

Rete di teleriscaldamento Comune di Sesto San Giovanni

OGGETTO: Relazione tecnica e di calcolo della vita utile
della rete di teleriscaldamento di Sesto San Giovanni

COMMITTENTE: A2A Calore & Servizi S.r.l.
Milano, ottobre 2022

Progettista:

Dott. Ing. Jentica Natalia

N° 33986 ORDINE DEGLI INGEGNERI
DELLA PROVINCIA DI MILANO



REnergies srl
Corso Italia, 1 - Milano



Sommario

1. Introduzione	2
2. Norme di riferimento: UNI EN13941 e UNI EN253	2
2.1. Termini e definizioni.....	2
2.2. Vita termica utile	2
2.3. Analisi a fatica della rete – Individuazione cicli termici	7
2.4. Analisi a fatica della rete – Verifica a fatica.....	8
3. Descrizione della alimentazione della rete di teleriscaldamento di Sesto San Giovanni	10
4. Calcolo della vita termica utile	11
5. Calcolo numero cicli termici completi equivalenti	15
5.1. Calcolo numero cicli termici completi equivalenti – rete di trasporto	16
5.2. Calcolo numero cicli termici completi equivalenti - rete di distribuzione	29
6. Verifica a fatica a titolo di esempio.....	30
Conclusioni	31
Bibliografia.....	31

1. Introduzione

A2A Calore & Servizi s.r.l. è chiamata a certificare l'affidabilità delle proprie assunzioni circa la vita utile, individuata in 50 anni, della rete di trasporto e distribuzione del sistema di teleriscaldamento di Sesto San Giovanni, intesa come sezione a valle del primario degli impianti di produzione ed a monte delle derivazioni per l'allacciamento d'utenza.

In questo contesto ha richiesto alla Società REnergies srl una relazione di calcolo nella quale, a partire dai dati analitici di temperatura relativi all'esercizio delle centrali di produzione, sulla base delle metodologie e secondo le indicazioni contenute nelle normative UNI EN13941:2022 [1], UNI EN253:2016 [2] e UNI EN253:2019 [3], vengano determinati i corrispondenti valori per la vita termica utile delle tubazioni e valutati i livelli attesi delle sollecitazioni meccaniche a fatica della rete (cicli termici completi equivalenti).

La presente relazione riporta, quindi, dopo una panoramica introduttiva dei contenuti delle normative dedicate, una descrizione delle metodologie impiegate per il calcolo e delle assunzioni poste a base dello stesso, nonché il dettaglio dei risultati dei calcoli condotti.

A corollario delle conclusioni, si è espresso un parere relativo ai soli aspetti valutati analiticamente nel contesto della presente relazione di calcolo, sulla ragionevolezza ed affidabilità del valore di 50 anni assunto da A2A Calore & Servizi per la vita utile della rete di Sesto San Giovanni.

2. Norme di riferimento: UNI EN13941 e UNI EN253

2.1. Termini e definizioni

Vita utile – definisce complessivamente la durata di vita attesa per una rete di teleriscaldamento in funzione dell'insieme di tutti i fattori o meccanismi che possono concorrere nel determinarla, quali ad esempio le caratteristiche dei materiali impiegati, i regimi di temperatura di esercizio, gli standard di progettazione, realizzazione ed esercizio e manutenzione etc..

Vita termica utile – definisce la durata di vita attesa per una rete di teleriscaldamento e per suoi componenti, in funzione dei soli aspetti correlati ai regimi di temperatura nel tempo ed in particolare all'invecchiamento dell'isolamento termico.

2.2. Vita termica utile

La vita termica utile di una rete di teleriscaldamento dipende dalle caratteristiche della schiuma PUR (poliuretanic) e dalla sua composizione, dal tubo di servizio in acciaio e dal tubo di protezione in polietilene. L'invecchiamento dell'isolamento termico e del tubo di protezione può portare al deterioramento di importanti proprietà meccaniche, come ad esempio l'adesione tra tubo di servizio e schiuma, definita come resistenza a taglio assiale. La vita utile dipende, inoltre, anche delle varie sollecitazioni meccaniche che risultano dalla progettazione della rete e dalle variazioni di temperatura (cicli) a cui la rete è soggetta durante il suo esercizio. Altre proprietà, quali, ad esempio, la conducibilità termica della schiuma PUR (λ), non hanno, invece, un'influenza diretta sulla durata della vita utile del sistema secondo la Norma UNI EN13941:2022, come riportato al paragrafo 5.1.

Secondo la UNI EN13941:2022, la UNI EN253:2016 e UNI EN253:2019, una rete di teleriscaldamento deve essere progettata per consentire una durata di vita utile di almeno 30 anni, con una temperatura di funzionamento in continuo a 120°C e per determinati intervalli di tempo con picchi fino a 140°C; la somma di tali intervalli non deve eccedere, in media, le 300 h/anno.

La UNI EN253:2016 indica che una vita termica utile di almeno 50 anni si può ottenere con una temperatura in continuo della rete di 115°C, come descritto al paragrafo 4.5.5.1.

Come conseguenza di ciò, più bassa è la temperatura della rete, più alta risulterà la sua vita termica utile in termini di anni di esercizio.

La medesima Norma UNI EN253:2016 ha esaminato la durata minima di vita termica utile di una rete preisolata tramite uno studio sull'invecchiamento della schiuma, condotto dal gruppo di lavoro di CEN/TC 107 (Allegato A della Norma), che ha analizzato l'effetto dell'invecchiamento della schiuma sulla resistenza a taglio per sistemi di tubi preisolati.

Lo studio è stato basato su vari provini di laboratorio, dove, per verificare la resistenza a taglio delle schiume, le tubazioni sono state esposte a invecchiamento termico, come indicata nella Norma al paragrafo 4.5.5.1, escludendo perciò i processi ossidativi. Questi saranno, invece, oggetto di approfondimento nell'evoluzione della norma UNI EN253:2019 trattata in seguito.

I test effettuati hanno dimostrato che un'equazione di Arrhenius, che mette in relazione il logaritmo della vita termica attesa di una rete di teleriscaldamento con il valore reciproco della temperatura di esercizio continua assoluta, può essere utilizzata per calcolare l'aspettativa di vita termica utile della rete di teleriscaldamento, dipendente dalle temperature di esercizio effettive (fig.1).

L'Allegato C della medesima Norma definisce la formula di seguito riportata, che mette in relazione le ore effettive di funzionamento (vita termica) con la corrispondente temperatura di invecchiamento:

$$\ln L_k = \frac{C}{Tk} + D,$$

dove:

L_k è la vita termica alla temperatura Tk ;

Tk è la temperatura di invecchiamento;

C e D sono i coefficienti della relazione di Arrhenius.

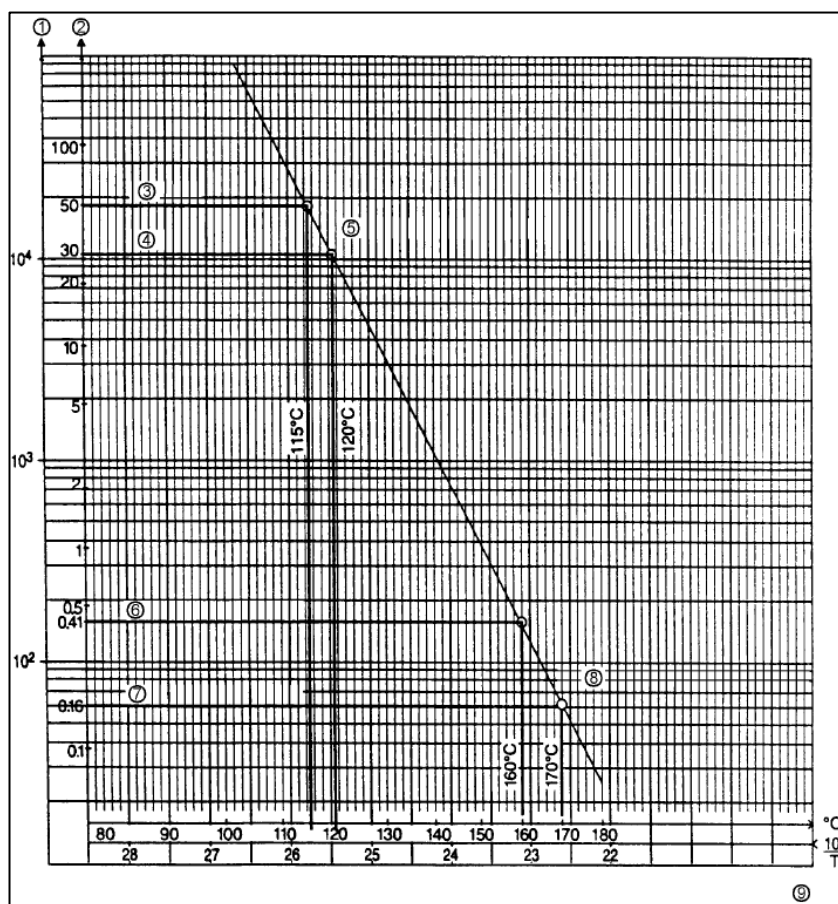


Fig.1 Relazione tra vita termica utile e la temperatura di esercizio in continuo

- 1 Vita termica utile (gg)
- 2 Vita termica utile (anni)
- 3 Vita termica utile di 50 anni per una temperatura di esercizio in continuo a 115°C
- 4 Vita termica utile di 30 anni per una temperatura di esercizio in continuo a 120°C
- 5 Condizioni operative effettive
- 6 Vita termica utile di 3600 h per una temperatura di prova 160°C
- 7 Vita termica utile di 1450 h per una temperatura di prova 170°C
- 8 Condizioni di prova di invecchiamento
- 9 Temperatura di esercizio in continuo

Assumendo che i cicli di temperatura di esercizio di una rete di teleriscaldamento siano gli stessi ogni anno, si può calcolare la vita termica utile minima prevista utilizzando la seguente formula: (Allegato B della Norma UNI EN253:2016)

$$L = \left(\frac{t_1}{L_1} + \frac{t_2}{L_2} + \dots + \frac{t_n}{L_n} \right)^{-1},$$

dove:

L è la vita termica totale attesa del sistema di teleriscaldamento, espressa in anni;
 L_1, L_2, L_n , è la vita termica del sistema, espressa in anni, relativa alla temperatura di funzionamento in continuo $\theta_1, \theta_2, \theta_n$, ricavata dal grafico in fig. 1;
 t, t_2, t_n è il tempo totale, espresso in anni, che il sistema ha operato alla temperatura $\theta_1, \theta_2, \theta_n$.

N.B.: La formula sopra riportata viene applicata solo per tubazioni rettilinee soggette a variazioni di temperatura graduali e occasionali (dovute alle variazioni delle richieste stagionali di calore), intendendo con ciò che le sollecitazioni meccaniche degli accessori, quali, ad esempio, curve e Tee di derivazione, non vengono prese in considerazione nel calcolo della vita termica utile.

Nella successiva versione della Norma UNI EN253:2019, si evidenzia che il declino nella resistenza a taglio è una combinazione di stress termici e processi ossidativi. All'approfondimento di questo tema, è dedicato l'intero allegato A che si basa sullo studio realizzato dal German Research Group, nel periodo 2012-2016, i cui principali elementi sono di seguito riportati.

