente, direttamente o tramite un ente terzo, per supportare il processo decisionale orientato alla scelta di una ESCo, ovvero dalla ESCo stessa come strumento di autodiagnosi o tramite un ente terzo, per verificare le proprie capacità a fornire servizi di efficienza energetica secondo i requisiti della presente norma>>³. Altri importanti vantaggi possono essere: la possibilità di accedere o di competere senza limitazioni ai futuri bandi pubblici e la possibilità di potersi riorganizzare, o di colmare eventuali lacune di ogni genere, nel corso del processo di certificazione. Infine l'ultimo rilevante beneficio che una ESCo può trarre dalla certificazione è la possibilità di

² F. FURIANI, M.G. LANDI, M.C. NOVELLI, Aspetti normativi del contratto EPC e dei suoi elementi di garanzia per la pubblica amministrazione, ENEA, settembre 2013, pp. 17.

³ UNI CEI 11352: aprile 2014, Società che forniscono servizi energetici (ESCO), appendice A , pp. 8.

partecipare al mercato dei certificati bianchi, il che significa ulteriori introiti derivanti dagli interventi di efficientamento, oltre al guadagno sul risparmio. Questo è probabilmente il motivo principale che spinge numerose ESCo all'ottenimento della certificazione. Del meccanismo dei certificati bianchi se ne parlerà nei capitoli successivi. La norma in sintesi, prevede che la ESCo attraverso i suoi servizi garantisca al cliente un miglioramento dell'efficienza dell'energia, rilevato attraverso la misura della riduzione dei consumi energetici rispetto a quelli iniziali. La ESCo deve quindi effettuare un audit energetico preliminare, definire le azioni da svolgere per l'efficientamento (punto 4.2.2) ed infine verificarne l'esito (punto 4.2.3). nel punto 4.3 sono riportate le capacità che la ESCo deve possedere (organizzativa, diagnostica, progettuale, gestionale, economico-finanziaria), tra cui la capacità di realizzare e/o gestire un sistema di gestione dell'energia conforme alla norma europea ISO 50001 sui sistemi di gestione dell'energia⁴. Anche della norma ISO 50001 verrà fatto un approfondimento nei paragrafi successivi. Come già anticipato nel paragrafo precedente, all'interno della norma sono richieste delle figure professionali che rispondano a determinati requisiti, in particolare:

- La presenza nell'organigramma dell'area tecnica di un responsabile con adeguata competenza nella gestione dell'energia e dei mercati energetici;
- La presenza nell'organigramma di un tecnico con adeguata competenza di progettazione nelle aree di intervento della ESCo;

Sempre nell'allegato vi è presente una nota che evidenzia la possibilità che le due figure professionali coincidano con la stessa persona. Tali requisiti sono soddisfatti nel caso la persona sia un Esperto in Gestione dell'energia(EGE), certificato secondo la UNI CEI 11339. Di conseguenza, si può dire che è senza dubbio opportuno che la ESCo abbia una o più figure, con competenze proprie degli Energy manager, che rispondano alle caratteristiche evidenziate nell'allegato, mentre è chiaro che la presenza in una ESCo di un EGE certificato sia auspicabile, ma non obbligatoria. Sempre nella norma UNI CEI 11352 è presente un secondo allegato, il quale

4 <http://www.fire-italia.org/la-certificazione-delle-esco/>

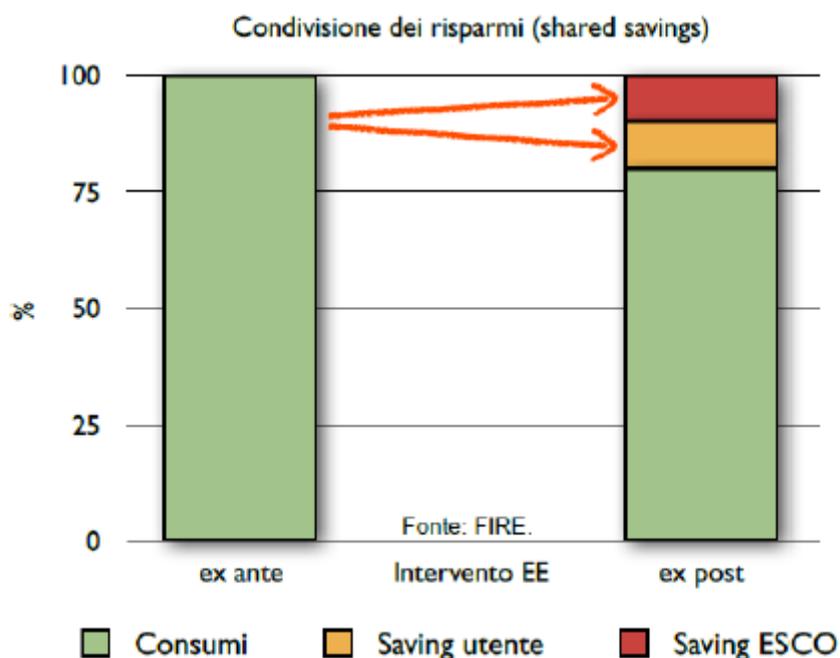
definisce i contenuti minimi dell'offerta contrattuale del servizio di efficienza energetica che la ESCo deve assicurare nei confronti dei clienti .

1.3 Il Finanziamento Tramite Terzi (FTT) e l'Energy Performance Contract (EPC)

Il termine finanziamento tramite terzi (third part financing) nasce a metà degli anni 80 negli Stati Uniti, e sta ad indicare un particolare tipo di finanziamento proprio dei progetti in campo energetico. Lo scopo di questi finanziamenti era quello di promuovere lo sviluppo energetico e l'innovazione tecnologica nel campo delle energie rinnovabili, in sostituzione ai sistemi tradizionali basati sugli idrocarburi. Ad oggi il significato sostanziale del FTT non è cambiato, ed ha assunto un ruolo fondamentale nell'economia delle ESCo.

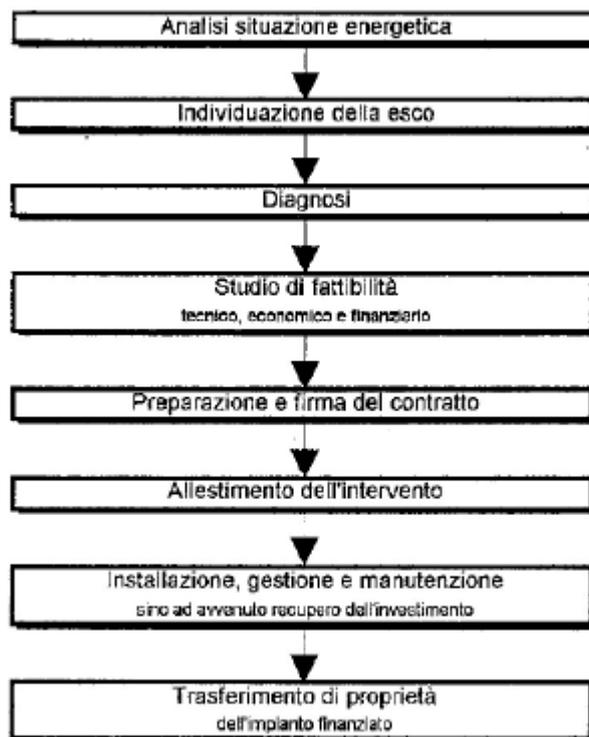
Il ruolo della ESCo, tramite lo strumento del FTT è quello di fornire un sistema integrato di servizi, che comprende la diagnosi, il finanziamento, la progettazione, l'installazione, la gestione e la manutenzione di un impianto tecnologico, dalle cui prestazioni deriverà il risparmio monetario (il risparmio atteso è stimato a priori) che permetterà alla ESCo di poter rientrare sull'investimento effettuato che guadagnare sul capitale investito. Nel caso la società responsabile dell'intervento fosse inoltre produttrice di energia elettrica e/o termica, sarebbe possibile stipulare un contratto di fornitura di energia, da inserire nel pacchetto, con benefici per entrambe le parti. La ESCo può decidere di finanziare il progetto con fondi propri, oppure affidarsi ad un istituto di credito, il quale effettua degli accertamenti, in cerca di garanzie, non più sulla solidità finanziaria della società ma sulla capacità dell'impianto di conseguire i risultati attesi da progetto. Questo tipo di approccio avvantaggia le piccole ESCo in quanto, pur non disponendo di elevate garanzie finanziarie, possono comunque garantirsi il finanziamento, in seguito alla presentazione di un progetto valido. L'utente finale, infine, fruitore della migliore performance energetica dell'impianto installato, corrisponde alla ESCo un canone pari alla differenza della bolletta energetica prima e dopo l'intervento per un numero di anni stabilito contrattualmente a priori. Una volta terminato il contratto, l'impianto diventa a tutti gli effetti del cliente, il quale potrà godere in pieno dell'impianto installato e dunque del risparmio.

L'avvio formale del progetto comincia una volta stipulato il contratto; in questo ambito, la tipologia di contratto più utilizzata e che meglio si adatta al FTT è l'Energy Performance Contract (EPC). Questo tipo di contratto è quello più utilizzato dalle ESCo per cui è garantita la prestazione energetica da misurazioni effettuate prima e dopo l'intervento con una procedura stabilita a priori contrattualmente. Vi sono principalmente due schemi che si adottano con maggiore frequenza in un contratto EPC: il "shared savings" (risparmi condivisi) e il "guaranteed savings" (risparmi garantiti). Il primo consiste nella divisione in modo percentuale fra la ESCo e il committente, mentre il secondo schema prevede il pagamento di rate prestabilite, per un periodo determinato, alla ESCo. Quest'ultima proposta avviene sulla base di un risparmio garantito per il cliente. Nella seguente figura è mostrato lo schema del shared savings.



1-1 Schema EPC con FTT a risparmi condivisi (fonte: FIRE)

Va precisato che nello schema shared savings, le percentuali di suddivisione del risparmio possono variare: più la percentuale di risparmio conseguita alla ESCo è alta, minore sarà la durata del contratto e viceversa. Nella seguente figura sono schematizzate le fasi operative del finanziamento tramite terzi



1-2 Fasi operative del finanziamento tramite terzi (fonte: FIRE)

Al fine di ottenere i risultati prefissati e dunque il conseguimento degli obiettivi, non basta fare affidamento solamente sull'aspetto tecnologico ma bisogna tenere conto della variabile umana. La difficoltà principale che si incontra nel tentativo di ottenere un risparmio energetico consiste nel fatto che, soprattutto nella fase di gestione, la ESCo ha bisogno della necessaria cooperazione dell'utente finale. Una riduzione dei consumi non può essere ottenuta se il beneficiario non adotta un comportamento responsabile nei confronti dell'ambiente. «Qualsiasi apparecchiatura tecnica, finanziaria e giuridica non sarà mai in grado di sostituire il comportamento umano. Le aziende impegnate in percorsi di riqualificazione energetica (tra cui le ESCO) sono in grado di adempiere ai loro obblighi contrattuali solo se anche il comportamento degli utenti è "ambientalmente responsabile". Di conseguenza anche il sistema di controllo del rendimento energetico non può limitarsi a misurare le prestazioni fisiche dell'edificio, ma deve rivolgere la sua attenzione anche al comportamento degli utenti. I comportamenti dell'utente possono

mettere in seria discussione i bilanci energetici all'origine dello stesso EPC, creando notevole incertezza, ad esempio, sui tempi di ammortamento dell'investimento>>>⁵.

Come misura cautelativa, la ESCo potrebbe inserire, durante la stipula del contratto, una serie di norme di comportamento che il beneficiario dovrà attuare, con il fine di garantire le prestazioni.

In ultima analisi occorre menzionare il metodo con cui vengono contabilizzati i risparmi. A tal riguardo esistono dei protocolli di misura e verifica standardizzati, uno di questi è il *protocollo internazionale di misura e verifica dei risultati* (IPMVP), tale protocollo è citato nella norma UNI CEI 11352. Questo strumento permette di valutare i reali benefici energetici ed economici degli interventi effettuati e fornisce un metodo per la contabilizzazione oggettiva dei risparmi, dunque ideale quando si parla di contratto a prestazioni garantite. L'IPMVP prevede due approcci e quattro opzioni che consentono di coprire tutti i possibili casi, dando un peso differente al risparmio generato dal singolo intervento e agli effetti sinergici con altri interventi e con l'edificio e gli impianti esistenti. L'IPMVP richiede che l'accuratezza venga valutata, ma lascia ampia flessibilità alle parti di decidere qual è l'accuratezza più appropriata per ogni progetto. L'IPMVP fornisce dunque procedure che, se realizzate correttamente, consentono ai diversi attori coinvolti nei progetti di efficienza di individuare parametri e procedure per caratterizzarne i benefici e tenerli sotto controllo nel tempo.

Di seguito viene riportato un estratto di un report dell'ENEA, nel quale viene fatta una proposta di come un contratto EPC può essere collegato ad un contratto di futura manutenzione dell'impianto e fornitura dei vettori energetici da parte della stessa ESCo. (il discorso viene fatto per la pubblica amministrazione, ma è estendibile anche ad aziende o privati: << si potrebbe prevedere un contratto che subordina la futura fornitura e manutenzione a valle della realizzazione degli interventi previsti(...). Dunque, il soggetto aggiudicatario dell'EPC vedrà assicurata la fornitura e manutenzione degli

⁵ ACER Azienda Casa Emilia Romagna della Provincia di Reggio Emilia (Dott.sa Elisa Artioli, Dott. Marco Corradi, Ing. Luigi Guerra, Dott.sa Floriana Montanari, Dott.sa Sara Simonazzi, Ing. Alessandro Viglioli) e AESS Agenzia per l'energia e lo sviluppo sostenibile di Modena (Dott. Marcello Antinucci, Dott.sa Lisa Sentimenti), L'Energy Performance Contract (EPC) nel Social Housing, www.fresh-project.eu.

impianti/edifici per tutta la durata degli interventi di efficientamento. Conclusa l'opera, però, la pubblica amministrazione dovrà verificare che essa garantisca il risparmio stabilito in sede contrattuale(...) e solo allora decidere se risolvere il contratto(...) e rivolgersi ad un altro operatore, o affidare in via definitiva la fornitura e la manutenzione al soggetto che ha posto in essere gli interventi di riqualificazione>>>⁶.

In questo modo il beneficiario del contratto ha la garanzia che gli interventi siano effettuati a regola d'arte e rispettosi di quanto accordato nel contratto. La ESCo, invece, avrebbe tutto l'interesse nell'effettuare un lavoro ben fatto, al fine di assicurarsi anche la futura manutenzione e fornitura dei vettori energetici, cosa che diminuirebbe ulteriormente i costi di rientro del capitale investito. Come risultato indiretto, vi sarebbe una conseguente crescita di ESCo virtuose e competitive, le quali stimolerebbero la crescita e la competitività del mercato.

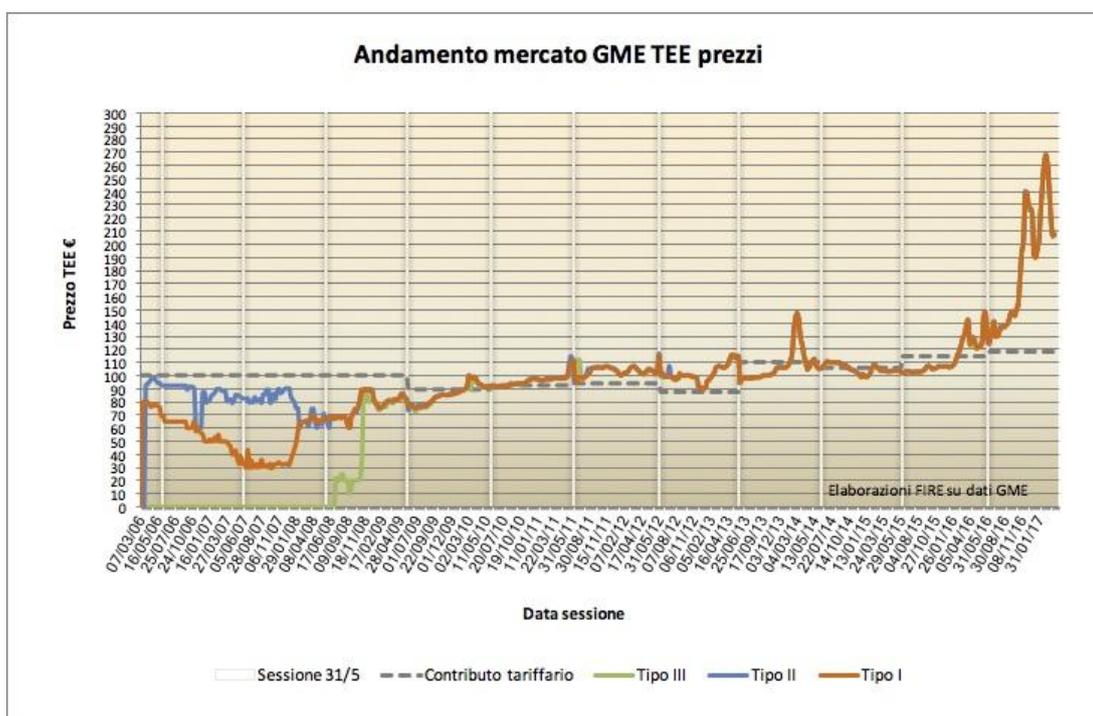
1.4 Gli incentivi legati agli interventi di efficientamento energetico

1.4.1 I certificati bianchi

I certificati bianchi, detti anche Titoli di Efficienza Energetica (TEE), sono stati introdotti nella legislazione italiana dai decreti ministeriali del 20 luglio 2004. Essi attestano il conseguimento di risparmi energetici, attraverso interventi di efficientamento energetico, che siano opere di riqualificazione o l'installazione di macchinari efficienti. Questi titoli vengono distribuiti dal Gestore del Mercato Elettrico (GME) in base al numero di tep (tonnellate equivalenti di petrolio) risparmiate, le quali devono essere certificate dall'Autorità per l'energia elettrica e il gas (AEEG). Il risparmio di 1 tep di energia primaria corrisponde al rilascio di un Certificato Bianco, il cui valore varia ogni istante, in base alle dinamiche del mercato. Nella seguente figura è mostrato l'andamento del valore, in euro, per ogni certificato. Dalla figura si può notare come l'andamento del prezzo dei TEE sul mercato del GME nel corso degli anni ha avuto un periodo di stazionarietà, seguito

⁶ F. FURIANI, M.G. LANDI, M.C. NOVELLI, Aspetti normativi del contratto EPC e dei suoi elementi di garanzia per la pubblica amministrazione, ENEA, settembre 2013, pp. 23.

da una recente impennata. Nel giro di un anno si è passati da circa 100 ad oltre 250 €/TEE, per poi scendere fino a 200 €/TEE nell'ultima sessione di maggio. Questo recente aumento è dovuto a molteplici fattori, un aspetto che molto probabilmente può aver inciso sul fenomeno è dovuto alle fasi di incertezza preliminare alla recente revisione legislativa, che potrebbero aver indotto alcuni operatori del settore a ritenere cautelativo assicurarsi una quota di mercato prima della revisione legislativa, avvenuta l'11 gennaio 2017.



1-3 Andamento del valore dei Certificati Bianchi (fonte: FIRE su dati GME)

Al 30 aprile 2017 sono stati emessi circa 44 milioni di Certificati secondo quanto indicato dal report pubblicato dal GSE, il che si può tradurre con un risparmio di circa 24 milioni di tep di risparmi addizionali di energia primaria. In particolare, nel periodo gennaio/aprile 2017, sono state concluse positivamente 1948 istruttorie, corrispondenti a circa 2,17 milioni di TEE. L'Italia è stata la prima al mondo ad applicare questo tipo di strumento per incentivare il mercato degli interventi di efficientamento energetico. Dopo l'entrata in vigore in Italia, anche Francia, Regno Unito e Polonia hanno introdotto un sistema incentivante simile al modello italiano. I Certificati Bianchi vanno dunque ad affiancare il Conto Termico e le Detrazioni

Fiscali nel panorama nazionale dei meccanismi di sostegno per l'efficienza energetica e per le energie rinnovabili. Nel prossimo sottoparagrafo verranno spiegate in dettaglio le dinamiche di mercato dei Certificati Bianchi.

IL MECCANISMO DI FUNZIONAMENTO DEI CERTIFICATI BIANCHI

Il decreto ministeriale del 20 luglio 2004 definisce per la prima volta le regole tecniche ed economiche per l'attuazione del meccanismo e ripartisce annualmente gli obiettivi nazionali tra i distributori di energia elettrica e gas naturale secondo i criteri definiti dai decreti. In sostanza i decreti stabiliscono che vengano fissati ogni anno degli obiettivi di risparmio energetico, questi risparmi devono essere ottenuti dalle aziende distributrici di energia elettrica e gas naturale che abbiano più di 50000 clienti finali. Riassumendo, i distributori di energia elettrica e gas che superano i 50000 clienti finali, sono soggetti obbligati al raggiungimento di un risparmio di determinati tep ogni anno. Gli obiettivi sono determinati a livello nazionale e dunque ripartiti in modo percentuale tra i soggetti obbligati. Vi sono altri soggetti che possono richiedere il rilascio dei Certificati, i quali, però, non devono sottostare a nessun obbligo quantitativo annuale, tali soggetti sono denominati volontari. Fino all'ultima revisione legislativa (11 gennaio 2017), gli unici soggetti volontari che potevano partecipare a questo meccanismo erano le ESCo certificate UNI CEI 11352, con l'ultima revisione la possibilità è stata estesa ai seguenti soggetti:

- Aziende distributrici non soggette all'obbligo (< 50000 utenze servite);
- Soggetti, sia pubblici che privati, che hanno nominato un Esperto in Gestione dell'Energia (EGE) certificato UNI CEI 11339;
- Soggetti, sia pubblici che privati, in possesso di un sistema di gestione dell'energia certificato secondo la norma ISO 50001;

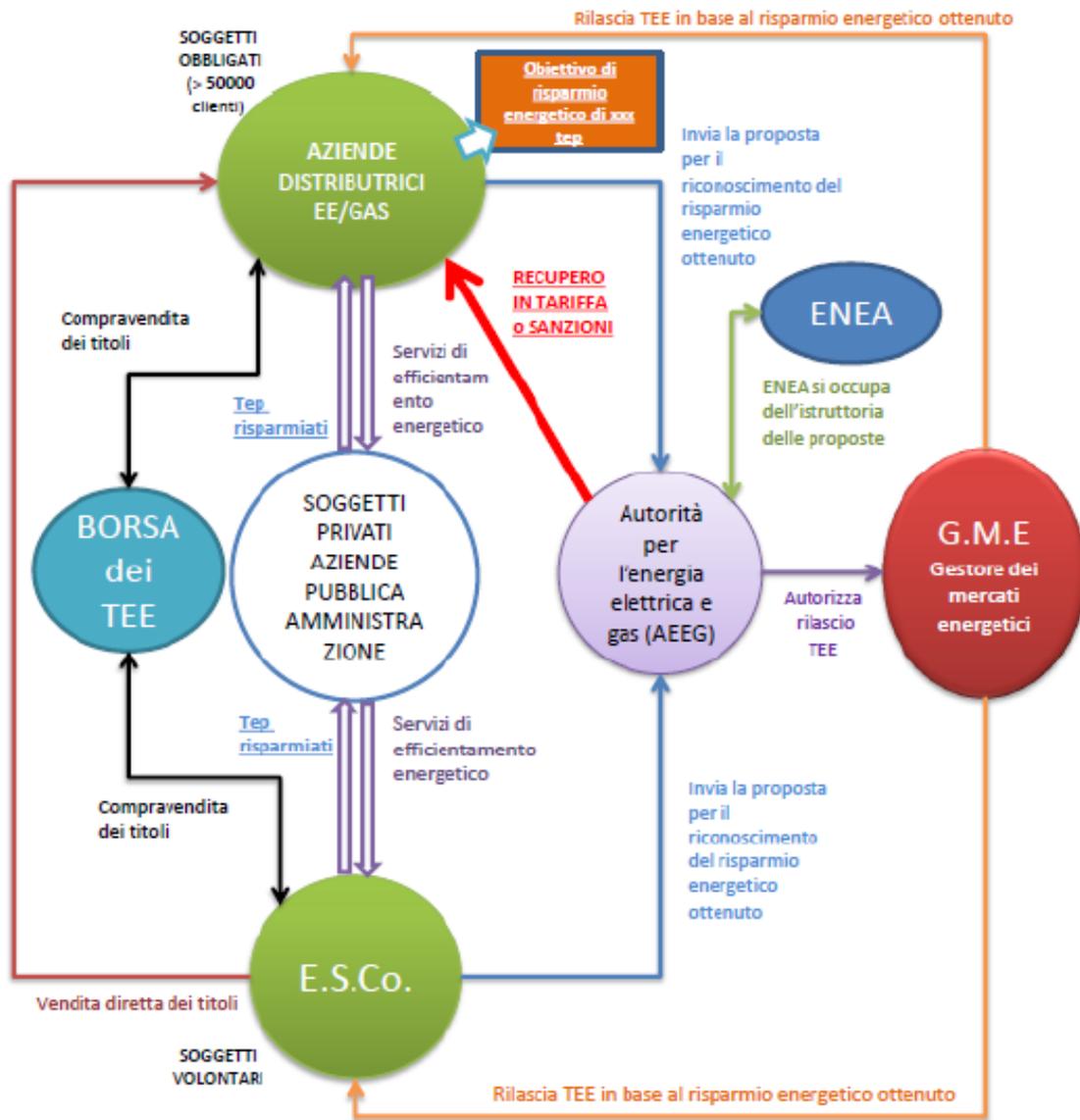
Soggetti obbligati e volontari si interfacciano con l'universo dei consumatori finali di energia, individuano ed attuano misure di miglioramento dell'efficienza, ottenendo in ritorno i corrispondenti risparmi energetici, per il riconoscimento dei quali inviano una proposta all'AEEG. L'ENEA effettua l'istruttoria sulle proposte. Se l'esito è positivo, il GME riconosce i titoli di efficienza energetica ai soggetti

proponenti. Se il soggetto obbligato ha ottenuto per tale via TEE, può iniziare a soddisfare il proprio obiettivo assegnato. Altri titoli possono essere reperiti sulla borsa gestita dal GME, su cui i soggetti volontari hanno venduto i propri titoli. Altri titoli possono essere ottenuti dai soggetti obbligati tramite contrattazione bilaterale coi soggetti volontari in possesso di TEE. Se l'obiettivo annuale non è raggiunto, il soggetto obbligato viene sanzionato. Se l'obiettivo è raggiunto, viene concesso il recupero in tariffa per l'ammontare di titoli costituente l'obbligo.

A grandi linee, l'articolazione dell'intero sistema prevede i seguenti capisaldi:

- *L'Autorità per l'energia elettrica e il gas (AEGG)* è l'ente preposto alla implementazione dell'intero sistema;
- Il miglioramento dell'efficienza energetica è realizzato presso gli utenti finali;
- Sono stabiliti obiettivi nazionali di incremento dell'efficienza energetica;
- I grandi distributori di gas ed elettricità (con più di 50000 clienti) sono soggetti obbligati al raggiungimento dei predetti obiettivi;
- Il miglioramento dell'efficienza energetica viene certificato tramite l'emanazione da parte del GME di Titoli di Efficienza Energetica;
- Ogni TEE corrisponde ad 1 tep di energia risparmiata a seguito di interventi di efficientamento realizzati dai soggetti obbligati o da soggetti volontari che possono partecipare al meccanismo;
- Le proposte per l'ottenimento dei titoli sono sottoposte ad un' istruttoria tecnico-amministrativa condotta da ENEA;

Nella seguente figura è mostrato in modo schematico il meccanismo per l'ottenimento dei Certificati Bianchi.



