

POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Energetica e Nucleare

**Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Energetica e Nucleare**

Tesi di Laurea Magistrale

Analisi dei profili termici isoenergia nelle reti di teleriscaldamento



Relatori

Prof. Vittorio Verda

Ing. Elisa Guelpa

Candidato

Luca Caliri

Luglio 2018

Indice

Introduzione.....	1
1 - Energia ed Era Energetica.....	3
1.1 – World Energy Outlook-2017	4
1.1.1 - Sostenibilità ambientale.....	6
1.1.2 - Sicurezza energetica	7
1.1.3 - Cambiamenti climatici.....	8
1.2 - La situazione cinese e il suo impatto sul panorama mondiale	15
2 - Teleriscaldamento	19
2.1 – Sottosistemi delle reti di teleriscaldamento	21
2.1.1 – Centrali di produzione	21
2.1.2 – Rete di distribuzione	24
2.1.2.1 – Circuito primario	25
2.1.2.2 – Circuito secondario.....	26
2.1.3 – Sottostazioni di pompaggio	26
2.1.4 – Sottostazione di scambio termico	27
2.2 - Il teleriscaldamento in Italia	33
2.3 – Il teleriscaldamento in Italia: stato attuale e potenzialità di sviluppo. 34	
2.3.1 – Evoluzione della volumetria teleriscaldata.....	34
2.3.2 – Potenza termica installata nelle centrali di teleriscaldamento	35
2.3.2 - Risparmi associati al teleriscaldamento	36
2.3.3 – Risparmio di energia primaria fossile.....	36
2.3.2 – Risparmio in termini di minor rilascio di CO ₂ in atmosfera	38
3 - Analisi preliminare: dati sperimentali.....	39
3.1 – Step dell’analisi.....	45
3.1.1 – Calcolo della portata del secondario.....	46
3.1.2 – Calcolo del ΔT medio logaritmico.....	48
3.1.3 – Calcolo di fUA.....	50
3.1.4 – Calcolo di Cmin, Cmax e Cr.....	52
3.1.5 – Calcolo di NTU.....	56

3.1.6 – Calcolo dell'efficienza dello scambiatore e del flusso termico	59
3.1.7 – Calcolo della T_2	62
3.1.8 – Ottimizzatore.....	69
4 – Stato corrente e stato ottimizzato a confronto.....	70
5 - Conclusioni.....	77
Indice delle figure.....	78
Indice delle tabelle.....	80
Bibliografia e Sitografia	81

Introduzione

Il teleriscaldamento rappresenta una tecnologia che, grazie alla possibilità di poter produrre il calore e utilizzarlo in posti diversi dal luogo di produzione, è stato largamente utilizzato in ambito urbano. Esso offre la possibilità di poter produrre simultaneamente energia elettrica e termica ad alto rendimento e avere un basso impatto ambientale rispetto ad impianti tradizionali che si servono dei combustibili fossili per generare la reazione di combustione.

Una caratteristica peculiare delle aree mediterranee è la presenza di un picco nella curva che rappresenta la potenza termica richiesta dalle utenze allacciate alla rete del teleriscaldamento. La ragione dietro questa particolarità risiede nel fatto che, durante la notte, gli impianti vengono spenti. La temperatura dell'acqua che circola nelle tubazioni si abbassa rispetto ai valori che raggiunge con l'impianto in funzione. Al mattino, quando l'impianto viene acceso nuovamente, occorre dunque portare l'acqua a temperatura. La potenza termica richiesta per innalzare la temperatura dell'acqua non è indifferente. Per questa ragione il profilo della richiesta termica dell'utenza presenta un picco in prossimità delle 6:00. A seconda dell'utenza e se questa è autogestita oppure no, il picco si presenta ad orari diversi. La fascia oraria cui questo si manifesta va dalle 4:00 alle 8:00, orari a cui fanno riferimento le simulazioni che sono state svolte per il raggiungimento dell'obiettivo di questo lavoro di tesi.

Poiché gli impianti cogenerativi non sono dimensionati in base al valore del picco ma in base a un valore più basso, per poter funzionare in modo ottimale per la maggior parte del tempo, piuttosto che per brevi periodi, occorre fornire tramite altri sistemi la potenza in eccesso. Una delle tipologie di sistemi integrativi più utilizzati è rappresentata dalle caldaie. Queste hanno un'efficienza minore rispetto agli impianti cogenerativi, non funzionano in assetto cogenerativo, hanno dunque rendimenti più bassi, utilizzano combustibili fossili per realizzare la reazione di combustione e pertanto hanno un impatto ambientale non indifferente.

Obiettivo di questo lavoro di tesi è trovare un modello di scambiatore di calore che sia in grado di ottenere l'andamento della temperatura in uscita sul lato primario. Questa verrà successivamente utilizzata per simulare il comportamento della rete teleriscaldata. Lo studio consentirà infine di ottenere una situazione ottimizzata, rispetto a quella attuale, in cui il

picco della potenza richiesta da ciascuna utenza, giorno per giorno, verrà ridotto rispetto al valore attuale.

Compito dell'ottimizzatore è valutare dei valori ottimali degli anticipi di accensione e spegnimento dell'impianto, per ciascuna delle utenze (di numero maggiore di 750) allacciate alle varie sottostazioni della rete, compatibilmente con la necessità di mantenere nullo il delta energia di ciascuna utenza passando dalla situazione corrente a quella ottimizzata.

Come conseguenza di tale modifica si avrà un aumento del rendimento complessivo dell'impianto, e una riduzione dell'utilizzo delle caldaie e dunque delle emissioni di CO₂ in atmosfera, accompagnate da una situazione isoenergetica per ciascuna utenza prima e dopo l'utilizzo di tale modello.

Il programma che è stato utilizzato per portare a compimento questo lavoro di tesi è MATLAB. Tramite questo è stato possibile scrivere dei codici che descrivessero i vari problemi riscontrati e che si è deciso di trattare e risolvere.

1 - Energia ed Era Energetica

La storia dell'uomo è suddivisa in diverse ere, ciascuna delle quali è caratterizzata da cambiamenti radicali che hanno segnato il passaggio da una condizione ad un'altra. Una delle prime che ci possa venire in mente è sicuramente il passaggio dall'Era preistorica a quella storica. In quel periodo infatti nasce la scrittura, cambiamento epocale che ha consentito il tramandarsi di memorie passate, tradizioni e usanze. Si ha così il passaggio da un modo di tramandare le cose per via orale ad uno per via scritta.

In che era viviamo noi del XXI secolo? Quale termine può meglio indicare e descrivere l'era che stiamo vivendo? Possibilmente una semplice parola non basterebbe. Potremmo parlare di *Era Tecnologica* in quanto, in effetti, lo sviluppo e il progredire delle scoperte tecnologiche hanno portato l'uomo a passare da certe abitudini ad altre. Il modo che aveva esso per rapportarsi ai problemi e alle faccende della vita quotidiana è cambiato radicalmente con la comparsa di una tecnologia sempre più all'avanguardia.

Potremmo affermare allo stesso tempo, e non sarebbe di certo un errore, che stiamo vivendo in un *Era Energetica*. L'evoluzione tecnologica, i numerosi studi e le scoperte fatte in campo energetico, la sensibilità verso nuove risorse di energia, il problema ambientale e la sempre maggiore necessità di energia per compiere ognuna delle attività quotidiane, ha preso luogo ed è oggi una problematica mondiale.

Il problema energetico è infatti, ormai da diversi anni, sulla bocca di tutti. I disastri conseguenti i cambiamenti climatici, l'assenza dell'alternarsi delle stagioni, le nubi di inquinamento sopra le nostre teste, sono fatti che tutti, dai meno esperti a chi fa dell'energia una professione, possono vedere chiaramente con i propri occhi.

Le radici dell'Era Energetica risalgono al XVII secolo con l'avvento della Prima Rivoluzione Industriale. In questo periodo nasce la prima macchina a vapore che ha segnato il passaggio da una produzione manuale ad una automatizzata grazie all'utilizzo delle macchine. L'industria tessile fu quella che, in quel tempo, ha subito un boom enorme. Prima dell'ingresso delle macchine nella storia, tutte le attività erano svolte dall'uomo. Il costo della manodopera non sempre era basso e, inoltre, il tempo necessario per portare a compimento un lavoro talvolta era lungo. Ciò rendeva il settore tessile costoso e rivolto a un pubblico circoscritto. Con l'arrivo delle macchine è stato possibile accelerare tantissimo la produzione dei tessuti portando il prezzo del bene a valori accessibili a tutti.

L'invenzione della macchina a vapore e il boom da essa causato, sono stati tuttavia la primissima causa che ha condotto oggi gli esponenti mondiali a interrogarsi sulla tematica

energetica, proporre soluzioni ai gravi problemi che le industrie e l'abuso dell'utilizzo delle fonti fossili hanno causato al nostro pianeta.

I combustibili fossili, detti anche idrocarburi per la presenza di atomi di carbonio e idrogeno nella loro struttura molecolare, sono ancora oggi la fonte energetica più utilizzata al mondo. Questi si distinguono tra petrolio, carbone e gas naturale. Quando questi vengono bruciati, per produrre energia, rilasciano grandi quantitativi di anidride carbonica ed altri inquinanti che impattano in modo negativo sull'ambiente. Queste fonti energetiche sono state utilizzate per secoli in modo massiccio: anzitutto perché il loro utilizzo ha dei costi minori rispetto a quello delle fonti rinnovabili e secondo poi perché la quantità di energia che questi possono sprigionare è molto alta ^[1]. Tutto ciò va anche introdotto in un contesto in cui lo sviluppo tecnologico non aveva ancora raggiunto i traguardi oltrepassati nei giorni nostri.

1.1 – World Energy Outlook-2017

Nel 1977 nasce il primo World Energy Outlook (WEO), un documento rilasciato dall'International Energy Agency (IEA). Esso rappresenta il riferimento più accreditato sulle analisi del mercato energetico e sulle sue proiezioni: si basa su dati obiettivi e analisi accurate capaci di delineare un trend della domanda e delle scorte di energia ^[2].

I trend e le stime fatte e riportate su questo documento sono stati ottenuti grazie l'utilizzo di un tool: il World Energy Model (WEM). Questo è un modello di simulazione su larga scala realizzato per riprodurre il funzionamento del mercato energetico. Grazie ad esso è possibile simulare delle proiezioni settore per settore e regione per regione per tutti gli scenari analizzati nel WEO ^[3]. Poiché non esiste un'unica storia possibile sul futuro dell'energia globale né un'unica previsione IEA a lungo termine sul settore energetico, il WEO utilizza un approccio basato su vari scenari per evidenziare le scelte chiave, le conseguenze e gli imprevisti che possono accadere ed illustrare come il decorso del sistema energetico possa essere influenzato dalla variazione di alcune di queste variabili, tra cui le politiche energetiche adottate dai governi di tutto il mondo ^[2].

L'edizione del 2017 fa riferimento a tre scenari: New Policies Scenario (NPS), Current Policies Scenario e Sustainable Development Scenario (SDS).

L'NPS ha come obiettivo quello di dare un'idea del ruolo che le attuali ambizioni politiche sembrano dare al settore energetico. Esso comprende sia le politiche e le misure già attuate dai governi di tutto il mondo ma anche i possibili effetti delle politiche annunciate.

L'SDS invece delinea un approccio integrativo per il raggiungimento di obiettivi internazionalmente riconosciuti su temi quali i cambiamenti climatici, la qualità dell'aria e un accesso universale all'energia.

Il CPS invece considera soltanto l'impatto che hanno le politiche e le misure sancite dalla legislazione già a metà del 2017. Questo fornisce una valutazione di dove le politiche esistenti possano portare il settore energetico senza altre influenze da parte del governo [3].

Di seguito viene portato un esempio che fa meglio capire in che modo varia il trend del nostro oggetto di studio seguendo una volta uno scenario, una volta un altro. Il caso studio analizzato nell'esempio è una previsione sulla variazione della quantità di energia primaria totale utilizzata, e allo stesso tempo, una previsione sul diverso utilizzo delle varie fonti energetiche secondo lo scenario NPS prima e SDS dopo.

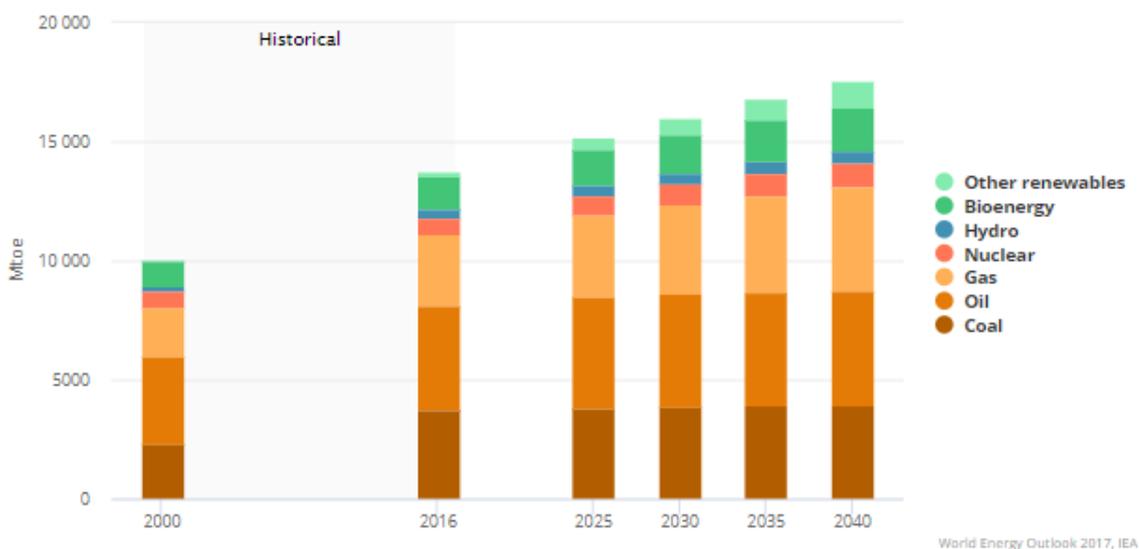


Figura 1: Domanda di energia primaria totale secondo NPS [4]

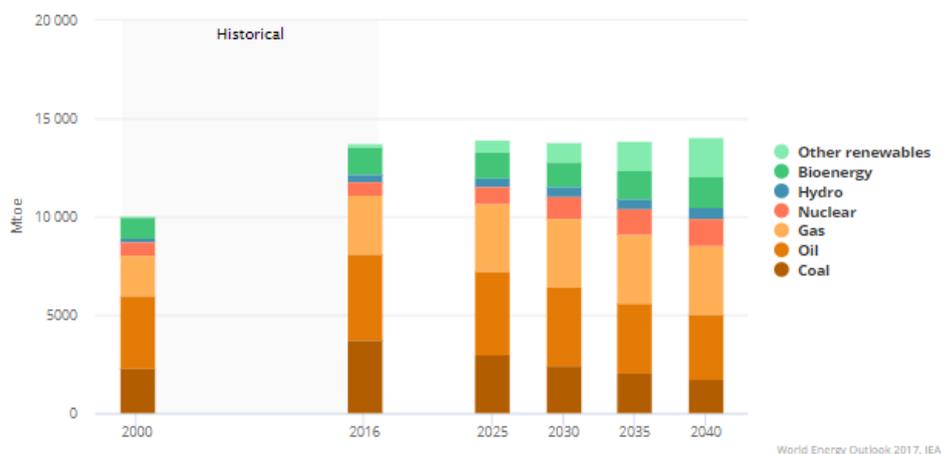


Figura 2: Domanda di energia primaria totale secondo SDS [4]

Dando uno sguardo rapido ad entrambe le figure vediamo chiaramente che in un caso il trend della domanda di energia cresce in modo significativo, nell'altro invece il valore resta più o meno costante rispetto alla situazione presente. Secondo lo scenario NPS la quantità di energia primaria richiesta nel 2040 è pari a quella richiesta nel presente, con l'aggiunta della quantità di energia che oggi la Cina e l'India utilizzano. Secondo lo scenario SDS invece si prevede una piccola crescita della domanda in quanto si ritiene che un miglioramento sul versante efficienza energetica sia bilanciato da un uso meno intensivo di energia. Il diverso utilizzo delle varie fonti energetiche, nello scenario SDS, è l'immagine riflessa di un passaggio verso una realtà che utilizza sempre meno il carbone.

Fatta una piccola introduzione su cosa è possibile trovare all'interno del WEO, vediamo più nel dettaglio, servendoci di grafici e tabelle di vario tipo, qual è la situazione energetica dei nostri giorni, confrontandola con quella del passato e con quella che tramite il WEM è stato possibile prevedere per gli anni a venire. I temi che verranno trattati nel seguito, in modo più approfondito, riguardano: sostenibilità ambientale, competitività economica, sicurezza energetica, inquinamento atmosferico e cambiamenti climatici. Vediamo un po' più nel dettaglio questi settori.

1.1.1 - Sostenibilità ambientale

Cosa intendiamo con il termine sviluppo sostenibile o sostenibilità ambientale? Sono entrambe delle parole che sentiamo spesso ma cosa significano realmente?

Una delle prime e delle migliori definizioni risale al 1987 ed è stata rilasciata dalla *World Commission on Environment and Development*: ***“Humanity has the ability to make development sustainable to ensure that it meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs”*** ^[5].

L'enunciato è abbastanza chiaro e incisivo. Esso recita: *L'umanità ha la possibilità di rendere sostenibile lo sviluppo, cioè di far sì che esso soddisfi i bisogni dell'attuale generazione senza compromettere la capacità delle generazioni future di rispondere ai loro.* Tutto quello che concerne lo sviluppo, da intendersi sotto tutti i punti di vista, non deve in alcun modo limitarsi nel breve-medio termine. La possibilità che è stata concessa a noi oggi, di soddisfare i nostri bisogni e le nostre esigenze, non deve comportare in alcun modo che le generazioni future, possano non godere dello stesso diritto che abbiamo esercitato noi prima di loro. Viene espresso chiaramente, che noi abbiamo la possibilità di fare ciò. Non è

un'utopia. Bisogna semplicemente percorrere la giusta strada, piuttosto che le molteplici strade alternative. Il concetto di sviluppo sostenibile, infatti, impone delle limitazioni che sono legate allo stato raggiunto dalla tecnologia e alla risposta della biosfera di assorbire le conseguenze delle attività dell'uomo.

Si ritiene che il punto di snodo per la transizione a un sempre minore utilizzo del carbone e un sempre maggiore passaggio a sistemi energetici sostenibili, sia l'utilizzo delle energie rinnovabili. Dalle indagini e previsioni della IEA è stato ricavato che:

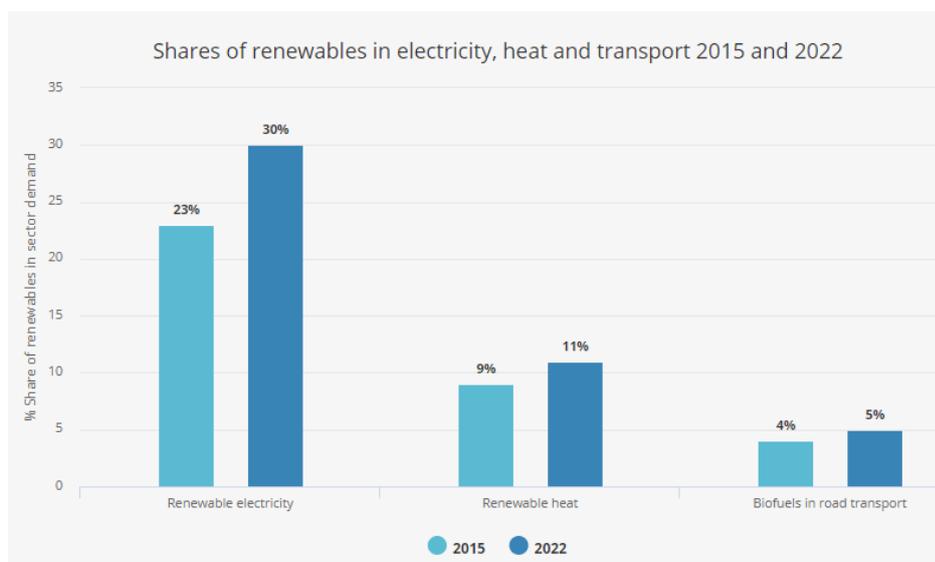


Figura 3: Ieri e domani a confronto: utilizzo delle rinnovabili in tre settori [6]

L'istogramma mostra qual era la percentuale dell'energia rinnovabile utilizzata (2015) per la produzione di energia elettrica, energia termica e biocombustibili utilizzati nel trasporto terrestre e qual è la previsione fatta per il 2022 [6].

1.1.2 - Sicurezza energetica

La IEA definisce sicurezza energetica la situazione in cui si ha una disponibilità continua delle fonti energetiche a prezzo accessibile. Si distingue la sicurezza energetica a lungo termine da quella a breve termine. La prima è relativa agli investimenti per la fornitura di energia, mentre la seconda è relativa alla capacità dei sistemi energetici di adeguarsi rapidamente alla possibile variazione della domanda energetica da parte delle utenze [6].

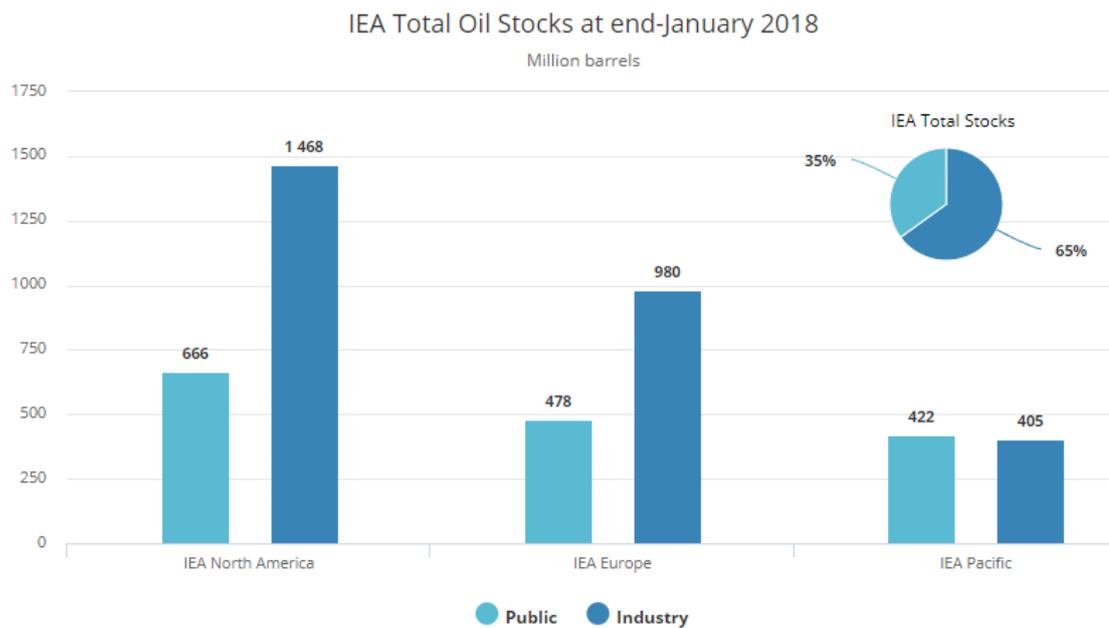


Figura 4: Milioni di barili di petrolio stoccati nel settore pubblico e industriale [6]

1.1.3 - Cambiamenti climatici

Con il termine generico cambiamento climatico in realtà si fa riferimento a tutti i cambiamenti meteorologici mondiali associati all'aumento della temperatura media. I primi dati raccolti, presi un po' come dati di riferimento, risalgono circa al 1850 e dal periodo 1850-1900, la temperatura media mondiale ha subito un incremento di circa 1°C rispetto all'era preindustriale. L'incremento di temperatura è maggiormente legato al fenomeno del riscaldamento globale mentre, per cambiamenti climatici si intendono anche tutte quelle conseguenze causate dall'innalzamento della temperatura stessa [7].

Una migliore definizione di cambiamenti climatici è da attribuire alla NASA che dà la seguente definizione: *"a broad range of global phenomena created predominantly by burning fossil fuels, which add heat-trapping gases to Earth's atmosphere. These phenomena include the increased temperature trends described by global warming, but also encompass changes such as sea level rise; ice mass loss in Greenland, Antarctica, the Arctic and mountain glaciers worldwide; shifts in flower/plant blooming; and extreme weather events."* [8]

Una possibile traduzione di quanto affermato è: *una vasta gamma di fenomeni globali creati prevalentemente dalla combustione di combustibili fossili che aggiungono dei gas che*

intrappolano il calore nell'atmosfera terrestre. Questi fenomeni includono l'incremento della temperatura, descritto dal riscaldamento globale, ma comprendono anche dei cambiamenti quali l'innalzamento del livello del mare, la perdita di massa di ghiaccio in Groenlandia, in Antartide, nell'Artico e nei ghiacciai di tutto il mondo, cambiamenti nella fioritura dei fiori/piante ed eventi metereologici estremi.

Per collegarci a quanto affermato sopra, possiamo dire che nell'atmosfera è presente una *greenhouse* ovvero uno strato di gas, di cui il principale è il vapore acqueo, adibito a intrappolare il calore irradiato dal sole e rifletterne verso la terra una quantità tale da mantenere la temperatura terrestre a livelli accettabili per la vita delle sue specie. Come conseguenza delle attività dell'uomo, si sta generando un eccesso di gas serra, diversi dal vapore acqueo, che non si dissipano con l'aumento della temperatura e che quindi sono causa di un accumulo di calore. Tra i gas serra rientrano l'anidride carbonica, il metano e l'ossido di azoto.

La causa principale della produzione di gas serra è l'utilizzo di energia. La promozione dello sviluppo sostenibile e la lotta ai cambiamenti climatici sono dunque parte integrante di ciascun "Energy planning". L'utilizzo di energia impatta per circa due terzi sulla emissione mondiale di gas serra ed è responsabile di circa l'80% di CO₂ prodotta. Vediamo graficamente quanto affermato. Il grafico seguente mostra l'impatto che hanno sulla produzione della CO₂ diverse attività svolte dall'uomo.

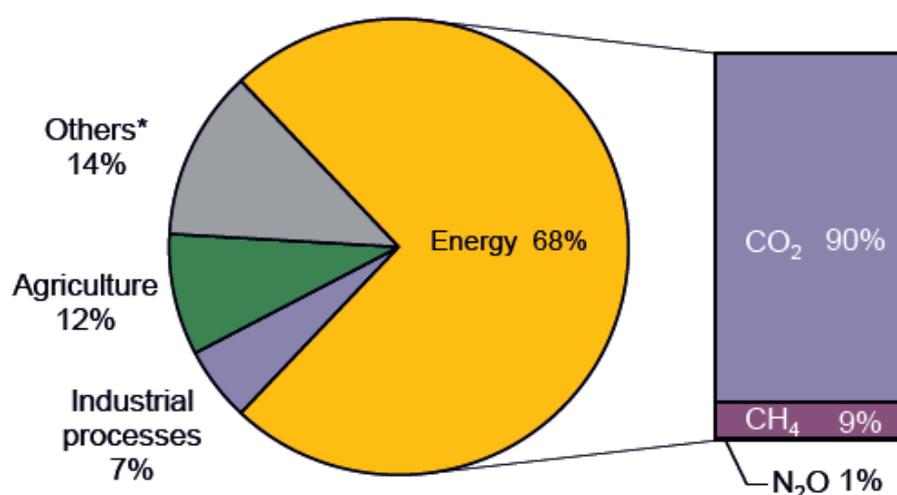


Figura 5: Impatto delle principali attività dell'uomo sulla produzione di gas serra [9]

Il diagramma soprastante tuttavia è poco chiaro. Si parla di CO₂ prodotta dall'utilizzo di energia nel senso generale del termine. Non viene fatta una distinzione per fonte energetica. Come conseguenza della crescita economica e dello sviluppo mondiale, l'incremento della domanda energetica ha visto un aumento di circa il 150% in meno di mezzo secolo, in termini di TPES (Total Primary Energy Supply). Si riporta di seguito un istogramma che mostra l'evoluzione del consumo energetico distinguendo la quota di energia prodotta da fonte fossile e quella da fonte rinnovabile (i dati sono espressi in Gtoe, Giga Tons of Oil Equivalent o, in italiano, Giga Tonnellate Equivalenti di Petrolio) [9].

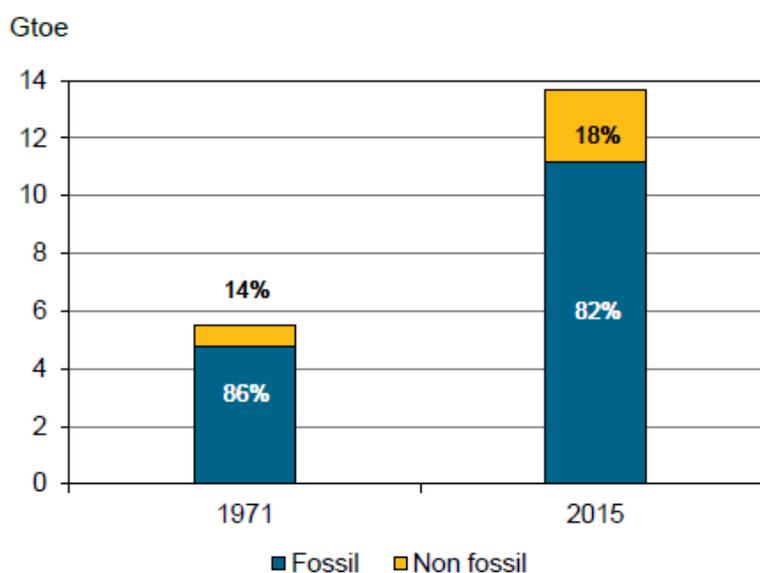


Figura 6: Fornitura di energia primaria mondiale in Gtoe [9]

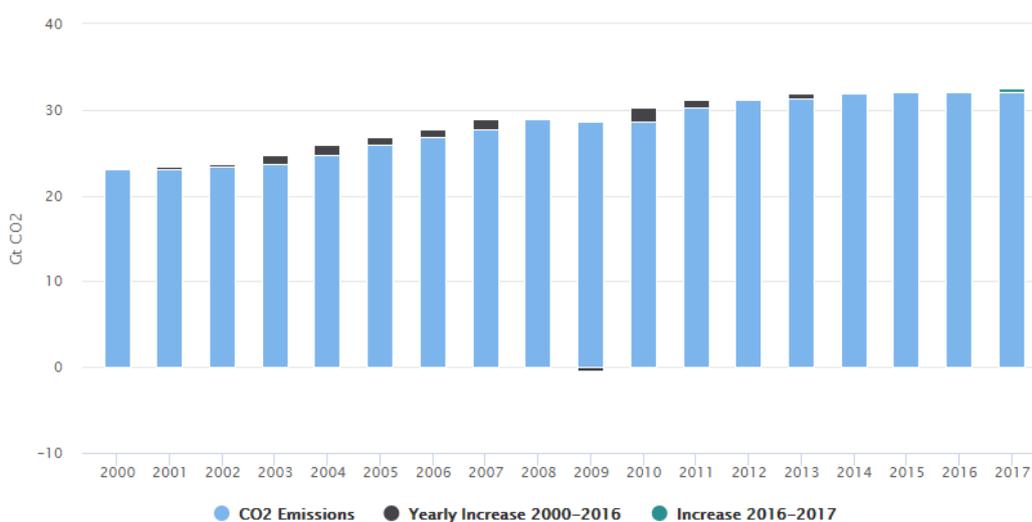


Figura 7: Evoluzione dell'emissione globale della CO₂ [6]

La percentuale di CO₂ prodotta varia non solo con il tipo di combustibile utilizzato per la combustione ma anche dal luogo. Quei paesi particolarmente sensibili al problema energetico stanziavano sempre più fondi per l'ammodernamento degli impianti di produzione: impianti più datati hanno un'efficienza minore e un impatto ambientale maggiore rispetto a impianti di ultima generazione.

Come è stato già detto, il modello WEM con cui si fanno le simulazioni e proiezioni per la stesura del WEO, è capace di analizzare la situazione energetica settore per settore e regione per regione. A tal proposito si riportano di seguito dei grafici che mostrano i primi l'emissione per combustibile, i secondi invece l'emissione per regioni.

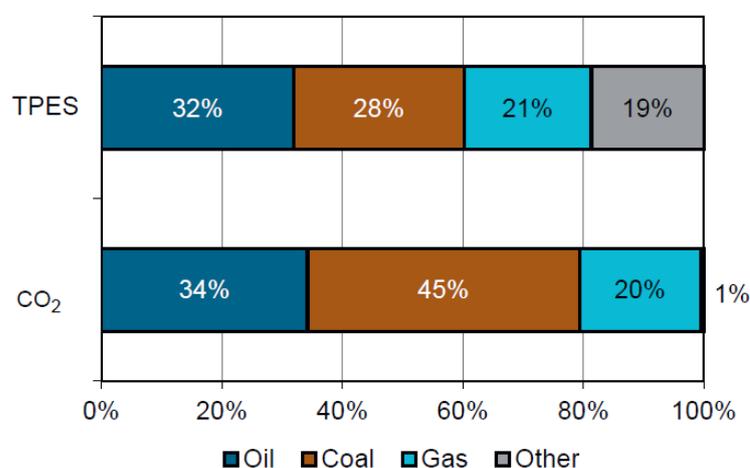


Figura 8: Fornitura energia mondiale per combustibile e relativa produzione di CO₂ [9]

Dalla figura soprastante è facile rendersi conto di quanto l'utilizzo massiccio del carbone abbia causato gravissimi impatti ambientali. Nonostante infatti il carbone rappresenti il 28% dei TPES mondiali nel 2015, pesa il 45% sulla produzione di CO₂. Questo a causa dell'elevato contenuto di carbone per unità di energia prodotta. Per petrolio e gas naturale invece il rapporto è di circa 1:1.