Prima di tutto, è stato osservato che la resistenza a taglio assiale peggiora bruscamente dopo l'inizio della sollecitazione termica. Dopo questa caduta iniziale, la resistenza a taglio rimane costante a un livello di plateau. Il livello plateau (definito come il rapporto in % tra la resistenza a taglio allo stato invecchiato e la resistenza a taglio iniziale) dipende principalmente dalla temperatura di invecchiamento (fig.2)

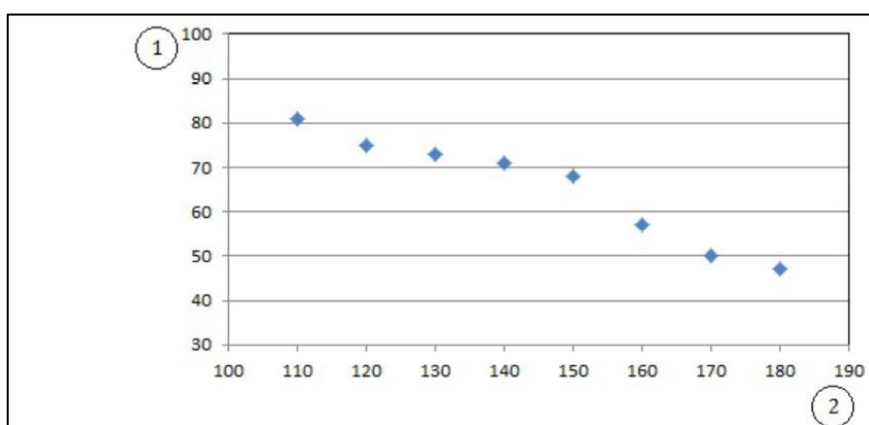


Fig.2 Livello plateau della resistenza a taglio % per varie temperature di invecchiamento

- 1 Livello plateau della resistenza a taglio in rapporto alla resistenza a taglio iniziale in %
 2 Temperatura di invecchiamento in °C

Si è visto che i processi ossidativi non giocano un ruolo chiave nella determinazione del livello di plateau, in quanto nel breve tempo necessario a raggiungerlo, l'ossigeno che si diffonde radialmente attraverso il tubo di protezione in PE viene consumato nella sezione di schiuma PUR prima di raggiungere il tubo di servizio in acciaio.

È stata poi osservata un'ulteriore perdita di resistenza a taglio dovuta all'effetto combinato dell'invecchiamento termico ed ossidativo (fig.3).

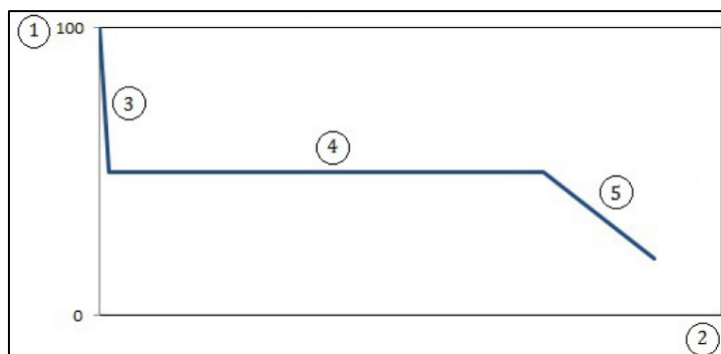


Fig.3 Resistenza al taglio come % della resistenza al taglio iniziale rispetto al tempo di invecchiamento

- 1 Resistenza del PUR a taglio in %
- 2 Tempo di invecchiamento corrispondente ad una determinata temperatura di invecchiamento
- 3 Caduta iniziale della resistenza al taglio
- 4 Livello plateau
- 5 Ulteriore peggioramento della resistenza a taglio

La perdita finale di resistenza a taglio può essere simulata solo quando i processi termici e ossidativi sono entrambi sufficientemente accelerati. Mentre i processi termici possono essere accelerati aumentando la temperatura del tubo di servizio in acciaio, i processi ossidativi dipendono principalmente dalla diffusione radiale dell'ossigeno attraverso il tubo di protezione in PE. Quest'ultimi possono essere accelerati aumentando la temperatura del tubo di protezione o riducendone lo spessore dello stesso.

A tal fine, sono stati condotti dei test dal gruppo di lavoro German Research Group (descritti nei sotto capitoli A.4 e A.5 dell'Allegato A della norma), che mettono in relazione la vita termica utile e la temperatura di esercizio in continuo, ed i cui risultati sono illustrati nel diagramma in fig.4.

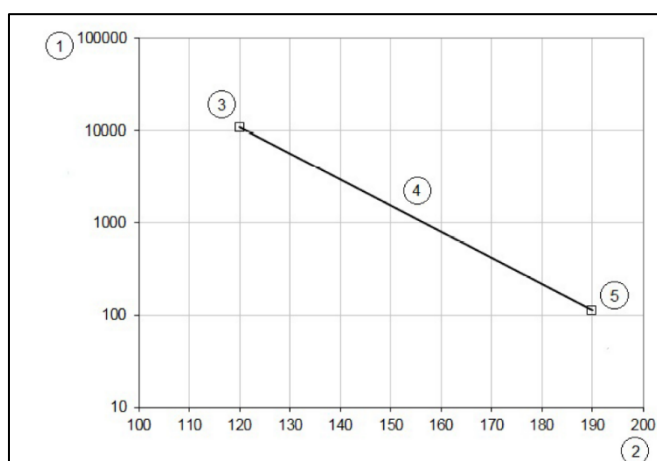


Fig.4 Relazione tra vita utile e la temperatura di esercizio in continuo

- 1 Vita termica utile (gg)
- 2 Temperatura di esercizio (°C)
- 3 120°C temperatura di esercizio corrispondente a 30 anni
- 4 Campione del tubo preisolato per prova in laboratorio
- 5 Tubo di servizio a 190°C riscaldato per 2700 ore

Il CEN ha deciso, tuttavia, per diverse motivazioni, di non implementare tale test nella nuova versione della normativa.

La UNI EN253:2019 conclude e conferma in ogni caso che, una vita utile di almeno 50 anni è generalmente ottenuta ad una temperatura di esercizio in continuo inferiore a 115°C, come indicato al paragrafo 4.5.6.1.

Dato che la Norma UNI EN253:2019, non indica, tuttavia, nuove metodologie da assumere per il calcolo della vita termica utile, o tali metodologie non sono state ancora implementate, si è deciso di adottare le formule di calcolo e il grafico della relazione di Arrhenius definiti dagli Allegati della Norma precedente, ovvero la UNI EN253:2016.

2.3. Analisi a fatica della rete – Individuazione cicli termici

Il numero di cicli completi equivalenti scelto per la base dei calcoli a fatica non deve, secondo la UNI EN13941:2022, essere più basso del minimo numero di cicli mostrati nella tabella sottostante (fig. 5), relativamente agli anni di esercizio previsti per la rete.

Table 14 — Equivalent full action cycles for $m = 4$ and $\Delta T_{ref} = 110^\circ\text{C}$		
Character of pipeline	Number of full action cycles	
	30 years operation	50 years operation
Transmission pipelines	100 to 250	170 to 420
Distribution pipelines	250 to 500	420 to 840
House connections	1000 to 2500	1700 to 4200

Fig.5 Cicli equivalenti completi con $m=4$ e $\Delta T_{ref} = 110^\circ\text{C}$

N.B.: Anche se la base definita dalla norma è di 30 anni di funzionamento, nella pratica, le reti di teleriscaldamento possono funzionare a condizioni operative diverse per periodi più lunghi di 30 anni. Per questo motivo, la norma UNI EN13941:2022 indica nella tabella anche i valori dei cicli relativi a 50 anni, come indicato nella Nota 2 del paragrafo 6.7.2.

Nel caso in cui si conoscano il numero e l'ampiezza dei cicli termici, derivati, per esempio, da un'estrapolazione dei dati sullo storico delle temperature, la Norma UNI EN13941:2022 dà indicazioni precise sul calcolo effettivo dei cicli termici. I cicli ottenuti (tramite, ad esempio, estrapolazione con il metodo RAIN-FLOW) devono essere convertiti in cicli termici equivalenti utilizzando la formula di Palmgren-Miner:

$$N_0 = \frac{\sum n_i \cdot (\Delta T_i)^m}{(\Delta T_{ref})^m},$$

dove:

N_0 è il numero di cicli termici completi equivalenti;

n_i è il numero di cicli con range di temperatura ΔT_i ;

ΔT_{ref} è la temperatura di riferimento alla quale viene calcolato N_0 ;

m è la costante del grafico SN.

2.4. Analisi a fatica della rete – Verifica a fatica

Sulla base del numero di cicli equivalenti individuati (tramite calcolo o secondo la tabella di fig. 4), la verifica a fatica degli accessori (quali stacchi, curve, riduzioni, etc.), viene effettuata utilizzando l'equazione di Palmgren-Miner:

$$\sum_i \frac{n_i}{N_i} \leq \frac{1}{\gamma_{fat}}$$

dove:

n_i è il numero di cicli con intervallo di sforzo ΔS_i durante la vita utile richiesta;

N_i è il numero di cicli con intervallo di sforzo ΔS_i al quale avviene la rottura;

γ_{fat} è il fattore di sicurezza per verifica a rottura (fig.6);

i è il numero dei diversi intervalli di sforzo.

Table 15 — Partial safety factor for fatigue	
Project class	γ_{fat}
A	5
B	6,67
C	10

Fig.6 Fattore di sicurezza per verifica a rottura in base alla Classe di progetto

N_i è calcolato con la formula:

$$N_i = \left(\frac{k}{S_i} \right)^m,$$

dove:

S_i è l'intervallo di sforzo di progetto, derivante dalla curva del grafico SN.

Da qui si ricava l'equazione per il grafico della curva SN:

$$S = k \cdot N^{-1/m}$$

Tramite l'utilizzo del grafico SN, lo sforzo di riferimento S viene calcolato, assumendo un comportamento puramente elastico del materiale, anche quando lo sforzo calcolato è al di sopra del limite di snervamento.

Per tubi di servizio realizzati in acciaio al carbonio basso legati (sforzo di snervamento inferiore ai 360Mpa) vengono utilizzati i coefficienti $K=5000$ e $m=4$ (fig.7):

$$S = 5000 \cdot N^{-1/4}$$

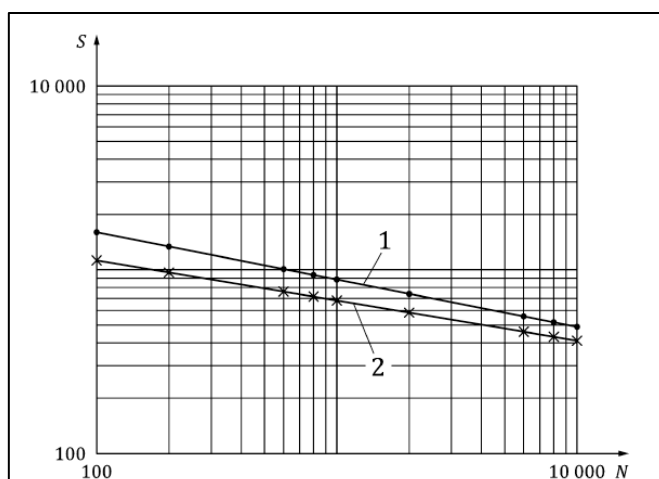


Fig.7 Curva di fatica (SN) per accessori in acciaio basso legati

Il grafico della figura 6 rappresenta 2 curve: la n.1 riguarda gli effetti a fatica per saldature di testa realizzate, per esempio, nella giunzione tra due tubi in acciaio, o tra tubo e curva, ecc.; la n. 2 riguarda gli effetti a fatica per saldature ad angolo, quali ad esempio, quelle che si possono trovare nei compensatori monouso; in questo caso l'intervallo di sforzo a fatica S si riduce per rapporto allo stesso numero di cicli sulla rete.

N.B.: la verifica a fatica della rete non è oggetto di questo studio.

3. Descrizione della alimentazione della rete di teleriscaldamento di Sesto San Giovanni

La rete di teleriscaldamento di Sesto San Giovanni è entrata in funzione nel 1994, tramite il primo stralcio, ed è stata gradualmente estesa negli anni. Il piano di sviluppo per i prossimi anni prevede l'ampliamento della rete e dei sistemi di recupero/produzione di calore per servire ulteriori utenze sia pubbliche che private.

La rete è di tipo a maglia e per far fronte al fabbisogno termico degli utenti serviti, viene alimentata da n. 4 Centrali Termiche, più precisamente EDISON, TECNOCITY ANSALDO, VETROBALSAMO, PONTENUOVO, per un totale di 195 MW di potenza termica installata.