1-4 Meccanismo per l'ottenimento dei Certificati Bianchi

1.4.2 Le detrazioni fiscali : l' Ecobonus

L'Ecobonus è una agevolazione fiscale prevista per i contribuenti che sostengono spese per interventi di riqualificazione energetica nella propria casa, sugli edifici condominiali o su uffici, negozi e capannoni. In altre parole, si tratta di un aiuto fiscale per compensare tutte quelle spese sostenute per ridurre il fabbisogno energetico di un immobile. Tale agevolazione, consiste in una detrazione Irpef se la

spesa è effettuata dal contribuente privato o dall'Ires se si tratta di impresa o società. Possono usufruire della detrazione tutti i contribuenti residenti e non residenti, anche se titolari di reddito di impresa, che possiedono, a qualsiasi titolo, l'immobile oggetto di intervento. Nel dettaglio, gli interventi per cui è prevista l'agevolazione rientrano in una di queste categorie:

- Interventi di riqualificazione energetica a patto che si realizzi una diminuzione del fabbisogno energetico annuo rispetto ai valori indicati nell'allegato A del D.M. 11/03/2008 per gli interventi iniziati nel 2008 e anni successivi;
- Interventi su edifici esistenti concernenti coperture e pavimenti, finestre ed infissi, a patto che si realizzi una diminuzione o pari valori indicati dall'allegato B dello stesso D.M.;
- Sostituzione di infissi e schermature;
- Installazione di pannelli solari;
- Sostituzione impianti di climatizzazione invernale con impianti dotati di caldaia, quindi anche per l'acquisto di pompe di calore ad alta efficienza e impianti a basso assorbimento di energia, e sostituzione dei vecchi scaldabagni con scaldacqua a pompa di calore.

Per effetto della nuova legge di bilancio 2018 la detrazione per le spese di sostituzione di infissi e schermature e per l'installazione di caldaie a condensazione e a biomasse passa dal 65% al 50%. Per gli altri interventi di riqualificazione il bonus rimane invariato al 65%. Ogni tipo di intervento presenta un tetto massimo di spesa detraibile: ad esempio per gli interventi di riqualificazione energetica di edifici esistenti il tetto è fissato a 100 mila euro, mentre per l'installazione di pannelli solari è fissato a 60 mila euro.

Per gli interventi su singole unità immobiliari, l'Ecobonus verrà ampliato grazie alla possibilità di cessione del credito (portabilità dell'Ecobonus).

1.4.3 *Il Conto Termico*

Il Conto Termico 2018 GSE è un pacchetto di incentivi e agevolazioni istituiti con il decreto ministeriale del 28 dicembre 2012, al fine di promuovere interventi per il

miglioramento dell'efficienza energetica degli edifici già esistenti ed incentivare la produzione di energia da fonti rinnovabili. I fondi per tali agevolazioni sono gestiti dal GSE che gestisce inoltre le domande e le spese ammissibili, i soggetti beneficiari e le modalità per richiedere i benefici dell'agevolazione. I soggetti beneficiari (amministrazioni pubbliche o privati), possono accedere agli incentivi Conto Termico 2018, previsti dal DM 28/12/12 per le seguenti tipologie di spese ed interventi:

- Interventi di incremento dell'efficienza energetica, per cui ad esempio: l'isolamento termico delle superfici opache, sostituzione chiusure trasparenti, sostituzione impianti di climatizzazione invernale con generatori di calore a condensazione, installazione sistemi di schermatura e/o ombreggiamento di chiusure trasparenti;

Solo le pubbliche amministrazioni possono accedere ai benefici del conto termico per questi interventi di incremento dell'efficienza energetica. Alle pubbliche amministrazioni, spetta un contributo pari al 40% della spesa ammissibile sostenuta in base alla tabella 1 incentivi. Ad ogni tipologia di intervento sono associati costi massimi ammissibili unitari ed un valore massimo dell'incentivo erogabile.

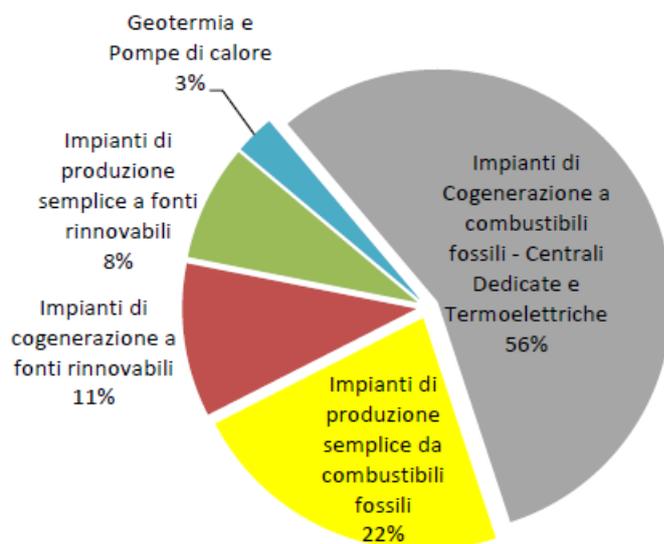
- Interventi piccoli per impianti per la produzione di energia termica da fonti rinnovabili, come ad esempio: sostituzione scaldacqua elettrici con analoghi a pompa di calore, installazione collettori solari termici, sostituzione di impianti di climatizzazione invernale classici con impianti dotati di pompe di calore, elettriche o a gas, utilizzando energia aerotermica, geotermica o idrotermica;

Capitolo 2

INTRODUZIONE AL TELERISCALDAMENTO

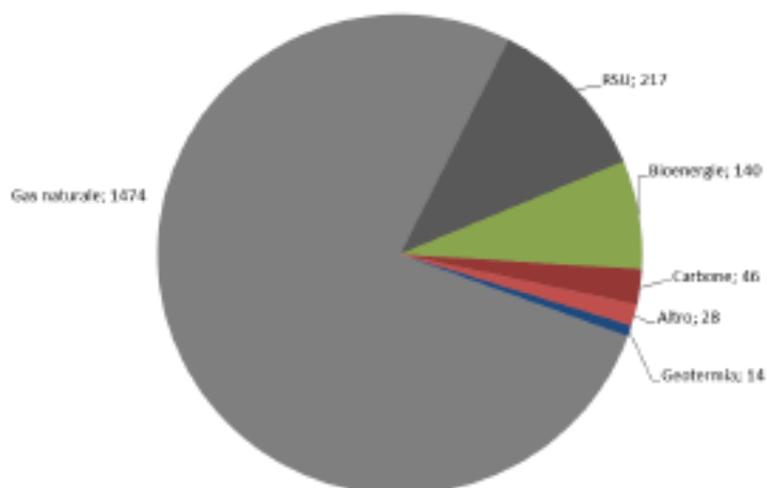
Con il termine teleriscaldamento si intende la distribuzione, attraverso una serie di tubazioni interrate e isolate, di un fluido termovettore, il quale può essere acqua calda, acqua surriscaldata o vapore, con il fine di fornire calore per il riscaldamento e per l'acqua calda sanitaria agli utenti finali. Generalmente il calore viene prodotto in un unico sito, (centrale principale) ma, nel caso di reti molto estese, il calore può provenire da più siti ed essere prodotto in modi diversi. Il calore è solitamente prodotto in una centrale di cogenerazione termoelettrica a gas naturale, a combustibili fossili o a biomasse, oppure utilizzando il calore proveniente dalla termovalorizzazione dei rifiuti solidi urbani. In alcuni paesi (tra cui Russia, Ucraina, Svezia e Svizzera) si utilizza anche la cogenerazione da centrale nucleare. Nel caso di reti di piccole dimensioni, o nel caso in cui non vi siano centrali termoelettriche, solitamente il calore viene prodotto da caldaie a biomassa o gas naturale. Oltre alle biomasse, le altre fonti di energia rinnovabile utilizzate per il teleriscaldamento sono la geotermia e il solare termico. Va menzionata infine un'ultima fonte di energia praticamente "a costo zero", ovvero il calore di scarto da processi industriali, la quale rappresenterebbe un'ottima soluzione se combinata ad un sistema efficiente di trasporto del calore dal sito di produzione a quello di distribuzione. In Italia, circa il 78% dell'energia termica immessa in rete è prodotta con tecnologie a basso impatto ambientale⁷. Nel seguente grafico sono mostrate le diverse tecnologie per la produzione dell'energia termica per il teleriscaldamento in Italia.

⁷ F. BUSCAROLI, Teleriscaldamento e fonti rinnovabili: l'esperienza di Ferrara, 2012



2-1 Energia termica prodotta per tecnologia di produzione (fonte: GSE)

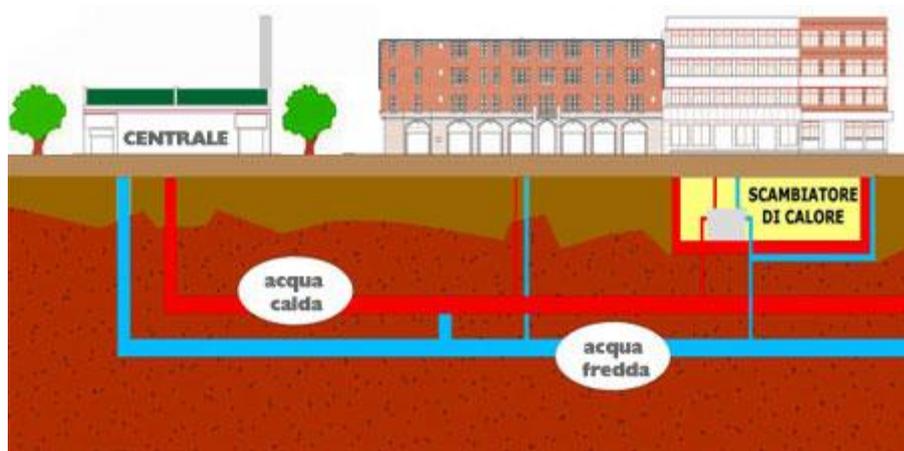
Al 2013, l'energia termica prodotta dagli impianti che alimentano le reti TLR in Italia nel 2013 ammonta a circa 11270 GWh⁸, di cui il 79% proviene da fonti fossili e il restante 21% da fonti di energia rinnovabile⁸. Nel seguente grafico sono mostrate le quantità di energia primaria (in ktep) utilizzate per il teleriscaldamento in Italia.



2-2 fonti energetiche utilizzate per il teleriscaldamento in Italia (fonte: GSE)

⁸ GESTORE DEI SERVIZI ENERGETICI, Valutazione del potenziale nazionale di applicazione della cogenerazione ad alto rendimento e del teleriscaldamento efficiente, dicembre 2015, pp. 76

2.1 Schema del funzionamento di una rete di teleriscaldamento

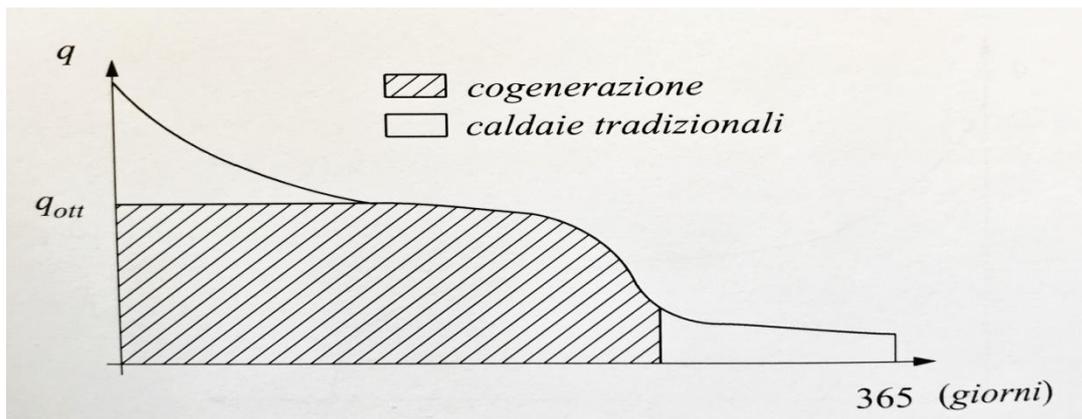


2-3 Schema di funzionamento di una rete di teleriscaldamento

Nella figura sopra riportata è rappresentata schematicamente una rete di teleriscaldamento, essa si compone di 3 parti principali:

- La centrale di generazione del calore;
- La rete di distribuzione;
- Le sottostazioni delle utenze;

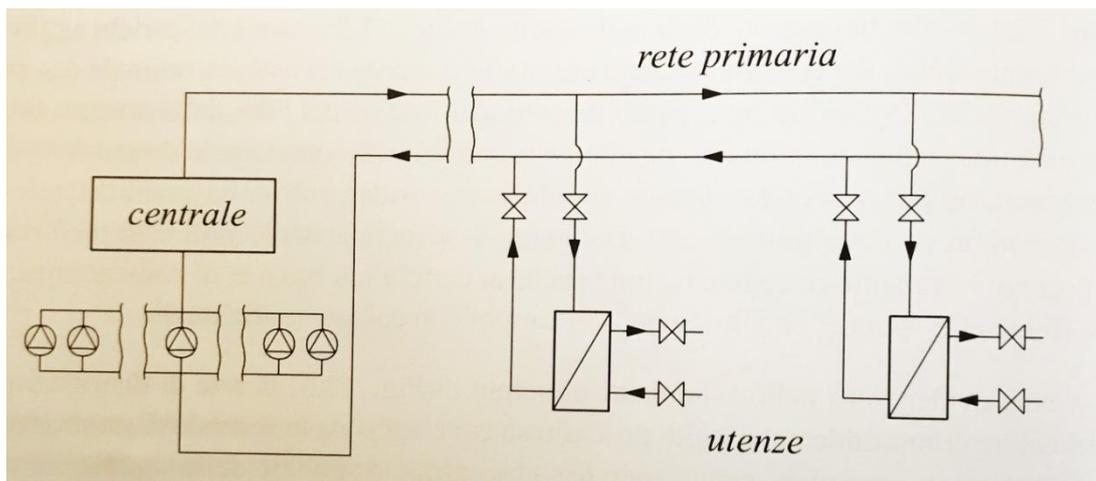
Come già anticipato, la centrale di generazione del calore può essere di tipi differenti e non essere l'unica per una sola rete. In generale i cogeneratori sono più costosi delle caldaie tradizionali e, quindi, devono poter funzionare a carichi elevati per la maggior parte dell'anno. Ciò si ottiene scegliendo attentamente la potenza termica dei cogeneratori sulla base del diagramma dei carichi, di cui vi è riportato un esempio nella seguente figura.



2-4 Potenza richiesta da un impianto di teleriscaldamento e scelta della potenza ottimale di cogenerazione

Il diagramma dei carichi sopra riportato si estende ai 365 giorni annuali, in quanto riferito ad una rete che fornisce anche acqua calda sanitaria e, dunque, operante tutto l'anno. Se la rete fornisse acqua calda solo per il riscaldamento, il diagramma sarebbe limitato ai soli giorni in cui esso è attivo. La potenza termica ottimale q_{ott} per un impianto di cogenerazione è generalmente dell'ordine del 50% della valore massimo di picco richiesto dalla rete, in quanto tale potenza permette di coprire il fabbisogno di circa il 90% dell'energia termica richiesta durante l'anno (area tratteggiata), consentendo di mantenere contenuta la taglia dell'impianto. Il resto del fabbisogno viene coperto da caldaie di integrazione, o tramite sistemi di accumulo del calore prodotto dalla stessa centrale, nel caso vi siano esuberanti di produzione rispetto alla domanda. Normalmente però, dal punto di vista operativo, si preferisce spegnere l'impianto di cogenerazione ai carichi bassi e, di conseguenza, si fa pronte alle "punte" e alle "code" dei carichi con le caldaie di integrazione.

Come mostrato dallo schema funzionale nella figura 2-5, la rete di distribuzione del calore comprende un circuito primario su cui è attestata la centrale di produzione, e tanti circuiti secondari quante sono le sottocentrali al servizio delle singole utenze. Di rilevante importanza è la stazione di pompaggio, la quale deve garantire il continuo ricircolo dell'acqua, a fronte delle perdite di carico. Una rete di teleriscaldamento può essere dunque paragonata all'apparato circolatorio del corpo umano, in cui le arterie rappresentano le tubazioni di mandata e le vene quelle di ritorno, esse sono accoppiate e le portate scorrono in versi opposti.



2-5 Schema di principio di una rete di teleriscaldamento

Tipicamente le tubazioni sono costituite da un tubo interno in acciaio, uno spesso strato di isolante e una guaina protettiva esterna; tali tubazioni vengono interrato al di sotto del livello stradale, oppure collocate all'interno di canali artificiali, sopra o sotto al terreno. Il costo delle tubazioni e la loro posa in opera rappresenta la maggior parte dell'investimento di un impianto di teleriscaldamento. Le tubazioni con diametro più grande rappresentano la "dorsale" (di mandata e di ritorno) e da essa si diramano condotte di diametro minore, le quali, conducono il fluido termovettore alle sottostazioni delle utenze. Ogni rete presenta inoltre, lungo il suo percorso, una serie di valvole i cui scopi sono differenti:

- Valvole di sezionamento, il cui scopo è quello di isolare i tratti di tubazione, sia quelli principali che quelli secondari, in caso di malfunzionamenti o perdite. Tali valvole sono presenti sia sulla mandata che sul ritorno e generalmente sono del tipo a sfera.
- Valvole di sfiato/drenaggio, posizionate nei tratti alti o bassi della rete. Consentono le operazioni di sfiato e drenaggio, sono delle valvole a sfera coibentate e azionabili solo manualmente.

In generale, possiamo trovare due tipi di configurazione di rete: diretta e indiretta.

- La configurazione diretta consiste in un unico circuito idraulico che parte dalla centrale di produzione del calore e arriva fino al terminale di

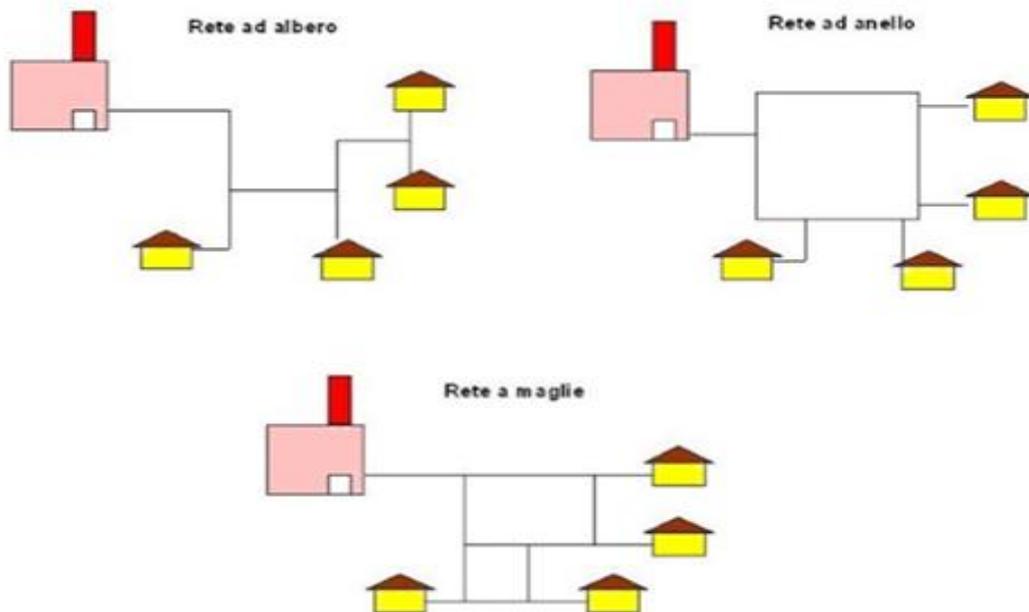
riscaldamento dell'utenza (assenza delle sottostazioni). Questo tipo di configurazione risulta semplice ed economico ma comporta diversi problemi per quanto riguarda la gestione e le perdite di carico.

- La configurazione indiretta, largamente utilizzata in Italia, è costituita da due circuiti, uno principale, costituito dalle dorsali e dalle relative ramificazioni, e da diversi circuiti secondari, il cui numero è pari a quello delle utenze. Circuito primario e secondario sono separati da una sottostazione, in cui è presente uno scambiatore di calore. In questo caso i costi di realizzazione e le perdite sono maggiori ma regolazione, manutenzione e localizzazione delle perdite sono più semplici rispetto alla configurazione diretta. La contabilizzazione del calore inoltre avviene in modo più efficiente.

Per quanto riguarda il circuito principale, in base alla sua forma, possiamo distinguere tre tipi di reti: ramificata, ad anello o a maglie.

- La rete ramificata, detta anche ad albero, è la più semplice da realizzare, ed è costituita da una tubazione principale dalla quale si staccano numerose tubazioni secondarie, a mano a mano di diametro minore. Presenta l'inconveniente che, se si verifica un guasto in un punto, da quel punto in poi la rete non viene alimentata.
- La rete ad anello è costituita da un'unica dorsale, che funziona sia da mandata che da ritorno. Tale sistema è utilizzabile in entrambi i versi. È un sistema razionale ed efficiente, si presta anche meglio a possibili ampliamenti ma non sempre risulta la configurazione migliore.
- La rete a maglie è costituita da più circuiti ad anello, collegati tra di loro. Con tale configurazione è possibile isolare solo piccole porzioni di rete in caso di guasto, continuando a fornire calore nelle altre parti, anche la regolazione e la manutenzione sono più efficienti. Le reti a maglie presentano inoltre minori cadute di pressione, permettendo quindi di semplificare la gestione in caso di elevata richiesta termica e di ridurre i costi di pompaggio. I costi di installazione sono nettamente più alti rispetto agli altri tipi di rete e giustificati solo in caso di alte densità abitative.

Nella figura seguente sono schematizzati i tre tipi di configurazione della rete.



2-6 Configurazioni delle reti di teleriscaldamento

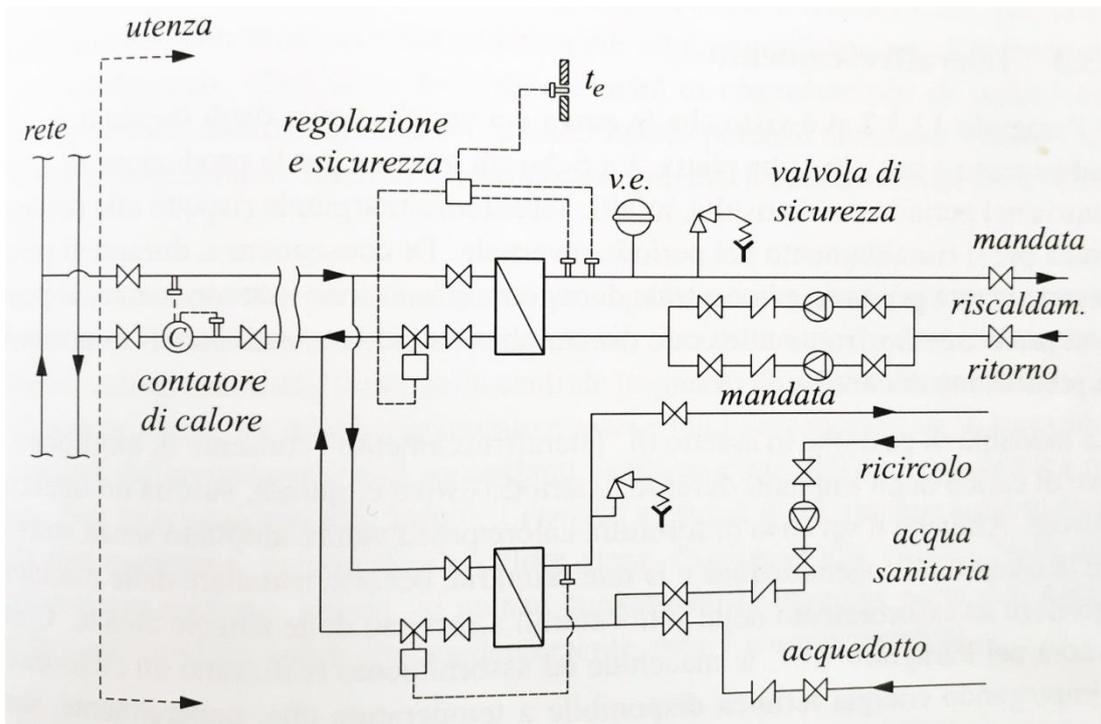
Le quantità di calore trasportate per unità di massa di fluido vettore sono date dalle differenze di entalpia ($h_m - h_r$) tra la mandata e il ritorno del fluido. Di conseguenza, le portate massiche di fluido termovettore in centrale sono calcolabili in base alla relazione

$$\dot{m} = \frac{q}{(h_m - h_r)} \quad (2.1)$$

Dove q è la potenza termica richiesta. Se si utilizzasse vapore come fluido termovettore, il salto entalpico sarebbe maggiore e dunque avremmo minori portate, mentre con l'acqua a media temperatura si hanno differenze di entalpia minori e quindi portate maggiori.

Le sottocentrali installate presso le singole utenze sono del tipo schematizzato nella figura 2-7. Tali sottostazioni allacciate alla rete primaria, da un punto di vista funzionale, sostituiscono le centrali termiche tradizionali, in cui la caldaia a gas tradizionale viene soppiantata da uno scambiatore di calore. Nel caso l'utenza venga fornita anche di acqua calda sanitaria, gli scambiatori di calore dovranno essere due e separati, ognuno corredato dai dispositivi di regolazione e sicurezza previsti dalla normativa. I costi della fornitura di calore vengono addebitati in funzione delle

indicazioni del misuratore di energia termica (contatore di calore), che valuta in continuo il flusso termico q , a partire dalle misure di portata massica e di temperatura tra mandata e ritorno dell'acqua. I sistemi di contabilizzazione si distinguono tra quelli a misura diretta in cui vengono misurate le portate e le differenze di temperatura, e indiretta dove viene misurata la temperatura dei radiatori. Altri componenti importanti previsti nella sottostazione sono: la valvola di regolazione, la valvola di sicurezza, e il regolatore elettronico della temperatura di mandata.



2-7 Schema funzionale di una sottocentrale allacciata alla rete di teleriscaldamento

2.2 Teleraffrescamento e reti a bassa temperatura

Nel seguente paragrafo si vogliono introdurre due applicazioni innovative che, nonostante siano ancora poco sviluppate, possono migliorare e incrementare il mercato della produzione centralizzata di calore.

2.2.1 Il Teleraffrescamento

Il teleraffrescamento è il settore del mercato dell'energia centralizzata con maggiore sviluppo a livello mondiale. Consiste nella distribuzione di un fluido termovettore a bassa temperatura (con un range di 6-12 °C) in modo analogo a quanto avviene per il teleriscaldamento. Questa tecnologia sfrutta il calore proveniente dai cogeneratori, da pompe di calore o da calore di scarto industriale, per produrre del “freddo” , tramite dei cicli frigoriferi ad assorbimento. Questa tecnologia è l'alternativa efficiente e rinnovabile all'uso dei condizionatori elettrici, questi ultimi infatti utilizzano l'energia elettrica, forma di energia pregiata, la quale viene degradata, comportando una spesa ambientale molto alta. Il teleraffrescamento così inteso, presenta dei problemi tecnici ed economici: è necessario infatti prevedere la posa di una nuova rete, adatta al trasporto del fluido freddo o, in alternativa adattare la rete del teleriscaldamento esistente ad una configurazione per il trasporto del fluido caldo nella stagione invernale e freddo nella stagione estiva. Per ovviare a questa problematica, spesso si decide di installare il gruppo frigorifero ad assorbimento presso l'utente finale, in modo tale da distribuire il fluido caldo anche d'estate, per essere poi convertito in freddo presso l'utenza.