Vediamo adesso un grafico che mostra l'impatto sulla produzione di CO₂ mondiale per combustibile. Il periodo temporale considerato va dal 1971 al 2015. Verso la fine del 1980 petrolio e carbone sono stati responsabili di circa il 40% di biossido di carbonio rilasciato in atmosfera. Nei Paesi appartenenti all'Annex I, il petrolio è la fonte energetica maggiormente responsabile delle emissioni, mentre per i paesi non appartenenti all'Annex I il carbone ha una rilevanza maggiore del petrolio.

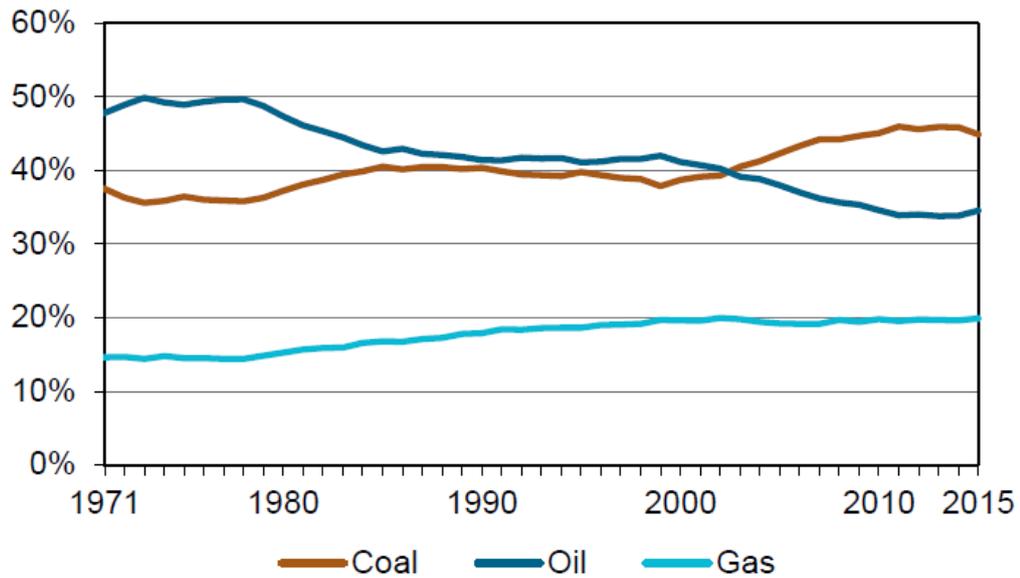


Figura 9: Evoluzione nel tempo delle emissioni di CO₂ per combustibile [9]

Come conseguenza della maggiore influenza dei non Annex I, si ha una crescita del carbone da un valore del 39% al 2002 al 45% nel 2015 mentre il petrolio vede un trend opposto: dal 40% al 35% nel 2015. Il trend relativo al gas naturale è invece più o meno costante negli ultimi 15 anni considerati nell'indagine.

Come già detto la produzione di CO₂ varia non solo al variare del combustibile utilizzato ma anche da paese a paese. Ci sono alcuni stati che hanno ad esempio miniere di carbone e utilizzano maggiormente quello come combustibile piuttosto che magari il gas naturale che dovrebbero importarlo. Vediamo dunque il secondo degli aspetti trattati, l'analisi delle emissioni regione per regione.

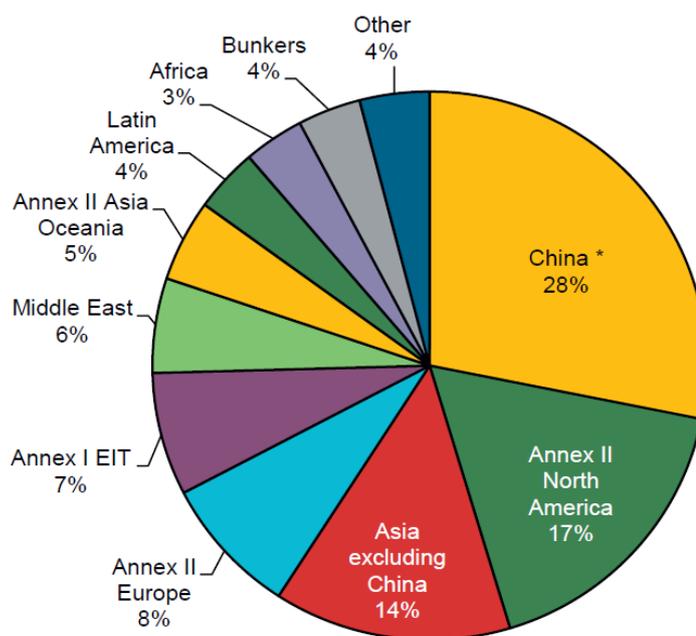
Come menzionato precedentemente, si è fatta una distinzione tra i paesi Annex I e non Annex I. Cosa significa appartenere ad una categoria piuttosto che un'altra?

Nel 1992 viene stipulato l' *United Nations Framework Convention in Climate Change* (UNFCCC) , un trattato ambientale internazionale. Questo ha l'obiettivo di stabilizzare la concentrazione di gas serra nell'atmosfera ad un livello che eviti interferenze antropogeniche pericolose con il clima. A tal proposito tutti gli stati firmatari del trattato sono stati suddivisi in gruppi: Paesi appartenenti all'Allegato I (40 stati e l'Unione Europea), Paesi appartenenti all'Allegato II (24 Stati) e i Paesi in via di sviluppo.

Al primo gruppo appartengono i paesi industrializzati e paesi ex socialisti ad economia in transizione che si impegnano a ridurre le emissioni prodotte sul loro suolo a valori inferiori di quelli del 1990. Se non dovessero riuscire nel loro intento, dovranno acquistare dei crediti

di emissione. Al secondo gruppo appartengono paesi industrializzati. I paesi in via di sviluppo invece, potranno decidere loro stessi se essere inglobati nel Annex I quando saranno sufficientemente sviluppati ^[10].

I Paesi non Annex I impattavano complessivamente per il 58% sulle emissioni globali di CO₂ mentre quelli appartenenti all'Annex I per il 38%. Si riporta di seguito un grafico che illustra le percentuali di emissioni di CO₂ regione per regione.



* China includes Hong Kong, China.

Figura 10: Emissione di CO₂ per regioni (dati riferiti al 2015) [9]

Interessante è rendersi conto che più dei due terzi delle emissioni totali di CO₂ sono rilasciate da solo dieci Paesi, 5 dei quali appartenenti all'Annex I. Vediamo quali sono questi 10 Paesi e quanto ciascuno di essi produce.

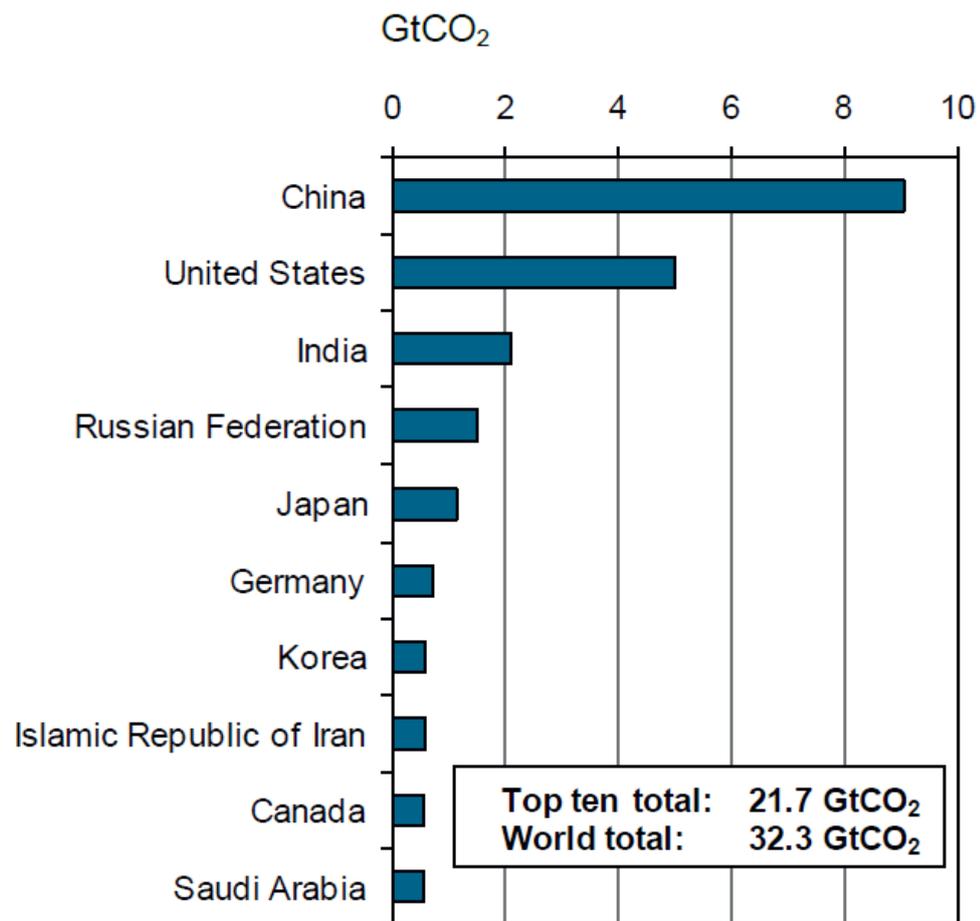


Figura 11: I dieci paesi maggiori produttori di CO₂ [9]

Facendo un banale calcolo con i valori riportati, è evidente che questi 10 giganti, in termine di produzione di biossido di carbonio, impattano per oltre il 67% sulla produzione mondiale di CO₂.

Il fatto che la Cina sta in cima alla vetta non è di certo qualcosa che ci fa meravigliare. Vedremo nel paragrafo seguente una breve panoramica sulla situazione cinese.

1.2 - La situazione cinese e il suo impatto sul panorama mondiale

Per molti anni il tema energetico cinese è stato più concentrato su aspetti quantitativi che qualitativi. Il paese ha infatti subito uno sviluppo piuttosto repentino che ha portato centinaia di milioni di cittadini fuori dalla povertà, l'industria a livelli che non aveva mai visto prima e, di conseguenza, una domanda sempre maggiore di fonti energetiche. La principale fonte utilizzata è stata il carbone.

Come dice la stessa definizione di energia, nulla si crea, nulla si distrugge ma tutto si trasforma. Per ottenere questo enorme sviluppo il prezzo da pagare è stato altissimo. La Cina è oggi il paese più inquinato al mondo con condizioni ambientali disastrose. La qualità dell'aria è pessima e questa è la causa della morte prematura di circa due milioni di persone ogni anno ^[11].

La Cina è oggi il paese con due primati contrastanti: è sì il paese più inquinante al mondo ma anche il maggior produttore di energie pulite ^[12]. Il gigante mondiale cinese ha visto, e continua a vedere, un forte sviluppo in molti campi. Dal punto di vista energetico si può dire che la nuova politica energetica vede il gas naturale, l'elettricità e le rinnovabili al centro del suo "Energy Plan".

La Cina, essendo alla ricerca di una strada più ecologica per la produzione di energia, ha chiesto l'aiuto dell'Italia per farsi introdurre alla tecnologia del teleriscaldamento. Nell'aprile del 2016 tre aziende di punta italiane sul settore del teleriscaldamento, Iren, A2A ed Hera, hanno firmato un memorandum con Pechino per stipulare una collaborazione industriale su quest'ambito ^[27].

La National Energy Administration (NEA), l'autorità cinese in materia energetica, ha affidato alla China General Nuclear Group (CGNG) e alla Tsinghua University il compito di effettuare uno studio di fattibilità per la realizzazione di un reattore nucleare che produca l'energia termica per la rete del teleriscaldamento cui saranno collegate diverse abitazioni pubbliche e private nel nord della Cina ^[28].

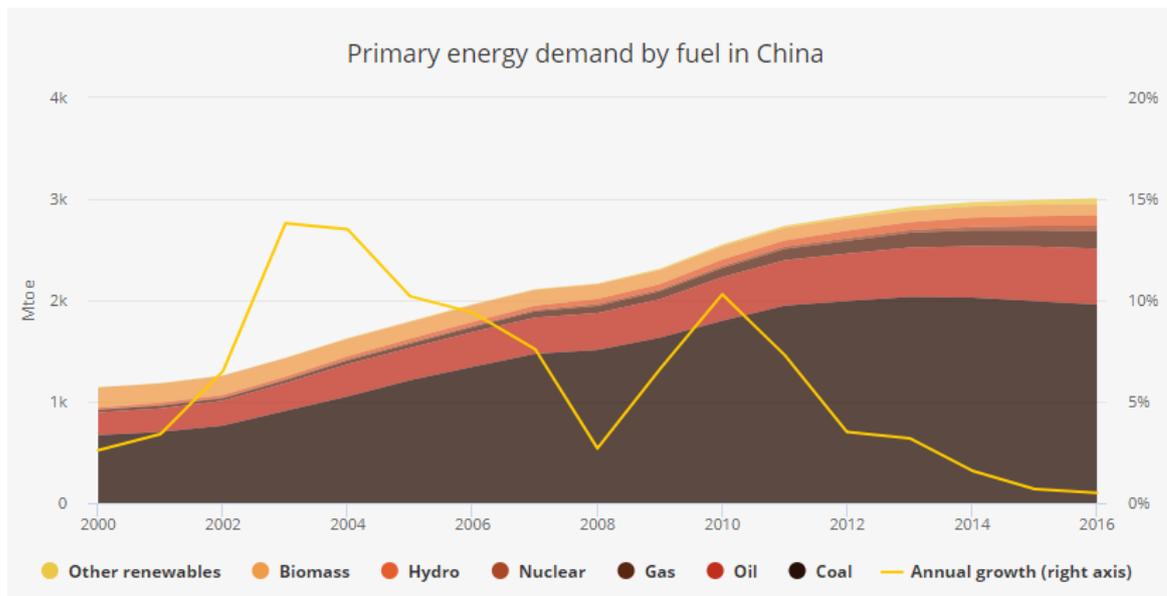


Figura 12: Richiesta di energia primaria in Cina [11]

Dal basso verso l'alto incontriamo il carbone, il petrolio, il gas, il nucleare, l'idroelettrico le biomasse e infine altre fonti rinnovabili. Il grafico mostra sull'asse sinistro i Mtoe delle varie fonti energetiche utilizzate e riportate nel grafico, sull'asse delle ordinate di destra invece ci sono le percentuali relativi alla crescita annua della domanda energetica. A tal proposito è possibile osservare che la crescita della domanda energetica ha subito una riduzione nel tempo. Si è passato da un tasso medio annuo dell' 8% , nel periodo che va dagli anni 2000 al 2012, ad uno inferiore del 2% dal 2012 agli anni nostri. Nel "New Policies Scenario" si prevede una riduzione della domanda energetica fino all'1% medio annuo al 2040. Senza le nuove normative energetiche, si sarebbe arrivati nel 2040 con un consumo di circa il 40% maggiore di quello che invece le nuove politiche comporterebbero [8]. Vediamo nella figura seguente i cambiamenti che si prevedono essere dal 2016 al 2040 in termini di domanda di energia primaria.

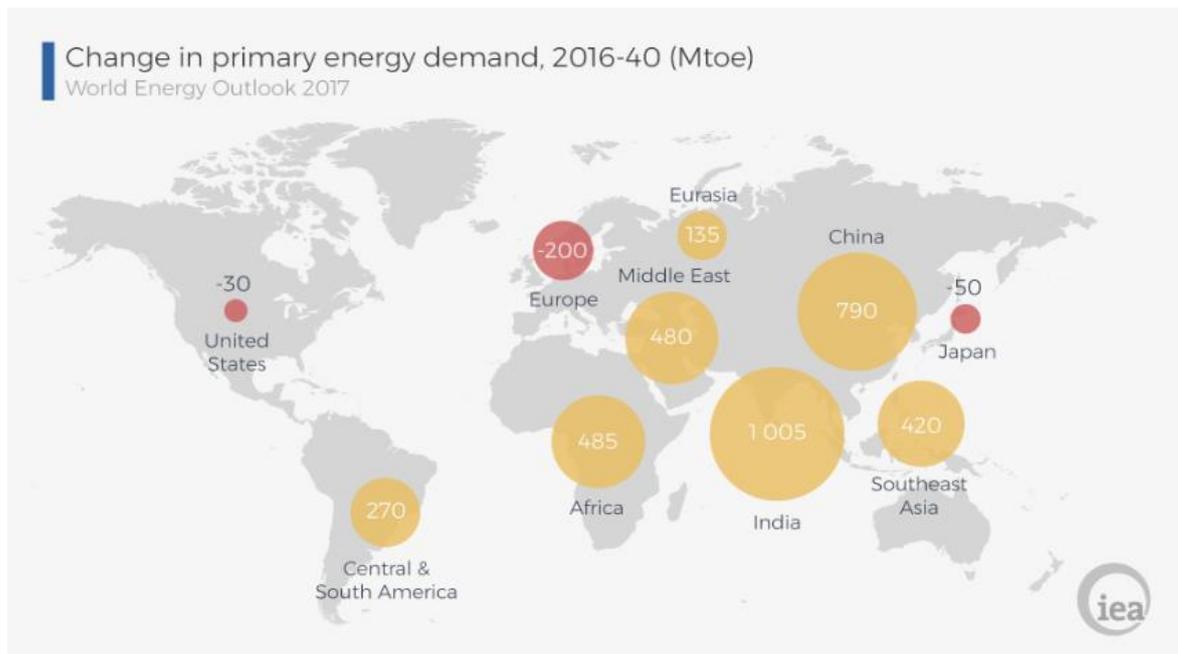


Figura 13: Cambiamenti nella domanda di energia primaria: 2016-2040 [11]

Si riporta di seguito un istogramma in cui si vede in termini quantitativi quanto detto in precedenza. Con il “New Policies Scenario” si ha un passaggio dall’utilizzo di fonti “tradizionali” a uno maggiormente incentrato sull’utilizzo di fonti “pulite”. Nel grafico ci si riferisce alla Cina con colori più accesi e agli altri paesi con colori con effetto trasparente. Il periodo considerato è di 50 anni e si fa una distinzione tra il primo venticinquennio e il secondo.

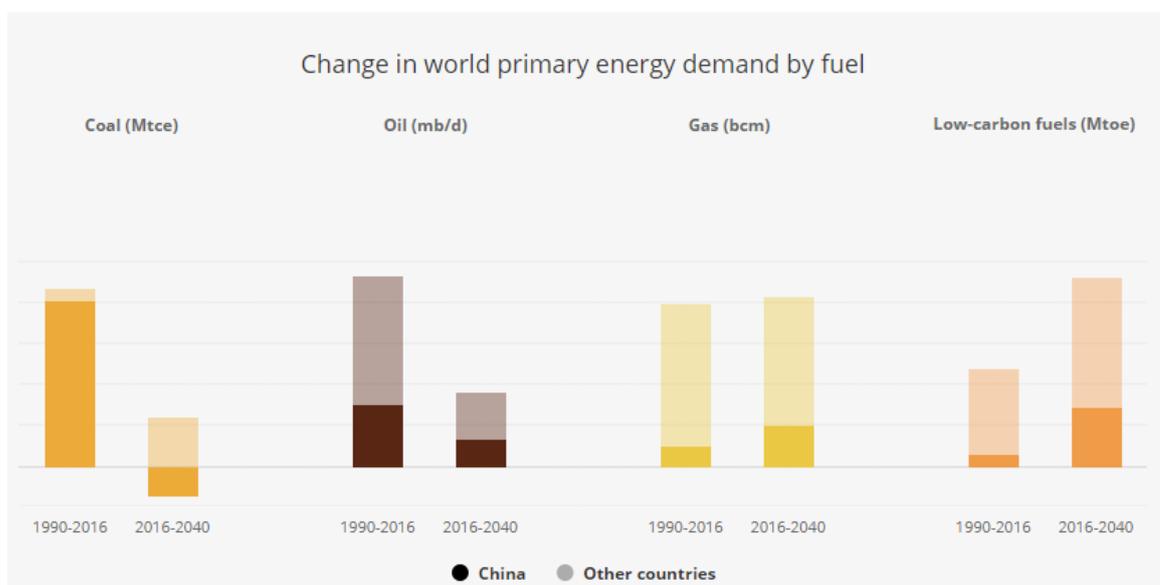


Figura 14: Trend della domanda energetica per risorse in mezzo secolo. Cina & altri paesi [11]

Nei primi 25 anni circa il consumo di carbone è di circa 2030 Mtce per la Cina contro i 152 per gli altri paesi. Grazie alle nuove politiche energetiche cinesi, si prevede una riduzione di 358 Mtce mentre il secondo venticinquennio vede per gli altri paesi un incremento a 607. Per quanto riguarda il petrolio si passa da 9 a 4 milioni di barili al giorno per la Cina e da 19 a 7 per gli altri paesi; da 194 a 401 miliardi di metri cubi di gas per la Cina e da 1407 a 1268 per gli altri paesi; un passaggio da 113 a 582 Mtoe di combustibili a basso contenuto di carbone per la Cina contro quello da 840 a 1277 per gli altri paesi.

2 - Teleriscaldamento

Con il termine teleriscaldamento si indica una tecnologia che permette di trasportare il calore dal luogo di produzione a quello di utilizzo. Esso è composto dall'unione di due parole: tele e riscaldamento che in un'unica parola assumono il significato di riscaldamento a distanza [13].

Per questa sua peculiarità il teleriscaldamento è, tra le possibili tecnologie che possono essere impiegate per il riscaldamento urbano, quella che più tra tutte è stata presa in considerazione. Le ragioni sono da ricercare in una notevole riduzione del consumo di energia primaria, il basso impatto ambientale e la possibilità di utilizzare energia proveniente da altri processi industriali. Se a tutto questo si aggiunge il fatto che questo sistema ha un'elevata efficienza, soprattutto nel caso in cui esso operi in assetto cogenerativo, si capisce perché esso è stato, ed è ancora ora oggi, oggetto di studio [14].

Quando si parla di riscaldamento a distanza si intuisce subito che il calore non viene generato nello stesso posto in cui viene utilizzato. Esso infatti viene prodotto in una o più centrali termiche e da qui, attraverso una rete di distribuzione, viene mandato presso le utenze ad essa collegate [15].

Queste centrali producono acqua calda o surriscaldata, solitamente alle temperature di 90 e 120°C (ci sono tuttavia delle reti in cui l'acqua calda si trova a temperatura minore: 60°C), e, spesso, funzionano in assetto cogenerativo: con questo termine si indica la produzione combinata di energia termica ed elettrica volta all'abbattimento dei costi delle fonti di energia primaria (combustibile). L'acqua prodotta viene poi mandata alle utenze allacciate alla rete che la utilizzano per il riscaldamento delle abitazioni o per la produzione di acqua calda sanitaria. A questo punto l'acqua, che ha ceduto calore e si è raffreddata, torna indietro alla centrale termica che la riporta alla temperatura originaria [16].

Immediata è la distinzione tra i rami in cui circola l'acqua calda, generata dalla centrale e mandata alle varie utenze, e i rami in cui circola invece l'acqua che ha già ceduto calore presso le utenze e si è dunque raffreddata. Vedremo in seguito infatti la distinzione tra il circuito di mandata e quello di ritorno.

Il concetto di cogenerazione è stato già chiamato in gioco più volte e se ne è data una definizione. Vediamo più nel dettaglio cosa è.

La *cogenerazione* è la produzione combinata di energia elettrica e termica. Uno dei più evidenti vantaggi nell'utilizzo di questa tecnologia sta nel fatto che è possibile ottenere un

risparmio di energia primaria dell'ordine del 30-40%. Si riporta di seguito uno schema riassuntivo di quanto detto.

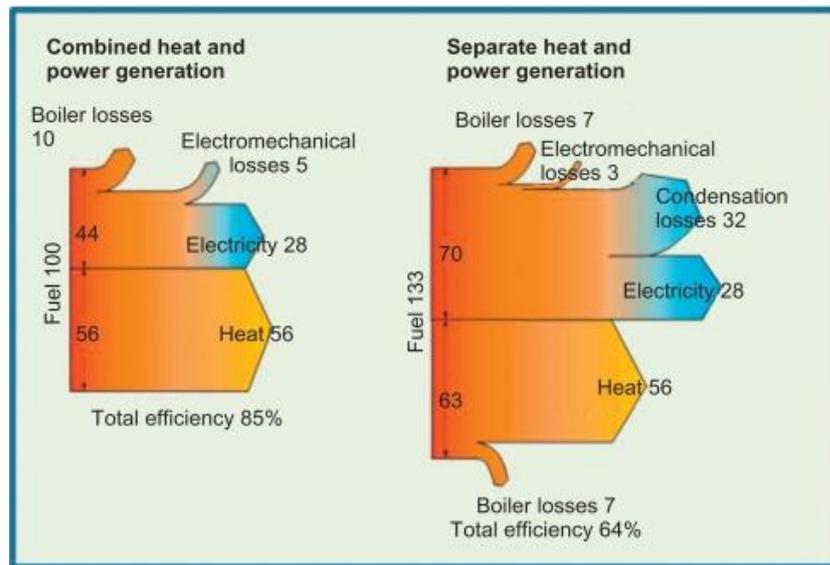


Figura 15: Sistema tradizionale e cogenerativo a confronto [17]

Si consideri un impianto che funzioni in assetto cogenerativo. Il fine dell'impianto è la produzione di una quota di energia elettrica pari a 28 e di energia termica pari a 56. Per fare ciò occorre disporre in ingresso di una quantità di combustibile pari a 100. Dal momento che il sistema è reale e non ideale, il processo di trasformazione di una forma di energia in un'altra prevede delle perdite. Esse sono state considerate essere pari a 15. Il rendimento totale dell'impianto che funziona in assetto cogenerativo sarà dunque, nel caso in esame, dell'85%. Si consideri adesso un altro impianto che però funziona non più in assetto cogenerativo ma, produce la stessa quantità di energia elettrica e termica, prodotta dall'impianto cogenerativo, con una produzione separata. Il confronto tra i due impianti viene fatto a parità di effetto utile. Se nel primo impianto occorre disporre di 100 unità di combustibile, nel secondo, per raggiungere lo stesso fine, ne serve di più, nel caso in esame 133 unità. La grandissima differenza tra i due sta nel fatto che, nonostante l'effetto utile sia lo stesso, l'efficienza è notevolmente diversa. L'efficienza viene valutata come effetto utile su spesa.

$$\eta_{ele} = \frac{P_e}{Comb}$$

$$\eta_{th} = \frac{P_{th}}{Comb}$$

L'effetto utile abbiamo imposto essere lo stesso in modo da poter facilmente confrontare i due impianti. La spesa è però diversa: in assetto cogenerativo abbiamo una spesa di 100 unità

di combustibile, in assetto di produzione separata abbiamo invece una spesa di 133 unità di combustibile per il raggiungimento del medesimo fine. Questo comporta ad avere nel primo caso un'efficienza dell'85% e nel secondo del 64%.

Questo esempio mostra in modo chiaro che la produzione in assetto cogenerativo è più vantaggiosa della produzione separata.

Il teleriscaldamento consente lo sfruttamento della produzione in assetto cogenerativo, in più, una politica su cui si basa il teleriscaldamento, è l'utilizzo dei rifiuti per la produzione di energia termica. Questo si sposa perfettamente con una normativa Europea che prevede l'utilizzo di calore prodotto dai rifiuti ogni qualvolta sia possibile.

2.1 – Sottosistemi delle reti di teleriscaldamento

La rete di teleriscaldamento , in inglese District Heating System, è costituita da diversi sottosistemi distinti tra loro ma tutti necessari per l'esistenza del DHS. Questo risulta composto infatti da quattro sottosistemi: centrale di produzione, rete di distribuzione, stazioni di pompaggio e sottostazioni di scambio termico. Nei paragrafi seguenti verranno descritte più nel dettaglio ciascuna di esse.

2.1.1 – Centrali di produzione

Le centrali di produzione sono, per la maggior parte dei casi, delle centrali termiche che funzionano in assetto cogenerativo (per i molteplici vantaggi che questa tecnologia offre e di cui è stato discusso nei paragrafi precedenti).

Per quanto riguarda la taglia delle centrali e dunque il corretto dimensionamento delle stesse, occorre prendere in considerazione sia la richiesta termica delle utenze allacciate alla rete che le perdite nella rete stessa. Queste sono abbastanza piccole in termini di potenza (qualche punto percentuale della potenza massima) ma non trascurabili in termini di energia (8-10%) ^[18]. Esse dipendono principalmente dalla temperatura di funzionamento della rete, praticamente costante durante la stagione invernale, pertanto queste aumentano al diminuire della richiesta di energia termica delle utenze.

Il fabbisogno termico complessivo è calcolato servendosi della storia delle utenze. Vengono raccolti i dati di consumo e con questi si costruisce una curva di carico. Per le motivazioni riportate, è chiaro che il fabbisogno che dovrà soddisfare la centrale non sarà pari alla somma

del fabbisogno delle varie utenze, ma queste comunque hanno un'incidenza più che notevole sulla taglia della centrale.

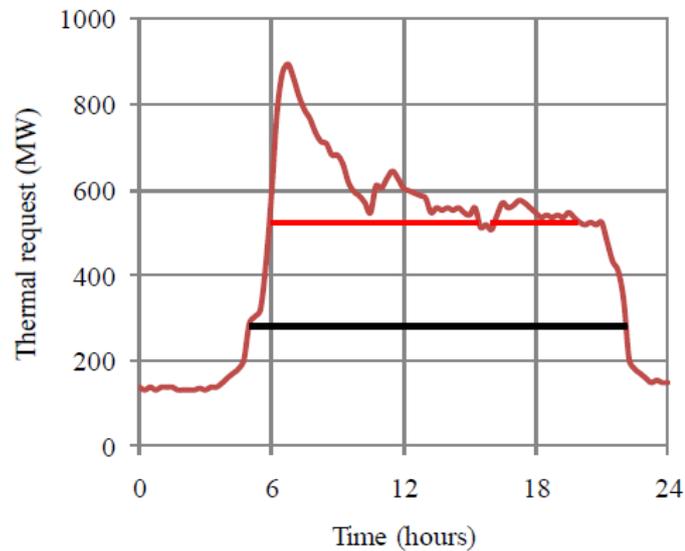


Figura 16: Esempio di richiesta termica di un'utenza tipo in un giorno tipico invernale [18]

Guardando con sguardo critico la figura soprastante, si vede che nelle prime ore del mattino, intorno alle 6:00, si ha un picco di potenza termica. La ragione dietro questo trend sta nel fatto che nelle aree mediterranee in particolare, dove gli impianti di riscaldamento domestico vengono spenti durante la notte, si verifica una situazione in cui, al mattino, quando gli impianti vengono riaccesi, si ha un picco di domanda di energia termica.

Non sempre la sola centrale termica è sufficiente a soddisfare una domanda così alta, quindi, si utilizzano altri sistemi supplementari. Tra questi assumono particolare importanza le caldaie. Queste non solo entrano in funzione, a supporto delle centrali termiche, per fornire tutto il calore necessario quando la richiesta supera la disponibilità della centrale, ma hanno un notevole utilizzo quando questa è in manutenzione o ci sono dei guasti. Secondo la normativa vigente, tali centrali devono soddisfare altissimi requisiti di efficienza, superiori a quelli delle caldaie. Si pensi al fatto che le piccole caldaie vengono accese e spente diverse volte nel corso della giornata per mantenere la temperatura delle abitazioni a valori di comfort (influenza negativa sul rendimento), in una centrale più grande, invece, è possibile far fronte a tutte queste oscillazioni della domanda termica senza dover spegnere l'impianto (influenza positiva sul rendimento). Si intuisce quindi il bisogno di operare in modo da cercare di ridurre il picco di domanda di energia termica per limitare, quanto più possibile, l'utilizzo delle caldaie, soggette a efficienze minori.

Altro aspetto da considerare è la possibilità di prevedere e integrare alla rete principale sistemi di accumulo. In questo modo si cerca di accumulare energia termica quando la richiesta delle utenze non è altissima e di utilizzare la quantità immagazzinata quando invece la richiesta delle utenze collegate alla rete è maggiore.

Vediamo di seguito un grafico che mostra un esempio di richiesta termica valutata nel corso di un anno.

