

POLITECNICO DI TORINO

**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA
MECCANICA E AEROSPAZIALE**



Tesi di Laurea Magistrale

**“Ottimizzazione delle prestazioni delle pompe
di calore con metodi di inferenza Bayesiana”**

**“Performance optimization of heat pumps
with Bayesian inference methods”**

Relatore

Prof. Marco Carlo Masoero

Correlatori

Ing. Gianfranco Pellegrini

Dott. Angelo D’Ambrosio

Candidato

Luca De Marco

Matr.279103

Anno Accademico 2021 – 2022

INDICE

Abstract (italiano)	4
Abstract (inglese)	5
CAPITOLO 1	7
1. Introduzione	7
1.1 Evoluzione climatica.....	7
1.2 Riscaldamento globale diretto e indiretto.....	9
1.3 Effetti sulla salute umana.....	11
1.4 Riduzione delle emissioni: metodi e importanza.....	13
1.5 L'impegno dell'azienda Teon.....	15
1.6 Fattore economico.....	16
1.7 Modalità di analisi e metodo scientifico.....	20
1.8 Analisi degli strumenti utilizzati.....	23
1.8.1 Dispositivi di misura.....	23
1.8.2 Dispositivi di comando.....	24
CAPITOLO 2	27
2. Curva climatica	27
2.1 Introduzione.....	27
2.2 Analisi del funzionamento della macchina.....	28
2.3 Formula e curva climatica.....	30
2.3.1 Parametri presenti nella CLIMATICA.....	31
2.3.2 Implementazione della formula Climatica.....	33
2.3.3 Risultati applicati alla macchina in esame.....	39
2.4 Analisi dei COP.....	41
2.4.1 Analisi nelle condizioni di funzionamento.....	42
2.4.2 Analisi nelle condizioni determinate dalla Climatica lineare.....	44
2.4.3 Analisi nelle condizioni determinate dalla Climatica esponenziale.....	47
2.4.4 Confronto finale e risultati ottenuti.....	49
CAPITOLO 3	52
3. Regolazione PID	52
3.1 Sistema di regolazione.....	52
3.2 Obiettivi di un sistema di regolazione.....	53
3.3 Dai sistemi ON – OFF ai sistemi di regolazione PID.....	55
3.4 Algoritmo PID.....	55
3.5 Azione proporzionale.....	57
3.6 Azione integrale.....	59

3.7 Azione derivativa.....	60
3.8 Peso sul set point	62
3.9 Formulazione a due gradi di libertà	63
3.10 Tecniche di taratura	65
3.10.1 Metodo di Haalman	67
3.10.2 Tecniche CHR	68
3.11 Tecniche di ottimizzazione.....	69
3.12 Valvola a due vie	73
3.13 Parametri di controllo del surriscaldamento	73
3.14 Taratura dei parametri.....	76
3.14.1 Prova 1	76
3.14.2 Prova 2	78
3.14.3 Prova 3	78
3.14.4 Prova 4	79
3.14.5 Prova 5	80
3.14.6 Prova 6	81
3.14.7 Prova 7	82
3.14.8 Prova 8	83
3.14.9 Prova 9	84
3.14.10 Prova 10	85
3.14.11 Prova 11	86
3.14.12 Prova 12	87
3.14.13 Prova 13	88
3.14.14 Prova 14	89
3.14.15 Prova 15	90
3.14.16 Prova 16	91
3.15 Scelta dei parametri di taratura	92
3.16 Verifica dei parametri di taratura	94
CAPITOLO 4.....	103
4. Determinazione della durata ottimale dei cicli ON della pompa di calore	103
4.1 Introduzione.....	103
4.1.1 Approccio bayesiano.....	105
4.2 Analisi dei cicli ON della Tina 115	109
4.2.1 Considerazioni iniziali.....	109
4.2.2 Metodo proposto.....	111
4.2.3 Risultati ottenuti	112

4.2.4 Considerazioni finali.....	114
4.3 Ottimizzazione Bayesiana	116
4.3.1 Basi teoriche sull'ottimizzazione numerica.....	116
4.3.2 Principi di analisi Bayesiana	118
4.4. Implementazione generale del modello di ottimizzazione.....	121
4.4.1 Simulatore della pompa di calore	121
4.4.2 Scelta del modello surrogato	124
4.4.3 Funzione di acquisizione	127
4.4.4 Implementazione grafica	128
4.4.5 Software impiegato.....	129
4.5 Risultati	129
4.5.1 Distribuzione dei candidate inputs	130
4.5.2 Evoluzione della response surface	130
4.5.3 Valutazione della COP/min	131
Capitolo 5	133
5. Conclusione	133
5.1 Sviluppi futuri.....	133
Ringraziamenti	135
BIBLIOGRAFIA	137

Abstract (italiano)

Questa tesi focalizza l'attenzione sul miglioramento dell'efficienza delle pompe di calore (di seguito PdC) in termini di SCOP (Seasonal Coefficient of Performance) al fine di ridurre le emissioni clima-alteranti e di ottenere un risparmio economico all'utente. Lo SCOP permette di valutare le prestazioni della PdC nell'intera stagione di riscaldamento. Il riscaldamento è la prima causa di inquinamento urbano e pertanto, con l'impiego di fonti naturali pulite, come acqua, terra, aria e con l'utilizzo di refrigeranti naturali più performanti e con bassi GWP (Global Warming Potential), si riesce a ridurre drasticamente l'entità di emissioni inquinanti in atmosfera. Migliorare lo SCOP della pompa di calore significa inoltre risparmiare sulla bolletta dell'elettricità.

Per il miglioramento delle prestazioni delle PdC sono stati individuati tre campi di intervento. Inizialmente si è implementato un algoritmo che permette di determinare una formula detta "Climatica" (in analogia a quella utilizzata con le caldaie), con cui si calcola la temperatura di set point della PdC in funzione della temperatura esterna, delle prestazioni del radiatore alle varie temperature di funzionamento e della zona climatica interessata. L'analisi ha evidenziato che l'inseguimento della curva "climatica" così costruita consente un miglioramento dello SCOP pari al 17,6%.

È stato inoltre sviluppato un secondo algoritmo che permette di modificare dinamicamente i parametri di regolazione PID della valvola di laminazione. In particolare, si è analizzato come tale regolazione influenzi anch'essa le prestazioni della PdC. In particolare, l'obiettivo di tale analisi è stato quello di ottimizzare i tempi di raggiungimento del grado di surriscaldamento ossia, arrivare al valore target nel minor tempo possibile e rimanerci stabilmente per l'intero ciclo ON della PdC. Inizialmente, previa individuazione dei parametri ottimali di regolazione k_p , T_i , T_d e attraverso un'analisi sperimentale, dei valori storici di surriscaldamento (per ogni ciclo ON della PdC) ricavati dal database attraverso l'utilizzo del programma "Studio 3T" [®], si è implementato un algoritmo che permette di ricavare dinamicamente per ogni PdC il set di parametri ottimali per la regolazione.

Infine, si è implementato un terzo algoritmo che permette di ricavare la durata ottimale di un ciclo ON della PdC al variare delle condizioni operative. Per ogni ciclo ON, a parità di energia elettrica assorbita dalla PdC, il COP migliora all'aumentare dell'energia termica prodotta; l'energia termica prodotta è a sua volta proporzionale all'area compresa fra le curve relative a temperatura di mandata e di ritorno dell'impianto (ΔT); schematizzando un ciclo ON, esso è costituito da un'area iniziale simil-triangolare che rappresenta il transitorio (in cui ΔT passa da zero a ΔT_{\max}) seguita da un'area simil-trapezoidale in cui il ΔT rimane massimo. L'idea è stata quella di incrementare quest'ultima area a parità di transitorio. Dapprima è stata fatta un'analisi dei dati sperimentali, a cui è seguita una simulazione di tali incrementi. È risultato che con basse temperature di mandata tali incrementi potevano essere maggiori che con temperature più elevate. Pertanto, si è sviluppato un algoritmo in linguaggio di programmazione R[®] che consente di determinare la durata ottimale del ciclo ON della PdC al variare delle condizioni operative. Si è così ottenuto un miglioramento del COP medio compreso fra il 25% e il 50%.

Abstract (inglese)

This thesis focuses on the improvement of heat pumps' efficiency (Pdc) in terms of SCOP (Seasonal Coefficient of Performance), in order to reduce climate-altering emissions and to obtain economic savings for the user. The SCOP allows to evaluate the PdC performances throughout the entire heating season. Heating, by the way, is the main cause of urban pollution, so with the usage of natural sources such as water, ground, air and high-performance natural refrigerants with low GWP (Global Warming Potential), it is possible to drastically reduce the amount of polluting emissions into the atmosphere. Improving the SCOP of the heat pump also means saving on the electricity bill.

For the improvement of the performance of PdCs has been identified three fields on which is possible to act.

Initially, an algorithm capable of determining the so called “climatic formula” (in analogy with the one used for the boilers) has been implemented. Such algorithm calculates the setup point of the Pdc as a function of the external temperature, radiator’s performance working in different operative temperatures, and climatic zone of interest. The analysis showed that the pursuit of the "climatic" curve thus constructed allows an improvement in the SCOP equal to 17.6%.

A second algorithm allows to modify dynamically the PID parameters that regulate the behavior of the throttling valve. In particular has been analyzed how this regulation influences the performance of the PdC. The objective of this analyses was to optimize the time for reaching the degree of overheating, i.e. to reach the target value as soon as possible and keep it stable for the entire ON cycle of the PdC.

Once defined the optimal parameters for the regulation, namely k_p , T_i , T_d , an experimental analyses has been carried out to identify “storical” values of overheating working conditions (for each ON cycles of the PdC) from the database through the use of the software “Studio 3T”[®]. Thanks to these data, it has been possible to implement an algorithm that allowed to calculate for each PdC, the optimal set of parameters for the regulation.

In the end, a third algorithm capable to calculate the optimal working time of the ON cycle of a PdC when operative conditions change, has been implemented.

For each ON cycle, considering the same electric energy absorbed from the PdC, the COP gets better as the produced thermal energy increases; this thermal energy is then proportional to the area in between the curves of suction and discharge temperature of the plant (ΔT); schematizing an ON cycle this is constituted by an initial triangular area that represents the transient (in which ΔT passes from zero to ΔT_{max}), followed by a trapezoidal area in wich ΔT maintains the maximum value. The key idea is to increase this last portion maintaining the same transient. First of all an analysis on the experimental data has been carried out, followed by a simulation of these increments. The results have shown that with lower discharge temperatures these increments are bigger with respect

working conditions with higher discharge temperatures. In this way, has been implemented an algorithm in R[®] language, that allows to determine the optimal working time of the ON cycle of the PdC varying its operative conditions. In the end it has been obtained an increment, in terms of performances, of the average COP in between 25% and 50%.

CAPITOLO 1

1.Introduzione

1.1 Evoluzione climatica

Fino a pochi anni, le previsioni climatiche del Pianeta fatte attraverso modelli matematici erano considerate sufficientemente attendibili, mentre oggi, l'esperienza diretta, ci fa vedere come fenomeni climatici sempre più estremi, frequenti e devastanti siano di fatto diventati imprevedibili. Gli ultimi cinque anni sono stati i più caldi della storia ed in particolare, il decennio 2010-2019 è stato il più caldo da quando esistono registrazioni attendibili e regolari della temperatura. Partendo dai dati raccolti dagli anni Ottanta ad oggi, si riscontra che ogni decennio è stato più caldo di tutti i precedenti. Osservando la frequenza e l'intensità degli eventi climatici, i cambiamenti nei comportamenti, nelle abitudini migratorie e riproduttive di molte specie animali e vegetali, appare evidente come il problema del cambiamento climatico debba essere inderogabilmente un tema di discussione presente in ogni congresso scientifico o politico.

La comunità scientifica è ormai unanime nell'indicare le attività umane quali principali responsabili della crisi climatica, affermando come l'indicatore primario di tale modificazione apportata dall'uomo sia l'aumento costantemente crescente dei gas serra immessi nell'atmosfera. La concentrazione di tali gas ha raggiunto livelli ormai non più sostenibili: rispetto ai livelli preindustriali l'anidride carbonica è aumentata del 147%, il metano del 259% e il protossido di azoto del

123%. La concentrazione di CO₂ in atmosfera viene attualmente stimata, in media, pari a 413 parti per milione: una concentrazione che, presumibilmente, non era presente da almeno 650 mila anni. Con tali valori percentuali di gas serra presenti in atmosfera l'effetto di "riscaldamento globale" del pianeta è di fatto inevitabile.

Come noto, la generazione di tali gas è da ricondurre principalmente alle emissioni in atmosfera generate da energia proveniente da fonte fossile – fonte fossile che - oltre a produrre un aumento dell'effetto serra, allo stesso tempo incrementa in modo diretto l'energia termica globale trasmessa in atmosfera; una sensibile quota parte di detta fonte fossile è utilizzata per il riscaldamento degli edifici.

1.2 Riscaldamento globale diretto e indiretto

Se l'intervento umano non genera alterazioni dell'equilibrio termico e della concentrazione atmosferica, il calore geotermico naturale che fluisce dall'interno della terra verso l'atmosfera è compensato da quello che fuoriesce dall'atmosfera verso gli spazi siderali e da quello che entra in atmosfera sottoforma di radiazione in cotale modo da mantenere costante la temperatura media atmosferica negli anni.

Per Riscaldamento globale si intende l'effetto dell'innalzamento della temperatura media atmosferica della superficie terrestre registrato su scala globale negli ultimi cento anni.

Le cause del riscaldamento globale vengono strutturalmente distinte in dirette e indirette:

- riscaldamento "indiretto": si tratta delle emissioni di gas in atmosfera che, incrementando l'effetto serra, contribuiscono in modo indiretto a riscaldare il pianeta;

- riscaldamento “diretto”: sono tutte quelle reazioni esotermiche sia di natura chimica che di natura nucleare che immettono energia termica in atmosfera riscaldando il pianeta in modo diretto. Tale energia, prima di essere emessa, è “conservata” sotto forma di legami chimici o nucleari. Ogni volta che avviene una reazione (chimica o nucleare) viene immesso calore in atmosfera. La combustione, le reazioni di fissione e di fusione nucleare sono esempi di reazioni esotermiche.

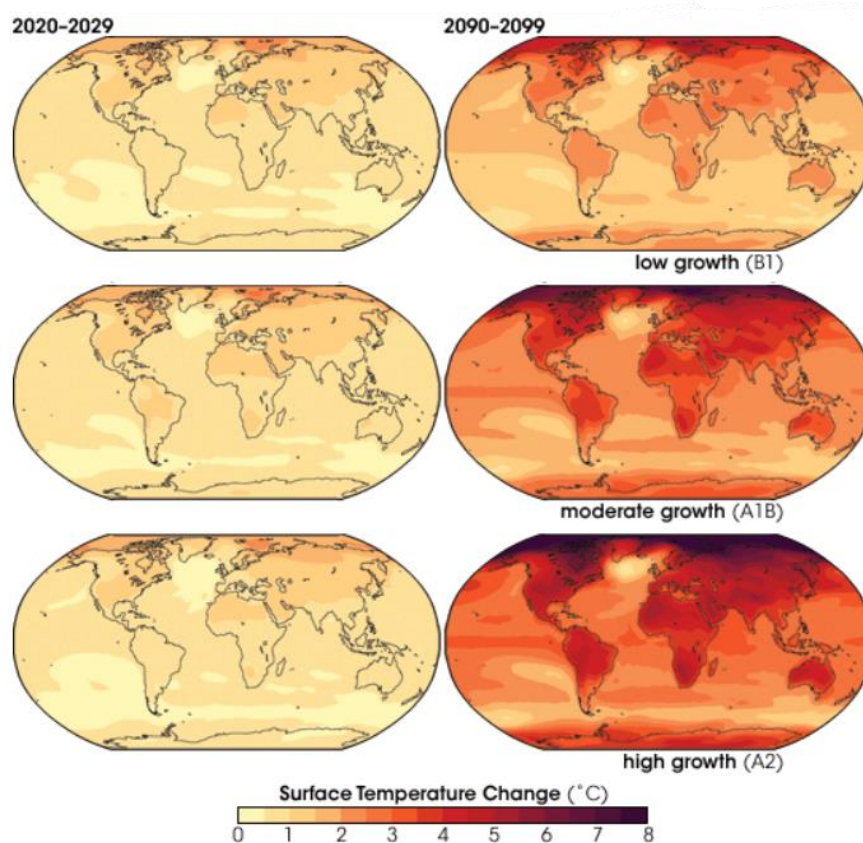


Figura 1.1: riscaldamento globale previsto nei prossimi anni.

Da ciò si evince che, per contrastare il fenomeno del riscaldamento globale occorre ridurre le emissioni in atmosfera ed evitare l’incremento diretto dell’energia termica del globo terrestre: ebbene, per il termico da riscaldamento è possibile ottenere questo duplice risultato.

1.3 Effetti sulla salute umana

Oltre agli effetti sul riscaldamento globale, le emissioni da combustione fossile, sono nocive e costituiscono le principali cause di malattie cardio-circolatorie e cancerogene. Gli studi epidemiologici presentano due approcci principali:

- effetti a breve termine: osservabili a pochi giorni di distanza dai picchi di esposizione;
- effetti a lungo termine: osservabili dopo esposizioni di lunga durata e a distanza di tempo (anni).

Gli effetti a breve termine vengono generalmente valutati osservando le fluttuazioni dello stato di salute della popolazione sia con co-morbilità¹ che senza, durante i “picchi” di inquinamento: in questo frangente si assiste ad un aumento della mortalità per cause cardiache e respiratorie.

Gli effetti a lungo termine vengono invece studiati attraverso studi di coorte²: osservando lo stato di salute di soggetti che vivono in contesti diversi, si valutano a livello individuale alcuni fattori di rischio che possono essere “confondenti” rispetto agli inquinanti atmosferici, come il fumo di tabacco e l’esposizione lavorativa; i soggetti arruolati vengono poi seguiti nel tempo e viene valutata la mortalità e la morbosità in relazione alla diversa esposizione ambientale.

Il particolato atmosferico è ritenuto ad oggi l’indicatore che più coerentemente si associa con gli esiti sulla salute, specialmente quando è misurato in termini di particelle inalabili (PM10) o respirabili (PM2,5); sempre più rilevanza assume il monitoraggio del particolato ultrafine (PM0,1).

¹ Il concetto di comorbilità o comorbidità in ambito sanitario indica la coesistenza di più patologie diverse in uno stesso individuo. Il termine può riferirsi a due o più patologie che coesistono simultaneamente, ma indipendentemente l’una dall’altra, oppure riferirsi a patologie che compaiono secondariamente all’insorgenza di una patologia di fondo.

² Uno studio di coorte è un disegno di studio non sperimentale ma osservazionale che per un periodo di tempo di anni segue un gruppo di individui selezionati sulla base di determinate caratteristiche (coorte).

L'indicatore maggiormente utilizzato negli ultimi anni è stato il PM2,5, corrispondente alle particelle di diametro aerodinamico medio pari a 2,5 micron o inferiori.

Nel complesso, a carico della mortalità naturale, le stime di rischio disponibili riportano, per ogni incremento di $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ della concentrazione di PM2,5 a breve termine, un aumento della mortalità compreso tra 0,3% - 0,5% (nel giro di pochi giorni successivi ad incrementi di breve durata) e a lungo termine un aumento del 6% - 7% (nell'arco di 10-15 anni in presenza di incrementi di lunga durata). Per quanto riguarda le stime di impatto su scala nazionale, nel nostro Paese il 7% circa di tutte le morti per cause naturali è stato imputato all'inquinamento atmosferico. Tra le cause di morte in eccesso rientrano parte delle patologie cardiovascolari, respiratorie e tumorali, in primis il tumore del polmone. A rafforzare la cancerogenicità vi sono considerazioni in relazione alla presenza di molti cancerogeni nel particolato, con il polmone come organo bersaglio: gli IPA, ma anche i metalli pesanti, quali cromo, arsenico, nichel, e le fibre di amianto. Evidenze epidemiologiche robuste indicano quindi effetti dannosi per l'apparato respiratorio dovuti ad esposizione ad inquinanti atmosferici, anche per valori ambientali inferiori a quelli consentiti dagli standard internazionali.

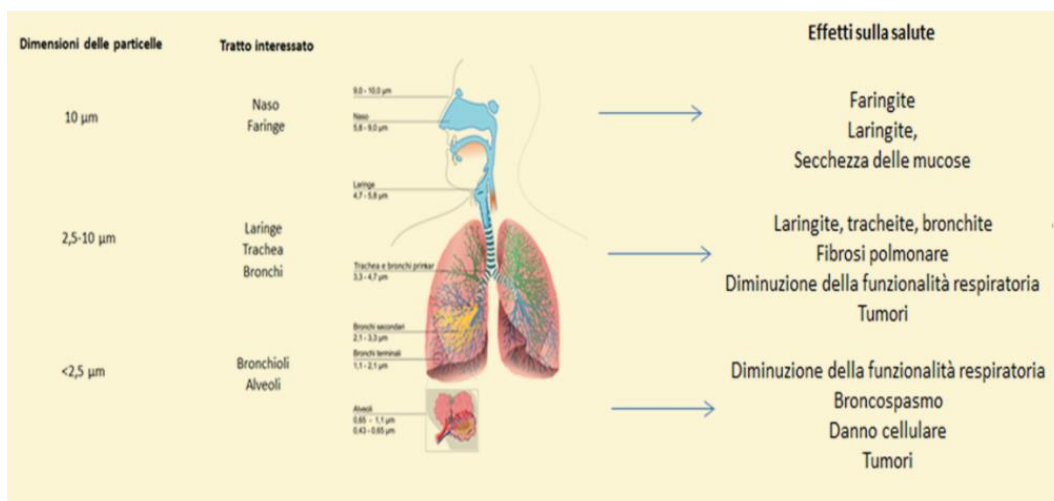


Figura 1.2: effetti del particolato sulla salute umana. [Università di Modena]

1.4 Riduzione delle emissioni: metodi e importanza.

Nonostante la somma di tutte le superfici destinate ad area urbana presenti sul pianeta arrivi a coprire appena il 2,6% dell'intera superficie terrestre, in tali superfici viene prodotto il 70% di tutte le emissioni in atmosfera. Ecco perché, per incidere efficacemente sulla riduzione delle emissioni clima-alternanti occorre agire in primis e soprattutto nelle aree urbane. Il territorio europeo non fa eccezione e, in particolare, la Pianura Padana risulta il luogo più inquinato d'Europa. In tutte le aree urbane del centro-nord d'Italia, ben il 62% delle emissioni clima-alteranti in atmosfera sono da imputare al riscaldamento degli edifici e questa percentuale è tutt'oggi in crescita soprattutto per via del fatto che l'inquinamento da trasporti si sta progressivamente riducendo. Da tale constatazione si deduce che, per incidere adeguatamente e più velocemente sulla riduzione delle emissioni nocive in atmosfera, conviene ridurre soprattutto sulle emissioni da riscaldamento.

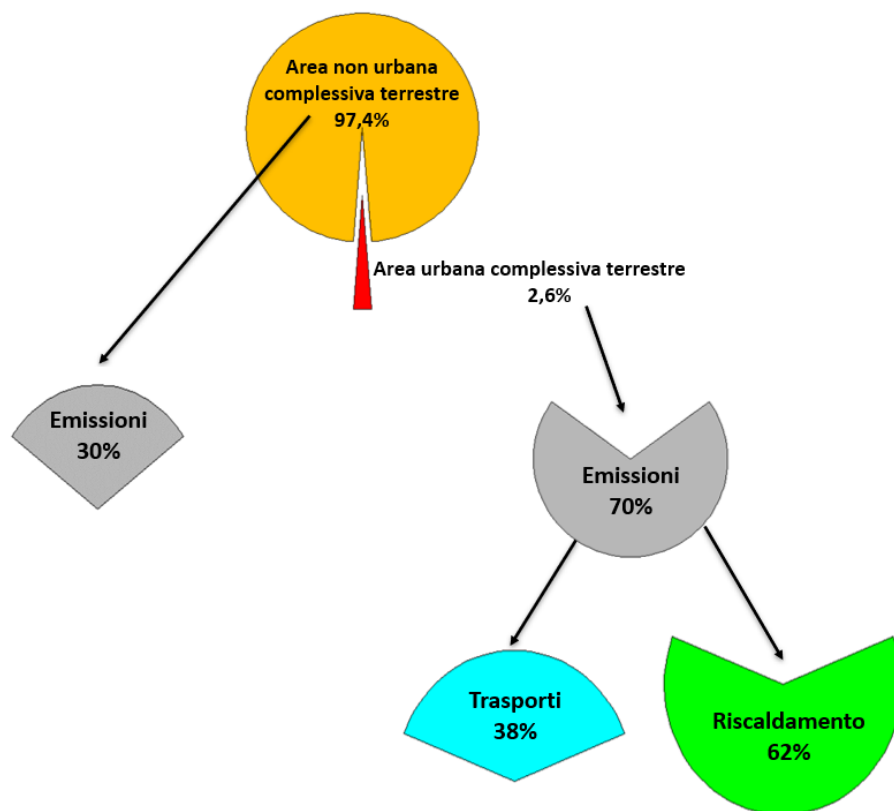


Figura 1.3: cause delle emissioni clima-alternanti globali.

La domanda pressante che tutti ci poniamo è: come salvaguardare il nostro Pianeta?

Sicuramente per avere un impatto decisivo sui fenomeni sopra citati non è sufficiente un intervento di tipo individuale; è necessario che l'economia, la politica e la società progettino piani di contenimento del cambiamento climatico che possano essere collettivi e incisivi. Sotto questo aspetto molte aziende stanno facendo scelte sociali importanti, riducendo le emissioni prodotte, così come molti enti sovranazionali si sono mossi per definire alcune importanti linee guida per il futuro.

Si parla sempre più spesso di Green Economy: una sfida che unisce le persone al profitto economico e che si basa sul concetto di sviluppo sostenibile finalizzato a generare valore per le imprese e per i consumatori.

La mia generazione, più di tutte, ha scoperto e concretamente fatto proprio. Il concetto che il nostro "benessere" è strettamente collegato a quello ambientale. Oggigiorno si ha la consapevolezza di come un'economia degenerativa, basata sullo sfruttamento incondizionato delle risorse, non possa essere più immaginata.

Le tematiche principali della Green Economy partono dai processi lavorativi delle aziende per arrivare alle abitudini dei singoli consumatori.

I punti cardine della Green Economy sono:

- il risparmio energetico: attraverso un miglioramento dell'efficienza si ha un risparmio energetico, che consente di diminuire l'impatto ambientale;
- i processi aziendali: attraverso il controllo razionale dei processi produttivi, la gestione degli scarti e delle emissioni si ottengono significative riduzioni di impatto sull'ambiente;
- i rifiuti e il riciclo: la definizione dei "cicli di vita" fin dalle materie prime porta a generare un controllo sui rifiuti prodotti e una corretta gestione dei processi di riciclaggio;
- la riduzione delle emissioni: cioè l'attenzione ai processi produttivi e di distribuzione delle merci attraverso il continuo aggiornamento tecnologico degli impianti di produzione e di trasporto.

1.5 L'impegno dell'azienda Teon

Oggi risulta necessario considerare l'ambiente come un protagonista attivo della nostra economia e non solo come un bacino di risorse da cui prelevare illimitatamente. Pertanto, l'unico sistema economico che sembra mantenere una validità è quello dello sviluppo sostenibile: una crescita economica che tenga conto di quanto l'elemento sfruttato possa sostenere lo sfruttamento stesso, ossia una crescita economica che preservi le risorse alla base della produzione per essere sostenibile nel tempo. In tale ottica rientra l'azienda Teon, una nuova realtà aziendale che sviluppa, produce e commercializza soluzioni innovative per il riscaldamento ed il raffrescamento senza emissioni di edifici di grande volumetria. In Teon è stata ideata TINA, la pompa di calore ad alta temperatura e alta efficienza energetica, insignita di una serie di riconoscimenti:

- lo "Smart Future Grid Award", conferito da Smart alle realtà che operano per migliorare la qualità e la vivibilità delle città europee;
- il "Premio nazionale Innovazione Amica dell'ambiente – Legambiente", conferito da Legambiente nel 2017 all'innovazione d'impresa in campo ambientale;
- alle "Symbola", per l'alto grado di innovazione e sostenibilità. La fondazione, che da anni racconta le realtà italiane che si distinguono per bellezza, sostenibilità e innovazione, ha inserito Tina nel rapporto "100 italian stories for future building".
- La rete di canali newyorkese Bloomberg Television ha recentemente realizzato un servizio che ha trasmesso in tutti i suoi canali internazionali satellitari e via cavo in cui ha descritto le quindici realtà italiane più innovative: fra queste c'è TEON.
- Il libro appena uscito di Alessandro Gassmann "Io e i #Green Heros" al paragrafo "Il tepore della terra, dell'aria e dell'acqua", cita proprio TEON come protagonista della rivoluzione energetica e ambientale.

Come descritto in precedenza, il riscaldamento è la prima causa d'inquinamento, ben al di sopra di traffico, industria e generazione elettrica. Per azzerare le

emissioni inquinanti dei nostri sistemi di riscaldamento TEON agisce sia attraverso l'impiego di fonti naturali pulite, come acqua, terra, aria, sia attraverso l'utilizzo di refrigeranti naturali, più performanti e a impatto serra zero. In particolare, TEON utilizza come refrigerante l'R600a (isobutano), che presenta un GWP (Global Warming Potential) pari a 3. Il GWP rappresenta il potenziale di riscaldamento, ovvero il contributo all'effetto serra e al riscaldamento globale. Il GWP è misurato relativamente all'effetto della CO₂, il cui potenziale di riferimento è pari a 1. Ecco perché, se parliamo di GWP, parliamo anche di CO₂. Il valore GWP di un gas indica il potenziale del gas a contribuire al riscaldamento globale rispetto al biossido di carbonio (CO₂). Un GWP pari a 3 come quello dell'R600a significa che ogni kg di questo refrigerante, se immesso nell'atmosfera, contribuisce al riscaldamento globale come 3 kg di anidride carbonica.

Quasi tutte le pompe di calore oggi nel loro processo di riscaldamento o raffrescamento della risorsa utilizzano i gas fluorurati, detti F-Gas, hanno valori di GWP molto elevati (alcuni refrigeranti superano anche GWP = 4.000) e sono dunque molto dannosi per l'ambiente per il loro rilevantissimo impatto sull'effetto serra.

1.6 Fattore economico

Oltre agli aspetti relativi a salute, ambiente ed energia, è di primaria importanza anche il risparmio economico che ottenibile con l'utilizzo di queste pompe di calore ad alta temperatura. Tina, essendo in grado di raggiungere temperature anche superiori a 80°C, a differenza delle pompe di calore tradizionali che generalmente lavorano a temperature comprese fra 45°C e 50°C. Grazie a ciò mentre le normali pompe di calore richiedono l'installazione del riscaldamento a bassa temperatura, Tina si adatta a tutti gli impianti tradizionali come ad esempio quelli a radiatori. Questo è uno dei principali vantaggi offerti da una pompa di calore ad alta temperatura: si evita di ristrutturare l'impianto della propria casa, in quanto Tina è in grado di produrre potenza termica a elevate temperature compatibili con i terminali in ambiente esistenti. Questo vantaggio è assai rilevante in quanto ben il 95% di tutti gli impianti di riscaldamento è costituito da sistemi ad alta temperatura.

Un aspetto negativo delle pompe di calore è la minor resa al crescere del salto di temperatura da operare fra sorgente fredda (aria, terra, acqua) e sorgente più calda (impianto di riscaldamento), dunque le pompe di calore utilizzate per alimentare gli impianti ad alta temperatura rendono meno di quanto renderebbero se operassero su impianti a bassa temperatura. A parità di condizioni al contorno, la soluzione energeticamente più premiante è dunque quella di sostituire gli impianti esistenti con sistemi a bassa temperatura; purtroppo, nella maggior parte dei casi è complicato far traslocare le persone per il tempo occorrente a smantellare i pavimenti di casa, installare i pannelli radianti e ricostruire i nuovi pavimenti.

Una concreta alternativa consiste nell'utilizzo di pompe di calore ad alta temperatura in grado di alimentare gli impianti di riscaldamento ad alta temperatura esistenti, evitando così invasive, fastidiose e costose ristrutturazioni impiantistiche. Infatti, le pompe di calore ad alta temperatura di ultima generazione riescono a raggiungere livelli di efficienza tali da consentire di dimezzare la bolletta energetica anche lavorando ad alta temperatura.

Il miglioramento dell'efficienza - obiettivo di questa tesi - è strettamente correlato al risparmio economico da garantire all'utente finale.

In ingegneria l'efficienza di un sistema fisico è la sua capacità di ottenere lo stesso risultato consumando una quantità minore di energia rispetto ad un sistema meno efficiente, aumentando quindi il rendimento e diminuendo i costi. Se si ha una casa più efficiente, si constata immediatamente un risparmio energetico.

Pertanto, il miglioramento dell'efficienza della casa o di un'azienda presenta diversi benefici:

- rispetto per l'ambiente: se la casa consuma di meno, vi sarà un minore impatto ambientale;
- valore dell'immobile: la valutazione economica di un edificio tiene in considerazione anche l'efficienza energetica dello stesso;
- risparmio economico: un edificio più efficiente riduce i costi energetici.

Investire nel miglioramento dell'efficienza energetica può, quindi, assicurare dei vantaggi sia nel breve che nel lungo periodo. Nel breve periodo si risparmia grazie al risparmio in bolletta. Nel lungo periodo, invece, si avrà un aumento del valore di mercato dell'immobile.

L'efficienza di una pompa di calore, o meglio la sua resa, è espressa dal COP, detto Coefficient of Performance, dato dal rapporto tra l'energia termica fornita (ossia il calore termico ceduto) e l'energia elettrica consumata. Un valore del COP pari a 4 indica che per ogni kWh_e di energia elettrica consumata, la pompa di calore fornisce calore pari a 4 kWh_t. La pompa di calore ha un Coefficiente di Prestazione tanto più elevato quanto più bassa è la differenza di temperatura tra sorgente e fluido da riscaldare.