2.2.2 Reti a bassa temperatura

Le reti a bassa temperatura sono a tutti gli effetti equiparabili alle reti di teleriscaldamento tradizionali, con l'unica differenza rappresentata dal trasporto del fluido termovettore a temperature decisamente inferiori rispetto al teleriscaldamento tradizionale (40-50 °C). In questo modo è possibile utilizzare calore di scarto da processi industriali anche a temperatura moderata e fonti rinnovabili in modo molto più efficiente. La convenienza è anche economica, in quanto si avrebbero costi decisamente più bassi, sia per quanto riguarda l'approvvigionamento del calore che nella posa di tubature, meno sofisticate e dunque meno costose. Questa soluzione è possibile nel caso di impianti di riscaldamento a bassa temperatura, oppure, nel caso di edifici esistenti con impianto ad alta temperatura qualora si intervenisse sull'isolamento termico della struttura. In tal modo i terminali esistenti risulterebbero

sovradimensionati (si riducono le dispersioni) e dunque sarebbe possibile abbassare le temperature di funzionamento del secondario.

Nel caso di reti di teleriscaldamento convenzionali, il collegamento di impianti di riscaldamento a bassa temperatura può essere effettuato:

- In modo consueto, sulla rete di mandata. In tal caso è possibile sfruttare un salto entalpico maggiore, quindi si riduce la portata sul lato primario rispetto a un impianto ad alta temperatura. Inoltre si riduce la temperatura di ritorno sul lato primario, consentendo in generale una migliore efficienza della generazione di calore in centrale;
- Sulla rete di ritorno. Questa soluzione è di particolare interesse nel caso di parti della rete di teleriscaldamento già sature, cioè nelle quali non è possibile allacciare ulteriori utenze perché si causerebbe un incremento della portata circolante oltre il limite. Questa installazione non comporta invece alcun incremento di portata⁹.

2.2.2.1 *Confronto exergetico tra reti ad alta temperatura e a bassa temperatura*

Al fine di confrontare le reti a bassa temperatura con quelle ad alta temperatura, occorre effettuare un'analisi exergetica.

Il primo principio della termodinamica ci dice che, tutte le forme d'energia sono equivalenti, tale equivalenza però è solo metrologica e si riflette nel fatto che energia, calore e lavoro si misurano con la stessa unità, il joule. Il secondo principio, invece, stabilisce un vincolo sulle trasformazioni termodinamiche, dal quale risulta che non tutti i processi di conversione dell'energia sono realizzabili. L'exergia, (detta anche energia utilizzabile) combina insieme il primo e il secondo principio della termodinamica e, in questo modo, assegna un fattore di ponderazione alle varie forme di energia, in virtù della loro capacità di rendere realizzabili alcuni processi termodinamici. Detto in altri termini, l'exergia fornisce una valutazione della qualità delle varie forme di energia.

⁹ V.VERDA, Complementi di energetica, slide a.a. 2015-2016, pp 79

Di seguito viene riportata l'equazione, nella sua forma estesa, dell'energia utilizzabile

$$\sum_{j=1}^N \phi_k \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) - W_t = \left(\frac{\delta(U^t + p_0 V + T_0 S)}{\delta T}\right)_{VC} + \sum_{k=1}^{NC} \dot{m}_k (h^t - T_0 s)_{VC} + T_0 \Sigma_i \quad (2.2)$$

In cui il pedice 0 sta ad indicare le condizioni della biosfera (in questo caso, $T=20^\circ\text{C}$ $p=1 \text{ atm}$), e l'apice t sta ad indicare "totale", dove:

$$U^t = U + E_c + E_p \quad (2.3)$$

$$h^t = h + e_c + e_p \quad (2.4)$$

Occorre adesso introdurre un indicatore energetico, chiamato: efficienza di secondo principio o efficienza energetica. L'efficienza exergetica fornisce una valutazione oggettiva delle prestazioni di un sistema energetico dal punto di vista termodinamico. Tra le varie definizioni proposte, quella più comunemente impiegata è il rapporto tra il prodotto utile e la risorsa utilizzata:

$$\eta_{II} = \frac{\text{exergia ottenuta}}{\text{exergia fornita}} \quad (2.5)$$

Il suo valore è compreso tra 0 e 1 e indica se la risorsa è utilizzata in modo efficiente o meno. L'informazione fornita può dunque essere impiegata nel caso di comparazione tra processi produttivi alternativi.

A tal proposito si vogliono ora analizzare le efficienze di secondo principio per due sistemi di produzione dell'acqua calda ai fini del teleriscaldamento:

SISTEMA 1 (impianto a biomassa)

- Temperatura sorgente calore: 1000°C
- Temperatura mandata: 85°C
- Temperatura ritorno: 65°C

SISTEMA 2 (impianto con calore di recupero industriale/solare termico)

- Temperatura sorgente calore: 100°C
- Temperatura mandata: 55°C
- Temperatura ritorno: 35°C

Gli altri valori sono uguali per entrambi i sistemi, in quanto occorre effettuare una comparazione a parità di potenza.

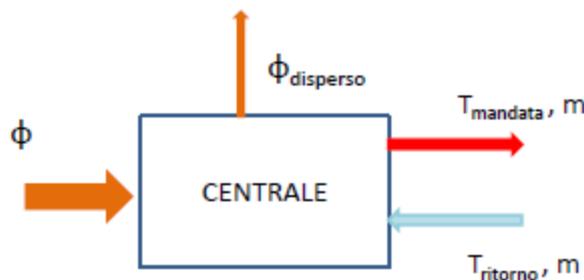
- Potenza impianto: 10 MW ($\eta = 0,80$)
- Differenza di temperatura tra mandata e ritorno: 20 °C

Si vuole precisare che il sistema 1 e il sistema 2 rappresentano degli esempi rispettivamente per impianti ad alta e bassa temperatura ma l'esempio è estendibile a qualunque altro sistema equivalente. Nelle ipotesi inoltre non è stato tenuto conto della modalità di produzione del calore ma solamente la temperatura a cui la sorgente calda è disponibile, questo per mettere in evidenza i vantaggi nell'operare a bassa temperatura.

La portata di fluido termovettore, anch'essa costante, si ricava facilmente dalla relazione:

$$\dot{m} = \frac{\eta * \phi}{c_p * \Delta T} = \frac{0,80 * 10000}{4,186 * 20} = 95,56 \frac{kg}{s} \quad (2.6)$$

Lo schema utilizzato per l'analisi è riportato in figura 2-8:



2-8 Schema del volume di controllo del sistema analizzato

Dallo schema si può impostare l'equazione di bilancio energetico in condizioni stazionarie e considerando che il sistema riceve un flusso termico a temperatura costante, senza scambiare il lavoro con l'esterno. L'equazione di bilancio energetico risulta quindi:

$$T_0 \Sigma_i = W_{perso} = \Phi \left(1 - \frac{T_0}{T_{sorgente}} \right) - \dot{m}_{acqua} (b_{mand} - b_{rit}) \quad (2.7)$$

b rappresenta l'exergia fisica ed è data da:

$$b = h - h_0 - T_0 (s - s_0) = c_p (T_{mand} - T_{rit}) - T_0 * c_p * \ln \frac{T_{mand}}{T_{rit}} \quad (2.8)$$

SISTEMA 1

$$\begin{aligned} W_{perso} &= 10000 \left(1 - \frac{20 + 273}{1000 + 273} \right) - 95,56 \left((4,186 * 20) - (273 * 4,186 * \ln \frac{(273 + 85)}{(273 + 65)}) \right) \\ &= 7698,35 - 1258,77 = 6439,37 \text{ kW} \end{aligned}$$

Questo valore rappresenta il lavoro perso e dunque le irreversibilità generate durante il processo. Il rendimento di secondo principio vale

$$\eta_{II} = \frac{\text{exergia ottenuta}}{\text{exergia fornita}} = \frac{\dot{m}_{acqua} (b_{mand} - b_{rit})}{\Phi \left(1 - \frac{T_0}{T_{sorgente}} \right)} = 0,164$$

SISTEMA 2

Per il sistema 2 valgono le stesse equazioni del sistema 1 in cui variano le temperature di sorgente, mandata e ritorno.

$$W_{perso} = 2144,77 \quad \eta_{II} = 0,292$$

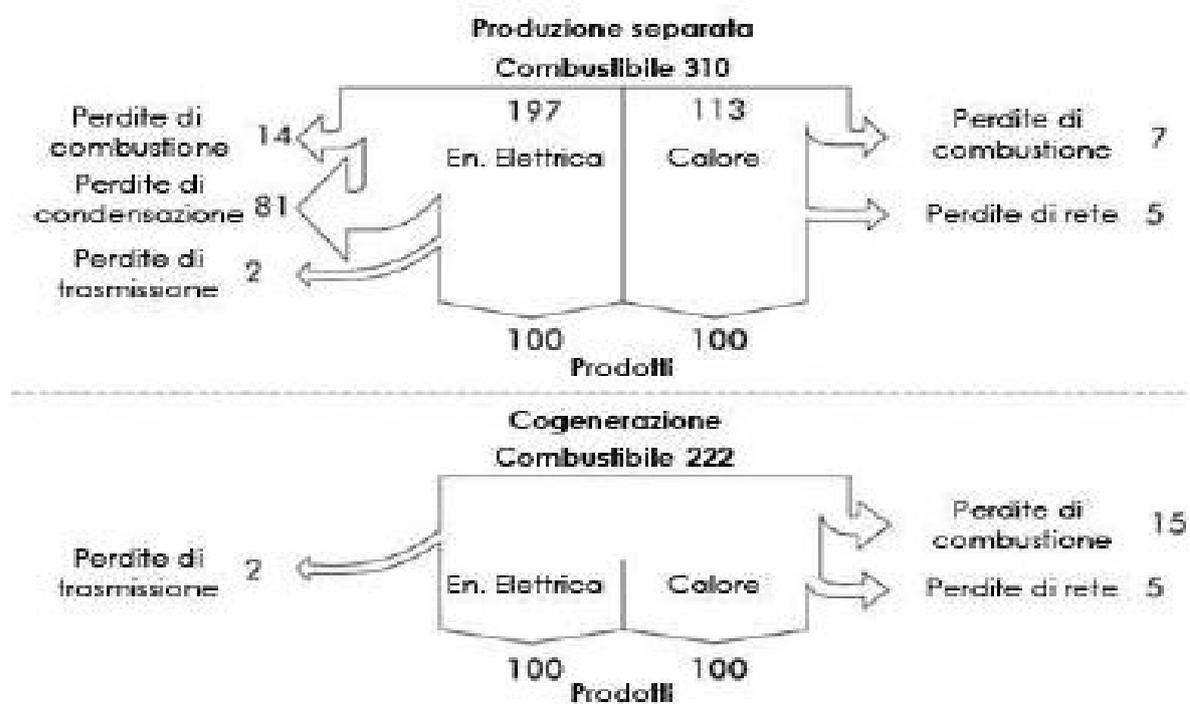
Come si può notare, il lavoro perso è diminuito notevolmente e l'efficienza di secondo principio è quasi raddoppiata. Questo sta ad indicare che la risorsa utilizzata per scaldare l'acqua è utilizzata in modo molto più efficiente rispetto al primo caso. Nel caso della cogenerazione, avremmo dei rendimenti molto più alti perché nella voce "exergia ottenuta" si andrebbe a sommare la potenza elettrica prodotta. In ogni

caso questa analisi ci dice come convenga operare a basse temperature e, in generale, sia importante mantenere bassa la differenza di temperatura tra sorgente e prodotto.

2.3 Vantaggi e svantaggi del teleriscaldamento

2.3.1 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 2-9 (diag. Sankey) 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 della produzione di energia e lo riutilizza ai fini di teleriscaldamento o per necessità industriali.



2-9 Comparazione di un sistema cogenerativo rispetto alla produzione separata

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. Il teleriscaldamento presenta dunque un importante vantaggio ambientale rispetto a sistemi localizzati in quanto può utilizzare calore di scarto o calore ricavato dalla combustione di rifiuti.

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 di 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. 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 dimensione sono in aumento, ma in generale sussiste ancora troppa differenza tra il rendimento medio delle caldaie installate e gli impianti di teleriscaldamento. I 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 piccole.

Il teleriscaldamento e la cogenerazione riducono le emissioni sia 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 praticato 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 localizzata dall'utenza.

Uno studio affiliato all'IEA (International Energy Agency) relativo al teleriscaldamento e cogenerazione ha dimostrato come l'utilizzo di tecnologie di teleriscaldamento e cogenerazione riducono le emissioni totali di CO₂ da combustione del 3-4% a livello globale rispetto ad un ipotetico mondo senza queste due tecnologie.

2.3.2 I vantaggi per l'utente

Il teleriscaldamento si presenta come una tecnologia semplice, sicura ed economica. Il primo sostanziale vantaggio per l'utente è la sostituzione del classico locale caldaia, e le apparecchiature annesse (canne fumarie, scarichi di sicurezza, cisterne, ecc.) con un sistema di scambiatori di calore, tubazioni e valvole. Tale configurazione può presentarsi più complessa rispetto all'impianto a caldaia classico, i vantaggi che ne derivano sono però numerosi. Sotto l'aspetto della sicurezza, vengono totalmente eliminati i rischi di esplosioni e di intossicazione da fumi, ciò dovuto dall'assenza della caldaia. Questo aspetto è molto importante in quanto, nonostante esistano prescrizioni di legge sulle verifiche di sicurezza ed efficienza energetica delle caldaie, non sempre vengono rispettate e i controlli sono molto difficoltosi; tramite l'allacciamento al teleriscaldamento, tali adempimenti verrebbero meno. La manutenzione, sostituzione e riparazione impianti non è più a carico dell'utente finale ma tutte le responsabilità ricadono sul distributore di energia termica. L'utente paga solo il calore già pronto all'uso, e lo paga a consumo effettuato, ad una tariffa normalmente inferiore a quella del calore prodotto tramite combustione in una caldaia individuale alimentata a gas naturale. Tutti i moderni impianti di teleriscaldamento prevedono sistemi di contabilizzazione per ogni singolo alloggio, affiancati a sistemi di controllo dei tempi di funzionamento e delle temperature.

Di seguito è riportato un riassunto con i principali vantaggi per l'utente che comporta l'allacciamento al teleriscaldamento:

- Minori costi di gestione e manutenzione;
- Contabilizzata solo l'energia effettivamente consumata;
- Aliquota IVA al 10% (contro il 20% degli oli combustibili);

- Temperatura riscaldamento e acqua sanitaria gestita dal cliente;
- Nessun costo sostituzione caldaia e bruciatore;
- Abbattimento dei costi di manutenzione, controllo periodico caldaia e verifica dei fumi;
- Eliminazione del rischio di esplosioni e di intossicazione;
- Possibile riconversione degli spazi dedicati alle canne fumarie;
- Servizio calore con il teleriscaldamento è attivo tutto l'anno (non sempre accade) a differenza dei tradizionali impianti

2.3.3 *Gli svantaggi*

Gli svantaggi del teleriscaldamento non coinvolgono la specifica utenza ma, in base a dove è ubicata la centrale di produzione del calore, le comunità cittadine adiacenti possono soffrire sia di inquinamento atmosferico che acustico. In generale infatti i grossi impianti a cogenerazione sono più rumorosi delle caldaie tradizionali, inoltre la dispersione degli inquinanti, sebbene minore rispetto all'assenza del teleriscaldamento, è concentrata in un'area meno estesa e dunque le ricadute sull'ambiente e sulla salute di quell'area sono peggiori.

L'azienda distributrice di calore stessa deve fare fronte a delle problematiche, soprattutto di natura economica. In primo luogo occorre menzionare i lunghi tempi di ritorno dell'investimento, in cui la rete di tubazioni occupa la maggior parte delle risorse. La rete stessa e le sottostazioni rappresentano siti di dispersioni del calore e dunque di perdita economica, occorre quindi ottimizzare l'isolamento e promuovere l'uso di termo vettori a bassa temperatura, in modo tale da ridurre le dispersioni al minimo. Infine occorre menzionare l'ultimo svantaggio, rappresentato dalla convenienza di installare le reti solamente in zone altamente abitate; l'alto costo degli impianti può essere giustificato solamente nel caso vi siano tante utenze allacciate alla rete.

2.3.4 Case study: Analisi dei consumi di un condominio prima e dopo l'allacciamento alla rete di teleriscaldamento

Nel seguente paragrafo viene valutato l'andamento dei consumi di energia termica prima e dopo l'allacciamento alla rete di teleriscaldamento. L'edificio in questione è un condominio sito in viale Europa 80/82 nel comune di Leinì con una volumetria pari a 2800 m^3 . Tale edificio, fino alla stagione 2010/2011 era asservito da una caldaia di tipo tradizionale, a uso condominiale. Dopo quella stagione l'intero condominio ha deciso di allacciarsi alla rete di teleriscaldamento, sostituendo la caldaia con uno scambiatore di calore di pari potenza. Si conoscono i consumi dell'edificio dei due anni antecedenti all'allacciamento alla rete e di tutti gli anni successivi, fino alla stagione 2016/2017. Si è deciso di esprimere il consumo specifico come $\text{kWh}_{\text{th}}/\text{GG}$. I GG rappresentano i gradi giorno e indicano la "rigidità" della stagione invernale. In questo modo è possibile valutare i consumi indipendentemente dalle condizioni meteorologiche. I kWh_{th} rappresentano invece i "chilowattora termici", ovvero l'energia utile disponibile ai radiatori.

Per quanto riguarda i dati prima dell'allacciamento alla rete, gli unici dati disponibili sono le spese annue, in euro, di gas metano:

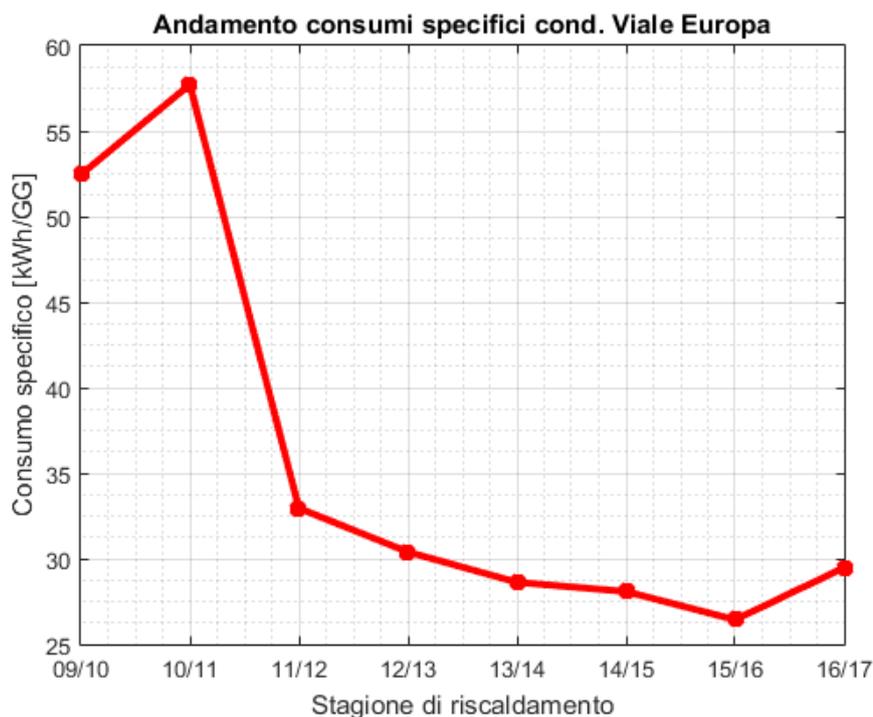
- Stagione 2009/2010: 13817,43 €
- Stagione 2010/2011: 13990,16 €

Per calcolare il consumo in metri cubi è necessario conoscere il costo medio del gas metano al Sm^3 per la stagione di riferimento. I valori riportati di seguito sono dati dalla media aritmetica del costo nei mesi di ottobre, gennaio e aprile.

- Stagione 2009/2010: 0,758 €/Sm³
- Stagione 2010/2011: 0,835 €/Sm³

In questo modo è possibile ottenere gli Sm^3 di metano consumato. Occorre ora trasformarli in kWh moltiplicandoli per il PCI del metano, pari a $33,96 \text{ MJ}/\text{Sm}^3$ e per il fattore di conversione da MJ a kWh che vale 0,277778. Per ottenere i kWh_{th} occorre moltiplicare per il rendimento medio di una caldaia tradizionale, che è stato assunto pari a 0,85. Per quanto riguarda i dati di consumo di energia termica, dopo l'allacciamento alla rete, si fa riferimento ai dati forniti direttamente dall'azienda, tali dati sono già espressi in kWh_{th} . I consumi di energia termica forniti si intendono allo

scambiatore primario, per semplicità sono state trascurate le perdite di calore tra scambiatore primario e radiatori. Per omogeneità di calcolo, la stessa semplificazione è stata adottata anche nel caso ante allacciamento. Dunque in entrambi i casi la quantità di energia utile è coincidente con quella fornita. Nel grafico 2-10 è riportato l'andamento del consumo di energia termica dell'edificio in questione per il periodo di tempo considerato.



2-10 Andamento dei consumi specifici di energia termica.

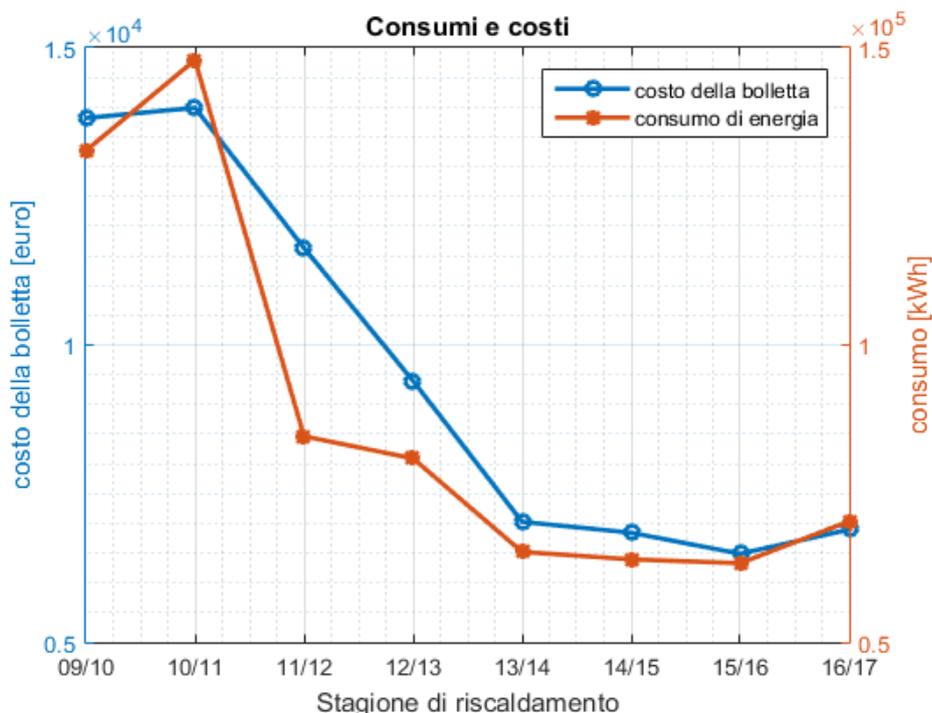
Come si può notare dal grafico 2-10, tra la stagione 2010/2011 e la stagione 2011/2012 vi è un netto calo del consumo specifico, tale periodo coincide con l'allacciamento alla rete di teleriscaldamento. Tra queste due stagioni vi è una diminuzione del consumo specifico pari a circa il 43%, nelle stagioni successive invece vi è una lieve ma progressiva diminuzione dei consumi, dovuta probabilmente al costante settaggio delle valvole termostatiche al fine di ottenere la temperatura interna ideale. Nell'ultimo anno di monitoraggio vi è una leggera crescita dei consumi, giustificabile ipotizzando la probabile occupazione di un appartamento che precedentemente non era abitato, andando ad aumentare il

consumo complessivo del condominio. Questo drastico calo dei consumi può essere legato a molteplici fattori:

- Nello stesso anno in cui il condominio si è allacciato alla rete di teleriscaldamento è stata effettuata un'opera di efficientamento energetico sull'involucro edilizio (coibentazione, infissi con minori dispersioni, ecc);
- L'installazione delle valvole termostatiche, avvenuta congiuntamente all'allacciamento alla rete, è stata particolarmente efficace, andando a limitare gli sprechi ed evitando situazioni di disomogeneità termiche all'interno degli edifici;
- La caldaia precedente era di vecchia generazione e particolarmente inefficiente;

Oltre alle possibili cause sopra elencate, si può pensare che l'introduzione di una nuova tecnologia, quale il teleriscaldamento, abbia indotto gli utenti ad attuare un comportamento prudente per quanto riguarda il settaggio delle valvole termostatiche, per la paura di dover incorrere in bollette più salate di quanto fossero abituati.

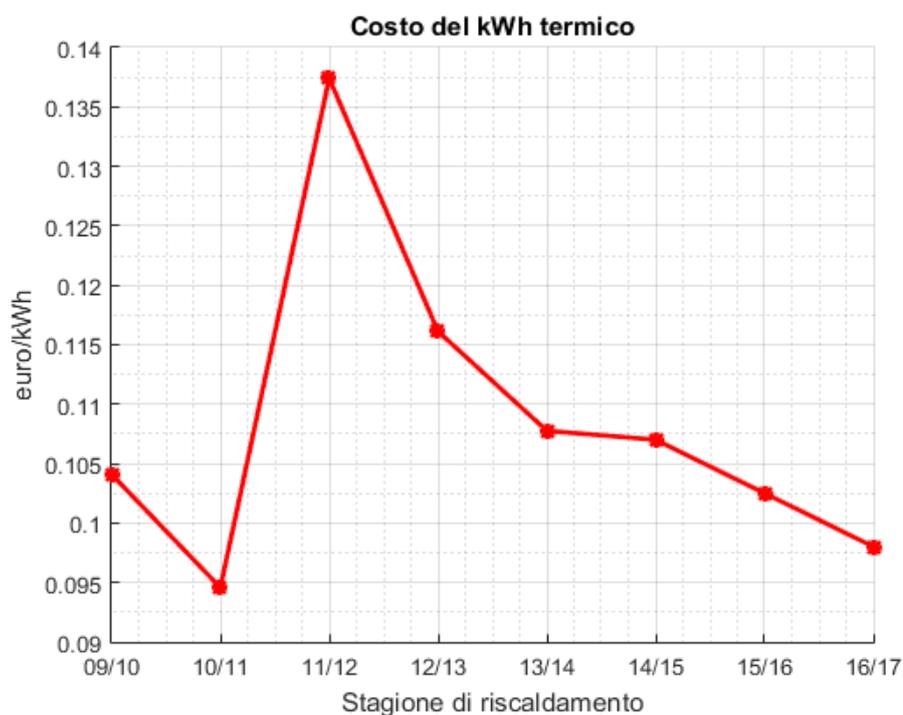
Nel grafico 2-11 sono riportati i consumi di energia termica in kWh e il relativo costo della bolletta, riferiti allo stesso anno.