Di seguito una breve descrizione delle Centrali Termiche:

- La Centrale EDISON, con una potenza termica installata di 110 MW, copre il fabbisogno quasi totale della rete. Nei momenti di elevata richiesta di energia termica (picco) interviene la caldaia ad acqua surriscaldata "BONO", con una potenza termica di 40 MW. Complessivamente, dunque, la potenza termica installata è di 150 MW.
- La Centrale TECNOCITY ANSALDO, con una potenza termica installata di 20 MW, viene messa in funzione prevalentemente nella stagione estiva e nei momenti di elevata richiesta di energia termica.
- La Centrale VETROBALSAMO è costituita da uno scambiatore a vapore da 5 MW termici per produzione di acqua surriscaldata.
- La Centrale PONTENUOVO, con una potenza termica installata di 20 MW, viene messa in funzione prevalentemente nella stagione estiva.

L'energia termica immessa nella rete copre il fabbisogno di n. 4500 utenze pubbliche e private.

Dalle specifiche tecniche si evince che la rete è stata progettata per un esercizio alla temperatura di progetto di 130°C e alla pressione di 16 bar.

Dalla lettura dei tabulati storici delle temperature di esercizio raccolti nelle Centrali Termiche e in alcune sottostazioni di utenza, si è riscontrato che la temperatura massima di esercizio non ha superato i 120°C se non per poche ore all'anno; la rete dispone di un sistema di telecontrollo da remoto.

Fino ad aprile 2021, la rete di teleriscaldamento veniva alimentata da un'ulteriore Centrale Termica, soprannominata "CORE". La Centrale produceva calore da termovalorizzatore per una potenza termica da 12 a 15 MW. Per una maggiore completezza dei risultati, anche questa Centrale sarà presa in considerazione per il calcolo della vita termica utile termica e del numero di cicli termici completi equivalenti.

4. Calcolo della vita termica utile

Lo studio sul calcolo della vita termica utile è stato condotto adottando le formule e il grafico della Norma UNI EN253:2016, utilizzando i tabulati storici delle temperature di esercizio forniti.

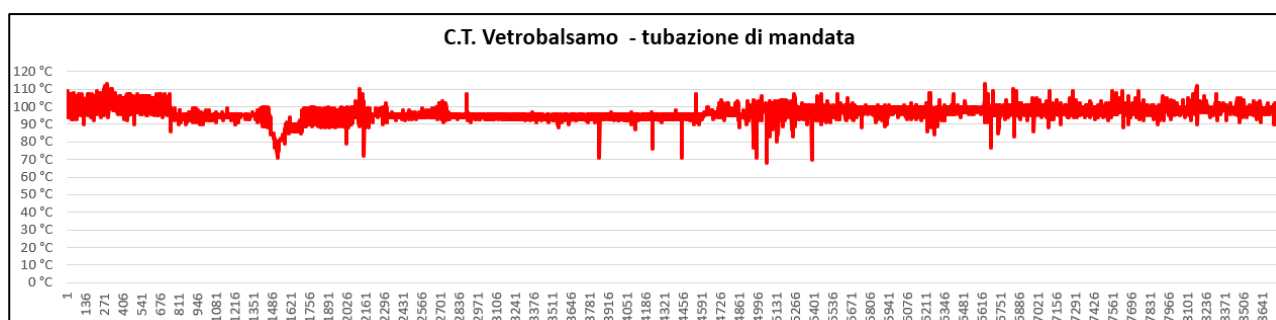
Per questa verifica sono state esaminate le temperature di esercizio per un periodo di un anno, e più precisamente dal 25/03/2020 al 24/03/2021 della C.T. EDISON, della C.T. TECNOCITY ANSALDO, C.T. CORE e della C.T. VETROBALSAMO.

Per quanto riguarda la C.T. PONTENUOVO, sono state esaminate solamente le temperature di esercizio relative a 6 mesi del 2022, e più precisamente dal 12/01/2022 al 11/07/2022, in quanto non era dotata del sistema di telecontrollo per gli anni precedenti.

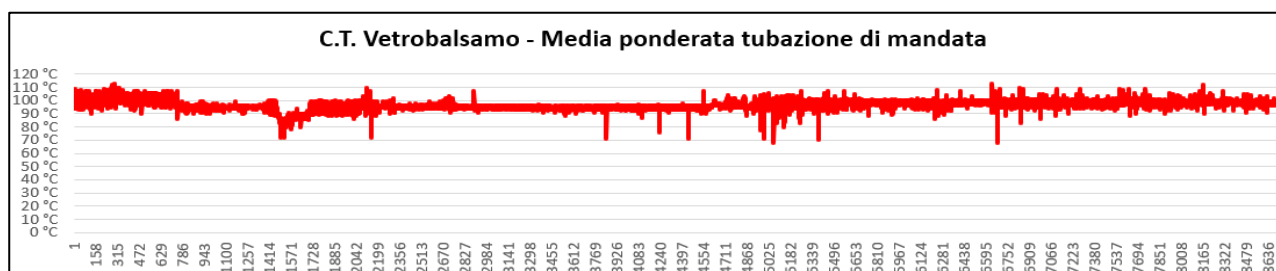
Data la tipologia della rete, di tipo a maglia, per le centrali dove le portate risultano assenti (quando una Centrale termica subisce un'interruzione), la vita termica utile è stata calcolata anche considerando la media ponderata delle temperature di mandata in base alle portate immesse nel ramo di rete da tutte le altre Centrali in funzione. Il calcolo è stato eseguito per 2 centrali, la Centrale Tecnocity Ansaldo e la Centrale Vetrobalsamo.

In base al grafico della relazione di Arrhenius (Allegato A) e alla formula (Allegato B) della Norma UNI EN253:2016, e sulla base delle temperature orarie di esercizio ottenute dalle letture o in base alla media ponderata calcolata, sono stati calcolati gli anni di vita termica utile della rete per i diversi casi.

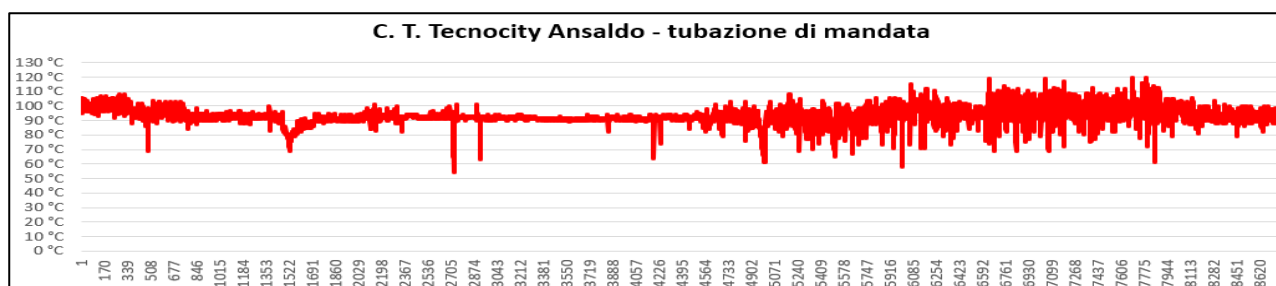
Si riportano di seguito i grafici relativi all'andamento delle temperature di mandata, nonché delle temperature calcolate sulla media ponderata in base alle portate per i circuiti delle Centrali Tecnocity Ansaldo e Vetrobalsamo e le tabelle riepilogative della vita termica utile di ciascuna Centrale.



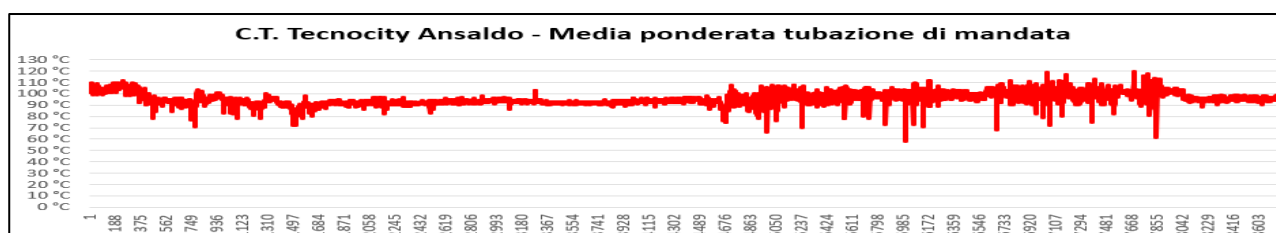
Circuito C.T. Vetrobalsamo - tubazione di mandata			
Gamma temperature di esercizio	Ore di funzionamento 25/03/2020-24/03/2021	Temperatura media di esercizio	Vita termica prevista secondo l'Allegato C della Norma UNI EN253:2016
114°C-110°C	11 h/anno	111,1 °C	60 anni
109°C-100°C	1307 h/anno	101,8 °C	> 75 anni
<100°C	7442 h/anno	95,5 °C	> 100 anni
Vita termica utile calcolata secondo l'Allegato B della Norma UNI EN 253:2016			> 95,19 anni



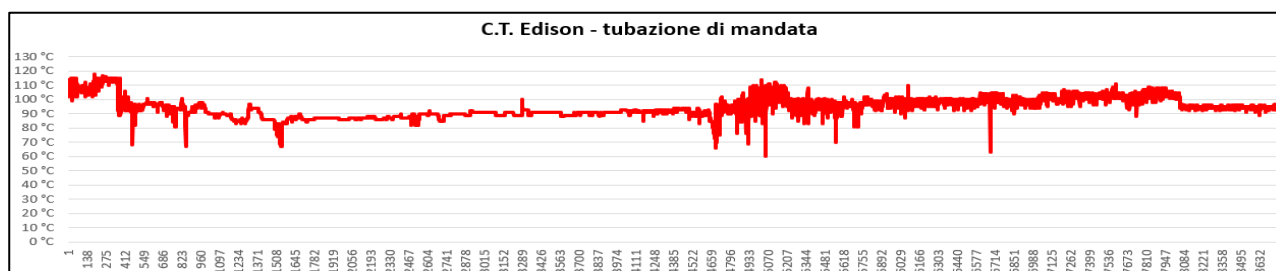
Circuito C.T. Vetrobalsamo – Media ponderata tubazione di mandata			
Gamma temperature di esercizio	Ore di funzionamento 25/03/2020-24/03/2021	Temperatura media di esercizio	Vita termica prevista secondo l'Allegato C della Norma UNI EN253:2016
114°C-110°C	11 h/anno	108,6 °C	60 anni
109°C-100°C	1314 h/anno	101,8 °C	> 75 anni
<100°C	7435 h/anno	95,6 °C	> 100 anni
Vita termica utile calcolata secondo l'Allegato B della Norma UNI EN 253:2016			95,2 anni



Circuito C.T. Tecnocity Ansaldo - tubazione di mandata			
Gamma temperature di esercizio	Ore di funzionamento 25/03/2020-24/03/2021	Temperatura media di esercizio	Vita termica prevista secondo l'Allegato C della Norma UNI EN253:2016
120°C-116°C	13 h/anno	117,6 °C	40 anni
115°C	5 h/anno	115,0 °C	50 anni
114°C-110°C	51 h/anno	111,5 °C	60 anni
109°C-100°C	1095 h/anno	102,3 °C	> 75 anni
<100°C	7596 h/anno	91,9 °C	> 100 anni
Vita termica utile calcolata secondo l'Allegato B della Norma UNI EN 253:2016			> 95,4 anni