Dal 1° gennaio 2013 è stata introdotta una nuova grandezza, che esprime le prestazioni della pompa di calore, l'efficienza stagionale, ossia SCOP (Seasonal Coefficient of Performance). Questo coefficiente valuta in che modo lavora la pompa di calore durante tutta la stagione di riscaldamento in relazione alle condizioni climatiche, alle caratteristiche di installazione e alle temperature dell'impianto. Ai fini dei valori di riferimento utilizzati dagli strumenti normativi, per il calcolo dello SCOP l'Europa viene suddivisa ai fini del calcolo dello SCOP in tre macrozone climatiche: quella "AVERAGE", basata su Strasburgo, "WARM" basata su Atene e "COLD" basata su Helsinki. Tutti i costruttori di pompe di calore di potenza termica superiore a 70 kW_t devono dichiarare obbligatoriamente il valore di SCOP, mentre per le pompe di calore di potenza termica superiore a 70 kW la dichiarazione dello SCOP è facoltativa.

L'obiettivo di questa tesi è, la ricerca di soluzioni finalizzate al miglioramento dell'efficienza delle pompe di calore Tina in termini di SCOP e di risparmio economico sulla bolletta. Per il miglioramento delle prestazioni sono stati individuati tre campi di intervento:

- l'implementazione di un algoritmo che permetta di determinare una curva detta Climatica (in analogia alla curva climatica utilizzata dalle caldaie). È stato sviluppato un algoritmo, che permette di calcolare la temperatura di set point dinamica della macchina in funzione della temperatura esterna, della zona climatica ove la macchina è installata

e delle caratteristiche dei terminali in ambiente. Tale temperatura, viene calcolata in funzione della resa termica che i radiatori di volta in volta devono garantire, che deve essere sufficiente a riscaldare gli ambienti in cui tali radiatori sono installati. Abbiamo verificato che, se anziché far funzionare la pompa di calore a setpoint fisso si fa inseguire al setpoint il valore della curva climatica, si ottiene un miglioramento dell'efficienza pari al **17,6%**.

- L'implementazione di un algoritmo che permetta di variare dinamicamente i parametri PID relativi alla regolazione della valvola di laminazione. In particolare, l'obiettivo in tale analisi è far sì che il grado di surriscaldamento, ossia la differenza fra la temperatura in uscita dall'evaporatore³ e la temperatura di evaporazione, arrivi a coincidere nel minor tempo possibile con il valore di riferimento impostato e rimanga nell'intorno di tale valore per l'intero ciclo ON della macchina. Inizialmente sono stati determinati i parametri k_p , T_i e T_d ⁴ attraverso un'analisi sperimentale, ossia ricavando attraverso l'utilizzo del programma "Studio 3T"® l'andamento del grado di surriscaldamento in ogni ciclo ON della macchina, una volta variati i parametri di regolazione. Infine, si è implementato un algoritmo che permette di ricavare per ogni macchina il set di parametri ottimali per la regolazione dinamica della valvola laminatrice.

- Implementazione di un algoritmo che permetta di ricavare la durata ottimale di un ciclo ON della macchina al variare delle condizioni operative. Se si analizza la formula per calcolare il COP si osserva come esso, a parità di energia elettrica, aumenti all'aumentare dell'energia termica prodotta, che è a sua volta direttamente proporzionale alla differenza fra la temperatura di mandata e di ritorno dell'impianto. Pertanto, per aumentare il COP nell'intero ciclo ON della macchina si deve aumentare quest'ultima differenza di temperatura. Per far ciò è stato

³ In realtà nel caso di TINA è più corretto parlare di temperatura di primo surriscaldamento poiché tale tecnologia prevede un successivo surriscaldamento dovuto alla presenza di uno scambiatore che recupera l'entalpia prodotta dal sotto raffreddamento.

⁴ Tali parametri caratteristici della regolazione PID verranno ampiamente trattati nel capitolo 3.

sviluppato un algoritmo che consente di determinare al variare delle condizioni operative la durata ottimale del ciclo ON della macchina.

Pertanto, con tutti i metodi proposti sono state ottimizzate le prestazioni della macchina, ossia si è incrementato lo SCOP della pompa di calore al fine di un risparmio economico in bolletta.

1.7 Modalità di analisi e metodo scientifico

Per l'implementazione di tali metodi è stato fondamentale avere la possibilità di ricavare direttamente da remoto i dati storici di funzionamento reale delle pompe di calore. Nelle analisi sperimentali effettuate relative ai primi due metodi, si è utilizzato il software "Studio 3T", attraverso il quale si ha la possibilità di scaricare qualsiasi dato delle pompe di calore e trasferirlo direttamente in un file Excel. In tal modo, sono state ricavate per il primo metodo la potenza elettrica, la potenza termica, le temperature di mandata e di ritorno per varie pompe di calore e in diversi giorni, mentre per il secondo metodo sono stati estratti i dati relativi alla temperatura di evaporazione e il grado di surriscaldamento della Tina 115, situata a Mappano.

L'insieme delle analisi svolte è basato sull'applicazione del metodo scientifico. Il metodo scientifico non è che un approccio metodologico per interpretare la realtà che si fonda su una procedura ben individuata, finalizzata a trovare in modo obiettivo le regole che caratterizzano quella realtà analizzata. Esso, pertanto, è un approccio logico che permette a chi lo osserva di giungere a conclusioni coerenti con la realtà che si sta osservando. Il metodo scientifico sperimentale, la cui formulazione si deve a Galileo Galilei, può essere distinto in tre momenti:

- fase induttiva: l'osservatore parte dall'osservazione (particolare) per elaborare un'ipotesi che permetta di spiegare quel fenomeno (generale);
- fase deduttiva: attraverso l'esperimento che si conduce, si verifica se quella ipotesi è confermata;

- verifica: l'osservatore condivide i risultati del suo esperimento con gli altri esperti del settore affinché svolgano le dovute verifiche per confermarli o semmai modificarli o smentirli.

Ogni singolo passaggio della procedura è sia necessario che fondamentale affinché un risultato possa essere accettato dal punto di vista scientifico.

Ogni momento del metodo scientifico si differenzia in diverse fasi:

- fase induttiva:
 - osservo un fenomeno;
 - formulo un'ipotesi;
- fase deduttiva:
 - verifico l'ipotesi;
 - raccolgo i dati;
 - elaboro i risultati;
 - pubblico i risultati;
- verifica:

- peer review, ossia una continua verifica del risultato ottenuto.

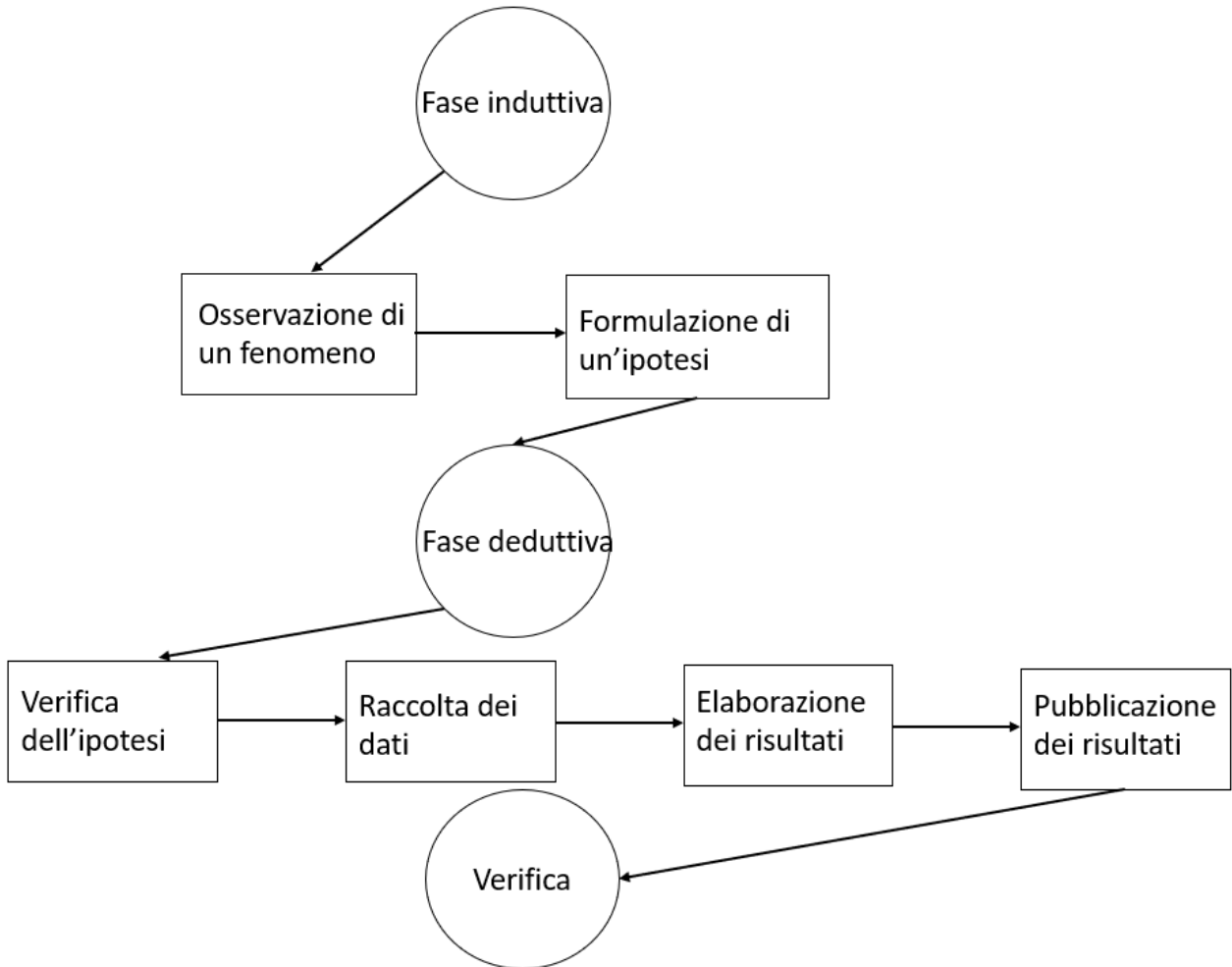


Figura 1.4: sequenza delle fasi del metodo scientifico.

La forza e la validità del metodo scientifico non si basa esclusivamente sulla mera applicazione della procedura, ma l'esperimento alla base del metodo scientifico deve possedere precise caratteristiche che gli consentano di superare il vaglio dell'approccio logico su cui si regge. Le caratteristiche principali che il metodo scientifico deve possedere sono:

- ripetibilità: in primo luogo per avere valenza scientifica l'esperimento deve poter essere ripetibile;
- la riproducibilità: la possibilità di riprodurre l'esperimento anche variando una o più condizioni, come il metodo di misurazione, l'operatore alla misura o lo strumento di misura;
- la falsificabilità: l'esperimento deve essere falsificabile, ossia consentire agli altri scienziati di svolgere le stesse verifiche e raccolte dati

del loro collega per valutare se il risultato può essere confutato da nuovi esperimenti.

1.8 Analisi degli strumenti utilizzati

L'analisi di un processo comporta di dover analizzare in maniera opportuna le grandezze fisiche in gioco. Per tale attività, quindi, sono necessari strumenti di misura, ossia i sensori, in grado di rilevare lo stato attuale, controllori deputati ad elaborare opportunamente le informazioni raccolte e attuatori in grado di tradurre tali risultati in azioni fisiche concrete.

1.8.1 Dispositivi di misura

Con il termine sensori o trasduttori si intendono tutti i sistemi in grado di effettuare la misura di una grandezza fisica e successivamente tradurla in un segnale, generalmente elettrico. I sensori più comunemente utilizzati nell'ambito del controllo dei processi industriali sono i seguenti: sensori di temperatura, sensori di pressione, sensori di portata e sensori di livello. Nel caso del sistema analizzato per la regolazione PID della valvola di laminazione a monte dell'evaporatore, si ha un trasduttore di pressione Carel SPKT*SO®, che presenta un preciso principio di misura: la misura della variazione di resistenza elettrica associata alla deformazione di conduttori (estensimetri) o cristalli di silicio (trasduttori piezo-resistivi).

Alcuni parametri che caratterizzano la funzionalità e le prestazioni di tali trasduttori sono:

- accuratezza: è il massimo scostamento tra la misura fornita dal sensore e il valore vero della grandezza fisica misurata. Tale parametro esprime che la misura è migliore quanto più il suo valore è basso. Viene espresso come percentuale del campo di misura (o del fondo scala, se l'estremo è lo zero) oppure come percentuale della misura stessa:

$$\varepsilon_f = 100 \cdot \frac{X_{misurato} - X_{reale}}{X_{fondo-scala}} \quad (1.1)$$

$$\varepsilon_a = 100 \cdot \frac{X_{misurato} - X_{reale}}{X_{reale}} \quad (1.2)$$

La carenza di accuratezza deriva essenzialmente da errori sistematici di misura, riducibili attraverso l'aggiustamento periodico dei parametri del sensore. Nel caso del trasduttore utilizzato si ha un'accuratezza pari a $\pm 1\%$ FS.

- Precisione: esprime la ripetibilità delle misure dello stesso valore fisico nelle stesse condizioni operative.
- Rangeability: è il rapporto tra il fondo-scala e il minor valore per il quale sono validi i dati di accuratezza e precisione. Un valore elevato di rangeability è indice di applicabilità del sensore in un ampio campo di misura. Il trasduttore di pressione in esame presenta $-1 \div 45 \text{ barg}$.
- Sensibilità: è il rapporto tra una variazione della misura fornita dal sensore e la corrispondente variazione del valore reale della grandezza fisica.
- Risoluzione massima: è la più piccola variazione della grandezza fisica in grado di produrre una variazione della misura fornita dal sensore.
- Caratteristica statica: è la relazione algebrica che esprime la misura fornita dal sensore in funzione del valore reale della grandezza fisica. Si cerca di operare con strumenti in grado di fornire, nel campo di interesse, una relazione lineare.
- Caratteristica dinamica: è la funzione di trasferimento che lega il valore della grandezza fisica alla misura fornita dal sensore.

1.8.2 Dispositivi di comando

Gli organi di comando, detti genericamente attuatori, attraverso i quali attuare l'azione di controllo, possono essere molteplici. Nel sistema in esame si considera la valvola di laminazione Carel E3V65BWR10®, ossia una valvola

comandata da segnali analogici. Come nel caso dei sistemi di misura risultano, agli effetti della regolazione, essere importanti il guadagno statico e la caratteristica dinamica; mentre però, per i sensori il guadagno è quasi sempre costante, nel caso degli attuatori le non linearità possono non essere altrettanto trascurabili. Le valvole, realizzate con le più svariate tecnologie costruttive, consentono di modulare la portata di un fluido sostanzialmente attraverso la posizione “h” di un otturatore che ne ostruisce il passaggio. Il parametro caratteristico di una valvola risulta essere il coefficiente di efflusso C_v , definito come la portata volumetrica di acqua a temperatura ambiente che transita attraverso la valvola quando la caduta di pressione statica su di essa è di 1psi.

Diagramma di capacità

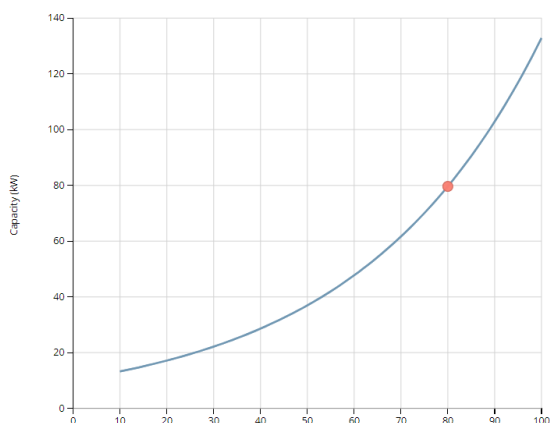


Figura 1.5: diagramma di capacità della valvola E3V65BWR10.

In tale diagramma di capacità viene indicata la capacità frigorifera della valvola in funzione dell'apertura della valvola stessa.

A seconda della tecnologia costruttiva adottata tale coefficiente può essere funzione lineare, parabolica o esponenziale della corsa dell'otturatore. La portata di fluido uscente risulta poi essere funzione della caduta di pressione Δp sulla valvola e, più precisamente, della sua radice quadrata. Pertanto, la caratteristica della valvola può essere espressa, limitatamente alla zona di normale efflusso, come $w = k \cdot C_v(h) \cdot \sqrt{\Delta p}$. Poiché il salto di pressione dipende a sua volta dalla posizione dell'otturatore, attraverso il dimensionamento della valvola è possibile controbilanciare la dipendenza non lineare dal salto di pressione attraverso la dipendenza del coefficiente di efflusso dalla corsa dell'otturatore, in modo da avere un comportamento il più possibile lineare dell'organo di comando.

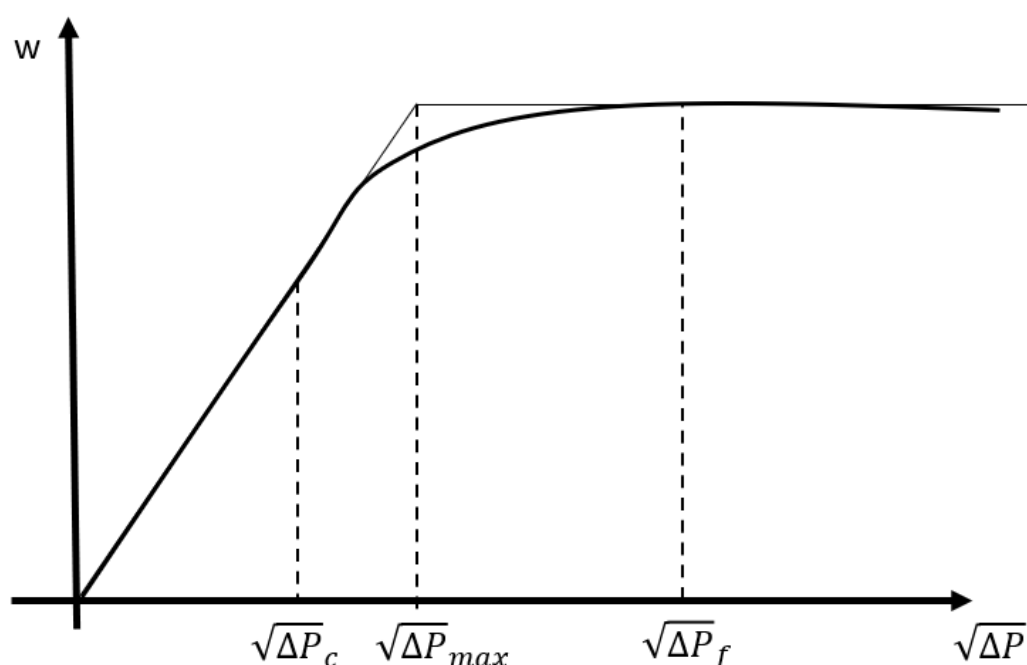


Figura 1.6: tipica caratteristica di efflusso di una valvola.

La non linearità della relazione tra la corsa dell'otturatore e la portata è responsabile del degrado di molte prestazioni dei loop di regolazione: a ciò si tenta di rimediare attraverso un'accorta taratura degli algoritmi PID.

CAPITOLO 2

2. Curva climatica

2.1 Introduzione

Nel presente capitolo viene descritta l'analisi del procedimento per la determinazione di una formula, detta Climatica, che permette di definire la temperatura di mandata in funzione della temperatura esterna. Nella giornata del 2 novembre 2021, si è analizzato il funzionamento della pompa di calore "Tina 115", situata a Mappano e, in particolare, si è studiato l'andamento delle seguenti grandezze:

- temperatura di mandata T_m [°C];
- temperatura di ritorno T_r [°C];
- temperatura esterna T_{ext} [°C];
- temperatura di set point $T_{set\ point}$ [°C];
- potenza elettrica $P_{elettrica}$ [kW_e];
- potenza termica $P_{termica}$ [kW_t].

Tali grandezze sono state ricavate dal database di raccolta dei dati storici nell'intervallo temporale compreso fra le 08:00 e le 17:00 utilizzando il programma "Studio 3T". L'obiettivo di tale analisi è ricavare una formula, che permetta di calcolare la temperatura di mandata in funzione della sola temperatura esterna e, inoltre, far sì che tale temperatura sia sufficiente a riscaldare l'ambiente ove è posto il radiatore e che sia minore della temperatura in esercizio. Si riesce a dimostrare che se la macchina produce acqua calda tale temperatura variabile anziché a setpoint fisso, il COP (coefficient of performance) aumenta.

Dapprima, in tale analisi si osserva come la temperatura di set point, che determina l'accensione e lo spegnimento della macchina, non segue la temperatura di mandata e che pertanto, l'inizio e la fine dei cicli ON della macchina non dipendano da quest'ultima temperatura. Successivamente, a partire dalla

conoscenza della zona climatica, ove la macchina è situata, e delle caratteristiche del radiatore, sono determinate una curva lineare (come quella utilizzata con le caldaie) e una esponenziale, in base alle quali si calcola la temperatura di mandata in funzione di quella esterna. La temperatura di set point deve assumere dei valori prossimi a quelli della temperatura di mandata in modo tale da garantire un corretto funzionamento della macchina stessa. Infine, sono analizzate le prestazioni della macchina nella condizione attuale e quelle che avrebbe fornito se la temperatura di mandata fosse determinata con la Climatica lineare o con la Climatica esponenziale. Si conclude l'analisi, osservando che la macchina fornisce le migliori prestazioni quando è in esercizio alle temperature minori, ossia quando la temperatura di mandata è determinata dalla Climatica esponenziale.

2.2 Analisi del funzionamento della macchina

In prima battuta, si analizza la temperatura di set point che, in base alle impostazioni del PLC della macchina dovrebbe variare in funzione della temperatura esterna con andamento continuo. Tuttavia, analizzando l'andamento di tale temperatura sia al computer attraverso l'utilizzo del programma prima nominato (vedi grafico sotto riportato), sia attraverso la visione diretta del pannello installato a bordo macchina, si è osservato un andamento a gradini. Da ciò si evince che con l'algoritmo implementato, ogni variazione decimale della temperatura esterna non comporta una variazione della temperatura di set point,

ma quest'ultima varia solo dopo che esternamente si è avuto un cambiamento significativo della temperatura.

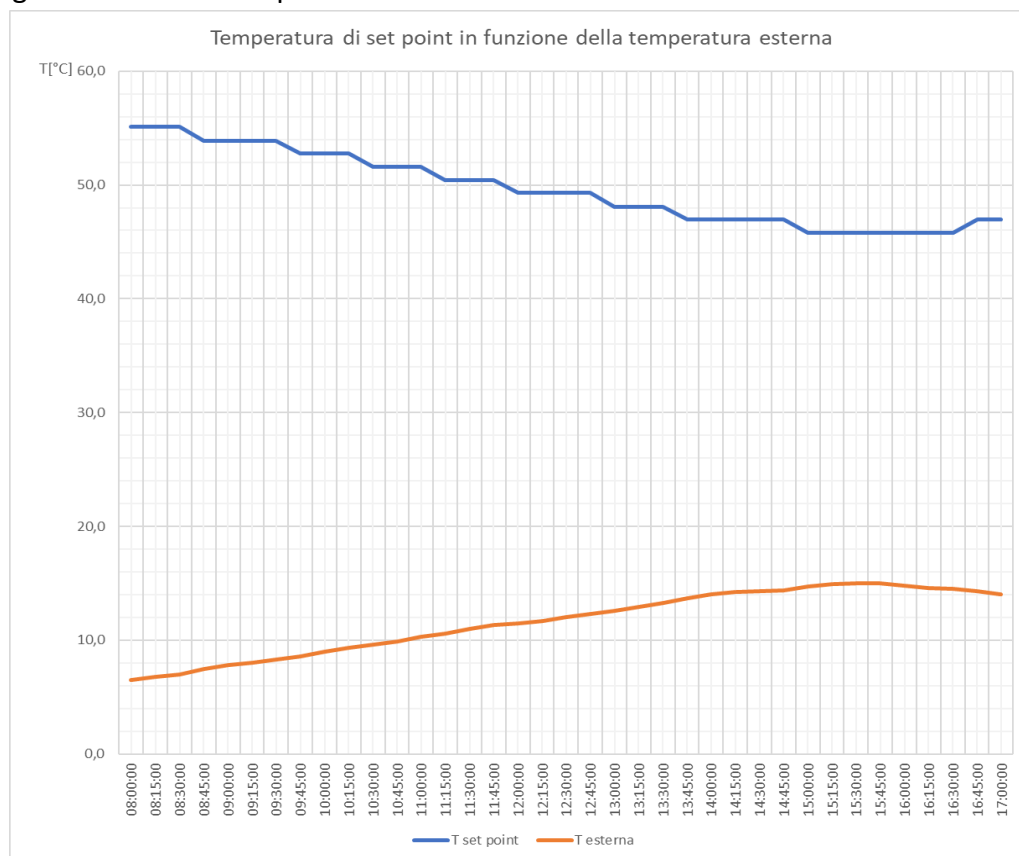


Figura 2.1: andamento della temperatura di set point in funzione della temperatura esterna.

Da ciò consegue la necessità di perfezionare l'algoritmo al fine che la temperatura di set point segua più prontamente l'andamento della temperatura esterna.

Successivamente, sono state prese in esame la temperatura di mandata e di ritorno dell'impianto e sono state confrontate con la temperatura di set point: quest'ultima può seguire indifferentemente sia la mandata che il ritorno. Nel caso si scelga di seguire la temperatura di ritorno, allorquando essa supera di un valore fisso e preimpostato la temperatura di set point, la pompa di calore si spegne, mentre quando è inferiore rispetto alla temperatura di set point di un certo valore prefissato la macchina si riaccende.

Dall'analisi della "Tina 115" si è analizzato l'andamento reale delle grandezze sopra descritte:

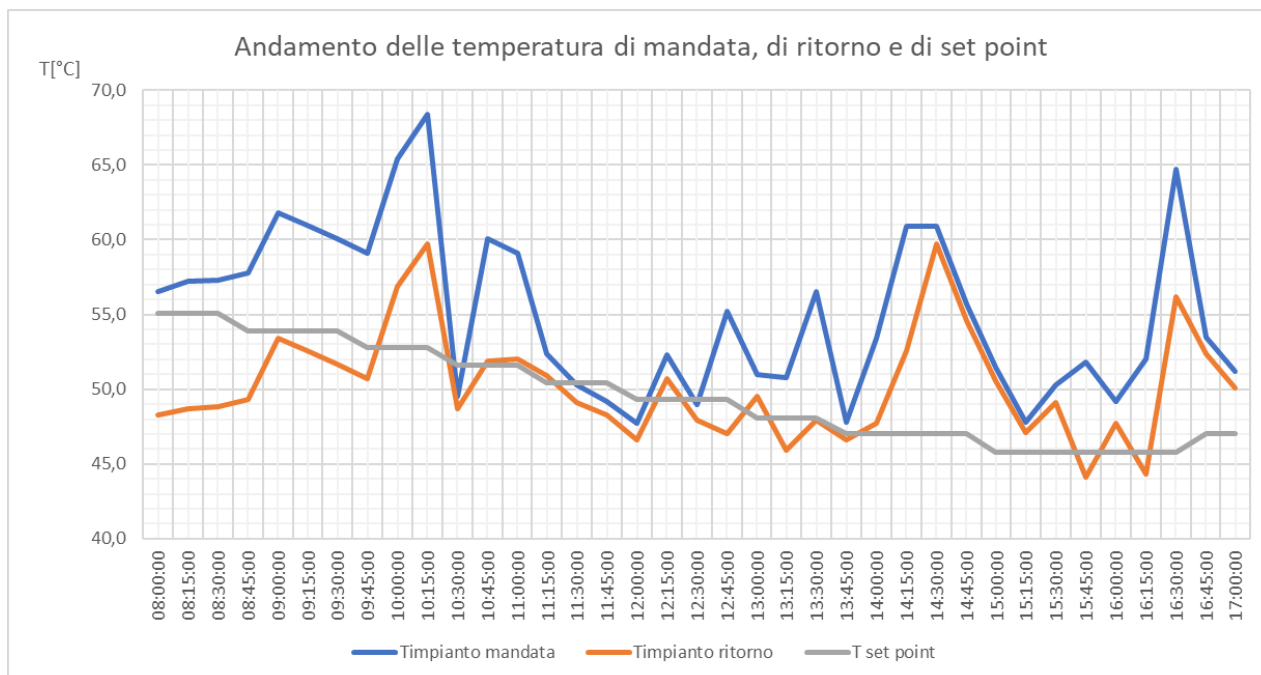


Figura 2.2: andamento della temperatura di mandata, di ritorno e di set point della pompa di calore.

Dal grafico si ricava che la temperatura di set point non ha alcuna relazione con le temperature di mandata e di ritorno e pertanto, la macchina non lavora come dovrebbe. Da qui, la necessità di implementare un algoritmo tale per cui la temperatura di setpoint segua l'andamento desiderato.

2.3 Formula e curva climatica

Da quanto detto in precedenza, è evidente la necessità di implementare una formula che permetta di ricavare la temperatura di mandata, e quindi la temperatura di set point, in funzione della temperatura esterna. Inoltre, tale formula presenta due caratteristiche fondamentali, che esprimono la sua importanza:

- tiene conto del calore scambiato dal radiatore con l'ambiente e pertanto, la temperatura di mandata determinata sarà sufficiente a riscaldare il locale ove è situato il radiatore;

- la temperatura di mandata determinata è minore di quella d'esercizio della macchina e ciò assicura delle prestazioni migliori, in termini di COP della macchina stessa.

2.3.1 Parametri presenti nella CLIMATICA

La formula, Climatica, tiene conto delle caratteristiche del radiatore e della zona climatica di appartenenza della località ove è situata la macchina. La presenza di grandezze che si riferiscono al radiatore assicura che la temperatura di mandata, determinata con tale formula, sia sufficiente a riscaldare il locale ove è posto il radiatore. Le grandezze caratterizzanti del radiatore sono:

- l'esponente "n" che, a seconda della marca e della tipologia del radiatore ha un range compreso tra $1,2 \div 1,4$; è stato considerato un valore pari a $n = 1,34$;
- la differenza di temperatura tra ingresso e uscita dell'acqua nel radiatore; nel caso in esame è pari a $\Delta T_{rad} = 10 K$; (mettere la seguente nota: "sarebbe più corretto considerare il ΔT medio logaritmo ma in questo caso, considerare un ΔT lineare costituisce un'ottima approssimazione".
- nelle condizioni di riferimento, la differenza di temperatura fra temperatura media dell'acqua nei radiatori e temperatura ambiente è pari a $\Delta T_{rif} = 60 K$.

Le zone climatiche, invece, sono zone accomunate da condizioni climatiche simili durante la stagione di riscaldamento. Le zone climatiche sono quindi aree del territorio italiano che hanno convenzionalmente lo stesso clima, per le quali è quindi possibile immaginare condizioni simili tra loro. Le zone climatiche sono state definite allo scopo di contenere i consumi di energia e individuano la durata giornaliera del riscaldamento, i periodi di accensione degli impianti termici e i giorni di riscaldamento dell'intera stagione di riscaldamento. Le zone climatiche (anche dette fasce climatiche) vengono individuate in base ai gradi giorno (mettere una nota per spiegare cosa sono i gradi giorno e i valori che assumono per ogni fascia climatica) e sono sei, classificate dalla A alla F: alla zona climatica A

appartengono i comuni italiani per i quali il valore dei gradi giorno è molto basso e che di conseguenza si trovano in condizioni climatiche più favorevoli, ossia ove è richiesta una minore quantità di riscaldamento, e così via fino alla zona climatica F.

L'appartenenza alla zona climatica determina sia delle costanti che compaiono nella formula Climatica sia gli estremi del range in cui la temperatura di mandata può variare. In particolare, le costanti che non variano in funzione della zona climatica sono:

- il minimo valore che la temperatura di mandata può assumere $T_{min} = 40^{\circ}C$;
- il massimo valore che nelle condizioni limiti la temperatura di mandata può assumere $T_{max} = 85^{\circ}C$;

Le grandezze che variano in funzione della zona climatica, invece, sono quelle elencate nella tabella riportata di seguito:

		Zona climatica			
		F	E	D	C
$T_{E\ min}$	[°C]	-15	-5	0	5
$T_{M\ max}$	[°C]	75	69	65	60
$T_{E\ lim}$	[°C]	-25	-17,9	-14,4	-10,9
$T_{ext\ middle}$	[°C]	2,5	7,5	10	12,5

Tabella 2.1: grandezze che dipendono dalla zona climatica.

In tale tabella viene riportato:

- $T_{E\ min}$ il minimo valore che la temperatura esterna può assumere;

- $T_{M \max}$ il massimo valore che la temperatura di mandata può assumere;

- $T_{E \lim}$ il minimo valore che la temperatura esterna può assumere ed è determinato dalla seguente formula:

$$T_{E \lim} = T_A - \frac{T_A - T_{E \min}}{\left(\frac{2T_{M \max} - \Delta T_{Rad} - T_A}{\Delta T_{Rif}} \right)^n};$$

- $T_{ext \ middle}$ il valore intermedio della temperatura esterna, calcolato come $T_{ext \ middle} = T_{E \lim} - T_{E \min}$.

2.3.2 Implementazione della formula Climatica

La formula Climatica si ricava a partire dalla seguente formula:

$$R_{reale} = R_{teorica} \left(\frac{\Delta T_m}{\Delta T_{rif}} \right)^n \quad (2.1)$$

Ove:

- R_{reale} è la resa reale del radiatore;
- $R_{teorica}$ è la resa teorica del radiatore;
- ΔT_m è la variazione di temperatura media⁵.