2-11 Consumo di energia termica e relativo costo in bolletta per ogni stagione di riscaldamento

Da questo grafico si può notare che nell'anno immediatamente successivo al passaggio al teleriscaldamento (stagione 2011/2012) i consumi sono effettivamente diminuiti, tale diminuzione non ha portato però ad un risparmio economico proporzionale al risparmio energetico. Il motivo è l'elevato costo iniziale del kWh termico del teleriscaldamento.

Nel seguente grafico è mostrato l'andamento del costo unitario del kWh termico. I valori del costo del kWh termico sono stati ricavati semplicemente dividendo la spesa della bolletta del gas o dell'approvvigionamento di acqua calda da teleriscaldamento per il numero di kWh termici consumati. Va tenuto presente che anche in questo caso, per quanto riguarda le stagioni in cui era presente la caldaia, viene tenuto conto del suo rendimento medio.



2-12 Costo del kWh termico per ogni stagione di riscaldamento

Dal grafico 2-12 si può notare che, in corrispondenza della prima stagione di teleriscaldamento, vi è un aumento consistente del prezzo al kWh rispetto alla stagione precedente, per poi decrescere molto velocemente, fino a tornare a livelli pre-intervento dopo cinque stagioni.

In generale si può concludere che, nonostante l'iniziale alto costo del kWh termico, il costo della bolletta a fine anno è diminuito, grazie soprattutto all'installazione delle valvole termostatiche e all'efficienza dell'impianto.

Per far sì che tale tecnologia diventi veramente competitiva, occorre che il costo unitario del kWh termico sia inferiore agli 0.08 euro/kWh. Tale scenario risulterebbe assolutamente realistico nel caso si utilizzasse calore di scarto, proveniente da qualunque processo di tipo industriale.

Capitolo 3

L'IMPIANTO DI TELERISCALDAMENTO DI LEINÌ

L'impianto di teleriscaldamento in oggetto è in funzione dal gennaio 2002, la rete è alimentata da una centrale termica a biomassa con potenza nominale di 10 MWt, costituita da due caldaie alimentate a cippato, e una caldaia di riserva a gas naturale da 3,5 MWt. La rete è costituita da un sistema di doppie tubazioni (mandata e ritorno) interrato con una lunghezza complessiva di 12,2 km, collegando 94 utenze, per una volumetria totale riscaldata pari a circa 426662 m³. La centrale brucia cippato di legna vergine proveniente da scarti di segheria e di origine forestale, inoltre essa è dotata di un sistema di monitoraggio delle emissioni in continuo, i dati vengono registrati e trasmessi periodicamente agli enti preposti al controllo.

3.1 La centrale di produzione del calore

Nell'edificio sono installati due generatori con potenza termica nominale di 5 MWt cadauno. L'impianto produce acqua calda ad una temperatura di 85-90°C a servizio di una rete di teleriscaldamento che collega sia fabbricati pubblici che privati, precedentemente alimentati a combustibili fossili (metano, gasolio, olio combustibile). Il cippato di legna introdotto nella camera di combustione produce calore, grazie alla regolazione del dosaggio del combustibile nel focolare si garantisce un'ottimale combustione sia a basso che ad alto regime, quindi in qualunque condizione stagionale. Le caldaie sono state progettate per bruciare senza problemi combustibile con umidità media del 50% e con pezzatura fino a 100/150 mm. di diametro. Un'ulteriore caldaia, alimentata a gas metano, della potenzialità di 3,5 MW, svolge la funzione di "riserva": normalmente spenta, viene utilizzata solo in

caso di emergenza e cioè di grave malfunzionamento di una delle caldaie principali, che possa compromettere la corretta erogazione del calore all'utenza.

Il trasporto del materiale viene svolto dai rastrelli, i quali, muovendosi assialmente in avanti, spingono il combustibile verso la camera di combustione, mentre muovendosi indietro si fanno scavalcare dal materiale combustibile per poi riprendere il ciclo.

Il combustibile viene dosato dentro il focolare attraverso un convoglio detto "zona di compressione", riscaldato dall'acqua della caldaia, formando così un braciere uniforme sopra la griglia del focolare. La griglia mobile del focolare consta di due parti, una fissa, l'altra mobile. Sopra di essa, con il calore delle mura del focolare, il combustibile viene essiccato e preparato per la gassificazione sopra la prima parte mobile della griglia. Sopra la seconda parte mobile della griglia prende atto la postcombustione dei residui incombusti fino a ridurli in cenere, la quale, assieme con altri residui non bruciati come ad esempio sassi, ferro, etc., viene servita mediante una serranda regolata idraulicamente, al sistema di estrazione ceneri.

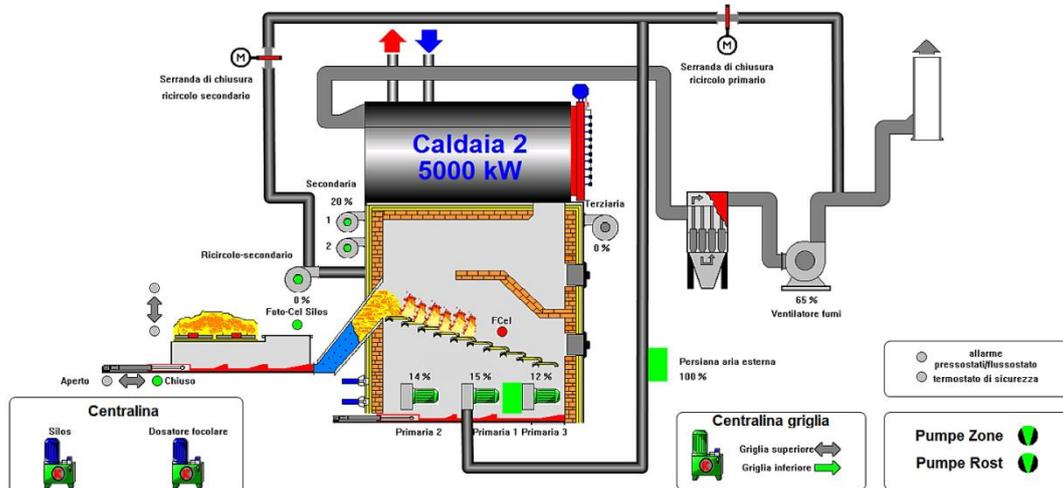
La gestione automatica del combustibile regola il dosaggio ed assicura un'ottima ed uniforme copertura del braciere con il combustibile dipendente da quanto necessario. Grazie a questo sistema la quantità di combustibile nel focolare può essere precisamente regolata non formando così mucchi inutili di materia prima, ceneri in eccesso e la possibilità di controllare la combustione dal regime del 20% fino al 100% della portata nominale della caldaia.

Il focolare, di costruzione robusta e ben isolato, ha due zone di combustione: la prima zona di combustione con la griglia, impiegata per l'essiccazione, separazione dei gas dal combustibile e per la combustione primaria del cippato. La seconda zona di combustione è utilizzata per la postcombustione dei gas volatili derivati dalla separazione, la quale avveniva nella prima zona di combustione.

Le arie necessarie per la combustione, vengono insufflate nelle varie zone di combustione in base alla quantità necessaria. Ogni zona ha un proprio ventilatore, il quale, regolato da inverter di frequenza, ha la possibilità di insufflare una quantità precisa d'aria dentro la propria zona. Le arie sono tre primarie e due secondarie.

Il processo automatico di combustione, a partire dall'estrazione della biomassa dai depositi fino all'abbattimento dei gas fumogeni ed al collegamento con la canna fumaria, viene controllato da un sistema di regolazione multiparametrica. Prendendo

in considerazione la qualità della biomassa come combustibile con una “fiamma estesa” assicura bassi valori di emissione in atmosfera ed un altissimo grado di sfruttamento.



3-1 Schema di funzionamento dell'impianto di produzione del calore

3.1.1 Il caricamento del biocombustibile

Il silos di stoccaggio è un'area coperta di oltre 500 m² nella quale viene effettuato lo scarico del cippato dagli automezzi, successivamente tramite l'uso di un carroponte dotato di benna idraulica trasferisce il cippato dal silos di stoccaggio ai silos polmone. Da questo punto dell'impianto in poi il processo è totalmente automatizzato, il materiale combustibile viene convogliato nella camera di combustione tramite i rastrelli e lo spintore in base alle “richieste” della caldaia, in funzione del calore da produrre. In media vengono caricate 45 tonnellate al giorno, nei mesi invernali si può arrivare fino a 70.



3-2 Silos per lo stoccaggio della biomassa

3.1.2 Il sistema di trattamento dei fumi

Le emissioni della combustione della biomassa sono continuamente monitorate e registrate, periodicamente i dati raccolti vengono trasmessi agli enti preposti al controllo (ARPA, Città Metropolitana di Torino e Comune di Leini). I fumi vengono in primo luogo trattati da un mult ciclone, le ceneri derivate da tale depurazione vengono rese attraverso una valvola stellare alla coclea, la quale trasporta le ceneri fino all'estrattore ceneri orizzontale posto tra le due caldaie. I fumi vengono ulteriormente trattati dall'elettrofiltro, entrano nel filtro elettrico tramite il bocchettone d'entrata del gas, distribuendosi uniformemente per mezzo delle apposite pareti sull'intera sezione del filtro. La separazione della polvere avviene tramite carica elettrostatica delle particelle e con separazione delle particelle cariche sugli elettrodi di deposito. Le particelle di polvere contenute nel gas vengono caricate negativamente e procedono nel campo elettrico verso gli elettrodi di deposito polarizzati positivamente e messi a terra. Gli elettrodi di deposito sono stati progettati come canaletti di raccolta per evitare che la polvere separata venga trascinata dalla corrente di gas durante la battitura. La polvere separata nel filtro viene raccolta in un container.

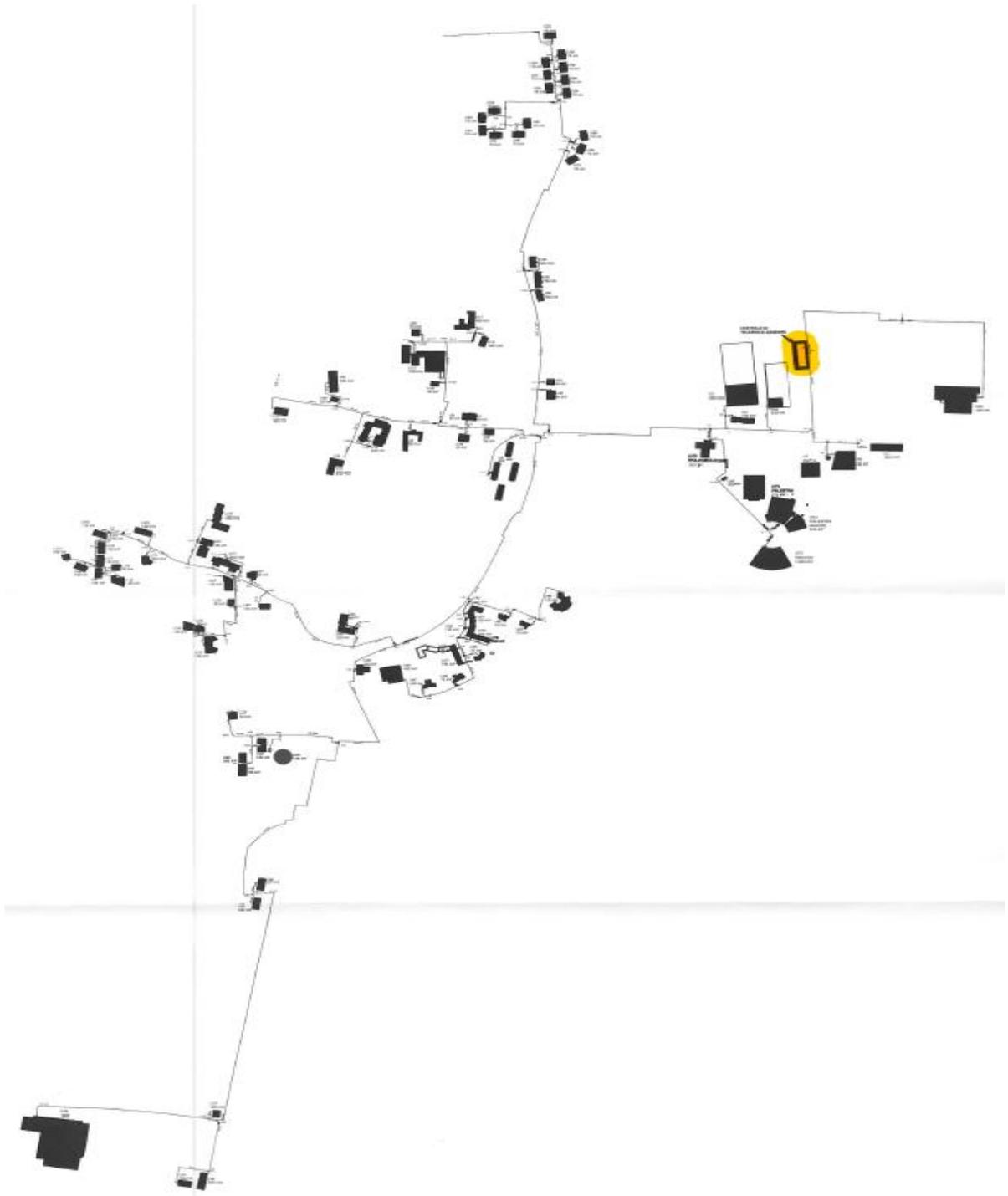


3-3 Il sistema di trattamento dei fumi

Nel prosieguo del capitolo verrà presa in esame la rete di teleriscaldamento del comune di Leini, per tale rete verranno valutate in via teorica le perdite di calore nell'assetto attuale. Nel capitolo successivo invece saranno valutate le perdite a seguito dell'implementazione di un sistema per la regolazione del carico.

3.2 La rete di distribuzione del calore

La rete di tubazioni si estende per 12,2 km e nella figura 3-4 è mostrato lo sviluppo per intero.



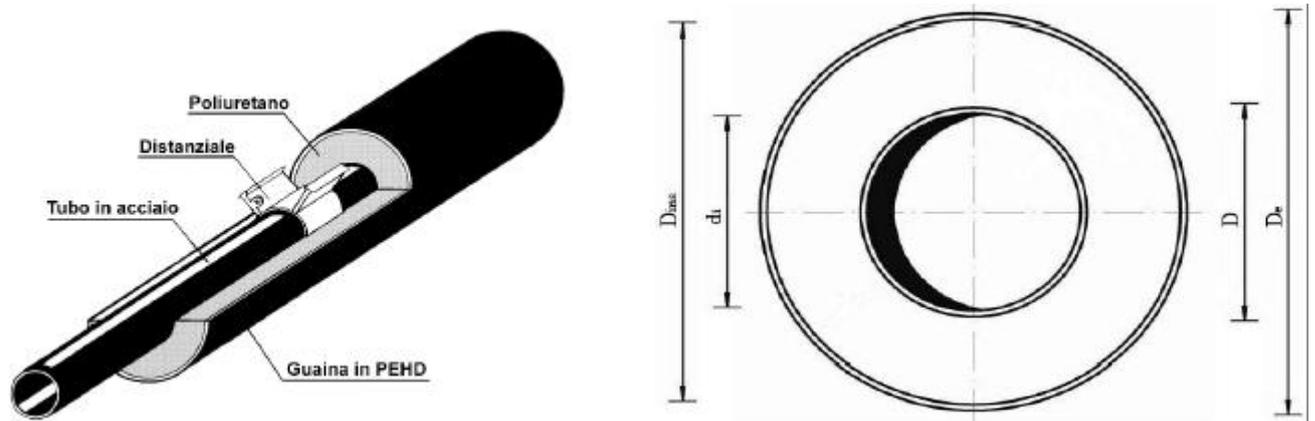
3-4 Planimetria della rete di tubazioni

Nella figura è evidenziata la posizione della centrale di produzione del calore.

La rete esistente si sviluppa secondo una configurazione ramificata, in cui non vi sono presenti delle maglie. Le utenze sono allacciate alla rete principale tramite delle sottostazioni di scambio termico, costituite sostanzialmente da uno o più scambiatori di calore, il che significa che la configurazione è di tipo indiretto. Ogni utenza fisica (condominio, abitazione singola, centro commerciale) possiede una sottostazione indipendente, in alcuni casi, però, può capitare che la sottostazione sia condivisa da più utenze, specie se piccole.

TUBAZIONI UTILIZZATE E METODO DI POSA

Le tubazioni utilizzate sono di tipo classico, con sistema Bonded. Il sistema Bonded è un sistema preisolato utilizzato per il trasporto di fluidi caldi e freddi. È costituito da un tubo di servizio in acciaio, da un isolamento in schiuma di poliuretano espanso esente freon e da un tubo guaina in polietilene ad alta densità. La caratteristica del sistema è l'adesione tra il tubo di servizio, la schiuma di poliuretano e il tubo esterno che consente ai componenti di costituire un corpo unico in grado unico in grado di trasferire le forze. Gli spostamenti avvengono quindi fra il tubo guaina e il materiale di reinterro. Le dilatazioni vengono assorbite dai materassini elastici installati in corrispondenza delle curve, all'esterno del tubo guaina, dopo la posa delle tubazioni e prima del riempimento dello scavo. I tubi sono interrati ad una profondità che va da 0,8 a 1m e i diametri interni variano da 250 mm (uscita della centrale) fino a 40 mm. Nella figure 3-6 e 3-7 sono mostrati i particolari delle tubazioni utilizzate.



3-5 Spaccato e sezione trasversale delle tubazioni

Le tubazioni utilizzate e le relative dimensioni sono riportate nella tabella 3-6

DN (mm)	40	50	65	80	100	125	150	200	250
di	43,1	54,5	72,3	82,5	107,1	132,5	160,3	210,1	263
D	48,3	60,3	78,1	88,9	114,3	139,7	168,3	219,1	273
Dins	104,1	119,1	136,1	154,1	192,1	217,1	241,7	305,3	387,4
De	110	125	140	160	200	225	250	315	400

3-6 Tubazioni utilizzate e relative misure

Nella tabella 3-7 sono riportati i metri di tubazione totale in base al differente diametro nominale.

	40	50	65	80	100	125	150	200	250
metri di tubazione	493,3	708,4	864,8	1645,2	838,8	1009,3	2148,1	2508,5	1434,2

3-7 Quantità di tubazioni utilizzate in base al diametro nominale

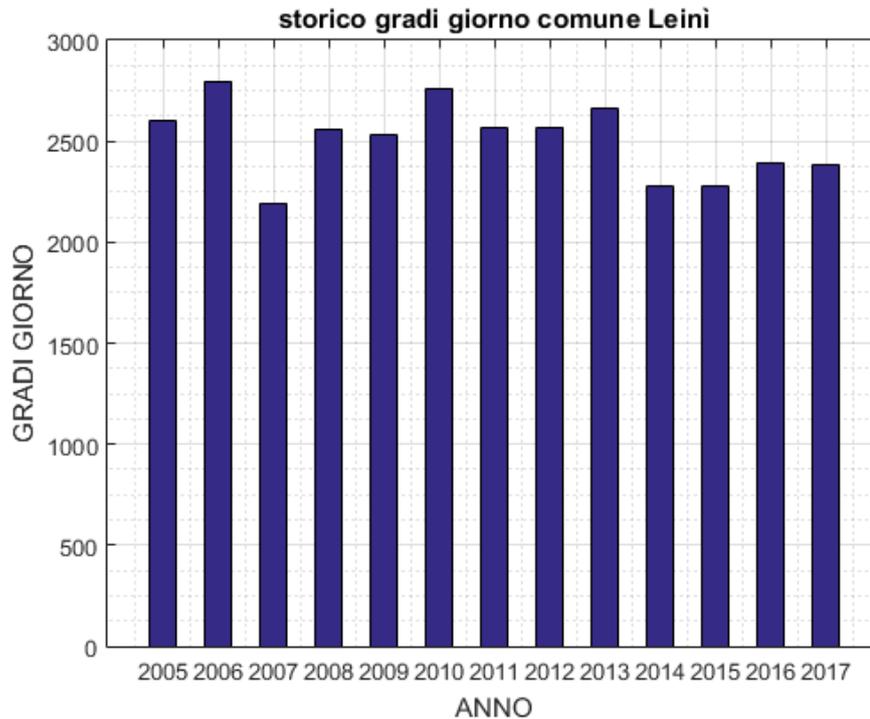
3.3 Caratterizzazione climatica

Leinì è un comune italiano di circa 16400 abitanti, situato in provincia di Torino, a pochi chilometri dal capoluogo. Leinì appartiene alla zona climatica E. La zona climatica di appartenenza indica in quale periodo e per quante ore è possibile accendere il riscaldamento negli edifici. Tale suddivisione viene fatta in base ai *gradi giorno* del comune stesso. Il grado giorno di una località è la somma estesa a tutti i giorni, in un periodo annuale convenzionale di riscaldamento, delle sole differenze positive giornaliere tra la temperatura ambiente, fissata convenzionalmente per ogni paese, e la temperatura media esterna giornaliera:

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

La sommatoria è estesa ai giorni del periodo convenzionale di riscaldamento, i pedici 0 ed e stanno ad indicare la temperatura ambiente convenzionale (20 °C) e la temperatura media esterna giornaliera tale per cui $T_e < T_0$. Nel grafico 3-9 è mostrato lo storico dei gradi giorno per il comune di Leinì dall'anno 2005. La zona climatica E prevede un periodo di riscaldamento che va dal 15 ottobre al 15 aprile, la normativa¹⁰ impone inoltre un valore massimo di ore di funzionamento giornaliero, che in questo caso è pari a 14 ore. Tramite lo stesso decreto è stato possibile definire la temperatura esterna di progetto, che per il comune in oggetto non è espressamente indicata. A tal proposito si è assunto come valore di riferimento quello della città di Torino, pari a -8 °C.

¹⁰ La classificazione climatica dei comuni italiani è stata introdotta dal Decreto del presidente della Repubblica n. 412 del 26 agosto 1993 (tabella A e successive modifiche ed integrazioni) in merito al Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia, in attuazione dell'art. 4, comma 4, della L. 9 gennaio 1991, n. 10.



3-8 Gradi giorno per il comune di Leini nel periodo 2005-2017

3.4 Valutazione delle dispersioni termiche¹¹

Al fine di garantire il riscaldamento degli ambienti, il fluido termovettore della rete di teleriscaldamento deve essere distribuito ad una temperatura superiore rispetto alla temperatura di set point di riscaldamento (20°C). Ciò comporta che l'acqua circolante nella rete sia ad una temperatura più alta rispetto alla temperatura esterna. Questa differenza tra la temperatura del fluido e la temperatura ambiente, provoca una dissipazione di calore, tramutabile in perdita economica nonché in perdita di efficienza su tutto l'impianto. Per limitare tali perdite, si utilizzano condutture isolate per mezzo dell'applicazione di strati di materiale a bassa conducibilità termica λ espressa in W/m^2K . Il flusso termico disperdente da una data conduttura di lunghezza L a temperatura interna T_i e temperatura esterna T_e viene espresso dalla 3.2.

¹¹ F. Kalmár, Energy Conscious Heating, Akadémiai Kiadó, Budapest, 2011

$$\Phi = \frac{T_i - T_e}{\sum R} * L \quad (3.2)$$

Il termine a denominatore sta ad indicare la sommatoria di tutte le resistenze R che ostacolano il passaggio di calore fra interno ed esterno. Per una condotta cilindrica composta da n strati, partendo dall'interno si ha:

- La resistenza termica dovuta allo scambio termico convettivo fra fluido termovettore e parete del tubo, la quale dipende dal coefficiente di scambio termico convettivo α e dal diametri interno del tubo d_i :

$$R_{conv,in} = \frac{1}{\alpha_i * \pi * d_i} \quad (3.3)$$

- La resistenza termica dovuta allo scambio di calore per conduzione all'interno di ogni strato di materiale, la quale dipende dalla conducibilità termica del materiale i -esimo λ_i e dal diametro interno d_j e esterno d_{j+1} :

$$R_{conv,in} = \frac{1}{2 * \pi * \lambda_j} \ln \frac{d_{j+1}}{d_j} \quad (3.4)$$

In questo caso, essendo la tubazione a diretto contatto con il terreno, non è presente la resistenza termica dovuta allo scambio termico convettivo sulla parete esterna del tubo. Dunque combinando la (3.3) e sviluppando la (3.4) per tutti gli strati che compongono il tubo, si ottiene la seguente:

$$R_{tubo} = \frac{1}{\alpha_i * \pi * d_i} + \frac{1}{2 * \pi * \lambda_{ac}} \ln \frac{D}{d_i} + \frac{1}{2 * \pi * \lambda_{is}} \ln \frac{D_{ins}}{D} + \frac{1}{2 * \pi * \lambda_{gu}} \ln \frac{D_e}{D_{ins}} \quad (3.5)$$

I pedici della conducibilità termica λ indicano rispettivamente i valori riferiti all'acciaio, all'isolante e alla guaina protettiva esterna. Per quanto riguarda i diametri invece, si fa riferimento alla tabella 3-8.

Queste resistenze appena introdotte non bastano a descrivere il modello che si deve studiare, occorre infatti introdurre due ulteriori resistenze: una legata al terreno e l'altra dovuta alla vicinanza di due tubazioni, che si influenzano a vicenda per quanto riguarda la dispersione del calore.

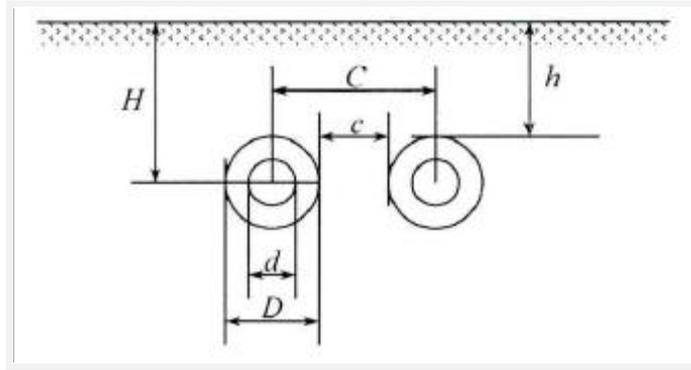
- Il terreno frapposto tra la tubazione e l'aria è una componente resistiva che si oppone al flusso di calore dissipato. Tale resistenza viene chiamata R_g , si ricava tramite la (3.6) facendo uso delle variabili λ_f (conducibilità del terreno), H (profondità di posa) e α_{eq} (resistenza termica equivalente = 0,0685 m²K/W):

$$R_g = \frac{1}{2 * \pi * \lambda_f} * \cosh^{-1} \left(\frac{2 * H}{D_e} + \alpha_{eq} * \lambda_f \right) \quad (3.6)$$

- La presenza di due tubazioni adiacenti necessita l'introduzione dell'ultima componente resistiva, chiamata R_{12} . Per il calcolo di tale resistenza viene utilizzata la conducibilità del terreno λ_f , la profondità di posa H e la distanza di posa C (distanza tra gli assi delle condotte):

$$R_{12} = \frac{1}{2 * \pi * \lambda_f} * \ln \left(1 + \frac{(2 * H)^2}{C^2} \right) \quad (3.7)$$

Per la profondità di posa H , si è scelto un valore uguale per tutti i tratti di tubazione, pari a 1 m, mentre la distanza di posa C dipende dal diametro degli assi e il valore c come mostrato in figura 3-9 è costante pari a 0,2 m.