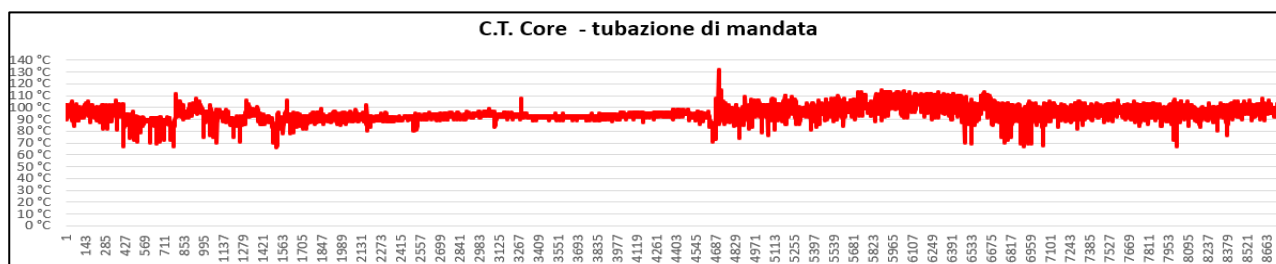
Circuito C.T. Tecnocity Ansaldo – Media ponderata tubazione di mandata			
Gamma temperature di esercizio	Ore di funzionamento 25/03/2020-24/03/2021	Temperatura media di esercizio	Vita termica prevista secondo l'Allegato C della Norma UNI EN253:2016
120°C-116°C	9 h/anno	117,3 °C	40 anni
115°C	2 h/anno	115,0 °C	50 anni
114°C-110°C	34 h/anno	111,2 °C	60 anni
109°C-100°C	2127 h/anno	102,7 °C	> 75 anni
<100°C	6588 h/anno	93,6 °C	> 100 anni
Vita termica utile calcolata secondo l'Allegato B della Norma UNI EN 253:2016			> 92,1 anni



C.T. Edison – tubazione di mandata			
Gamma temperature di esercizio	Ore di funzionamento 25/03/2020-24/03/2021	Temperatura media di esercizio	Vita termica prevista secondo l'Allegato C della Norma UNI EN253:2016
120°C-116°C	3 h/anno	117,0 °C	40 anni
115°C	66 h/anno	115,0 °C	50 anni
114°C-110°C	168 h/anno	112,5 °C	60 anni
109°C-100°C	1822 h/anno	103,1 °C	> 75 anni
<100°C	6701 h/anno	91,9 °C	> 100 anni
Vita termica utile calcolata secondo l'Allegato B della Norma UNI EN 253:2016			> 91,7 anni



C.T. Pontenuovo – tubazione di mandata			
Gamma temperature di esercizio	Ore di funzionamento 12/01/2022-11/07/2022	Temperatura media di esercizio	Vita termica prevista secondo l'Allegato C della Norma UNI EN253:2016
109°C-100°C	1380 h/anno	101,7 °C	> 75 anni
<100°C	2964 h/anno	84,9 °C	> 110 anni
Vita termica utile calcolata secondo l'Allegato B della Norma UNI EN 253:2016			> 95,8 anni



C.T. Core – tubazione di mandata			
Gamma temperature di esercizio	Ore di funzionamento 25/03/2020-24/03/2021	Temperatura media di esercizio	Vita termica prevista secondo l'Allegato C della Norma UNI EN253:2016
132°C	1 h/anno	132,0 °C	8 anni
115°C	2 h/anno	115,0 °C	50 anni
114°C-110°C	181 h/anno	111,0 °C	60 anni
109°C-100°C	1762 h/anno	102,9 °C	> 75 anni
<100°C	6814 h/anno	93,0 °C	> 100 anni
Vita termica utile calcolata secondo l'Allegato B della Norma UNI EN 253:2016			> 92,4 anni

Si riporta sotto la tabella riepilogativa.

Vita termica utile calcolata secondo l'Allegato A e B della Norma UNI EN 253:2016	
Circuito C.T. Vetrobalsamo - tubazione di mandata	> 95,19 anni
Circuito C.T. Vetrobalsamo - Media pesata tubazione di mandata	> 95,18 anni
Circuito C.T. Tecnocity Ansaldo - tubazione di mandata	> 92,14 anni
Circuito C.T. Tecnocity Ansaldo - Media pesata tubazione di mandata	> 95,39 anni
Circuito C.T. Edison - tubazione di mandata	> 91,73 anni
Circuito C.T. Pontenuovo - tubazione di mandata	> 95,80 anni
Circuito C.T. Core - tubazione di mandata	> 92,39 anni

I calcoli dimostrano per ogni singolo circuito (Centrali Termiche sopra descritte) che, con temperature effettive di esercizio, per la maggior parte al di sotto di 115°C con picchi di temperatura inferiori a 120°C per poche ore l'anno, ed una singola punta oraria di 132°C relativa alla Centrale Termica Core, l'aspettativa di vita termica utile della rete risulta superiore a 50 anni in tutti e cinque i casi.

5. Calcolo numero cicli termici completi equivalenti

Abitualmente, il numero di cicli termici completi equivalenti per la verifica a fatica viene indicato nella Norma UNI EN13941:2022 in base alla funzione del tratto di rete (trasporto, distribuzione o allaccio di utenza, fig.4), nonché, ovviamente, in base alle variazioni di temperatura alle quali sono soggetti.

Table 14 — Equivalent full action cycles for $m = 4$ and $\Delta T_{ref} = 110\text{ }^{\circ}\text{C}$		
Character of pipeline	Number of full action cycles	
	30 years operation	50 years operation
Transmission pipelines	100 to 250	170 to 420
Distribution pipelines	250 to 500	420 to 840
House connections	1000 to 2500	1700 to 4200

Fig.4 Cicli equivalenti completi con $m=4$ e $\Delta T_{ref} = 110^{\circ}\text{C}$

Nel caso oggetto di questo studio, tuttavia, essendo note le variazioni di temperatura su base oraria, è stato dapprima calcolato il numero e l'ampiezza effettiva dei cicli utilizzando il metodo di conteggio RAIN-FLOW, metodo che viene indicato nella Norma UNI EN13941:2022. Per la trasformazione in numero di cicli termici completi equivalenti si è utilizzata, in seguito, la formula di Palmgren-Miner.

L'algoritmo RAIN-FLOW è stato sviluppato da Tatsuo Endo (ingegnere giapponese) e Masakatsu Matsuishi (all'epoca studente di ingegneria) nel 1968 e viene applicato ampiamente nell'ingegneria industriale, chimica, meccanica, etc..

Questo metodo di calcolo viene abitualmente utilizzato nell'analisi a fatica del materiale, al fine di tradurre le sollecitazioni di carico nel tempo in semplici cicli di sollecitazione caratterizzate da una sollecitazione minima e una massima.

Il numero di cicli termici per le dorsali principali (rete di trasporto) è stato calcolato utilizzando i tabulati delle temperature di esercizio delle 5 Centrali Termiche.

Per quanto riguarda le dorsali secondarie (distribuzione), non sono stati calcolati i cicli termici equivalenti, in quanto non è stato possibile rilevare le temperature. Il principio per l'assunzione dei cicli sarà trattato nel relativo capitolo.

5.1. Calcolo numero cicli termici completi equivalenti – rete di trasporto

Data la tipologia della rete, di tipo a maglia, la distribuzione del vettore termico a tutte le utenze, può essere, anche in caso d'interruzione dell'erogazione da uno o più impianti, garantita dalle altre centrali.

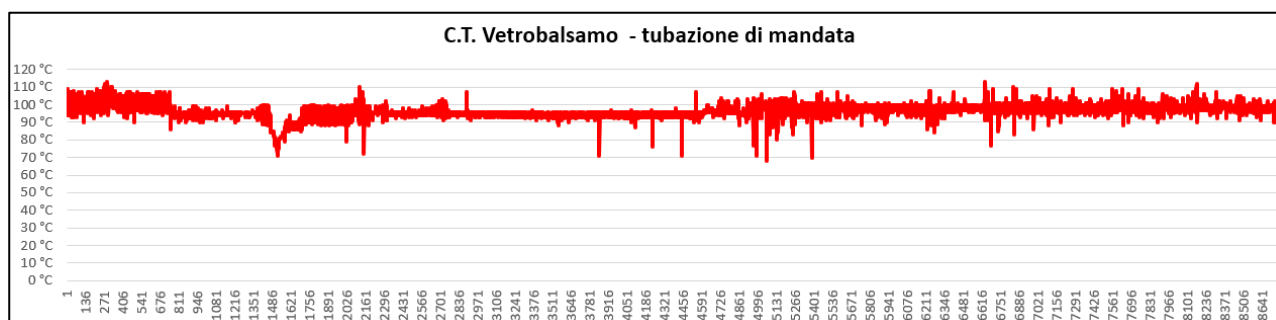
Questo potrebbe generare maggiori oscillazioni della temperatura sulla tubazione di ritorno, e si è, perciò, deciso di calcolare il numero di cicli termici completi equivalenti su entrambe le tubazioni.

Inoltre, per le centrali dove le portate risultano assenti (quando una Centrale termica subisce un'interruzione), i cicli sono stati calcolati anche considerando la media ponderata delle temperature in base alle portate immesse nel ramo di rete da tutte le altre Centrali in funzione. Questo calcolo è stato eseguito per 2 centrali, la Centrale Tecnocity Ansaldo e la Centrale Vetrobalsamo.

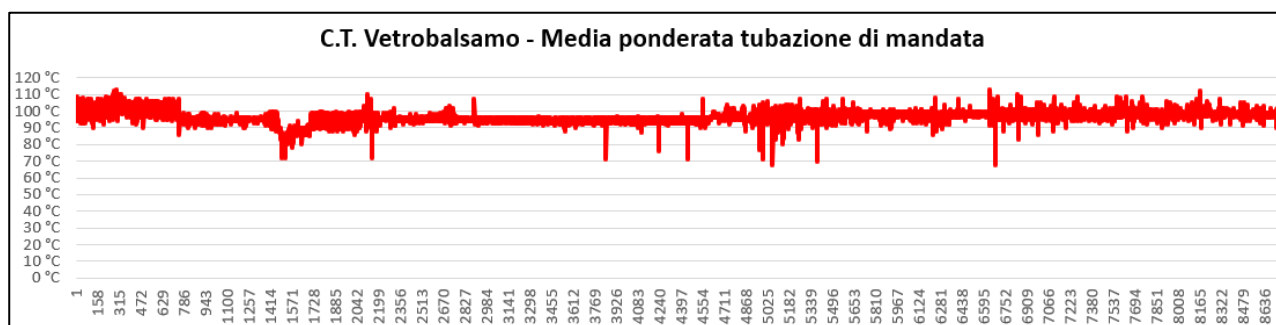
Dal calcolo dei cicli termici completi equivalenti si evince che la Centrale Termica più sfavorita è la Centrale EDISON, che presenta il numero e gli intervalli più ampi in termini di variazione delle temperature (cicli) nella tubazione di ritorno.

Nel calcolo è stato, a titolo cautelativo, aggiunto un ciclo termico parziale annuo corrispondente a un ΔT di 80°C , pari al massimo valore osservato per ogni centrale; questo per tener conto di possibili oscillazioni di temperatura per gli anni per cui non erano disponibili i dati.

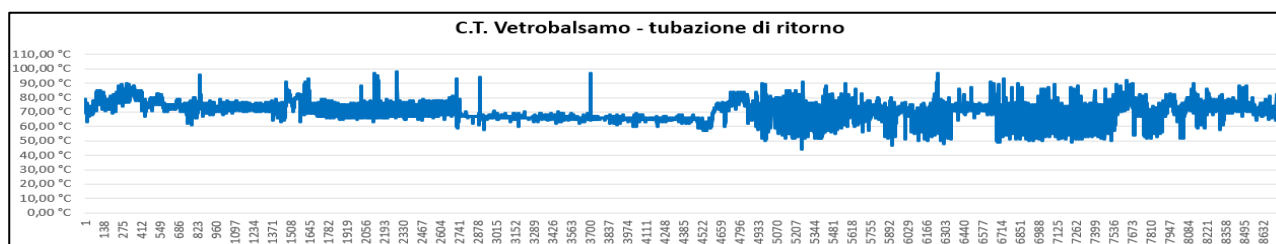
Si riportano di seguito i grafici relativi all'andamento delle temperature di mandata e ritorno, nonché delle temperature calcolate sulla media ponderata in base alle portate per i circuiti delle Centrali Tecnocity Ansaldo e Vetrobalsamo e le tabelle, per ogni Centrale Termica analizzata, indicanti il numero e l'ampiezza effettivi dei cicli calcolati con il metodo RAIN-FLOW, il numero di cicli parziali e il numero di cicli completi riferiti a 30 e a 50 anni calcolati con la formula di Plamgren-Miner; si ottiene alla fine il numero completo di cicli equivalenti come somma dei cicli completi sui 30 e 50 anni.