A partire dalla seguente formula, si considera:

$$\Delta T_m = \frac{2 \cdot T_{Mn} - \Delta T_{rad}}{2} - T_A \quad (2.2)$$

$$\frac{R_{reale}}{R_{teorica}} = \frac{T_A - T_E}{T_A - T_{E \lim}} \quad (2.3)$$

Mettendo a sistema le formule 2.1, 2.2 e 2.3, si ottiene:

$$T_{Mn} = \Delta T_{Rif} \left(\frac{T_A - T_E}{T_A - T_{E \lim}} \right)^{1/n} + \frac{\Delta T_{Rad}}{2} + T_A \quad (2.4)$$

⁵ Per tale analisi si è utilizzata la temperatura media lineare poiché si ottiene un risultato, che rappresenta una buona approssimazione di quello che si sarebbe ottenuto considerando la temperatura media logaritmica: $\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}}$.

Zona climatica		T_{ext}																																													
		-20	-19	-18	-17	-16	-15	-14	-13	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20					
Zona climatica	F	75,0	75,0	75,0	75,0	75,0	75,0	73,9	72,9	71,8	70,7	69,6	68,5	67,3	66,2	65,1	63,9	62,7	61,6	60,4	59,2	57,9	56,7	55,4	54,2	52,9	51,6	50,2	48,9	47,5	46,1	44,6	43,1	41,6	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0			
	E	69,0	69,0	69,0	69,0	69,0	69,0	69,0	69,0	69,0	69,0	69,0	69,0	69,0	69,0	69,0	69,0	67,7	66,3	65,0	63,6	62,3	60,9	59,4	58,0	56,5	55,1	53,5	52,0	50,4	48,8	47,2	45,5	43,8	42,0	40,2	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	
	D	65,0	65,0	65,0	65,0	65,0	65,0	65,0	65,0	65,0	65,0	65,0	65,0	65,0	65,0	65,0	65,0	65,0	65,0	65,0	65,0	65,0	63,5	62,0	60,4	58,9	57,3	55,7	54,0	52,3	50,6	48,8	47,0	45,2	43,3	41,3	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0
	C	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	58,2	56,5	54,6	52,8	50,9	48,9	46,9	44,8	42,7	40,4	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0

Figura 2.3: temperature di mandata, calcolata con la Climatica esponenziale, in funzione della temperatura esterna e zona climatica.

Applicando tale formula e considerando le varie zone climatiche, si calcolano le temperature di mandata T_{Mn}

L'andamento grafico per le varie zone climatiche è il seguente:

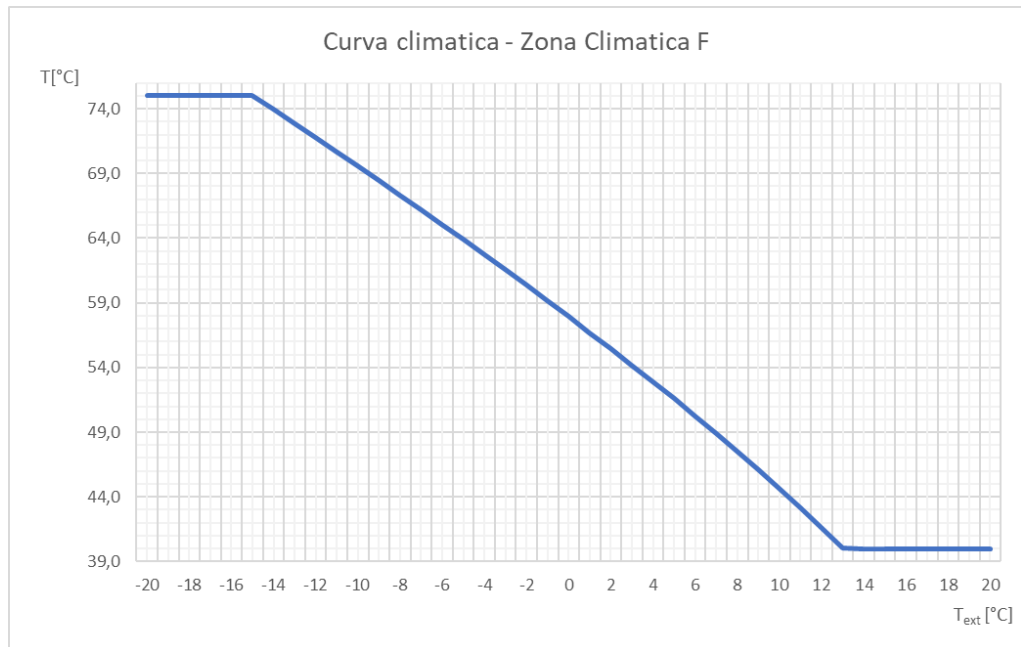


Figura 2.4: andamento della temperatura di mandata nella zona climatica

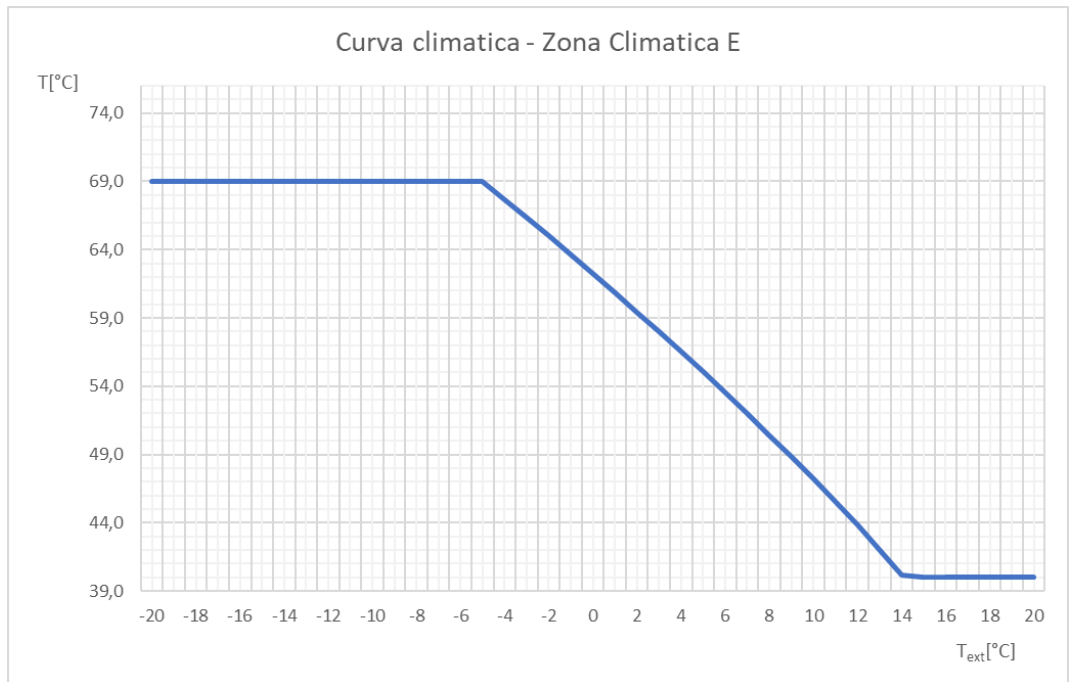


Figura 2.5: andamento della temperatura di mandata nella zona climatica E.

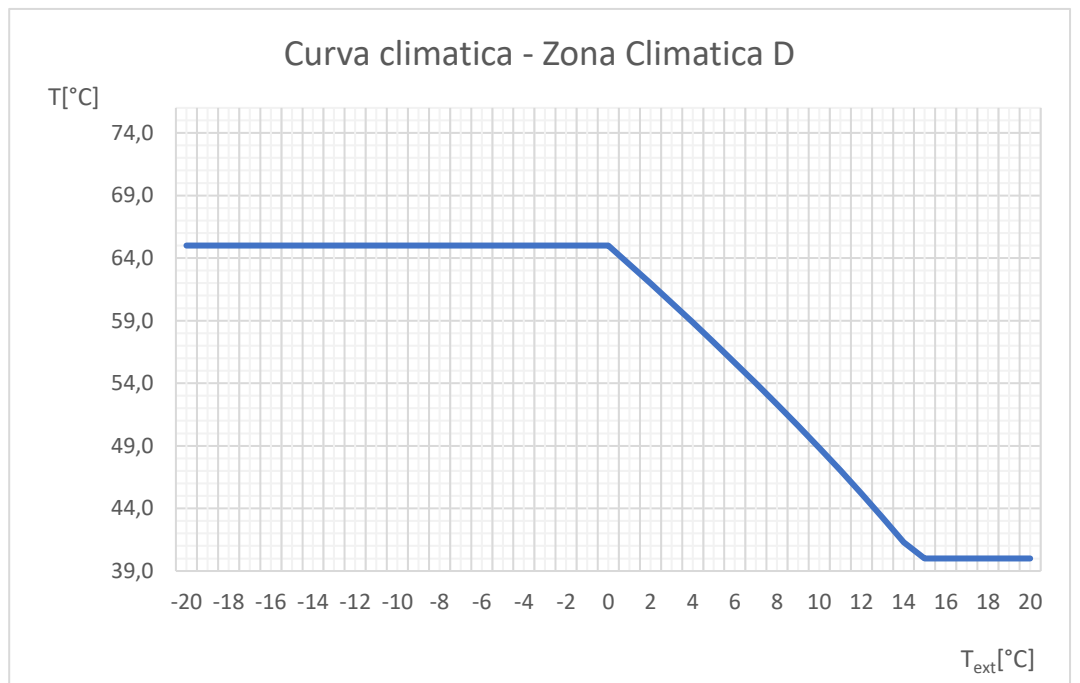


Figura 2.6: andamento della temperatura di mandata nella zona climatica D.

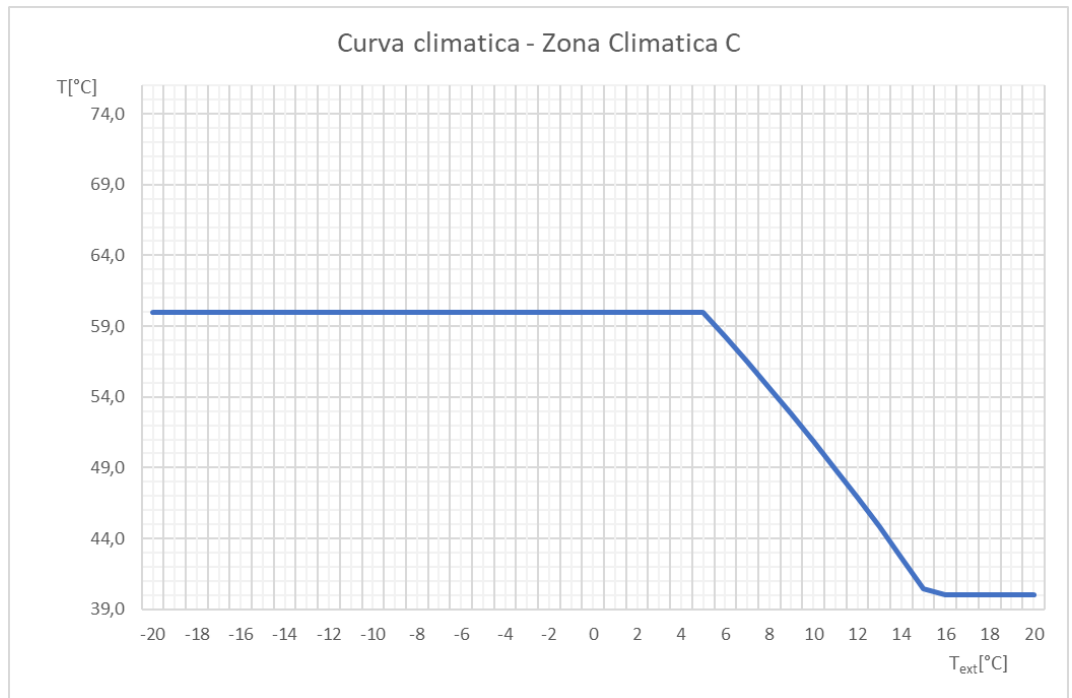


Figura 2.7: andamento della temperatura di mandata nella zona climatica C.

A partire dalla formula Climatica esponenziale e considerando la formula della retta passante per i due punti estremi si è ricavata una formula Climatica lineare:

$$\frac{y - T_{M \max}}{T_{M \max} - T_{\min}} = \frac{x - T_{E \min}}{T_A - T_{E \min}} \quad (2.5)$$

Sostituendo $y = T_{M \text{ rett}}$ e $x = T_E$, si ottiene la formula Climatica lineare:

$$T_{M \text{ rett}} = T_{M \max} - \frac{T_{M \max} - T_{\min}}{T_A - T_{E \min}} (T_E - T_{E \min}) \quad (2.6)$$

Applicando tale formula e considerando le varie zone climatiche, si calcolano le temperature di mandata $T_{M \text{ rett}}$.

		T _{ext}																																								
		-20	-19	-18	-17	-16	-15	-14	-13	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Zona climatica	F	75,0	75,0	75,0	75,0	75,0	75,0	74,0	73,0	72,0	71,0	70,0	69,0	68,0	67,0	66,0	65,0	64,0	63,0	62,0	61,0	60,0	59,0	58,0	57,0	56,0	55,0	54,0	53,0	52,0	51,0	50,0	49,0	48,0	47,0	46,0	45,0	44,0	43,0	42,0	41,0	40,0
	E	69,0	69,0	69,0	69,0	69,0	69,0	69,0	69,0	69,0	69,0	69,0	69,0	69,0	69,0	69,0	69,0	67,8	66,7	65,5	64,4	63,2	62,0	60,9	59,7	58,6	57,4	56,2	55,1	53,9	52,8	51,6	50,4	49,3	48,1	47,0	45,8	44,6	43,5	42,3	41,2	40,0
	D	65,0	65,0	65,0	65,0	65,0	65,0	65,0	65,0	65,0	65,0	65,0	65,0	65,0	65,0	65,0	65,0	65,0	65,0	65,0	65,0	65,0	63,8	62,5	61,3	60,0	58,8	57,5	56,3	55,0	53,8	52,5	51,3	50,0	48,8	47,5	46,3	45,0	43,8	42,5	41,3	40,0
	C	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	58,7	57,3	56,0	54,7	53,3	52,0	50,7	49,3	48,0	46,7	45,3	44,0	42,7	41,3

Figura 2.8: temperature di mandata, calcolata con la Climatica lineare, in funzione della temperatura esterna e zona climatica.

I risultati ottenuti sono riportati nei grafici sottostanti.

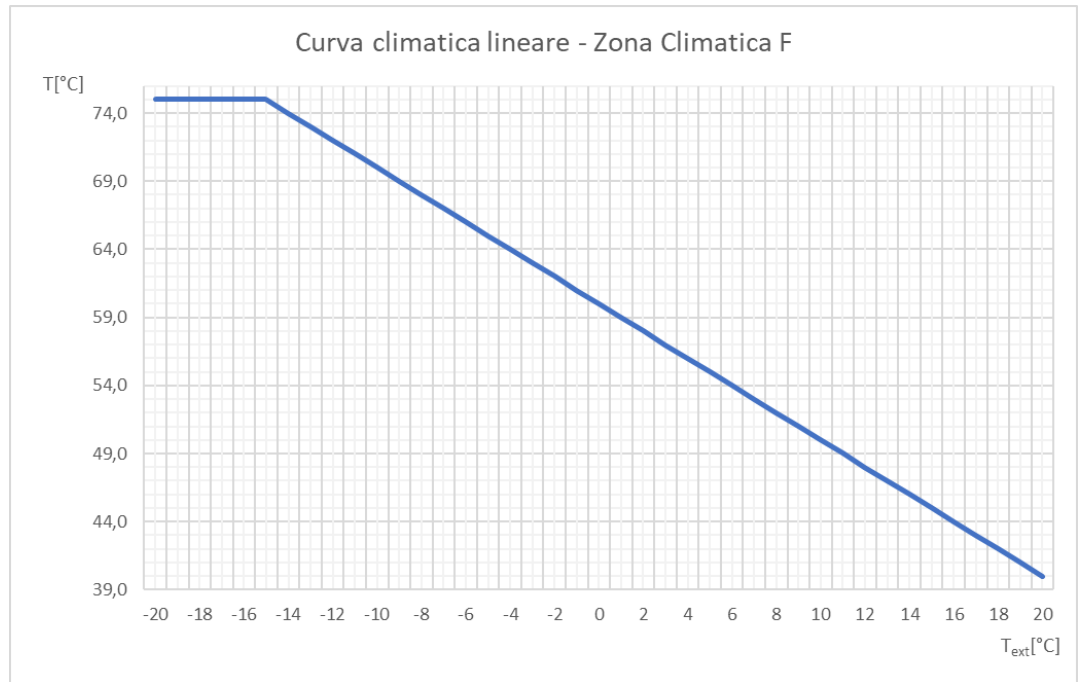


Figura 2.9: andamento della temperatura di mandata nella zona climatica F.

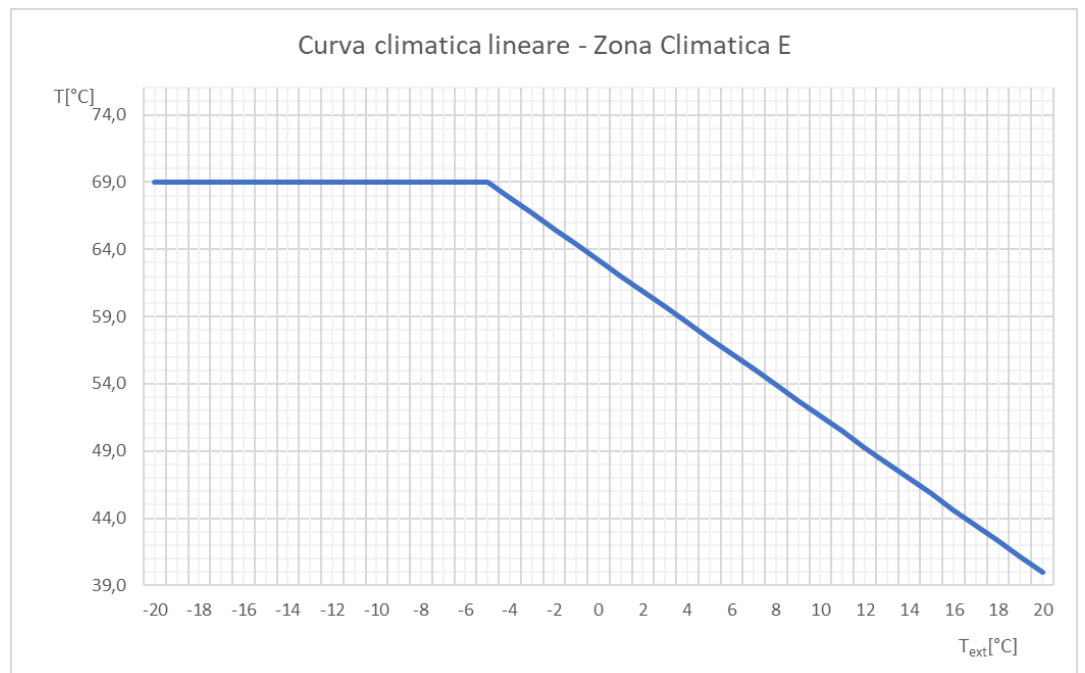


Figura 2.10: andamento della temperatura di mandata nella zona climatica E.

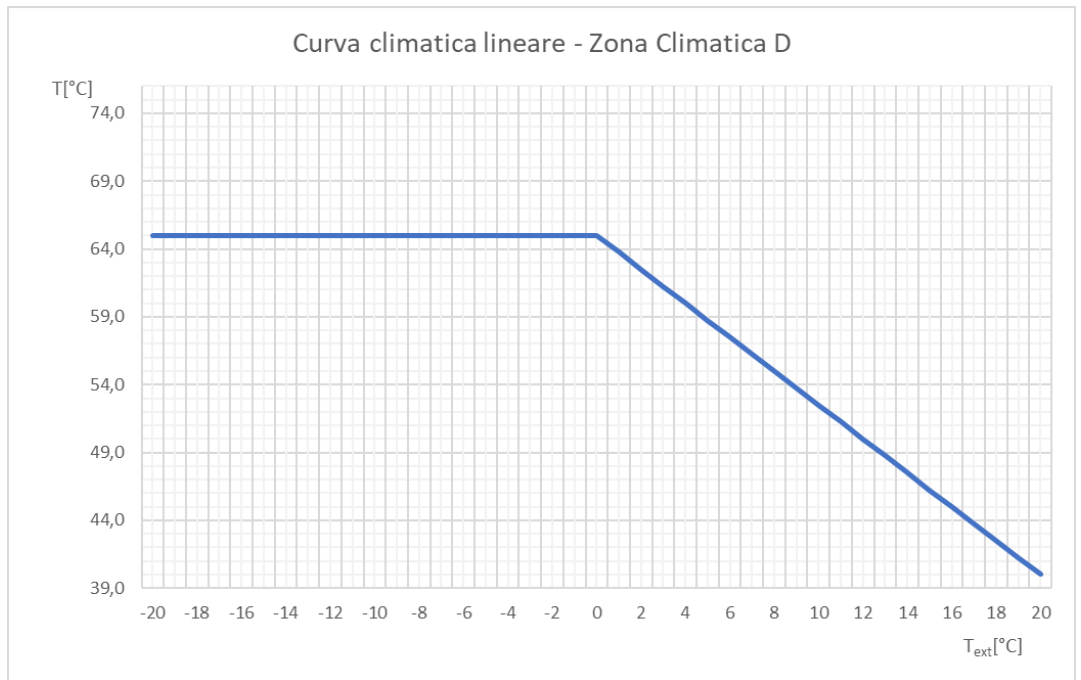


Figura 2.11: andamento della temperatura di mandata nella zona climatica D.

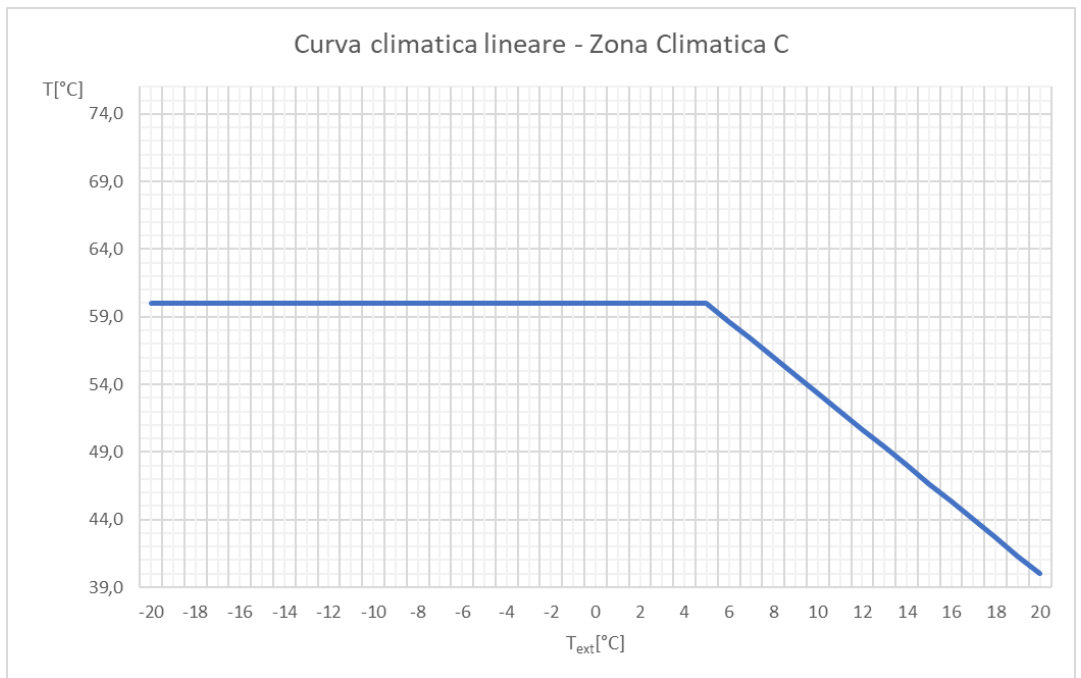


Figura 2.12: andamento della temperatura di mandata nella zona climatica C.

2.3.3 Risultati applicati alla macchina in esame

Ricavate le formule descritte nei sottoparagrafi precedenti che permettono di calcolare la temperatura di mandata, sono state calcolate le temperature di ritorno attraverso la seguente formula:

$$T_{Rn} = T_{Mn} - \Delta T_{reale} \quad (2.7)$$

Ove:

- T_{Rn} è la temperatura di ritorno, che tiene conto della formula Climatica esponenziale;
- ΔT_{reale} è la differenza fra le temperature di mandata e di ritorno, determinate attraverso l'utilizzo del software "Studio 3T".

Si ha una formula analoga per la temperatura di ritorno T_{Rrett} calcolata tenendo conto della Climatica lineare:

$$T_{Rrett} = T_{Mrett} - \Delta T_{reale} \quad (2.8)$$

Sulla base dei risultati ottenuti, sono stati ricavati i grafici, che consentono di confrontare le temperature di mandata (memorizzata, esponenziale e lineare) e le temperature di ritorno (memorizzata, esponenziale e lineare).

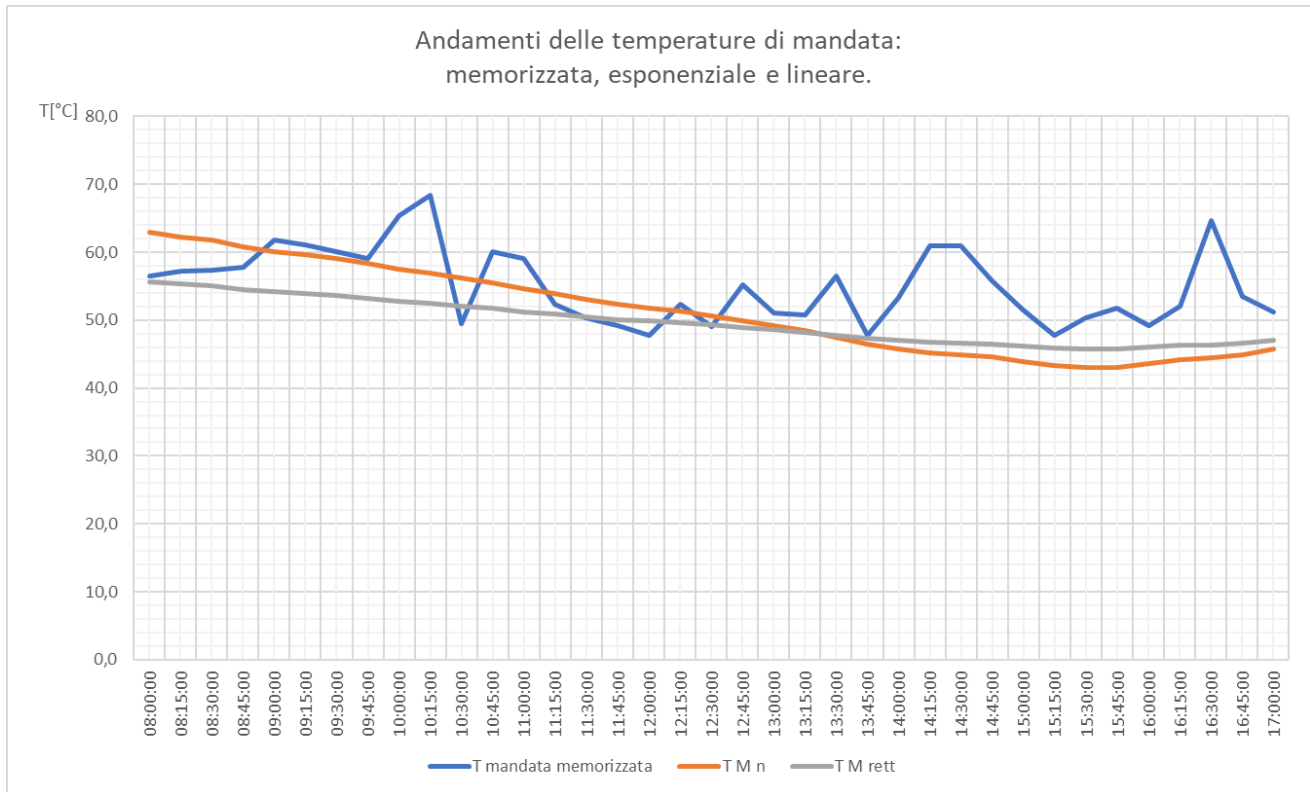


Figura 2.13: andamento delle temperature di mandata – memorizzata, esponenziale e lineare.

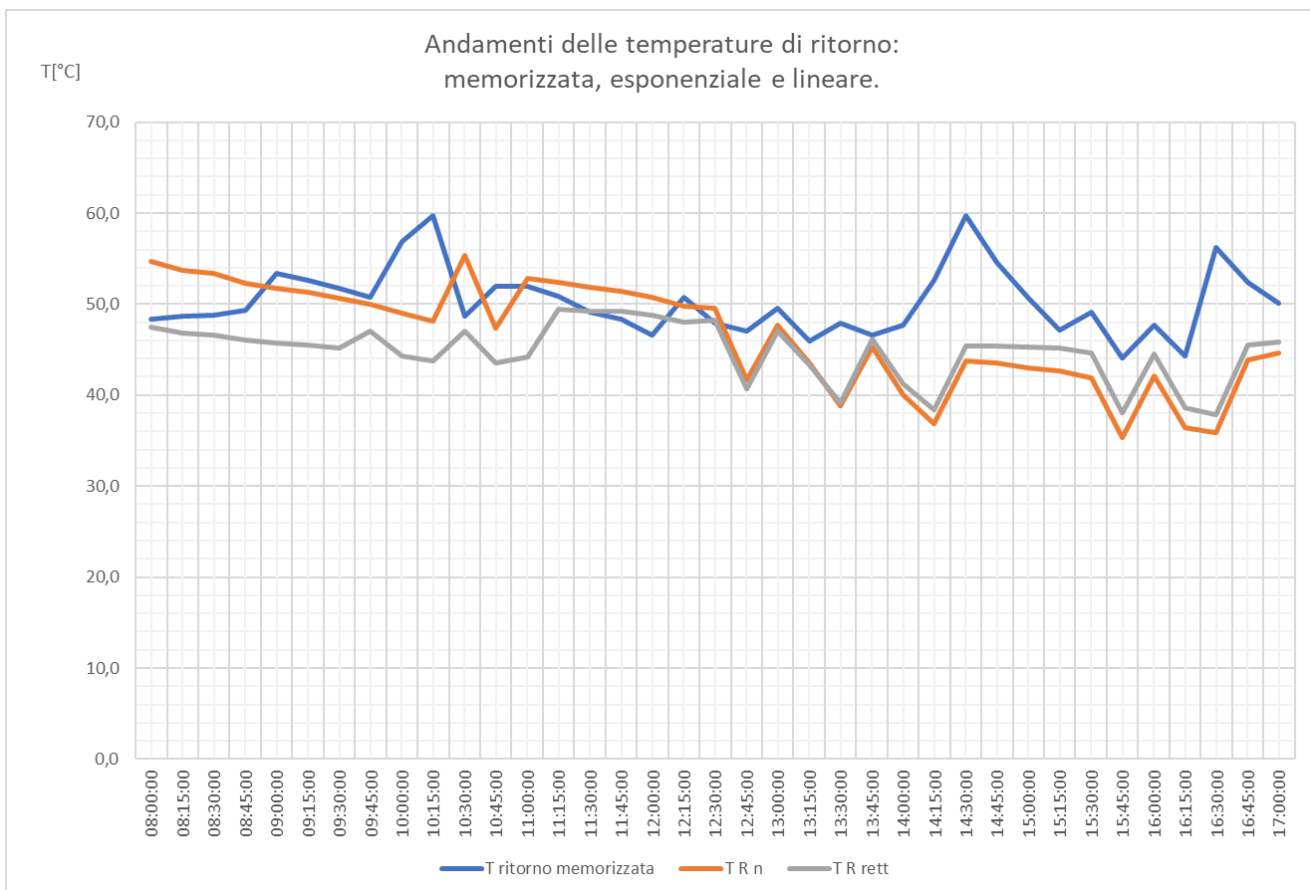


Figura 2.14: andamento delle temperature di ritorno – memorizzata, esponenziale e lineare.

Osservando in particolare il grafico, riportato in figura 2.13, si evince che la temperatura di mandata, calcolata applicando la formula Climatica esponenziale, è minore rispetto alle altre. Pertanto, la macchina se funzionasse con tale temperatura, offrirebbe delle prestazioni migliori. È questo l'obiettivo del paragrafo successivo, ossia quello di analizzare e verificare quali siano le prestazioni della macchina alle diverse temperature: memorizzate, esponenziali e lineari.

2.4 Analisi dei COP

Una volta ricavate le formule Climatica esponenziale e Climatica lineare, si deve verificare quali prestazioni presenti la macchina se avesse le temperature di mandata determinate secondo le formule 2.4 e 2.6. L'ipotesi di partenza è che il COP maggiore sia quello della macchina che presenta una temperatura di mandata calcolata attraverso la formula Climatica esponenziale. Si è ipotizzato ciò, poiché, come indicato nelle schede tecniche delle macchine, quest'ultime presentano COP maggiori a temperature minori e con la formula Climatica esponenziale si determina la minor temperatura di mandata possibile, che permette di riscaldare l'ambiente desiderato.

Si è proceduto, dapprima, all'analisi dell'energia termica ed elettrica, e quindi del COP, che la macchina presenta effettivamente. Tali energie sono confrontate con le energie di benchmark, ossia le energie che la macchina presenta a banco prova e riportate nelle schede tecniche. È opportuno sottolineare che quando si considerano le energie di benchmark, non si tiene conto di quando la macchina è spenta, ossia si considera che la macchina sia sempre accesa nell'arco della giornata analizzata.

Successivamente, sono state determinate le energie termiche ed elettriche, che la macchina presenterebbe se seguisse la formula Climatica lineare. Anche in tal caso, tali energie sono state confrontate con le rispettive grandezze di benchmark.

Inoltre, sono state calcolate le energie termiche ed elettriche, che la macchina presenterebbe se seguisse la Climatica esponenziale. Ugualmente alle

prime due analisi, tali energie sono state confrontate con le rispettive grandezze di benchmark.

Infine, sono stati calcolati i COP nei tre casi analizzati e si è osservato quale macchina presentasse le prestazioni migliori.