3-9 Tubazioni interrante

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 sono espressi in W/m e calcolati secondo la (3.8) e la (3.9).

$$q_f = \frac{(T_f - T_{amb}) * (R_g + R_{tubo}) - (T_r - T_{amb}) * R_{12}}{(R_g + R_{tubo})^2 - R_{12}^2} \quad (3.8)$$

$$q_r = \frac{(T_r - T_{amb}) * (R_g + R_{tubo}) - (T_f - T_{amb}) * R_{12}}{(R_g + R_{tubo})^2 - R_{12}^2} \quad (3.9)$$

Pertanto il valore di potenza termica disperdente totale sarà pari a:

$$q_{tot} = q_f + q_r \quad (3.10)$$

Si è deciso di tenere comunque separati i contributi della tratta di andata e di ritorno, per evidenziare maggiormente l'influenza della temperatura sul calore disperso.

3.4.1 Ipotesi di partenza ai fini del calcolo delle dispersioni

Nel paragrafo precedente sono già state introdotte le ipotesi riguardanti la profondità di posa e la distanza delle tubazioni. L'assetto attuale dell'impianto prevede una temperatura di mandata costante, pari a circa 85°C e una temperatura di ritorno che oscilla in base alla richiesta, anch'essa comunque può essere considerata

costante e pari a 65°C ai fini del calcolo. Durante il suo tragitto, il fluido termovettore perde calore e quindi si abbassa di temperatura. La diminuzione di temperatura è dell'ordine di 1-2 °C sia per la mandata che per il ritorno, dunque per semplicità di calcolo si è deciso di mantenere la temperatura costante, scelta giustificata dal fatto che l'errore introdotto è minore dell' 1%. La scelta adottata inoltre risulta più cautelativa e dunque portare a risultati più vicini a quelli reali. Nella seguente tabella sono riportati i valori di conducibilità dei materiali utilizzati:

	λ_{acciaio}	$\lambda_{\text{isolante}}$	λ_{guaina}	λ_{terreno}
W/(m °C)	55	0,03	0,35	1,2

3-10 Conducibilità termica materiali e terreno

Al fine di rendere più realistica possibile la simulazione, si è scelto di utilizzare i valori di temperatura media giornaliera del comune di Caselle Torinese (distante pochi chilometri dal comune di Leini), da utilizzare come valori di temperatura ambiente, a partire dal 15 ottobre 2016 fino al 15 aprile 2017. Le ore di funzionamento giornaliero sono 14.

Per valutare il coefficiente di scambio termico convettivo α è stato necessario innanzitutto valutare la velocità del fluido. Le pompe di rete lavorano a portata costante, per cui conoscendo il diametro della tubazione principale di mandata, si può ricavare la velocità del fluido tramite la seguente relazione:

$$v = \frac{\dot{V}}{A} = 1,28 \frac{m}{s} \quad (3.11)$$

Dove la portata volumica \dot{V} è uguale a 0,0694 m³/s (250 m³/h) e la sezione trasversale della tubazione principale è pari a 0,0543 m² ($d_i = 0,263$ m).

La velocità viene considerata costante in tutti i tratti di rete. A questo punto è possibile calcolare il numero di *Reynolds* definito dalla (3.12).

$$Re = \frac{\rho * v * d_i}{\mu} \quad (3.12)$$

Dove μ è la viscosità dinamica e per l'acqua vale 0,000978 Pa*s.

Il numero di *Reynolds* è così calcolato per ogni diametro interno, verificando che in ogni caso il moto è turbolento. È così possibile applicare la correlazione di *Dittus-Boelter*, essendo anche in presenza di sola convezione forzata.

Per prima cosa si calcola il numero di *Prandtl*, costante per tutte le tubazioni in quanto dipende solo dai parametri fisici dell'acqua.

$$Pr = \frac{C_p * \mu}{\lambda_{acqua}} \quad (3.12)$$

Con un valore di calore specifico pari a 4186 J/kg e una conduttività termica dell'acqua pari a 0,6 W/m, ottengo $Pr = 6,8134$.

Si può ora trovare il numero di *Nusselt* tramite la (3.13) e quindi il coefficiente α tramite la (3.14) per ogni diametro.

$$Nu = 0,023 * Pr^{0,4} * Re^{0,8} \quad (3.13)$$

$$\alpha = \frac{Nu * \lambda_{acqua}}{d_i} \quad (3.14)$$

Nella tabella 3-11 sono riassunti tutti i risultati.

	40	50	65	80	100	125	150	200	250
$d_i(m)$	0,0431	0,0545	0,0723	0,0825	0,1071	0,1325	0,1603	0,2101	0,263
$v(m/s)$	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28
Re	56334,51	71235,06	94500,82	107832,9	139986,7	173186,1	209522,6	274614,4	343758,2
Pr	6,813	6,813	6,813	6,813	6,813	6,813	6,813	6,813	6,813
Nu	313,1	377,8	473,6	526,3	648,5	768,9	895,5	1111,9	1330,7
$\alpha(W/m^2K)$	4358,801	4158,945	3930,382	3827,998	3633,328	3481,924	3351,782	3175,245	3035,787

3-11 Tabella riassuntiva

3.4.2 Risultati

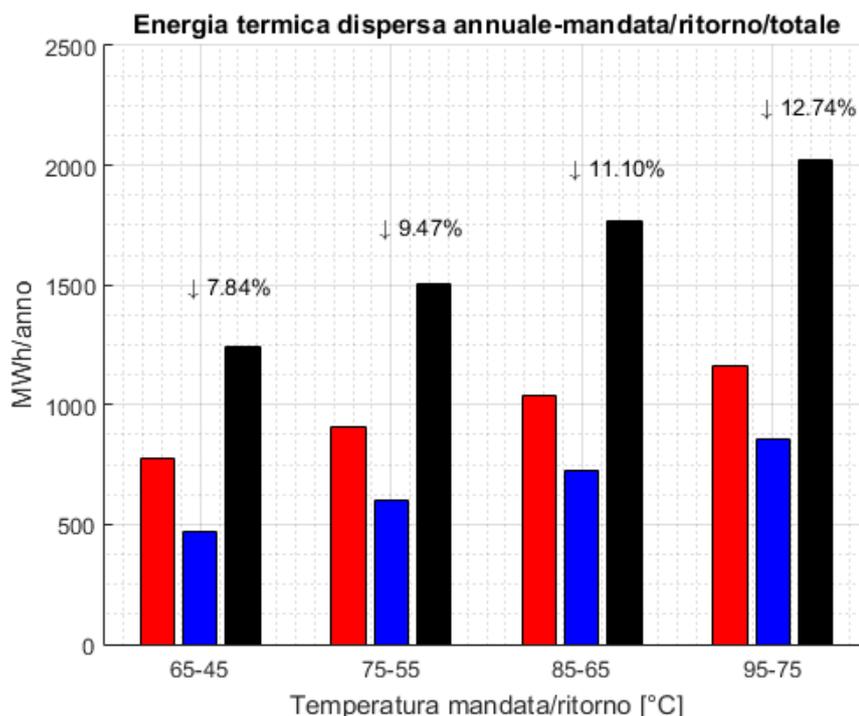
Una volta ottenuti i valori di q_r e q_f per ogni diametro e per ogni giorno di funzionamento, si procede a moltiplicarli per i metri di tubazione corrispondenti, in base alla tabella 3-7. Dopodiché per ottenere l'energia dispersa in kWh, si moltiplica il valore ottenuto in precedenza per il numero di ore di funzionamento giornaliero. Sommando tutta la quantità di energia dispersa di tutti i giorni della stagione di riscaldamento si ottiene la quantità di energia dispersa in un anno.

Nella stagione 2016/2017 l'impianto ha prodotto 15886 MWh di energia termica e la simulazione ha prodotto una perdita teorica di 1763,9 MWh ripartiti in 1035 MWh per la condotta di mandata e 728,9 MWh per quella di ritorno. L'efficienza della rete si può ricavare tramite la (3.15).

$$\eta_{rete} = 1 - \frac{e_{th} \text{ dispersa}}{e_{th} \text{ immessa in rete}} = 1 - \frac{1763,9}{15886} = 88,9\% \quad (3.15)$$

Di conseguenza la frazione di energia dispersa ammonta all' 11,1%, valore che si avvicina alle perdite reali di rete.

Nella seguente figura è mostrato un confronto con le perdite che si avrebbero con differenti temperature di mandata e ritorno. Allo scopo si è deciso di mantenere costante il ΔT tra mandata e ritorno (pari a 20 °C), in modo tale da avere un confronto a parità di energia termica distribuita, mantenendo costante portata a calore specifico.



3-12 Confronto delle dispersioni termiche a differenti temperature di mandata e ritorno

Nella figura sono inoltre mostrate le percentuali di calore disperso in base alla quantità di calore fornito nella stagione di riscaldamento. Innanzitutto si può notare una dipendenza lineare delle perdite di rete rispetto alla temperatura dei fluidi. La componente di energia dispersa dalla condotta di mandata pesa per circa il 60% sul totale, tuttavia, man mano che si alzano le temperature il peso percentuale tende a diminuire. Questo grafico fornisce una prima indicazione sul peso che le perdite termiche di rete possono avere nell'economia di un impianto di teleriscaldamento, ci suggerisce altresì di come lavorare a basse temperature ci consenta un risparmio energetico ed economico rilevante.

3.5 Pompe di rete e fabbisogno energetico stagionale

Le pompe di rete permettono la circolazione del fluido termovettore all'interno della rete. La potenza totale delle pompe deve essere sufficiente per far fronte alle perdite di carico Δh del circuito e deve essere progettata per garantire una portata circolante adeguata nelle condizioni climatiche più avverse (condizioni di progetto).

La potenza delle pompe in Watt viene individuata dalla (3.16).

$$P_p = \dot{V} * \frac{\rho * g * \Delta h}{\eta_p} \quad (3.16)$$

Il valore così ricavato costituisce la potenza all'asse della pompa e, ai fini di una 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 .

$$P_E = \frac{P_p}{\eta_t * \eta_m} \quad (3.17)$$

Il fabbisogno energetico elettrico dell'impianto risulta calcolabile come il valore della potenza P_E moltiplicato per il numero di ore annue di funzionamento, così come fatto per le perdite di calore, restituendo un risultato in kWh.

DETERMINAZIONE DELLE PERDITE DI CARICO

Un fluido che scorre dentro una tubazione è soggetto alle cosiddette perdite di carico distribuite e localizzate. Le prime dipendono dall'attrito viscoso che si esercita fra le particelle aventi diversa velocità a causa dell'aderenza tra il fluido e la superficie del condotto, le seconde sono 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 (restringimenti di sezione e variazioni di direzione).

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 definito come:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon}{3,71d_i} * \frac{2,51}{R_e \sqrt{\lambda}} \right) \quad (3.18)$$

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.

L'implementazione del calcolo delle perdite di carico comporta 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.

Nel caso della rete presa in considerazione, si è calcolato un Δh pari a circa 50 m, corrispondente ad una pressione di circa 5 bar, molto vicina al valore di pressione realmente utilizzato dall'impianto. Ipotizzando un rendimento della pompa pari a 0,8 un rendimento del motore di 0,90 e un rendimento di trasmissione pari a 0,95 si può calcolare:

$$P_p = 0,07 * \frac{1000 * 9,81 * 50}{0,80} = 42578 = 42,6 \text{ kW}$$

$$P_E = 0,07 * \frac{1000 * 9,81 * 50}{0,80 * 0,90 * 0,95} = 49799 = 49,8 \text{ kW}$$

$$E_E = 49799 * 14 * 183 = 127,6 \text{ MWh/anno}$$

Dunque occorrono 127,6 MWh all'anno per il funzionamento delle pompe.

Capitolo 4

INTERVENTO DI EFFICIENTAMENTO PRESSO L'IMPIANTO DI PRODUZIONE DEL CALORE:

METODI ALTERNATIVI PER LA REGOLAZIONE DELLA RETE DI DISTRIBUZIONE

In questo capitolo verranno introdotti due metodi, alternativi a quello esistente, per la regolazione dell'energia termica distribuita nella rete in base alle condizioni climatiche esterne. Lo scopo di questa trattazione è valutare il risparmio energetico che si otterrebbe attuando questi due metodi, uno alternativo all'altro, a confronto di quelle che sono le condizioni attuali di funzionamento dell'impianto. Come già anticipato, il sistema attuale lavora mandando in rete acqua calda ad una temperatura di circa 85 °C, indipendentemente da quelle che sono le condizioni climatiche esterne. La temperatura di ritorno dipende da quella che è la richiesta di calore dalle utenze, più è alta, più la temperatura di ritorno sarà bassa e viceversa. Un sistema automatizzato fornisce alla caldaia il quantitativo esatto di biomassa che serve a riportare la temperatura dell'acqua a quella di mandata. La portata viene mantenuta costante a quella di progetto per tutto il periodo di funzionamento, salvo casi straordinari.

Occorre sottolineare che nel capitolo verranno prese in considerazione delle temperature le quali possono non coincidere con quelle di un classico impianto domestico, dotato di radiatori classici (temperatura di funzionamento 70-80 °C). Ciò non significa che la simulazione non è realistica, piuttosto non è legata al tipo di terminali utilizzati ed alla loro temperatura di funzionamento. Nel capitolo successivo verranno proposti degli interventi di efficientamento energetico degli

edifici e di sostituzione dei terminali di riscaldamento ad alta temperatura con terminali a bassa temperatura.

Per semplificare la compilazione delle formule che seguiranno, si fa uso della notazione espressa dalle (4.1), (4.2), (4.3) e (4.4).

$$T_e = t_i - t_e \quad (4.1)$$

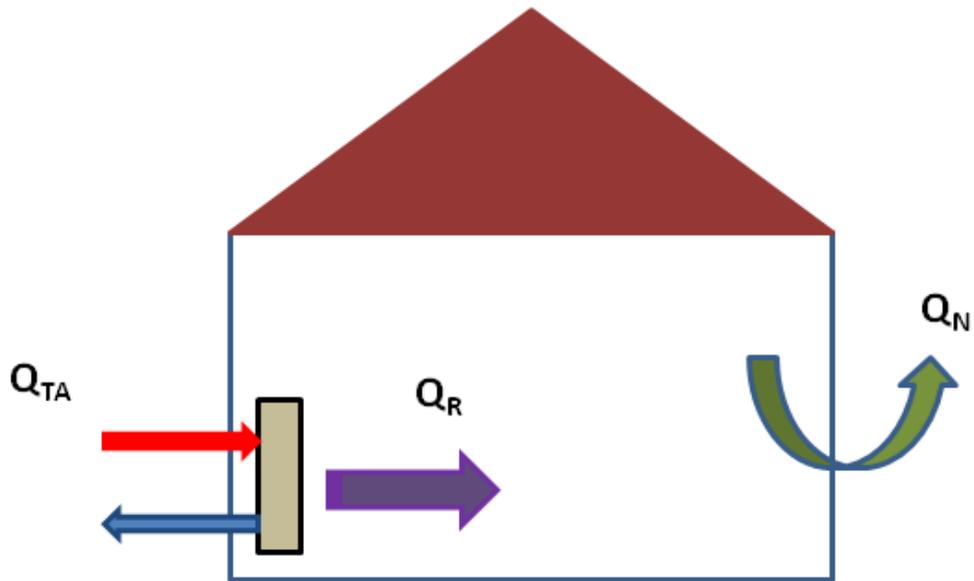
$$T_f = t_f - t_i \quad (4.2)$$

$$T_r = t_r - t_i \quad (4.3)$$

$$T_R = \frac{T_f - T_r}{\ln \frac{T_f}{T_r}} \quad (4.4)$$

Dove t_i identifica la temperatura interna di design (assunta costante pari a 20 °C), t_e la temperatura esterna, t_f la temperatura di mandata del fluido termovettore, t_r la temperatura di ritorno del fluido termovettore e T_R la differenza di temperatura medio logaritmica.

Nella seguente figura sono mostrati i flussi termici di un'utenza, in cui: Q_N rappresenta la richiesta di calore nella stanza; Q_R il calore trasferito dal radiatore; Q_{TA} il calore trasferito dal fluido termovettore.



4-1 Flussi termici di un'utenza

La condizione per cui si verifica un equilibrio tra calore fornito e calore disperso dall'utenza è dato dalla (4.5).

$$Q_N = Q_R = Q_{TA} \quad (4.5)$$

Dove:

$$Q_N = T_e * \sum_i A_i * U_i \quad (4.6)$$

$$Q_R = k_R * A_R * T_R \quad (4.7)$$

$$Q_{TA} = \dot{m} * C_p * (T_f - T_r) \quad (4.8)$$

Dove A_i è 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; A_R superficie totale dei radiatori; k_R il coefficiente di scambio termico dei radiatori.

Per assicurare la fornitura di calore alle utenze in condizioni di continua variazione di richiesta, sono impiegati sofisticati sistemi di controllo.

Nel primo 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.

Nel secondo caso il parametro di controllo utilizzato è la portata di fluido termovettore, mentre la temperatura di mandata viene mantenuta costante ($t_f = \text{costante}$) durante il periodo di funzionamento. La temperatura di ritorno è influenzata dalla temperatura esterna e dalla portata circolante in rete.

Come già detto, le temperature di mandata e ritorno considerate possono essere inferiori alle temperature di funzionamento dei radiatori classici, ciò implica che tali metodi di controllo debbano essere affiancati a dei programmi di efficientamento edilizio.

4.1 Regolazione tramite controllo della temperatura del fluido termovettore a portata costante

In questo primo metodo per il controllo dell'energia termica distribuita in rete, è la temperatura del fluido termovettore ad essere variata, mentre la portata circolante viene mantenuta costante.

Si possono scrivere le equazioni (4.6) e (4.7) per i valori nominali di controllo ($T_{e0}; T_{R0}$) e per un'altra coppia di valori ($T_e; T_R$) inferiori ai valori di progetto. Tramite la (4.5) è possibile scrivere le seguenti uguaglianze:

$$T_{e0} * \sum_i A_i * U_i = k_{R0} * A_R * T_{R0} \quad (4.9)$$

$$T_e * \sum_i A_i * U_i = k_R * A_R * T_R \quad (4.10)$$

Il coefficiente di scambio termico del radiatore k_R , dipende dalla temperatura medio logaritmica T_R agente sul radiatore:

$$k_R = k_{R0} * \left(\frac{T_R}{60}\right)^{\frac{1}{m}} \quad (4.11)$$

Dove m è un esponente ricavato a sua volta dall'esponente n il quale dipende dal tipo di radiatore (n oscilla tra 1,24 e 1,36).

$$m = \frac{1}{n - 1} \quad (4.12)$$

Utilizzando le (4.9), (4.10) e (4.11) si ricava la seguente relazione:

$$T_R = T_{R0} * \left(\frac{T_e}{T_{e0}}\right)^{\frac{m}{m+1}} \quad (4.13)$$

Allo stesso modo posso eguagliare le relazioni (4.6) e (4.8) secondo la (4.5) e scriverle per il valore nominale di temperatura esterna T_{e0} e per un altro valore T_e , come espresso dalla (4.14).

$$\frac{T_f - T_r}{T_{f0} - T_{r0}} = \frac{T_e}{T_{e0}} \quad (4.14)$$

Dalla quale si può ricavare:

$$T_f = T_r + \frac{T_e}{T_{e0}} * (T_{f0} - T_{r0}) \quad (4.15)$$

Di conseguenza unendo la (4.15) e facendo uso della (4.13) e (4.4) posso ricavare la differenza fra temperatura di mandata e dell'ambiente riscaldato:

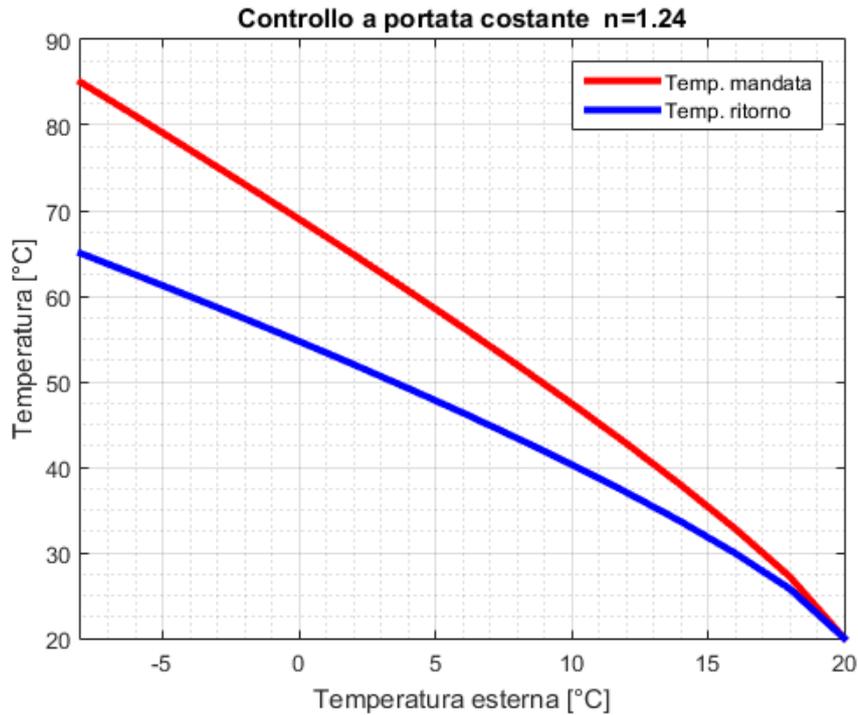
$$T_f = T_r * \exp \left[\left(\frac{T_e}{T_{e0}} \right)^{\frac{1}{m+1}} * \ln \left(\frac{T_{f0}}{T_{r0}} \right) \right] \quad (4.16)$$

Quindi sviluppando la (4.16) per isolare T_f e T_r esprimendoli in base alla temperatura esterna e ai valori di progetto, ottengo la (4.17) e la (4.18)

$$T_r = \frac{\frac{T_e}{T_{e0}} * (T_{f0} - T_{r0})}{\exp \left[\left(\frac{T_e}{T_{e0}} \right)^{\frac{1}{m+1}} * \ln \left(\frac{T_{f0}}{T_{r0}} \right) \right] - 1} \quad (4.17)$$

$$T_f = \frac{\frac{T_e}{T_{e0}} * (T_{f0} - T_{r0}) * \exp \left[\left(\frac{T_e}{T_{e0}} \right)^{\frac{1}{m+1}} * \ln \left(\frac{T_{f0}}{T_{r0}} \right) \right]}{\exp \left[\left(\frac{T_e}{T_{e0}} \right)^{\frac{1}{m+1}} * \ln \left(\frac{T_{f0}}{T_{r0}} \right) \right] - 1} \quad (4.18)$$

In questo modo ottengo i valori di T_f e T_r in funzione della sola T_e , considerando costanti i valori di progetto. Nelle seguenti figure sono mostrati gli andamenti delle temperature di mandata e di ritorno nel caso di temperatura esterna di progetto pari a -8 °C e temperature di mandata e ritorno pari a quelle dell'impianto.



4-2 Controllo a portata costante

Come si può notare dalla figura 4-2 la differenza di temperatura del fluido tra mandata e ritorno è massimo in corrispondenza delle condizioni esterne di progetto e diminuisce man mano che la temperatura esterna aumenta. Il fabbisogno di calore degli edifici si annulla quando la temperatura esterna raggiunge il valore di set-point di temperatura interna (20 °C). Per tutto il periodo considerato la portata viene mantenuta costante.

4.2 Regolazione tramite controllo della portata a temperatura di mandata costante

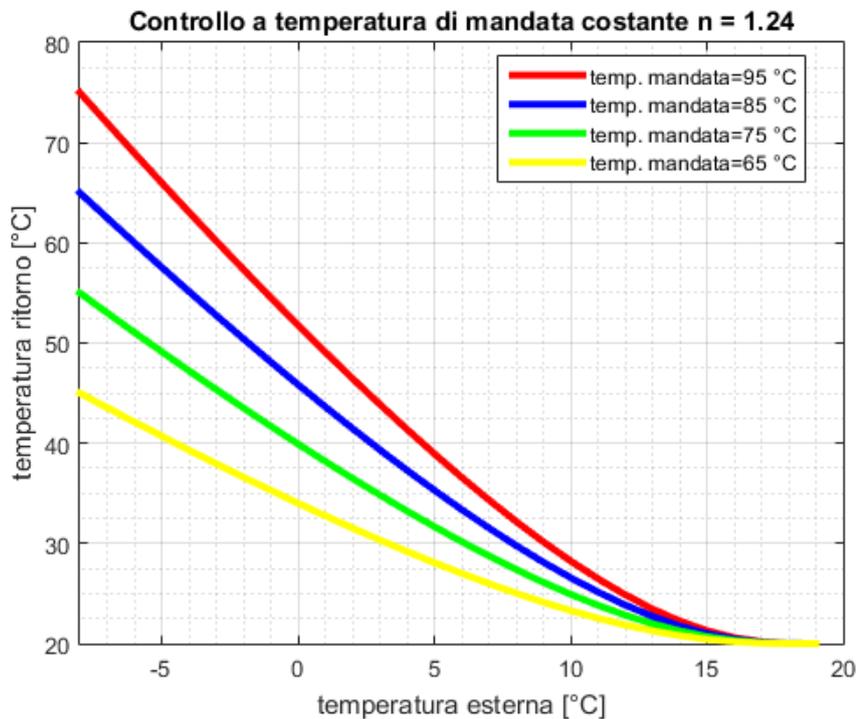
In questo primo metodo per il controllo dell'energia termica distribuita in rete, è la portata circolante ad essere variata. In condizioni di massima richiesta, la portata circolante è massima e decresce all'aumentare della temperatura esterna. La temperatura di ritorno è influenzata dalla temperatura esterna e dalla portata circolante in rete, la temperatura di mandata invece viene mantenuta costante pari a quella nominale. Utilizzando le equazioni (4.4) e (4.13) per un valore iniziale pari al

parametro nominale di temperatura esterna T_{e0} e per un altro valore T_e qualunque si ottiene:

$$\frac{T_e}{T_{e0}} = \left(\frac{T_f - T_r}{\ln\left(\frac{T_f}{T_r}\right)} * \frac{\ln\left(\frac{T_f}{T_{r0}}\right)}{T_f - T_{r0}} \right)^{\frac{m+1}{m}} \quad (4.19)$$

Essendo la (4.19) un'equazione non lineare, per trovare T_r e dunque tutti i valori di t_r occorre risolverla numericamente, ad esempio tramite il metodo di bisezione o il metodo di Newton. Esiste anche una funzione di MATLAB[®] chiamata “*fsolve*”, la quale trova automaticamente le radici della funzione.

Nel grafico seguente sono mostrati i valori di temperatura di ritorno in funzione della temperatura esterna, mantenendo costante la temperatura di mandata. Nel grafico sono ipotizzate diverse temperature di mandata.



4-3 Controllo a temperatura di mandata costante

Come si può notare, in condizioni di progetto la temperatura di ritorno coincide con quella nominale, man mano che la temperatura esterna aumenta, la temperatura di ritorno diminuisce. Il ΔT tra mandata e ritorno aumenta molto velocemente in caso di incremento della temperatura esterna, il che potrebbe sembrare in contraddizione con la minore richiesta di calore delle utenze. Tale fatto sarà giustificato di seguito in quanto la portata circolante subirà una riduzione in corrispondenza di aumenti di temperatura esterna e viceversa.