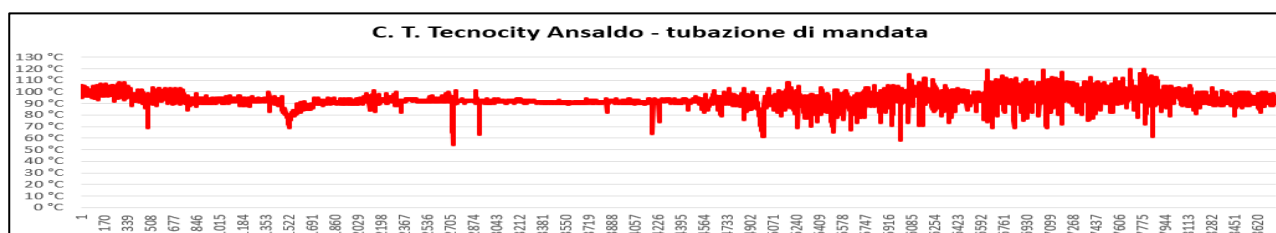
C.T. Vetrobalsamo - tubazione di mandata						
$\Delta T_{ref} =$		110 °C	Formula Palmgren-Miner			
m =		4				
	Numero cicli e ampiezza	ΔT nel periodo	Numero di cicli parziali (30anni)	Numero di cicli completi (30anni)	Numero di cicli parziali (50anni)	Numero di cicli completi (50 anni)
Durante 1 anno di esercizio (25/03/2020 al 24/03/2021)	537,5	1	16.125	0,0001	26.875	0,0002
	532,0	2	15.960	0,002	26.600	0,003
	344,5	3	10.335	0,01	17.225	0,01
	158,0	4	4.740	0,01	7.900	0,01
	89,0	5	2.670	0,01	4.450	0,02
	81,0	6	2.430	0,02	4.050	0,04
	48,0	7	1.440	0,02	2.400	0,04
	57,0	8	1.710	0,05	2.850	0,08
	51,0	9	1.530	0,07	2.550	0,11
	36,5	10	1.095	0,07	1.825	0,12
	30,0	11	900	0,09	1.500	0,15
	19,0	12	570	0,08	950	0,13
	14,0	13	420	0,08	700	0,14
	11,0	14	330	0,09	550	0,14
	7,5	15	225	0,08	375	0,13
	3,0	16	90	0,04	150	0,07
	8,0	17	240	0,14	400	0,23
	1,0	18	30	0,02	50	0,04
	3,5	19	105	0,09	175	0,16
	5,0	21	150	0,20	250	0,33
	0,5	22	15	0,02	25	0,04
	2,5	23	75	0,14	125	0,24
	2,0	24	60	0,14	100	0,23
	1,0	25	30	0,08	50	0,13
	3,0	27	90	0,33	150	0,54
	2,5	35	75	0,77	125	1,28
	1,5	36	45	0,52	75	0,86
	1,0	37	30	0,38	50	0,64
	1,0	39	30	0,47	50	0,79
	1,0	45	30	0,84	50	1,40
Numero di cicli termici completi equivalenti C.T. Vetrobalsamo				4,9		8,1
Fattore di sicurezza	1,00	80	30	8,39	50	13,99
Numero di cicli termici completi equivalenti C.T. Vetrobalsamo (compreso fattore di sicurezza)				13,3		22,1



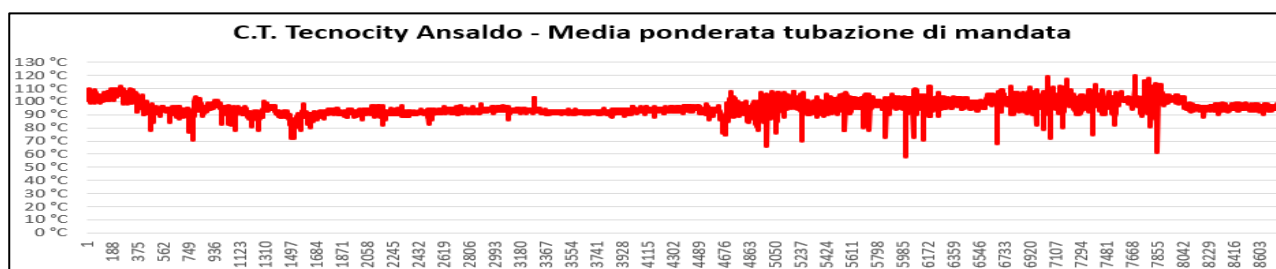
C.T. Vetrobalsamo - Media ponderata tubazione di mandata						
$\Delta T_{ref} =$		110 °C	Formula Palmgren-Miner			
m =		4				
	Numero cicli e ampiezza	ΔT nel periodo	Numero di cicli parziali (30anni)	Numero di cicli completi (30anni)	Numero di cicli parziali (50anni)	Numero di cicli completi (50 anni)
Durante 1 anno di esercizio (25/03/2020 al 24/03/2021)	541,5	1	16.245	0,0001	27.075	0,0002
	538	2	16.140	0,002	26.900	0,003
	345,5	3	10.365	0,01	17.275	0,01
	162	4	4.860	0,01	8.100	0,01
	86	5	2.580	0,01	4.300	0,02
	80	6	2.400	0,02	4.000	0,04
	52	7	1.560	0,03	2.600	0,04
	58	8	1.740	0,05	2.900	0,08
	51	9	1.530	0,07	2.550	0,11
	36,5	10	1.095	0,07	1.825	0,12
	30	11	900	0,09	1.500	0,15
	18	12	540	0,08	900	0,13
	14	13	420	0,08	700	0,14
	13	14	390	0,10	650	0,17
	8,5	15	255	0,09	425	0,15
	3	16	90	0,04	150	0,07
	8	17	240	0,14	400	0,23
	1	18	30	0,02	50	0,04
	3,5	19	105	0,09	175	0,16
	1	20	30	0,03	50	0,05
	6	21	180	0,24	300	0,40
	0,5	22	15	0,02	25	0,04
	2,5	23	75	0,14	125	0,24
	3	27	90	0,33	150	0,54
	1	33	30	0,24	50	0,41
	2	35	60	0,61	100	1,02
1	36	30	0,34	50	0,57	
1	37	30	0,38	50	0,64	
1	38	30	0,43	50	0,71	
0,5	44	15	0,38	25	0,64	
1,5	45	45	1,26	75	2,10	
Numero di cicli termici completi equivalenti C.T. Vetrobalsamo				5,4		9,0
Fattore di sicurezza	1,00	80	30	8,39	50	13,99
Numero di cicli termici completi equivalenti C.T. Vetrobalsamo (compreso fattore di sicurezza)				13,8		23,0



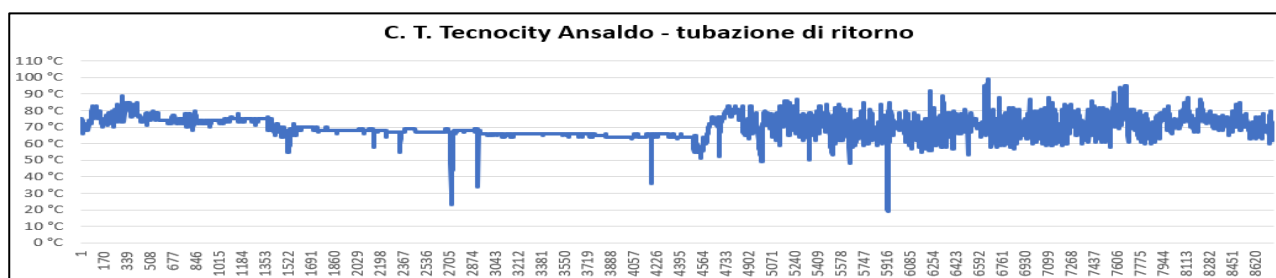
C.T. Vetrobalsamo - tubazione di ritorno						
$\Delta T_{ref} =$		110 °C	Formula Palmgren-Miner			
$m =$		4				
	Numero cicli e ampiezza	ΔT nel periodo	Numero di cicli parziali (30anni)	Numero di cicli completi (30anni)	Numero di cicli parziali (50anni)	Numero di cicli completi (50 anni)
Durante 1 anno di esercizio (25/03/2020 al 24/03/2021)	301,5	1	9.045	0,0001	15.075	0,0001
	257	2	7.710	0,001	12.850	0,001
	170	3	5.100	0,003	8.500	0,005
	95	4	2.850	0,005	4.750	0,01
	64	5	1.920	0,01	3.200	0,01
	70	6	2.100	0,02	3.500	0,03
	49,5	7	1.485	0,02	2.475	0,04
	27	8	810	0,02	1.350	0,04
	35	9	1.050	0,05	1.750	0,08
	31	10	930	0,06	1.550	0,11
	21	11	630	0,06	1.050	0,11
	20,5	12	615	0,09	1.025	0,15
	19	13	570	0,11	950	0,19
	8	14	240	0,06	400	0,10
	4	15	120	0,04	200	0,07
	8,5	16	255	0,11	425	0,19
	5	17	150	0,09	250	0,14
	10	18	300	0,22	500	0,36
	5	19	150	0,13	250	0,22
	5	20	150	0,16	250	0,27
	9	21	270	0,36	450	0,60
	15	22	450	0,72	750	1,20
	13	23	390	0,75	650	1,24
	5,5	24	165	0,37	275	0,62
	8	25	240	0,64	400	1,07
	5	26	150	0,47	250	0,78
	6,5	27	195	0,71	325	1,18
	4	28	120	0,50	200	0,84
	7,5	29	225	1,09	375	1,81
	4,5	30	135	0,75	225	1,24
	4	31	120	0,76	200	1,26
	0,5	32	15	0,11	25	0,18
	4	33	120	0,97	200	1,62
	2	34	60	0,55	100	0,91
	4	35	120	1,23	200	2,05
	5	36	150	1,72	250	2,87
	0,5	37	15	0,19	25	0,32
	3,5	38	105	1,50	175	2,49
	3	39	90	1,42	150	2,37
	1,5	40	45	0,79	75	1,31
	1	42	30	0,64	50	1,06
	0,5	43	15	0,35	25	0,58
	1,5	44	45	1,15	75	1,92
	0,5	45	15	0,42	25	0,70
	0,5	49	15	0,59	25	0,98
	0,5	53	15	0,81	25	1,35
	0,5	54	15	0,87	25	1,45
Numero di cicli termici completi equivalenti C.T. Vetrobalsamo				21,7		36,1
Fattore di sicurezza	1,00	80	30	8,39	50	13,99
Numero di cicli termici completi equivalenti C.T. Vetrobalsamo (compreso fattore di sicurezza)				30,1		50,1