2.4.1 Analisi nelle condizioni di funzionamento

Si considerino le temperature di mandata e di ritorno nelle condizioni effettive di funzionamento della macchina. In tali analisi sono state determinate, dapprima, le potenze nelle condizioni di funzionamento e in seguito le potenze, dette di benchmark, ossia quelle che la macchina presenterebbe da banco prova. È opportuno specificare che le potenze di benchmark sono state determinate attraverso una doppia interpolazione lineare fra le potenze che la macchina presenterebbe con una temperatura d'uscita dell'acqua dalla sorgente di 10°C e di 15°C. Tale interpolazione è stata effettuata per tener conto che la temperatura effettiva d'uscita dell'acqua dalla sorgente è di 10,9°C.

Pertanto, sono state determinate le seguenti grandezze:

- la potenza elettrica $P_{elettrica\ memorizzata}$, che è stata estratta attraverso l'utilizzo del programma "Studio 3T";
- la potenza termica $P_{termica\ memorizzata}$, che è stata calcolata attraverso la formula di seguito riportata:

$$P_{termica\ memorizzata} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{M\ memorizzata} - T_{R\ memorizzata}) \quad (2.9)$$

Ove:

- $\dot{m} = 11,134 \left[\frac{mc}{h} \right]$ è la portata volumica dell'acqua;
- $c_p = 1,164 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$ è il calore specifico dell'acqua.
- la potenza elettrica $P_{elettrica\ benchmark}$, che è stata determinata attraverso la doppia interpolazione sopra descritta;
- la potenza termica $P_{termica\ memorizzata}$, che è stata calcolata attraverso la doppia interpolazione sopra descritta.

È possibile osservare nel grafico di seguito riportato, come differiscano le potenze che effettivamente si hanno con le potenze di benchmark. È opportuno sottolineare che il confronto debba essere eseguito unicamente quando la macchina è accesa, poiché nei cicli OFF della macchina le potenze effettive tendono verso lo zero, mentre le potenze di benchmark continuano ad assumere valori elevati.

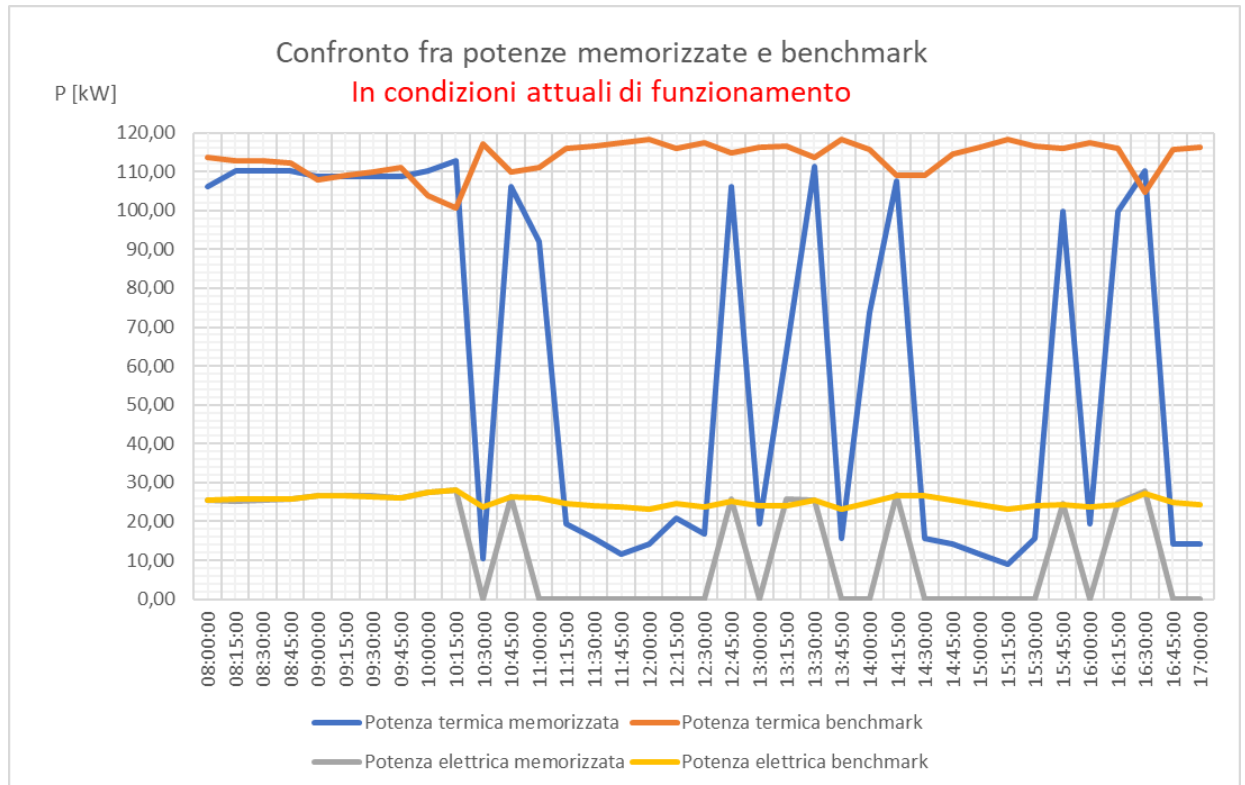


Figura 2.15: confronto fra le potenze effettive e le potenze di riferimento.

Una volta determinate le potenze, è possibile calcolare le energie corrispondenti date dal prodotto delle potenze per l'unità di tempo, in cui esse sono costanti:

$$E_{termica/elettrica} = P_{termica/elettrica} \cdot \Delta t \quad (2.10)$$

Sommando le energie nell'arco della giornata, si calcola il COP giornaliero della macchina.

L'efficienza di una pompa di calore è misurata dal coefficiente di prestazione COP (coefficient of performance), dato dal rapporto tra energia resa, ossia il calore ceduto all'ambiente da riscaldare, ed energia elettrica

consumata: più il COP è elevato e più la macchina è efficiente, ovvero è caratterizzata da un basso consumo.

$$COP = \frac{E_{termica}}{E_{elettrica}} \quad (2.11)$$

Utilizzando la formula sopra riportata, sono stati calcolati:

- $COP_{memorizzato}$, ossia il coefficiente di prestazione della pompa di calore nelle effettive condizioni di funzionamento;
- $COP_{benchmark\ su\ memorizzato}$, ossia il coefficiente di prestazione della pompa di calore nelle condizioni di banco prova.

Si ottengono i seguenti risultati:

Confronto fra i vari COP	
COP memorizzato	4,701
COP benchmark su memorizzato	4,517

Figura 2.16: confronto fra i COP nelle condizioni di effettivo funzionamento e nelle condizioni di banco prova.

2.4.2 Analisi nelle condizioni determinate dalla Climatica lineare

Si considerino le temperature di mandata e di ritorno determinate attraverso l'applicazione della formula Climatica lineare. In tale analisi, sono state calcolate dapprima le potenze elettriche e termiche che la macchina presenterebbe nelle condizioni reali di funzionamento, se tuttavia le temperature di mandata e di ritorno fossero calcolate con la formula Climatica lineare. Per tenere conto dei cicli ON – OFF della macchina, tuttavia, tali potenze sono state calcolate attraverso la seguente formula:

$$P_{termica/elettrica\ lineare} = \frac{P_{termica/elettrica\ memorizzata}}{P_{termica/elettrica\ benchmark}} \cdot P_{termica/elettrica\ benchmark\ (lineare)} \quad (2.12)$$

Attraverso il rapporto $\frac{P_{termica/elettrica\ memorizzata}}{P_{termica/elettrica\ benchmark}}$ si riesce a simulare il periodo temporale in cui la macchina è spenta poiché altrimenti, utilizzando e interpolando i soli dati delle schede tecniche, non si riuscirebbe a considerare tali periodi. Pertanto, in tale analisi sono state calcolate le seguenti grandezze:

- la potenza termica $P_{termica\ attesa\ (lineare)}$, che è stata determinata attraverso la formula 2.12 ed è la potenza che la macchina produrrebbe nelle condizioni reali di funzionamento se le temperature fossero calcolate attraverso la formula Climatica lineare;
- la potenza elettrica $P_{elettrica\ attesa\ (lineare)}$, che è stata determinata attraverso la formula 2.12 ed è la potenza elettrica che la macchina consumerebbe nelle condizioni reali di funzionamento se le temperature fossero calcolate attraverso la formula Climatica lineare;
- la potenza termica $P_{termica\ benchmark\ (lineare)}$, che è stata determinata attraverso la doppia interpolazione⁶ dei dati ricavati nelle schede tecniche ed è la potenza che la macchina produrrebbe nelle condizioni di banco prova se le temperature fossero calcolate attraverso la formula Climatica lineare;
- la potenza elettrica $P_{elettrica\ benchmark\ (lineare)}$, che è stata determinata attraverso la doppia interpolazione dei dati ricavati nelle schede tecniche ed è la potenza che la macchina consumerebbe nelle condizioni di banco prova se le temperature fossero calcolate attraverso la formula Climatica lineare.

⁶ Con il termine doppia interpolazione si fa riferimento ad una prima interpolazione per tener conto dell'effettiva temperatura di mandata ed una seconda interpolazione eseguita poiché si è considerata l'effettiva temperatura d'uscita della sorgente.

È possibile osservare nel grafico di seguito riportato come differiscono le potenze attese con le potenze di benchmark.

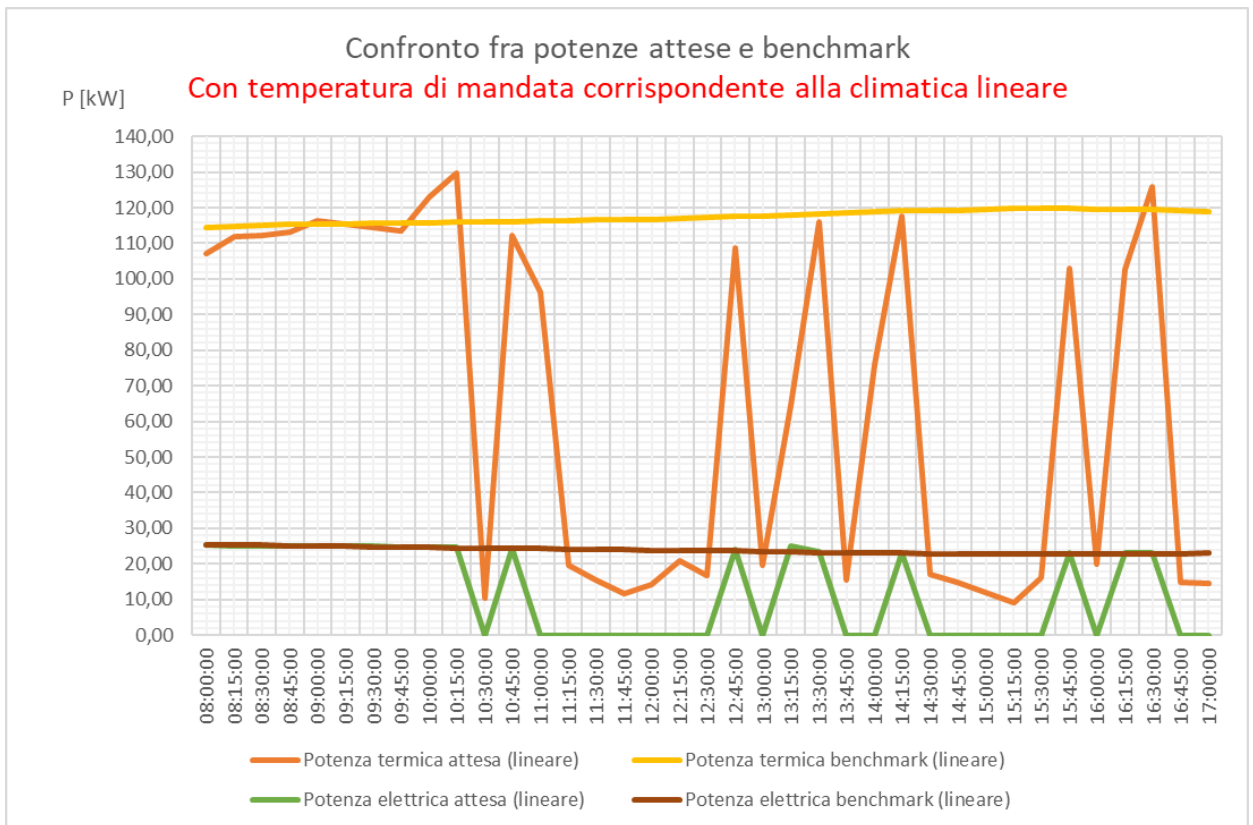


Figura 2.17: confronto fra le potenze effettive e le potenze di riferimento.

Sommando le energie nell'arco della giornata, si calcola il COP giornaliero della macchina. Si è effettuato il confronto fra i coefficienti di prestazione, che la macchina presenterebbe nelle seguenti condizioni di funzionamento:

- $COP_{atteso (lineare)}$, ossia il coefficiente di prestazione che la pompa di calore presenterebbe nelle reali condizioni di funzionamento se le temperature di mandata e di ritorno fossero calcolate attraverso la formula Climatica lineare;
- $COP_{benchmark su atteso}$, ossia il coefficiente di prestazione che la pompa di calore presenterebbe nelle condizioni di banco prova se le temperature di mandata e di ritorno fossero calcolate attraverso la formula Climatica lineare.

Si ottengono i seguenti risultati:

Confronto fra i vari COP	
COP atteso (lineare)	5,242
COP benchmark su atteso	4,944

Figura 2.18: confronto fra i COP nelle condizioni di effettivo funzionamento e nelle condizioni di banco prova.

2.4.3 Analisi nelle condizioni determinate dalla Climatica esponenziale

Si considerino le temperature di mandata e di ritorno determinate attraverso l'applicazione della formula Climatica esponenziale. In tale analisi, sono state calcolate dapprima le potenze elettriche e termiche che la macchina presenterebbe nelle condizioni reali di funzionamento, se tuttavia le temperature di mandata e di ritorno fossero calcolate con la formula Climatica esponenziale. Per tenere conto dei cicli ON – OFF della macchina, tuttavia, tali potenze sono state calcolate attraverso una formula identica alla formula 2.12 con l'unica differenza che il rapporto $\frac{P_{termica/eletrica\ memorizzata}}{P_{termica/eletrica\ benchmark}}$, grazie al quale si tiene conto dei cicli OFF della macchina, è moltiplicato per $P_{termica/eletrica\ benchmark\ (esponenziale)}$.

Pertanto, in tale analisi sono state calcolate le seguenti grandezze:

- la potenza termica $P_{termica\ proposta\ (esponenziale)}$, che è stata determinata attraverso la formula sopra descritta ed è la potenza che la macchina produrrebbe nelle condizioni reali di funzionamento se le temperature fossero calcolate attraverso la formula Climatica esponenziale;
- la potenza elettrica $P_{elettrica\ proposta\ (esponenziale)}$, che è stata determinata attraverso la formula sopra descritta ed è la potenza elettrica che la macchina consumerebbe nelle condizioni reali di funzionamento se le temperature fossero calcolate attraverso la formula Climatica esponenziale;
- la potenza termica $P_{termica\ benchmark\ (esponenziale)}$, che è stata determinata attraverso la doppia interpolazione dei dati ricavati nelle

schede tecniche ed è la potenza che la macchina produrrebbe nelle condizioni di banco prova se le temperature fossero calcolate attraverso la formula Climatica esponenziale;

- la potenza elettrica $P_{elettrica\ benchmark\ (esponenziale)}$, che è stata determinata attraverso la doppia interpolazione dei dati ricavati nelle schede tecniche ed è la potenza che la macchina consumerebbe nelle condizioni di banco prova se le temperature fossero calcolate attraverso la formula Climatica esponenziale.

È possibile osservare nel grafico di seguito riportato, come differiscono le potenze che effettivamente si hanno se la macchina seguisse la Climatica esponenziale con le potenze di benchmark.

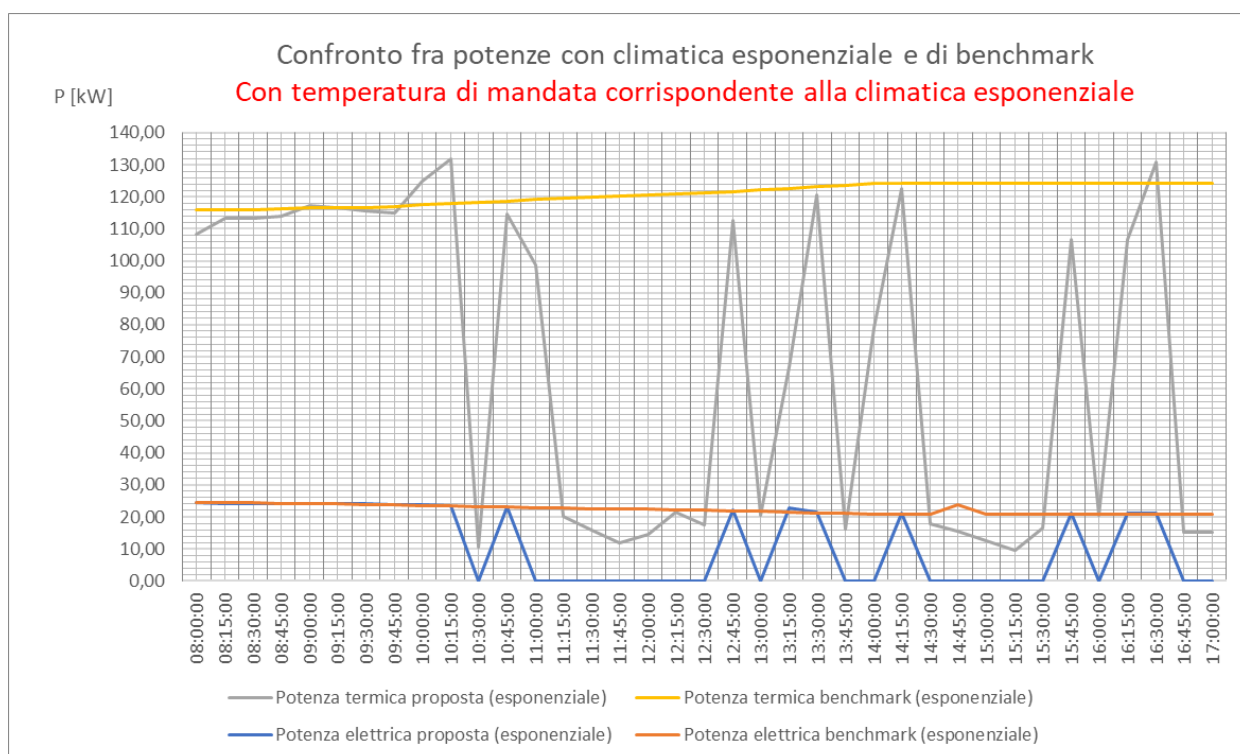


Figura 2.19: confronto fra le potenze effettive e le potenze di riferimento.

Sommando le energie nell'arco della giornata, si calcola il COP giornaliero della macchina. Si è effettuato il confronto fra i coefficienti di prestazione, che la macchina presenterebbe nelle seguenti condizioni di funzionamento:

- $COP_{proposto\ (esponenziale)}$, ossia il coefficiente di prestazione che la pompa di calore presenterebbe nelle reali condizioni di

funzionamento se le temperature di mandata e di ritorno fossero calcolate attraverso la formula Climatica esponenziale;

- $COP_{benchmark\ su\ proposto}$, ossia il coefficiente di prestazione che la pompa di calore presenterebbe nelle condizioni di banco prova se le temperature di mandata e di ritorno fossero calcolate attraverso la formula Climatica esponenziale.

Si ottengono i seguenti risultati:

Confronto fra i vari COP	
$COP_{proposto\ (esponenziale)}$	5,705
$COP_{benchmark\ su\ proposto}$	5,441

Figura 2.20: confronto fra i COP nelle condizioni di effettivo funzionamento e nelle condizioni di banco prova.

2.4.4 Confronto finale e risultati ottenuti

L'obiettivo di tale analisi, quindi, è stato quello di ricavare una temperatura di mandata, che fosse minore di quella in esercizio nella macchina, ma che contemporaneamente consentisse ai terminali in ambiente di riscaldare in maniera ottimale l'ambiente desiderato. Tuttavia, si è dovuto verificare che con tale temperatura la pompa di calore fornisse delle prestazioni migliori, in modo tale da far sì che la proposta di utilizzo della formula Climatica esponenziale fosse conveniente ai fini di un miglioramento dell'efficienza della macchina.

Nel grafico sottostante è possibile osservare un confronto fra le potenze termiche ed elettriche, che la macchina produrrebbe e consumerebbe nel caso in cui la temperatura di mandata fosse pari a quella memorizzata, a quella determinata dalla Climatica esponenziale o a quella calcolata con la formula Climatica lineare.

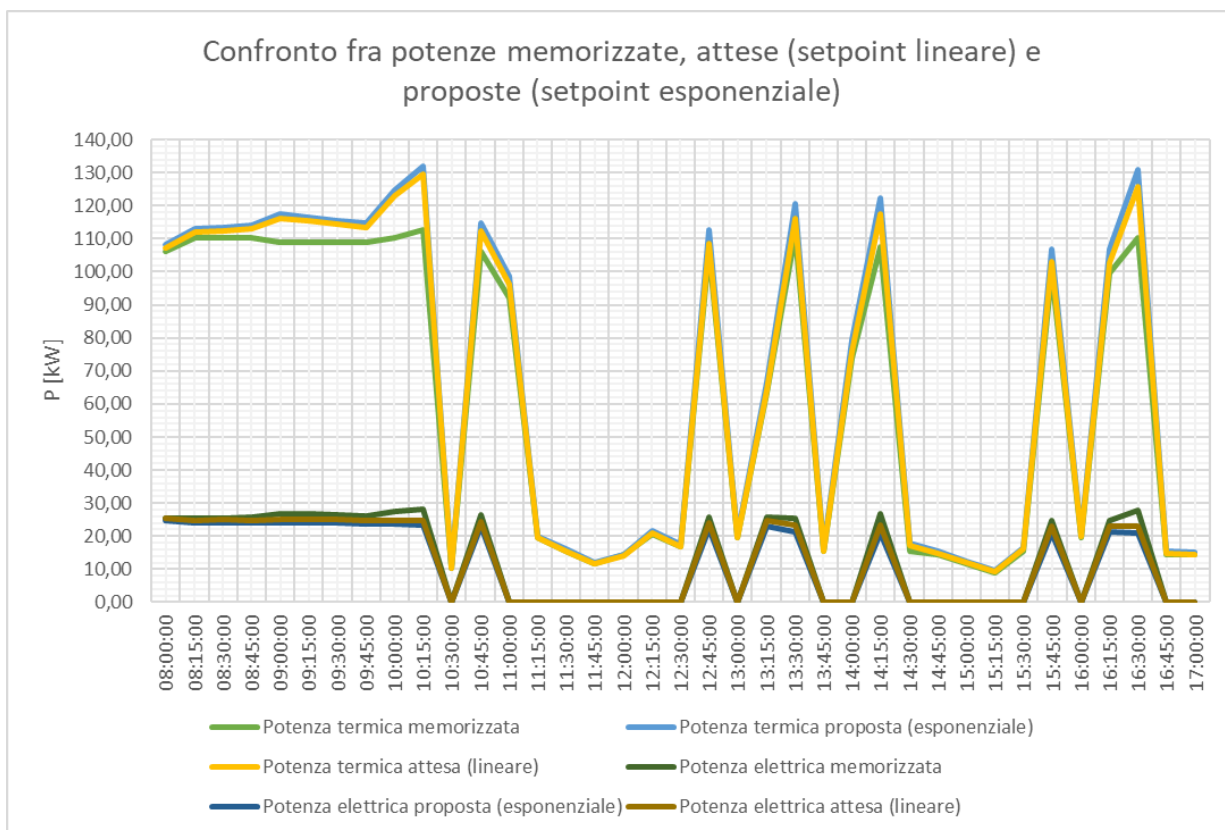


Figura 2.21: confronto fra le potenze termiche ed elettriche ricavate.

Da tale grafico si evince come la potenza termica, che è fondamentale ricordare sia al numeratore nella formula del COP, sia maggiore nel caso in cui la macchina presentasse una temperatura di mandata determinata dalla Climatica esponenziale. Inoltre, si nota che la potenza elettrica, che è presente al denominatore della formula del COP, sia maggiore nelle condizioni di funzionamento effettivo della macchina, mentre sarebbe minore nel caso in cui la pompa di calore presentasse una temperatura di mandata calcolata con la Climatica esponenziale.

Pertanto, si avrà che quest'ultima macchina presenta un COP maggiore rispetto alla macchina con una temperatura di mandata determinata dalla Climatica lineare o rispetto alla macchina nelle condizioni attuali di

funzionamento. Ciò è sintetizzato nella tabella sottostante, in cui sono confrontati i tre COP descritti in precedenza.

Confronto fra i vari COP	
$COP_{\text{memorizzato}}$	4,701
$COP_{\text{atteso (lineare)}}$	5,242
$COP_{\text{proposto (esponenziale)}}$	5,705

Figura 2.22: confronto fra i COP determinati con le tre temperature di mandata considerate.

Con la proposta di utilizzo della temperatura di mandata determinata dalla Climatica esponenziale si ha un miglioramento dell'efficienza:

- del **17,6%** rispetto alla pompa di calore nelle condizioni effettive di funzionamento;
- del **8,1%** rispetto alla pompa di calore con una temperatura di mandata calcolata con la Climatica lineare.

CAPITOLO 3

3.Regolazione PID

3.1 Sistema di regolazione

I regolatori PID (proporzionale, integrale e derivativo) sono dei regolatori standard, che per mezzo di dispositivi di correzione come software d'ausilio, permettono di regolare i parametri del sistema entro ampi limiti.

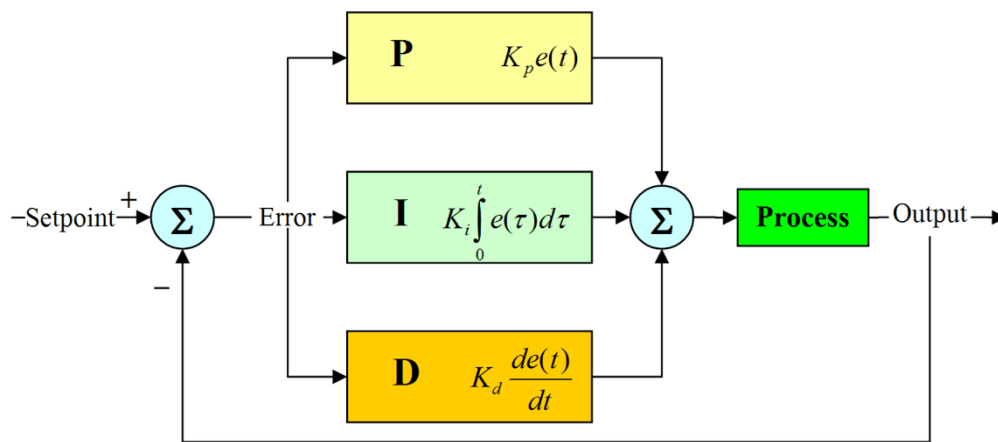


Figura 3.1: regolatore PID.

In generale, l'obiettivo di un'azione di regolazione può essere definito come quello di cercare di portare un sistema a comportarsi in un modo desiderato sulla base delle misure del suo stato attuale e agendo in modo opportuno.

Generalmente, dovendo formalizzare il problema, l'obiettivo viene espresso da un insieme di valori di riferimento di certe variabili, dette *variabili da controllare*, mentre le azioni si attuano conferendo certi valori ad altre variabili, dette *variabili di controllo*, sulla base dell'errore evidenziato dal confronto tra obiettivo e situazione attuale. Il controllore, quindi, deve determinare il valore da attribuire alle variabili di controllo in modo tale che l'andamento delle variabili controllate sia, malgrado l'influenza di disturbi imprevedibile, il più possibile simile a quello desiderato. La presenza di incertezza nella modellizzazione e di disturbi non misurabili nel sistema da controllare spesso impone che l'obiettivo possa essere raggiunto solo attraverso lo schema della retroazione.

Lo schema generale di una regolazione è il seguente, riportato nella figura sottostante.

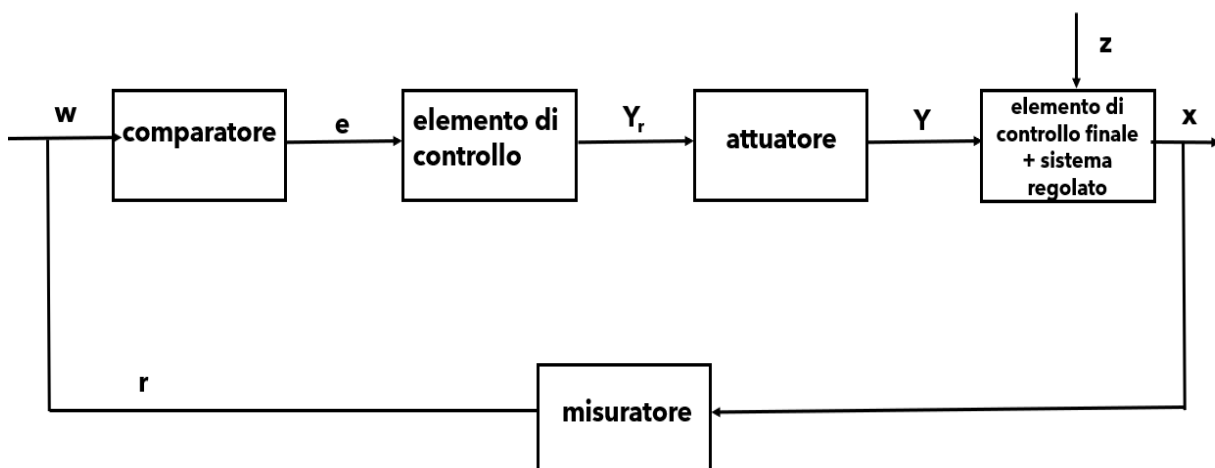


Figura 3.2: schema generale di una regolazione.

In tale figura è riportato un *comparatore*, in cui si ha il confronto fra “w”, che è il *set point*, ossia il valore ideale che la grandezza regolata dovrebbe assumere in quel momento e il valore della grandezza da regolare. La differenza fra queste due grandezze è “e”, che è la *differenza di regolazione*, che viene analizzata nell’*elemento di controllo*. L’elemento di controllo analizza la differenza di regolazione come variabile d’ingresso e ne ricava la “Y_r”, ossia la *variabile d’uscita del regolatore*, che influenza direttamente la grandezza regolata. Il modo in cui l’elemento di controllo determina la variabile d’uscita del regolatore in base alla differenza di regolazione è il criterio principale della regolazione. Infine, vi è “z”, che è la *grandezza di disturbo*, che interferisce involontariamente sulla grandezza regolata allontanandola dal set point ideale; “r” è la *variabile di reazione*, ossia la grandezza che viene continuamente controllata per poter reagire a variazioni indesiderate. Infine, “x” è la *grandezza regolata* ed è il reale obiettivo della regolazione.

3.2 Obiettivi di un sistema di regolazione

Gli obiettivi, che un buon sistema di regolazione deve garantire, sono molteplici, tra i quali i fondamentali sono:

- *stabilità*: il regolatore deve essere in grado di smorzare le oscillazioni del processo e di costituire un sistema stabile in anello chiuso.
- *Errore nullo a regime*: è necessario che il regolatore faccia sì che la variabile di processo eguagli a regime il set point impostato.
- *Rapidità di risposta alle variazioni di set point*: il regolatore deve essere in grado di abbreviare il più possibile ampiezza e frequenza delle oscillazioni della variabile di processo attorno al set point durante il transitorio.
- *Robustezza contro le non linearità, contro le variazioni parametriche e contro il rumore*: è necessario che il regolatore sia in grado di fornire prestazioni non troppo degradate a fronte delle problematiche elencate.
- *Moderazione nelle variazioni della variabile di controllo*: è preferibile che il regolatore generi un andamento non troppo oscillante per le variabili di controllo in modo da non sollecitare troppo bruscamente gli organi di comando che andrebbero altrimenti incontro a precoce usura.

3.3 Dai sistemi ON – OFF ai sistemi di regolazione PID

Per gli obiettivi elencati nel sottoparagrafo precedente si è avuto nel corso degli anni il passaggio da sistemi ON – OFF ai sistemi di regolazione PID.

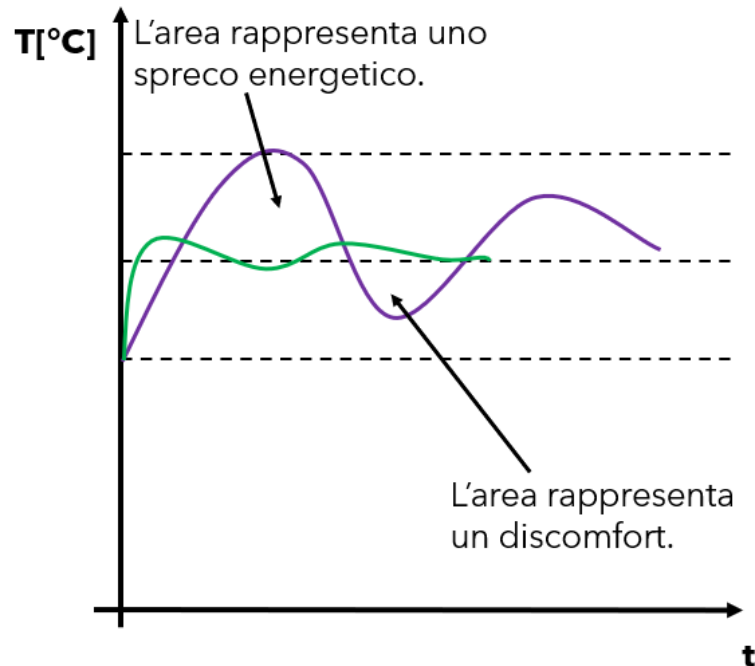


Figura 3.3: utilizzo di sistemi di regolazione ON – OFF e PID.

Analizzando questo grafico, posto come esempio, si nota come la regolazione PID faccia sì che a mano a mano che si leggano i dati, ossia campionando le misure nel tempo, la temperatura sia sempre più costante, in modo tale da garantire molto meno sprechi e discomfort.