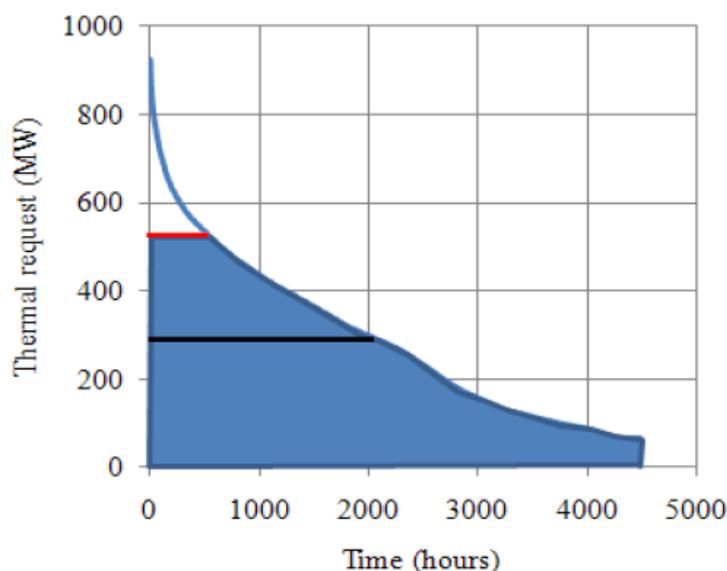


Figura 17: Esempio di richiesta termica annua [18]

Il grafico mostra in ascissa per quante ore annue l'impianto è in funzione e in ordinata la potenza termica richiesta. La curva rappresentata ci dà informazioni circa le ore all'anno in cui è necessaria una data quantità di potenza termica. Da quest'ultima immagine si vuole sottolineare il fatto che l'impianto deve soddisfare un'elevata richiesta termica solo per poche ore l'anno mentre per la maggior parte del tempo deve fornire una quantità di energia decisamente inferiore al picco massimo. Se si dimensionasse la centrale in relazione al picco, questa risulterebbe per la maggior parte del suo funzionamento sovradimensionata e ciò andrebbe ad influire sul rendimento. Si dimensiona pertanto prendendo come riferimento un valore di fabbisogno minore di quello massimo e, nelle ore dell'anno in cui la centrale deve fornire una quantità maggiore di calore, si utilizzano, come detto in precedenza, delle caldaie di integrazione.

2.1.2 – Rete di distribuzione

Il calore prodotto in centrale deve adesso essere mandato presso le utenze. Questo avviene grazie un sistema di reti interrato che, partono dalla stazione di pompaggio e si vanno ad allacciare alle reti di trasporto e distribuzione del calore. Nella maggior parte dei casi, l'acqua calda o surriscaldata, viene distribuita fino alle sottostazioni di scambio termico degli edifici serviti dove, tramite uno scambiatore di calore, cede calore all'acqua presente nel circuito secondario, quello responsabile del trasporto dell'acqua calda fino ai terminali delle utenze, per poi tornare alle centrali per riscaldarsi nuovamente e ripetere il ciclo ^[19].

Il processo descritto è il più comune in Italia ed è detto “distribuzione indiretta”. Esso offre diversi vantaggi: manutenzione più efficace, possibilità di individuazione delle perdite e regolazione del flusso termico più agevole, migliore gestione della rete grazie all'esistenza dei due circuiti distinti in cui circola l'acqua: il primario che ospita l'acqua calda prodotta in centrale e il secondario che trasporta invece l'acqua raffreddata. Di contro invece il sistema è piuttosto costoso e le perdite energetiche nella rete sono maggiori rispetto al sistema diretto. La “distribuzione diretta” invece prevede un'unica rete. L'acqua calda va direttamente dalla centrale ai terminali di scambio termico. Il costo della rete è decisamente inferiore rispetto al caso indiretto ma tutti i vantaggi legati alla distinzione dei due circuiti vengono a mancare ^[20].

Le reti di teleriscaldamento, dal punto di vista topologico, sono distinte essenzialmente in due macro-gruppi: reti ad albero e reti magliate.

- Reti magliate: questa topologia è decisamente la più funzionale e vantaggiosa. In caso di malfunzionamento di un tratto di tubazione, si pensi ad esempio a perdite di carico dovute a foratura dei tubi, è possibile chiudere quel tratto di rete, limitare dunque lo spreco di fluido termovettore, senza influire sul corretto funzionamento degli altri tratti della rete. Altro vantaggio offerto dalla rete magliata è una minore caduta di pressione con conseguente risparmio sui costi di pompaggio. Di contro i costi di installazione sono molto onerosi ^[18].
- Reti ad albero: nel suo percorso dalla centrale alle utenze, l'acqua che circola nelle tubazioni ha un percorso determinato. Nella rete magliata, proprio per l'esistenza delle maglie, non si conosce a priori il percorso dell'acqua.

La figura che segue mostra un esempio di rete magliata e rete ad albero.

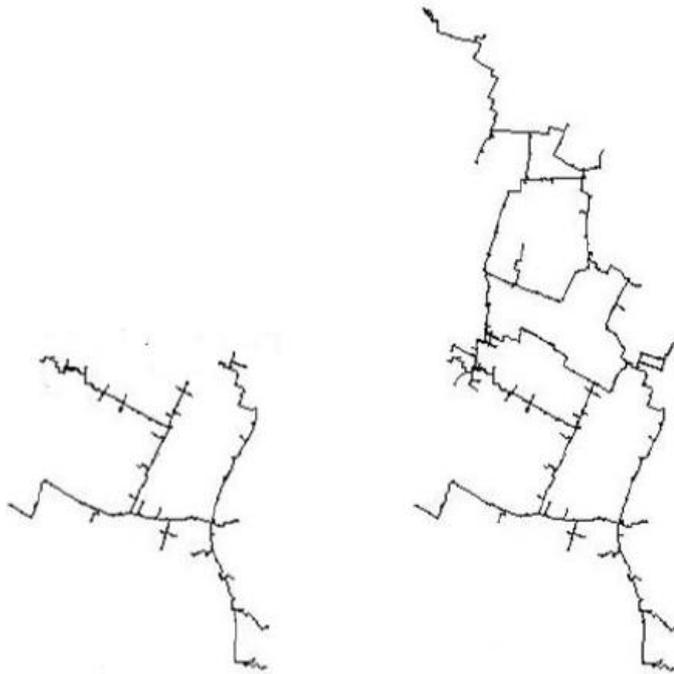


Figura 18: Esempio di rete ad albero (a sinistra) e di rete magliata (a destra) [18]

2.1.2.1 – Circuito primario

La rete di distribuzione, nel caso di distribuzione indiretta, è composta da circuito primario e circuito secondario. Di seguito vengono riportate le principali caratteristiche e i componenti del primario ^[21]:

- Tubazioni in acciaio, senza saldature, idonee al trasporto dell'acqua surriscaldata. Questa si prevede avere una pressione massima di 16 bar e una temperatura limite di 130 °C.
- Organi di intercettazione (come le valvole) dovranno anch'essi essere d'acciaio. Questi saranno del tipo a sfera e dovranno essere installati in modo da essere agevole il controllo e il raggiungimento per persone addette.
- Filtri con la funzione di intercettare le impurità che provocherebbero un danneggiamento delle altre apparecchiature di cui dispone la rete.
- Valvole di sfiato e drenaggio, della medesima tecnologia a sfera, a passaggio totale e non coibentate.

2.1.2.2 – Circuito secondario

Anche il per il circuito secondario, la normativa vigente impone dei limiti e delle caratteristiche dei vari componenti presenti ^[21]:

- Tubazioni anch'esse di acciaio.
- Valvole di intercettazione a sfera flangiate o a farfalla.
- Filtro avente le stesse funzioni di quello di cui disponeva il circuito primario.
- Valvole di sfiato e drenaggio, come quelle del circuito primario.
- Scambiatori di calore che mettono in comunicazione i due circuiti devono essere a piastre corrugate ad alta efficienza. La disposizione delle piastre sarà in parallelo e consentiranno il passaggio dell'acqua del primario e del secondario in modo alternato.

2.1.3 – Sottostazioni di pompaggio

Altra sottostazione presente nelle reti di teleriscaldamento è quella del pompaggio. La funzione principale è quella di equilibrare e compensare le varie e possibili perdite di pressione cui è soggetta la rete. Questo perché è indispensabile che la portata di progetto arrivi a servire tutte le utenze. Ci saranno delle utenze più favorite e delle utenze più sfavorite. La differenza è in termini di distanza dalle sottostazioni di pompaggio. Più le utenze sono vicine più sono favorite in quanto la pressione è maggiore, più sono lontane più sono sfavorite perché appunto la pressione è diminuita lungo il percorso. Occorre tuttavia che anche l'utenza più sfavorita sia in condizioni di ricevere il calore prodotto dalla centrale. Questa sarà infatti l'utenza presa in esame per il dimensionamento della sottostazione di pompaggio. Per far fronte ai diversi livelli di pressione lungo tutta la rete, saranno disposte numerose valvole di regolazione ^[18].

Con riferimento alla rete di Torino Nord, la stazione di pompaggio è formata da un gruppo di pompe sul ramo di mandata e uno sul ramo di ritorno. Ciascun gruppo è composto da 4 pompe in grado di smaltire una portata di 700kg/s e di prevalenza nominale di 8.5 bar ^[16].

Si riporta di seguito un diagramma che mostra un esempio di cadute di pressione lungo la rete. Non appena la pressione scende troppo, occorre che il gruppo di pompe di cui è asservita la rete, ristabiliscono il valore di pressione tale per consentire all'acqua di poter raggiungere l'utenza.

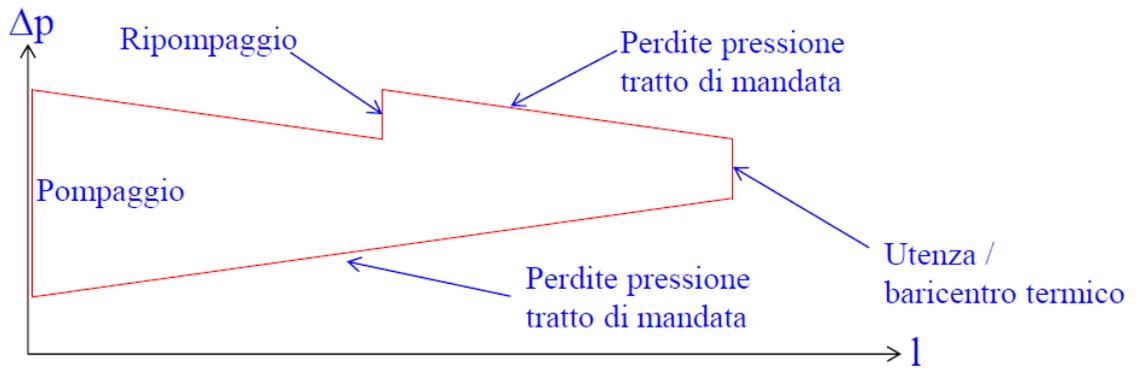


Figura 19: Perdite di pressione e ripompaggio [18]

2.1.4 – Sottostazione di scambio termico

La scelta tra una sottostazione di scambio termico e un'altra ovviamente non è casuale. Essa infatti dipende, in primis, dalla finalità richiesta ma anche da aspetti logistici come ad esempio lo spazio a disposizione. Distinguiamo le sottostazioni per teleriscaldamento a basamento (le cui finalità sono: per solo uso riscaldamento e quelle per uso riscaldamento e produzione di acqua calda sanitaria (ACS)) e le sottostazioni murali per teleriscaldamento che hanno le medesime finalità di quelle a basamento e in più consentono una disposizione degli scambiatori di calore anche in serie (contro la disposizione in parallelo prevista dalle sottostazioni a basamento [22]).

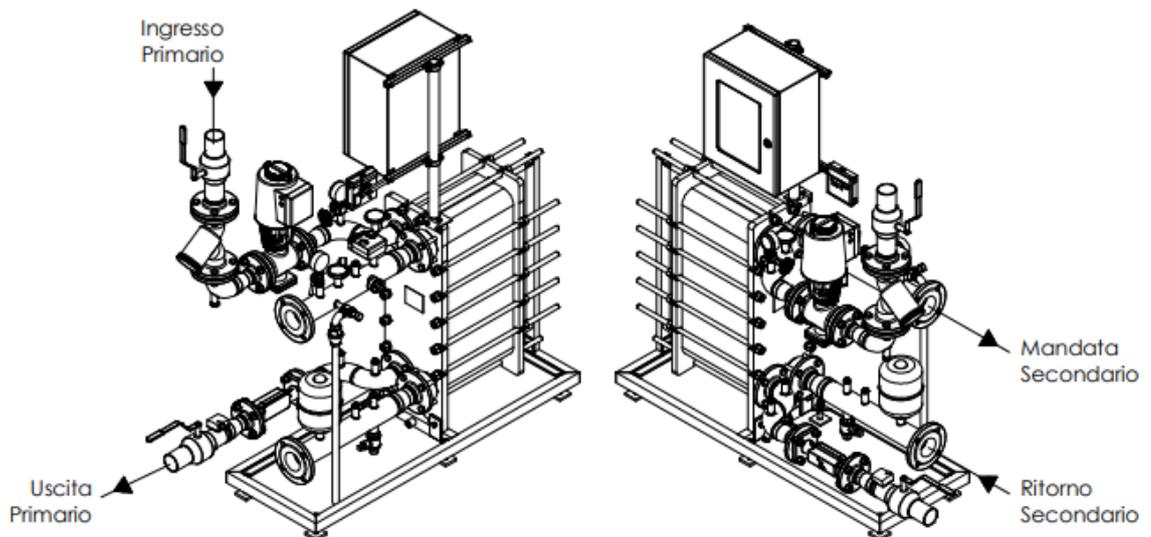
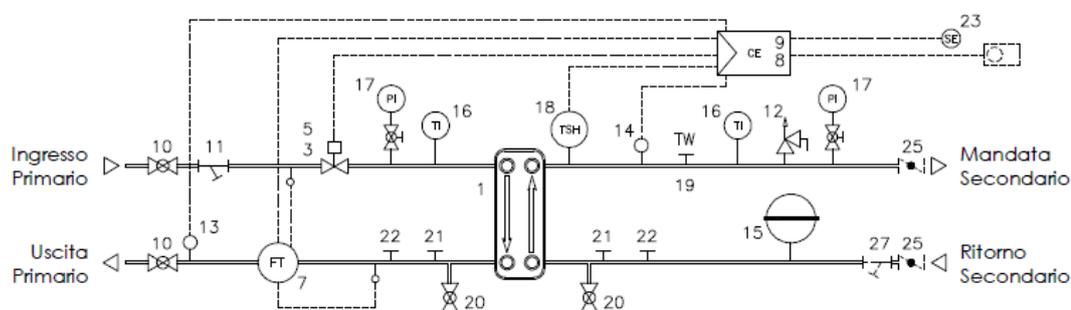


Figura 20: Sottostazioni per teleriscaldamento a basamento [22]

La sottostazione per teleriscaldamento è un'unità assemblata che ha l'obiettivo di garantire una trasmissione del calore ad alto rendimento assicurando che il tutto venga fatto in condizioni di estrema sicurezza. Nel basamento sono presenti dei profilati dotati di:

1. Scambiatori di calore a piastre ispezionabili
2. Accessori di sicurezza, osservazione, protezione e regolazione (vaso di espansione, manometri, termometri, termostati di sicurezza e regolazione, centralina di termoregolazione [22]).

Si riporta di seguito lo schema idraulico di una sottostazione a basamento il cui unico fine è la produzione del calore per il riscaldamento.



COMPONENTI

- | | |
|---|--|
| 1 Scambiatore di calore a piastre per RISC | 14 Sonda di temperatura lato RISC |
| 3 Valvola servocomandata per RISC | 15 Vaso d'espansione |
| 5 Servomotore per RISC | 16 Termometro |
| 7 Misuratore di energia termica | 17 Manometro + valvola 3 vie portamanometro |
| 8 Regolatore | 18 Termostato (Bitermostato per acqua surriscaldata) |
| 9 Quadro elettrico | 19 Pozzetto termometrico ISPESL |
| 10 Valvola di intercettazione a sfera lato PRIMARIO | 20 Valvola di drenaggio |
| 11 Filtro lato PRIMARIO | 21 Predisposizione per Termometro |
| 12 Valvola di sicurezza | 22 Predisposizione per Manometro |
| 13 Sonda di temperatura lato PRIMARIO | 23 Sonda esterna |

Figura 21: Sottostazione a basamento per solo uso riscaldamento – Schema idraulico [22]

Questa configurazione può essere adottata per impianti di grande/media potenza alimentati da acqua surriscaldata o calda. Come detto in precedenza, aspetto peculiare di queste sottostazioni è garantire un esercizio sicuro. Per assicurare che gli elevati standard di sicurezza vengano rispettati, questa configurazione consente:

- La limitazione della portata del primario: se si ritiene necessario è possibile limitare la portata del primario in modo da garantire un esercizio sicuro senza uscire dai range di sicurezza.
- La limitazione della temperatura di ritorno con eventuali segnalazioni di malfunzionamento della sonda ad immersione.

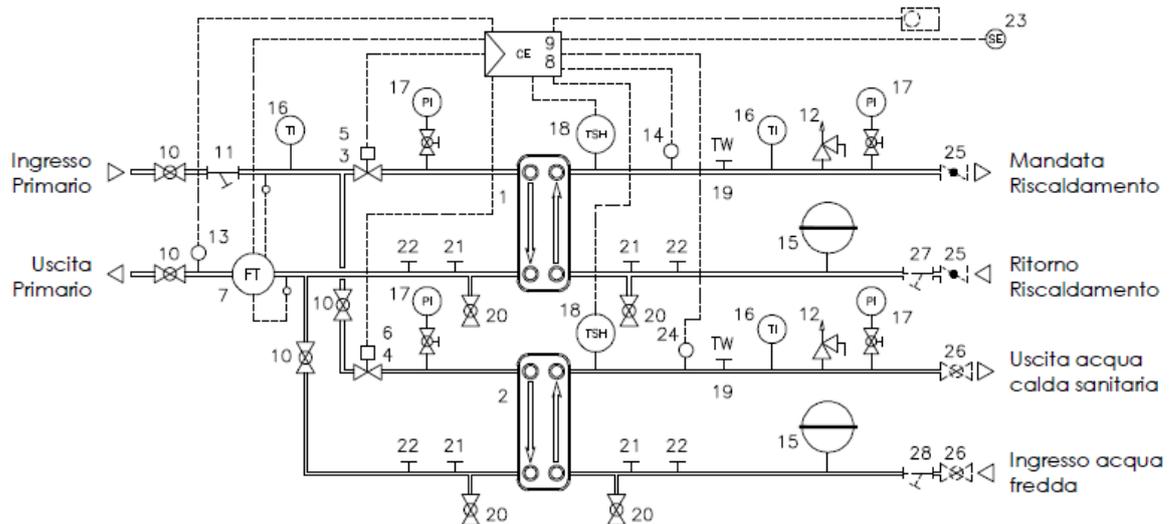
- La telelettura del contabilizzatore del calore e telecontrollo [22].

Di seguito vediamo invece un'altra tipologia di sottostazione di teleriscaldamento a basamento che, rispetto alla prima, ha anche l'obiettivo di produrre acqua calda sanitaria. Le caratteristiche sono molto simili a quelle riportate per la configurazione per solo riscaldamento ma in aggiunta ne sono presenti altre relative alla produzione dell'ACS. A tal proposito ne viene citata qualcuna:

- Gestione del ricircolo mediante un PID (controllo Proporzionale Integrativo Derivativo).
- Gestire un ciclo di disinfestazione contro la legionella.

Aspetto fondamentale, di cui non si era parlato nel caso precedente, è la possibilità di insorgenza della legionella. La legionella altro non è che un batterio presente nell'acqua in determinate condizioni di temperatura. Essa esiste per range di temperatura compresi tra i 20°C e i 50°C mentre viene debellata per temperature maggiori. Da attenzionare in particolar modo è l'impossibilità di insorgenza del batterio per garantire, ancora una volta, la sicurezza delle persone che fanno uso della tecnologia del teleriscaldamento. Occorre evitare che la temperatura sia compresa nel range in cui la legionella ha luogo. Il circuito in cui potrebbe eventualmente accadere ciò è il secondario dove circola acqua a temperatura più bassa rispetto al ramo di mandata (come già detto infatti nel primario circola l'acqua che dalla centrale arriva negli scambiatori di calore, cede il calore, si raffredda e torna alla centrale a scaldarsi nuovamente).

Si riporta di seguito il circuito idraulico della sottostazione a basamento per riscaldamento e produzione di acqua calda sanitaria.



COMPONENTI

- | | |
|---|--|
| 1 Scambiatore di calore a piastre per RISC | 14 Sonda di temperatura lato RISC |
| 2 Scambiatore di calore a piastre per ACS | 15 Vaso d'espansione |
| 3 Valvola servocomandata per RISC | 16 Termometro |
| 4 Valvola servocomandata per ACS | 17 Manometro + valvola 3 vie portamanometro |
| 5 Servomotore per RISC | 18 Termostato (Bitermostato per acqua surriscaldata) |
| 6 Servomotore per ACS | 19 Pozzetto termometrico ISPESL |
| 7 Misuratore di energia termica | 20 Valvola di drenaggio |
| 8 Regolatore | 21 Predisposizione per Termometro |
| 9 Quadro elettrico | 22 Predisposizione per Manometro |
| 10 Valvola di intercettazione a sfera lato PRIMARIO | 23 Sonda esterna |
| 11 Filtro lato PRIMARIO | 24 Sonda di temperatura lato ACS |
| 12 Valvola di sicurezza | |
| 13 Sonda di temperatura lato PRIMARIO | |

Figura 22: Sottostazione a basamento per uso riscaldamento e produzione di ACS – Schema idraulico [22]

Essendo due le finalità di questa tipologia di sottostazione, è chiaro che occorre uno scambiatore di calore per il riscaldamento e un altro per la produzione di ACS (in figura quello in alto è addetto a soddisfare la prima funzione, quello in basso la seconda). Come è evidente, se nello schema precedente c'erano dei componenti relativi solo al circuito del solo riscaldamento, in questo, più complesso, esistono gli stessi elementi, disposti su entrambi i circuiti, che quelli relativi esclusivamente alla produzione dell'acqua calda sanitaria.

Vediamo adesso la seconda tipologia di sottostazione per teleriscaldamento, quella murale. Anche questa, come quella a basamento è un'unità assemblata. La differenza sta nel fatto che per questa è presente un telaio esterno nella quale sono racchiusi gli elementi che sono stati descritti già per la tecnologia a basamento. Contrariamente ai primi, idonei per impianti di grande/media potenza, questi sono maggiormente utilizzati nei casi in cui si ha a che fare con piccoli impianti [22].

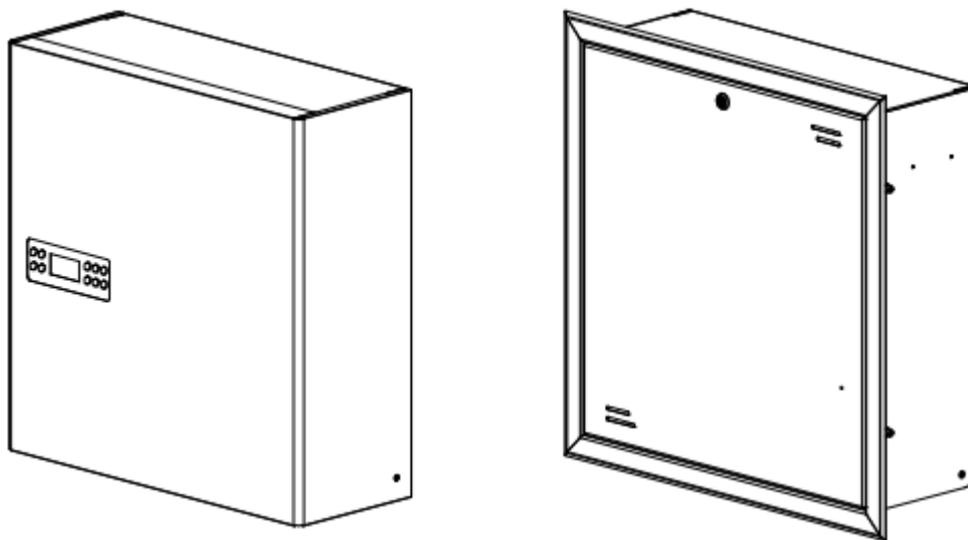
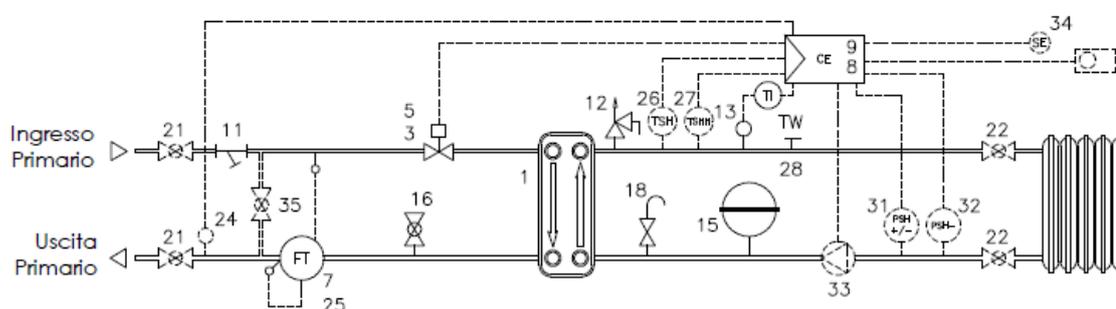


Figura 23: Sottostazioni murali per teleriscaldamento [22]

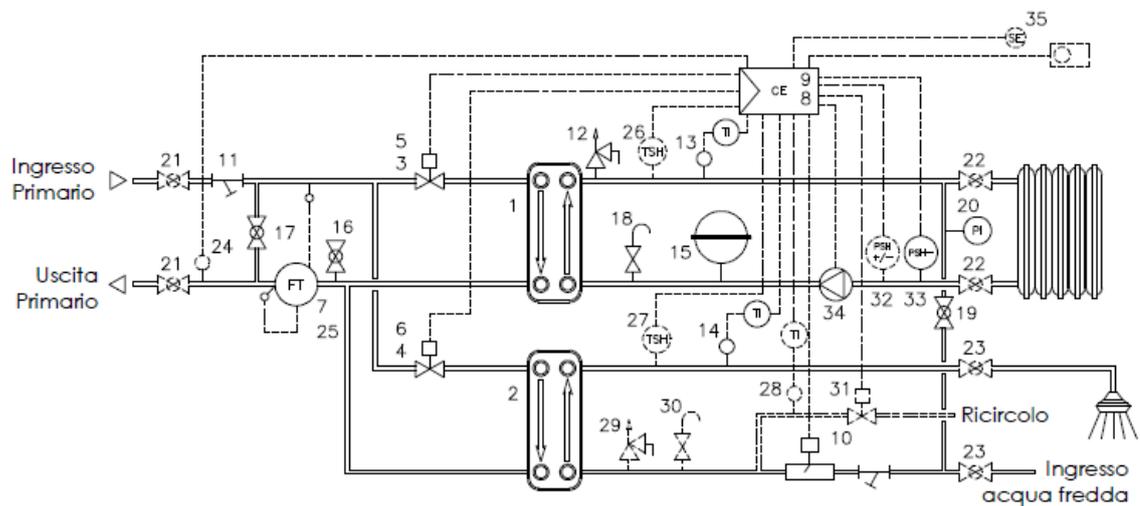
Ancora una volta si fa la distinzione a seconda della finalità: solo produzione di calore o effetto combinato di produzione di calore e acqua calda sanitaria. Vediamo i due schemi idraulici di per entrambe le tecnologie.



COMPONENTI

- | | | | |
|---|--|----|--|
| 1 | Scambiatore di calore a piastre per RISC | 11 | Filtro |
| 3 | Valvola servocomandata per RISC | 12 | Valvola di sicurezza |
| 5 | Servomotore per RISC | 13 | Sonda di temperatura lato RISC |
| 7 | Misuratore di energia termica | 15 | Vaso d'espansione |
| 8 | Regolatore | 16 | Valvola a sfera per sfiato lato PRIMARIO |
| 9 | Quadro elettrico | 18 | Valvola di sfiato lato RISC |

Figura 24: Sottostazione murale per solo uso riscaldamento – Schema idraulico [22]



COMPONENTI

- | | | | |
|----|--|----|--|
| 1 | Scambiatore di calore a piastre per RISC | 13 | Sonda di temperatura lato RISC |
| 2 | Scambiatore di calore a piastre per ACS | 14 | Sonda di temperatura lato ACS |
| 3 | Valvola servocomandata per RISC | 15 | Vaso d'espansione |
| 4 | Valvola servocomandata per ACS | 16 | Valvola a sfera per sfiato lato PRIMARIO |
| 5 | Servomotore per RISC | 17 | Valvola a sfera by-pass |
| 6 | Servomotore per ACS | 18 | Valvola di sfiato lato RISC |
| 7 | Misuratore di energia termica | 19 | Valvola a sfera riempimento |
| 8 | Regolatore | 20 | Manometro |
| 9 | Quadro elettrico | 33 | Pressostato di minima |
| 10 | Flussostato | 34 | Pompa di circolazione |
| 11 | Filtro | | |
| 12 | Valvola di sicurezza | | |

Figura 25: Sottostazione murale per uso riscaldamento e produzione ACS - Schema idraulico [22]

2.2 - Il teleriscaldamento in Italia

Il primo impianto di teleriscaldamento in Italia nasce negli anni '70 a Modena. Da qui passerà soltanto un anno prima che un nuovo progetto internazionale venga approvato e porterà questa tecnologia anche a Brescia. Proprio grazie alla possibilità delle reti di riscaldamento di recuperare il calore proveniente da altre attività industriali, è stata possibile la realizzazione di questo progetto: si sfruttava infatti il calore prodotto dalla combustione dei rifiuti. A seguire anche Reggio Emilia è stata attraversata dalla rete del teleriscaldamento e, ad oggi, circa la metà delle case degli abitanti sono teleriscaldate [23].

Negli anni '80 il teleriscaldamento arriva a Torino. Indubbiamente, tra le città italiane che dispongono questo servizio, Torino è quella che più tra tutte ha sfruttato questa tecnologia. Oggi è quella che vanta il primato di città più teleriscaldata d'Europa con oltre il 55% della sua popolazione allacciata alla rete.

La rete del teleriscaldamento tuttavia, non passa per tutte le regioni le italiane. Al nord è presente ovunque ad eccezione del Friuli e nel centro della penisola lo troviamo in Toscana, nelle Marche e nel Lazio.

Si riporta di seguito una figura che illustra quanto fino ad ora riportato [24].



Figura 26: L'Italia teleriscaldata [24]

2.3 – Il teleriscaldamento in Italia: stato attuale e potenzialità di sviluppo

Nel 2014 *Legambiente* e *l'Associazione Italiana Riscaldamento Urbano* (AIRU) presentano il primo rapporto sul teleriscaldamento in Italia. In esso è riportato che sono circa (dato riferito al periodo in cui il rapporto è stato rilasciato) 3 milioni gli abitanti equivalenti che godono dei servizi del teleriscaldamento. Nel novero rientrano in effetti sia utenze domestiche, edifici del terziario e industriali. Scendendo nel dettaglio, è riportato che la volumetria teleriscaldata è divisa come segue: il 62% serve edifici residenziali (182 milioni di m³), il 35% edifici del terziario (101.5 milioni di m³) e il restante 3% le industrie (8.2 milioni di m³). In aggiunta, il rapporto riferisce che circa il 6% del fabbisogno nazionale del calore necessario per il riscaldamento è da attribuire al teleriscaldamento ^[L]. Altri dati interessanti riportati nel documento, riguardano le diverse modalità di alimentazione delle reti. La Toscana, ad esempio, è ricca del geotermico mentre nel Trentino ci sono numerosi impianti a biomassa. Si contano 70 comuni teleriscaldati attraverso l'uso delle rinnovabili. A questi si sommano 59 comuni che sono attraversati da reti alimentate da una sola tipologia di combustibile: impianti cogenerativi fossili, centrali termoelettriche, caldaie e 21 comuni che invece utilizzano un mix di combustibili: fossili, impianti che recuperano il calore e fonti rinnovabili.