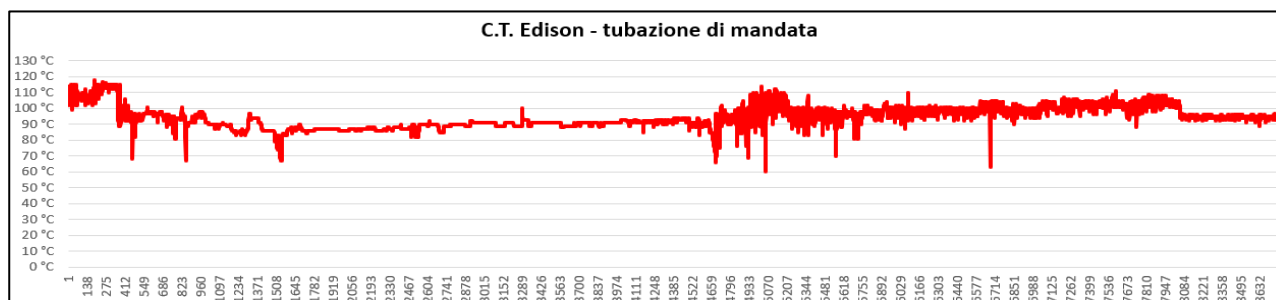
C.T. Tecnocity Ansaldo- tubazione di mandata						
$\Delta T_{ref} =$		110 °C	Formula Palmgren-Miner			
$m =$		4				
	Numero cicli e ampiezza	ΔT nel periodo	Numero di cicli parziali (30anni)	Numero di cicli completi (30anni)	Numero di cicli parziali (50anni)	Numero di cicli completi (50 anni)
Durante 1 anno di esercizio (25/03/2020 al 24/03/2021)	594	1	17.820	0,0001	29.700	0,0002
	281	2	8.430	0,001	14.050	0,002
	161	3	4.830	0,003	8.050	0,004
	113,5	4	3.405	0,006	5.675	0,01
	99	5	2.970	0,01	4.950	0,02
	60	6	1.800	0,02	3.000	0,03
	58	7	1.740	0,03	2.900	0,05
	45,5	8	1.365	0,04	2.275	0,06
	32,5	9	975	0,04	1.625	0,07
	29	10	870	0,06	1.450	0,10
	37	11	1.110	0,11	1.850	0,19
	25,5	12	765	0,11	1.275	0,18
	19,5	13	585	0,11	975	0,19
	19,5	14	585	0,15	975	0,26
	14,5	15	435	0,15	725	0,25
	11,5	16	345	0,15	575	0,26
	23	17	690	0,39	1.150	0,66
	10	18	300	0,22	500	0,36
	9	19	270	0,24	450	0,40
	8	20	240	0,26	400	0,44
	7,5	21	225	0,30	375	0,50
	3	22	90	0,14	150	0,24
	5	23	150	0,29	250	0,48
	5	24	150	0,34	250	0,57
	5	25	150	0,40	250	0,67
	6	26	180	0,56	300	0,94
	6	27	180	0,65	300	1,09
	2	28	60	0,25	100	0,42
	3	29	90	0,43	150	0,72
	4	30	120	0,66	200	1,11
	2	32	60	0,43	100	0,72
	2	33	60	0,49	100	0,81
	3,5	34	105	0,96	175	1,60
	4	35	120	1,23	200	2,05
	2	36	60	0,69	100	1,15
	2	37	60	0,77	100	1,28
	1	38	30	0,43	50	0,71
	1	39	30	0,47	50	0,79
	1	41	30	0,58	50	0,97
	3	42	90	1,91	150	3,19
	1	44	30	0,77	50	1,28
	2	45	60	1,68	100	2,80
	3	50	90	3,84	150	6,40
	0,5	52	15	0,75	25	1,25
	0,5	54	15	0,87	25	1,45
	0,5	59	15	1,24	25	2,07
	0,5	66	15	1,94	25	3,24
Numero di cicli termici equivalenti C.T. Tecnocity Ansaldo				25,2		42,0
Fattore di sicurezza	1,00	80	30	8,39	50	13,99
Numero di cicli termici equivalenti C.T. Tecnocity Ansaldo (compreso fattore di sicurezza)				33,6		56,0



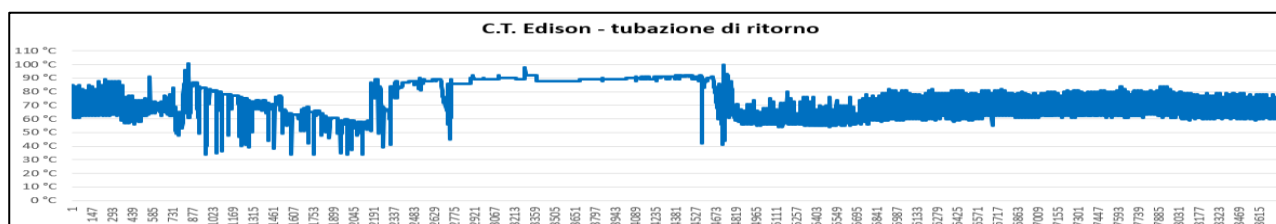
C.T. Tecnocity Ansaldo - Media ponderata tubazione di mandata						
$\Delta T_{ref} =$		110 °C	Formula Palmgren-Miner			
$m =$		4				
	Numero cicli e ampiezza	ΔT nel periodo	Numero di cicli parziali (30anni)	Numero di cicli completi (30anni)	Numero di cicli parziali (50anni)	Numero di cicli completi (50 anni)
Durante 1 anno di esercizio (25/03/2020 al 24/03/2021)	727	1	21.810	0,0001	36.350	0,0002
	426	2	12.780	0,001	21.300	0,002
	226,5	3	6.795	0,004	11.325	0,006
	151	4	4.530	0,008	7.550	0,01
	82,5	5	2.475	0,01	4.125	0,02
	73,5	6	2.205	0,02	3.675	0,03
	38	7	1.140	0,02	1.900	0,03
	37	8	1.110	0,03	1.850	0,05
	31,5	9	945	0,04	1.575	0,07
	22	10	660	0,05	1.100	0,08
	20	11	600	0,06	1.000	0,10
	27	12	810	0,11	1.350	0,19
	13,5	13	405	0,08	675	0,13
	14	14	420	0,11	700	0,18
	10	15	300	0,10	500	0,17
	6	16	180	0,08	300	0,13
	7	17	210	0,12	350	0,20
	8	18	240	0,17	400	0,29
	7	19	210	0,19	350	0,31
	2	20	60	0,07	100	0,11
	3	21	90	0,12	150	0,20
	3	22	90	0,14	150	0,24
	1	23	30	0,06	50	0,10
	1,5	25	45	0,12	75	0,20
	2	26	60	0,19	100	0,31
	1	27	30	0,11	50	0,18
	1	28	30	0,13	50	0,21
	3	29	90	0,43	150	0,72
	1	30	30	0,17	50	0,28
	1	31	30	0,19	50	0,32
	3	32	90	0,64	150	1,07
	3	33	90	0,73	150	1,22
	1	36	30	0,34	50	0,57
	2	37	60	0,77	100	1,28
	1	39	30	0,47	50	0,79
	2	42	60	1,28	100	2,13
	1	44	30	0,77	50	1,28
	1	47	30	1,00	50	1,67
	0,5	52	15	0,75	25	1,25
	0,5	54	15	0,87	25	1,45
	0,5	59	15	1,24	25	2,07
	0,5	62	15	1,51	25	2,52
Numero di cicli termici completi equivalenti C.T. Tecnocity Ansaldo				13,3		22,2
Fattore di sicurezza	1,00	80	30	8,39	50	13,99
Numero di cicli termici completi equivalenti C.T. Tecnocity Ansaldo (compreso fattore di sicurezza)				21,7		36,2



C.T. Tecnocity Ansaldo - tubazione di ritorno						
$\Delta T_{ref} =$		110 °C	Formula Palmgren-Miner			
$m =$		4				
	Numero cicli e ampiezza	ΔT nel periodo	Numero di cicli parziali (30anni)	Numero di cicli completi (30anni)	Numero di cicli parziali (50anni)	Numero di cicli completi (50 anni)
Durante 1 anno di esercizio (25/03/2020 al 24/03/2021)	81	1	2.430	0,00002	4.050	0,00003
	130	2	3.900	0,0004	6.500	0,001
	61,5	3	1.845	0,001	3.075	0,002
	32	4	960	0,002	1.600	0,003
	31	5	930	0,004	1.550	0,01
	18	6	540	0,004	900	0,01
	27	7	810	0,01	1.350	0,02
	18	8	540	0,02	900	0,03
	18	9	540	0,02	900	0,04
	17	10	510	0,03	850	0,06
	8	11	240	0,02	400	0,04
	14	12	420	0,06	700	0,10
	11	13	330	0,06	550	0,11
	8	14	240	0,06	400	0,10
	7	15	210	0,07	350	0,12
	9	16	270	0,12	450	0,20
	11	17	330	0,19	550	0,31
	5,5	18	165	0,12	275	0,20
	7	19	210	0,19	350	0,31
	8,5	20	255	0,28	425	0,46
	10	21	300	0,40	500	0,66
	4	22	120	0,19	200	0,32
	4,5	23	135	0,26	225	0,43
	6	24	180	0,41	300	0,68
	1	25	30	0,08	50	0,13
	1	26	30	0,09	50	0,16
	1	27	30	0,11	50	0,18
	2	28	60	0,25	100	0,42
	4	30	120	0,66	200	1,11
	1	31	30	0,19	50	0,32
	1	32	30	0,21	50	0,36
	1	33	30	0,24	50	0,41
	2	34	60	0,55	100	0,91
	1,5	35	45	0,46	75	0,77
	1	36	30	0,34	50	0,57
	1	37	30	0,38	50	0,64
	0,5	38	15	0,21	25	0,36
	1	39	30	0,47	50	0,79
	0,5	42	15	0,32	25	0,53
	1	64	30	3,44	50	5,73
	0,5	70	15	2,46	25	4,10
	0,5	80	15	4,20	25	6,99
Numero di cicli termici equivalenti C.T. Tecnocity Ansaldo				17,2		28,7
Fattore di sicurezza	1,00	80	30	8,39	50	13,99
Numero di cicli termici equivalenti C.T. Tecnocity Ansaldo				25,6		42,7



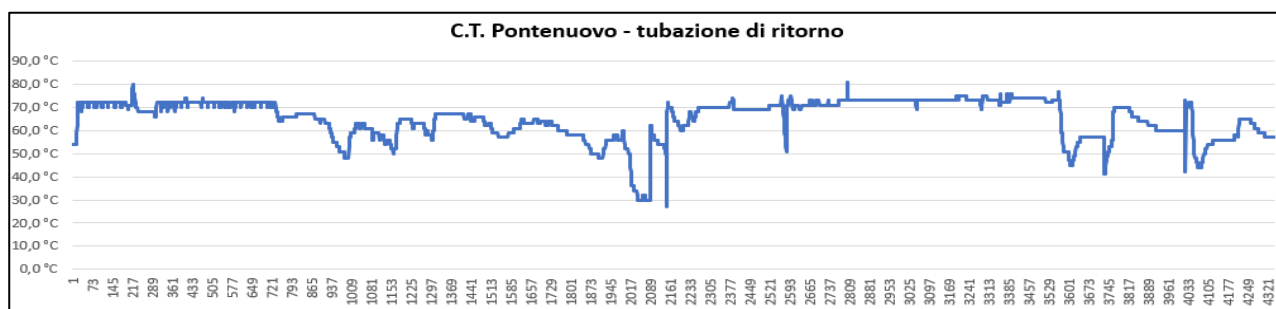
C.T. Edison - tubazione di mandata						
$\Delta T_{ref} =$		110 °C	Formula Palmgren-Miner			
$m =$		4				
	Numero cicli e ampiezza	ΔT nel periodo	Numero di cicli parziali (30anni)	Numero di cicli completi (30anni)	Numero di cicli parziali (50anni)	Numero di cicli completi (50 anni)
Durante 1 anno di esercizio (25/03/2020 al 24/03/2021)	232	1	6.960	0,00005	11.600	0,0001
	165	2	4.950	0,001	8.250	0,0009
	100	3	3.000	0,002	5.000	0,003
	70,5	4	2.115	0,004	3.525	0,01
	41	5	1.230	0,01	2.050	0,01
	42	6	1.260	0,01	2.100	0,02
	30	7	900	0,01	1.500	0,02
	23,5	8	705	0,02	1.175	0,03
	25	9	750	0,03	1.250	0,06
	17	10	510	0,03	850	0,06
	12	11	360	0,04	600	0,06
	6,5	12	195	0,03	325	0,05
	8,5	13	255	0,05	425	0,08
	7	14	210	0,06	350	0,09
	4	15	120	0,04	200	0,07
	2,5	16	75	0,03	125	0,06
	5	17	150	0,09	250	0,14
	2	18	60	0,04	100	0,07
	2,5	19	75	0,07	125	0,11
	1,5	20	45	0,05	75	0,08
	4,5	21	135	0,18	225	0,30
	1	22	30	0,05	50	0,08
	0,5	23	15	0,03	25	0,05
	3	25	90	0,24	150	0,40
	2	26	60	0,19	100	0,31
	2	27	60	0,22	100	0,36
	1	31	30	0,19	50	0,32
	2	33	60	0,49	100	0,81
	1	36	30	0,34	50	0,57
	1	40	30	0,52	50	0,87
	1,5	48	45	1,63	75	2,72
	0,5	49	15	0,59	25	0,98
	0,5	52	15	0,75	25	1,25
	0,5	58	15	1,16	25	1,93
Numero di cicli termici completi equivalenti C.T. Edison				7,2		12,0
Fattore di sicurezza	1,00	80	30	8,39	50	13,99
Numero di cicli termici completi equivalenti C.T. Edison (compreso fattore di sicurezza)				15,6		26,0