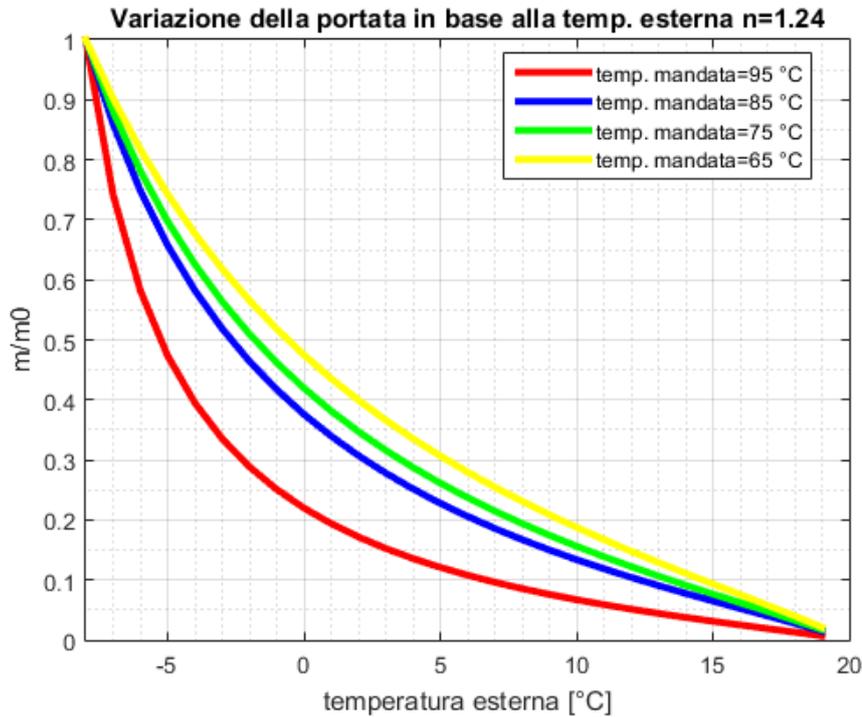
Sostituendo ora all'equazione (4.5) la (4.6) e la (4.8) per un valore iniziale di temperatura esterna T_{e0} e per un qualsiasi altro valore T_e si ottiene:

$$\frac{T_e}{T_{e0}} = \frac{T_f - T_r}{T_f - T_{r0}} * \frac{m}{m_0} \quad (4.20)$$

Pertanto:

$$\frac{m}{m_0} = \left(\frac{T_f - T_r}{T_f - T_{r0}} \right)^{\frac{1}{m}} * \left(\frac{\ln \frac{T_f}{T_{r0}}}{\ln \frac{T_f}{T_r}} \right)^{\frac{m+1}{m}} \quad (4.19)$$

Nella seguente figura è mostrato l'andamento della portata rispetto a quella nominale. Come già anticipato, l'aumento di ΔT tra mandata e ritorno, dovuto all'incremento della temperatura esterna, è accompagnato da una diminuzione di portata circolante. Si può notare altresì che più la temperatura di mandata è alta, maggiore è la pendenza della curva (portate minori a parità di temperatura esterna) e viceversa. La portata si annulla una volta che la temperatura esterna ha raggiunto i 20 °C.



4-4 Variazione della portata in base alla temperatura esterna

Nel paragrafo che segue sono confrontati i metodi di parzializzazione dei carichi appena descritti con le condizioni attuali di funzionamento dell'impianto. Nel particolare si valuteranno i risparmi energetici ed economici che se ne ricaverebbero, in caso di attuazione, per una stagione di riscaldamento.

4.3 Comparazione dei risultati

Vengono di seguito riportati i risultati ottenuti dalle simulazioni effettuate con i metodi precedentemente illustrati. Come riferimento sono prese in considerazione le condizioni attuali di funzionamento, le quali sono state trattate nel capitolo 3. In particolare viene effettuato un confronto sul risparmio sia energetico che economico che ne deriverebbe dall'implementazione di uno dei due metodi di controllo. I risparmi energetici sono valutati in base alla variazione delle perdite energetiche

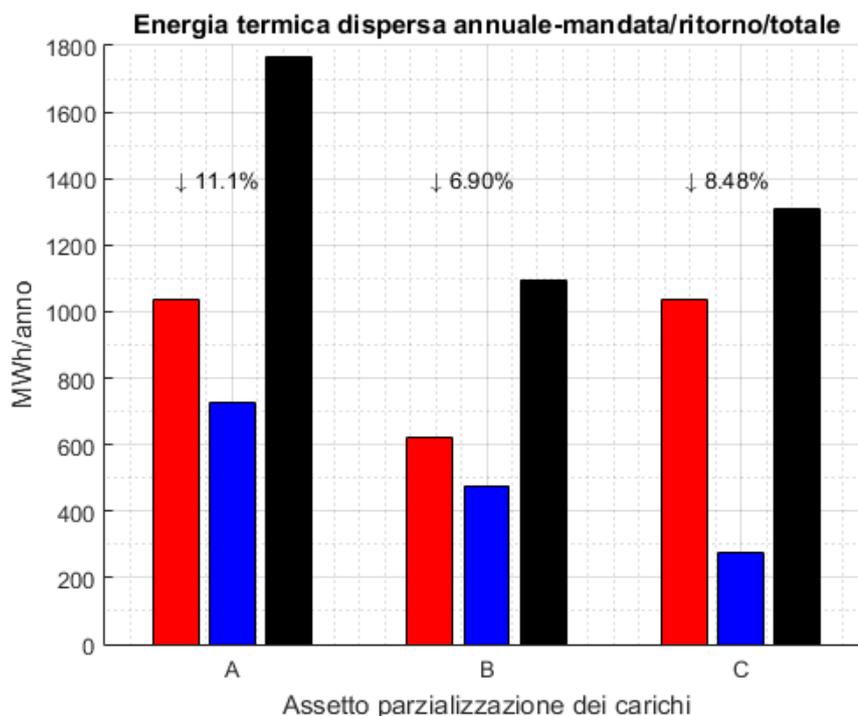
della rete e in base alla variazione dell'energia richiesta dalle pompe (perdite di carico).

Verrà inoltre fatta una analisi di sensitività, tramite la variazione dei parametri nominali in modo da ottenere un'indicazione su quali possono essere gli effetti indotti da tali variazioni. Si è visto inoltre che la variazione dell'indice n non influisce in maniera significativa sull'esito dei risultati, dunque si è deciso di utilizzare un valore medio, pari a $n= 1,30$, per lo sviluppo di tutti i calcoli.

Per quanto riguarda le comparazioni, si è deciso di mantenere costante il fabbisogno di energia termica annuale anche se, nella realtà, tali configurazioni potrebbero indurre dei risparmi di energia primaria dovuti alle minori temperature di esercizio. Per cui ci si limiterà a confrontare i risparmi dovuti alle minori perdite di calore nella rete. 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. Come già anticipato nel paragrafo 3.4.1 tale semplificazione induce un errore minore all' 1%. La semplificazione effettuata risulta pertanto giustificabile.

4.3.1 *Perdite di calore*

Viene riportata di seguito la comparazione dei risultati relativi alle simulazioni. Per semplicità, viene chiamato caso "A" la configurazione senza parzializzazione dei carichi, caso "B" il controllo a portata costante e caso "C" il controllo a temperatura di mandata costante. In questo primo confronto vengono mantenute le condizioni originarie di progetto, ovvero con temperatura di mandata e di ritorno pari a 85 °C e 65°C rispettivamente.



4-5 Confronto dei metodi di parzializzazione

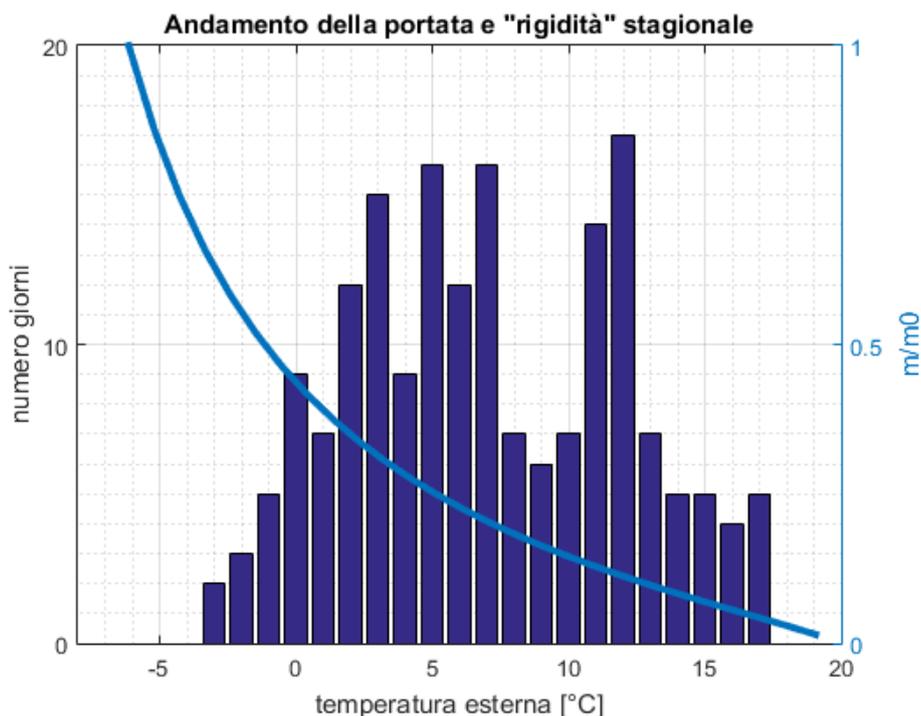
Una prima conclusione che si può trarre è che l'utilizzo dell'approccio "B" da luogo ad una rete che dal punto di vista delle perdite di calore è complessivamente più efficiente. Si osserva infatti come le perdite di calore nella rete con controllo a portata costante siano circa il 18% in meno rispetto alla rete con controllo a temperatura di mandata costante. Rispetto al caso "A", si arriva invece ad una riduzione delle perdite di calore intorno al 38%.

È inoltre osservabile una delle più importanti differenze fra metodo "B" e metodo "C", ovvero la diversa gestione delle temperature in mandata e ritorno dalle utenze. Sotto il controllo di tipo "B" le temperature alla mandata e al ritorno vengono entrambe modificate per adattarsi alla temperatura ambientale; questo non avviene sotto il controllo di tipo "C", 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 in ritorno osservabili nell'approccio di tipo "C", dove le prime arrivano a coprire l'80% del totale; nell'approccio di tipo "B" le perdite totali sono suddivise in modo apprezzabilmente più uniforme.

4.3.2 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 caso “B” 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, con l’approccio di tipo “C” la portata viene attivamente modificata a seconda della potenza richiesta dalla rete (figura 4-4).

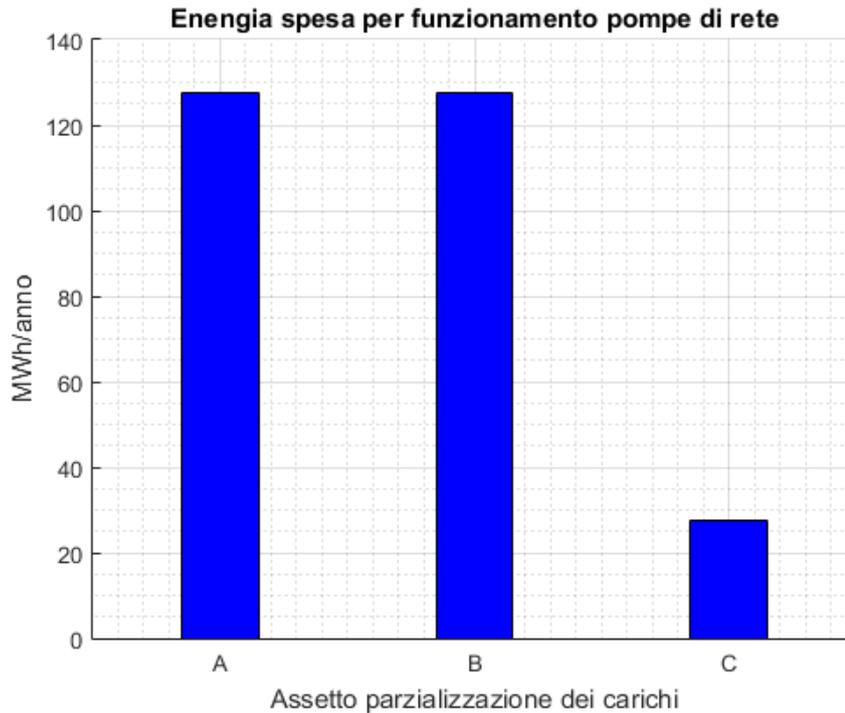
La riduzione della portata dispacciata nel caso “C” all’aumentare della temperatura ambientale comporta una minore velocità del fluido termovettore nella rete, andando a limitare il valore del coefficiente di attrito λ e dunque delle perdite di carico sostenute. Questo effetto è particolarmente evidente in quanto le condizioni di funzionamento tipiche di questa rete sono di forte parzializzazione rispetto al carico di picco. A tal scopo è utile il seguente grafico che mostra l’andamento della portata in base alle condizioni di progetto dell’impianto e il numero di giorni in cui è stata registrata una data temperatura esterna. I valori di temperatura esterna sono quelli utilizzati per i calcoli precedenti e corrispondono alla stagione di riscaldamento 2016/2017 per il comune di Leini.



4-6 Andamento della portata e "rigidità" stagionale per la stagione 2016/2017 nel comune di Leini

Come si può notare, in queste condizioni, l'impianto non lavorerebbe mai nelle condizioni di progetto e per la maggior parte della stagione si avrebbe una forte parzializzazione del carico. Queste condizioni spiegano inoltre le disuniformità nelle perdite di calore per il caso "C"; l'impianto, lavorando per la maggior parte del tempo con forte parzializzazione del carico, induce delle temperature di ritorno molto basse e dunque limitate perdite di calore.

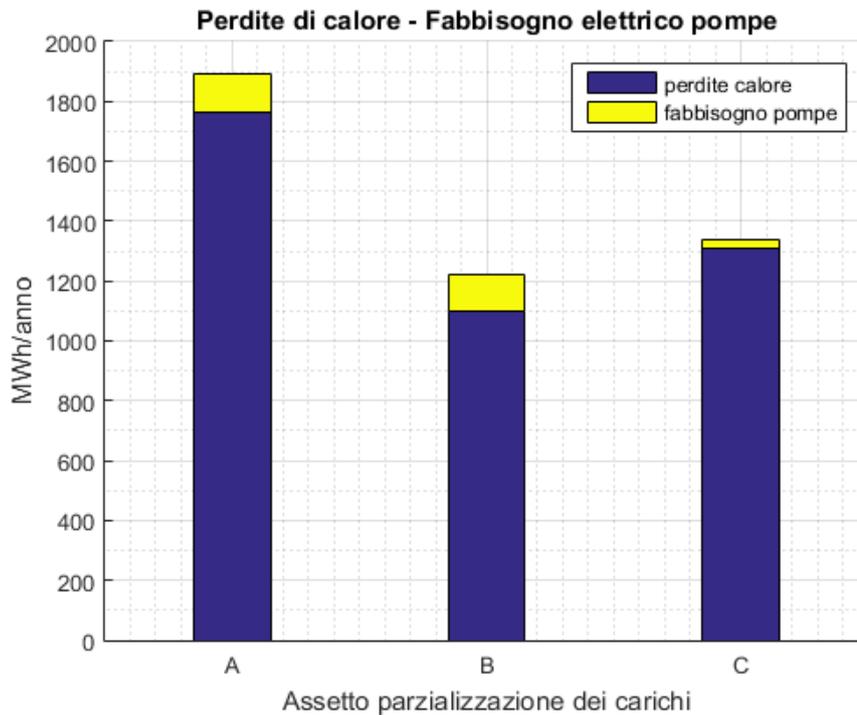
Nella figura 4-7 sono mostrati i valori di energia elettrica spesa per il funzionamento delle pompe nei tre casi illustrati sopra. Come si può vedere, nelle configurazioni "A" e "B" l'energia spesa è la stessa in quanto le pompe funzionano alla loro portata di progetto per ogni istante di tempo, nel caso "C" invece, abbiamo una notevole diminuzione dei consumi legata alla forte parzializzazione dei carichi. La differenza percentuale rispetto ai primi due casi ammonta all'80%.



4-7 Energia spesa per il funzionamento delle pompe di rete

4.3.3 Risparmio economico e emissioni di CO₂ evitate

Il grafico 4-8 mette insieme quanto esposto nei due paragrafi precedenti, in modo tale da valutare un ipotetico risparmio economico derivante dalle minori dispersioni di calore e dal minore uso di energia elettrica per l’approvvigionamento delle pompe. Come si può notare, dal punto di vista energetico, il metodo di controllo a portata costante (“B”) garantisce in maniera complessiva un risparmio energetico maggiore. Il contributo maggiore di risparmio è dato dalle perdite di calore nella rete, le quali sono nettamente minori rispetto al caso “A” (-37 %) e comunque minori rispetto al caso “C” (-18%). Al fine di valutare se il risparmio economico premia comunque il metodo a portata costante, occorre prendere in considerazione il costo dell’kWh elettrico e il costo del kWh termico.



4-8 Grafico riassuntivo: somma delle perdite di rete e fabbisogno delle pompe

Per quanto riguarda il costo del kWh elettrico si è assunto un valore di 0.15 €/kWh il che equivale a dire 150 €/MWh, il quale rappresenta un valore medio realistico per un tipico contratto di un utente operante nel settore industriale.

Per quanto riguarda il costo del kWh termico, si è fatto ricorso ai dati forniti dall'impianto per la stagione 2016/2017:

- Produzione annua di energia termica : 15886 MWh
- Costo annuo di approvvigionamento della biomassa : 417752 €

Da cui si ricava facilmente un valore di 0,0263 €/kWh il che equivale a dire 26,3 €/MWh. A questo punto valori di energia ricavati nei paragrafi 4.4.1 e 4.4.2 sono dunque moltiplicati per il costo unitario di energia termica ed elettrica.

Nella tabella 4-9 sono riportate le “spese economiche” relative alle perdite di calore e all'energia necessaria al pompaggio del fluido termovettore nella rete.

		spesa per perdite di calore nella rete	spesa per il pompaggio	totale
Tipo di configurazione	metodo "A"	€ 46.390,57	€ 19.137,00	€ 65.527,57
	metodo "B"	€ 28.837,95	€ 19.137,00	€ 47.974,95
	metodo "C"	€ 35.412,95	€ 3.960,00	€ 39.372,95

4-9 Spesa economica per le dispersioni di calore e pompaggio del fluido termovettore nella rete.

Come si può notare dalla tabella 4-9 il metodo "B" pur garantendo complessivamente il maggiore risparmio di energia, non restituisce gli stessi risultati per quanto riguarda il lato economico. A pesare è l'alto costo dell'energia elettrica necessaria per il funzionamento delle pompe di rete. Per quanto riguarda il metodo "C" la spesa sostenuta per il funzionamento delle pompe ha un peso nettamente inferiore rispetto agli altri due casi (-80%). In generale possiamo affermare che, adottando i seguenti metodi per la parzializzazione dei carichi, si può arrivare ad un risparmio economico, rispetto al metodo "A", pari a:

- Metodo "B": 17 552 €/anno;
- Metodo "C": 26 154 €/anno;

Il metodo "C" è dunque quello che garantisce il maggiore risparmio economico.

Le biomasse sono fonti energetiche considerate neutrali ai fini dell'effetto serra in quanto la loro combustione non comporta un incremento della concentrazione atmosferica di anidride carbonica. Il ciclo della CO₂, infatti è chiuso poiché le quantità di anidride carbonica emessa in fase di combustione equivale a quella assorbita dai vegetali durante il processo di crescita. Il bilancio della CO₂, tuttavia non è nullo se si considera l'intero ciclo di vita dei combustibili da biomassa, indipendentemente da quale sia il comparto di provenienza. Va rilevato infatti che le fasi di produzione, di lavorazione e di trasporto delle biomasse sono spesso responsabili di impatti negativi sull'ambiente determinati da consumi di energia e materie necessari a sostenere i processi.

Per quanto riguarda il calcolo delle emissioni di CO₂ evitate, grazie ai risparmi di energia elettrica e termica, si può fare riferimento a più fonti:

- Per quanto riguarda il consumo di elettricità si è fatto riferimento ai dati del rapporto ISPRA, il quale fissa un valore di 340 grammi di CO₂ al kWh di energia elettrica consumata. Tale valore tiene conto del mix produttivo per la produzione di energia elettrica presente in Italia.
- Il fattore di emissione relativo all'energia termica erogata all'utenza si può ricavare in base alle indicazioni definite dal DM 26 giugno 2015 ed alla nota n. 0020300 del Ministero dello sviluppo economico. Il fattore di emissione viene auto-dichiarato dalla società stessa che gestisce l'impianto; in questo caso il valore dichiarato è di 7 grammi di CO₂ riferito all'energia termica erogata all'utenza.

Nella tabella seguente, sono riportati i valori di emissioni di CO₂, secondo quanto descritto precedentemente.

		CO2 emessa per energia elettrica [ton]	CO2 emessa per energia termica [ton]	totale [ton]
Tipo di configurazione	metodo "A"	43,3772	12,3473	55,7245
	metodo "B"	43,3772	7,6755	51,0527
	metodo "C"	8,976	9,4255	18,4015

4-10 Emissioni di CO₂ per i diversi metodi analizzati

Da come si può vedere dalla tabella, il “peso” delle emissioni causate dall'uso dell'energia elettrica è molto alto e rappresenta la maggior parte della CO₂ totale emessa. A pesare è la scelta di considerare la combustione di biomassa a emissioni di anidride carbonica nulla per le considerazioni effettuate precedentemente. In ogni caso si può dire che essendo diminuite le perdite nella rete (casi “B” e “C”)e quindi il fabbisogno di energia primaria, conseguentemente si eviterebbe la combustione di una determinata quantità di materiale e dunque il rilascio di anidride carbonica.

Di seguito vengono riportati i valori di CO₂ risparmiata per i casi “B” e “C”

- Metodo “B”: 4,67 tonnellate/anno di CO₂ risparmiata;
- Metodo “C”: 37,32 tonnellate/anno di CO₂ risparmiata;

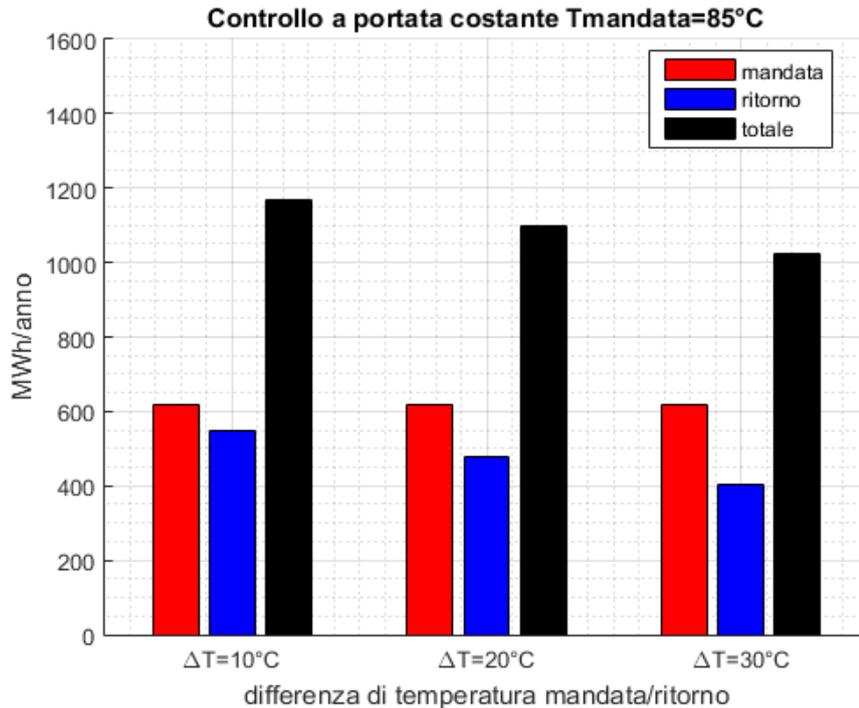
Anche in questo caso il metodo di controllo “C” garantisce risultati migliori in quanto permetterebbe di ridurre la quantità di CO₂ emessa del 67% rispetto al metodo “A” e del 64% rispetto al metodo “B”. Questo è dovuto al fatto che il metodo a portata variabile consente di parzializzare i carichi e dunque limitare l’uso dell’energia elettrica.

4.4 Analisi di sensitività

Lo scopo di questo paragrafo è quello di valutare gli effetti sui consumi che si vengono a creare quando vengono modificati i dati di progetto per le due modalità di controllo descritte in precedenza. In primo luogo verrà fatto variare il ΔT nominale tra mandata e ritorno, mantenendo costante la temperatura di mandata, in secondo luogo verrà effettuata l’analisi opposta, in cui il ΔT sarà mantenuto costante pari al valore nominale e la temperatura di mandata verrà fatta variare.

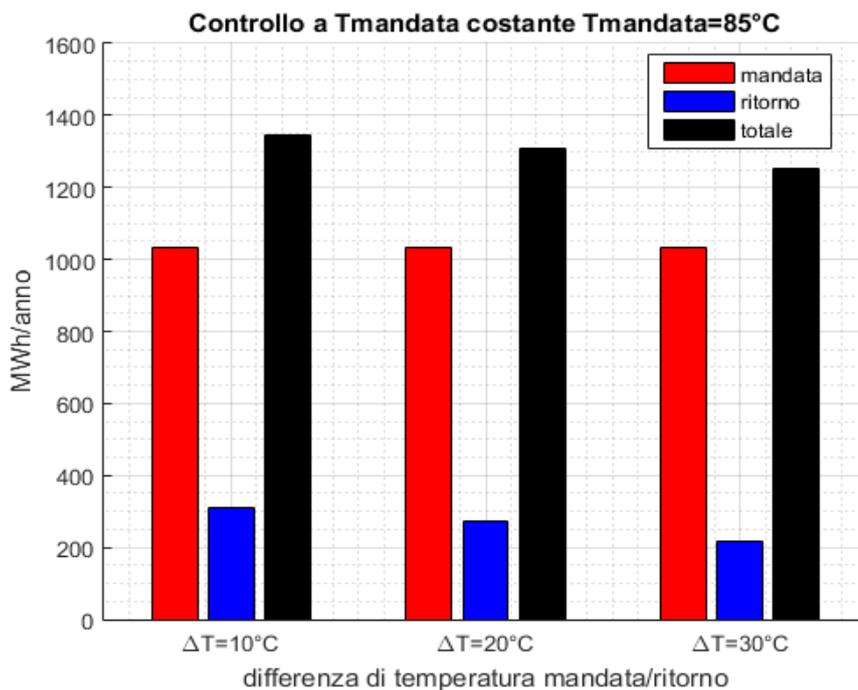
4.4.1 Effetto della variazione di ΔT nominale tra mandata e ritorno

In questa prima analisi viene fatto variare il ΔT nominale tra mandata e ritorno, mantenendo costante la temperatura di mandata. La temperatura di mandata utilizzata è pari a quella nominale, 85 °C, mentre i valori di ΔT valutati sono pari a 30 °C, 20 °C e 10 °C. Nei grafici 4-11 e 4-12 sono mostrati gli effetti della variazione del salto di temperatura tra mandata e ritorno sulle perdite di calore della rete. Nel grafico 4-11 sono mostrati gli effetti nel caso di controllo a portata costante mentre nel 4-12 gli effetti nel caso di controllo a temperatura di mandata costante.