2.3.1 – Evoluzione della volumetria teleriscaldata

Altri dati interessanti riportati nel rapporto riguardano ad esempio l'evoluzione della volumetria riscaldata. Dal 1972, anno successivo alla nascita della prima rete di teleriscaldamento in Italia, al 2012, anno a cui fa riferimento l'indagine, la volumetria teleriscaldata in Italia ha subito un notevole aumento. Vediamo di seguito:

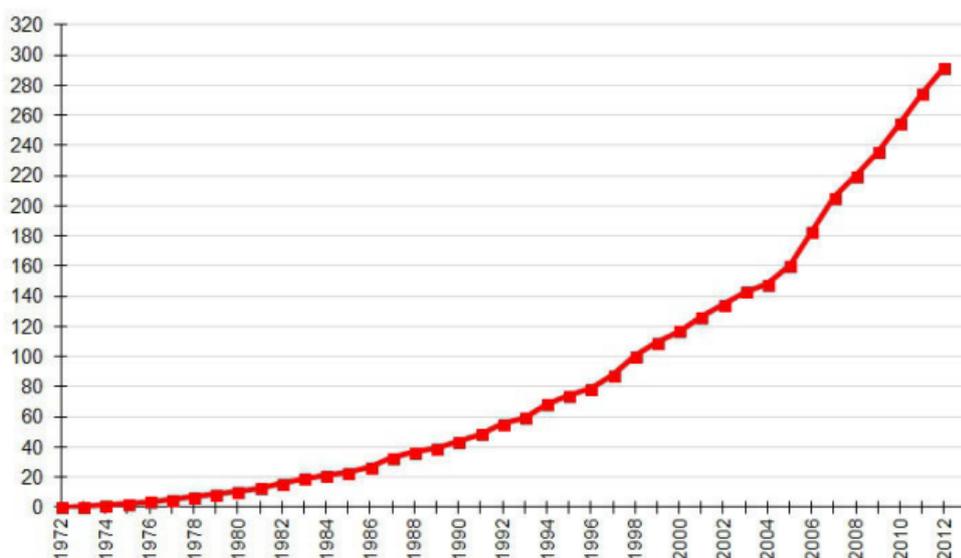


Figura 27: Milioni di m3 di volumetria teleriscaldato [24]

Le ragioni dietro questa crescita sono molteplici. Il teleriscaldamento, soprattutto grazie a un funzionamento delle centrali termiche in assetto cogenerativo, è molto efficiente e, come mostrato nei paragrafi precedenti, è in grado di ottenere lo stesso effetto utile prodotto da centrali che funzionano in assetto di produzione separata mantenendo dei costi di energia primaria minori. Nel corso del tempo inoltre la sensibilità sulla tematica ambientale è notevolmente aumentata. Il quadro normativo italiano, si è adattato alle normative europee e ha consentito un maggiore sviluppo del teleriscaldamento grazie al basso impatto ambientale.

2.3.2 – Potenza termica installata nelle centrali di teleriscaldamento

Nei paragrafi precedenti è stato affermato che diverse sono le modalità di alimentazione delle reti. Si era fatta la distinzione tra i comuni che utilizzavano fonti rinnovabili, quelli che utilizzavano un unico combustibile e quelli che si servivano di mix di combustibili. I comuni presi in esame nell'analisi presente nel rapporto di Legambiente e AIRU, sono 150. In questi viene prodotta una potenza termica di oltre 3000 MW e termica di oltre i 900 MW. Vediamo nel grafico seguente un istogramma che mostra la quantità prodotta per tipologia di alimentazione:

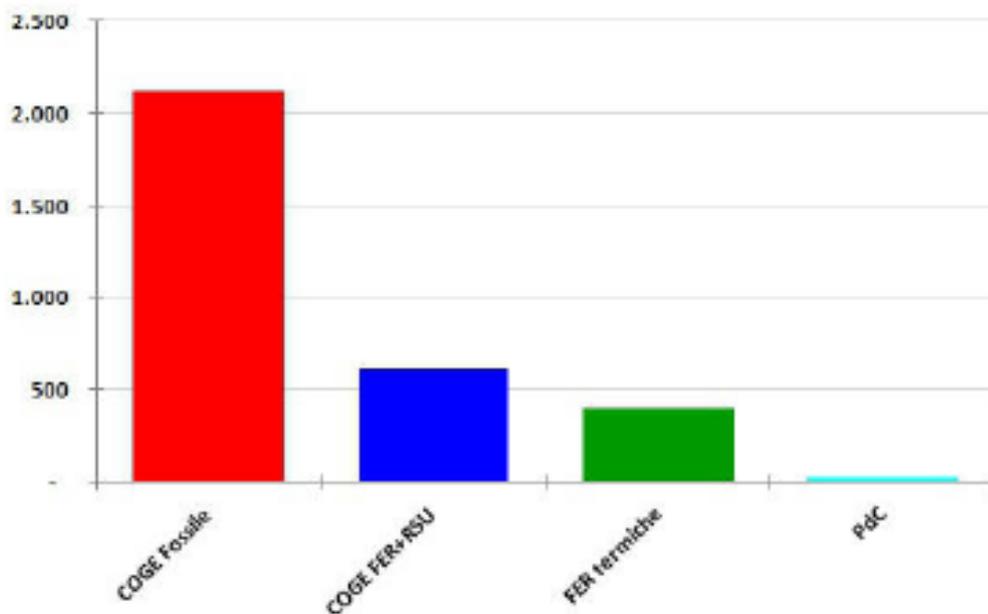


Figura 28: Potenza termica installata per modalità di generazione del calore [24]

In figura è mostrato che oltre 2000 MW di potenza sono generati da impianti di cogenerazione a combustibili fossili, oltre 600 MW da impianti di cogenerazione che utilizzano i Rifiuti Solidi Urbani (RSU) e Fonti Energetiche Rinnovabili (FER). Una percentuale molto bassa inoltre è da attribuire alle pompe di calore ad alta temperatura.

2.3.2 - Risparmi associati al teleriscaldamento

Quando parliamo di risparmio non facciamo riferimento al solo risparmio economico. La rete di teleriscaldamento, come detto nei capitoli precedenti, offre anche un notevole vantaggio ambientale. L'impatto che ha questa tecnologia sull'ambiente è ridotto, rispetto ai sistemi tradizionali, grazie a una più elevata efficienza, alla possibilità di utilizzare meno combustibile e quindi diminuire il contenuto di gas serra rilasciati in ambiente.

2.3.3 – Risparmio di energia primaria fossile

Dati riferiti al 2012 riportano che il risparmio energetico conseguito in Italia in quell'anno, grazie alle reti di teleriscaldamento, ammonta a circa 478000 tep. Di questo, circa il 90% è stato realizzato dalle regioni Piemonte, Lombardia e Trentino-Alto Adige. A livello

regionale, risultati interessanti si hanno in Toscana con un risparmio di energia primaria del 92.9% e in Valle d'Aosta con l'85.1% [24].

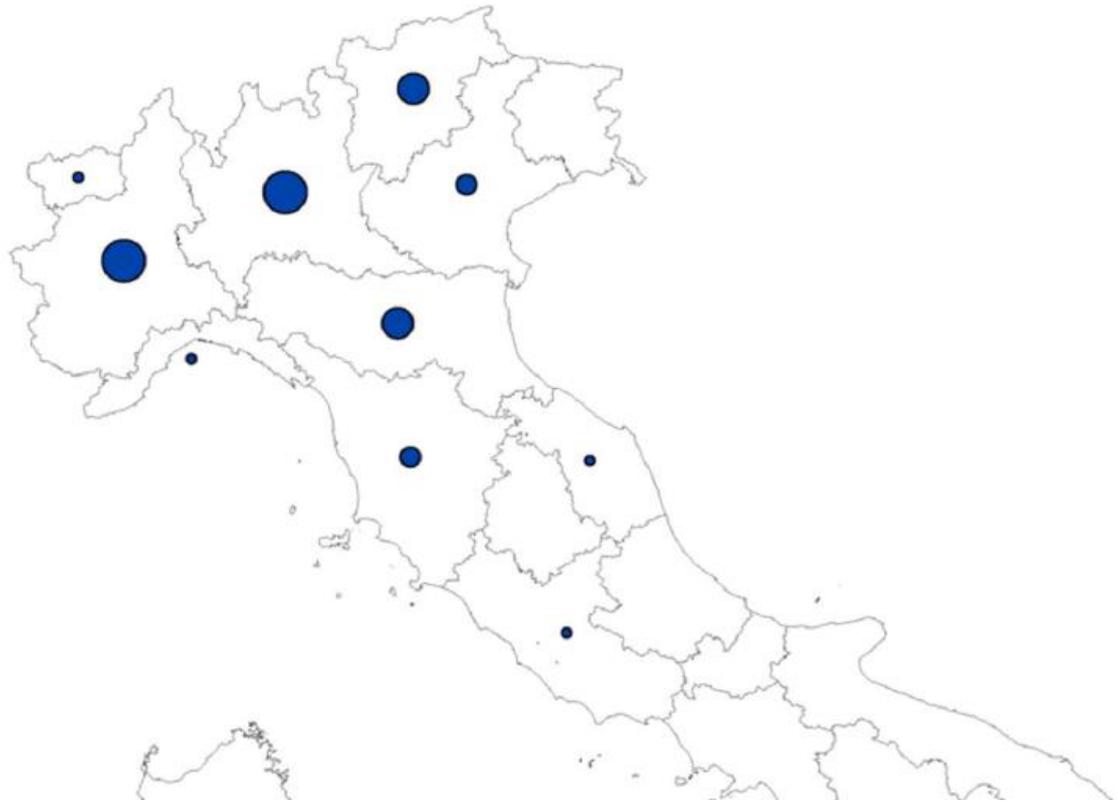


Figura 29: Risparmio di energia primaria fossile in tep [24]

La motivazione principale che sta dietro al grandissimo divario tra Piemonte Lombardia e le altre regioni dove il risparmio è decisamente minore (Liguria, Marche e Lazio) , sta nel fatto che il calore erogato in queste ultime viene prodotto maggiormente da caldaie a combustibili fossili non cogenerative.

Vediamo adesso di quantificare il risparmio economico in termini di emissioni di CO₂ evitate.

2.3.2 – Risparmio in termini di minor rilascio di CO₂ in atmosfera

Il risparmio di energia primaria comporta un risparmio economico: è necessario acquistare una quantità minore di combustibile per conseguire lo stesso effetto utile; un miglioramento della qualità dell'aria dovuto soprattutto a un minore rilascio di gas serra, di cui il principale è il biossido di carbonio.

Lo studio condotto nel 2012 ha portato in luce che gli impianti di teleriscaldamento in Italia hanno evitato di immettere in atmosfera 1.528 Mt di CO₂. Circa il 60% è da attribuire alla sola rete di Torino, la più grande d' Italia. Altro dato a supporto di questa enorme quantità di gas serra evitato, è il fatto che circa il 90% dell'energia è prodotta in una centrale che funziona a ciclo combinato gas-vapore. Il rendimento medio di tale impianto è leggermente minore di 0.8 [24].

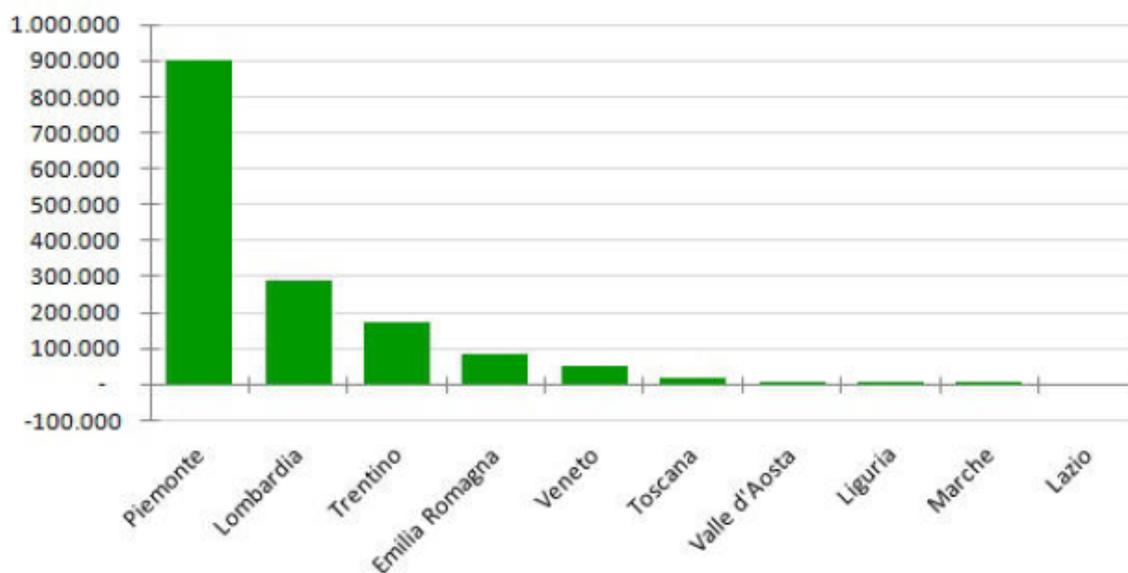


Figura 30: Tonnellate di CO₂ non immesse in atmosfera [24]

3 - Analisi preliminare: dati sperimentali

Il primo step dell'analisi dei profili energetici delle varie utenze collegate alle diverse sottostazioni della rete di teleriscaldamento, prevede lo studio dei dati che IREN ha fornito per la realizzazione del seguente studio. I dati in questione sono dati reali, misurati sperimentalmente tramite appositi strumenti di misura. Si riportano di seguito delle tabelle riassuntive dei dati a disposizione:

<i>Dati metereologici</i>
Temperatura esterna del giorno considerato
Temperatura esterna del giorno precedente a quello considerato
Massima temperatura esterna del giorno precedente a quello considerato
Minima temperatura esterna del giorno precedente a quello considerato

Tabella 1: Dati metereologici - Temperatura esterna

<i>Dati sulla rete</i>
Lunghezza delle tubazioni
Diametro delle tubazioni
Posizione del baricentro della rete
Posizione delle valvole presenti

Tabella 2: Dati sulla rete

<i>Dati relativi alle utenze</i>
Volume dell'edificio dell'utenza
Teleriscaldamento per ACS
Energia consumata per ogni ciclo di accensione-spegnimento
Orario dell'accensione e spegnimento nel formato ore-minuti

Tabella 3: Dati sulle utenze

I dati resi disponibili, sono relativi al periodo 1° gennaio 2015 fino al 31 dicembre 2017. Essi sono relativi ai mesi di riscaldamento ovvero 1° gennaio – 30 aprile, 1° ottobre – 31 dicembre per un totale di 212 giorni (213 per gli anni bisestili). I dati sono inoltre stati valutati ogni 5 minuti. Ci si trova dunque a lavorare con un numero elevatissimo di dati:

$$\text{Numero dati} = \frac{24 \left[\frac{h}{\text{giorno}} \right] * 3600 \left[\frac{s}{h} \right]}{300 [s]} = 183456$$

Le sottostazioni della rete del teleriscaldamento di Torino sono 10. Ciascuna di esse serve un numero ben preciso di utenze. Si riporta di seguito una tabella che mostra il numero delle utenze allacciate a ciascuna sottostazione.

Sottostazione	Numero di utenze allacciate	Numero di utenze con flusso nullo
406	160	18
408	50	7
410	92	14
411	57	20
413	106	26
414	110	11
418	19	1
419	66	4
420	11	0
442	87	8

Tabella 4: Sottostazioni della rete del teleriscaldamento e utenze ad esse allacciate

Estendendo l'analisi su tre anni, è chiaro che tutti i valori disponibili sono riferiti a 637 giorni (il 2016 è bisestile). Vediamo di seguito quali sono stati i dati misurati sperimentalmente e di cui ci si è serviti per portare avanti il lavoro di tesi.

<i>Dati sperimentali</i>
Potenza termica
Portata
T ₁
T ₂
T ₃
T ₄

Tabella 5: Dati sperimentali

Si indica con T_1 e T_2 le temperature rispettivamente di ingresso ed uscita dallo scambiatore di calore riferiti al ramo di mandata, con T_3 e T_4 invece le temperature di ingresso e uscita dallo scambiatore sul ramo di ritorno.

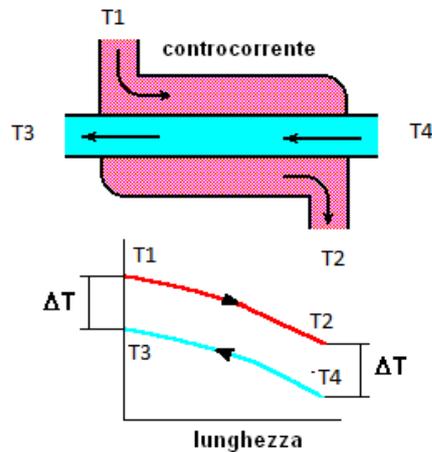


Figura 31: Scambiatore di calore in controcorrente [25]

Come è noto, lavorare con i dati sperimentali mostra delle difficoltà evidenti. Spesso ci si trova infatti ad avere valori non realistici a causa dei vari errori commessi in fase di lettura e registrazione delle grandezze che si stanno esaminando. Gli errori possono essere di vario tipo: errata calibrazione dello strumento, guasti dello strumento, fattori che influenzano la lettura non rendendola realistica. Vediamo nella fattispecie qualche esempio:

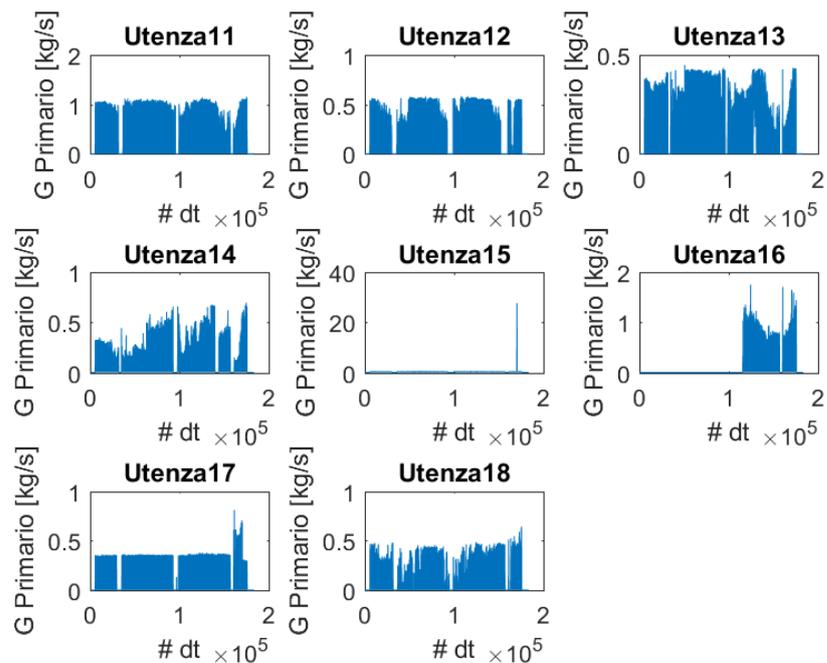


Figura 32: Portata del primario - sottostazione 419

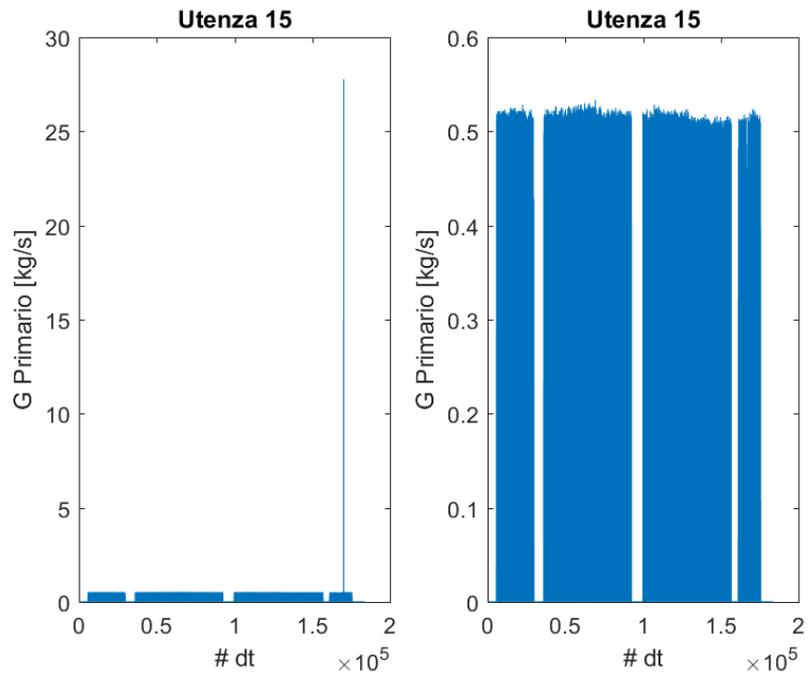


Figura 33: Zoom sull'utenza 15

Le figure soprastanti mostrano la portata del primario per le varie utenze allacciate alla sottorete 419. I dati sono relativi ai 637 giorni, come riportato in precedenza. La figura mostra dei valori sempre concordi, dello stesso ordine di grandezza, ad eccezione di uno. La seconda figura mostra l'utenza in questione prima e dopo la rimozione del valore impossibile.

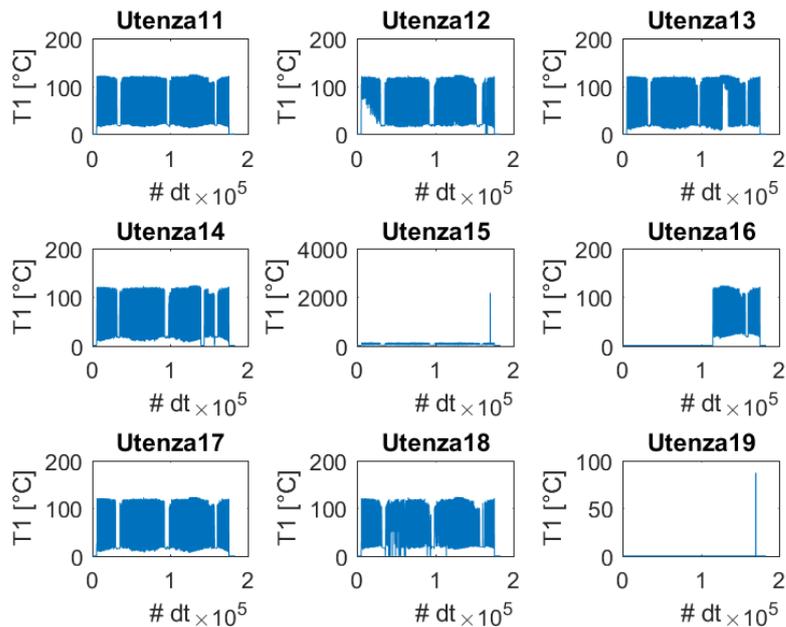


Figura 34: Temperatura T1 - sottostazione 419

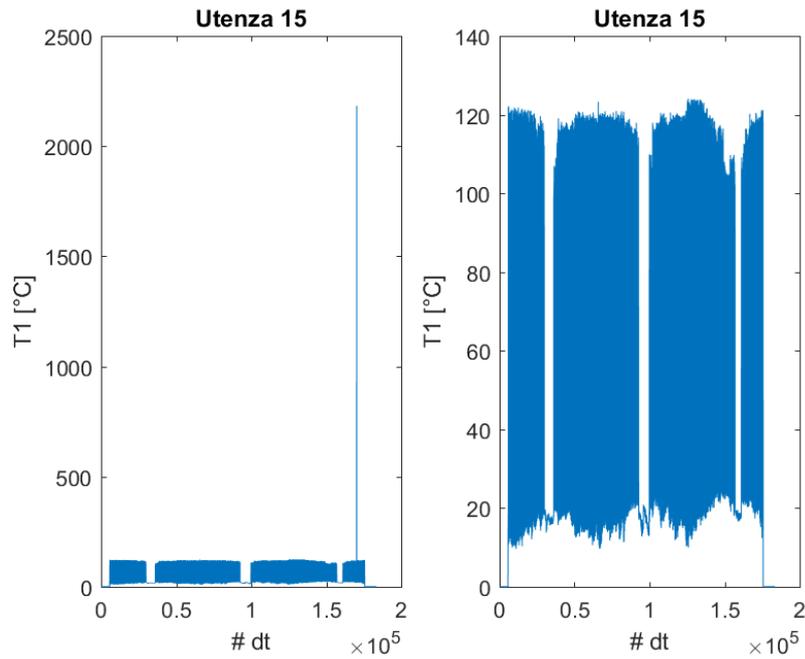


Figura 35: Zoom sull'utenza 15

Ancora una volta si vede una situazione irreal: è stata misurata e registrata una temperatura di oltre 2000 °C. I valori, già irrealistici se presi singolarmente, lo sono ancor di più se confrontati con gli altri, relativi alla stessa utenza. Si riporta di seguito alcuni casi che mostrano temperature e portate, riferite a sottostazioni diverse, i cui valori invece rientrano nella normalità:

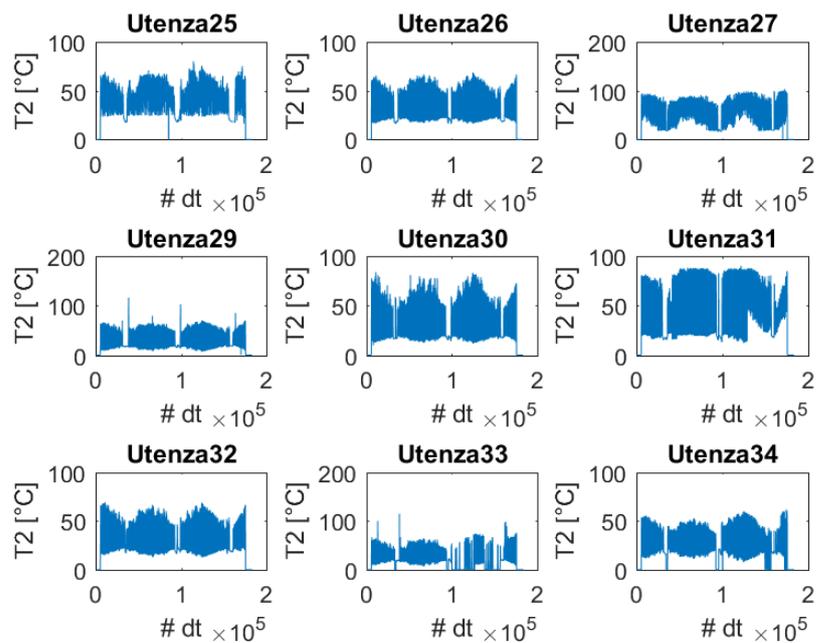


Figura 36: Temperatura T2 - sottostazione 442

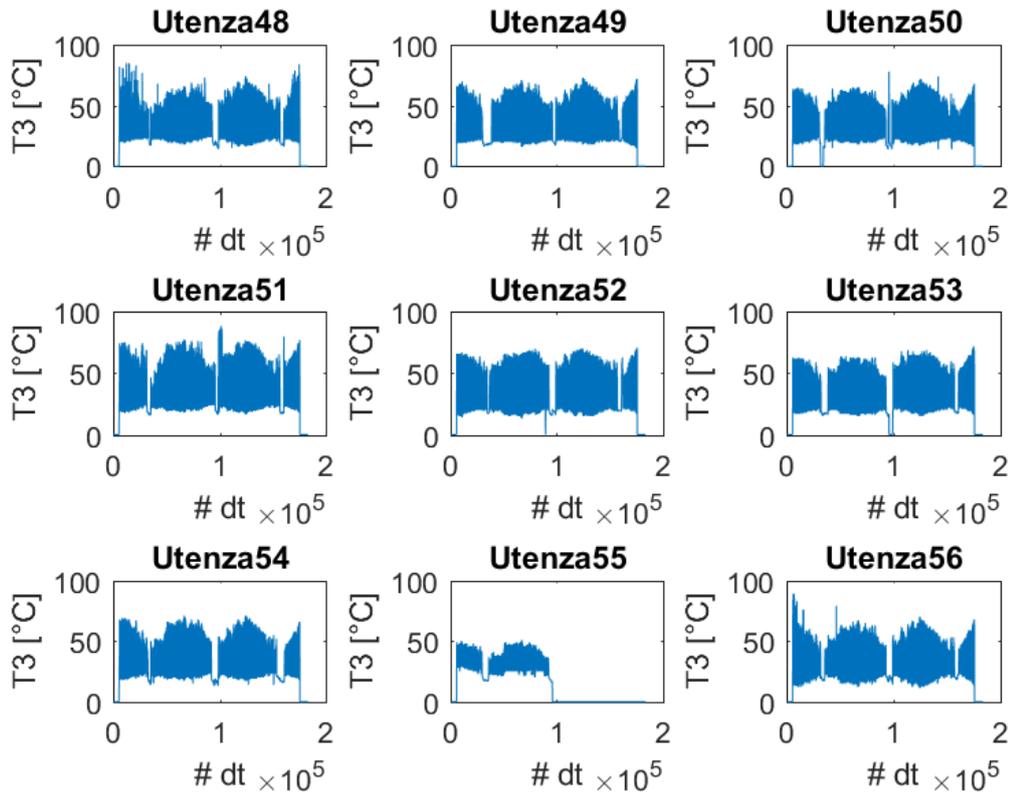


Figura 37: Temperatura T3 - sottostazione 442

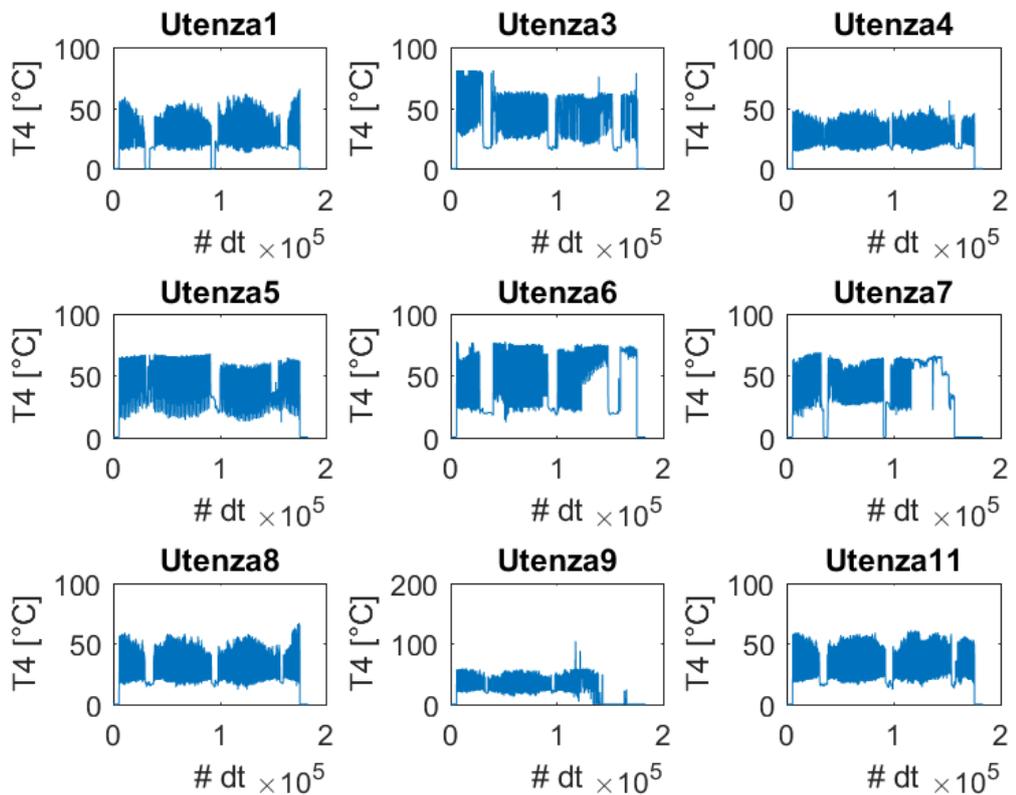
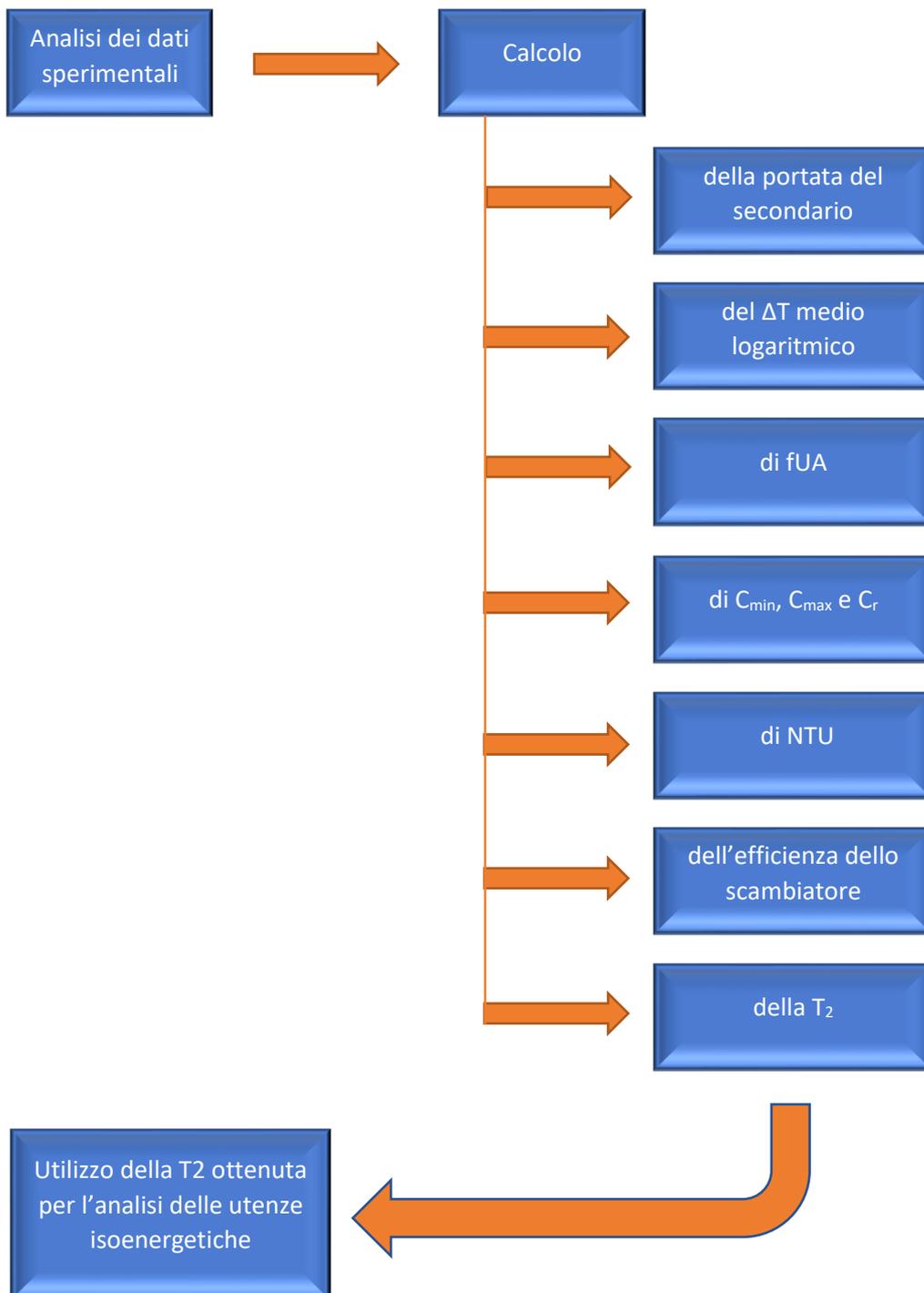


Figura 38: Temperatura T4 - sottostazione 420

3.1 – Step dell'analisi

Dopo aver analizzato i dati sperimentali si è proceduto alla modellazione dello scambiatore di calore. Quello che si vuole ottenere è creare un modello in grado di calcolare la temperatura T_2 in uscita dallo scambiatore di calore, lato primario, senza servirsi più dei dati sperimentali. Il modello che si è utilizzato è il metodo ϵ -NTU affiancato da quello che considera il ΔT medio logaritmico. Di seguito viene riportato un diagramma di flusso che mostra i vari step che hanno condotto al calcolo di T_2 .