3.4 Algoritmo PID

Il PID è una logica autoadattiva, cioè sostanzialmente a mano a mano che il sistema continua a funzionare, prende i dati, li campiona, li elabora e va a tarare il sistema nel migliore dei modi.

L'algoritmo PID trova la sua applicazione nell'ambito del controllo di processi descritti da una delle due seguenti funzioni:

1. $P_1(s) = \frac{\mu e^{-s\theta}}{(1+sT_1)(1+sT_2)}$, funzione che controlla i *processi stabili o autoregolanti*.

2. $P_2(s) = \frac{\mu e^{-s\theta}}{s(1+sT_1)}$, funzione che controlla i *processi non autoregolanti*.

In tale analisi risulta cruciale il valore del rapporto $\tau = \frac{\theta}{T_1}$, detto *rapporto di controllabilità*, tra il *ritardo puro* θ e la *costante di tempo* T_1 : perché il processo sia efficacemente controllabile attraverso un algoritmo PID è opportuno che:

$$\frac{\theta}{T_1} \leq 1 \quad (3.1)$$

La formulazione più classica dell'algoritmo PID è costituita dalla semplice relazione, espressa nel dominio del tempo:

$$u(t) = k_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (3.2)$$

Ove si ha:

- $u(t)$ è il valore della variabile di controllo all'istante t ;
- $e(t) = y^0(t) - y(t)$ è il valore della deviazione (errore) tra

set point e variabile da controllare all'istante t ;

mentre i diversi coefficienti prendono rispettivamente i nomi di:

- k_p *guadagno proporzionale*;
- T_i *costante di tempo dell'azione integrale*;
- T_D *costante di tempo dell'azione derivativa*.

Si possono, pertanto, rappresentare graficamente le tre componenti, precedentemente descritti.

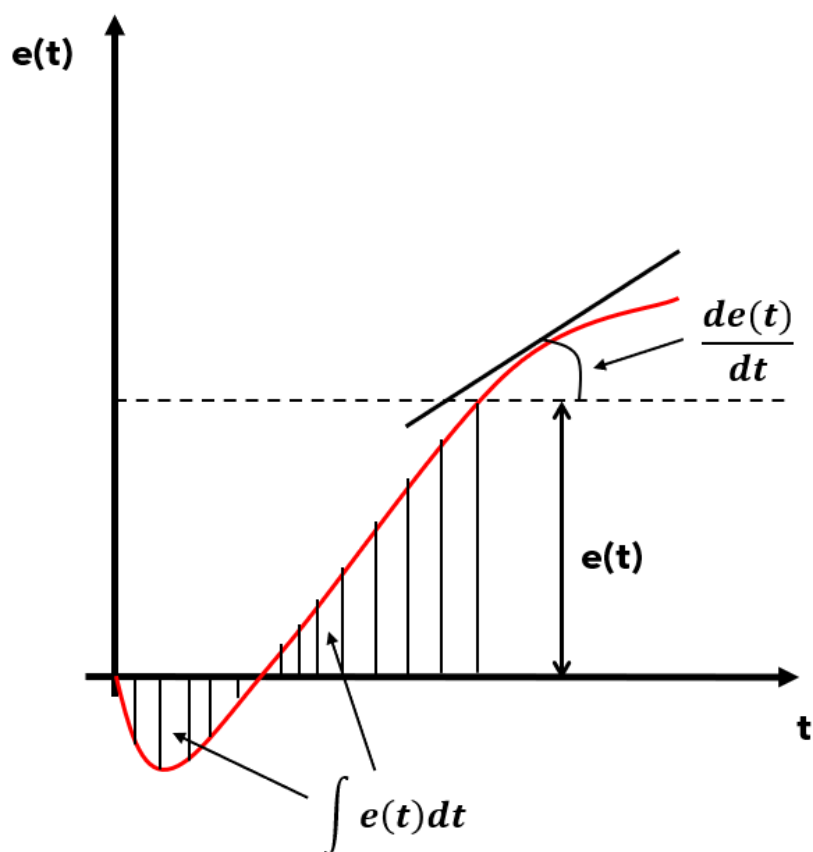


Figura 3.4: rappresentazione grafica delle tre componenti di errore.

Come si può notare, pertanto, l'azione di controllo all'istante t viene compiuta come somma di tre contributi:

$$u(t) = u_p(t) + u_i(t) + u_d(t) \quad (3.3)$$

3.5 Azione proporzionale

L'azione proporzionale, variando linearmente con l'errore attraverso il coefficiente di proporzionalità K_p , risulta la componente più sensibile al valore attuale dell'errore. Un valore elevato di K_p comporterà una reazione considerevole anche per modeste variazioni del valore dell'errore, mentre un valore basso trasferirà sulla variabile di controllo variazioni contenute anche in presenza di errori rilevanti.

Quindi, per determinare il guadagno proporzionale K_p , si consideri il legame tra ingresso e uscita di un regolatore puramente proporzionale, come mostrato nella figura di seguito riportata, per due valori diversi di guadagno, ove l'ingresso e l'uscita sono rappresentate come percento del loro campo di variazione.

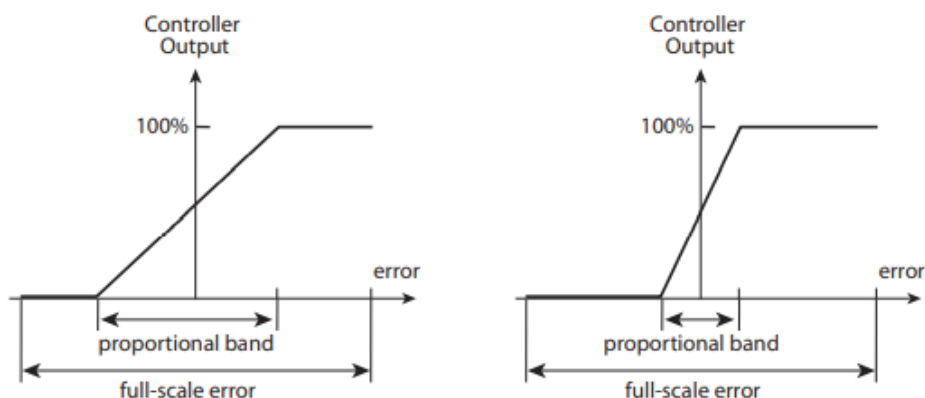


Figura 3.5: determinazione della banda proporzionale.

Nelle realizzazioni commerciali il parametro sul quale agire non è K_p , ma PB, detto *banda proporzionale*, tale che:

$$k_p = \frac{100}{PB\%} \quad (3.4)$$

Si definisce la banda proporzionale come la variazione dell'ingresso, in percento al suo campo di variazione, che comporta la variazione del 100% dell'uscita.

In definitiva, l'azione proporzionale obbedisce alla logica per la quale più grande è l'errore, istante per istante, più intensa è l'azione sul processo per portare la variabile controllata al valore desiderato. È importante osservare che tale azione è diversa da zero se e solo se l'errore è diverso da zero: pertanto, idealmente, a regime è nulla. In realtà, in una condizione di regime essa seguirà le fluttuazioni della variabile controllata dovute per esempio ai rumori di misura, e si può notare che può non arrivare da sola a raggiungere il set point, pur mantenendo una deviazione dallo stesso. L'azione proporzionale fornisce il suo contributo nelle fasi iniziali dei transitori e successivamente, quando l'errore diventa piccolo, finisce per perdere di efficacia.

3.6 Azione integrale

L'azione integrale, variando linearmente con l'integrale dell'errore attraverso il coefficiente di proporzionalità $\frac{k_p}{T_i}$, risulta la componente più adatta a tenere conto dell'andamento avuto dall'errore in passato. Un valore più basso di T_i darà, quindi, importanza maggiore a ciò che è già passato, mentre un valore più elevato abbasserà il peso dell'integrale e quindi trasferirà sulla variabile di controllo variazioni maggiormente dipendenti dal valore attuale dell'errore. In ipotetiche condizioni di errore costante, la componente integrale aumenta linearmente con il trascorrere del tempo, e quindi, dopo T_i secondi, eguaglierà quella proporzionale.

Con $e(t) = \bar{e}$, infatti, risulta:

$$\frac{k_p}{T_i} \int_0^{T_i} \bar{e} dt = \frac{k_p}{T_i} T_i \bar{e} = k_p \bar{e} \quad (3.5)$$

In definitiva, aumentando il valore del tempo dell'azione integrale T_i , la macchina raggiunge il set point più lentamente, ma evita eccessive oscillazioni. L'azione integrale serve a garantire che a regime l'errore sia nullo e non vada a zero se non vi è errore; anzi, se ad esempio l'errore rimane fisso, essa continua ad aumentare linearmente. Quindi, l'azione integrale non tiene conto del solo valore attuale, istantaneo dell'errore, bensì anche del suo passato. Pertanto, se si riesce ad andare a regime, cioè ad annullare l'errore, il controllo alla fine sarà fatto soltanto dall'azione integrale. Di conseguenza, è l'azione integrale che governa in maniera predominante il modo in cui il sistema va a regime. L'azione integrale per definizione non fa "salti" e, pertanto, è la meno pronta a reagire, ossia non partecipa quasi per nulla nelle fasi iniziali dei transitori, in cui sono predominanti le altre due azioni.

Per definire il tempo dell'azione integrale, si consideri l'azione P.I.
 $u(t) = k_p e(t) + k_I \int e(t) dt$ e la risposta di due termini al gradino unitario.

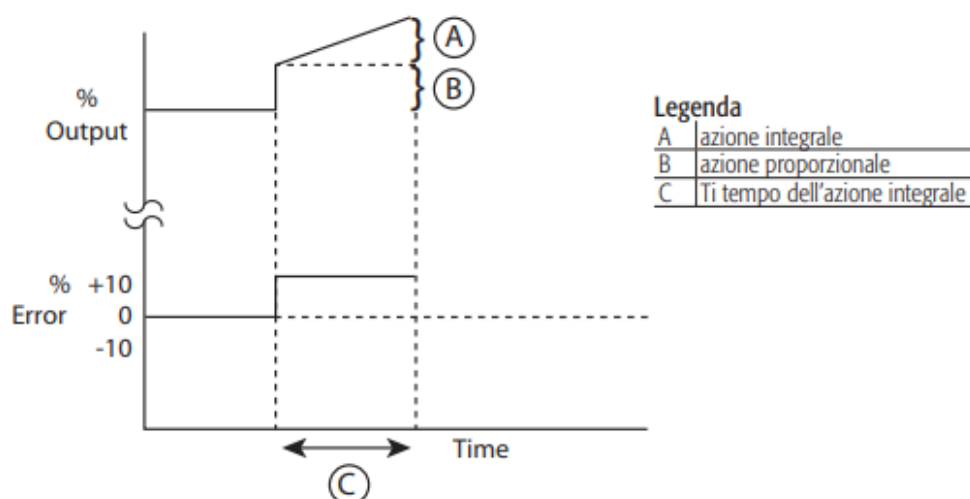


Figura 3.6: determinazione del tempo integrale.

Si definisce *tempo dell'azione integrale* (reset time) l'intervallo di tempo necessario perché la risposta della parte integrale sia uguale a quella della parte proporzionale.

3.7 Azione derivativa

L'azione derivativa, variando linearmente con la derivata dell'errore attraverso il coefficiente di proporzionalità $k_p T_D$, risulta essere la componente in grado di tenere conto della tendenza attuale dell'errore. Pertanto, valori più elevati di T_D daranno maggiore peso a quello che sembra essere l'andamento futuro dell'errore, conferendo quindi maggiore prontezza all'algoritmo, mentre valori più bassi trasferiranno sulla variabile di controllo variazioni più contenute.

Si noti, pertanto, che un T_D elevato risulta del tutto inadeguato se poi l'errore non varia quasi linearmente per i prossimi T_D secondi: se, infatti, non è $e(t + T_D) - e(t) \approx T_D \frac{de}{dt}$, l'azione derivativa induce un'azione di controllo errata. Si deve, quindi, cercare di tarare T_D di ampiezza pari all'intervallo di tempo entro il quale non è ragionevolmente lecito aspettarsi variazioni significative della tendenza (derivata) della variabile da controllare, e quindi dell'errore.

In ipotetiche condizioni di errore che varia linearmente, la componente proporzionale varia anch'essa linearmente con il trascorrere del tempo e quindi, dopo T_D secondi, eguaglierà il valore di quella derivativa.

In definitiva, aumentando il valore del tempo dell'azione derivativa T_D , diminuiscono le oscillazioni, ma possono sorgere vibrazioni attorno al set point. L'azione derivativa fa dipendere il controllo dal "futuro" dell'errore, cioè dalla direzione in cui esso si muove e dalla velocità con cui varia. Infatti, l'azione derivativa calcola una stima dell'errore che si compirà dopo Δt secondi sull'andamento della curva all'istante t e fa così dipendere il controllo da una sorta di predizione dell'errore T_D istanti di tempo in avanti. L'azione derivativa è la più pronta a reagire e aiuta solo se la predizione è buona, ossia se T_D non è troppo grande rispetto alle dinamiche temporali dell'errore.

L'azione derivativa è idealmente nulla a regime, ove in realtà però segue e tende ad amplificare il rumore di misura: aiuta, pertanto, solo nelle fasi iniziali dei transitori. Tale azione risulta essere molto pericolosa soprattutto se la misura della variabile controllata è rumorosa.

Bisogna, tuttavia, considerare alcuni accorgimenti sull'azione derivativa, che può giocare un ruolo utile, ma anche indesiderato. Una variazione anche minima ma a gradino del set point, si traduce infatti in una variazione a gradino dell'errore, che venendo derivato, trasferisce sulla variabile di controllo una componente impulsiva, ovvero un'eccessiva escursione per il solo fatto di aver variato di poco il set point. Per questo motivo si può filtrare il set point, ma ancora meglio si applica la componente derivativa direttamente sulla variabile di processo, cambiata di segno. In tal modo, una variazione a gradino del riferimento da seguire non verrà derivata, mentre si riesce comunque a tenere conto della tendenza della variabile da controllare.

Si possono, quindi, riportare i comportamenti delle tre azioni al variare dell'errore.

Errore	Azione proporzionale	Azione integrale	Azione derivativa
Costante	Costante	Aumenta linearmente	Nulla
Linearmente in aumento	Linearmente in aumento	Aumenta in modo parabolico (il suo tasso di crescita aumenta linearmente)	Costante positiva
Linearmente in diminuzione	Linearmente in diminuzione	Diminuisce in modo parabolico (il suo tasso di decremento diminuisce linearmente)	Costante negativa
Costantemente nullo	Costantemente nulla	Costante	Nulla

Tabella 3.1: andamento delle tre componenti in funzione di quello dell'errore.

3.8 Peso sul set point

L'introduzione di un coefficiente moltiplicativo, detto "peso", sul set point consente di disporre di un ulteriore parametro utile per migliorare le prestazioni di inseguimento senza degradare quelle di reiezione del disturbo sul carico. In questo modo l'espressione della variabile di controllo diviene:

$$U(s) = k_p \cdot \left(bR(s) - Y(s) + \frac{1}{sT_i} E(s) + sT_d E(s) \right) \quad (3.6)$$

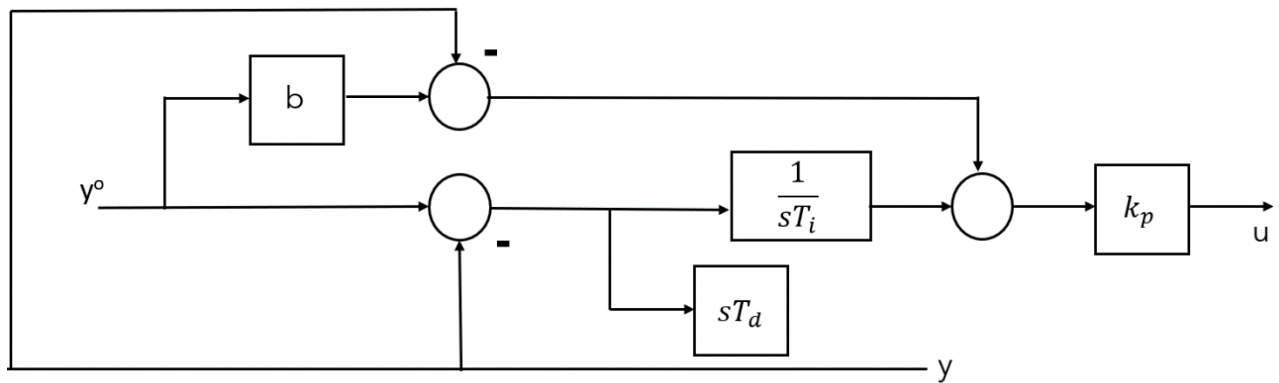


Figura 3.7: presenza del peso sul set point.

Ne segue che, indicate con $P(s)$ la funzione di trasferimento di processo e con $D(s)$ la trasformazione di Laplace del disturbo sul carico, le funzioni di trasferimento tra variabile da controllare e set point e tra variabile da controllare e disturbo sono:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{k_p \cdot \left(b + \frac{1}{sT_i} + sT_d \right) \cdot P(s)}{1 + C(s)P(s)} \quad (3.7)$$

$$\frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{P(s)}{1 + C(s)P(s)} \quad (3.8)$$

$$C(s) = k_p \cdot \left(b + \frac{1}{sT_i} + sT_d \right) \quad (3.9)$$

Il parametro b consente, quindi, di differenziare l'azione del regolatore che può essere tarato con particolare attenzione ai disturbi sul carico ed essere poi "corretto" attraverso una sua opportuna sintonia. Normalmente b assume valori compresi tra 0 e 1. Si intuisce come per $b = 1$ si abbia un normale PID, mentre per valori decrescenti di b si abbatte il peso sul set point e, quindi, si hanno risposte più smorzate e con meno sovra elongazioni.

3.9 Formulazione a due gradi di libertà

La versione standard ISA prevede sia con gli accorgimenti sull'azione derivativa che il peso sul set point, secondo la formulazione seguente:

$$U(s) = k_p \cdot \left(E_p(s) + \frac{1}{sT_i} E(s) + \frac{sT_d}{1 + \frac{sT_d}{N}} E_d(s) \right) \quad (3.10)$$

$$E_p(s) = bR(s) - Y(s) \quad (3.11)$$

$$E_d(s) = cR(s) - Y(s) \quad (3.12)$$

L'introduzione dei parametri b e c consente di progettare separatamente gli zeri forniti dal regolatore per l'inseguimento del set point da quelli per la reiezione dei disturbi sul carico. Ciò corrisponde a poter posizionare gli zeri della funzione di trasferimento in anello chiuso in modo indipendente dai suoi poli e, pertanto, si parla di architettura a due gradi di libertà.

Due rappresentazioni equivalenti di tale algoritmo di controllo sono:

$$C_{ff}(s) = \frac{U(s)}{R(s)} = k_p \cdot \left(b + \frac{1}{sT_i} + \frac{c \cdot sT_d}{1 + \frac{sT_d}{N}} \right) \quad (3.13)$$

$$C_{fb} = \frac{U(s)}{Y(s)} = k_p \cdot \left(1 + \frac{1}{sT_i} + \frac{sT_d}{1 + \frac{sT_d}{N}} \right) \quad (3.14)$$

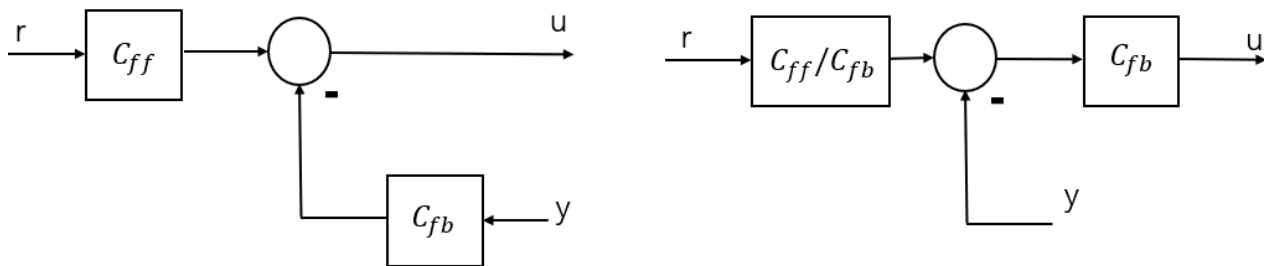


Figura 3.8: rappresentazioni equivalenti di tale algoritmo di controllo.

3.10 Tecniche di taratura

Da quanto visto fino ad ora appare chiaro come la struttura degli algoritmi PID sia piuttosto definita e, quindi, come le prestazioni del regolatore siano determinate essenzialmente dal valore dei parametri.

Aumento di	Rapidità della risposta	Stabilità della risposta
k_p	Aumenta	Diminuisce
T_i	Diminuisce	Aumenta
T_d	Aumenta	Aumenta (in condizioni ideali di rumore nullo)

Tabella 3.2: influenza dei parametri sul tipo di transitorio per un algoritmo PID.

Allo stesso scopo ci si può avvalere anche di mappe qualitative come gli andamenti riportati nella figura sottostante.

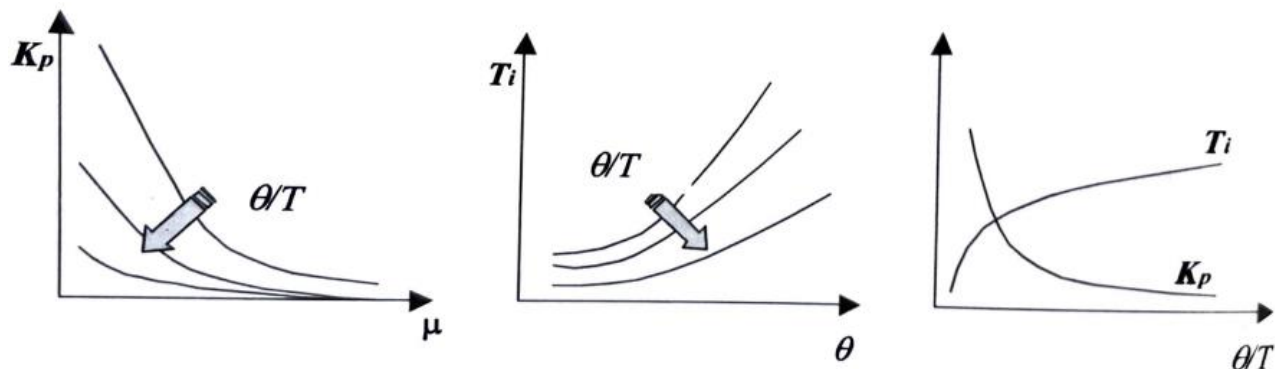


Figura 3.9: andamenti qualitativi dei parametri per l'algoritmo.

Sebbene le considerazioni riportate possano essere di utilità nel trovare manualmente i valori dei parametri adatti per un dato sistema di controllo, è altresì evidente che una taratura manuale può essere onerosa in termini di tempo richiedendo in generale molte prove e inoltre, essendo lasciata esclusivamente all'abilità dell'operatore, può risultare ben lungi da soddisfare un certo criterio di ottimizzazione delle prestazioni. Per questo motivo è di aiuto avere a disposizione formule che consentano di determinare i parametri del regolatore sulla base della funzione di trasferimento stimata del processo da controllare.

Ciascuna metodologia di taratura è stata ottenuta in base a:

- la selezione di una certa famiglia di processi da controllare;
- la specifica di un certo criterio di progetto, ovvero l'assegnazione di certi requisiti per il sistema in anello chiuso.

Per scegliere, quindi, la metodologia più adatta si deve individuare l'obiettivo che si vuole ricavare con il regolatore:

1. inseguimento del set point;
2. reiezione dei disturbi sul carico;
3. sensibilità al rumore di misura;
4. sensibilità alle variazioni parametriche del processo.

Per il controllore PID considerato l'obiettivo da ottenere è quello dell'inseguimento del set point.

Si tenga presente che la funzione di trasferimento tra la variabile da controllare $Y(s)$ e il riferimento $R(s)$ vale nel caso si utilizzi un PID a due gradi di libertà (altrimenti si ha $C_{ff} = C_{fb} = C_{PID}$):

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{C_{ff}(s)P(s)}{1 + C_{fb}(s)P(s)} \quad (3.15)$$

I requisiti per il loop possono essere diversi ma, generalmente, nel caso di inseguimento del set point, importano il tempo di salita e l'ampiezza delle sovra elongazioni. In genere, se l'algoritmo è tarato sufficientemente bene, il tempo di salita del sistema in anello chiuso dovrebbe essere uguale alla metà del tempo morto ($\theta/2$).

Si intuisce, pertanto, come possano essere efficaci alcune cifre di merito che consentono di tenere conto sia del tempo di salita che dell'ampiezza delle sovra elongazioni. I più applicati risultano, infatti:

$ITE = \int te(t) dt$, che penalizza in uguale misura tempo di salita e sovra elongazioni.

$ITAE = \int t|e(t)| dt$, che penalizza in uguale misura tempo di salita e sovra/sotto elongazioni.

$ITSE = \int te^2(t) dt$, che risulta essere più severo per il tempo di salita.

$ISTE = \int t^2 e^2(t) dt$, che risulta essere più severo nei confronti dell'errore.

Questi funzionali assumeranno diversi valori a seconda dei parametri PID utilizzati. Il set di parametri in corrispondenza del quale essi assumono il valore minimo è quello che dà le migliori prestazioni agli effetti della cifra di merito prescelta.

3.10.1 Metodo di Haalman

Un tipo particolare di tecnica di cancellazione poli – zeri è quella proposta in Haalman. La funzione di trasferimento del regolatore viene ottenuta indirettamente specificando la funzione di trasferimento d'anello desiderata. Si impone cioè che sia:

$$L(s) = C(s)P(s) = \frac{2}{3\theta \cdot s} e^{-\theta s} \quad (3.16)$$

Ciò corrisponde ad avere una pulsazione critica $\omega_c = \frac{2}{3\theta}$ e un margine di fase $\varphi_m \approx 52^\circ$.

Si ha:

Taratura di Haalman	k_p	T_i	T_d
$P(s) = \frac{\mu}{(1 + sT_1)(1 + sT_2)} e^{-\theta s}$	$\frac{2(T_1 + T_2)}{3\mu\theta}$	$T_1 + T_2$	$\frac{T_1 \cdot T_2}{T_1 + T_2}$

Tabella 3.3: regole di taratura con il metodo di Haalman.

Poiché per θ piccolo la pulsazione critica può diventare troppo elevata rispetto alle prestazioni degli attuatori, si può modificare il guadagno proporzionale assegnando direttamente margine di fase o di guadagno. Si ottiene quando:

$$k_p = \frac{T_i}{\mu L} \left(\frac{\pi}{2} - \varphi_m \right) \rightarrow k_m = \frac{\pi}{2 \left(\frac{\pi}{2} - \varphi_m \right)} \quad (3.17)$$

$$k_p = \frac{\pi T_i}{2k_m \mu L} \rightarrow \varphi_m = \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{2k_m} \quad (3.18)$$

3.10.2 Tecniche CHR

Il metodo proposto in Chien, Hrones e Reswick cerca di soddisfare entrambe le esigenze di buone prestazioni nei confronti della risposta allo scarico sul set point e a quella ad un disturbo di additivo sul carico. La loro idea è stata quella di fornire indicazioni di taratura per avere una risposta rapida con un overshoot contenuto (al 20%) oppure la più rapida risposta ottenibile senza overshoot. Si definisce overshoot quando la variabile di controllo oltrepassa maggiormente di quanto desiderato il set point.

Le formule proposte sono espresse in funzione (oltre che di T e θ il cui rapporto si suppone variabile da 0,1 a 1) di due parametri che valgono:

- $a = \mu \frac{\theta}{T}$, $h = \theta$ per i modelli del primo ordine con ritardo;
- $a = \mu \frac{\theta+T}{T}$ e $h = \theta + T$ per modelli del primo ordine con integratore e ritardo.

integratore e ritardo.

Pertanto, si ottiene:

Per scalino sul set point	0 % Overshoot			20 % Overshoot		
	k_p	T_i	T_d	k_p	T_i	T_d
PID	$0,6/a$	θ	$0,5\theta$	$0,95/a$	$1,4 T$	$0,47 \theta$

Tabella 3.4: regole di taratura con il metodo CHR.

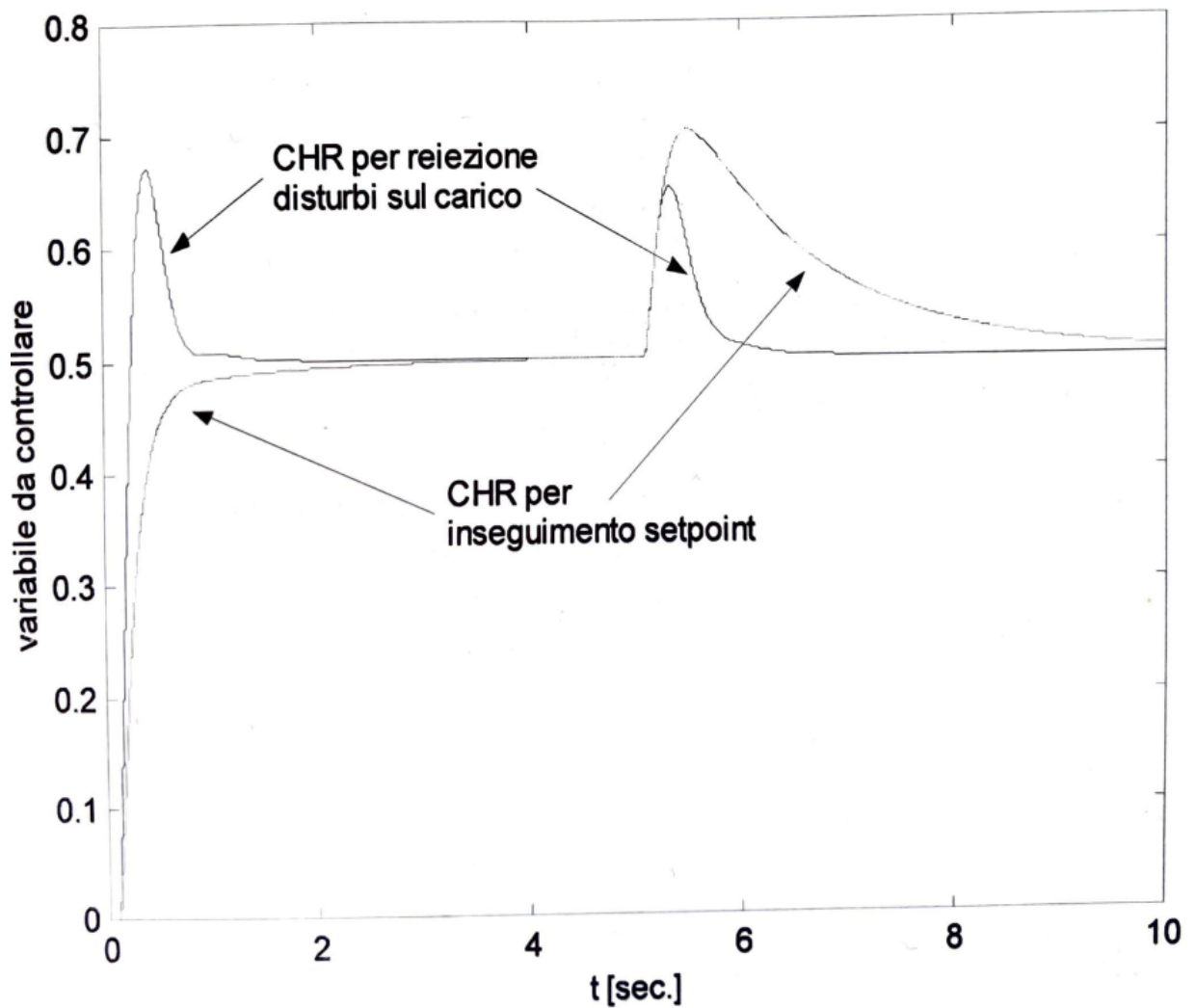


Figura 3.10: andamenti della risposta con il metodo CHR.

3.11 Tecniche di ottimizzazione

I metodi di ottimizzazione si basano sulla ricerca del miglior valore di una certa funzione dei parametri da sintonizzare, in questo caso quelli di un algoritmo PID. Come funzioni vengono scelte proprio le cifre di merito introdotte per la valutazione delle prestazioni del regolatore, che in tal caso è l'inseguimento del set point.

Questi funzionali assumono, infatti, diversi valori a seconda dei parametri PID utilizzati. Il set di parametri in corrispondenza del quale essi assumono il valore minimo è quello che viene scelto per la taratura dell'algoritmo. È chiaro come tale procedura possa attuarsi solo riuscendo ad esplicitare le espressioni delle cifre di

merito in funzione dei parametri del regolatore e di quelli del processo, per poi poterne calcolare il minimo attraverso uno studio delle sue derivate.

Alternativamente si può anche lanciare una procedura euristica di ricerca del minimo simulando ad ogni iterazione l'andamento del sistema in anello chiuso con un diverso valore dei parametri PID e salvandoli solo se il relativo valore assunto dalla cifra di merito prescelta risulta minore di quello associato ai parametri precedentemente salvati.

Si riportano qui di seguito i risultati reperibili in Zhuang, Atherton relativi all'ottimizzazione condotta sui due tipici criteri di valutazione attraverso ISE e ISTE.

Nel caso di processi autoregolanti (descritti da una funzione di trasferimento del primo ordine più ritardo) per i parametri dell'algoritmo PID si devono considerare le seguenti espressioni:

$$k_p = \frac{a_1}{\mu} \cdot \left(\frac{\theta}{T}\right)^{b_1}, T_i = \frac{T}{a_2 + b_2 \cdot (\theta/T)}, T_d = a_3 T \cdot (\theta/T)^{b_3} \quad (3.19)$$

ove i valori dei coefficienti sono riportati in tabella sottostante.