4-11 Variazione delle perdite di calore nella rete in base a diversi ΔT - metodo “B”

Come previsto si osservano perdite di calore in diminuzione man mano che il ΔT tra la mandata e il ritorno aumenta. La diminuzione è di tipo lineare e per ogni step di ΔT si ha una riduzione delle perdite totali che si attesta intorno al 10%. Si può notare altresì che è chiaro come queste variazioni sono da imputare quasi totalmente alla diminuzione delle perdite di calore nelle condotte di ritorno del fluido termovettore per le quali la diminuzione si attesta fra il 29% e il 32%, i decrementi corrispondenti alla mandata sono infatti al di sotto del punto percentuale.



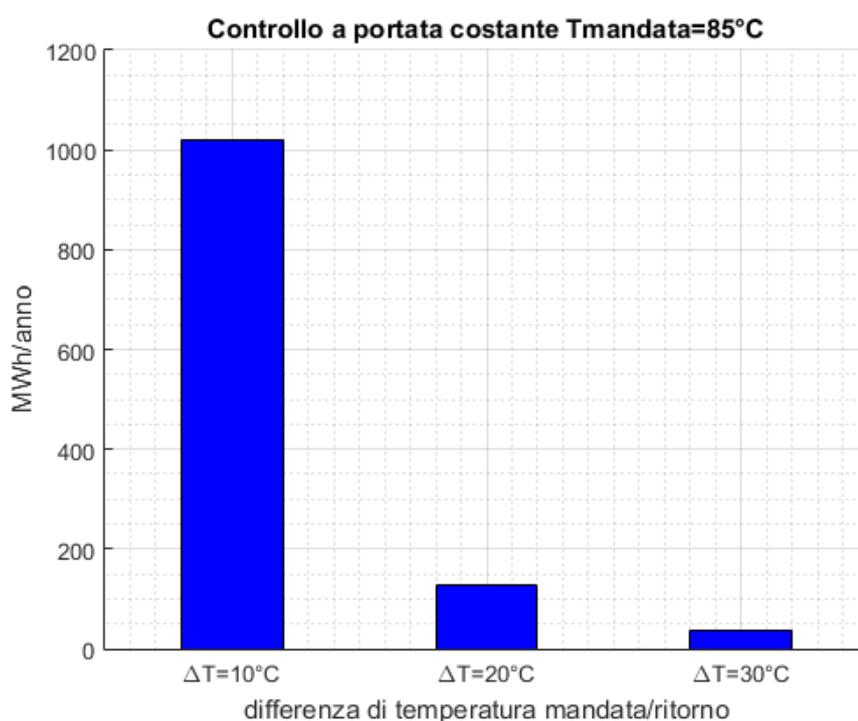
4-12 Variazione delle perdite di calore nella rete in base a diversi ΔT - metodo “C”

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

Dal grafico 4-12 si osserva come la diminuzione delle perdite all’aumentare del ΔT sia ancora presente, nonostante sia meno accentuato rispetto a quanto visto con il controllo di tipo “B”. Questo è legato direttamente al fatto che ad essere maggiormente influenzate dalla variazione del 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 di tipo “C” rappresentano una frazione minoritaria del totale, andando a ridurre l’effetto sul totale. Le perdite alle condutture di ritorno sono numericamente paragonabili a quelle del caso “B” (25%-

32%), le variazioni delle perdite totali oscillano invece tra il 6% e il 7%. Come conferma di quanto detto precedentemente, le perdite nella mandata sono pressoché stabili.

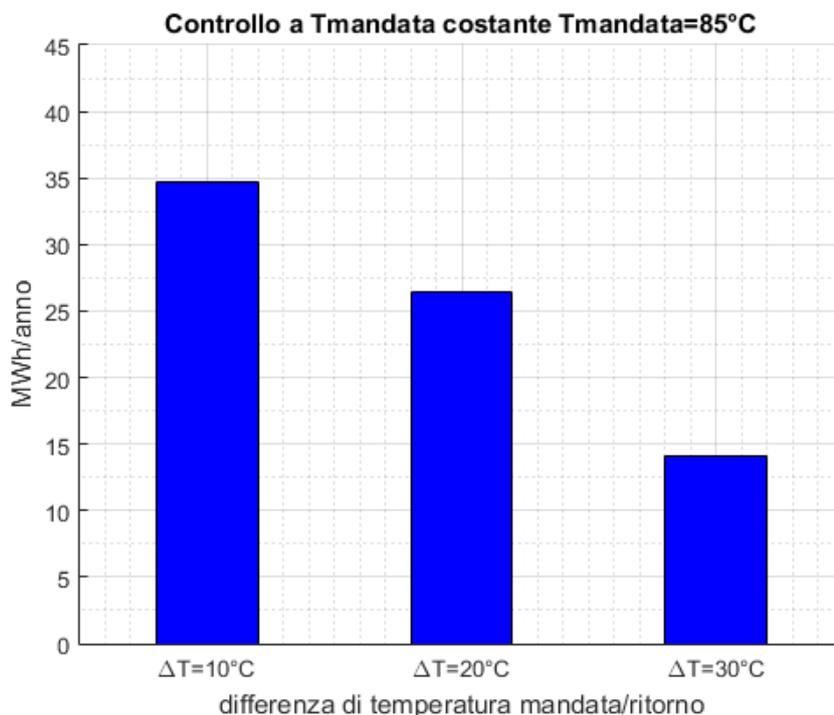
La variazione del ΔT non ha solo ripercussioni riguardanti le perdite di calore, esso va a modificare fortemente le portate che devono essere trasportate dalla rete. La portata, direttamente proporzionale alla velocità del fluido nella condotta, rientra direttamente nel calcolo delle perdite di carico, e un suo aumento porta a incrementi molto differenti a seconda che si utilizzi il metodo “B” o il metodo “C”



4-13 Variazione della potenza necessaria per l'alimentazione delle pompe in base a diversi ΔT - metodo “B”

Dal grafico 4-13 si osserva chiaramente come la differenza di temperatura nominale sia uno dei più importanti parametri da controllare in una rete controllata tramite metodo “B”. Si vede infatti come il mantenimento della portata nominale per tutta la stagione di riscaldamento fa sì che le perdite di carico stagionali siano già di per se 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 .

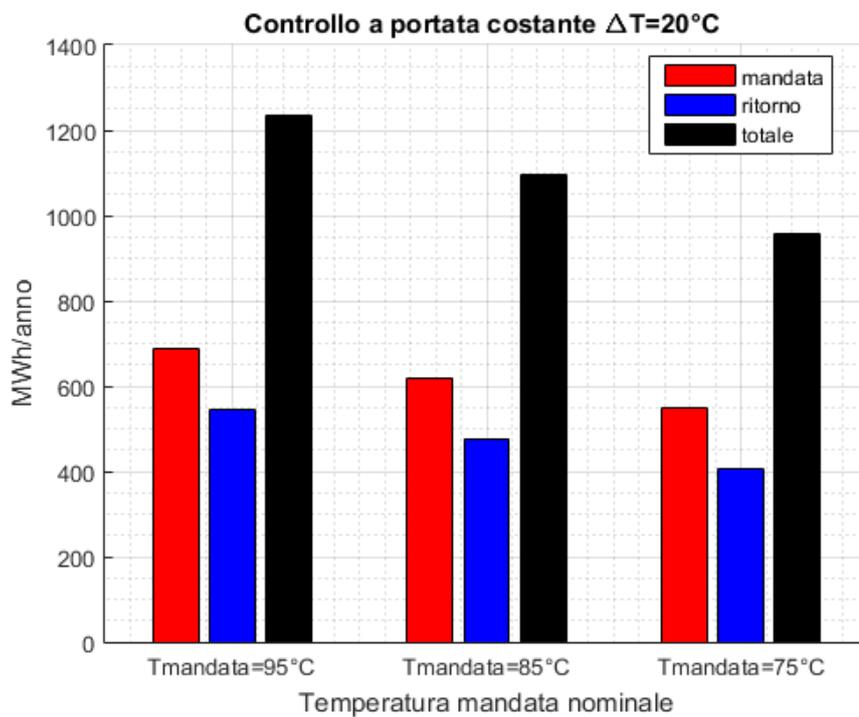


4-14 Variazione della potenza necessaria per l'alimentazione delle pompe in base a diversi ΔT - metodo "C"

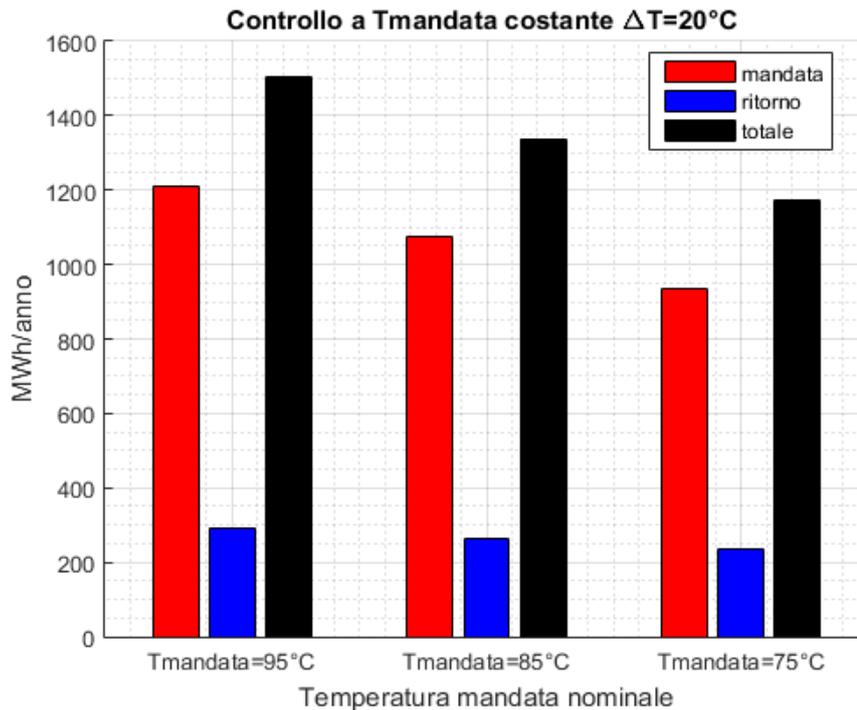
L'incremento delle perdite di carico ottenuto è molto elevato al ridurre del ΔT nominale, per quanto risulta decisamente meno pronunciato rispetto alla controparte a controllo di tipo "B". Questo è dovuto principalmente a quanto riportato nei capitoli precedenti rispetto alla variazione di portata a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

4.4.2 Effetto della variazione 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 95 °C, 85 °C e 75 °C per valutarne le conseguenze a livello di perdite di calore e perdite di carico sulla rete di teleriscaldamento. La differenza di temperatura nominale tra mandata e ritorno invece è stata mantenuta costante pari ad un valore $\Delta T=20$ °C. Successivamente si riportano sotto forma di grafico (4-15 e 4-16) i risultati ottenuti nella simulazione, andando a variare unicamente il valore della temperatura di mandata e il tipo di controllo.



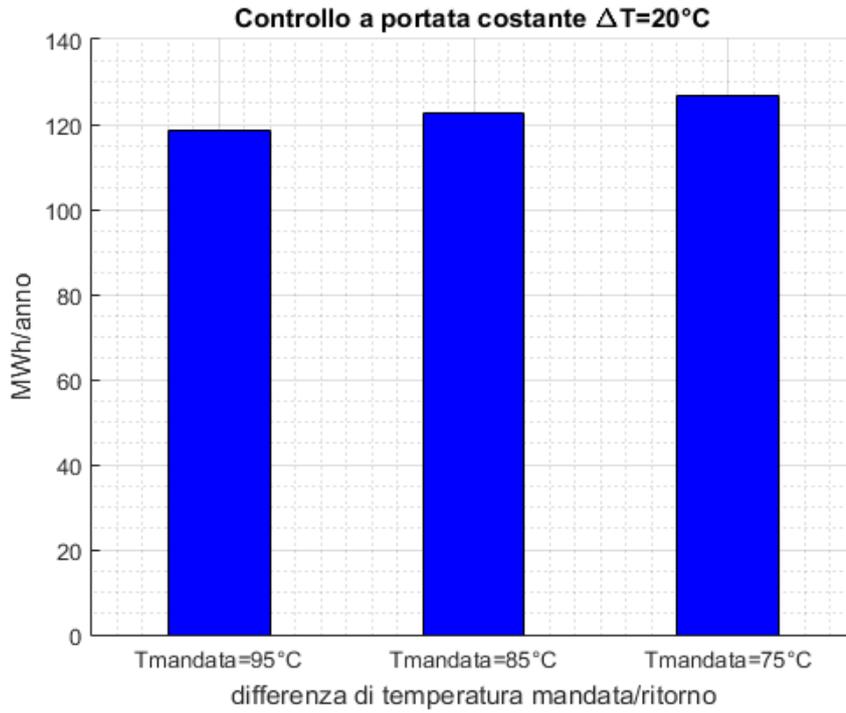
4-15 Variazione delle perdite di calore nella rete in base a diverse temperature di mandata - metodo "B"



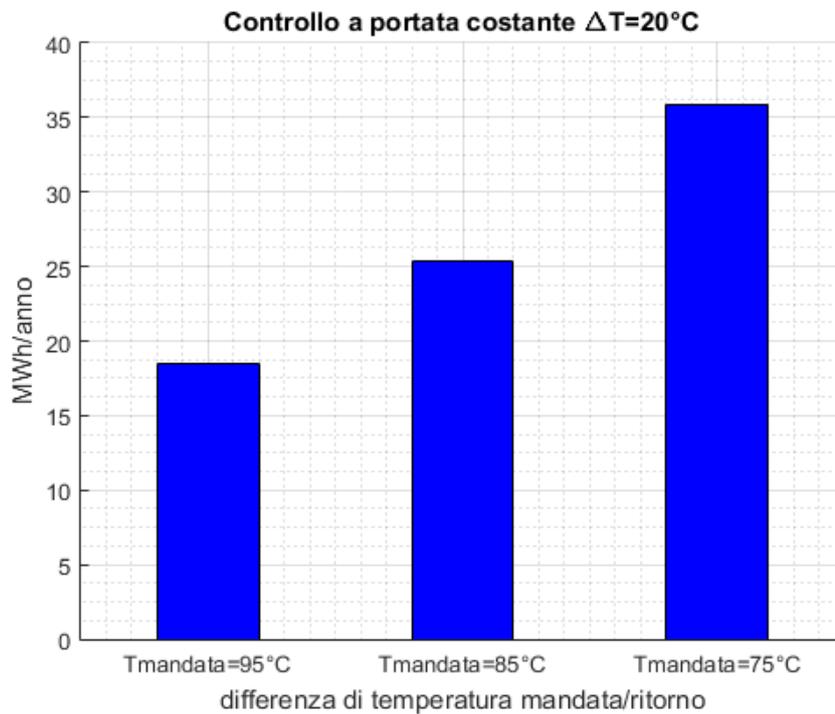
**4-16 Variazione delle perdite di calore nella rete in base a diverse temperature di mandata-
metodo “C”**

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. Le differenze percentuali osservate sono molto simili al variare del tipo di controllo utilizzato e ammontano ad un incremento del 28% fra i casi a $T=70^{\circ}\text{C}$ e $T=90^{\circ}\text{C}$. Si può notare che, utilizzando il metodo “C”, la differenza tra il calore disperso tra mandata e ritorno è sempre elevata e che la variazione della temperatura di mandata nominale ha una ripercussione di pochi punti percentuali sulle perdite nella condotta di ritorno.

Si riportano ora nei seguenti grafici le valutazioni relative all’energia richiesta dalle pompe durante la stagione di riscaldamento al variare della temperatura di mandata nominale.



4-17 Variazione della potenza necessaria per l'alimentazione delle pompe in base a diverse temperature di mandata- metodo "B"



4-18 Variazione della potenza necessaria per l'alimentazione delle pompe in base a diverse temperature di mandata- metodo "C"

Come mostrato dal grafico 4-17 l'aumentare della temperatura nominale del fluido termovettore corrisponde a una riduzione delle perdite di carico stagionali nell'ordine di 2-3 punti percentuali per step. 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 infatti va a ridurre gli attriti provocati dal movimento del fluido termovettore nella condotta, riducendo a sua volta le perdite di carico.

Similarmente a quanto visto con l'approccio di tipo "B", anche nelle simulazioni con l'approccio di tipo "B" (grafico 4-18) 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 di tipo "B" e quello di tipo "C".

Capitolo 5

INTERVENTI DI EFFICIENTAMENTO ENERGETICO PRESSO L'UTENZA

Le modalità di parzializzazione dei carichi descritte nel capitolo precedente hanno dimostrato come sia possibile ottenere un risparmio energetico, dunque economico, tramite il controllo della temperatura del fluido termovettore o della portata di rete, in base alle effettive condizioni climatiche esterne. Tali interventi hanno introdotto però delle temperature di esercizio che in alcuni casi si discostano molto dalle reali condizioni di funzionamento attuali. Potrebbe succedere infatti che il calore fornito alle singole utenze non sia sufficiente a mantenere la temperatura interna al valore di set-point. Questo capitolo intende proporre una serie di interventi di efficientamento energetico che la ESCo in questione potrebbe mettere in atto, presso gli utenti del teleriscaldamento, al fine di poter sfruttare i vantaggi conseguenti alla diversa gestione dell'impianto di teleriscaldamento. I vantaggi che ne deriverebbero sono molteplici e riguarderebbero sia gli utenti finali che la ESCo promotrice dell'intervento:

- La ESCo potrebbe proporre la stipula di un contratto di tipo EPC con l'utente finale, di conseguenza invogliare il contraente a effettuare l'intervento senza la necessità di esborso di denaro;
- L'utente si ritroverebbe con un immobile dal valore aumentato, grazie alle migliori prestazioni energetiche dell'edificio;
- L'utente potrebbe beneficiare di un notevole risparmio economico (variabile a seconda del tipo di intervento) a seguito di una diminuzione dei consumi energetici, sia in estate che in inverno;
- Nel caso di sostituzione dei terminali di riscaldamento tradizionali con terminali a bassa temperatura, (pannelli radianti, riscaldamento a

pavimento, ecc.) l'utente potrebbe beneficiare di un migliore confort termico generale.

- Sia la ESCo che i proprietari degli immobili potranno usufruire delle detrazioni fiscali o degli incentivi previsti per gli interventi di efficientamento energetico. A tal proposito si possono introdurre l'Ecobonus e i certificati bianchi.
- Da tali interventi ne deriverebbe una riduzione degli inquinanti emessi in atmosfera, come conseguenza della minore richiesta di energia termica.

Le modalità con cui può essere formulato un contratto di tipo EPC tra ESCo e beneficiario dell'intervento sono molteplici, a differenza di altri tipi di intervento di efficientamento energetico però, in questo caso subentrano le detrazioni fiscali previste dall'Ecobonus. Lo scopo finale di questi tipi di intervento è quello di garantire all'utente finale un risparmio energetico e alla ESCo un guadagno derivante dalla prestazione effettuata.

5.1 Il riscaldamento a bassa temperatura: perché conviene.

Nel capitolo 2 è stato dimostrato come l'utilizzo di una sorgente a bassa temperatura sia conveniente dal punto di vista exergetico, e dunque nel modo in cui l'energia termica viene sfruttata. Si potrebbe pensare però che un sistema che lavori a 55 °C invece che a 85 °C non sia in grado di soddisfare il fabbisogno energetico dell'edificio, tale considerazione però non è corretta. La quantità di calore richiesta per mantenere alla temperatura desiderata un locale dipende esclusivamente dalle sue caratteristiche costruttive, cioè dal suo grado di isolamento rispetto all'esterno ed alla sua dimensione. Questa quantità di calore è la stessa, qualunque sia il sistema di emissione si decida di installare e qualunque sia la temperatura di regime. La differenza tra un sistema e l'altro si limita, quindi, solamente alle modalità ed ai tempi con cui il calore viene fornito per mantenere le condizioni dell'ambiente nell'intorno dei valori impostati dall'utente. È facile intuire che, l'utilizzo di temperature intorno ai 75/85 °C sia molto più dispendioso dal punto di vista energetico rispetto all'utilizzo di un fluido termovettore a temperature dell'ordine dei

45/55 °C o meno. È tuttavia molto diffusa la convinzione che, per l'utilizzo delle basse temperature, sia necessaria l'installazione di un impianto radiante, il che comporterebbe una spesa notevole e la necessità di importanti lavori di ristrutturazione, soprattutto nel caso di un impianto a pavimento (scelta adeguata nel caso di edifici di nuova costruzione). I normali radiatori non sono considerati adatti, anche perché alle basse temperature, il termosifone non risulta caldo al tatto quanto ci si aspetterebbe. Si tratta però di un mito da sfatare, in quanto entrambe le soluzioni possono dimostrarsi valide. Infatti, in base a quanto detto all'inizio, il radiatore non rovente, ma poco più caldo della temperatura corporea, non comporta in alcun modo un minore riscaldamento, ma, semplicemente, la necessità di un funzionamento più prolungato del generatore, come peraltro accade negli impianti a irraggiamento, in modo da aumentare la quantità di calore fornita all'ambiente. È vero tuttavia che la resa termica dei radiatori a bassa temperatura risulta essere ridotta, per cui per ovviare al mancato apporto termico è necessario effettuare interventi mirati alla riduzione del fabbisogno termico, come la sostituzione dei serramenti con altri più performanti, l'isolamento dell'involucro edilizio ecc. Non è comunque sempre indispensabile un adeguamento, in quanto, a volte, i radiatori già installati risultano già essere sovradimensionati rispetto alle reali esigenze, permettendo così, con interventi minimi, di sfruttare appieno i vantaggi del nuovo regime di temperature.

5.2 Riqualificazione energetica degli edifici

Il patrimonio immobiliare Italiano nella maggior parte dei casi è costituito da immobili costruiti tra gli anni '60 e gli anni '80, periodo in cui non esistevano ancora delle leggi sul risparmio energetico e sulla necessità di ridurre i gas a effetto serra. Solamente dal 1991, tramite la Legge n. 10/91 e i suoi decreti attuativi, è stato introdotto l'obbligo di costruire edifici che rispettassero dei requisiti in materia di contenimento di consumi energetici. Tali limiti erano comunque molto meno stringenti di quanto lo sono gli attuali, occorre dunque tenere presente che anche questi fabbricati possono necessitare di interventi di riqualificazione.

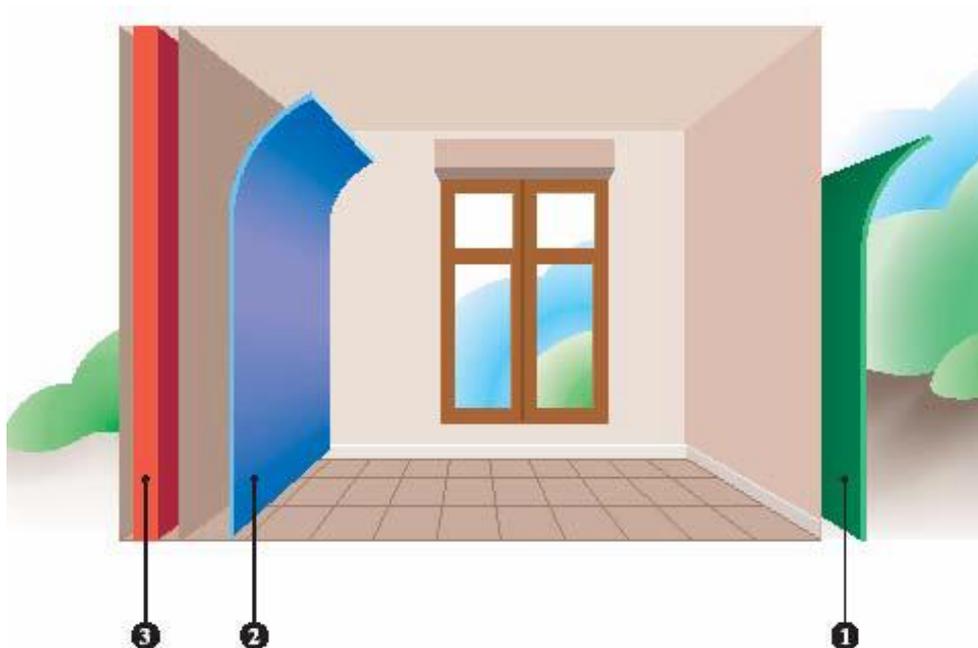
Lo scopo di questo paragrafo è quello di proporre degli interventi mirati alla riduzione del fabbisogno di energia termica, dunque è necessario ridurre le dispersioni di calore verso l'esterno tramite il miglioramento della coibentazione o l'utilizzo di superfici trasparenti più performanti. A questo seguirà un esempio pratico di un intervento di efficientamento energetico e i relativi tempi di ritorno dell'investimento da parte della ESCo.

ISOLAMENTO DELLE PARETI ESTERNE

L'isolamento dei muri può essere realizzato dall'interno, dall'esterno o nell'intercapedine. Tutti e tre i sistemi presentano dei vantaggi: la scelta dell'intervento da adottare dipenderà dallo stato di degrado dell'edificio e dalla somma di denaro disponibile per la sua realizzazione.

1. **Isolamento dall'esterno:** è senza dubbio la soluzione più efficace per isolare bene un edificio. In particolare è molto conveniente quando è comunque previsto un rifacimento della facciata;
2. **Isolamento dall'interno :** è un intervento non eccessivamente costoso che può essere realizzato facilmente. Provoca però una leggera diminuzione dello spazio abitabile e può necessitare della risistemazione dei radiatori, delle prese e degli interruttori elettrici;
3. **Isolamento nell'intercapedine:** quando la parete contiene un'intercapedine è possibile riempirla con degli opportuni materiali isolanti. La spesa è modesta e l'intervento è conveniente;

Per conseguire un effettivo risparmio energetico, ad ogni intervento di isolamento deve corrispondere una nuova regolazione dell'impianto di riscaldamento. Viceversa si rischia di surriscaldare eccessivamente l'edificio, perdendo i risparmi energetici ed economici apportati dall'intervento.



5-1 Coibentazione delle pareti perimetrali esterne

ISOLAMENTO DELLE COPERTURE

Tra tutte le superfici esterne di un edificio, spesso, il tetto è l'elemento che disperde più calore durante la stagione invernale e provoca surriscaldamento nei mesi estivi, a causa del basso livello di isolamento. Isolarlo non è facile, l'importante è individuare la soluzione più adatta alle varie esigenze. Se la copertura non è mai stata isolata è consigliabile intervenire immediatamente. Se la copertura è stata isolata più di 15 anni fa è consigliabile verificare lo stato dell'isolante: deve essere perfettamente asciutto, non lacerato, coprire tutta la superficie del tetto e aver conservato il suo spessore iniziale. Nel caso contrario è meglio provvedere ad un nuovo isolamento.