3.1.1 – Calcolo della portata del secondario

Dai dati a disposizione non era nota la portata del secondario. Il primo step è consistito dunque nel calcolo di tale portata. Questa è stata calcolata eguagliando il flusso termico scambiato tra il primario e il secondario, servendosi delle temperature di ingresso e uscita dallo scambiatore di calore lato secondario. Dal novero sono state tuttavia trascurati quei casi in cui la temperatura in ingresso T_4 fosse maggiore della temperatura di uscita T_3 .

$$\Phi = \dot{G}_1 * cp * (T_1 - T_2)$$

$$\Phi = \dot{G}_2 * cp * (T_3 - T_4)$$

Lavorando con i dati sperimentali, questa possibilità esiste, ed in effetti si è verificata più volte nel corso delle varie simulazioni lanciate e relative alle diverse sottostazioni considerate. Si riporta di seguito una tabella riassuntiva:

Sottostazione	Numero di utenze allacciate	Casi anomali ($T_4 > T_3$)	[%]
406	160	134940	$\cong 0.46 \%$
408	50	22318	$\cong 0.24 \%$
410	92	590014	$\cong 3.5 \%$
411	57	246997	$\cong 2.3 \%$
413	106	270936	$\cong 1.4 \%$
414	110	892336	$\cong 4.4 \%$
418	19	92270	$\cong 2.6 \%$
419	66	540514	$\cong 4 \%$
420	11	97560	$\cong 4.8 \%$
442	87	659459	$\cong 4 \%$

Tabella 6: Analisi portata secondario - Casi anomali

È chiaro che andando a valutare la percentuale delle anomalie rispetto al totale, queste risultano rappresentare una piccola parte. Per completezza e precisione del lavoro svolto, è stato comunque analizzato l'errore commesso nella registrazione dei dati, e per rendere il risultato quanto più attendibile possibile, tutti questi casi non sono stati considerati. Si riportano di seguito delle immagini relative alla portata del secondario:

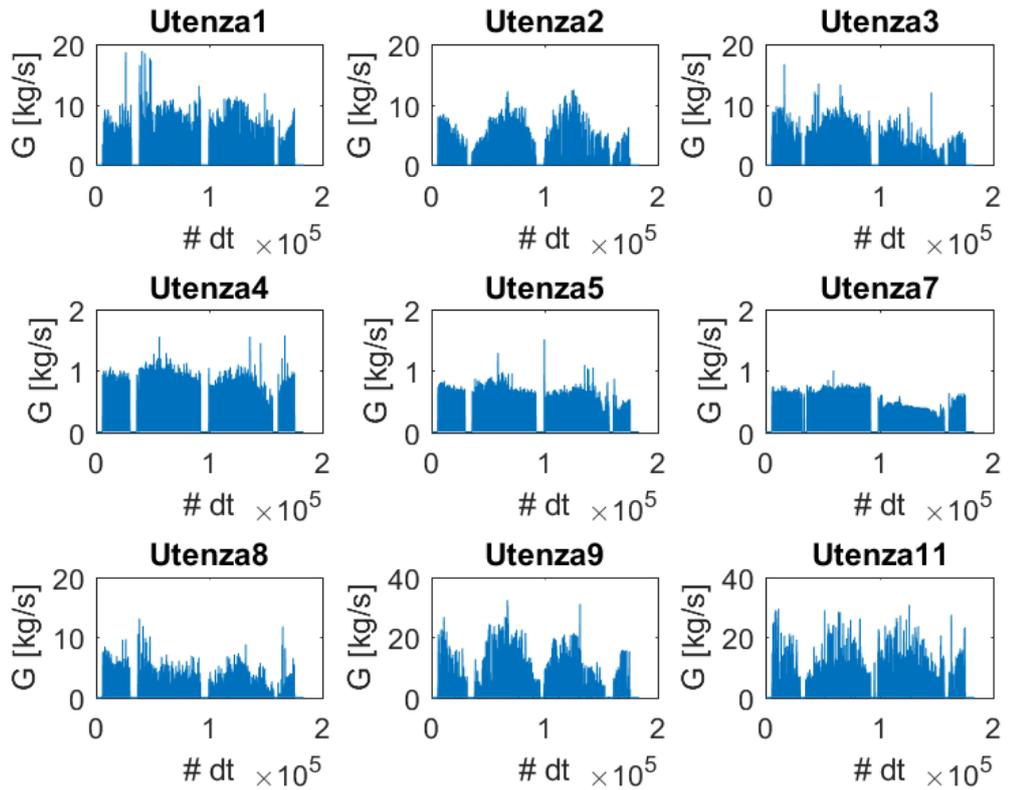


Figura 39: Portata del secondario - Sottostazione 414

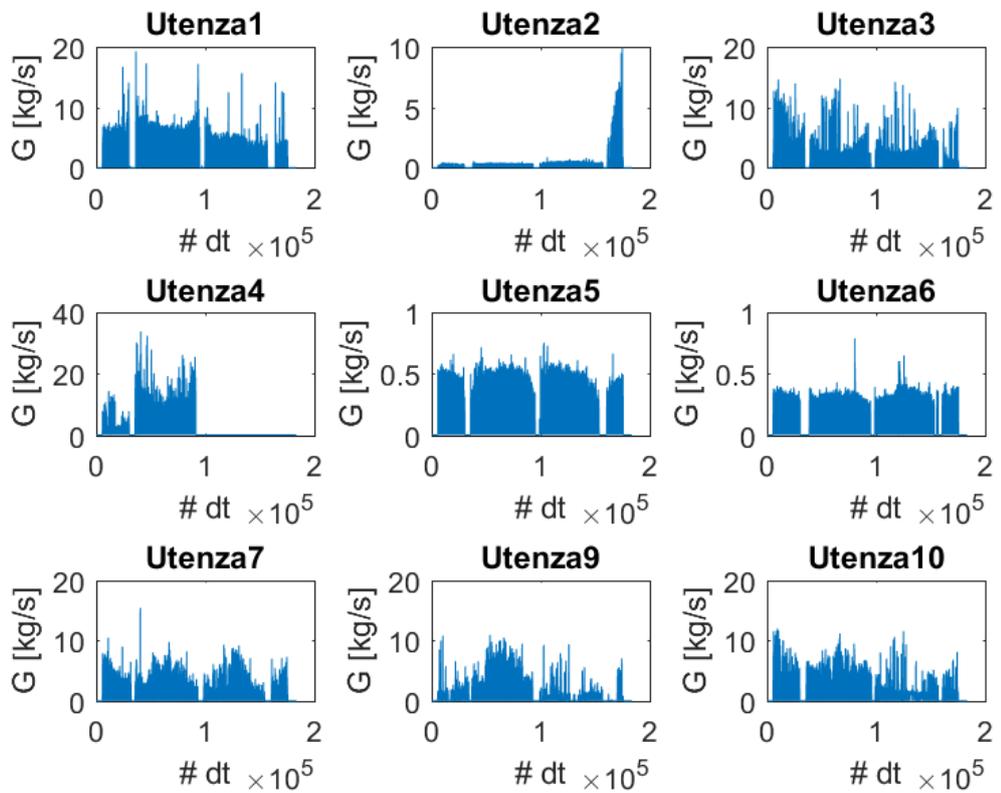
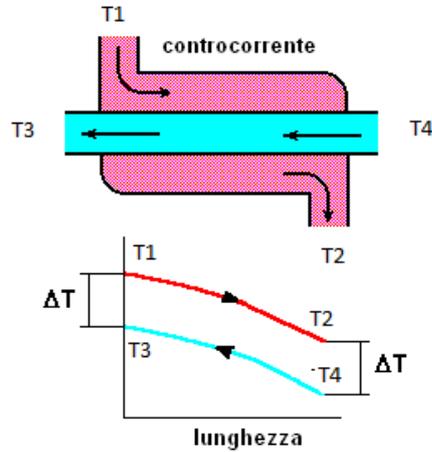


Figura 40: Portata del secondario - sottostazione 419

3.1.2 – Calcolo del ΔT medio logaritmico

Si faccia riferimento alla figura dello scambiatore in controcorrente presentata nei paragrafi precedenti e riportata nuovamente di sotto.



Il calcolo del ΔT medio logaritmico consiste nel calcolo della differenza di temperatura, da qui il delta, tra le temperature del primario e del secondario. L'acqua calda entra nello scambiatore, cede calore e si raffredda portandosi dal valore T_1 al valore T_2 . L'acqua fredda del secondario invece, entra nello scambiatore e passa dal valore T_4 al valore T_3 . Il ΔT medio logaritmico è così calcolato:

$$\Delta T_{ML} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\log\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)}$$

I termini nella formula rappresentano:

- ΔT_1 : è la differenza di temperatura tra T_1 e T_2
- ΔT_2 : è la differenza di temperatura tra T_3 e T_4 .

Come mostrato dal diagramma, la curva rossa, rappresentativa del fluido primario che dalla centrale entra nello scambiatore, quindi il fluido caldo, deve sempre trovarsi sopra il fluido secondario, quello freddo. Ancora una volta, a causa degli errori che sono stati commessi nella lettura e nella registrazione dei risultati, non sempre la T_1 è maggiore della T_3 e la T_2 della T_4 . Per il calcolo del ΔT medio logaritmico sono dunque stati esclusi tutti quei casi anomali in cui non veniva rispettato il principio della temperatura del primario maggiore di quella del secondario. Si riporta di seguito una tabella riassuntiva:

Sottostazione	Numero di utenze allacciate	Casi anomali	[%]
406	160	1333884	$\cong 4.5 \%$
408	50	193738	$\cong 2 \%$
410	92	912044	$\cong 5.4 \%$
411	57	471872	$\cong 4.5 \%$
413	106	857132	$\cong 4.4 \%$
414	110	4094145	$\cong 20 \%$
418	19	446714	$\cong 12.8 \%$
419	66	1782378	$\cong 14.7 \%$
420	11	227612	$\cong 11.3 \%$
442	87	1626776	$\cong 10.2 \%$

Tabella 7: Casi anomali nel calcolo del ΔT medio logaritmico

L'errore commesso questa volta è maggiore. Questo ce lo si aspetta in quanto non occorre più soddisfare un'unica richiesta come nel caso precedente ($T_4 > T_3$ nel caso della portata del secondario). Questa volta invece si è imposto che tutte e quattro le temperature fossero diverse da zero, e, solo per quei casi, si è valutato il numero dei casi in cui sia il ΔT_1 che il ΔT_2 fossero positivi. Vediamo qualche risultato:

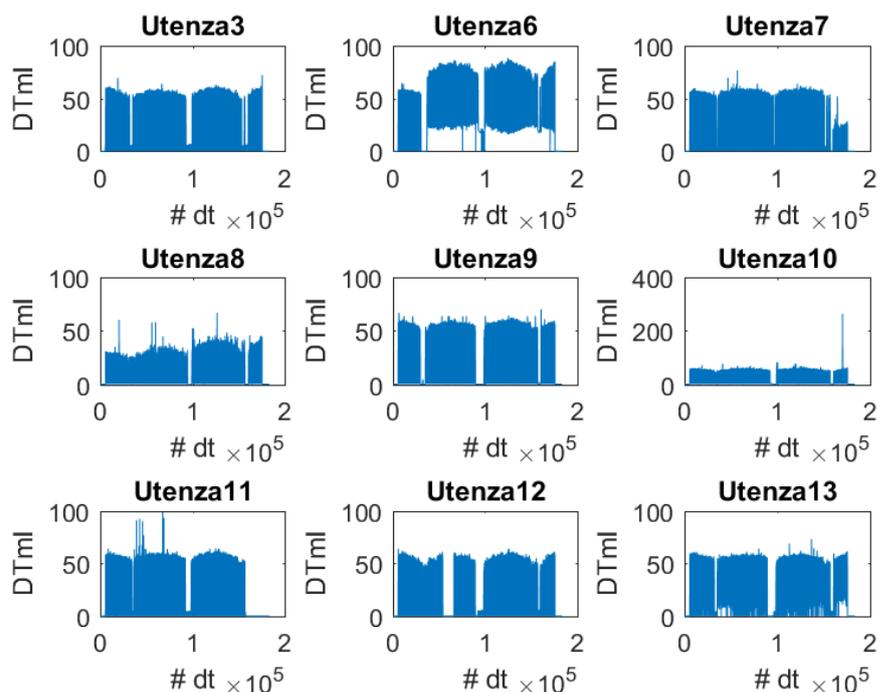


Figura 41: ΔT medio logaritmico - Sottostazione 406

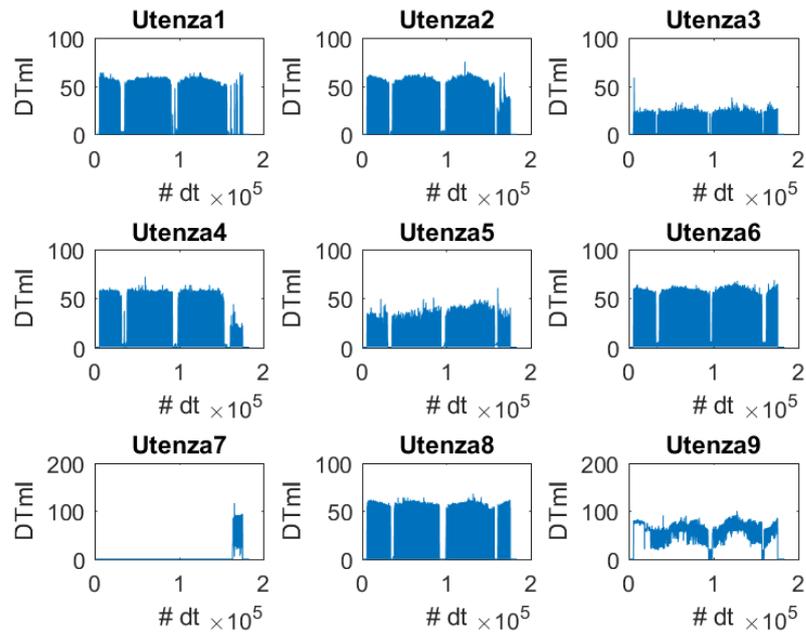


Figura 42: ΔT medio logaritmico - sottostazione 408

3.1.3 – Calcolo di fUA

Per il dimensionamento dello scambiatore di calore, e quindi per il raggiungimento dello scopo che ci si siamo prefissati di raggiungere, riuscire a valutare la T_2 in uscita dallo scambiatore senza ricorrere più all'utilizzo dei dati sperimentali, ci occorre conoscere il prodotto fUA. Vediamo di seguito:

$$\Phi = f * U * A * \Delta T_{ML}$$

I termini presenti nell'equazione hanno i significati di:

- f: Fattore correttivo che rappresenta il *grado di controcorrente* dello scambiatore. Più il fattore è prossimo all'unità, più il funzionamento dello scambiatore rispecchia lo scambio in controcorrente;
- U: coefficiente globale di scambio termico [W/m²/K];
- A: Superficie di scambio termico [m²];

Noto il flusso dai dati sperimentali, avendo calcolato il ΔT medio logaritmico, è adesso possibile calcolare il prodotto fUA. Un appunto va fatto anche in questo caso. Dal novero non sono stati inclusi tutti quei casi in cui il ΔT medio logaritmico fosse nullo. Questo per

evitare un risultato impossibile. Si riporta di seguito alcuni grafici che mostrano vari valori del prodotto fUA per le varie utenze delle diverse sottostazioni di scambio.

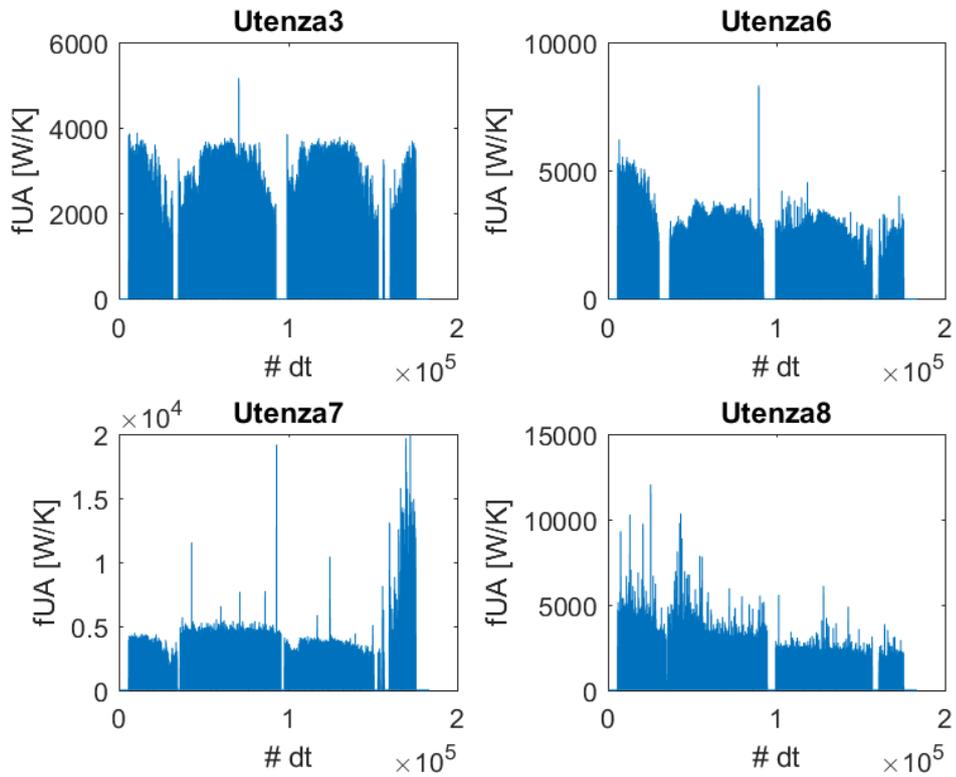


Figura 43: fUA - Sottostazione 406

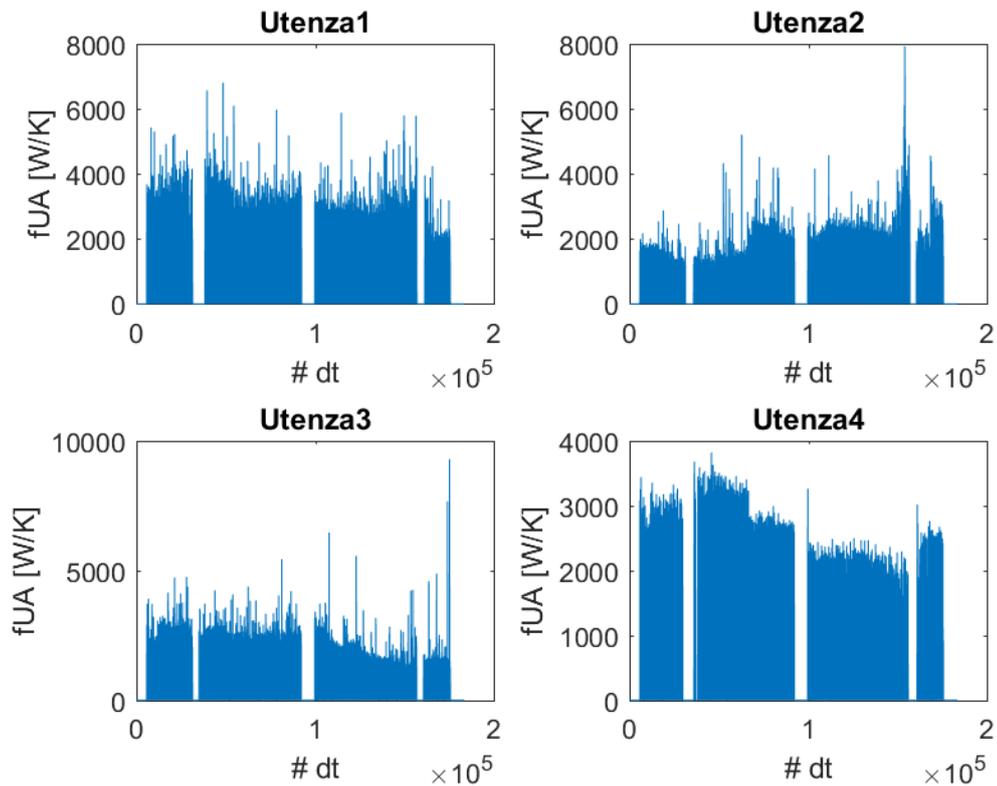


Figura 44: fUA - Sottostazione 414

3.1.4 – Calcolo di C_{min} , C_{max} e C_r

Per poter ottenere la T_2 in modo indipendente dall'utilizzo dei dati sperimentali, occorre, come già detto, un modello di scambiatore di calore costruito servendosi del ΔT medio logaritmico e del metodo ε -NTU. Vediamo quali sono passo passo tutti gli step da seguire per la formulazione di questa seconda tipologia di modello.

Il primo step consiste nel calcolo del C_{min} , C_{max} e C_r . Vediamo di seguito cosa ciascuno di questi termini rappresenta. Si calcola anzitutto C_{hot} e C_{cold} :

$$C_{hot} = \dot{G}_{hot} * cp \left[\frac{W}{K} \right]$$
$$C_{cold} = \dot{G}_{cold} * cp \left[\frac{W}{K} \right]$$

Con il pedice hot si sono indicate le grandezze relative al ramo caldo, al circuito primario; con il pedice cold invece le grandezze relative al ramo freddo, il secondario. Per ricavare il C_{min} e C_{max} altro non si fa che il confronto tra le due grandezze appena calcolate. Il valore maggiore tra C_{hot} e C_{cold} rappresenterà il C_{max} mentre il minore dei due il C_{min} .

$$Se: C_{hot} > C_{cold} \longrightarrow C_{max} = C_{hot}$$

$$Se: C_{cold} > C_{hot} \longrightarrow C_{max} = C_{cold}$$

La terza grandezza invece, il C_r , è il rapporto tra C_{min} e C_{max} :

$$C_r = \frac{C_{min}}{C_{max}}$$

Vediamo qualche risultato:

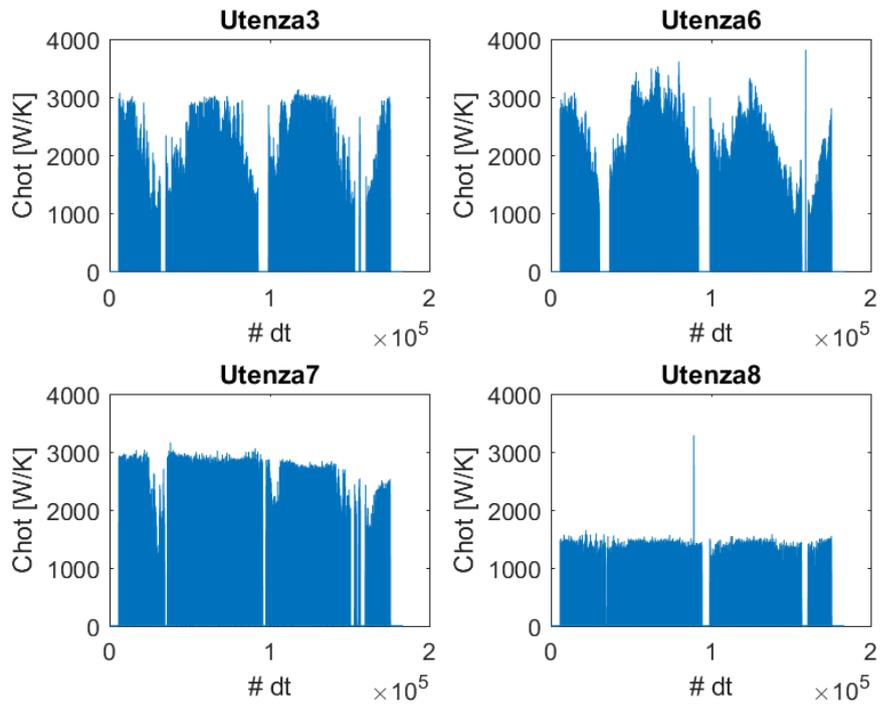


Figura 45: C_{hot} - sottostazione 406

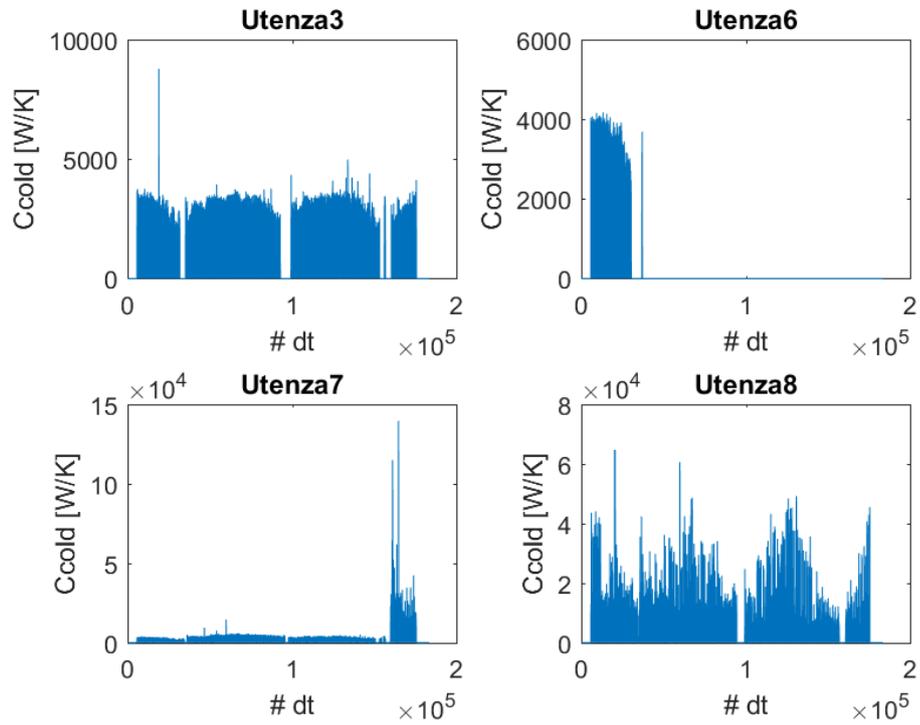


Figura 46: C_{cold} - sottostazione 406

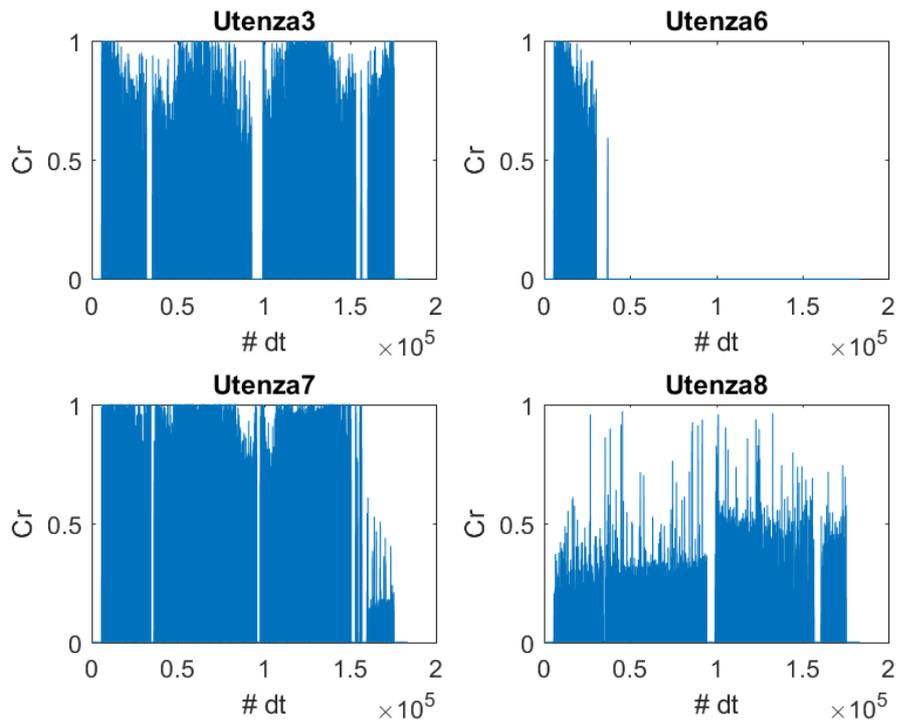


Figura 47: C_r - sottostazione 406

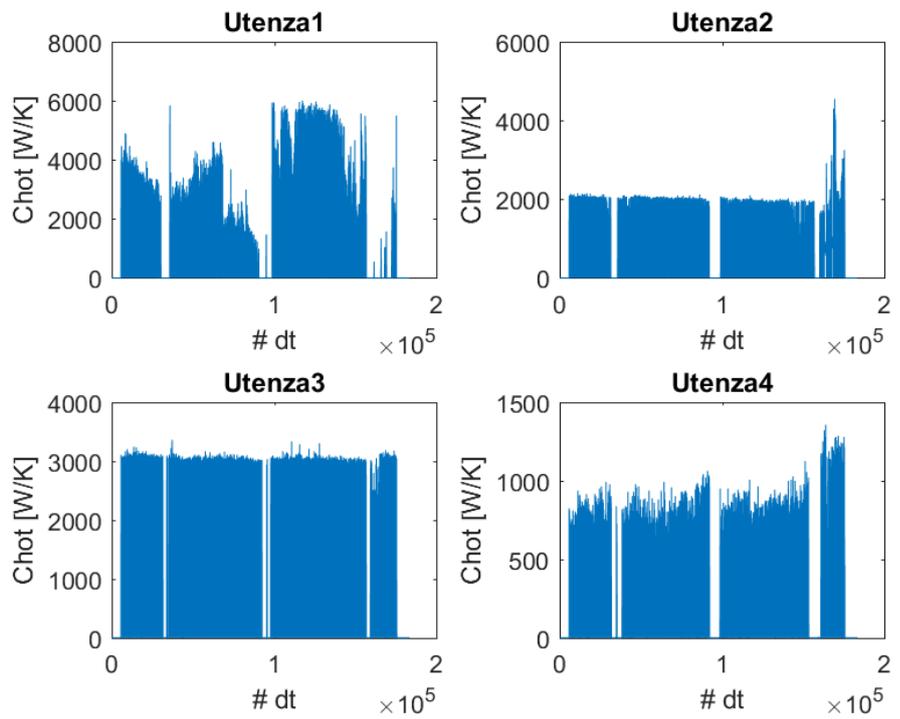


Figura 48: C_{hot} - sottostazione 408

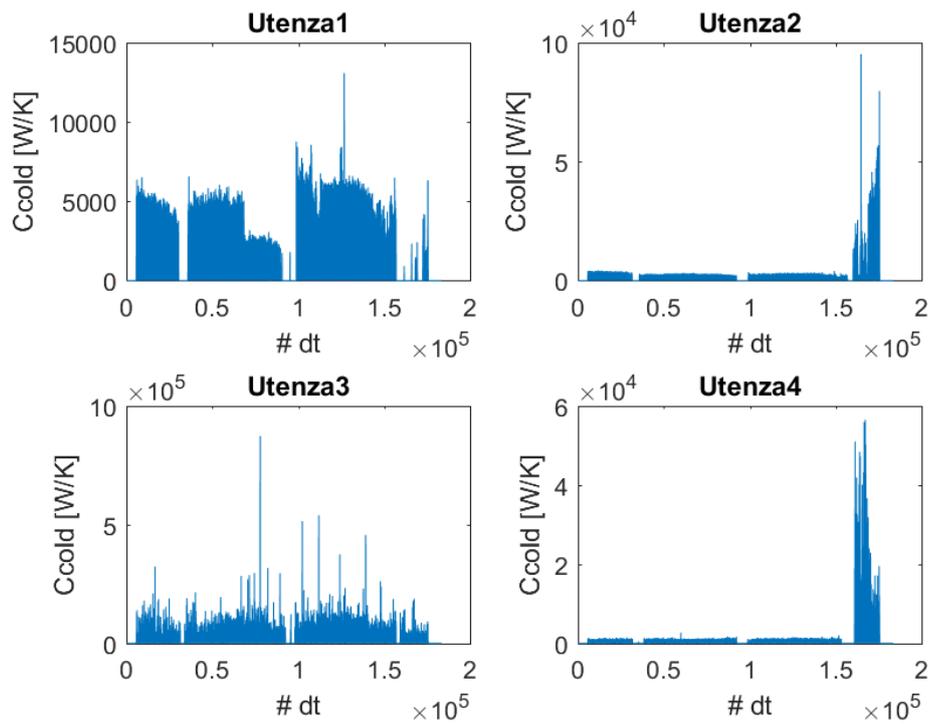


Figura 49: C_{cold} - sottostazione 408

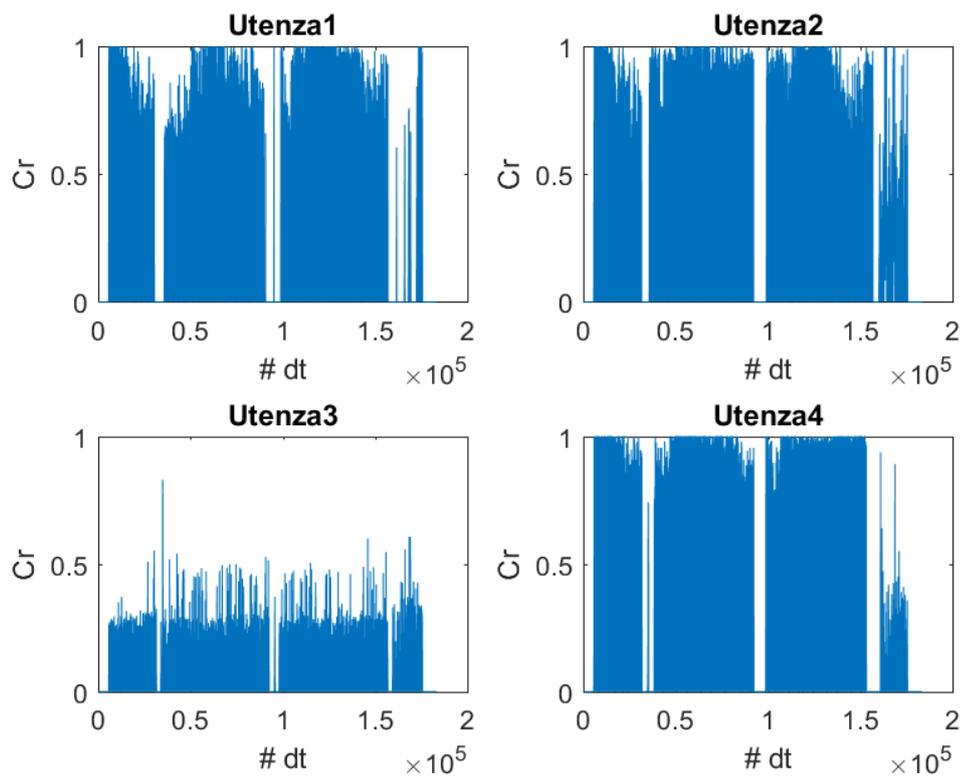


Figura 50: C_r - sottostazione 408

3.1.5 – Calcolo di NTU

Un parametro importante nel dimensionamento dello scambiatore è NTU ovvero il numero di unità di scambio termico (Number of Transfer Units). Il valore di NTU è calcolato come segue:

$$NTU = \frac{fUA}{C_{\min}}$$

Tenendo sempre a mente il nostro obiettivo, è chiaro che dobbiamo iniziare a trovare un modo per slegarci dai dati sperimentali e procedere seguendo un percorso alternativo ma corretto e valido. A tal proposito, tramite una funzione di MATLAB, si è utilizzato un fitting dei dati a disposizione per ricavare NTU.