Parametri PID	$0 < \theta/T < 1$				$1 < \theta/T < 2$			
	Inseguimento set point		Reiezione disturbo sul carico		Inseguimento set point		Reiezione disturbo sul carico	
	ISE	ISTE	ISE	ISTE	ISE	ISTE	ISE	ISTE
a_1	1,260	1,053	1,473	1,468	1,295	1,120	1,524	1,515
b_1	-0,887	-0,930	-0,970	-0,970	-0,619	-0,625	-0,735	-0,730
a_2	0,701	0,736	1,115	0,942	0,661	0,720	1,130	0,957
b_2	-0,147	-0,126	-0,753	-0,725	-0,110	-0,114	-0,641	-0,598
a_3	0,357	0,349	0,550	0,443	0,378	0,350	0,552	0,444
b_3	0,886	0,907	0,948	0,939	0,756	0,881	0,851	0,847

Tabella 3.5: valori dei coefficienti per ottimizzazione ISE/ISTE.

Nel caso, invece, di processi non autoregolanti (o di tipo integrale) si possono usare le formule, proposte in [Visioli, 2001] e riportate nella tabella sottostante.

Parametri PID	Inseguimento set point		Reiezione disturbo sul carico	
	ISE	ISTE	ISE	ISTE
k_p	$1,03/\mu\theta$	$0,90/\mu\theta$	$1,37/\mu\theta$	$1,34/\mu\theta$
T_i	-	-	$1,49\theta$	$1,83\theta$
T_d	$0,49\theta$	$0,45\theta$	$0,59\theta$	$0,49\theta$

Tabella 3.6: valori ottimi dei parametri PID per processi integrali ($P(s) = \frac{\mu}{s} e^{-\theta s}$).

Per quanto riguarda le cifre di merito IAE e ITAE si riportano nella tabella sottostante le formule proposte in [Rovira et al., 1969] e in [Murril, 1967] relative ancora una volta ai processi di tipo FODT.

In tal caso i parametri dell'algoritmo PID vengono espressi nel seguente modo (T_i è espressa in due modi, il primo per inseguimento, mentre il secondo per reiezione disturbo sul carico):

$$k_p = \frac{a_1}{\mu} \left(\frac{T}{\theta}\right)^{b_1}, T_d = a_3 T \left(\frac{\theta}{T}\right)^{b_3} \quad (3.20)$$

$$T_i = \begin{cases} \frac{T}{a_2 - b_2 \theta/T} \\ \frac{T}{a_2} \left(\frac{\theta}{T}\right)^{b_2} \end{cases} \quad (3.21)$$

PID	min (IAE)		min (ITAE)	
	Inseguimento set point	Reiezione disturbo sul carico	Inseguimento set point	Reiezione disturbo sul carico
a_1	1,086	1,435	0,965	1,357
b_1	0,869	0,921	0,850	0,947
a_2	0,740	0,878	0,796	0,842
b_2	0,130	0,749	0,1465	0,738
a_3	0,348	0,482	0,308	0,318
b_3	0,914	1,137	0,929	0,995

Tabella 3.7: valori ottimi dei parametri PID per minimizzazione IAE/ITAE.

Un ottimo lavoro è anche quello di [Kaya, Scheib – 1988] che propongono le formule ottenibili dalla minimizzazione di IAE e ITAE differenziandole per tipo di algoritmo (però solo PID con azione derivativa filtrata) e per tipo di prestazione (inseguimento o reiezione del disturbo sul carico). Si ha, pertanto, che:

min (IAE)	PID – formulazione in serie		PID – formulazione in parallelo	
	Inseguimento set point	Reiezione disturbo sul carico	Inseguimento set point	Reiezione disturbo sul carico
a_1	0,65	0,98089	1,13031	1,31509
b_1	1,04432	0,76167	0,81314	0,8826
a_2	0,9895	0,91032	5,7527	1,2587
b_2	0,09539	1,05211	5,7241	1,3756
a_3	0,50814	0,59974	0,32175	0,5655
b_3	1,08433	0,89819	0,17707	0,4576
min (ITAE)	PID – formulazione in serie		PID – formulazione in parallelo	
	Inseguimento set point	Reiezione disturbo sul carico	Inseguimento set point	Reiezione disturbo sul carico
a_1	1,12762	0,77902	0,98384	1,3176
b_1	0,80368	1,06401	0,49851	0,7937
a_2	0,99783	1,14311	2,71348	1,12499
b_2	0,02860	0,70949	2,29778	1,42603
a_3	0,42844	0,57137	0,21443	0,49547
b_3	1,0081	1,03826	0,16768	0,41932

Tabella 3.8: valori ottimi dei parametri PID per minimizzazione IAE e ITAE

(per processi di tipo FOPDT con $0 < \theta/T < 1$).

3.12 Valvola a due vie

La regolazione PID è applicata alla valvola a due vie a monte dell'evaporatore. Si prenda in esame il seguente schema circuitale:

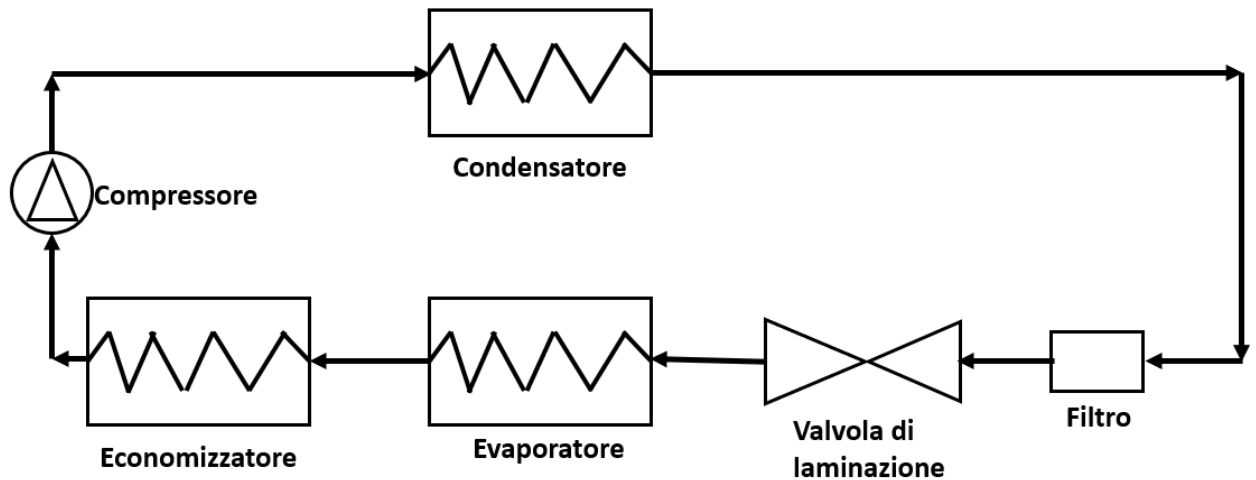


Figura 3.11: schema circuitale dell'impianto.

La valvola a due vie determina il grado di surriscaldamento, che è dato dalla differenza fra la temperatura di primo surriscaldamento e la temperatura di evaporazione. Tale differenza è impostata a 3 K e, pertanto, attraverso la regolazione PID si ha come obiettivo quello di ottenere un grado di surriscaldamento che raggiunga in maniera più veloce possibile il valore di set point e mantenga quest'ultimo valore per tutto il ciclo ON della pompa in esame.

3.13 Parametri di controllo del surriscaldamento

La regolazione del surriscaldamento si occupa di calcolare la posizione della valvola in base alla lettura del surriscaldamento e del relativo set point. La regolazione è di tipo PID (Proporzionale, Integrale, Derivativa).

- l'azione proporzionale (P) apre o chiude la valvola di k_p passi ogni volta che il surriscaldamento aumenta o diminuisce di 1 °C. Quindi maggiore è il valore di k_p maggiore sarà la velocità di reazione della valvola alle variazioni del surriscaldamento. L'azione proporzionale è fondamentale in quanto influenza in generale la rapidità di risposta della

valvola ma prende in considerazione solo la variazione del surriscaldamento, non tiene conto del relativo set point. Quindi se il surriscaldamento non varia sensibilmente la valvola rimarrà pressoché ferma e non è garantito il raggiungimento del set point del surriscaldamento.

- Azione integrale (I), caratterizzata dal parametro T_i , detto tempo integrale (sec): l'azione integrale è legata al tempo e fa muovere la valvola in proporzione alla distanza del surriscaldamento dal set point. Maggiore è la differenza, più intensa sarà l'azione integrale; minore è il tempo dell'azione integrale (T_i), più energica sarà l'azione integrale. L'azione integrale è necessaria affinché il surriscaldamento possa raggiungere il set point. Senza di essa, infatti, la sola azione proporzionale potrebbe far stabilizzare il surriscaldamento ad un valore diverso dal set point.

- Azione derivativa (D), caratterizzata dal parametro T_d , detto tempo derivativo (sec): l'azione derivativa è legata alla velocità di variazione del surriscaldamento, ovvero alla pendenza con la quale il surriscaldamento cambia da istante ad istante. Essa tende a contrastare le brusche variazioni del surriscaldamento, anticipando l'azione correttiva ed è tanto più energica quanto maggiore è il tempo T_d .

- Apertura valvola in partenza, definisce l'apertura percentuale alla quale la valvola si porta subito prima che inizi la regolazione del surriscaldamento e va impostata in modo che si avvicini alla posizione di lavoro normalmente assunta durante la regolazione. In prima approssimazione può essere valutata calcolando il rapporto tra la capacità frigorifera dell'evaporatore e quella della valvola. Una valvola da 10 kW installata in un evaporatore da 5 kW lavorerà presumibilmente al 50 % dell'apertura.

Considerato come detto che un minore surriscaldamento genera pendolazione ma assicura spesso maggiore resa, ogni variazione dei parametri dovrà avere come obiettivo il raggiungimento del miglior compromesso tra:

- l'abbassamento della temperatura di regolazione dell'utenza o un più rapido raggiungimento del set point di regolazione;
- la stabilità del sistema.
- l'assenza di ritorni di liquido al compressore.

In generale per non incorrere in problemi di regolazione che causino pericolo per il compressore sono state eseguiti i seguenti procedimenti:

- eseguire variazioni un parametro per volta;
- seguire l'andamento del surriscaldamento, della posizione valvola e delle temperature di regolazione dell'utenza per un periodo di almeno 10-30 min prima di decidere se una variazione ha migliorato o peggiorato la regolazione;
 - se necessario, prolungare il periodo durante la normale termostatazione abbassando temporaneamente il set point della temperatura dell'utenza per verificare meglio l'andamento del surriscaldamento;
 - verificare un set di parametri in tutte le condizioni di lavoro della macchina (avvio da fermata prolungata, termostatazione, sbrinamento, cambi eventuali di capacità frigorifera).

Per quel che riguarda i parametri di regolazione si riportano i range di variazione:

- guadagno proporzionale (**da 3 a 30**): l'aumento del guadagno proporzionale k_p aumenta la velocità di reazione della valvola ed è consigliato se il sistema è particolarmente perturbato o per velocizzare la regolazione del surriscaldamento. Se è elevato (>20) può causare pendolazioni ed instabilità.
- Tempo integrale (**da 40 a 400sec**): l'aumento del tempo integrale T_i migliora la stabilità ma rende la valvola più lenta nel raggiungere il set point del surriscaldamento. Se ridotto (40 sec) genera pendolazioni ed instabilità. Se il sistema è già perturbato si consigliano valori elevati (>150 sec) per evitare di ingenerare ulteriori perturbazioni.

- Tempo derivativo (**da 0 a 10 sec**): l'aumento del tempo derivativo T_d migliora la reattività della valvola in particolare in sistemi perturbati diminuendo l'ampiezza della pendolazione del surriscaldamento. Se elevato (>10 sec) può a sua volta generare eccesso di reattività e conseguente pendolazione.

3.14 Taratura dei parametri

Si è presa in esame la macchina Tina 115 presente nel sito di Mappano e si è analizzata durante le giornate del 03, 04, 05 e 09 novembre 2021. Si precisa fin da subito la procedura con cui si è effettuata l'analisi:

1. sono stati variati i parametri uno alla volta, considerando dapprima i loro valori estremi;
2. ogni set di parametri è stato valutato nell'arco temporale di mezz'ora in modo tale che il sistema avesse tempo a reagire alla variazione dei parametri;
3. si è applicato il teorema di Weierstrass per scegliere il valore da applicare dei parametri di regolazione;
4. si è valutato il set di parametri ottimale attraverso un'analisi degli andamenti delle temperature di evaporazione, temperature di primo surriscaldamento e il grado di surriscaldamento.

3.14.1 Prova 1

Si è analizzato, dapprima, un ciclo della macchina, in cui era stato impostato il seguente set di parametri del PID:

$$k_p = 15$$

$$T_i = 150 \text{ s}$$

$$T_d = 5 \text{ s}$$

Con tale set di parametri si è ricavato il grafico sottostante.

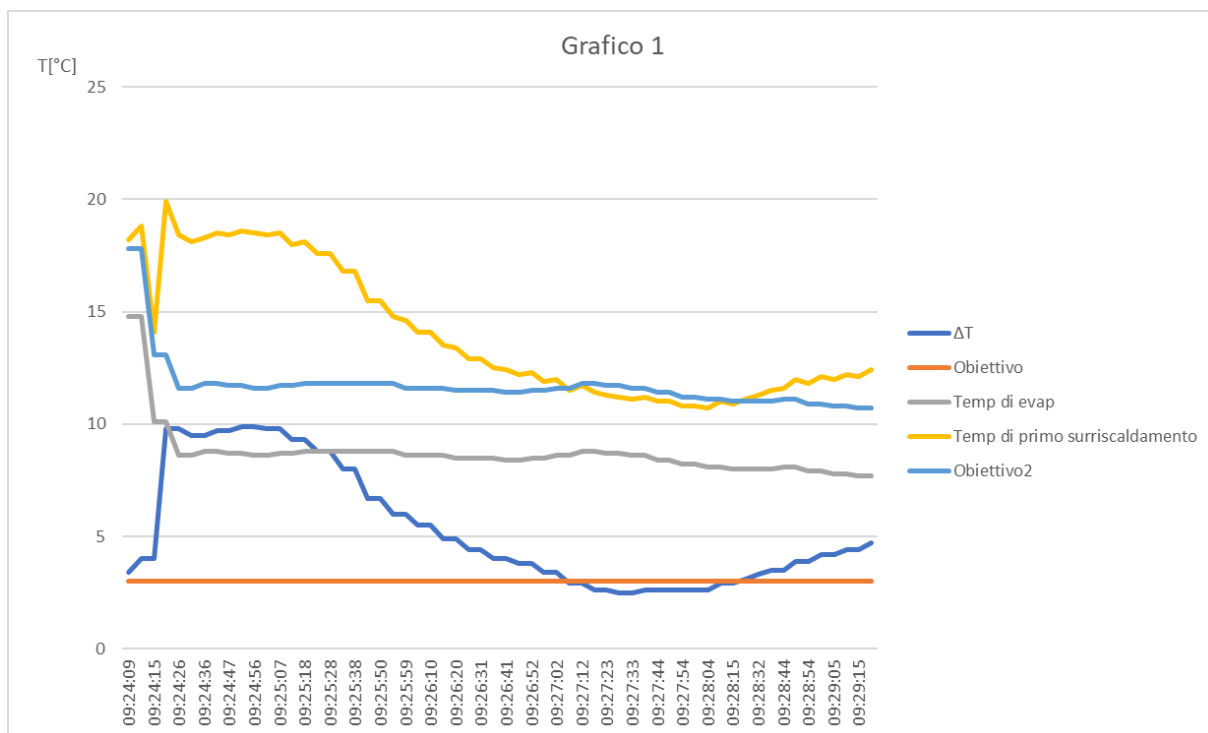


Figura 3.12: andamenti delle temperature scelte, ricavate durante la prova 1.

In tale grafico e nei successivi sono riportati gli andamenti delle seguenti grandezze:

- ΔT è il grado di surriscaldamento;
- la temperatura di evaporazione;
- la temperatura di primo surriscaldamento;
- con i termini “obiettivo” e “obiettivo 2” si indicano rispettivamente $3^{\circ}C$, ovvero il valore che il grado di surriscaldamento deve avere, e $T_{eva} + 3^{\circ}C$, ovvero il valore che la temperatura di primo surriscaldamento deve assumere.

Dal grafico, riportato in figura 3.12, si può osservare come il transitorio duri tre minuti circa e come il grado di surriscaldamento non arrivi mai ad essere pari a $3^{\circ}C$. Pertanto, si è deciso di variare i parametri del PID e dapprima, si è scelto di modificare il guadagno proporzionale, il cui range di variazione, riportato nella scheda tecnica della valvola, è pari a $3 \div 30$.

3.14.2 Prova 2

Dapprima, si è considerato il minimo valore che il guadagno proporzionale possa assumere, ossia 3, e si è lasciato costante il valore dei rimanenti parametri:

$$k_p = 3$$

$$T_i = 150 \text{ s}$$

$$T_d = 5 \text{ s}$$

Con tale set di parametri si è ricavato il seguente grafico.

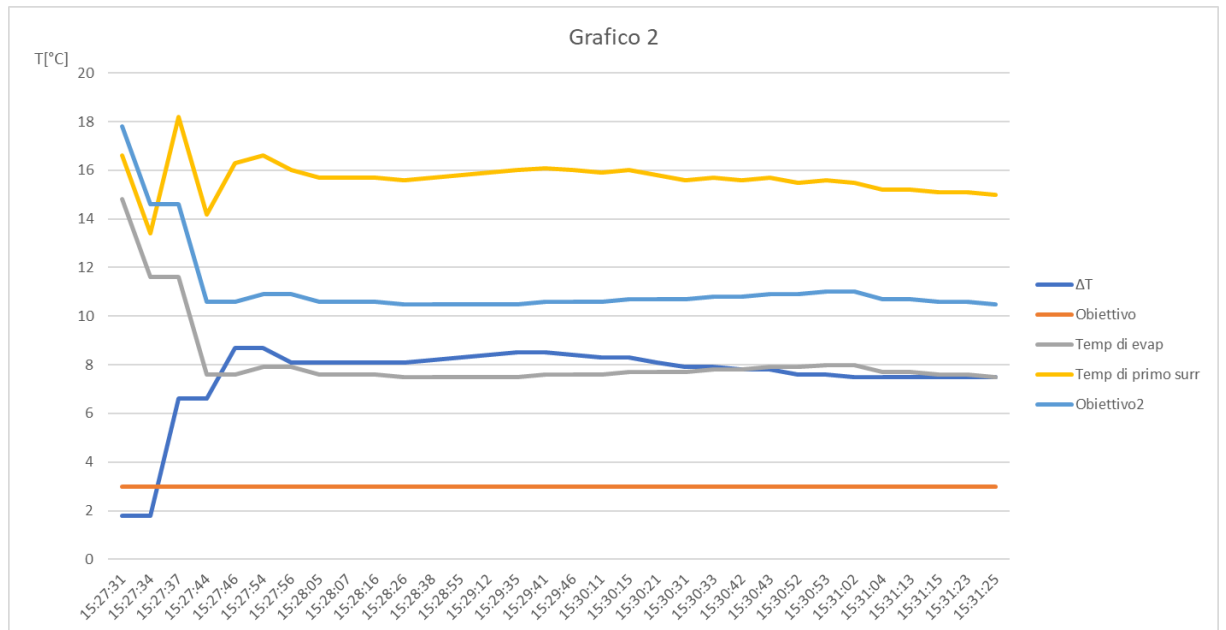


Figura 2.13: andamenti delle temperature scelte, ricavate durante la prova 2.

Come si evince dal grafico sovrastante, diminuendo il guadagno proporzionale, il grado di surriscaldamento è per tutta la durata del ciclo ON della macchina di 5°C maggiore rispetto all'obiettivo prefissato. Pertanto, si è immediatamente scartata la possibilità di diminuire il guadagno proporzionale, in quanto diminuendolo si riduceva in maniera considerevole la reattività del sistema. Pertanto, si è deciso nella prova successiva di considerare il valore massimo che il guadagno proporzionale possa assumere.

3.14.3 Prova 3

In tale prova, si è considerato il massimo valore che il guadagno proporzionale possa assumere, ossia 30, e si è lasciato invariato il valore dei restanti due parametri.

$$k_p = 30$$

$$T_i = 150 \text{ s}$$

$$T_d = 5 \text{ s}$$

Utilizzando il seguente set di parametri si è ricavato il seguente grafico.

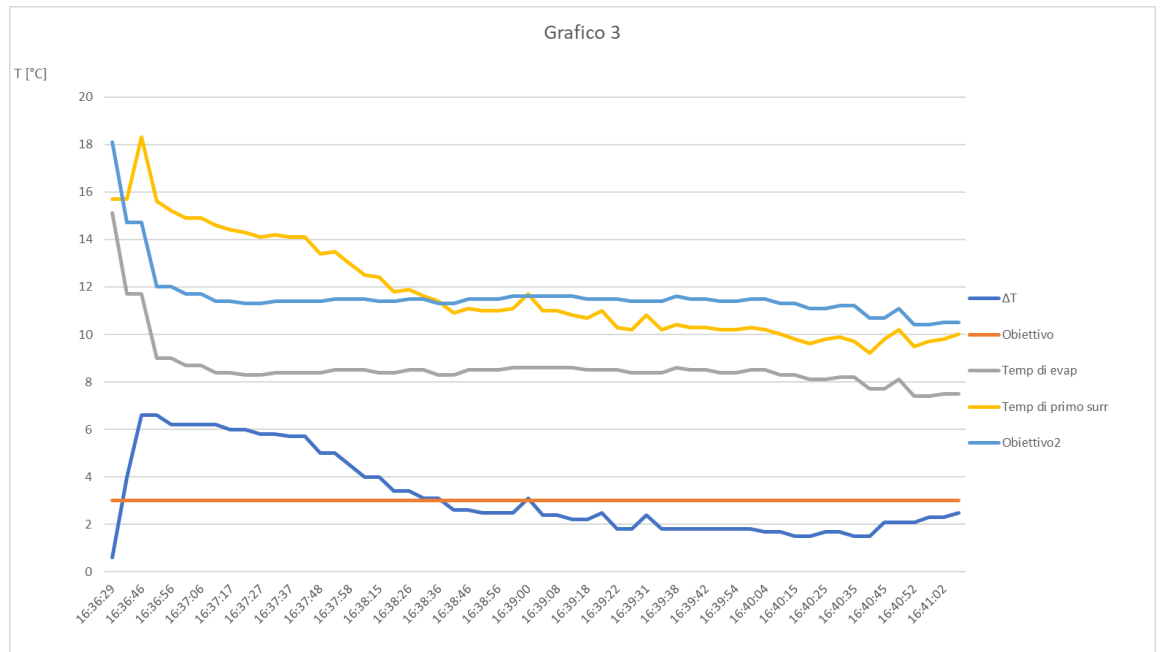


Figura 3.14: andamenti delle temperature scelte, ricavate durante la prova 3.

Si nota come, aumentando il guadagno proporzionale sino al valore massimo, la reattività della regolazione aumenta notevolmente, ma tuttavia si ha una risposta meno stabile. Pertanto, da tale grafico si può dedurre come un ipotetico valore ottimale sia compreso nel range **15 ÷ 30**, poiché in tale range il sistema è notevolmente reattivo, ma è caratterizzato da un valore accettabile di stabilità.

3.14.4 Prova 4

Una volta visto come il sistema reagisce alla variazione del guadagno proporzionale, si è reimpostato il valore iniziale del guadagno proporzionale e si è scelto di variare il tempo integrale, il cui range di variazione, riportato in scheda tecnica, è **40 ÷ 400 sec**. Dapprima si è scelto il minimo valore, che il tempo integrale possa assumere, ossia 40 sec. Il set di parametri scelto per la quarta prova è il seguente:

$$k_p = 15$$

$$T_i = 40 \text{ s}$$

$$T_d = 5 \text{ s}$$

Con tale set di parametri si è ricavato il seguente grafico.

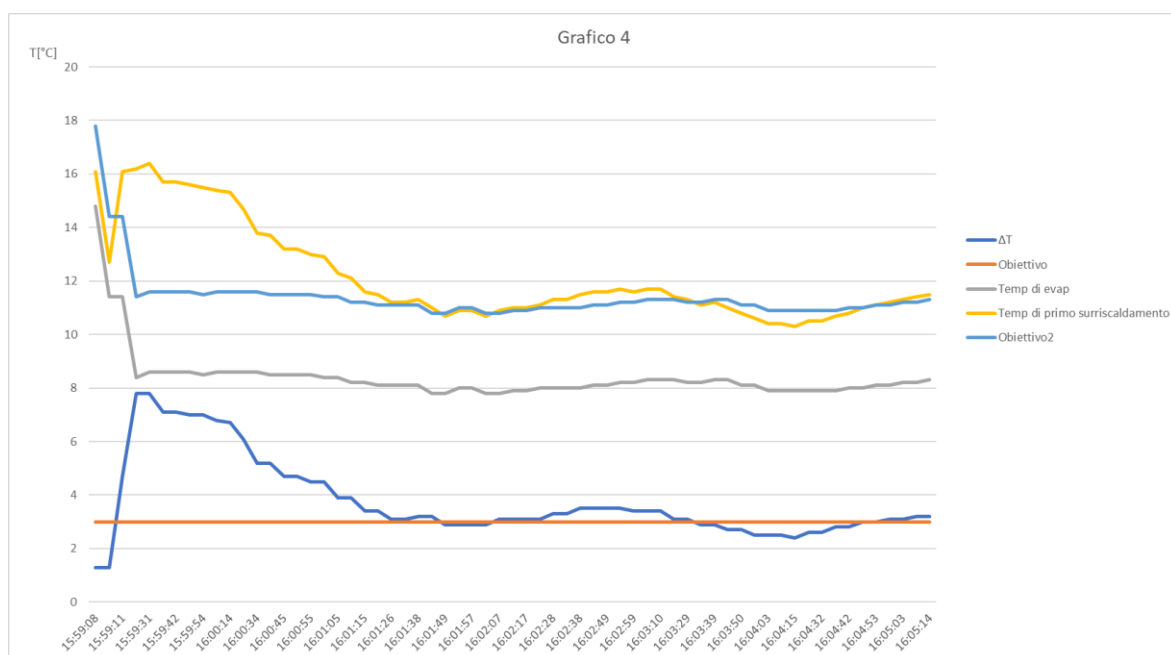


Figura 3.15: andamenti delle temperature scelte, ricavate durante la prova 4.

Si nota, immediatamente, come diminuendo il tempo integrale, il sistema raggiunge velocemente il valore di set point e quindi, il grado di surriscaldamento assume valori all'incirca pari a 3°C. Pertanto, in prima battuta si può considerare ottimale assumere il tempo integrale pari a 40 sec. Nonostante, si sia notato ciò, si è comunque analizzato nella prova successiva, il valore massimo che il tempo integrale possa assumere, ossia 400 sec.

3.14.5 Prova 5

In tale prova si è assunto il tempo integrale pari a 400 sec, mentre sono lasciati invariati i restanti parametri, in modo che si veda quale effetto produce l'aumento del tempo integrale sulla risposta del sistema. Il set di parametri scelto per la quinta prova, pertanto, è il seguente:

$$k_p = 15$$

$$T_i = 400 \text{ s}$$

$$T_d = 5 \text{ s}$$

Con tale set di parametri, pertanto, si ricava il seguente andamento delle temperature, riportato nel grafico sottostante.

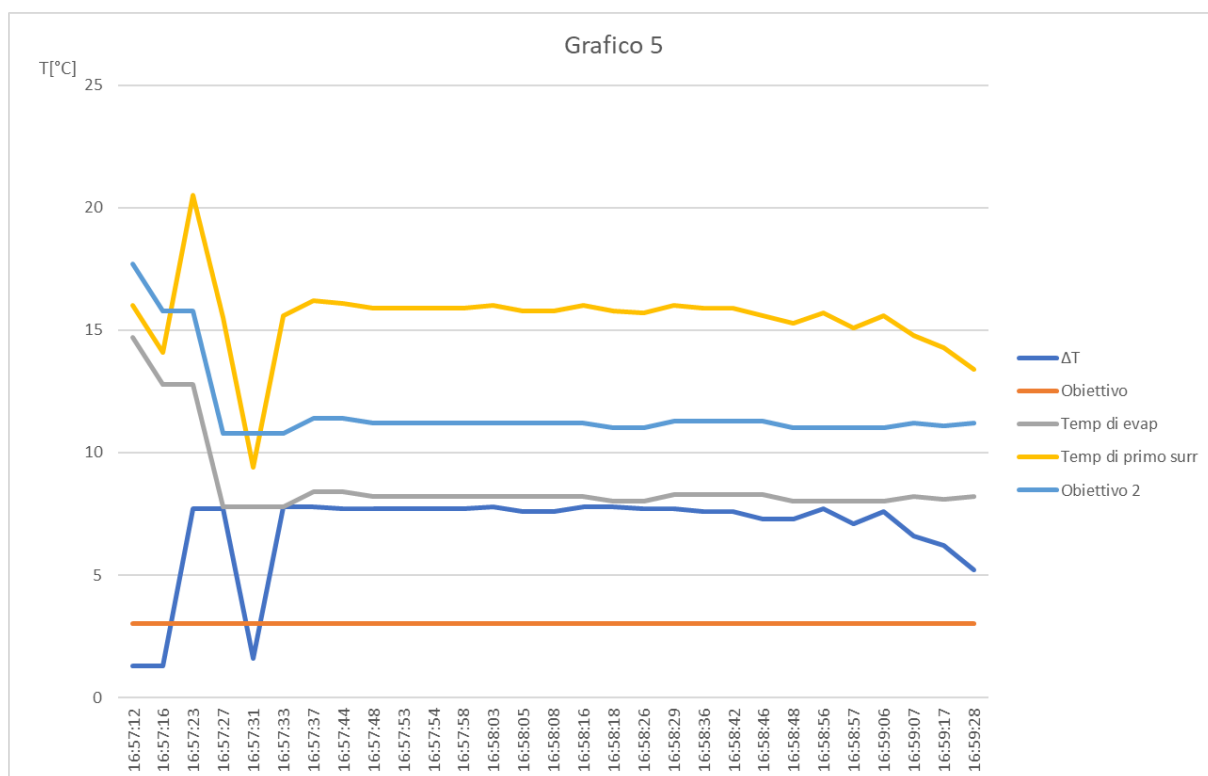


Figura 3.16: andamenti delle temperature scelte, ricavate durante la prova 5.

Come si era ipotizzato durante la prova precedente, il valore di tempo integrale pari a 400 sec è da escludere poiché in tali condizioni il sistema non riesce a raggiungere il valore di set point. Nella scheda tecnica, infatti, è indicato come un aumento notevole del tempo integrale comporti una maggiore stabilità del sistema, ma anche una lentezza del sistema a raggiungere il valore del set point; nei cicli operativi della Tina 115, il cui ciclo ON in inverno dura in media cinque minuti, il grado di surriscaldamento, avendo impostato $T_i = 400 s$, non raggiunge mai il valore di set point.

3.14.6 Prova 6

Una volta visto come varia il tempo integrale e come tale variazione influenzi la risposta del sistema in termini di stabilità e reattività, si è deciso di far variare il tempo derivativo, il cui range di variazione, riportato nella scheda tecnica della valvola a due vie, è pari a **0 ÷ 10 sec**. Dapprima si è scelto di assumere il tempo derivativo pari a 0 secondi, che è il minimo valore che tale parametro può assumere. Il set di parametri scelto, pertanto, per tale prova è pari a:

$$k_p = 15$$

$$T_i = 150 \text{ s}$$

$$T_d = 0 \text{ s}$$

Utilizzando tale set di parametri, si ottiene il seguente andamento delle temperature.

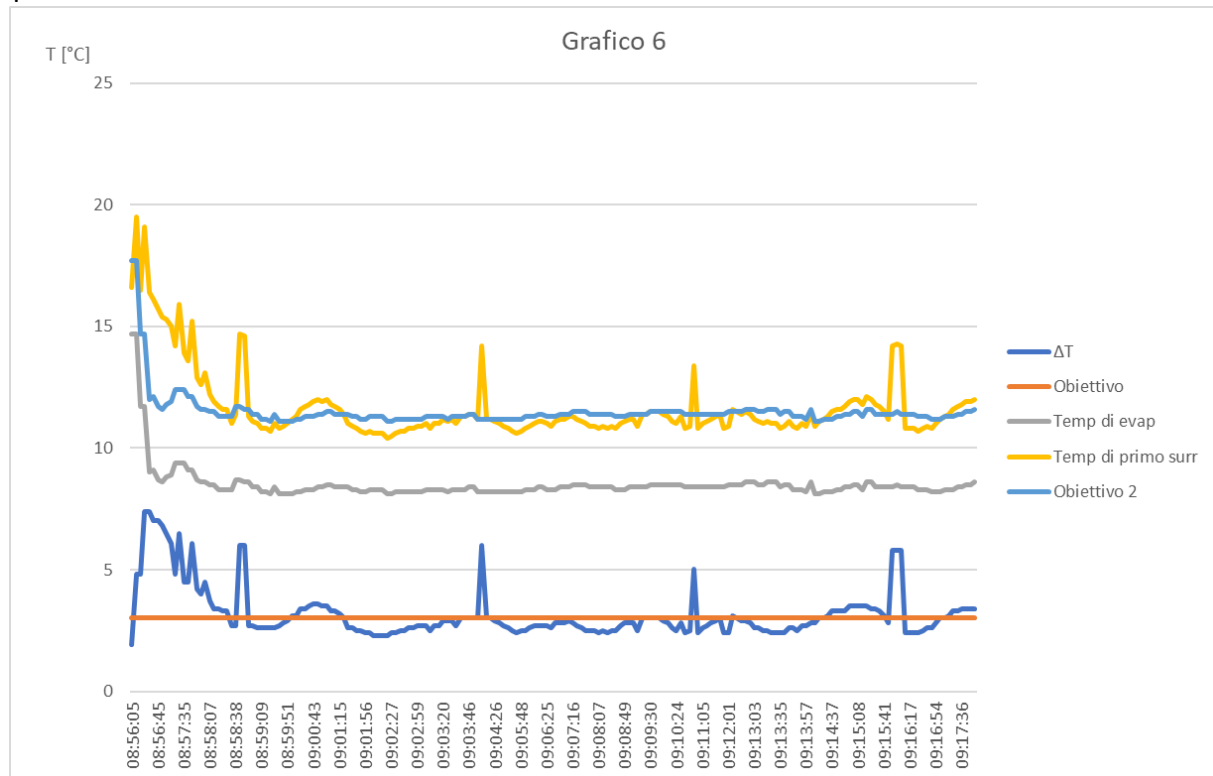


Figura 3.17: andamenti delle temperature scelte, ricavate durante la prova 6.