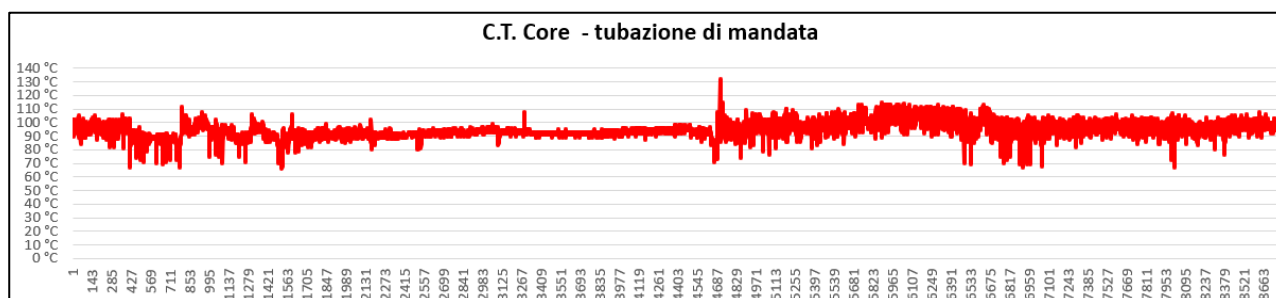
C.T. Edison - tubazione di ritorno						
$\Delta T_{ref} =$		110 °C	Formula Palmgren-Miner			
$m =$		4				
	Numero cicli e ampiezza	ΔT nel periodo	Numero di cicli parziali (30anni)	Numero di cicli completi (30anni)	Numero di cicli parziali (50anni)	Numero di cicli completi (50 anni)
Durante 1 anno di esercizio (25/03/2020 al 24/03/2021)	121	1	3.630	0,00002	6.050	0,00004
	86	2	2.580	0,0003	4.300	0,0005
	75,5	3	2.265	0,001	3.775	0,002
	28	4	840	0,001	1.400	0,002
	10	5	300	0,001	500	0,002
	9	6	270	0,002	450	0,004
	6	7	180	0,003	300	0,005
	10	8	300	0,01	500	0,01
	7	9	210	0,01	350	0,02
	9	10	270	0,02	450	0,03
	4	11	120	0,01	200	0,02
	9	12	270	0,04	450	0,06
	3	13	90	0,02	150	0,03
	6	14	180	0,05	300	0,08
	13,5	15	405	0,14	675	0,23
	16	16	480	0,21	800	0,36
	23	17	690	0,39	1.150	0,66
	33,5	18	1.005	0,72	1.675	1,20
	39,5	19	1.185	1,05	1.975	1,76
	18	20	540	0,59	900	0,98
	10	21	300	0,40	500	0,66
	12	22	360	0,58	600	0,96
	10	23	300	0,57	500	0,96
	2,5	24	75	0,17	125	0,28
	4,5	25	135	0,36	225	0,60
	10	26	300	0,94	500	1,56
	4	27	120	0,44	200	0,73
	0,5	28	15	0,06	25	0,10
	1	29	30	0,14	50	0,24
	2,5	30	75	0,41	125	0,69
	1	32	30	0,21	50	0,36
	0,5	33	15	0,12	25	0,20
	2	34	60	0,55	100	0,91
	5,5	35	165	1,69	275	2,82
	1,5	39	45	0,71	75	1,19
	2	42	60	1,28	100	2,13
	0,5	43	15	0,35	25	0,58
	2	45	60	1,68	100	2,80
	1	48	30	1,09	50	1,81
	1,5	49	45	1,77	75	2,95
	1	50	30	1,28	50	2,13
	0,5	53	15	0,81	25	1,35
	0,5	56	15	1,01	25	1,68
	1	57	30	2,16	50	3,60
	0,5	66	15	1,94	25	3,24
	0,5	67	15	2,06	25	3,44
Numero di cicli termici completi equivalenti C.T. Edison				26,1		43,4
Fattore di sicurezza	1,00	80	30	8,39	50	13,99
Numero di cicli termici completi equivalenti C.T. Edison (compreso fattore di sicurezza)				34,5		57,4



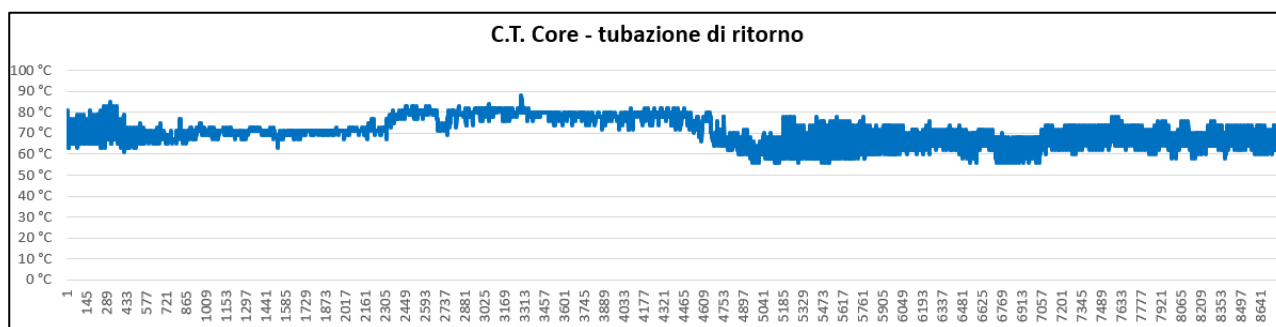
C.T. Pontenuovo - tubazione di mandata						
$\Delta T_{ref} =$		110 °C	Formula Palmgren-Miner			
$m =$		4				
	Numero cicli e ampiezza	ΔT nel periodo	Numero di cicli parziali (30anni)	Numero di cicli completi (30anni)	Numero di cicli parziali (50anni)	Numero di cicli completi (50 anni)
Durante 4344 ore di funzionamento (dal 12/01/2022 al 11/07/2022)	12	1,0	726	0,000005	1.210	0,000008
	243	2,0	14.701	0,002	24.501	0,003
	10	3,0	605	0,0003	1.008	0,0006
	83	4,0	5.021	0,009	8.369	0,015
	2	5,0	121	0,001	202	0,001
	22	6,0	1.331	0,01	2.218	0,02
	3	7,0	181	0,003	302	0,005
	9	8,0	544	0,02	907	0,03
	3	9,0	181	0,01	302	0,01
	6	10,0	363	0,02	605	0,04
	1	11,0	60	0,01	101	0,01
	2,5	12,0	151	0,02	252	0,04
	1	13,0	60	0,01	101	0,02
	1,5	14,0	91	0,02	151	0,04
	0,5	15,0	30	0,01	50	0,02
	1,5	16,0	91	0,04	151	0,1
	0,5	17,0	30	0,02	50	0,0
	0,5	26,0	30	0,1	50	0,2
	0,5	27,0	30	0,1	50	0,2
	0,5	29,0	30	0,1	50	0,2
	0,5	35,0	30	0,3	50	0,5
	0,5	37,0	30	0,4	50	0,6
	0,5	64,0	30	3,5	50	5,8
	0,5	69,0	30	4,7	50	7,8
Numero di cicli termici completi equivalenti C.T. Pontenuovo				9,4		15,7
Fattore di sicurezza	1,00	80	30	8,39	50	13,99
Numero di cicli termici completi equivalenti C.T. Pontenuovo (compreso fattore di sicurezza)				17,8		29,7



C.T. Pontenuovo - tubazione di ritorno						
$\Delta T_{ref} =$		110 °C	Formula Palmgren-Miner			
$m =$		4				
	Numero cicli e ampiezza	ΔT nel periodo	Numero di cicli parziali (30anni)	Numero di cicli completi (30anni)	Numero di cicli parziali (50anni)	Numero di cicli completi (50 anni)
Durante 4344 ore di funzionamento (dal 12/01/2022 al 11/07/2022)	3	1	181	0,0000012	302	0,000002
	48	2	2.904	0,0003	4.840	0,001
	3	3	181	0,0001	302	0,0002
	11	4	665	0,001	1.109	0,002
	1	5	60	0,0003	101	0,0004
	2	6	121	0,001	202	0,002
	3,5	8	212	0,01	353	0,01
	1	9	60	0,003	101	0,005
	1	10	60	0,004	101	0,01
	3	12	181	0,03	302	0,04
	1	13	60	0,01	101	0,02
	1	19	60	0,1	101	0,1
	0,5	21	30	0,04	50	0,1
	1	24	60	0,1	101	0,2
	0,5	26	30	0,1	50	0,2
	0,5	28	30	0,1	50	0,2
	0,5	30	30	0,2	50	0,3
	0,5	31	30	0,2	50	0,3
	1,5	32	91	0,6	151	1,1
	0,5	40	30	0,5	50	0,9
	0,5	53	30	1,6	50	2,7
	0,5	54	30	1,8	50	2,9
Numero di cicli termici completi equivalenti C.T. Pontenuovo				5,4		9,0
Fattore di sicurezza	1,00	80	30	8,39	50	13,99
Numero di cicli termici completi equivalenti C.T. Pontenuovo (compreso fattore di sicurezza)				13,8		23,0



C.T. Core - tubazione di mandata						
$\Delta T_{ref} =$		110 °C	Formula Palmgren-Miner			
$m =$		4				
	Numero cicli e ampiezza	ΔT nel periodo	Numero di cicli parziali (30anni)	Numero di cicli completi (30anni)	Numero di cicli parziali (50anni)	Numero di cicli completi (50 anni)
Durante 1 anno di esercizio (25/03/2020 al 24/03/2021)	132	1	3.960	0,00003	6.600	0,00005
	671	2	20.130	0,002	33.550	0,004
	101	3	3.030	0,002	5.050	0,003
	325	4	9.750	0,02	16.250	0,03
	83	5	2.490	0,01	4.150	0,02
	179	6	5.370	0,05	8.950	0,08
	68	7	2.040	0,03	3.400	0,06
	68	8	2.040	0,06	3.400	0,10
	43	9	1.290	0,06	2.150	0,10
	50	10	1.500	0,10	2.500	0,17
	26,5	11	795	0,08	1.325	0,13
	41,5	12	1.245	0,18	2.075	0,29
	19	13	570	0,11	950	0,19
	26,5	14	795	0,21	1.325	0,35
	18,5	15	555	0,19	925	0,32
	23	16	690	0,31	1.150	0,51
	7,5	17	225	0,13	375	0,21
	17	18	510	0,37	850	0,61
	3,5	19	105	0,09	175	0,16
	15	20	450	0,49	750	0,82
	11	21	330	0,44	550	0,73
	5	22	150	0,24	250	0,40
	11,5	23	345	0,66	575	1,10
	1,5	24	45	0,10	75	0,17
	2	25	60	0,16	100	0,27
	1	26	30	0,09	50	0,16
	3	27	90	0,33	150	0,54
	2	28	60	0,25	100	0,42
	4	29	120	0,58	200	0,97
	2	30	60	0,33	100	0,55
	2	32	60	0,43	100	0,72
	1	33	30	0,24	50	0,41
	2	34	60	0,55	100	0,91
	1	35	30	0,31	50	0,51
	1	36	30	0,34	50	0,57
	2	37	60	0,77	100	1,28
	1,5	39	45	0,71	75	1,19
	1	40	30	0,52	50	0,87
	1,5	41	45	0,87	75	1,45
	1	44	30	0,77	50	1,28
	0,5	45	15	0,42	25	0,70
	0,5	46	15	0,46	25	0,76
	0,5	65	15	1,83	25	3,05
	0,5	66	15	1,94	25	3,24
Numero di cicli termici completi equivalenti C.T. Core				15,8		26,4
Fattore di sicurezza	1,00	80	30	8,39	50	13,99
Numero di cicli termici completi equivalenti C.T. Core (compreso fattore di sicurezza)				24,2		40,4