Per ciascuna delle utenze allacciate alla sottostazione in esame, si è ordinato in ordine crescente il flusso termico, dato reso disponibile da IREN. Utilizzando lo stesso ordine e quindi la stessa correlazione che c'era tra le varie variabili prima del loro ordinamento, si è proceduto con l'ordine crescente di: fUA, T₂, T₁, C_{min}, C_{max}, C_r.

fUA ordinato
C _{hot} ordinato
T ₂ ordinato
T ₁ ordinato
C _{min} ordinato
C _{max} ordinato
C _r ordinato

Tabella 8: Elenco delle variabili che sono state ordinate per il calcolo di NTU

La funzione di fitting utilizzata è polyfit/polyval. Tramite questa viene generato un polinomio, il cui grado è settato in input, e il programma dà in output il polinomio che meglio rappresenta la funzione di cui si vuole ricavare l'andamento. La funzione in questione è proprio il numeratore del Numero di Unità di scambio Termico: fUA. Nel novero sono stati tolti tutti quei valori del flusso termico e del fUA, ricavato dai dati sperimentali, nulli. L'unica imposizione che si è data in fase di simulazione è stata quella di non considerare tutti quei valori di fUA, ricavati dal fitting dei dati sperimentali, negativi o che si distaccassero molto rispetto alla media dei valori ottenuti. Facendo il rapporto tra questi valori e quelli di C_{min}, ricavati in precedenza, si è ricavato il valore di NTU.

Vediamo alcuni dei risultati ottenuti:

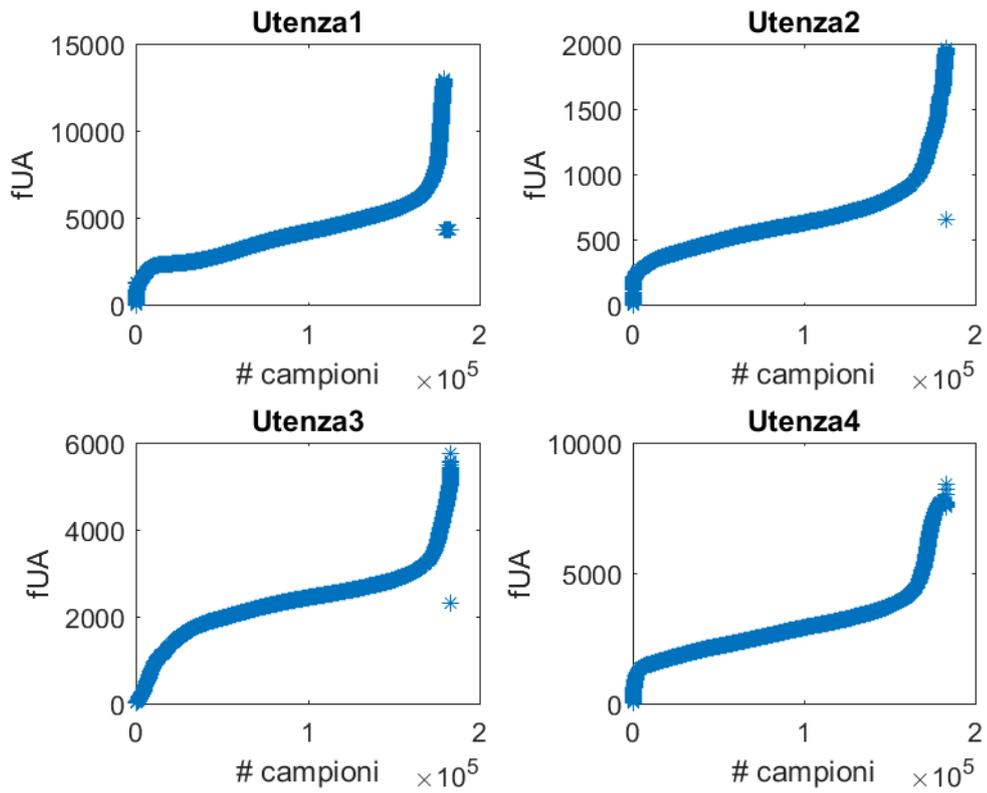


Figura 51: fUA dato dal fitting - sottostazione 419

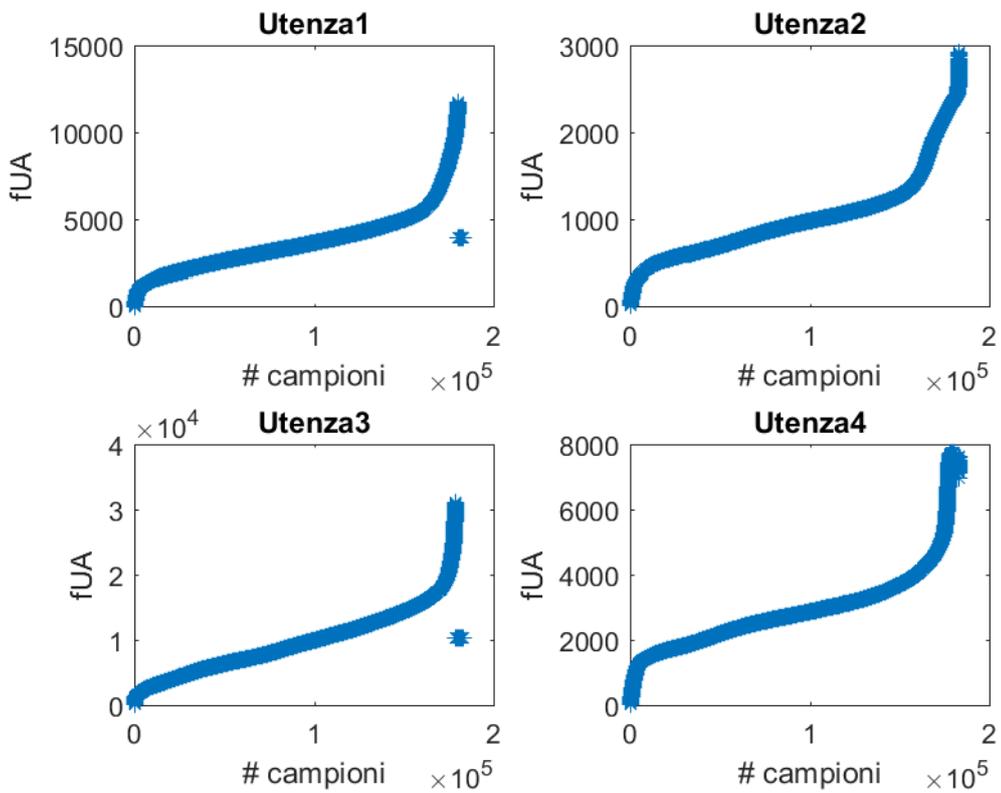


Figura 52: fUA dato dal fitting - sottostazione 418

Anche le due figure mostrate rappresentano i valori di fUA. Il risultato è tuttavia diverso da quello ricavato nei paragrafi precedenti in quanto: i primi sono stati ricavati servendosi dei dati sperimentali, gli ultimi invece sono stati ottenuti dal fitting di fUA al variare del flusso. Quest'ultimo risultato ottenuto è stato ordinato in ordine crescente per poter essere utilizzato successivamente per ricavare i valori di T_2 .

I valori di fUA appena ricavati sono inoltre stati utilizzati per trovare NTU. Le figure che seguono infatti rappresentano i valori di NTU ricavati dall'utilizzo del modello piuttosto che dai dati sperimentali.

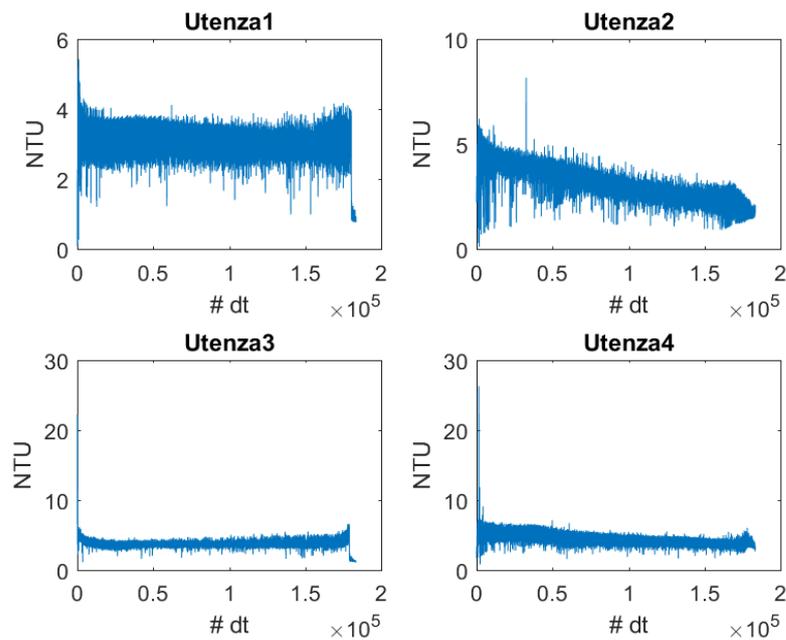


Figura 53: NTU - sottostazione 418

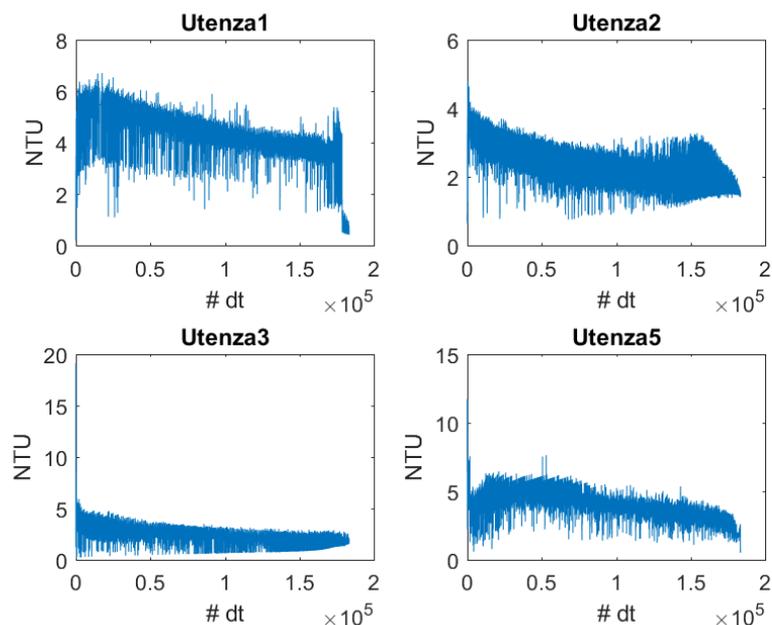


Figura 54: NTU - sottostazione 442

3.1.6 – Calcolo dell'efficienza dello scambiatore e del flusso termico

Attraverso l'utilizzo del modello ε -NTU è possibile risalire alla temperatura T_2 . Step necessario per il suo raggiungimento è la valutazione dell'efficienza dello scambiatore di calore. La formula utilizzata per il calcolo dell'efficienza è relativa a scambiatori a tubi concentrici funzionanti in controcorrente [26].

Se $C_r < 1$:

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp(-NTU * (1 - C_r))}{1 - C_r * \exp(-NTU * (1 - C_r))}$$

Se $C_r = 1$:

$$\varepsilon = \frac{NTU}{1 + NTU}$$

L'efficienza è anche pari al rapporto tra il flusso termico realmente scambiato e il massimo flusso termico scambiabile:

$$\varepsilon = \frac{\Phi}{\Phi_{max}}$$

Il flusso massimo è invece calcolato considerando il massimo delta temperature possibile. La formula utilizzata per ricavarlo è la seguente:

$$\Phi_{max} = C_{min} * (T_1 - T_4)$$

La massima temperatura è proprio la T_1 ovvero la temperatura in ingresso allo scambiatore lato primario, quella più bassa è invece quella in ingresso lato secondario. Questo ΔT va quindi moltiplicato per il C_{min} . Tramite formula inversa, avendo sia l'efficienza dello scambiatore sia il flusso massimo, è possibile ricavare il flusso realmente scambiato:

$$\Phi = \Phi_{max} * \varepsilon$$

Si riportano di seguito dei grafici che mostrano i valori ottenuti dell'efficienza dello scambiatore e il flusso termico ricavato dal modello.

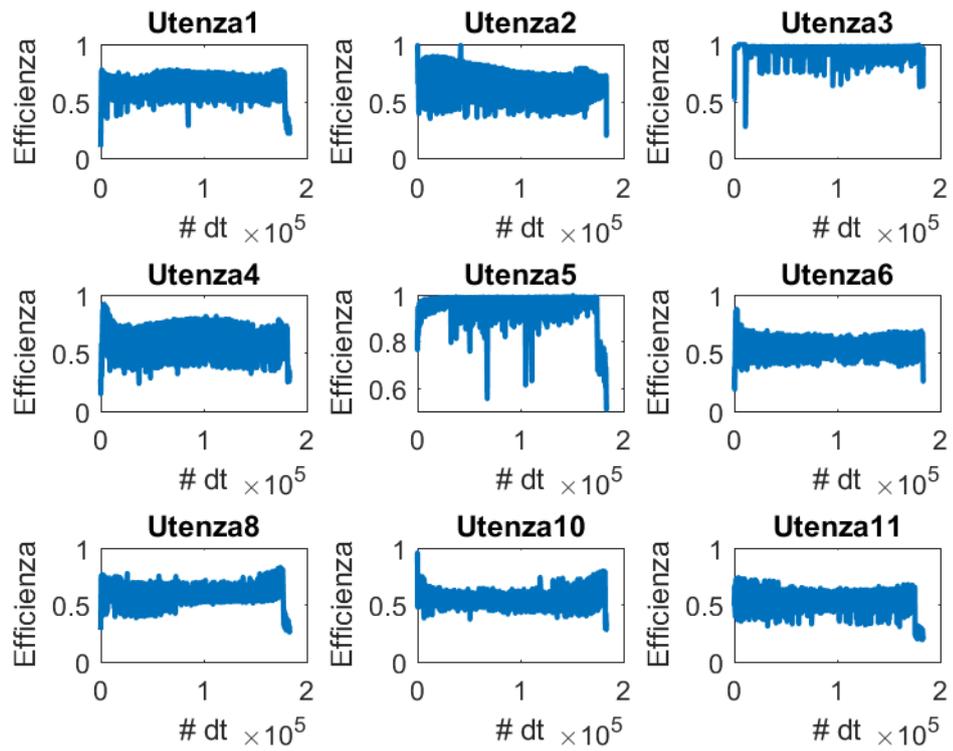


Figura 55: Efficienza - sottostazione 408

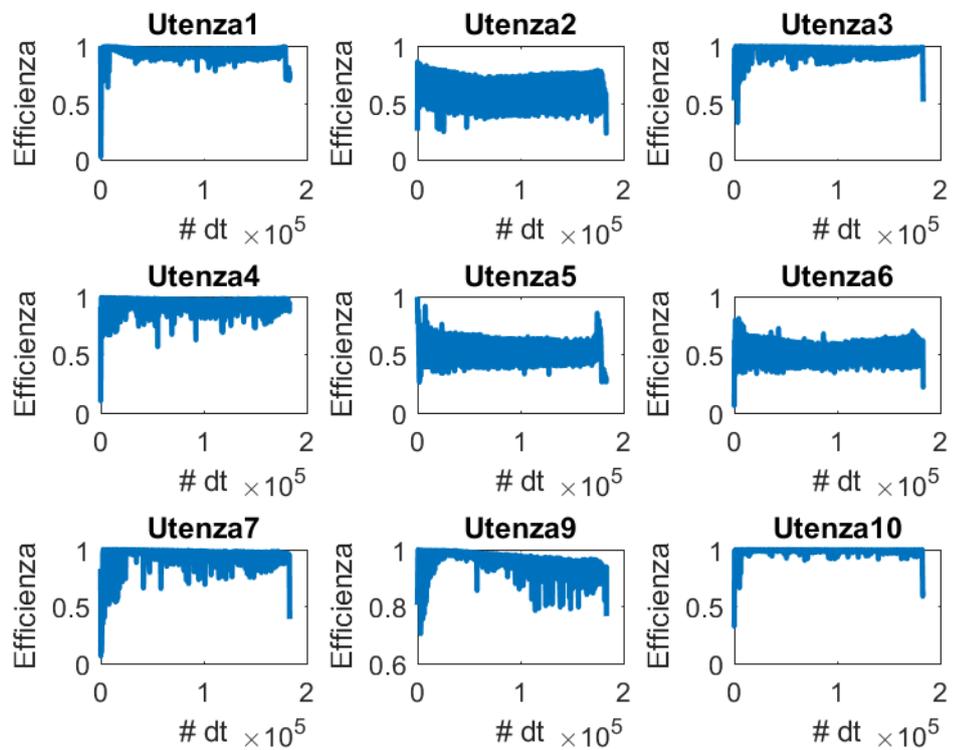


Figura 56: Efficienza - sottostazione 419

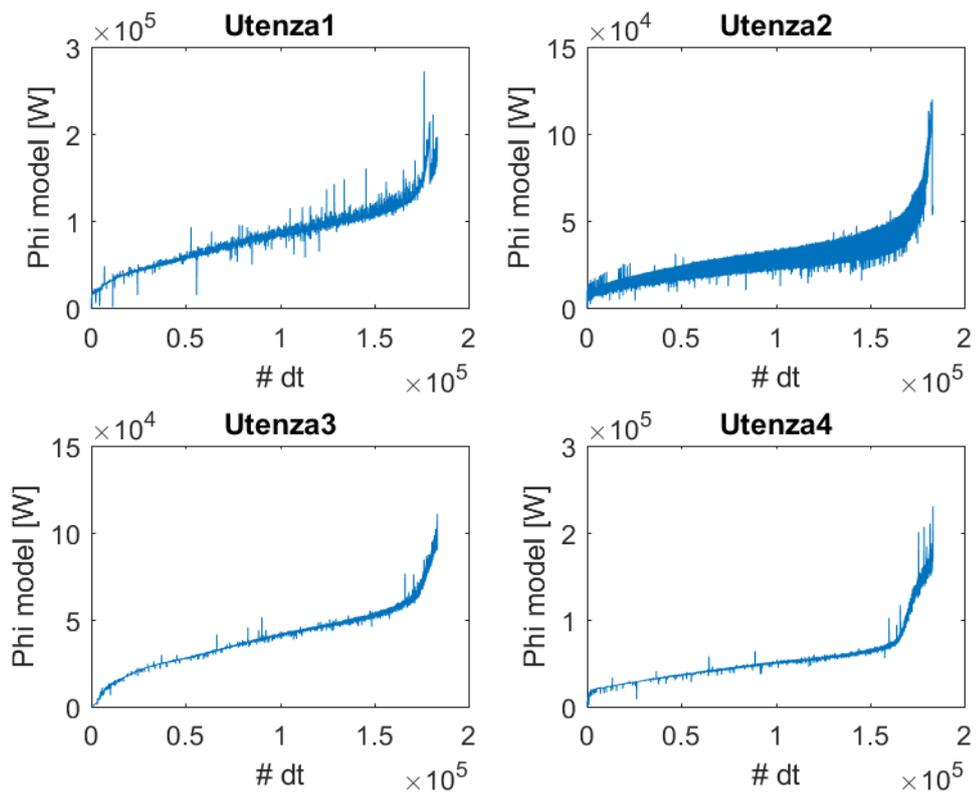


Figura 57: Flusso termico da modello - sottostazione 419

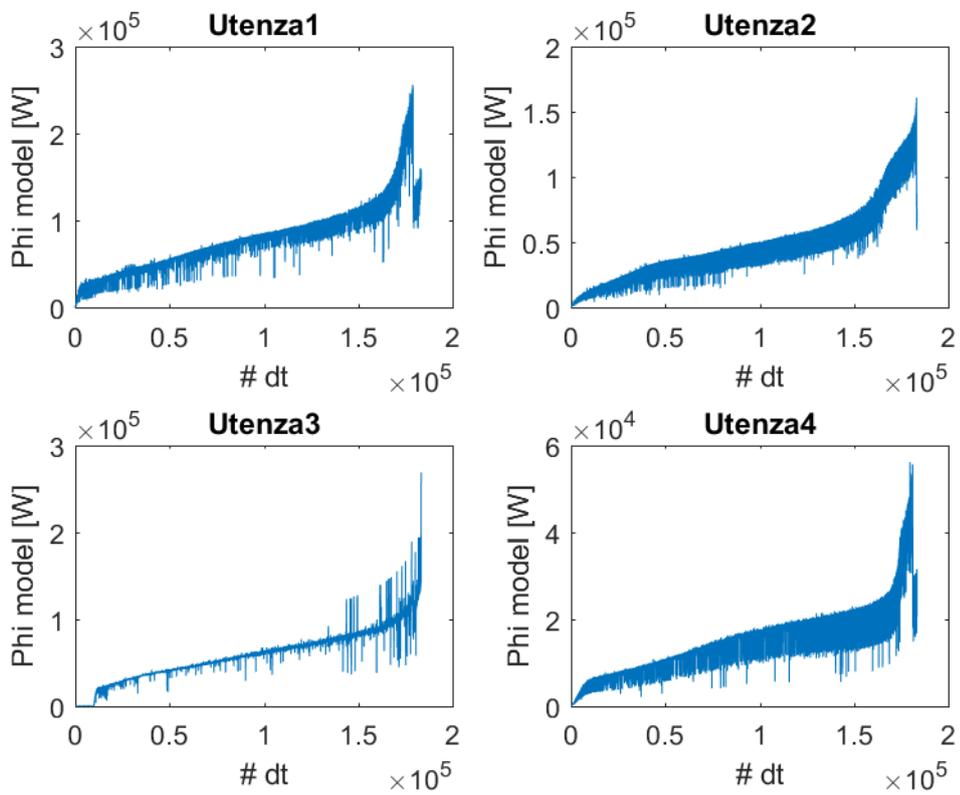


Figura 58: Flusso termico da modello - sottostazione 408

3.1.7 – Calcolo della T_2

Siamo dunque giunti all'ultimo degli step di calcolo (mostrati nel diagramma di flusso): il calcolo della temperatura T_2 . Nel paragrafo precedente abbiamo calcolato il flusso scambiato tra primario e secondario e, nei paragrafi precedenti, avevamo calcolato C_{hot} , il prodotto della portata del primario per il calore specifico. Tramite questi due dati è dunque possibile calcolare il ΔT dell'acqua del primario:

$$\Delta T_{water} = \frac{\Phi}{C_{hot}}$$

Il vettore contenente i valori di C_{hot} è anch'esso ordinato. La correlazione che c'era tra tutte le variabili prima e dopo aver ordinato il flusso deve restare invariata. Tramite la formulazione soprastante si è dunque calcolata la variazione di temperatura del primario. Servendoci della T_1 , dato fornito da IREN, è stato dunque possibile ricavare la temperatura in uscita dallo scambiatore lato primario, la T_2 .

$$T_2 = T_1 - \Delta T_{water}$$

Ancora una volta, a causa dell'utilizzo dei dati sperimentali, sono state fatte delle verifiche e sono stati eliminati tutti quei valori di T_2 che non rispettavano alcune regole:

- ΔT_{water} deve essere diverso da zero, altrimenti T_1 e T_2 sarebbero uguali e non ci sarebbe alcun flusso termico scambiato;
- T_1 deve essere maggiore del ΔT_{water} .

Vediamo di seguito i risultati ottenuti:

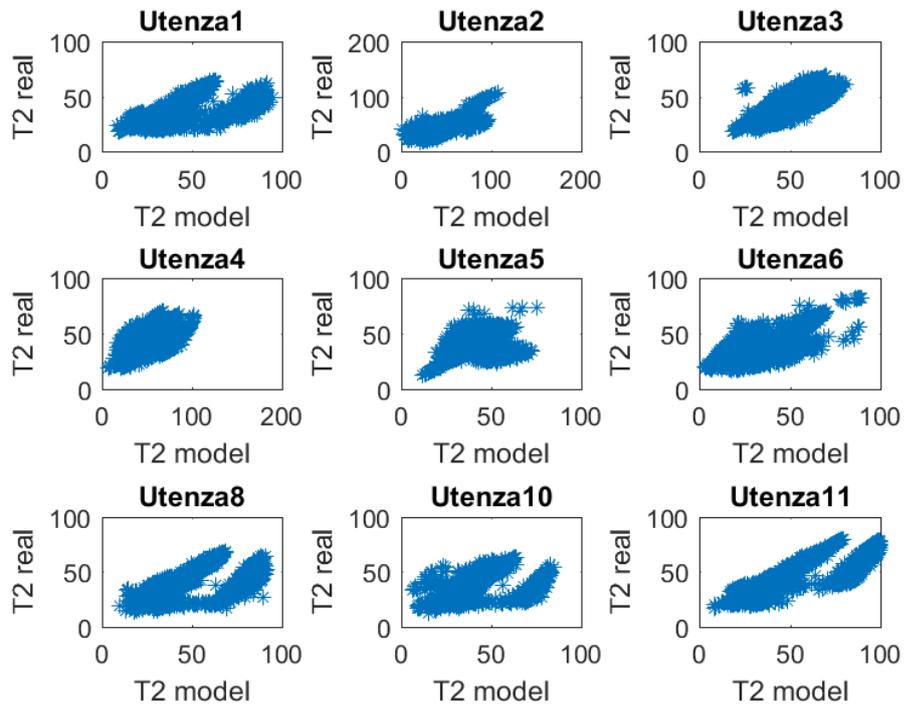


Figura 59: Dipendenza di T2 reale dalla T2 modello - sottostazione 408

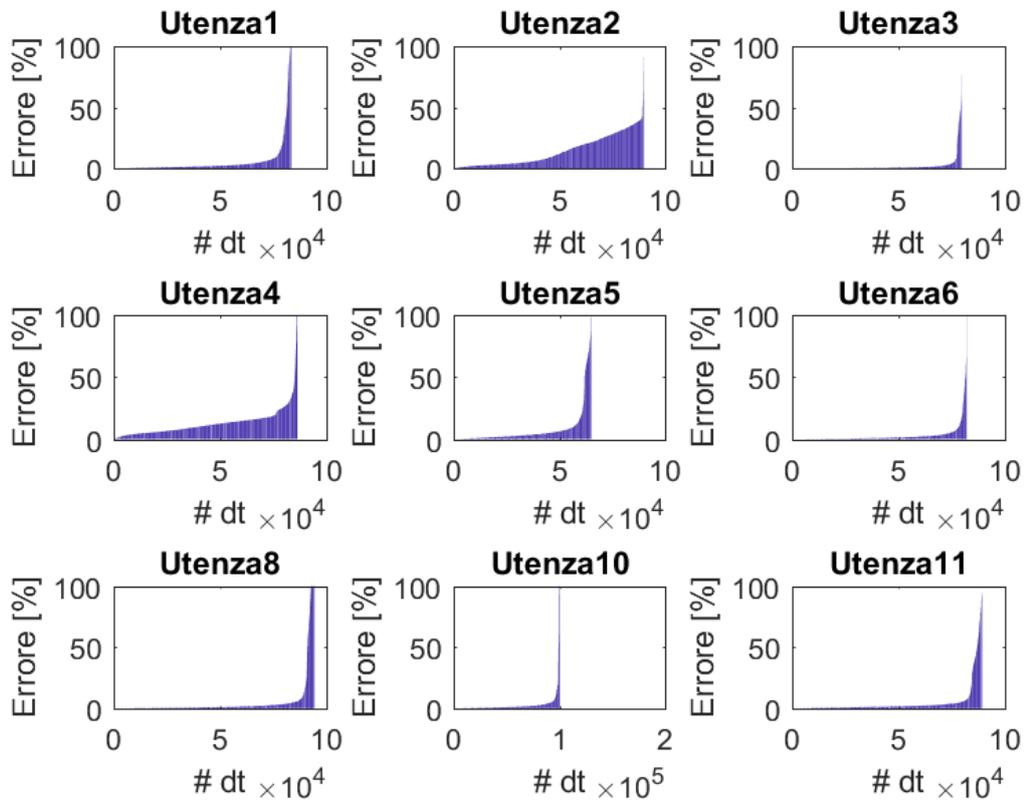


Figura 60: Errore percentuale commesso con l'utilizzo del modello - sottostazione 408

I grafici mostrano qual è la correlazione tra la temperatura T_2 ricavata dall'applicazione del modello e quella ricavata dai dati sperimentali. Successivamente viene raffigurato l'errore che viene commesso, ovvero lo scarto percentuale tra il valore reale e quello ricavato.