1. **Copertura piana** : se la copertura dell'edificio è piana (terrazzato) è possibile intervenire dall'interno oppure dall'esterno. L'isolamento esterno è un intervento delicato perché il terrazzo necessita di una accurata impermeabilizzazione e, se è praticabile, anche una adeguata pavimentazione;

2. **Sottotetto non praticabile** : è conveniente posare l'isolante sul pavimento del sottotetto. Isolare la parte inclinata porterebbe solo a riscaldare inutilmente il volume del sottotetto con il calore che sale dagli ambienti sottostanti;
3. **Sottotetto praticabile** : è conveniente isolare dall'interno, fissando l'isolante parallelamente alla pendenza del tetto;
4. **Mansarda**: se la mansarda è abitata conviene posizionare l'isolante all'esterno, sotto i coppi o le tegole, in modo da non ridurre la superficie utile, altrimenti è possibile isolare dall'interno;

I materiali utilizzabili per la coibentazione di pareti e tetto sono numerosi e differiscono gli uni dagli altri per le performance garantite e dunque dal prezzo. La scelta dell'isolante adatto non è semplice e dipende da numerosi fattori quali: le caratteristiche costruttive dell'edificio, il tipo di isolamento che si vuole effettuare e dalla disponibilità economica del beneficiario dell'intervento.

SUPERFICI VETRATE

Un cattivo isolamento delle superfici vetrate (perché costituite da vetri singoli) o una cattiva tenuta dei serramenti, costituiscono una fonte di dispersione di calore da tenere in conto quando si parla di riqualificazione energetica.

1. **Controllo della tenuta dei serramenti**: le infiltrazioni provenienti dalle finestre provocano dei rinnovi di aria eccessivi, con relative dispersioni di calore. È buona norma controllare periodicamente lo stato delle guarnizioni poste sulle battute delle ante e sostituirle se necessario. Naturalmente, se sono presenti vecchi modelli di serramenti che non hanno le guarnizioni è opportuno provvedere all'installazione. Inoltre piccole infiltrazioni d'aria dal telaio possono essere eliminate usando materiali siliconici;
2. **Isolamento delle superfici vetrate**: quando le finestre posseggono un vetro singolo è possibile: sostituire il vetro singolo con un doppio vetro, aggiungere un secondo serramento dietro o davanti al vecchio, sostituire tutto il

serramento, applicare tendaggi pesanti davanti alle finestre, installare una pellicola riflettente sulle superfici dei vetri o delle finestre.

3. **Controllo delle dispersioni di calore dal cassonetto della serranda:** molte volte esso non è isolato. Poiché isolarlo è un intervento piuttosto semplice e poco costoso, laddove c'è lo spazio sufficiente, almeno 2 cm, è consigliato applicare un pannello isolante.

Nelle seguenti tabelle¹²(fonte: ENEA) sono riportati degli esempi di interventi attuabili presso gli edifici costruiti nella zona climatica E (in cui è presente il comune di Leini). Le tabelle suggeriscono gli spessori dei materiali isolanti necessari per intervenire adeguatamente, il costo dei materiali, della manodopera e un punteggio che tiene conto del costo complessivo dell'intervento e dell'effettivo risparmio energetico. A tal proposito vengono presi in considerazione due tipi di edificio: una abitazione unifamiliare e un condominio.

Abitazione unifamiliare (Zona climatica E)

	Isolamento a cappotto delle pareti perimetrali	Isolamento dall'interno delle pareti perimetrali	Isolamento della copertura	Installazione di serramenti con maggiori proprietà isolanti	Isolamento primo solaio (su ambiente non riscaldato o su piloty)
<i>Spessore medio isolante da impiegare</i>	8	6 +1	10	/	8
<i>COSTO Materiale (euro/mq)</i>	20-30	11-15	21-51	300	24
<i>Costo Medio manodopera (euro/mq)</i>	25	15-25	5-20	20-30	25
<i>Risparmio energetico ottenibile (% rispetto a prima dell'intervento)</i>	15-20	15-20	40-45	3-5	10-15
<i>Convenienza</i>	00	00	0000	0	00

5-2 Esempi di interventi su abitazione unifamiliare in zona climatica E

Condominio (Zona climatica E)

¹² http://efficienzaenergetica.acs.enea.it/doc/risparmio_casa_agg.pdf

	Isolamento a cappotto delle pareti perimetrali	Isolamento della copertura	Installazione di serramenti con maggiori proprietà isolanti	Isolamento primo solaio (su ambiente non riscaldato)
Spessore medio isolante da impiegare	8	10	/	8
COSTO Medio Materiale (euro/mq)	20-30	21-51	300	24
Costo Medio manodopera (euro/mq)	25	5-20	20-30	25
Risparmio energetico ottenibile (% , rispetto a prima dell'intervento)	30-35	10-15	8-10	10-15
Convenienza	0000	00	0	00

5-3 Esempi di interventi su condominio in zona climatica E

Nella tabella 5-4 sono riportati due tipi di interventi, a basso costo, che possono essere attuati sugli infissi, al fine di ridurre ulteriormente le dispersioni di calore verso l'esterno.

INTERVENTI				ZONA CLIMATICA			
				A,b,c	D	E	F
INTERVENTI SULLE FINESTRE		COSTI INDICATIVI €/m ²	RISPARMIO ENERGETICO %	CONVENIENZA	CONVENIENZA	CONVENIENZA	CONVENIENZA
CONTROLLO INFILTRAZIONI	GUARNIZIONI SUPPLEMENTARI	6,20	10-15	00	0000	00000	00000
CONTROLLO DISPERSIONI DAL CASSONETTO	ISOLAMENTO	9,00	5-10	00	000	0000	00000

5-4 Interventi a basso costo per gli infissi

5.3 Case Study: intervento di efficientamento energetico presso un condominio allacciato alla rete di teleriscaldamento; contratto EPC .

5.3.1 Caratteristiche dell'edificio e Base dei consumi

Lo scopo del seguente paragrafo è quello di valutare la fattibilità economica e i tempi di ritorno di un investimento per un intervento di efficientamento energetico di un condominio allacciato alla rete di teleriscaldamento, secondo lo schema tipico di un Energy Performance Contract. Il condominio sotto esame è situato in via San Rocco n° 22/24, tale edificio è composto da 12 unità abitative identiche e la volumetria totale riscaldata è pari a circa 2800 metri cubi.

Dopo una accurata diagnosi energetica dell'edificio, ci si è accorti che tale edificio è altamente energivoro; la causa principale di questo alto consumo è il basso livello di

coibentazione delle pareti esterne perimetrali. Il valore medio di consumo al metro quadro riferito all'edificio è pari a circa 139 kWh/m², tale valore corrisponde alla classe energetica F. Nella seguente tabella sono riportati i consumi storici dei tre anni precedenti all'intervento.

	consumo [kWh]	gradi giorno
Anno 1	134452	2569
Anno 2	138316	2663
Anno 3	119137	2278

5-5 Consumi storici e gradi giorno relativi alla stagione

Per prima cosa occorre stabilire un punto di partenza per calcolare i risparmi energetici futuri (*baseline dei consumi* o *base dei consumi*). La base dei consumi è data dalla media aritmetica dei consumi di almeno 3 anni precedenti all'intervento. Occorre a questo punto ripetere l'operazione per quanto riguarda i gradi giorno, in modo tale da avere una base di consumi normalizzata.

Dopo ogni anno, quando occorre valutare il risparmio termico effettivo, si utilizza la *base dei consumi*, calcolata prima della stipula del contratto, depurata dell'effetto distorsivo dovuto all'andamento climatico per la stagione di esercizio corrente.

$$base\ dei\ consumi_{attualizzata} = base\ dei\ consumi * \frac{Gradi\ Giorno_{esercizio\ corrente}}{Gradi\ Giorno_{riferimento}} \quad (5.1)$$

Dove la base dei consumi e i gradi giorno di riferimento sono calcolati come descritto precedentemente e valgono:

- Base dei consumi : 130635 kWh
- Gradi Giorno di riferimento : 2503

Ottenuta la base dei consumi riferita all'anno corrente, si può risalire al risparmio effettivo di energia anno per anno.

5.3.2 Tipo di intervento e costo

Al fine di ridurre le dispersioni termiche dell'involucro edilizio, si è deciso di attuare un intervento che prevede l'installazione di pannelli termoisolanti su tutte le pareti perimetrali dell'edificio e una successiva intonacatura delle stesse. Il materiale termoisolante è costituito da pannelli di lana di vetro, la cui conducibilità termica λ è molto bassa, pari a circa 0.035 W/mK. Il basso costo e il fatto che sia totalmente ignifugo e atossico, ne fanno un materiale adatto per questo scopo. Nella seguente tabella sono riportate le varie voci di costo dell'intervento e la percentuale che ricoprono rispetto all'investimento totale. Per il calcolo del costo totale del materiale isolante si è considerato un prezzo di 25 €/m² e una superficie da isolare pari a circa 680 m².

Voci di costo	Costo	% sul totale
ponteggio	€ 9.614,00	22%
manodopera	€ 17.043,00	39%
componenti varie (colla, rasante, tasselli, rete colore, accessori vari)	€ 9.614,00	22%
pannelli	€ 7.429,00	17%
totale	€ 43.700,00	100%

5-6 Costi dell'intervento di efficientamento energetico

5.3.3 Valutazioni economiche

Al fine di ottenere una valutazione economica dell'intervento di efficientamento energetico e il tempo di ritorno dell'investimento occorre fare ricorso a uno strumento utilizzato in economia: il *valore attuale netto* (VAN). Il valore attuale netto è una metodologia tramite cui si definisce il valore attuale di una serie attesa di flussi di cassa non solo sommandoli contabilmente ma attualizzandoli sulla base del tasso di rendimento. Esso è definito come:

$$VAN_n = R_0 \sum_{k=1}^n \frac{(1 + e_{ef})^k}{(1 + i_{ef})^k} - C_0 \quad (5.2)$$

Dove:

- R_0 rappresenta il risparmio che si avrebbe ai costi attuali delle risorse energetiche;
- $e_{ef} = \frac{e-f}{1+f}$ è il tasso di incremento del costo delle risorse energetiche, dove e è il tasso di incremento del costo, f il tasso di inflazione e i è il tasso di interesse;
- $i_{ef} = \frac{i-f}{1+f}$ è il tasso reale d'interesse, i cui termini sono gli stessi di quanto detto prima;
- n è il numero di anni;
- C_0 è l'investimento iniziale;

Una volta definito il VAN si può introdurre il *tempo di ritorno dell'investimento* o *pay back time* (PBT), definito come il numero minimo n_0 di anni di esercizio per cui risulta $VAN_n \geq 0$. Tale valore ci fornisce un'indicazione di quanti anni è necessario aspettare prima che il nostro investimento sia completamente ripagato. Il valore del VAN_n e, conseguentemente, del tempo di ritorno n_0 , è fortemente dipendente dai tassi di interesse, di incremento del costo delle risorse energetiche, di inflazione. Questi tassi infatti sono difficili da prevedere nel lungo periodo. Attualmente, i tassi di interesse, di inflazione e di incremento del costo delle risorse energetiche sono piuttosto bassi e simili tra loro; e_{ef} è, di norma, un po' maggiore di i_{ef} . Tranne nel caso in cui si faccia riferimento a un investitore ben preciso che intende contrarre un mutuo, si può considerare, per il calcolo di n_0 l'espressione del VAN_n semplificata, a tassi zero.

Secondo quanto riportato nella tabella 5-6 il risparmio energetico ottenibile per un intervento di "cappottatura", nella zona climatica E, varia dal 30% al 35% . Al fine di effettuare una valutazione conservativa, la ESCo garantisce un risparmio annuo del 30%; eventuali risparmi che andranno oltre tale previsione andranno interamente a beneficio dei condomini. In caso contrario, se i risultati attesi non venissero soddisfatti (risparmio energetico annuo minore del 30%), sarebbe la ESCo stessa a

coprire la rata del finanziamento. Al fine di effettuare un'analisi preventiva del tempo di rientro dell'investimento si è calcolato il costo medio della bolletta prima dell'intervento: per far ciò si è moltiplicata la base dei consumi, definita a pag. 98 per il costo medio del kWh termico del teleriscaldamento negli anni di riferimento (0.1 €/kWh). In base a tale valore, si è calcolato il risparmio garantito, pari al 30% di esso.

- Costo medio bolletta: 13063.50 €
- Risparmio medio: 3919.05 €

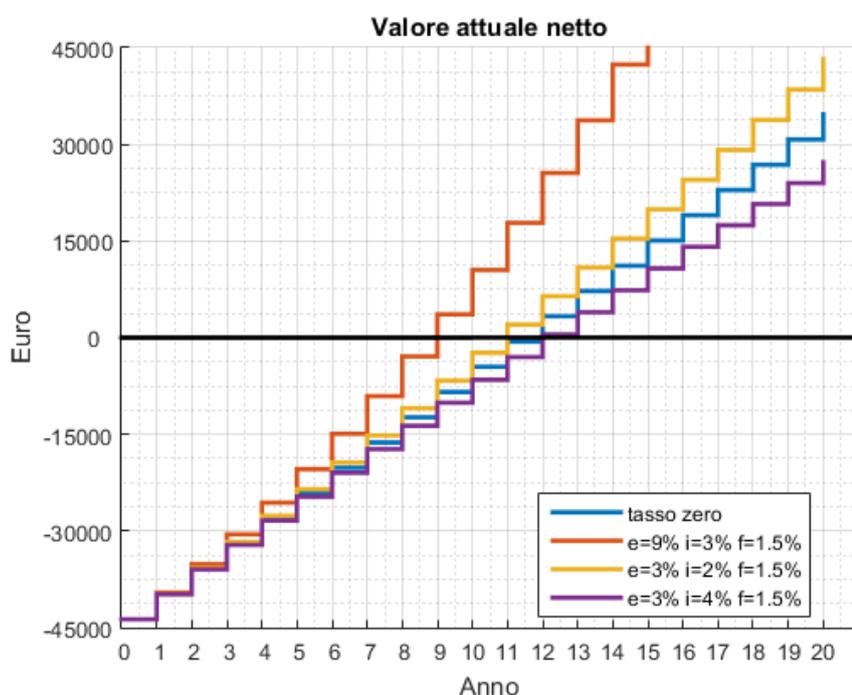
Ipotizzando dunque nulli i vari tassi elencati precedentemente e un risparmio costante pari al risparmio medio, è possibile calcolare il tempo di ritorno dell'investimento.

Anni	1	2	3	4	5	6
Risparmio attualizzato	€ 3.919,05	€ 3.919,05	€ 3.919,05	€ 3.919,05	€ 3.919,05	€ 3.919,05
VAN	-€ 39.780,95	-€ 35.861,90	-€ 31.942,85	-€ 28.023,80	-€ 24.104,75	-€ 20.185,70

anni	7	8	9	10	11	12
Risparmio attualizzato	€ 3.919,05	€ 3.919,05	€ 3.919,05	€ 3.919,05	€ 3.919,05	€ 3.919,05
VAN	-€ 16.266,65	-€ 12.347,60	-€ 8.428,55	-€ 4.509,50	-€ 590,45	€ 3.328,60

5-7 Tempo di ritorno dell'investimento

Dalla tabella 5-7 si può vedere come occorrono 12 anni al fine di ripagare per intero l'investimento. Si ricorda che tale valutazione è stata effettuata considerando i tassi pari a zero. Nel seguente grafico invece è mostrato l'andamento del VAN, ipotizzando diversi valori di i ed e , e considerando un periodo di 20 anni. Da come si può notare, il numero di anni necessari al rientro dell'investimento varia al seconda del valore di e ed i , diminuisce all'aumentare di e e aumenta al crescere di i . Al fine di minimizzare il *pay back time* occorre dunque che il valore di i sia minimo, il caso più favorevole si presenta quando è la ESCo stessa a finanziare il progetto, senza dover richiedere nessun aiuto agli istituti di credito. Per quanto riguarda il tasso di incremento del costo dell'energia, e , non è possibile massimizzarlo, in quanto dipende dalle dinamiche di mercato ed è dunque indipendente dalle scelte contrattuali.



5-8 Andamento del VAN con diversi valori di tasso i ed e

5.3.4 Le detrazioni fiscali come incentivi

Come anticipato nel paragrafo 5.1, chi intraprende interventi di efficientamento energetico, ed in particolare sull'involucro edilizio, può usufruire delle detrazioni fiscali Irpef o Ires introdotte dalla legge di stabilità del 2017, l' Ecobonus. La manovra finanziaria 2018 ha prorogato l'Ecobonus a tutto il 2018 e sarà stabile fino al 2021. Per quanto riguarda i condomini, l'Ecobonus 2018 prevede una detrazione del 65% che può arrivare al 70% se riguarda l'involucro dell'edificio e al 75% se la certificazione prova il miglioramento della prestazione energetica invernale ed estiva. Tali detrazioni avranno una durata di 10 anni e l'importo massimo detraibile per un intervento di "cappottatura" è pari a 60 000 €.

Nel caso in esame, l'importo dell'investimento rientra nel tetto massimo ed è quindi totalmente detraibile. La detrazione è pari al 70% in quanto non è prevista una certificazione del miglioramento della prestazione energetica estiva. Nella tabella 5-12 è riportato il costo effettivo dell'intervento e il relativo risparmio legato alla

detrazione fiscale, inoltre è riportato il risparmio annuo dell'intero condominio e della singola unità abitativa (supponendo una ripartizione uguale tra i condomini) sulla base dei 10 anni di durata delle detrazioni.

ECOBONUS	70%
Costo intervento	€ 43.700,00
Costo effettivo	€ 13.110,00
Risparmio totale	€ 30.590,00
Risparmio annuo condominio	€ 3.059,00
Risparmio annuo unità abitativa	€ 254,92

5-9 Ecobonus

5.3.5 La stipula del contratto

Il contratto EPC prevede che il beneficiario dell'intervento corrisponda alla ESCo un canone annuale in modo tale da ripagare l'intervento e garantire alla ESCo stessa una remunerazione. È la ESCo a decidere la durata, il canone annuale e tutti gli altri aspetti inerenti al contratto, rendendo questa tipologia di contratto molto versatile e adattabile ai vari casi. Ipotizzando i tassi i ed e nulli, la rata annuale che il condominio deve corrispondere alla ESCo non deve essere superiore al risparmio medio calcolato a pag. 100, in modo tale da rispettare i principi di questa tipologia di contratto. Come già detto, eventuali surplus di risparmio andrebbero a beneficio degli utenti ed eventuali deficit verrebbero coperti dalla ESCo

La durata del contratto in questione è stata fissata in 20 anni, in cui i primi 12 servirebbero a ripagare l'intervento e i successivi 8 costituirebbero l'effettivo guadagno della ESCo.

Dal momento in cui viene stipulato il contratto, gli utenti potranno beneficiare di due diverse tipologie di guadagno:

- La prima deriva da eventuali surplus di risparmio; il contratto garantisce il 30% ma, essendo una stima, è possibile che il risparmio sia maggiore. Tale forma di guadagno ha una durata pari a quella del contratto. Ipotizzato pari al 5%

- La seconda deriva dalla detrazione fiscale (70%); tale forma di guadagno è molto più consistente rispetto alla prima ed è indipendente dalle prestazioni garantite dall'intervento. Tale forma di guadagno ha una durata di 10 anni.

Per gli utenti incapienti, ovvero che rientrano nella no-tax area, esiste la possibilità di cedere alla ESCo, o a chi finanzia l'intervento, i crediti di imposta al quale avrebbe il diritto tramite l'Ecobonus. In questo modo anche gli utenti con minori disponibilità economiche verrebbero incentivati alla sottoscrizione del contratto, vedendosi decurtato il canone annuale. La seguente tabella riassume quanto detto fin'ora.

Costo totale intervento	€ 43.700,00	
Costo medio bolletta pre intervento	€ 13.063,50	
ESCO		
Risparmio annuo garantito (canone annuale)	€ 3.919,05	x 20 anni
Ricavi totali	€ 78.381,00	
Guadagno ESCo	€ 34.681,00	
UTENTE		
Risparmio annuo ipotizzabile per intero condominio	€ 653,18	x 20 anni
Risparmio annuo ipotizzabile a unità abitativa	€ 54,43	x 20 anni
Risparmio annuo derivante dalle detrazioni fiscali	€ 254,92	x 10 anni
Risparmio totale ad unità abitativa dal 1° al 10°anno	€ 309,35	
Risparmio totale ad unità abitativa dall 11° al 20°anno	€ 54,43	
Risparmio totale ad unità abitativa	€ 3.637,83	

5-10 Previsione dei guadagni della ESCo e dei risparmi degli utenti

Quanto è riportato in tabella 5-10 è da ritenersi a titolo puramente esemplificativo e non limitativo. Alla fine del contratto, quello che fino a quel momento era il canone annuale destinato alla ESCo, diventa a tutti gli effetti un risparmio che va interamente a beneficio degli utenti.

Tramite il contratto EPC, è dunque possibile effettuare degli interventi di efficientamento energetico senza che il beneficiario debba sobbarcarsi l'onere dell'investimento. Questo tipo di intervento, oltre ad essere a costo e rischio zero per l'utente, permette di accedere alle detrazioni fiscali, le quali, anche se in maniera indiretta, garantiscono un risparmio di denaro, che si va a sommare a quello derivante dall'effettivo risparmio energetico.

Dal punto di vista della ESCo invece, la questione è più delicata e non priva di rischi: in primo luogo è di fondamentale importanza la valutazione di fattibilità dell'intervento, dei tempi di ritorno dell'investimento, e del risparmio garantito. Occorre inoltre effettuare un'analisi rischio economico precisa e dettagliata. Il guadagno ipotizzato non è elevato, tenendo presente l'alto rischio economico a cui si espone la ESCo e che esso è distribuito sull'arco di 20 anni, questo è il principale motivo per cui le ESCo difficilmente attuano interventi con investimenti al disotto dei 100 000/150 000 €. Un altro aspetto fondamentale è la disponibilità economica della ESCo: le società con una bassa disponibilità economica saranno costrette a ricorrere al finanziamento tramite terzi e dunque i guadagni verrebbero ancora meno.

CONCLUSIONI

Nella prima parte di questo elaborato è stata effettuata un'analisi energetica delle condizioni di funzionamento attuali dell'impianto di teleriscaldamento di Leini, successivamente sono stati studiati due diversi approcci alternativi per il controllo della rete stessa. Si è visto in particolare come entrambi i metodi garantissero un risparmio energetico e quindi economico rispetto all'assetto di funzionamento esistente.

Dalle simulazioni effettuate si è ricavato come con l'utilizzo del controllo a portata costante una parte consistente delle perdite totali sia da imputare all'energia necessaria alle pompe per la movimentazione del fluido termovettore. Tale richiesta di energia però dipende fortemente dal valore di ΔT nominale fra mandata e ritorno: a causa del forte incremento delle perdite di carico infatti, configurazioni con un valore di ΔT nominale minore di 20°C appaiono difficilmente giustificabili. Le perdite di calore dalla rete invece risultano nettamente diminuite rispetto alla configurazione esistente, a causa della netta diminuzione delle temperatura di mandata.

Differentemente, con l'utilizzo dell'approccio a temperatura di mandata costante, il controllo sulla portata spacciata di fluido termovettore porta ad una forte riduzione delle perdite di carico sostenute dalla rete, al costo di un incremento delle perdite di calore rispetto al metodo con portata costante, comunque molto minori rispetto alla configurazione esistente. Di conseguenza le perdite di calore costituiscono la quasi totalità delle perdite di energia.

Si può concludere che, nonostante l'approccio a temperatura di mandata costante presenti indubbi vantaggi dal punto di vista energetico, dunque economico, e offra una maggiore flessibilità rispetto alle condizioni di funzionamento della rete, è però di difficile impiego nelle applicazioni reali. Il controllo della portata, infatti, comporta velocità di scorrimento del fluido termovettore nelle tubazioni molto basse, con conseguenti possibili problemi di formazione delle bolle d'aria e di depositi nelle

condotte; inoltre le temperature di ritorno dalle utenze sono mediamente inferiori a quelle ottenute in controllo a portata costante, rendendo più stretti i vincoli di funzionamento dei terminali d'impianto.

Si conclude che nella pratica applicazione pratica ci si dovrebbe approcciare al problema del controllo della rete con un metodo misto. I due approcci alternativi 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 del controllo a portata costante, ovvero le ridotte perdite di calore e la sua applicabilità, che dal controllo a temperatura di mandata costante, ovvero le ridotte perdite di carico e la maggiore efficienza.

Nella seconda parte dell'elaborato si è visto invece come intervenire sull'efficientamento energetico degli edifici sia di fondamentale importanza, al fine di ridurre in maniera significativa il consumo di energia per il riscaldamento. Abbattere il consumo di energia, soprattutto quella proveniente da fonti fossili, è la sfida di maggiore importanza che deve affrontare l'umanità intera e, in questo campo, le ESCo ricoprono un ruolo fondamentale in quanto promotrici dell'efficienza energetica. Mentre nel settore dell'industria è più facile intervenire, grazie a maggiori disponibilità economiche e una diversa consapevolezza di quanto sia importante l'efficientamento energetico, altrettanto non lo è nel campo dell'edilizia: scarse disponibilità economiche e scetticismo rallentano la crescita delle ESCo che operano in questo settore. Tutto ciò è gravato dai lunghi tempi di ritorno, il che tenderebbe a scoraggiare persino le ESCo stesse. Sussiste inoltre un altro problema che grava su alcune ESCo che, oltre a svolgere interventi di efficientamento, sono anche distributrici di energia termica o elettrica: per quale motivo tali società dovrebbero intervenire sugli edifici, garantendo un risparmio, se sono proprio loro a fornire l'energia a tali edifici?. Per superare tali difficoltà sarebbe opportuno istituire un fondo di garanzia rischi e degli incentivi a favore delle ESCo che decidono di operare nel settore civile.

BIBLIOGRAFIA

- UNI CEI 11352: aprile 2014, Società che forniscono servizi energetici (ESCo).
- F. FURIANI, M.G. LANDI, M.C. NOVELLI, Aspetti normativi del contratto EPC e dei suoi elementi di garanzia per la pubblica amministrazione, ENEA, settembre 2013.
- ACER Azienda Casa Emilia Romagna della Provincia di Reggio Emilia (Dott.sa Elisa Artioli, Dott. Marco Corradi, Ing. Luigi Guerra, Dott.sa Floriana Montanari, Dott.sa Sara Simonazzi, Ing. Alessandro Viglioli) e AESS Agenzia per l'energia e lo sviluppo sostenibile di Modena (Dott. Marcello Antinucci, Dott.sa Lisa Sentimenti), L'Energy Performance Contract (EPC) nel Social Housing.
- F. BUSCAROLI, Teleriscaldamento e fonti rinnovabili: l'esperienza di Ferrara, 2012.
- GESTORE DEI SERVIZI ENERGETICI, Valutazione del potenziale nazionale di applicazione della cogenerazione ad alto rendimento e del teleriscaldamento efficiente, dicembre 2015.
- V.VERDA, Complementi di energetica, slide a.a. 2015-2016.
- F. KALMAR, Energy Conscious Heating, Akadémiai Kiadó, Budapest, 2011

SITOGRAFIA

- <http://www.fire-italia.org/la-certificazione-delle-esco/>
- http://efficienzaenergetica.acs.enea.it/doc/risparmio_casa_agg.pdf
- http://www.edilportale.com/news/2016/11/normativa/ecobonus-la-riqualificazione-energetica-punta-tutto-sui-condom%C3%ACni_54741_15.html
- <http://www.altalex.com/documents/leggi/2017/08/31/ecobonus-condominio>
- <http://www.azzeroenergy.com/strategie-per-lefficienza/strategie-attive/impianti-a-bassa-temperatura/>
- <http://www.eurosportelloveneto.it/docChange/5-Tecnologie%20Efficienza%20Energetica%20Edifici.pdf>
- <https://www.professionalteam.biz/scrivania-tecnica/350-radiatori-a-bassa-temperatura-sfatiamo-il-mito.html>
- <http://www.checkupenergetico.com/news/detrazione-fiscale-cappotto-termico-2017>