C.T. Core - tubazione di ritorno						
$\Delta T_{ref} =$		110 °C	Formula Palmgren-Miner			
$m =$		4				
	Numero cicli e ampiezza	ΔT nel periodo	Numero di cicli parziali (30anni)	Numero di cicli completi (30anni)	Numero di cicli parziali (50anni)	Numero di cicli completi (50 anni)
Durante 1 anno di esercizio (25/03/2020 al 24/03/2021)	349,5	2	10.485	0,00115	17.475	0,00191
	122	4	3.660	0,006	6.100	0,011
	49	6	1.470	0,013	2.450	0,022
	31	8	930	0,03	1.550	0,04
	1	9	30	0,001	50	0,002
	46	10	1.380	0,09	2.300	0,16
	61	12	1.830	0,26	3.050	0,43
	33	14	990	0,26	1.650	0,43
	15,5	16	465	0,21	775	0,35
	13,5	18	405	0,29	675	0,48
	6,5	20	195	0,21	325	0,36
	4	22	120	0,19	200	0,32
	0,5	24	15	0,03	25	0,06
	0,5	27	15	0,05	25	0,09
	0,5	32	15	0,11	25	0,18
Numero di cicli termici completi equivalenti C.T. Core				1,8		2,9
Fattore di sicurezza	1,00	90	30	8,39	50	13,99
Numero di cicli termici completi equivalenti C.T. Core (compreso fattore di sicurezza)				10,2		16,9

Si riporta sotto la tabella riepilogativa dei cicli termici completi equivalenti per tubazioni di mandata, di mandata con media ponderata per le Centrali Tecnocity Ansaldo e Vetrobalsamo e di ritorno.

Riepilogo numero di cicli termici completi equivalenti - dorsali principali (rete di trasporto)												
	C.T. Vetrobalsamo Mandata	C.T. Vetrobalsamo Mandata Media ponderata	C.T. Vetrobalsamo Ritorno	C.T. Tecnocity Ansaldo Mandata	C.T. Tecnocity Ansaldo Mandata Media ponderata	C.T. Tecnocity Ansaldo Ritorno	C.T. Edison Mandata	C.T. Edison Ritorno	C.T. Ponte nuovo Mandata	C.T. Ponte nuovo Ritorno	C.T. Core Mandata	C.T. Core Ritorno
Numero cicli termici completi equivalenti su 30 anni	4,9	5,4	21,7	25,2	13,3	17,2	7,2	26,1	9,4	5,4	15,8	1,8
Numero di cicli termici completi equivalenti su 30 anni (compreso fattore di sicurezza)	13,3	13,8	30,1	33,6	21,7	25,6	15,6	34,5	17,8	13,8	24,2	10,2
Numero cicli termici completi equivalenti su 50 anni	8,1	9,0	36,1	42,0	22,2	28,7	12,0	43,4	15,7	9,0	26,4	2,9
Numero di cicli termici completi equivalenti su 50 anni (compreso fattore di sicurezza)	22,1	23,0	50,1	56,0	36,2	42,7	26,0	57,4	29,7	23,0	40,4	16,9

5.2.

5.2. Calcolo numero cicli termici completi equivalenti - rete di distribuzione

Per quanto concerne il numero di cicli delle dorsali secondarie, non disponendo dei tabulati delle temperature, non è stato eseguito alcun calcolo.

Dato che le dorsali secondarie svolgono il ruolo di collegamento e distribuzione di energia termica tra le dorsali principali e le sottocentrali di utenza, le variazioni di temperatura e il numero di cicli termici equivalenti saranno generalmente superiori alle dorsali principali e inferiori alle sottocentrali di utenza.

In base al numero di cicli termici calcolati per le reti di trasporto **si è deciso di ipotizzare** che i cicli termici equivalenti per le reti di distribuzione seguano la proporzione per i cicli minimi indicati dalla Norma UNI EN 13941:2022.

Si riporta sotto la tabella con il riepilogo dei cicli termici completi equivalenti per le due tipologie di tubazioni ottenuti tenendo conto della Centrale Termica con cicli termici completi equivalenti più elevati (i cicli sono arrotondati).

Numero di cicli termici equivalenti calcoli secondo i tabulati delle temperature di esercizio e la Norma UNI EN 13941 con $\Delta T_{ref}=110^{\circ}\text{C}$ e $m=4$				
Tipo di tubazione	30anni (senza fattore di sicurezza)	50anni (senza fattore di sicurezza)	30 anni (compreso fattore di sicurezza)	50 anni (compreso fattore di sicurezza)
Rete di trasporto	27,0	35,0	44,0	58,0
Rete di distribuzione	68,0	88,0	110,0	145,0

6.

6. Verifica a fatica a titolo di esempio

A titolo di esempio e con l'ausilio del programma di calcolo sisKMR è stato verificato a fatica uno stacco di derivazione con lo stesso numero di cicli e a temperature di progetto diverse: la prima a 130°C secondo le specifiche tecniche di progettazione fornite da A2A Calore & Servizi e la seconda a 120°C come si evince dai tabulati delle temperature di esercizio.

Dal confronto dei due casi si nota che lo sforzo di riferimento calcolato (SV) a 120°C è inferiore a quello calcolato alla temperatura di progetto di 130°C. Lo sforzo di riferimento (sforzo ammissibile SVzul) ottenuto dal grafico SN resta costante in quanto il numero di cicli termici completi equivalenti non cambia.

Ciò comporta un abbassamento dell'utilizzazione in termini percentuali degli accessori preisolati; nell'esempio trattato l'accessorio osservato è un Tee di derivazione.

Temperatura di progetto 130°C e 250 cicli termici completi equivalenti

REnergies srl		09.09.2022 08:49:11		Progetto: Verifica a fatica 130°C		2			
Risultati tee									
TTnn	- Valori nello stacco (nn - numero tee)	Typ	- 1=saldato; 2=rinforzato; 3=forgiato; 4=estruso;						
TGnn	- Valori nel tubo principale (nn - numero tee)		- 5=estruso sp. maggiorato; 6=saldato FEM						
SIG(L)	- Prova	h	- Spessore piastra rinforzo (solo tipo 2)						
BT	- Vincolo terreno/contorno	SV	- sforzo di riferimento calcolato (stacco e tubo principale) in MPa						
DN	- Diametro nominale DN	SVzul	- sforzo ammissibile [MPa]						
s	- Spessore	Util	- Utilizzo in %						
- Fattore di deformazione per lo stacco in corrispondenza del TEE secondo la norma selezionata									
TStck	DN	SIG(L)	BT	s	Typ	h	SV	SVzul	Util
TT01	100	B1	3	9,0	1	-	545,6	782,4	70
TG01	300	B1	3	5,6	1	-			

Temperatura di progetto 120°C e 250 cicli termici completi equivalenti

REnergies srl		09.09.2022 08:46:58		Progetto: Verifica a fatica 120°C		2			
Risultati tee									
TTnn	- Valori nello staco (nn - numero tee)	Typ	- 1=saldato; 2=rinforzato; 3=forgiato; 4=estruso;						
TGnn	- Valori nel tubo principale (nn - numero tee)		- 5=estruso sp. maggiorato; 6=saldato FEM						
SIG(L)	- Prova	h	- Spessore piastra rinforzo (solo tipo 2)						
BT	- Vincolo terreno/contorno	SV	- sforzo di riferimento calcolato (stacco e tubo principale) in MPa						
DN	- Diametro nominale DN	SVzul	- sforzo ammissibile [MPa]						
s	- Spessore	Util	- Utilizzo in %						
- Fattore di deformazione per lo stacco in corrispondenza del TEE secondo la norma selezionata									
TStck	DN	SIG(L)	BT	s	Typ	h	SV	SVzul	Util
TT01	100	B1	3	9,0	1	-	495,7	782,4	63
TG01	300	B1	3	5,6	1	-			

Conclusioni

Dai calcoli eseguiti sulla base dei dati forniti (temperature) per le Centrali Termiche, ed in base alla Norma UNI EN253:2016, la vita termica utile della rete di Sesto San Giovanni risulta superiore a 50 anni.

Per quanto concerne il calcolo dei cicli termici completi equivalenti determinati per le diverse tipologie di rete, questi risultano inferiori ai minimi indicati nella Norma UNI EN13941:2022 per i rispettivi anni di funzionamento.

Un analogo studio effettuato da Jooyong Kim, ricercatore presso la Korea District Heating Corporation (Korea) e Ingo Weidlich, ricercatore presso la HafenCity University (Germania), e pubblicato nella rivista scientifica ScienceDirect (2017) [4], propone un calcolo dei cicli termici completi equivalenti riferito ad alcune reti di teleriscaldamento esistenti, mostrando come ci si possa attendere un numero di cicli inferiore a quelli indicati dalla norma, discostandosi dai dati indicati in letteratura.

Inoltre, i due ricercatori, portano in evidenza uno studio effettuato dall'Associazione Tedesca per il Teleriscaldamento (AGFW) nel 2011, che mostra che una vita utile media di circa 50 anni può essere ottenuta per sistemi di tubazioni preisolate; un valore di circa 20 anni superiore a quello stimato alla fine degli anni 90.

Sulla base, inoltre, dell'esempio di verifica a fatica condotto su un Tee di derivazione, si può apprezzare il miglioramento in termini di utilizzazione percentuale ottenuto effettuando la verifica con una temperatura di 120°C rispetto ai 130°C di progetto, a parità di numero di cicli termici completi equivalenti.

In relazione agli aspetti presi in esame, l'assunzione di una vita utile della rete di Sesto San Giovanni pari a 50 anni si può ritenere quindi ragionevole ed affidabile.

Bibliografia

- [1] UNI EN13941:2022, "Tubazioni per teleriscaldamento - Progettazione ed installazione di tubazioni preisolate, singole o doppie, per reti di acqua calda interrate direttamente - Parte 1: Progettazione", UNI/CT700, UNI/CT 700/SC 30, UNI/CT 700/SC 30/GL 14
- [2] UNI EN253:2016, "Tubi per teleriscaldamento - Sistemi bloccati monotubo per reti di acqua calda interrate direttamente - Produzione di tubi di servizio in acciaio, isolamento termico in poliuretano e guaina esterna in polietilene", UNI/CT 700, UNI/CT 700/SC 30, UNI/CT 700/SC 30/GL 14
- [3] UNI EN253:2019, "Tubi per teleriscaldamento - Sistemi bloccati monotubo per reti di acqua calda interrate direttamente - Produzione di tubi di servizio in acciaio, isolamento termico in poliuretano e guaina esterna in polietilene", UNI/CT 700, UNI/CT 700/SC 30, UNI/CT 700/SC 30/GL 14
- [4] Jooyong Kim, Ingo Weidlich "Identification of Individual District Heating Network Conditions using Equivalent Full Load Cycles", The 15th International Symposium on District Heating and Cooling, ScienceDirect Energy Procedia 116 (2017) 343-350