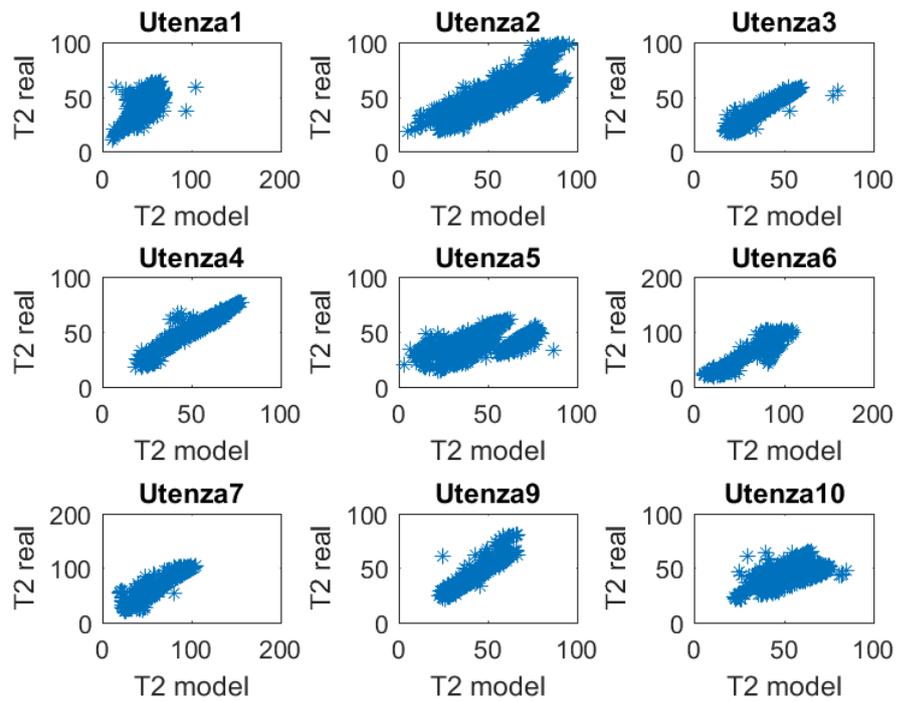


Figura 61: Dipendenza di T_2 reale dalla T_2 modello - sottostazione 419

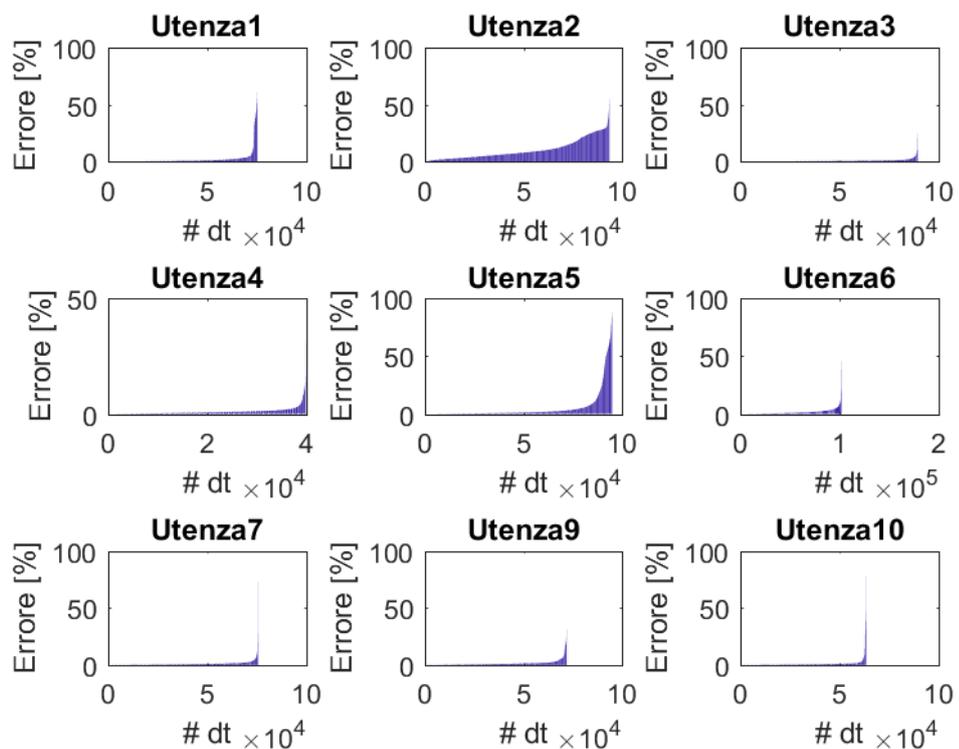


Figura 62: Errore percentuale commesso con l'utilizzo del modello - sottostazione 419

Successivamente è stato valutato il rapporto tra le due diverse temperature T_2 . Nella prima delle figure seguenti è mostrato il rapporto tra la T_2 ricavata dall'applicazione del modello e quella ricavata dai dati sperimentali per alcune delle utenze allacciate alla sottostazione 419, successivamente invece è stato riportato in un diagramma a torta il numero di volte in cui il valore del rapporto delle due temperature ricadesse all'interno di determinati intervalli (0-1, 1-1.1, 1.1-1.2, 1.2-1.3, 1.3-1.4, 1.4-1.5, 1.5-2, 2-2.5, 2.5-5)

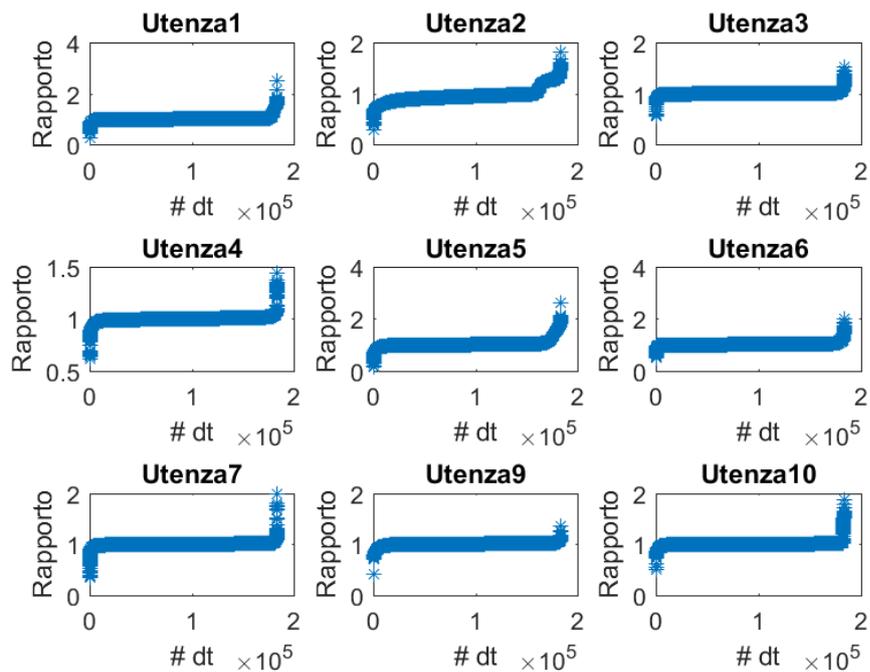


Figura 63: Rapporto temperature: $T_{2modello}/T_{2 reale}$ - sottostazione 419

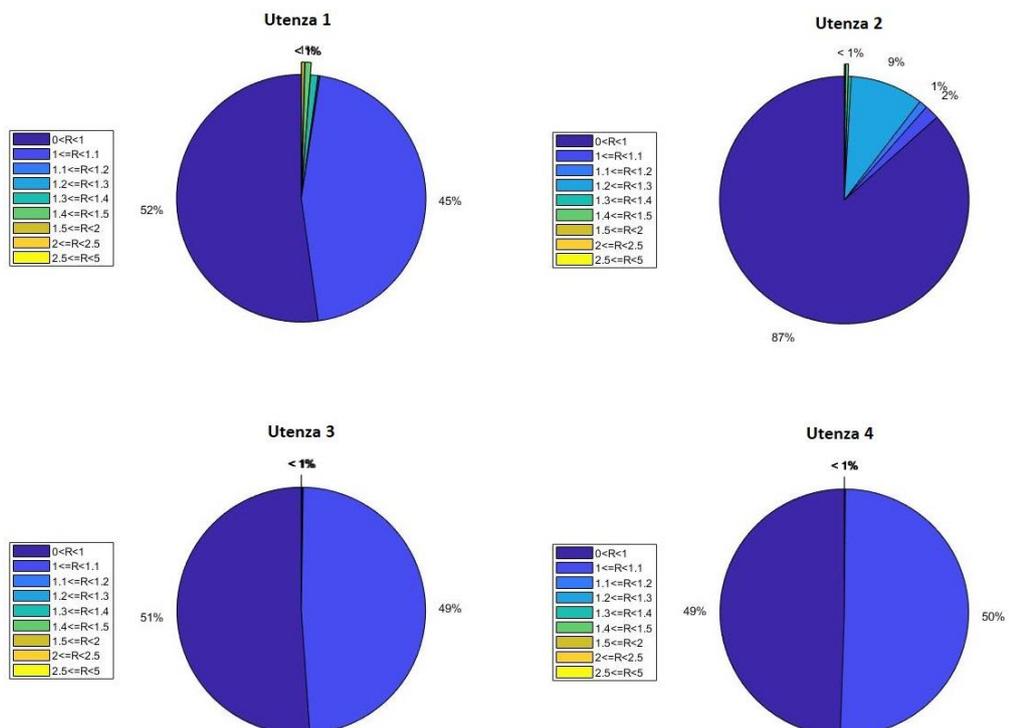


Figura 64: Pie chart del rapporto tra temperature - sottostazione 419

Le figure seguenti sono invece riferite alla sottostazione 442.

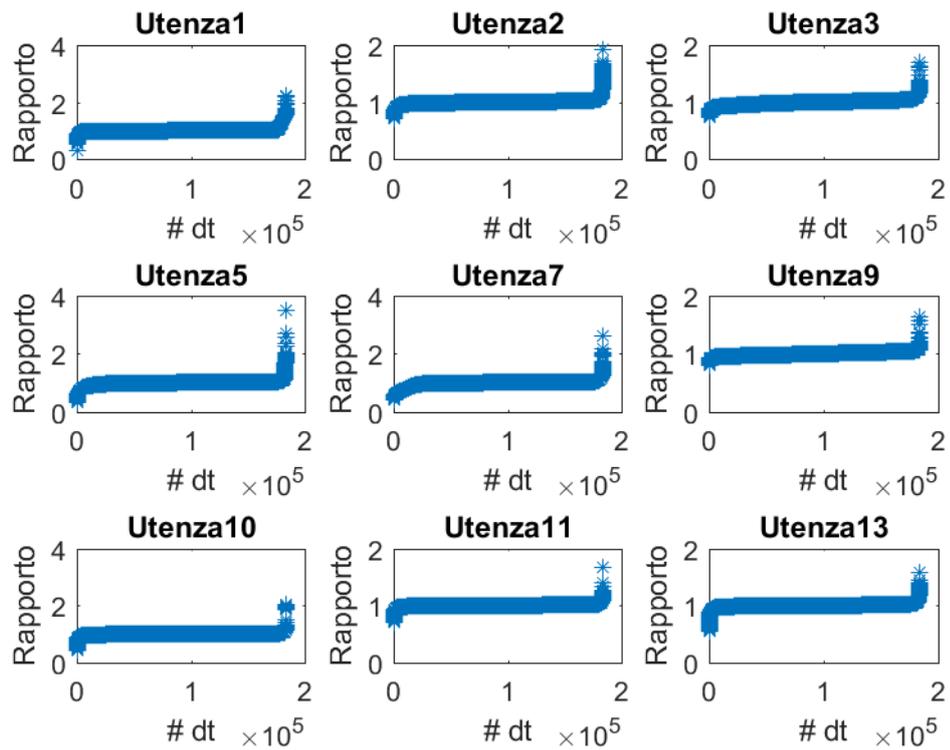


Figura 65: Rapporto temperature: $T_{2modello}/T_{2reale}$ - sottostazione 442

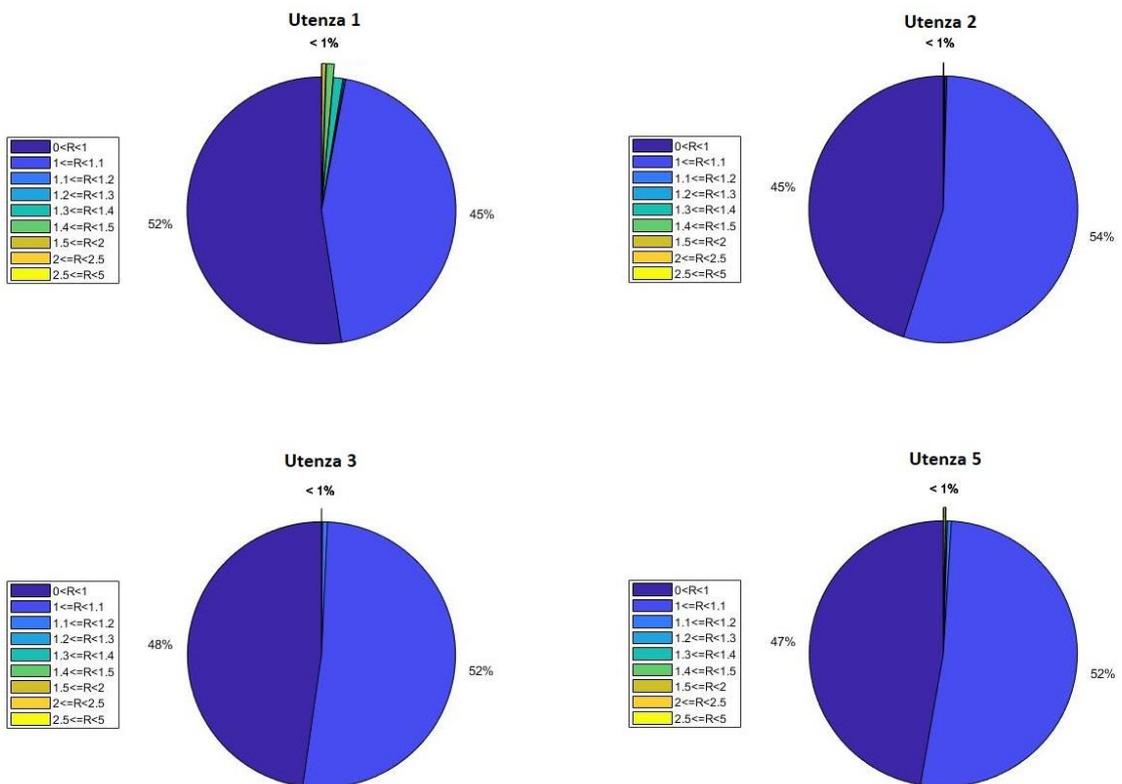


Figura 66: Pie chart del rapporto tra temperature - sottostazione 442

Dopo aver analizzato le utenze singolarmente, è stato esteso il risultato ottenuto a tutte le utenze allacciate alle sottostazioni. L'istogramma seguente mostra infatti il numero di volte che il rapporto delle temperature assume dei valori ben precisi. I risultati del modello mostrano che per la maggioranza delle utenze, durante i giorni considerati, le temperature T_2 messe a confronto si discostano di poco. Numeri molto alti sono riferiti a valori del rapporto pari a 1 ed 1.1.

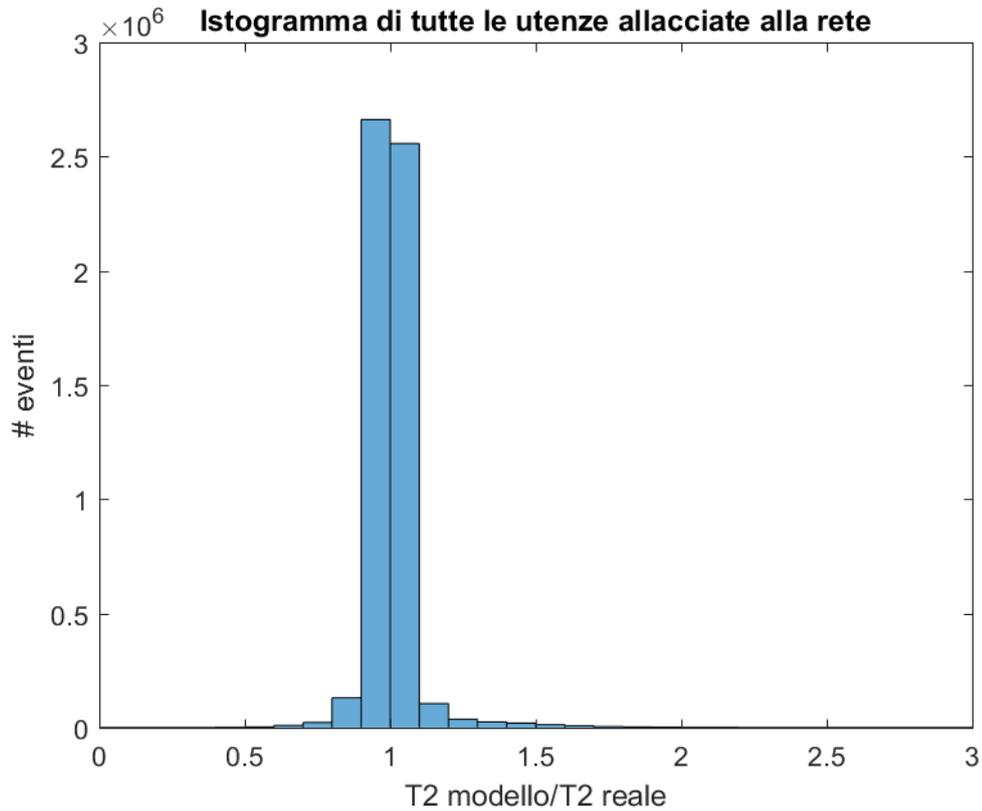


Figura 67: Istogramma di tutte le utenze collegate alla sottostazione 442

Di seguito è riportato lo stesso risultato ma rappresentato per mezzo di un diagramma a torta piuttosto che tramite istogramma. Il vantaggio è avere a disposizione dei valori percentuali piuttosto che valori numerici.

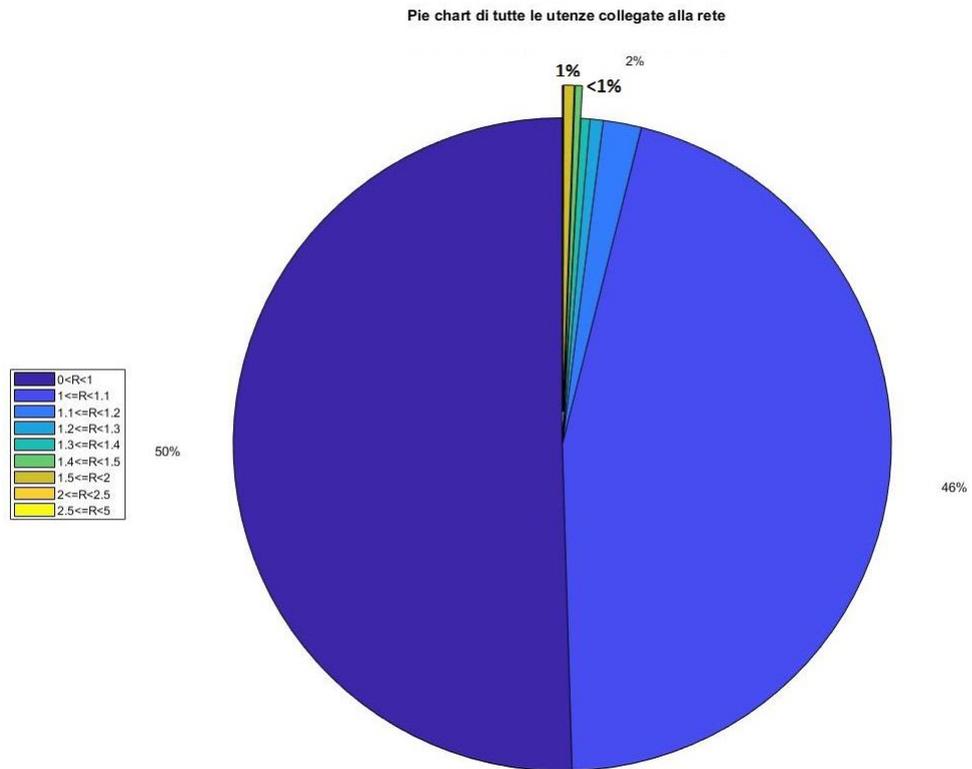


Figura 68: Pie chart di tutte le utenze collegate alla sottostazione 442

In modo analogo si riporta di seguito la situazione delle utenze allacciate alla sottostazione 414.

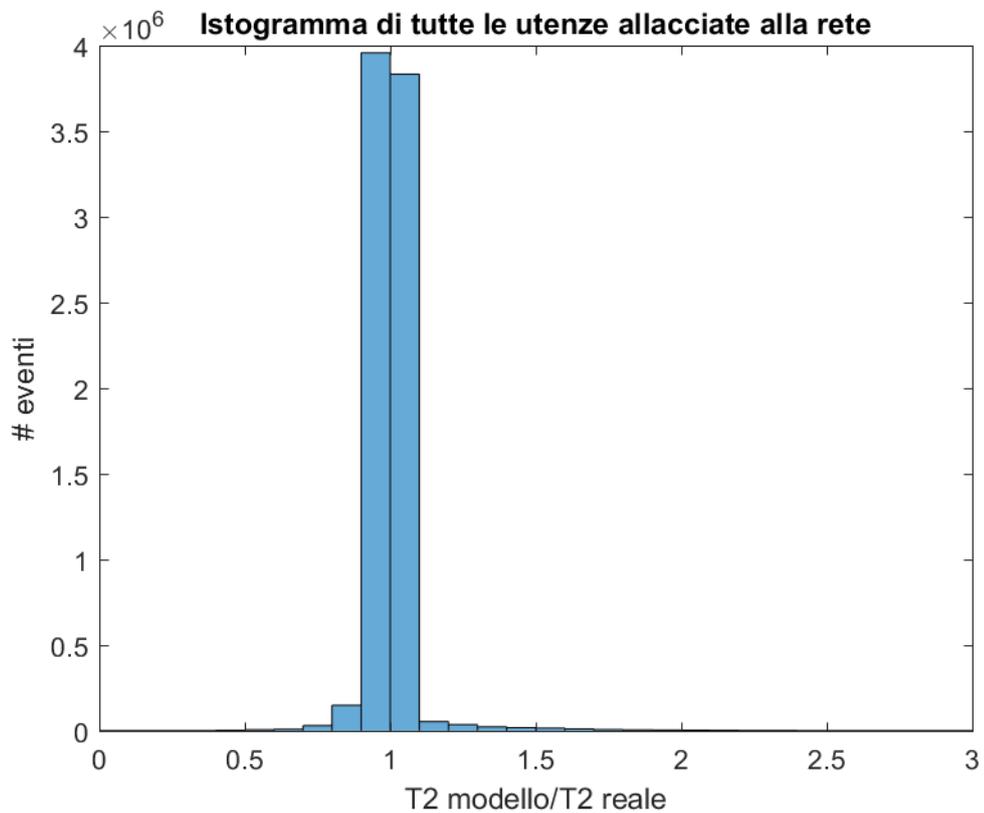


Figura 69: Istogramma di tutte le utenze collegate alla sottostazione 414

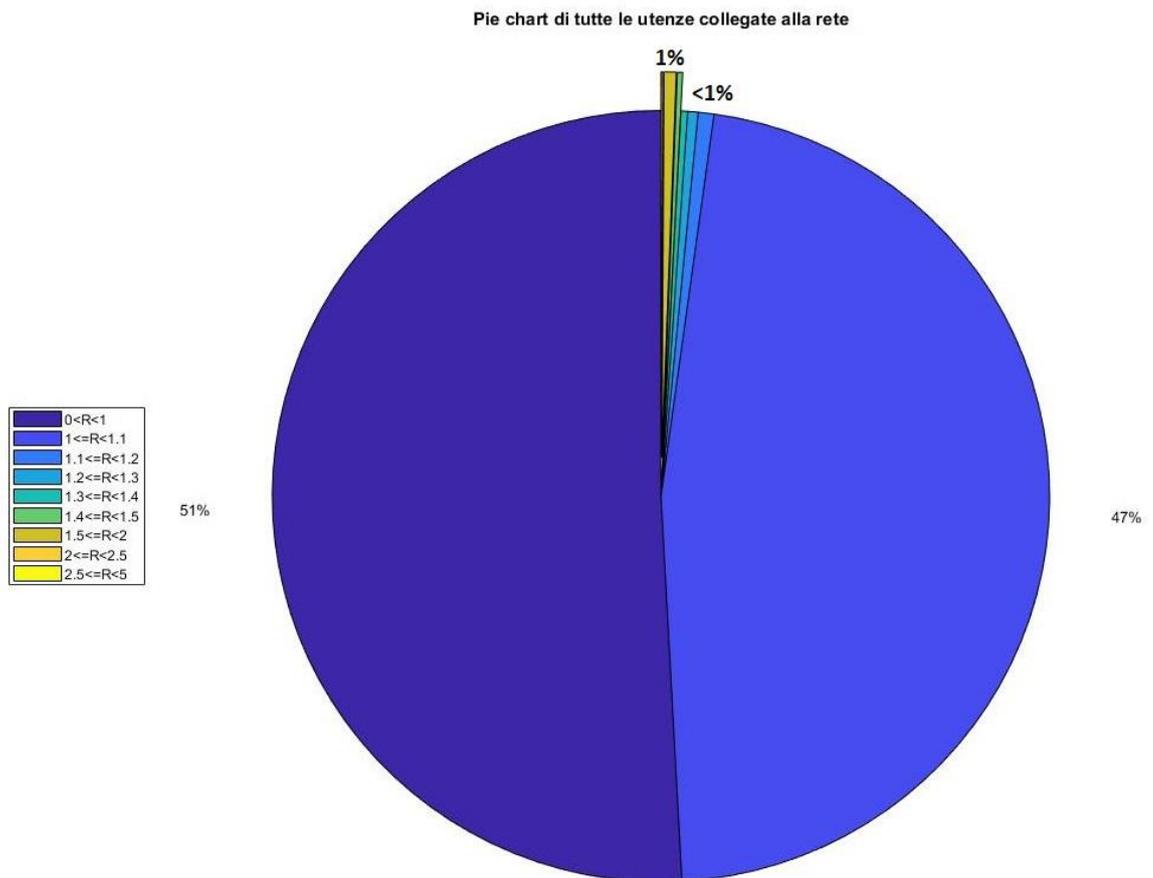


Figura 70: Pie chart di tutte le utenze collegate alla sottostazione 414

3.1.8 – Ottimizzatore

Uno degli obiettivi del lavoro di tesi consiste nel ricavare una situazione ottimizzata per ciascuna utenza. Il compito dell'ottimizzatore è quello di ricavare dei valori ottimali degli anticipi di accensione dell'impianto, per ciascuna delle utenze allacciate alla rete, in grado di ottenere la massima riduzione possibile del picco. Come è stato già detto nei capitoli precedenti, importante è la riduzione dei picchi di richiesta termica così da limitare l'utilizzo delle caldaie integrative, cui è associato un rendimento minore di quello degli impianti cogenerativi di cui si serve la rete del teleriscaldamento. L'obiettivo dell'ottimizzatore, tuttavia, andava affiancato all'esigenza di mantenere l'energia spesa dalle utenze costante prima e dopo l'applicazione del modello: l'energia utilizzata nel caso ottimizzato deve essere la stessa di quella necessaria nella situazione corrente.

4 – Stato corrente e stato ottimizzato a confronto

Step finale del lavoro di tesi è stato valutare e confrontare i risultati ottenuti. Sono stati analizzati due scenari. Lo scenario corrente e lo scenario ottimizzato.

I grafici che vengono riportati di seguito mostrano la riduzione del picco di richiesta termica di varie sottostazioni in giorni diversi dell'anno, il flusso termico e la portata nella situazione corrente e in quella ottimizzata. I risultati ottenuti sono relativi a due diversi giorni dell'anno. È stato preso in esame il primo giorno di accensione dell'impianto, il 21 ottobre, e un giorno di dicembre (il 25), mese in cui la temperatura è minore di quella del mese di ottobre. L'anno preso in esame è il 2017.

Si riportano di seguito i risultati ottenuti riferiti al 21 ottobre 2017.

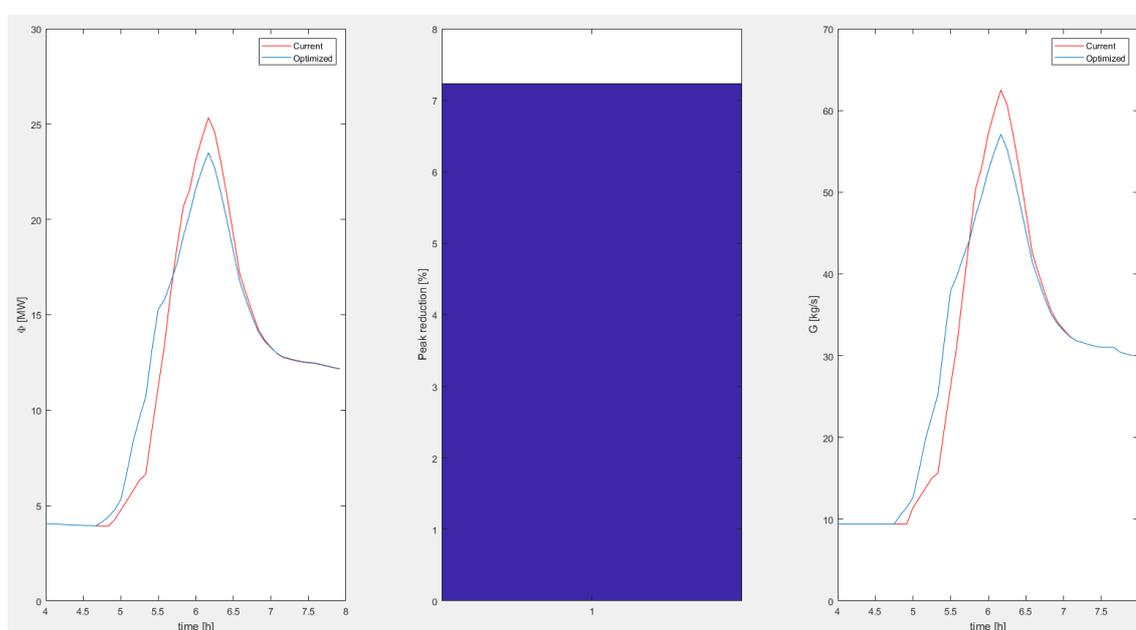


Figura 71: Flusso e portata al baricentro della rete, riduzione percentuale del picco (pre-implementazione). Sottostazione 442

Il grafico sopra riportato raffigura il flusso termico al baricentro nella situazione corrente ed ottimizzata, la riduzione percentuale del picco dovuto all'ottimizzazione e la portata al baricentro. Il risultato ottenuto è quello precedente all'implementazione del modello dello scambiatore di calore e quindi della stima della temperatura T_2 , in uscita dallo scambiatore, senza ricorrere all'utilizzo dei dati sperimentali. La situazione cambia leggermente con la modifica apportata al codice e dunque con l'utilizzo di temperature fittizie.

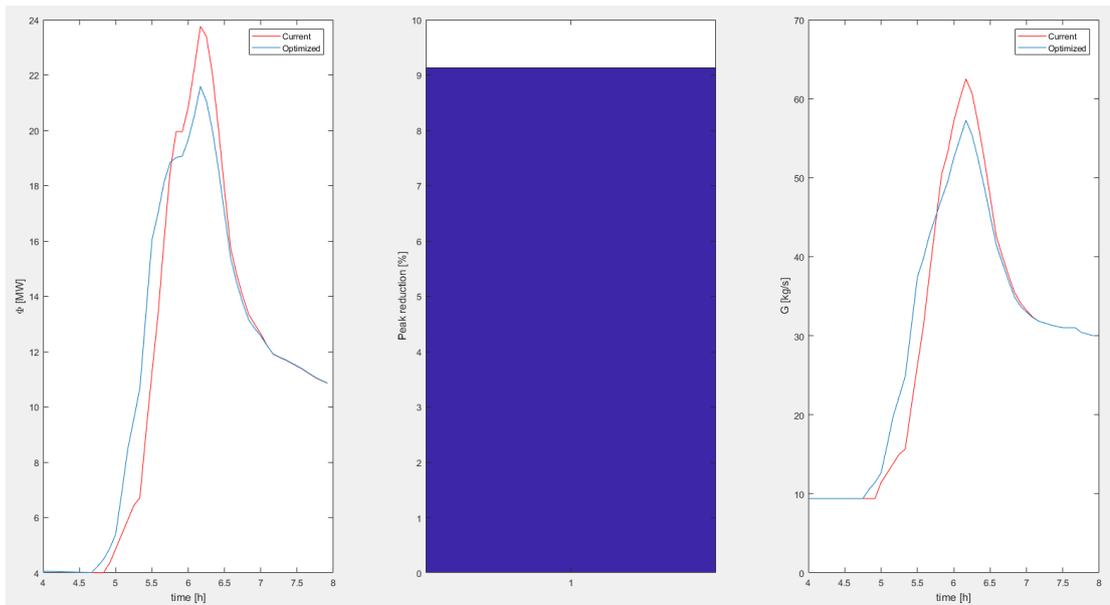


Figura 72: Flusso e portata al baricentro della rete, riduzione percentuale del picco (post-implementazione).
Sottostazione 442

Il confronto di queste ultime figure mostra che i risultati ottenuti prima e dopo l'introduzione delle nuove temperature T_2 sono molto simili.

Le figure di seguito invece consentono il confronto tra le temperature T_2 ottenute prima e dopo l'applicazione del modello dello scambiatore di calore.