Da tale grafico si evince come diminuendo il valore del tempo derivativo, il sistema diminuisce notevolmente la stabilità. Infatti, si nota come l'andamento del grado di surriscaldamento presenti una forte irregolarità. È evidente la presenza di picchi che discostano il valore del grado di surriscaldamento dai 3°C.

3.14.7 Prova 7

In tale prova si è aumentato il tempo derivativo sino al valore massimo imposto nella scheda tecnica della valvola a due vie, ossia dieci secondi. Poiché nella prova precedente si è notato come, diminuendo il tempo derivativo si ha una diminuzione della stabilità, si è optato per un aumento di quest'ultimo parametro. Si ha, pertanto, il seguente set di parametri:

$$k_p = 15$$

$$T_i = 150 \text{ s}$$

$$T_d = 10 \text{ s}$$

Utilizzando il seguente set di parametri, si è ricavato il seguente andamento delle temperature.

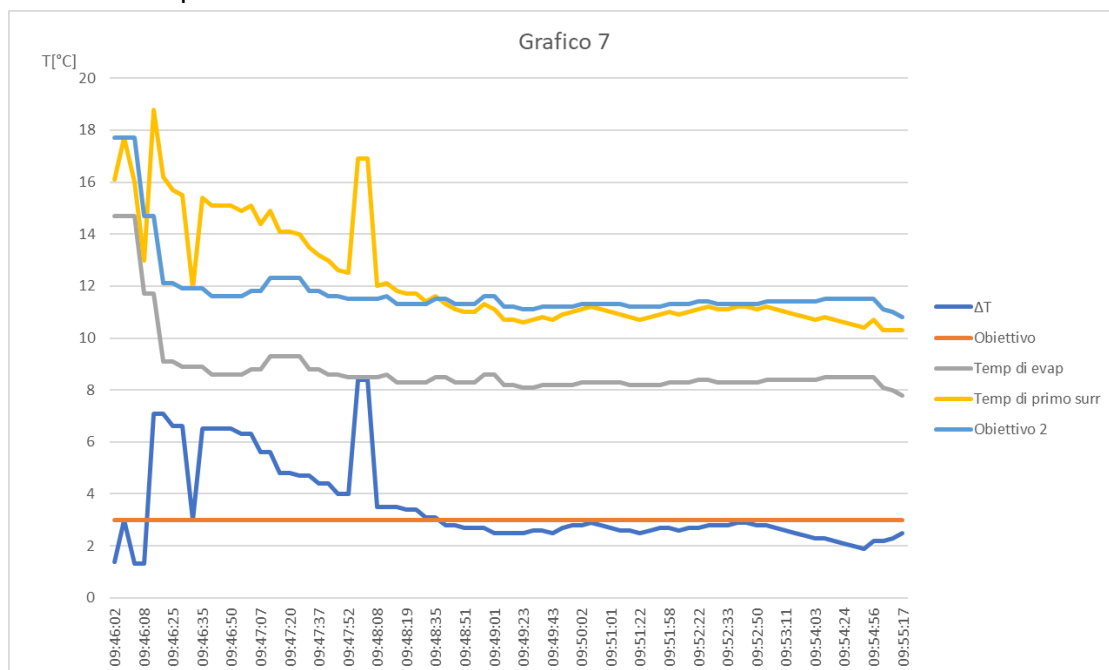


Figura 3.18: andamenti delle temperature scelte, ricavate durante la prova 7.

Come da ipotesi, aumentando il tempo derivativo, si ottiene un aumento di stabilità della risposta del sistema; inoltre, seppur il grado di surriscaldamento non raggiunga mai 3°C, assume dei valori prossimi ad esso. Come si evince dalla scheda tecnica della valvola, l'aumento del tempo derivativo T_d migliora la reattività della valvola in particolare in sistemi perturbati diminuendo l'ampiezza della pendolazione del surriscaldamento.

3.14.8 Prova 8

Una volta che tutti i parametri PID hanno assunto i valori massimi e minimi che essi possano assumere secondo quanto stabilito dalla scheda tecnica, si è visto quale delle prove eseguite abbia portato ad un andamento che permettesse di ottenere quanto voluto. Dall'analisi delle seguenti prove, si afferma che nella prova 4, ove si è imposto un tempo derivativo pari a 40 secondi, si ottiene il miglior andamento possibile. Pertanto, nelle successive prove sono stati variati il guadagno proporzionale e il tempo derivativo, mentre si è imposto un tempo integrale pari a 40 secondi. Nella prova otto si è considerato il seguente set di parametri:

$$k_p = 15$$

$$T_i = 40 \text{ s}$$

$$T_d = 5 \text{ s}$$

Si è ricavato il seguente andamento delle temperature.

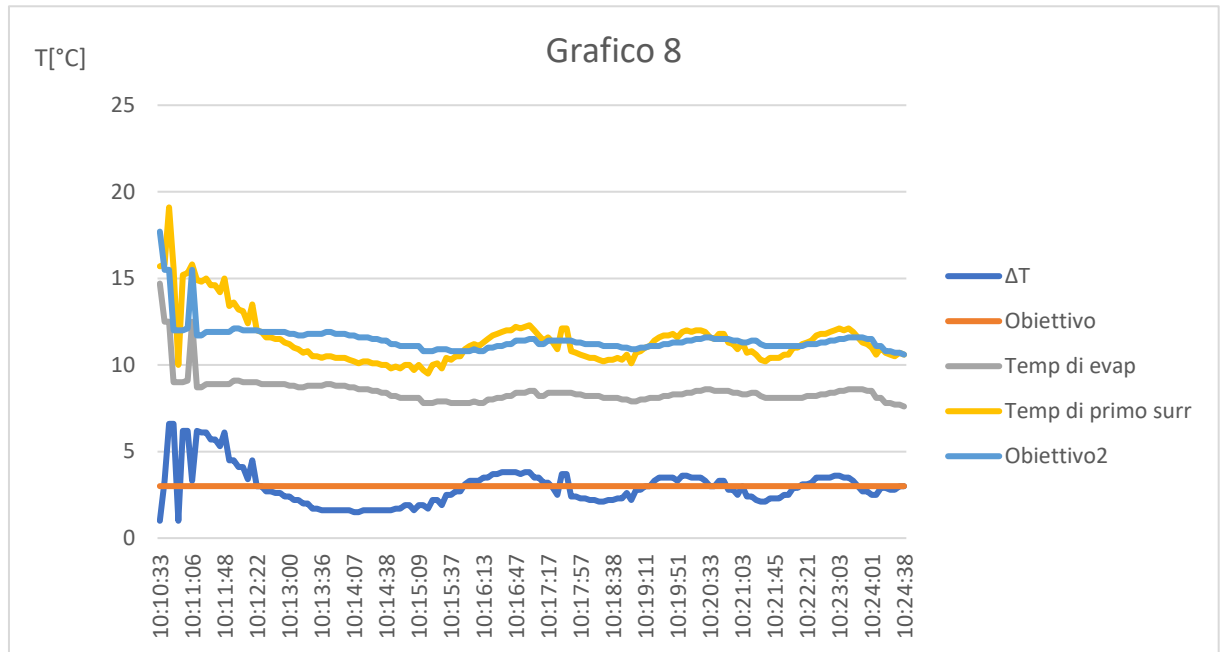


Figura 3.19: andamenti delle temperature scelte, ricavate durante la prova 8.

In tale prova sono stati utilizzati gli stessi parametri della prova 4, ritenuta fino ad ora la migliore, poiché si è voluto verificare che con un tempo integrale pari a 40 secondi si ha un sistema caratterizzato sia da una buona stabilità sia da una buona reattività. Infatti, sia il transitorio dura solamente due minuti a fronte di un ciclo ON della durata di 14 minuti, sia il grado di surriscaldamento assumono valori prossimi a 3°C.

3.14.9 Prova 9

Si è deciso di far variare dapprima il guadagno proporzionale e successivamente il tempo derivativo. Come visto in tutte le prove fino ad ora condotte, si è deciso che il guadagno proporzionale assuma il valore massimo e minimo stabilito nella scheda tecnica. Si è optato per tale prova il seguente set di parametri:

$$k_p = 3$$

$$T_i = 40 \text{ s}$$

$$T_d = 5 \text{ s}$$

Si ottiene, pertanto, il seguente andamento delle temperature.

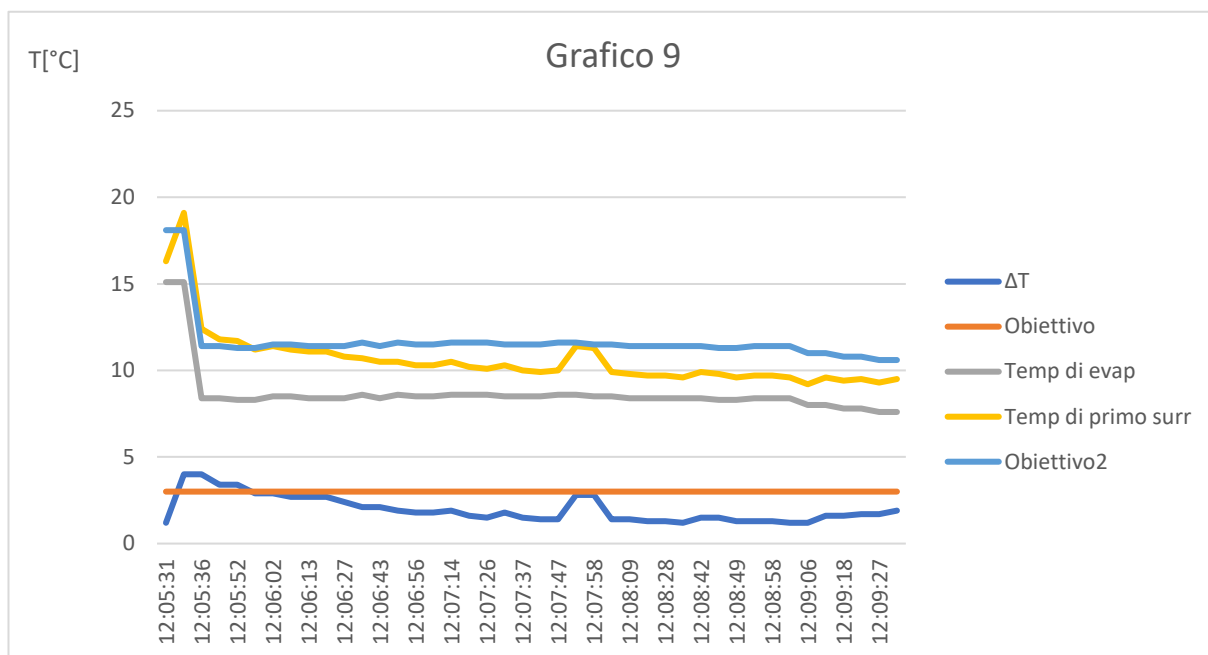


Figura 3.20: andamenti delle temperature scelte, ricavate durante la prova 9.

Diminuendo il guadagno proporzionale k_p , si ottiene una minore durata del transitorio, pari a 20 secondi, ma si ottiene un sistema estremamente lento; infatti, durante tutto il ciclo ON della macchina il grado di surriscaldamento non raggiunge mai il valore di set point.

3.14.10 Prova 10

Avendo notato che valori bassi del guadagno proporzionale comportano un sistema estremamente lento, si è assunto quest'ultimo parametro pari al massimo valore assumibile, ossia 30. Pertanto, si ha il seguente set di parametri:

$$k_p = 30$$

$$T_i = 40 \text{ s}$$

$$T_d = 5 \text{ s}$$

Avendo utilizzato il seguente set di parametri, si ottengono gli andamenti delle temperature, riportate nel grafico sottostante.

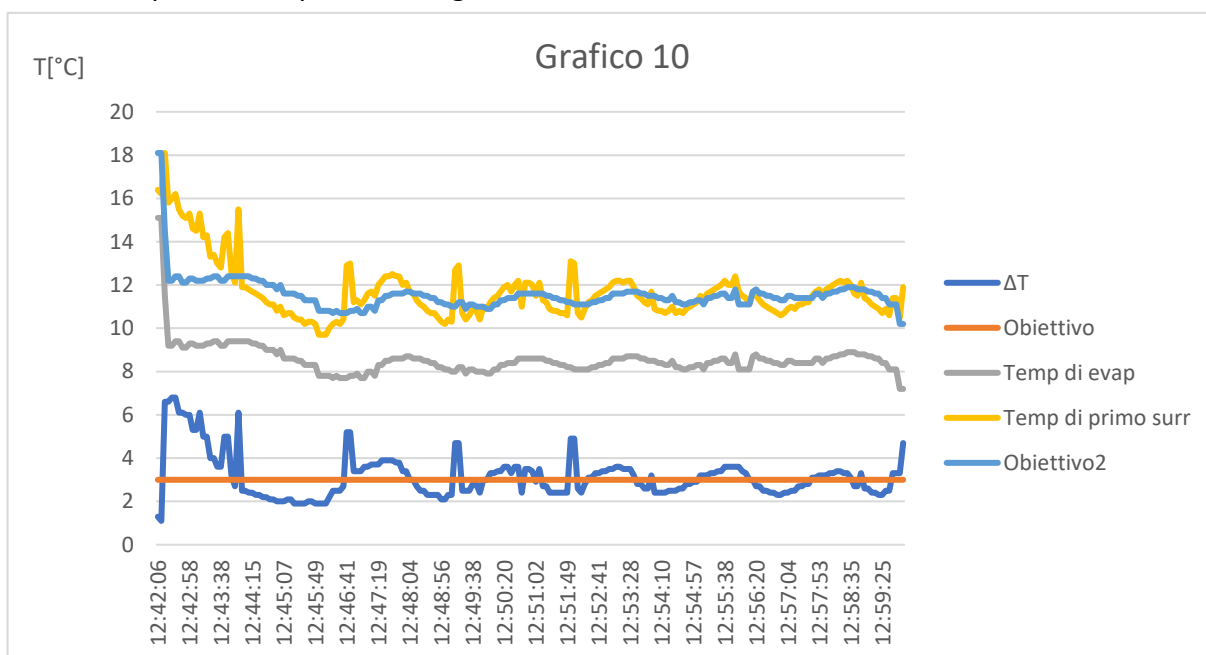


Figura 3.21: andamenti delle temperature scelte, ricavate durante la prova 10.

Da tale grafico si evince come l'aumento del guadagno proporzionale comporti un sistema caratterizzato sia da un'elevata reattività, che fa sì che il grado di surriscaldamento oscilli intorno al valore di set point, ma anche da un'elevata instabilità, che si deduce dall'andamento oscillatorio del grado di surriscaldamento.

3.14.11 Prova 11

Una volta che il guadagno proporzionale ha assunto sia il valore massimo sia il valore minimo, stabiliti nella scheda tecnica, si è applicato il teorema di Weierstrass in modo tale da poter considerare anche i valori medi. Pertanto, si è assunto un valore del guadagno proporzionale intermedio tra 3 e 15, ossia 9. Tale procedimento di analisi permette di stabilire un valore più accurato del parametro considerato, in quanto consente di stabilire un range di valori da scartare e un range di valori che possano fornire un andamento ottimale. Di conseguenza, il set di parametri considerato per la seguente prova è:

$$k_p = 9$$

$$T_i = 40 \text{ s}$$

$$T_d = 5 \text{ s}$$

Con tali parametri si ottiene il seguente andamento delle temperature.

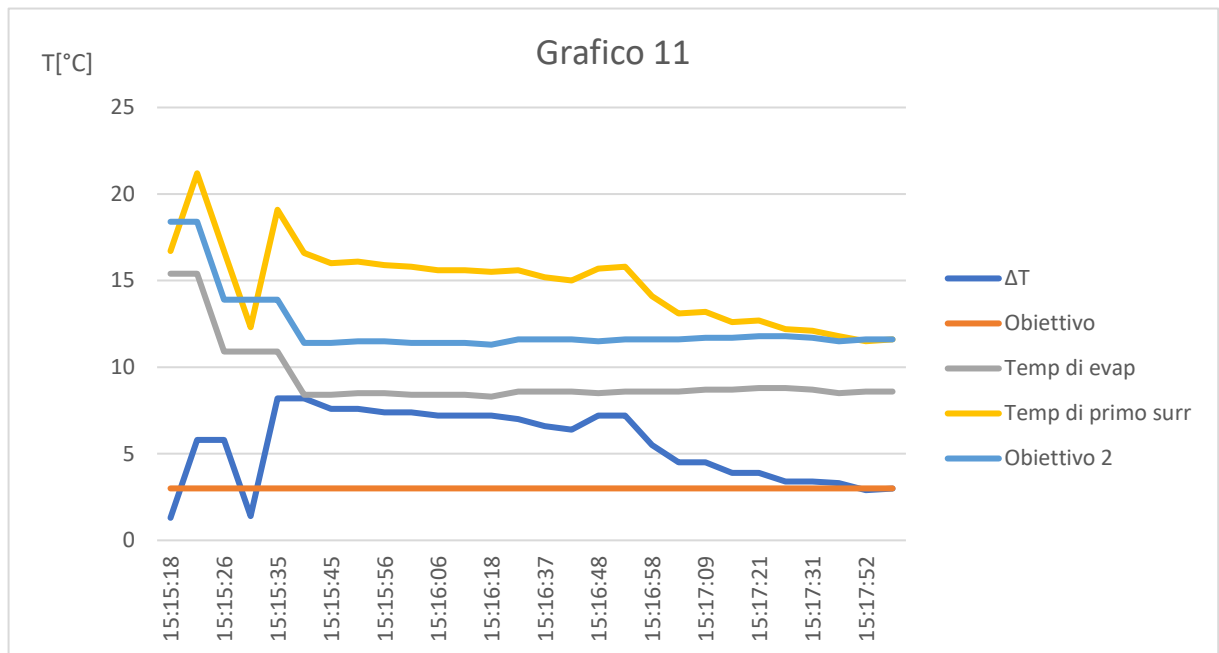


Figura 3.22: andamenti delle temperature scelte, ricavate durante la prova 11.

Come affermato nelle precedenti prove per valori del guadagno proporzionale minori di 15, si ha un sistema estremamente lento; infatti, anche considerando come in tale prova un valore del guadagno proporzionale pari a 9, il grado del surriscaldamento raggiunge il valore di set point esclusivamente alla fine del ciclo ON. Tuttavia, si può notare anche che la risposta del sistema presenta un transitorio di durata minima ed è caratterizzato da un'elevata stabilità.

3.14.12 Prova 12

Applicando come nella prova precedente il teorema di Weierstrass, si è considerato un valore del guadagno proporzionale intermedio tra 15 e 30, ovvero 22. Prima di effettuare tale prova, si è ipotizzato di ottenere una risposta del sistema reattiva e anche pressoché stabile. Si è considerato il seguente set di parametri:

$$k_p = 22$$

$$T_i = 40 \text{ s}$$

$$T_d = 5 \text{ s}$$

Si ottiene il seguente andamento delle temperature, riportato nel grafico sottostante.

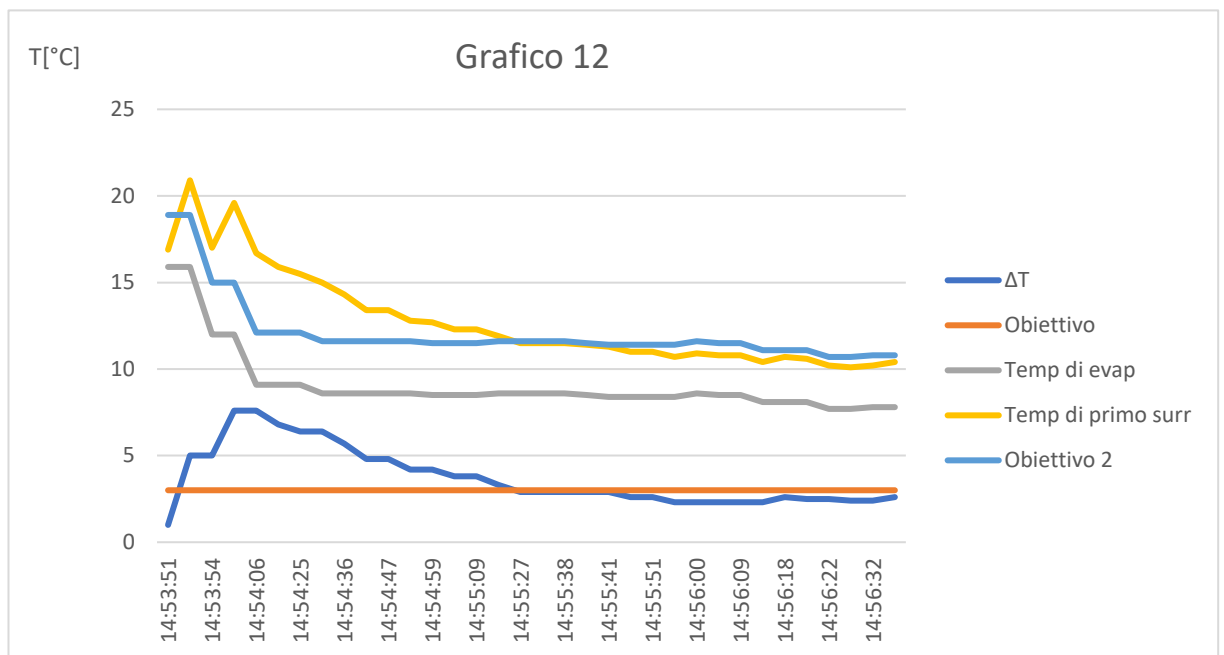


Figura 3.23: andamenti delle temperature scelte, ricavate durante la prova 12.

Da tale grafico si evince immediatamente come tale set di parametri sia ottimale, in quanto la risposta del sistema presenta un transitorio di durata pari a due minuti, e presenta un andamento stabile. Il grado di surriscaldamento assume un valore all'incirca costante e pari a quello di set point. Pertanto, al termine di tale prova si è deciso di assumere come valori dei parametri della regolazione PID:

- il guadagno proporzionale $k_p = 22$;
- il tempo integrale $T_i = 40$.

Per quanto riguarda il tempo derivativo T_d si deve ancora stabile quale valore possa essere considerato ottimale per gli obiettivi prefissati, ossia raggiungimento del set point, stabilità della risposta e reattività del sistema.

3.14.13 Prova 13

In tale prova e nelle successive sono stati mantenuti costanti i valori precedentemente stabiliti del guadagno proporzionale e del tempo integrale, mentre si è variato il valore del tempo derivativo. Dapprima, sono stati considerati

i valori estremi, che il tempo derivativo possa assumere, mentre successivamente si è applicato il teorema di Weierstrass. Si è deciso il seguente set di parametri:

$$k_p = 22$$

$$T_i = 40 \text{ s}$$

$$T_d = 0 \text{ s}$$

Si ottiene il seguente andamento delle temperature.

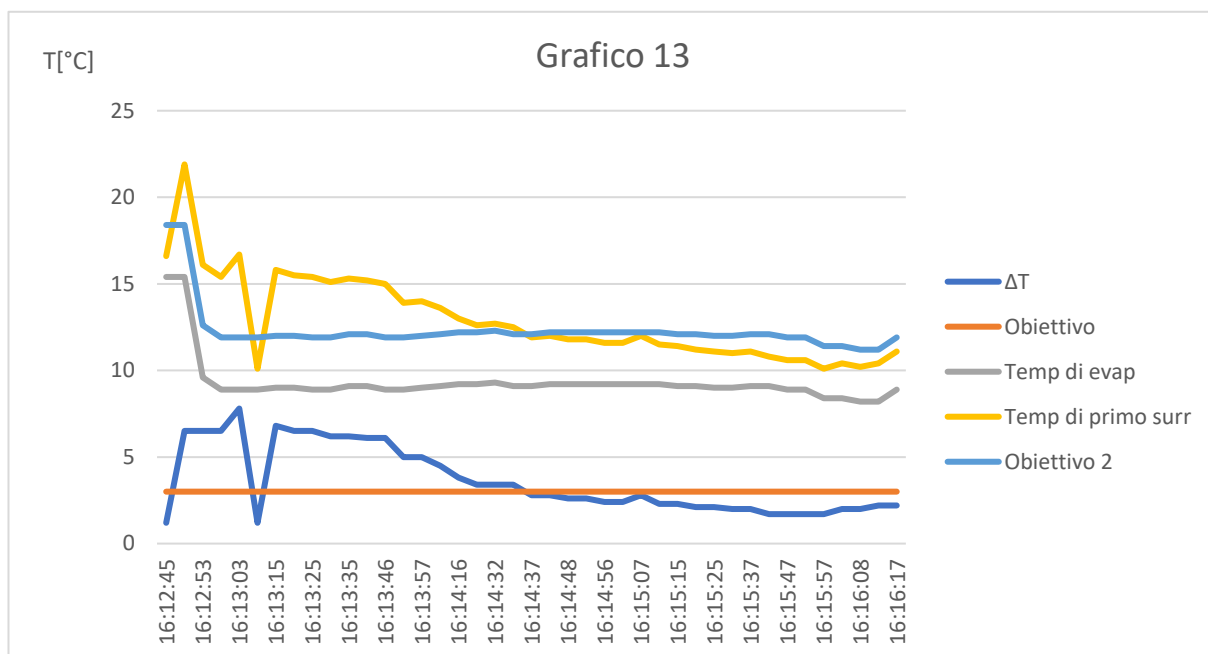


Figura 3.24: andamenti delle temperature scelte, ricavate durante la prova 13.

Assumendo il seguente set di parametri, si ottiene un andamento pressoché stabile, ove il grado di surriscaldamento presenta valori all'incirca pari a quello di set point. Tuttavia, si considera ancora non accettabile tale andamento per gli obiettivi prefissati.

3.14.14 Prova 14

Poiché nella prova precedente si è utilizzato il valore minimo del tempo derivativo, in tale prova quest'ultimo parametro assume il valore massimo ricavato nella scheda tecnica, ovvero dieci secondi. Aumentando il tempo derivativo migliora la reattività della valvola in particolare in sistemi perturbati diminuendo l'ampiezza della pendolazione del surriscaldamento. Si ha, pertanto, il seguente set di parametri:

$$k_p = 22$$

$$T_i = 40 \text{ s}$$

$$T_d = 10 \text{ s}$$

Si ottiene, quindi, il seguente andamento delle temperature.

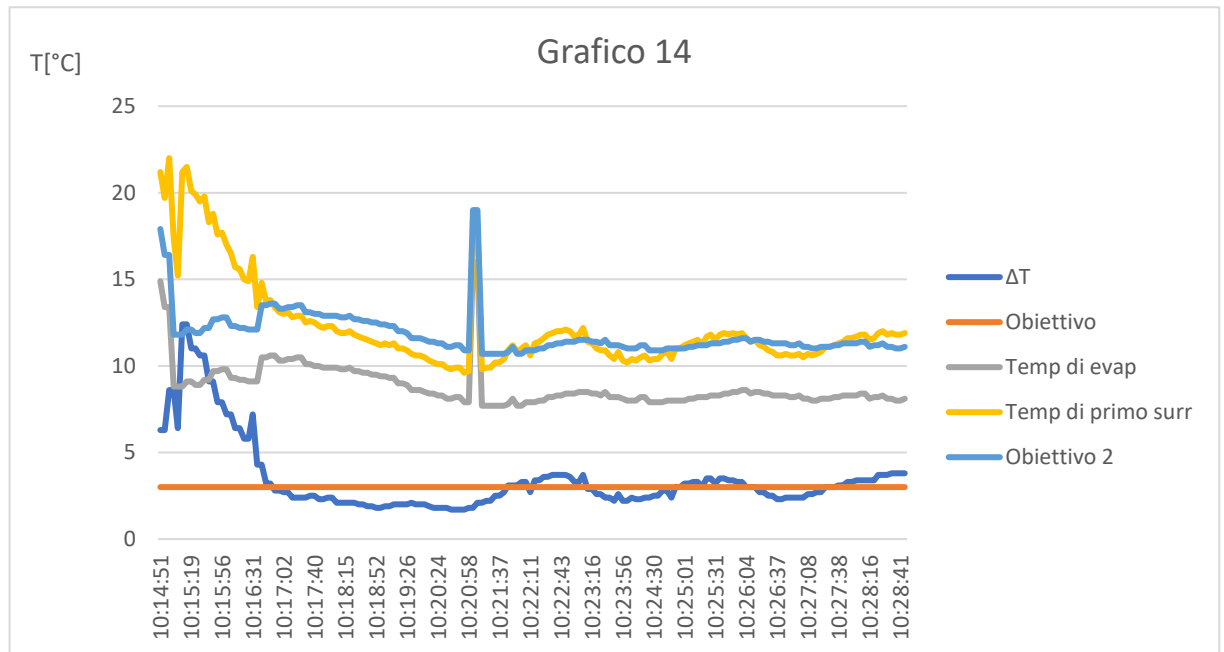


Figura 3.25: andamenti delle temperature scelte, ricavate durante la prova 14.

Come da ipotesi, aumentando il tempo derivativo rispetto alla prova precedente, si ottiene una diminuzione dell'ampiezza delle pendolazioni del surriscaldamento. Tuttavia, come detto per la prova 13, anche in tal caso si considera migliore la risposta del sistema ottenuta nella prova 12.

3.14.15 Prova 15

Una volta che sono stati considerati i valori massimi e minimi assumibili dal tempo derivativo, si è applicato il teorema di Weierstrass, ossia sono stati considerati i valori intermedi del range analizzato. In tale prova il tempo derivativo ha assunto un valore medio fra 0 e 5, ossia 2,5 secondi. Si ha, pertanto, il seguente set di parametri:

$$k_p = 22$$

$$T_i = 40 \text{ s}$$

$$T_d = 2,5 \text{ s}$$

Si ottiene l'andamento delle temperature riportato nel grafico sottostante.

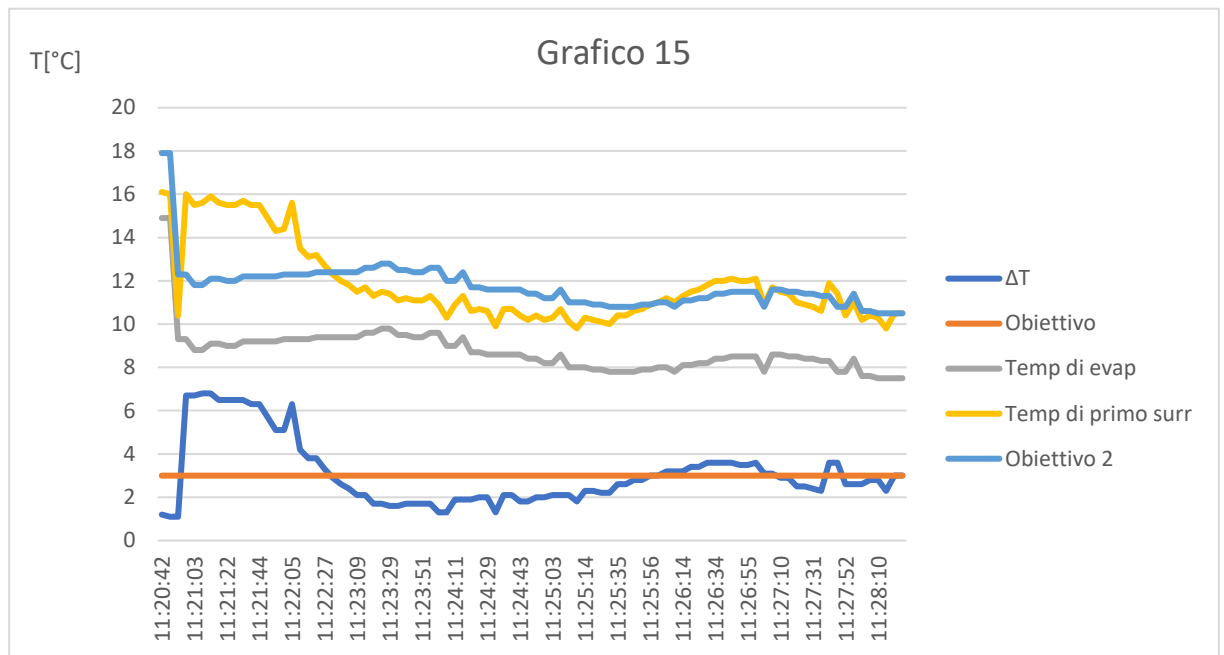


Figura 3.26: andamenti delle temperature scelte, ricavate durante la prova 15.

Diminuendo il valore del tempo derivativo al di sotto dei cinque secondi, si ottiene un sistema che presenta diverse pendolazioni di ampiezza variabile. Pertanto, si continua a considerare come risposta del sistema migliore quella ottenuta nella prova 12.

3.14.16 Prova 16

In quest'ultima prova si è considerato nuovamente il teorema di Weierstrass e si è variato il tempo derivativo, che ha assunto un valore medio tra 5 e 10, ossia 7,5 secondi. Di conseguenza, si ha il seguente set di parametri:

$$k_p = 22$$

$$T_i = 40 \text{ s}$$

$$T_d = 7,5 \text{ s}$$

Si ottiene il seguente andamento delle temperature.