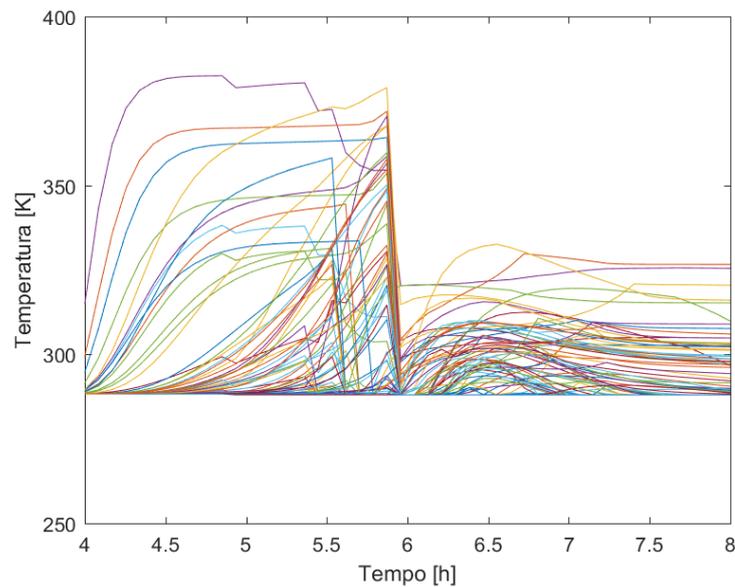


Figura 73: Temperature T_2 prima dell'utilizzo del modello proposto - sottostazione 442

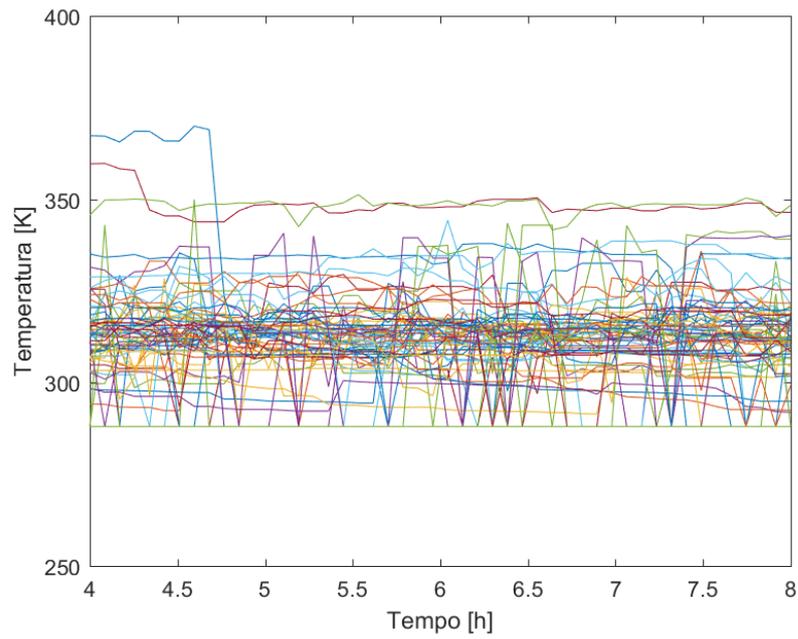


Figura 74: Temperature T2 dopo l'utilizzo del modello proposto - sottostazione 442

Ancora una volta è possibile vedere che il trend delle temperature è diverso ma i range entro cui queste sono confinate è lo stesso.

Si riportano adesso i risultati relativi al 25 dicembre 2017, la sottostazione presa in esame è la 419.

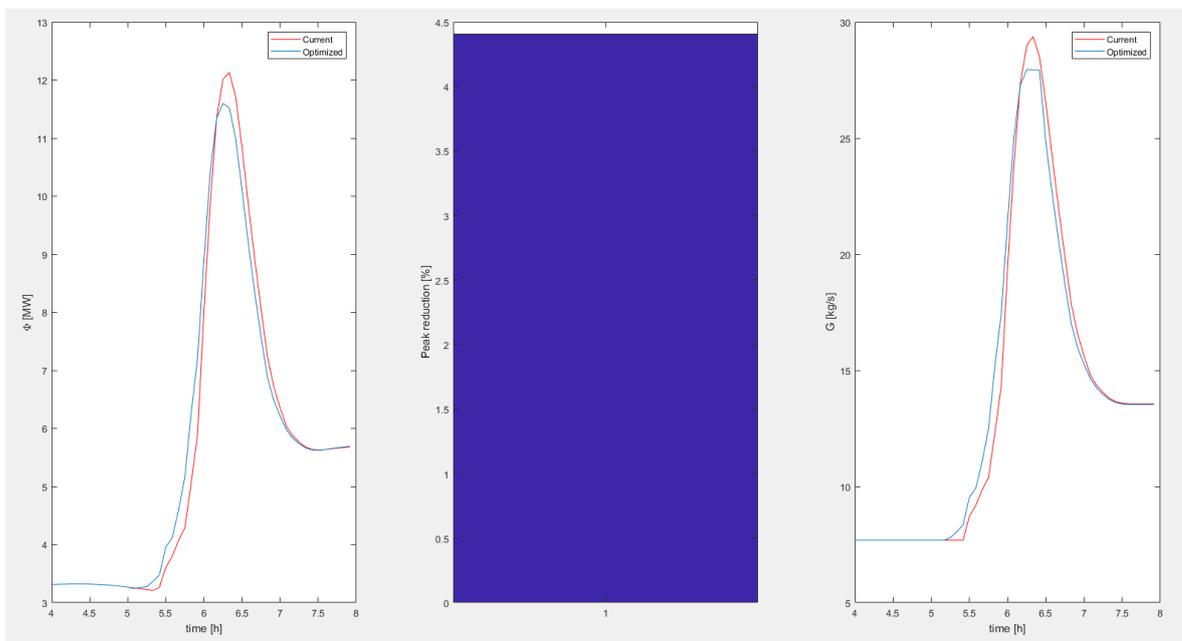


Figura 75: Flusso e portata al baricentro della rete, riduzione percentuale del picco (pre-implementazione). Sottostazione 419

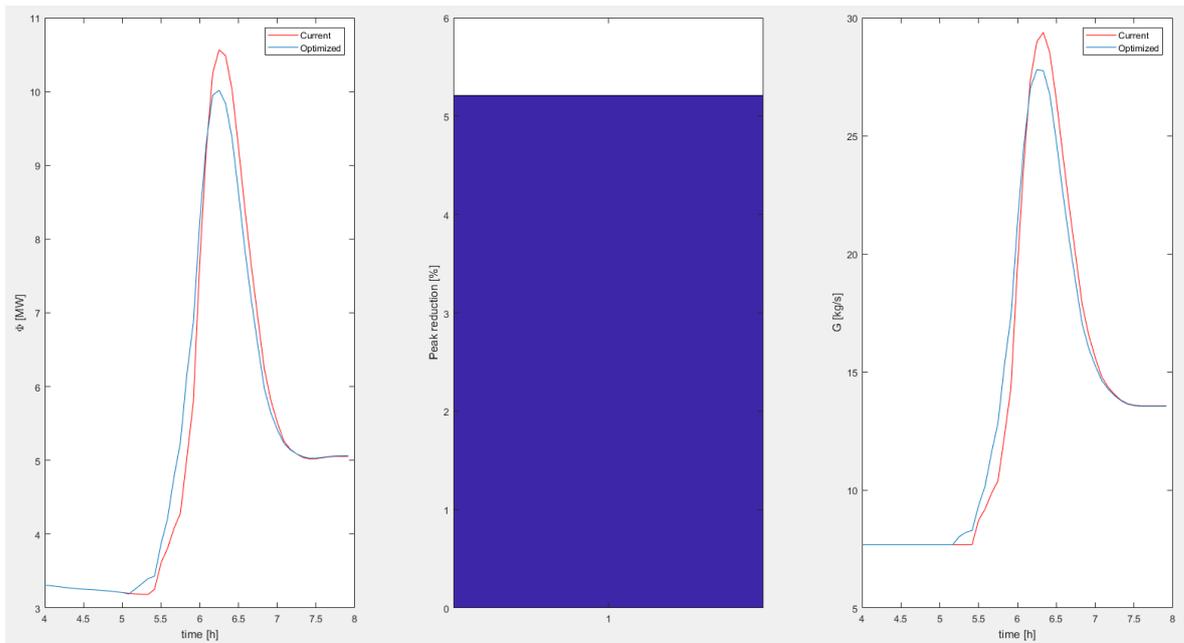


Figura 76: Flusso e portata al baricentro della rete, riduzione percentuale del picco (post-implementation).
Sottostazione 419

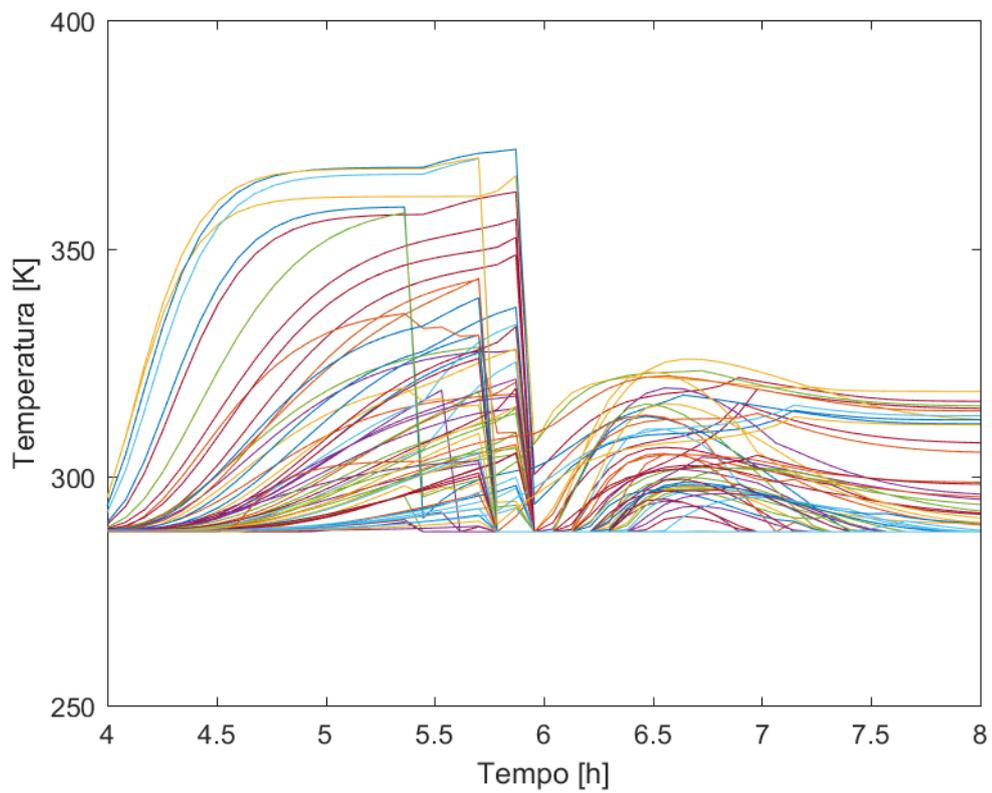


Figura 77: Temperature T_2 prima dell'utilizzo del modello proposto - sottostazione 419

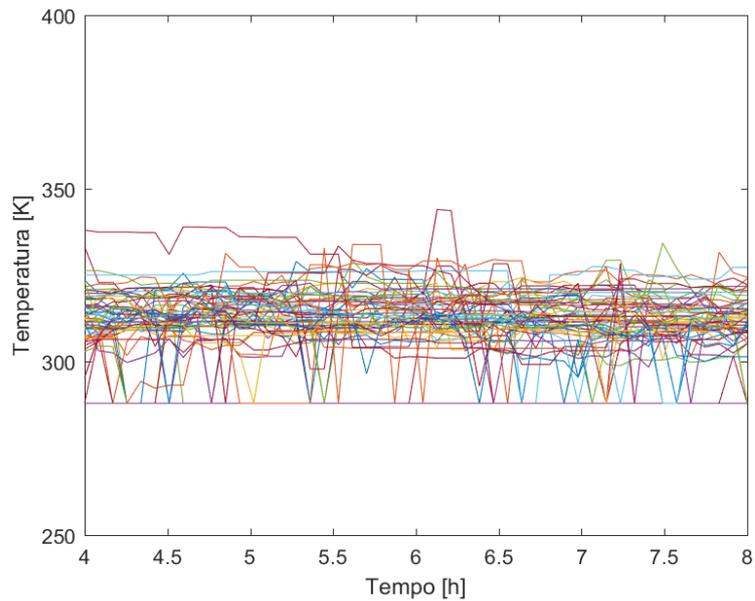


Figura 78: Temperature T_2 dopo dell'utilizzo del modello proposto - sottostazione 419

Si riporta infine il profilo del flusso termico delle utenze. Il risultato ottenuto prima e dopo l'applicazione del modello. La figura di sinistra mostra infatti il flusso termico dell'utenza 5 prima di aver applicato gli anticipi all'ora di accensione e spegnimento dell'impianto. La figura di destra mostra invece la situazione nel caso ottimizzato: è stato applicato l'anticipo, il cui valore ottimale è stato ricavato mediante l'ottimizzatore, sia all'ora di accensione che a quella di spegnimento. Il grafico infatti risulta essere traslato verso sinistra, rispetto al caso non. Vediamo di seguito quanto ottenuto.

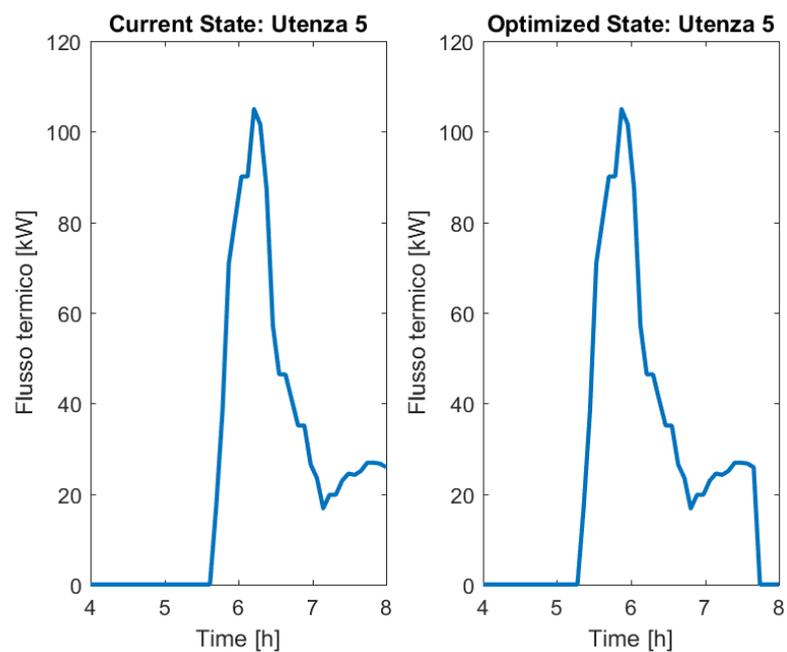


Figura 79: Profilo termico dell'utenza 5 allacciata alla sottostazione 419 prima e dopo l'applicazione del modello.

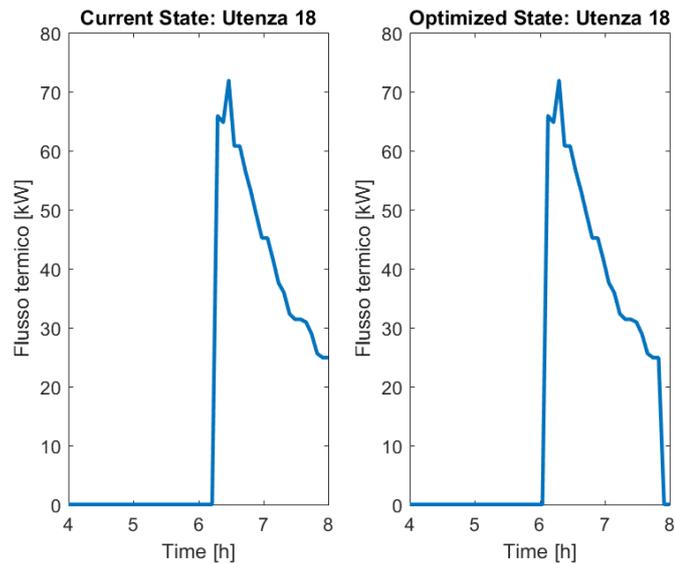


Figura 80: Profilo termico dell'utenza 18 allacciata alla sottostazione 419 prima e dopo l'applicazione del modello.

Le utenze 5 e 18 sopra riportate sono due esempi di utenze con due settaggi diversi nella situazione ottimizzata e sono relativi al 25 dicembre. A seconda dei dati inseriti in input infatti, il programma dà dei valori diversi degli anticipi. Per la prima infatti è stata calcolata una situazione ottimale con un anticipo di 10 minuti sull'orario di accensione e spegnimento dell'impianto, per la seconda invece l'anticipo valutato è il doppio. L'ottimizzatore trova qual è il valore ottimale dell'anticipo che occorre applicare all'ora di accensione e spegnimento dell'impianto per avere la massima riduzione del picco possibile.

Un ultimo esempio sono altre due utenze i cui profili sono invece stati valutati per il 21 ottobre del 2017. Le utenze sono allacciate alla sottostazione 442.

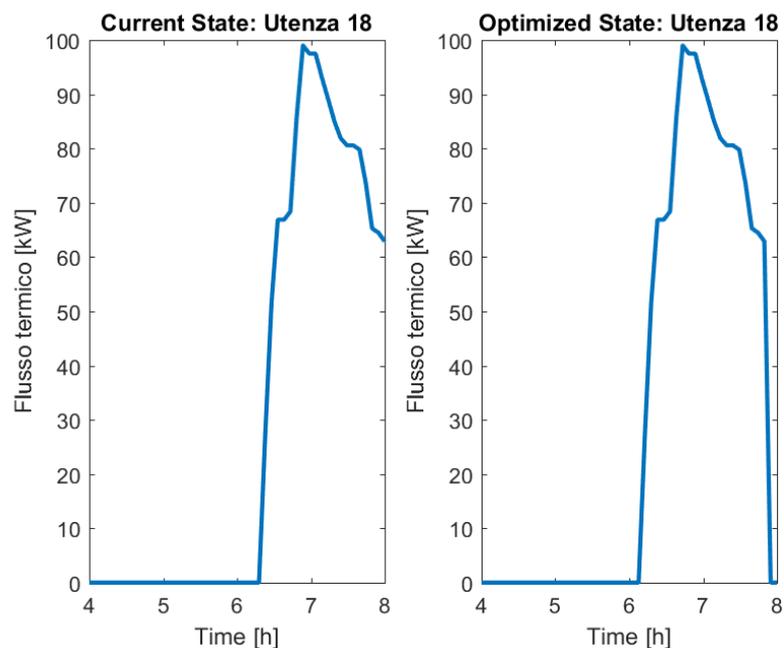


Figura 81: Profilo termico dell'utenza 18 allacciata alla sottostazione 442 prima e dopo l'applicazione del modello.

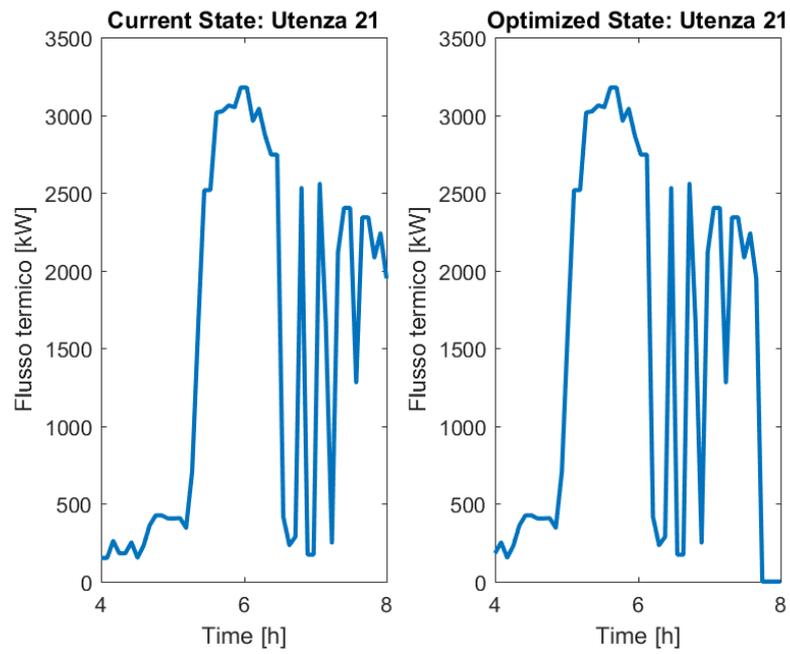


Figura 82: Profilo termico dell'utenza 21 allacciata alla sottostazione 442 prima e dopo l'applicazione del modello.

Anche in questo caso gli anticipi sono di 10 e 20 minuti per le utenze 18 e 21.

5 - Conclusioni

L'obiettivo che ci si era proposto con questo lavoro di tesi consisteva nella possibilità di trovare un modello di scambiatore di calore che fosse in grado di ottenere l'andamento della temperatura in uscita dallo scambiatore, sul lato primario. Queste temperature sarebbero successivamente state utilizzate per analizzare il comportamento della rete. Lo studio aveva come obiettivo finale quello di utilizzare i risultati ottenuti per valutare una configurazione ottimale delle utenze.

Il modello esaminato ed utilizzato per l'analisi delle utenze allacciate alla rete si è rivelato valido per il confronto tra la situazione corrente e quella ottimizzata. I valori di potenza termica e delle temperature, in uscita dallo scambiatore di calore lato primario, sono infatti concordi con i valori che erano stati trovati, in precedenza, con l'utilizzo di altri modelli di calcolo.

Entrambe le configurazioni analizzate, valutate per ciascuna delle oltre 750 utenze collegate alla rete, mostrano un delta energia nullo passando dalla situazione corrente a quella ottimizzata.

Le criticità del modello riguardano soprattutto l'utilizzo dei dati sperimentali. Questi possono essere soggetti a errori dovuti a molteplici fattori come: il malfunzionamento, la rottura degli strumenti di misura o errori umani. I dati ricavati per mezzo di quelli forniti da IREN mostrano degli errori talvolta non trascurabili. I valori del ΔT medio logaritmico, per esempio, mostra errori talvolta dell'ordine del 20% e, in contrapposizione, altri dell'ordine di qualche punto percentuale.

I tempi di calcolo inoltre non sempre sono brevi: variano da qualche minuto fino ad un massimo di 20 minuti (dati riferiti all'utilizzo di un processore i7 di settima generazione, CPU a 2.80 GHz e 16Gb di RAM)

Il lavoro fatto inoltre si potrebbe utilizzare anche per la modellazione di uno scambiatore di calore che non funzioni in controcorrente, come quello utilizzato nel caso studio esaminato.

Indice delle figure

Figura 1: Domanda di energia primaria totale secondo NPS [4].....	5
Figura 2: Domanda di energia primaria totale secondo SDS [4].....	5
Figura 3: Ieri e domani a confronto: utilizzo delle rinnovabili in tre settori [6].....	7
Figura 4: Milioni di barili di petrolio stoccati nel settore pubblico e industriale [6].....	8
Figura 5: Impatto delle principali attività dell'uomo sulla produzione di gas serra [9]	9
Figura 6: Fornitura di energia primaria mondiale in Gtoe [9].....	10
Figura 7: Evoluzione dell'emissione globale della CO ₂ [6]	10
Figura 8: Fornitura energia mondiale per combustibile e relativa produzione di CO ₂ [9].....	11
Figura 9: Evoluzione nel tempo delle emissioni di CO ₂ per combustibile [9]	12
Figura 10: Emissione di CO ₂ per regioni (dati riferiti al 2015) [9]	13
Figura 11: I dieci paesi maggiori produttori di CO ₂ [9].....	14
Figura 12: Richiesta di energia primaria in Cina [11]	16
Figura 13: Cambiamenti nella domanda di energia primaria: 2016-2040 [11].....	17
Figura 14: Trend della domanda energetica per risorse in mezzo secolo. Cina & altri paesi [11]...	17
Figura 15: Sistema tradizionale e cogenerativo a confronto [17].....	20
Figura 16: Esempio di richiesta termica di un'utenza tipo in un giorno tipico invernale [18]	22
Figura 17: Esempio di richiesta termica annua [18].....	23
Figura 18: Esempio di rete ad albero (a sinistra) e di rete magliata (a destra) [18]	25
Figura 19: Perdite di pressione e ripompaggio [18].....	27
Figura 20: Sottostazioni per teleriscaldamento a basamento [22].....	27
Figura 21: Sottostazione a basamento per solo uso riscaldamento – Schema idraulico [22]	28
Figura 22: Sottostazione a basamento per uso riscaldamento e produzione di ACS – Schema idraulico [22]	30
Figura 23: Sottostazioni murali per teleriscaldamento [22]	31
Figura 24: Sottostazione murale per solo uso riscaldamento – Schema idraulico [22].....	31
Figura 25: Sottostazione murale per uso riscaldamento e produzione ACS - Schema idraulico [22]	32
Figura 26: L'Italia teleriscaldata [24].....	33
Figura 27: Milioni di m ³ di volumetria teleriscaldata [24]	35
Figura 28: Potenza termica installata per modalità di generazione del calore [24]	36
Figura 29: Risparmio di energia primaria fossile in tep [24]	37
Figura 30: Tonnellate di CO ₂ non immesse in atmosfera [24].....	38
Figura 31: Scambiatore di calore in controcorrente [25].....	41
Figura 32: Portata del primario - sottostazione 419	41
Figura 33: Zoom sull'utenza 15	42
Figura 34: Temperatura T1 - sottostazione 419	42
Figura 35: Zoom sull'utenza 15	43
Figura 36: Temperatura T2 - sottostazione 442.....	43
Figura 37: Temperatura T3 - sottostazione 442.....	44
Figura 38: Temperatura T4 - sottostazione 420.....	44
Figura 39: Portata del secondario - Sottostazione 414.....	47
Figura 40: Portata del secondario - sottostazione 419	47
Figura 41: ΔT medio logaritmico - Sottostazione 406.....	49
Figura 42: ΔT medio logaritmico - sottostazione 408	50
Figura 43: fUA - Sottostazione 406	51
Figura 44: fUA - Sottostazione 414	51
Figura 45: C _{hot} - sottostazione 406	53

Figura 46: C_{cold} - sottostazione 406.....	53
Figura 47: C_r - sottostazione 406.....	54
Figura 48: C_{hot} - sottostazione 408.....	54
Figura 49: C_{cold} - sottostazione 408.....	55
Figura 50: C_r - sottostazione 408.....	55
Figura 51: fUA dato dal fitting - sottostazione 419.....	57
Figura 52: fUA dato dal fitting - sottostazione 418.....	57
Figura 53: NTU - sottostazione 418.....	58
Figura 54: NTU - sottostazione 442.....	58
Figura 55: Efficienza - sottostazione 408.....	60
Figura 56: Efficienza - sottostazione 419.....	60
Figura 57: Flusso termico da modello - sottostazione 419.....	61
Figura 58: Flusso termico da modello - sottostazione 408.....	61
Figura 59: Dipendenza di T_2 reale dalla T_2 modello - sottostazione 408.....	63
Figura 60: Errore percentuale commesso con l'utilizzo del modello - sottostazione 408.....	63
Figura 61: Dipendenza di T_2 reale dalla T_2 modello - sottostazione 419.....	64
Figura 62: Errore percentuale commesso con l'utilizzo del modello - sottostazione 419.....	64
Figura 63: Rapporto temperature: T_2 modello/ T_2 reale - sottostazione 419.....	65
Figura 64: Pie chart del rapporto tra temperature - sottostazione 419.....	65
Figura 65: Rapporto temperature: T_2 modello/ T_2 reale - sottostazione 442.....	66
Figura 66: Pie chart del rapporto tra temperature - sottostazione 442.....	66
Figura 67: Istogramma di tutte le utenze collegate alla sottostazione 442.....	67
Figura 68: Pie chart di tutte le utenze collegate alla sottostazione 442.....	68
Figura 69: Istogramma di tutte le utenze collegate alla sottostazione 414.....	68
Figura 70: Pie chart di tutte le utenze collegate alla sottostazione 414.....	69
Figura 71: Flusso e portata al baricentro della rete, riduzione percentuale del picco (pre- implementazione). Sottostazione 442.....	70
Figura 72: Flusso e portata al baricentro della rete, riduzione percentuale del picco (post- implementazione). Sottostazione 442.....	71
Figura 73: Temperature T_2 prima dell'utilizzo del modello proposto - sottostazione 442.....	71
Figura 74: Temperature T_2 dopo l'utilizzo del modello proposto - sottostazione 442.....	72
Figura 75: Flusso e portata al baricentro della rete, riduzione percentuale del picco (pre- implementazione). Sottostazione 419.....	72
Figura 76: Flusso e portata al baricentro della rete, riduzione percentuale del picco (post- implementazione). Sottostazione 419.....	73
Figura 77: Temperature T_2 prima dell'utilizzo del modello proposto - sottostazione 419.....	73
Figura 78: Temperature T_2 dopo dell'utilizzo del modello proposto - sottostazione 419.....	74
Figura 79: Profilo termico dell'utenza 5 allacciata alla sottostazione 419 prima e dopo l'applicazione del modello.	74
Figura 80: Profilo termico dell'utenza 18 allacciata alla sottostazione 419 prima e dopo l'applicazione del modello.	75
Figura 81: Profilo termico dell'utenza 18 allacciata alla sottostazione 442 prima e dopo l'applicazione del modello.	75
Figura 82: Profilo termico dell'utenza 21 allacciata alla sottostazione 442 prima e dopo l'applicazione del modello.	76

Indice delle tabelle

Tabella 1: Dati metereologici - Temperatura esterna.....	39
Tabella 2: Dati sulla rete.....	39
Tabella 3: Dati sulle utenze	39
Tabella 4: Sottostazioni della rete del teleriscaldamento e utenze ad esse allacciate.....	40
Tabella 5: Dati sperimentali	40
Tabella 6: Analisi portata secondario - Casi anomali	46
Tabella 7: Casi anomali nel calcolo del ΔT medio logaritmico	49
Tabella 8: Elenco delle variabili che sono state ordinate per il calcolo di NTU	56

Bibliografia e Sitografia

[1] <https://www.informazioneambiente.it/combustibili-fossili/>

[2] <https://www.iea.org/weo/aboutweo/>

[3] <https://www.iea.org/weo/weomodel/>

[4] <https://www.iea.org/weo/>

[5] <http://www.un-documents.net/our-common-future.pdf>

[6] www.iea.org/topics/

[7] <http://www.wired.co.uk/article/what-is-climate-change-definition-causes-effects>

[8] <https://climate.nasa.gov/resources/global-warming/>

[9] <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/CO2EmissionsfromFuelCombustionHighlights2017.pdf>

[10] https://it.wikipedia.org/wiki/Convenzione_quadro_delle_Nazioni_Unite_sui_cambiamenti_climatici#Paesi_dell'Allegato_II

[11] <http://www.iea.org/WEO2017/>

[12] <https://www.webuildvalue.com/it/economia-globale-sostenibilita/la-cina-alla-conquista-delle-rinnovabili.html>

[13] <http://www.treccani.it/vocabolario/teleriscaldamento/>

[14] [Peak-shaving in district heating systems through optimal management of thermal request of buildings](#)

[15] <http://www.lastampa.it/2014/12/19/societa/casa/teleriscaldamento-cos-e-come-funziona-PZ5KzXKe86Zucti0FGEIUL/pagina.html>

[16] http://www.irenenergia.it/ChiSiamo/Attivita/Teleriscaldamento/#come_funziona

[17] Advanced District Heating and Cooling (DHC) Systems

[18] Dispense del corso di "Complementi di energetica"

- [19] [http://www.irenenergia.it/ChiSiamo/Progetto Torino Nord/Rete di Teleriscaldamento/Rete di trasporto e distribuzione.html](http://www.irenenergia.it/ChiSiamo/Progetto_Torino_Nord/Rete_di_Teleriscaldamento/Rete_di_trasporto_e_distribuzione.html)
- [20] [http://editors.enea.it/it/Ricerca sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/risparmio-energia-settore-civile/2012/rds-2013-105.pdf](http://editors.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/risparmio-energia-settore-civile/2012/rds-2013-105.pdf)
- [21] [Acea energia – Teleriscaldamento-Specifica tecnica 13/06/2011](#)
- [22] [http://www.techno-system.it/files/uploads/Sottostazioni per Teleriscaldamento ITA 1.pdf](http://www.techno-system.it/files/uploads/Sottostazioni_per_Teleriscaldamento_ITA_1.pdf)
- [23] [http://www.gruppohera.it/gruppo/com media/dossier tlr/articoli/pagina72.html](http://www.gruppohera.it/gruppo/com_media/dossier_tlr/articoli/pagina72.html)
- [24] <https://www.legambiente.it/contenuti/dossier/il-teleriscaldamento-italia>
- [25] <http://www.galenotech.org/distillaz2.htm>
- [26] [http://www.dam.brown.edu/people/venturi/PREPRINTS/Book on fluid dynamics and heat transfer.pdf](http://www.dam.brown.edu/people/venturi/PREPRINTS/Book_on_fluid_dynamics_and_heat_transfer.pdf)
- [27] <http://www.lastampa.it/2016/04/06/economia/litalia-insegna-il-teleriscaldamento-alla-cina-HfUPvKOp4dMYpMRJ1zLbPN/pagina.html>
- [28] <http://bim.acca.it/la-cina-punta-al-teleriscaldamento-ad-energia-nucleare/>