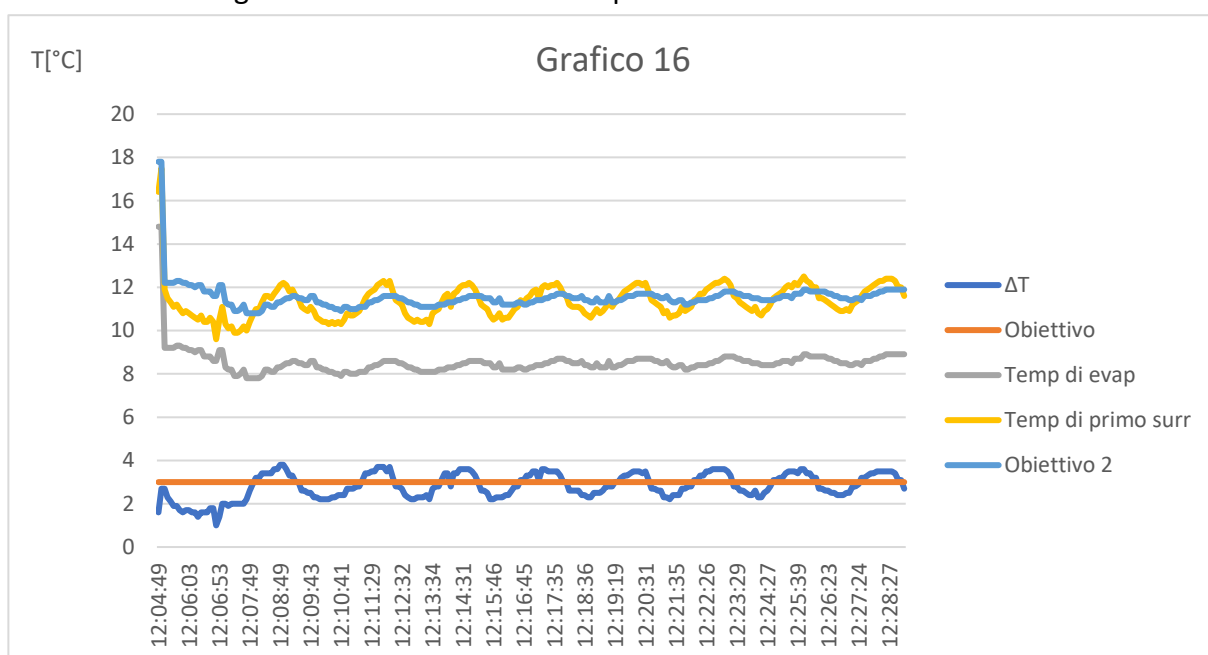


Figura 3.27: andamenti delle temperature scelte, ricavate durante la prova 16.

Si ottiene una risposta del sistema variabile, in cui il grado di surriscaldamento oscilla tra 2°C e 4°C. Tale risposta non può essere considerata accettabile poiché a differenza delle precedenti si ha un'ampiezza delle oscillazioni elevata.

3.15 Scelta dei parametri di taratura

Una volta terminate le sedici prove, condotte nell'arco di quattro giornate, si può determinare il miglior set di parametri, che permette di ottenere una risposta del sistema stabile e reattiva. Il grado di surriscaldamento segue il valore del set point e il transitorio ha una durata breve rispetto al ciclo ON della pompa di calore in esame. Sono stati scelti i seguenti parametri:

- il guadagno proporzionale $k_p = 22$, che aumenta la velocità di reazione della valvola ed è consigliato se il sistema è particolarmente perturbato o per velocizzare la regolazione del surriscaldamento.
- Il tempo integrale $T_i = 40$ secondi, che è il minor valore assumibile da tale parametro secondo la scheda tecnica della valvola a due vie. Tuttavia, tale valore seppur rende la risposta del sistema meno stabile,

fa sì che il grado di surriscaldamento raggiunga il valore di set point nel minor tempo possibile.

- Il tempo derivativo $T_d = 5 \text{ secondi}$, che permette di diminuire l'ampiezza della pendolazione del surriscaldamento.

Con tale set di parametri si ottiene l'andamento delle temperature, scelte per l'analisi, riportato nella prova 12. Tuttavia, si deve sottolineare come la scelta dei parametri è stata frutto di un'analisi sperimentale, in cui attraverso lo svolgimento di sedici prove si è determinato l'andamento del grado di surriscaldamento, che soddisfacesse maggiormente gli obiettivi prefissati ed elencati precedentemente. Si riporta nuovamente e per maggior completezza il risultato ottenuto nella prova 12.

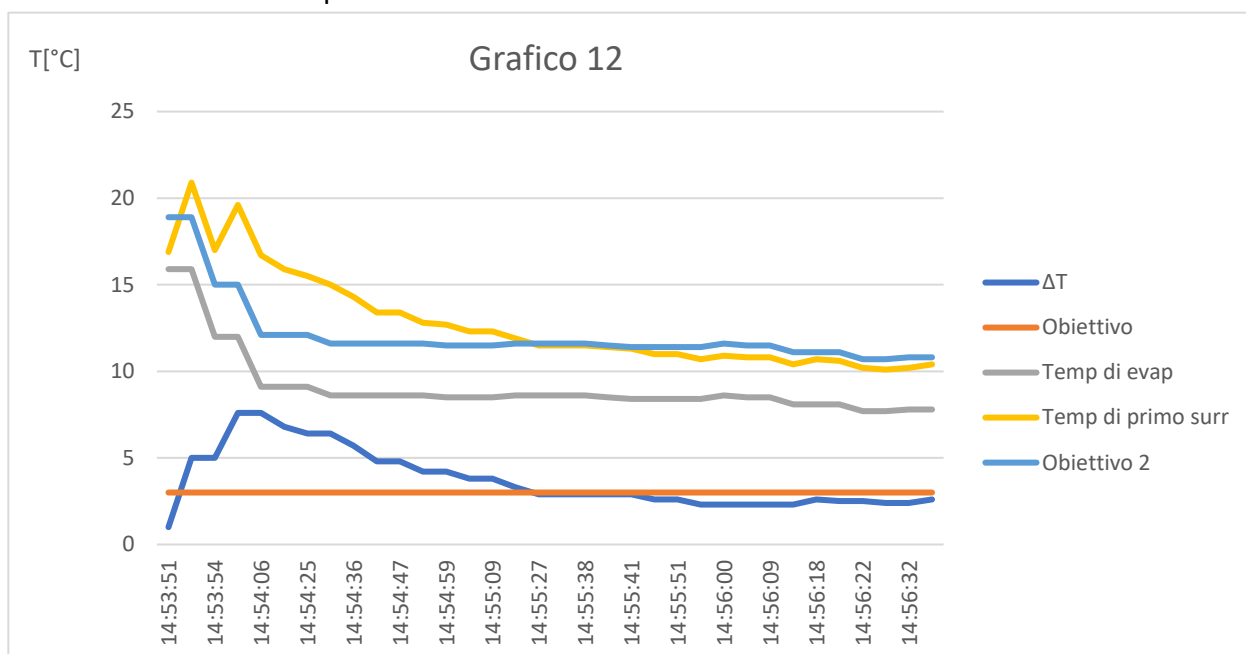
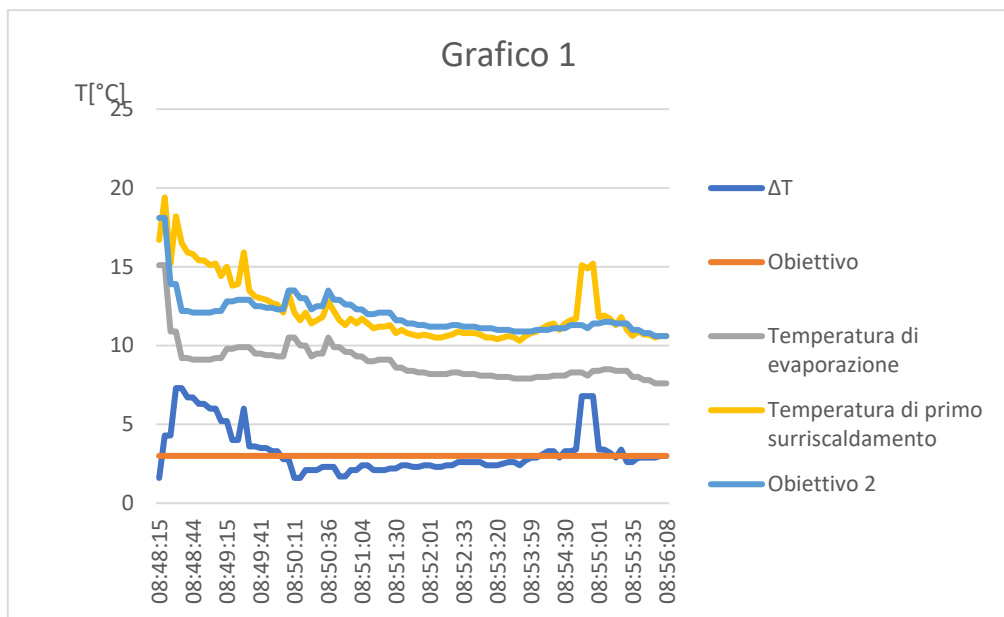
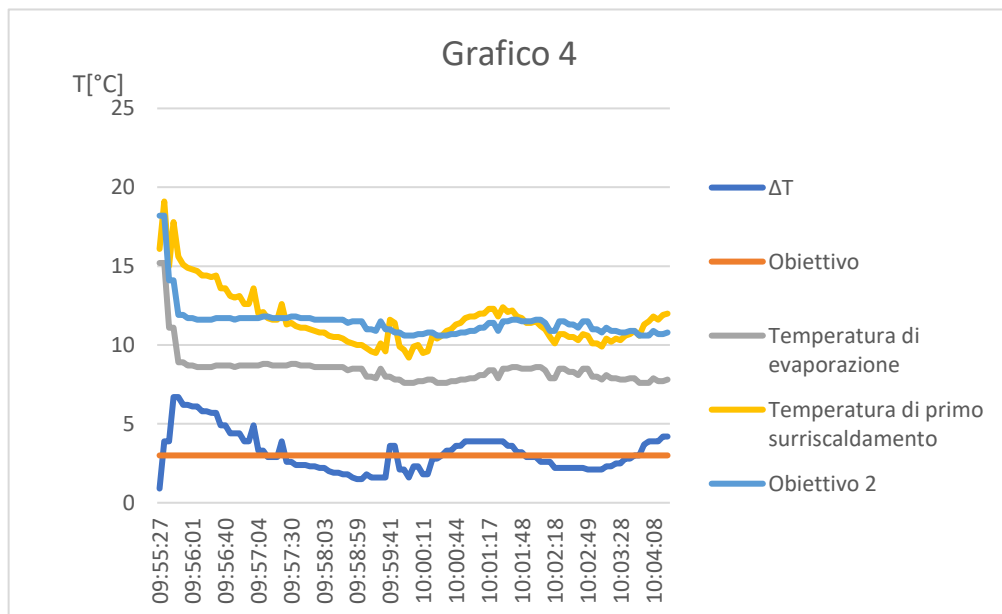
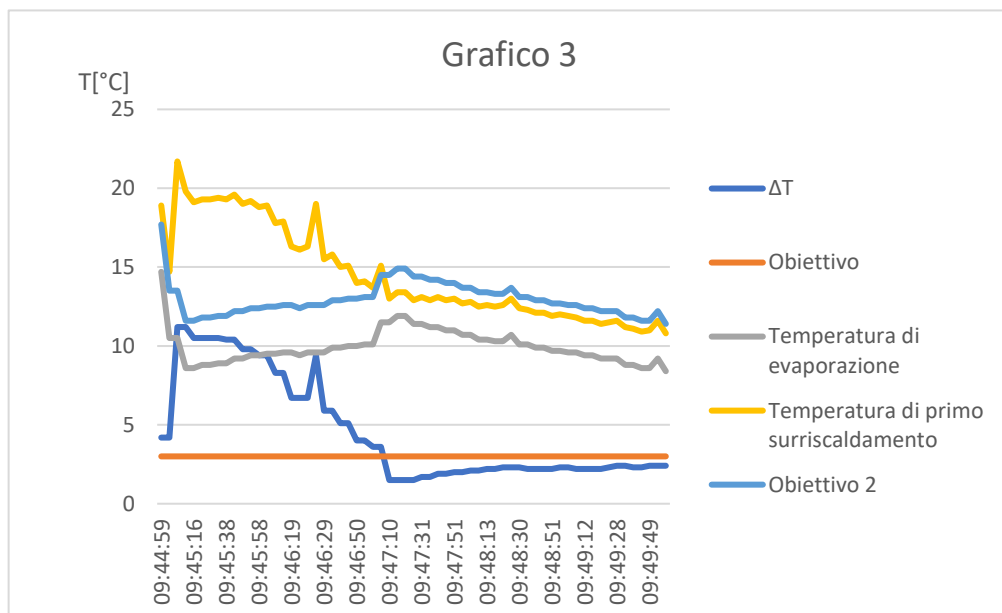
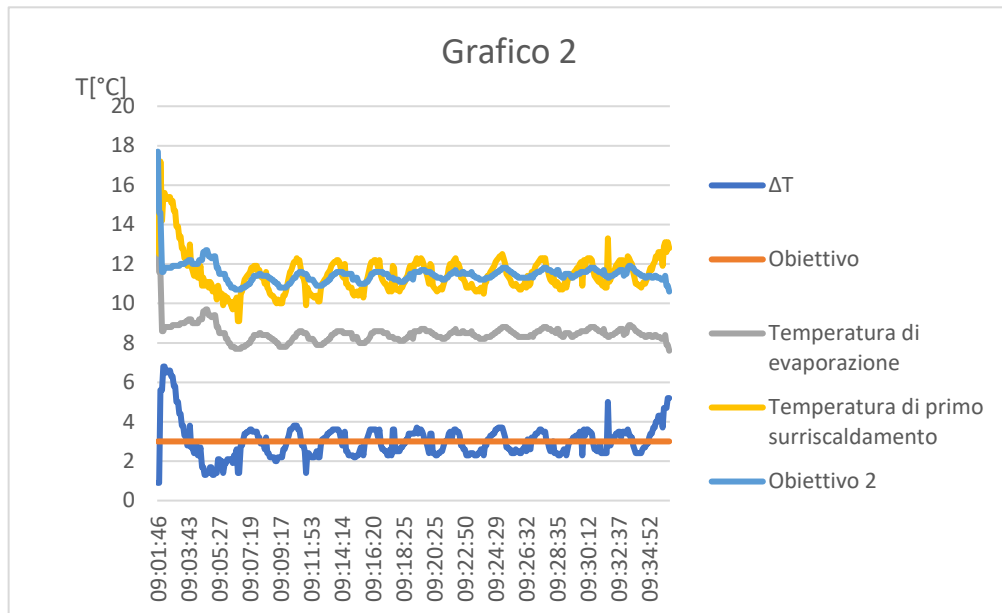


Figura 3.28: andamenti ottimali del grado di surriscaldamento e della temperatura di primo surriscaldamento.

3.16 Verifica dei parametri di taratura

Il set di parametri della regolazione PID scelto è stato determinato con una prova della durata di mezz'ora affinché la macchina in esame abbia il tempo necessario per reagire alla variazione dei parametri scelti. Pertanto, si è deciso di verificare tale set di parametri applicandolo per un'intera giornata: in particolare si è preso in esame il 10 novembre 2021. Grazie a tale verifica si è visto come nell'arco della giornata la scelta dei parametri non avesse comportato alcun allarme della macchina e come il grado di surriscaldamento in tutti i cicli ON della macchina avesse un andamento pressoché ottimale. Si riportano nelle figure sottostanti gli andamenti del grado di surriscaldamento e della temperatura di primo surriscaldamento nei cicli ON della macchina nella giornata analizzata, in particolare dalle 08:30 alle 10:30, dalle 12:00 alle 14:00 e dalle 15:00 alle 17:00.





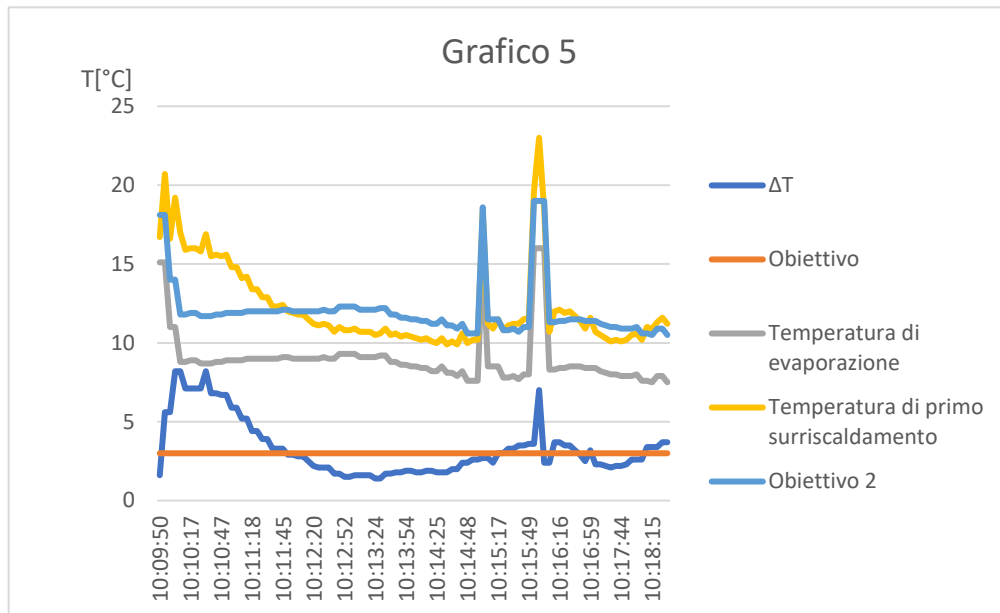
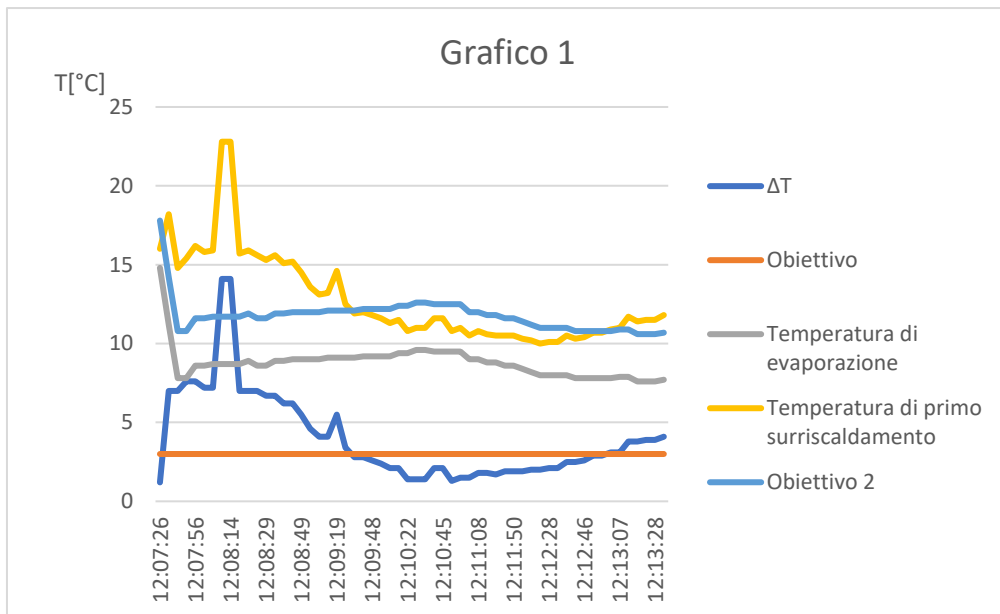
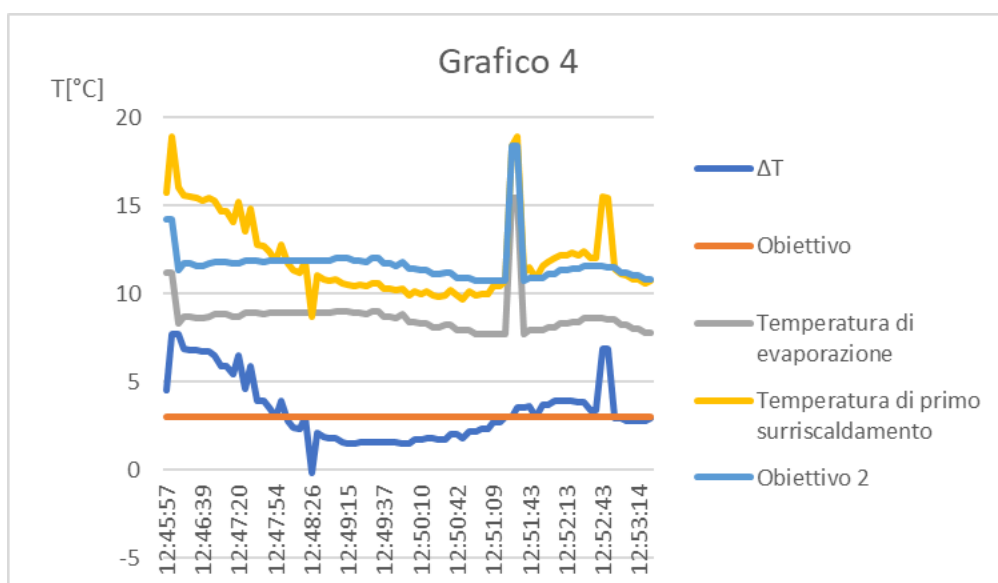
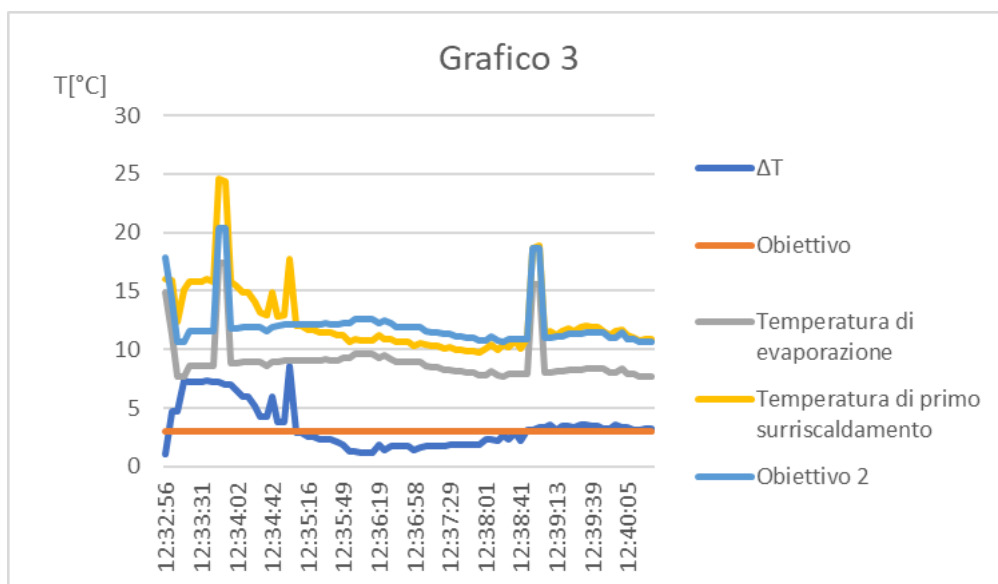
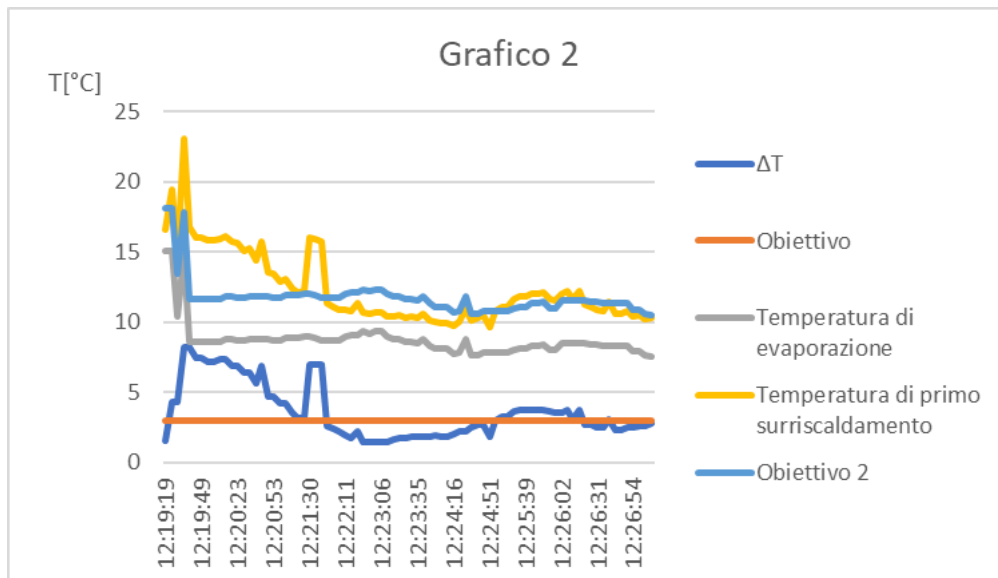
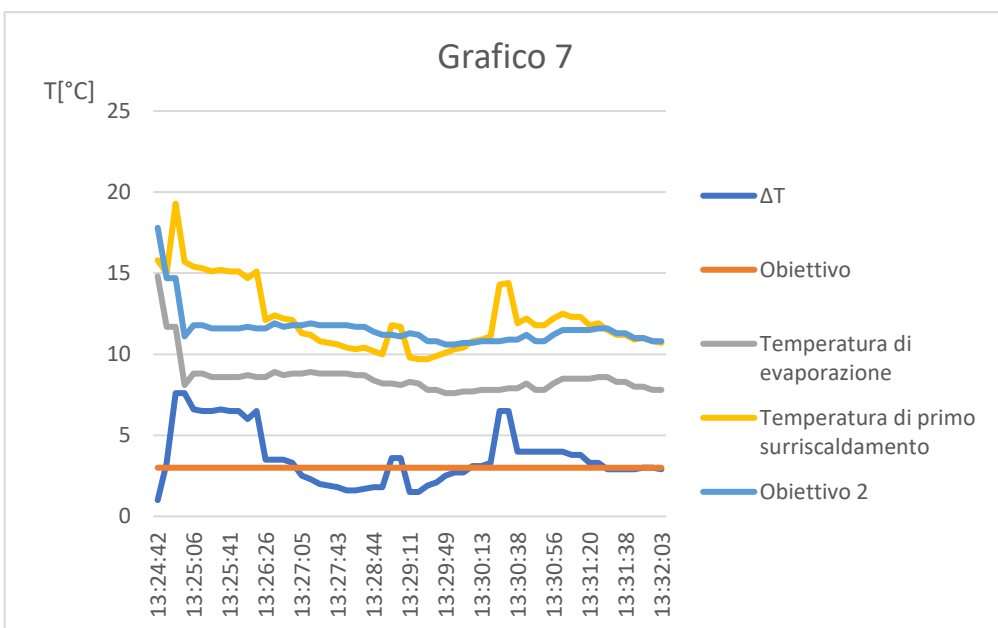
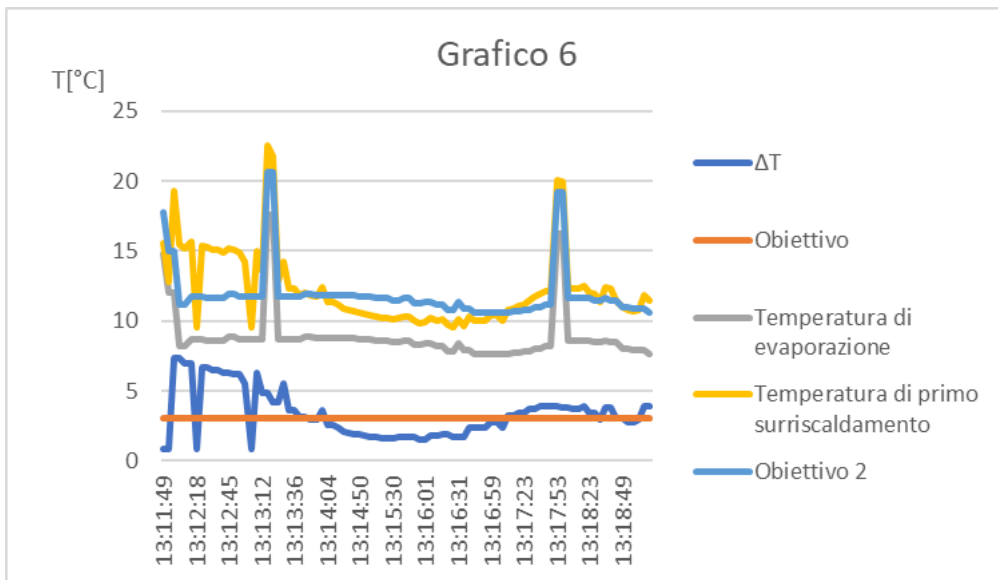
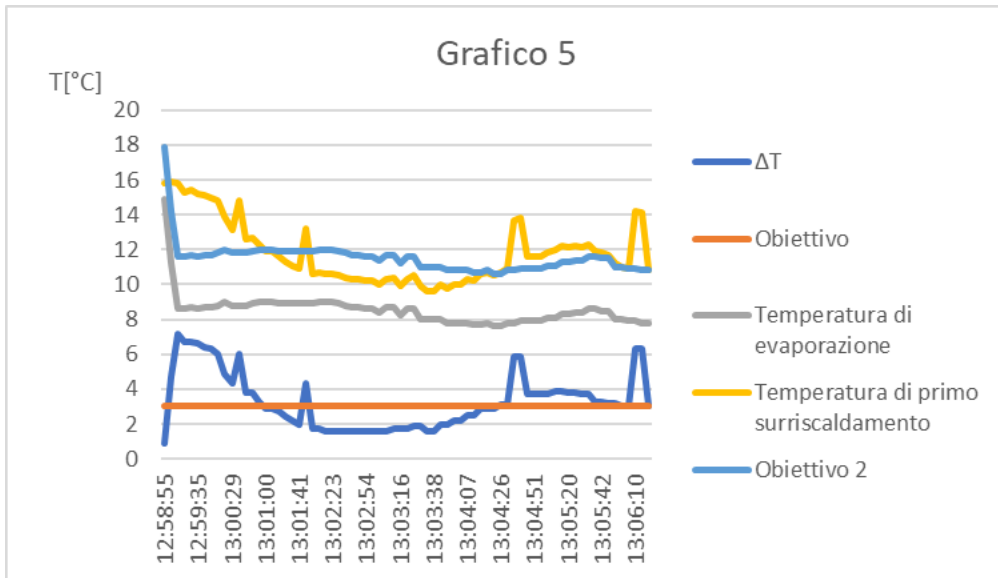


Figura 3.29: andamenti del ciclo ON tra le 08:30 – 10:30.







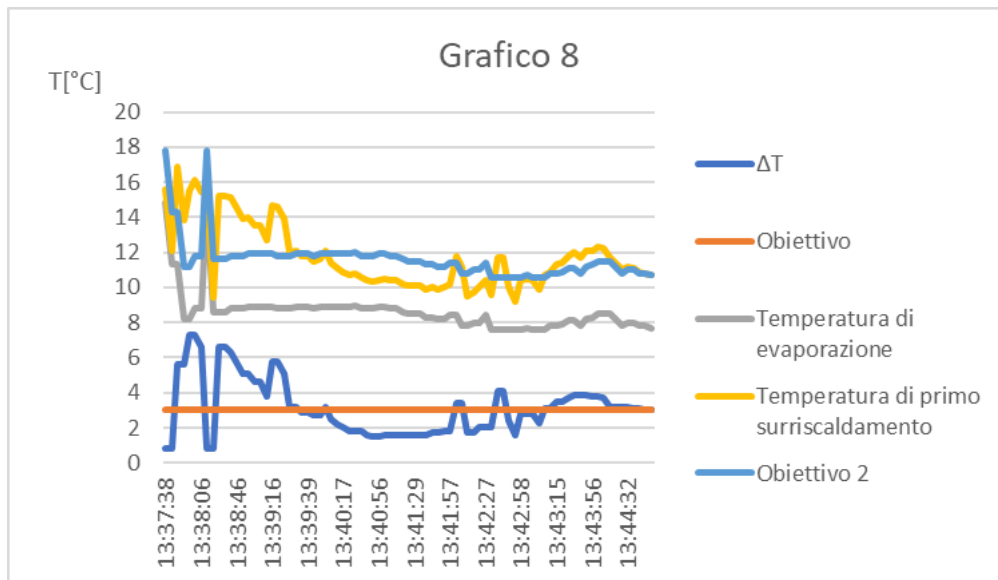
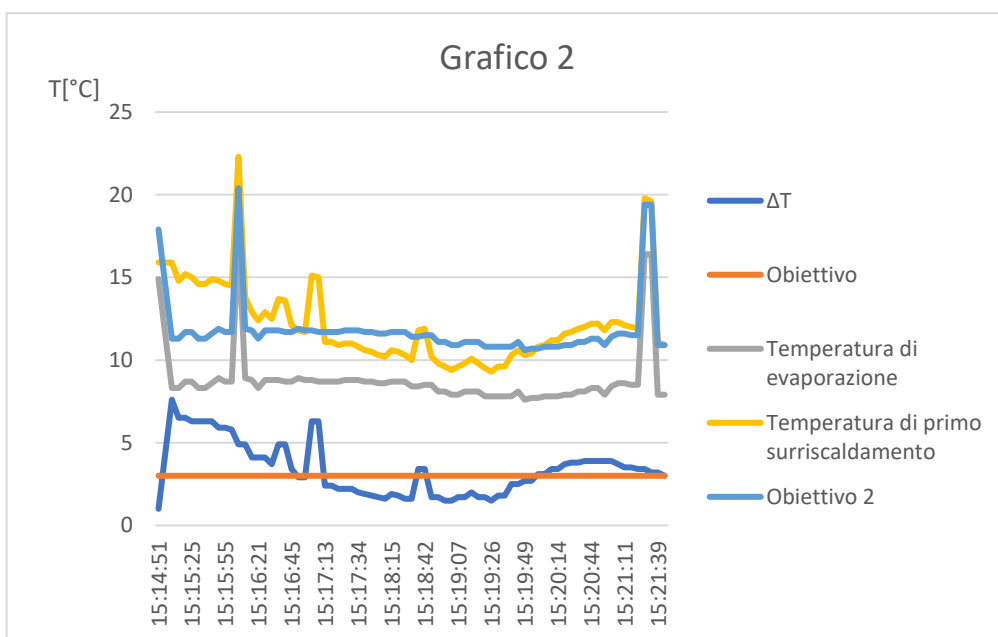
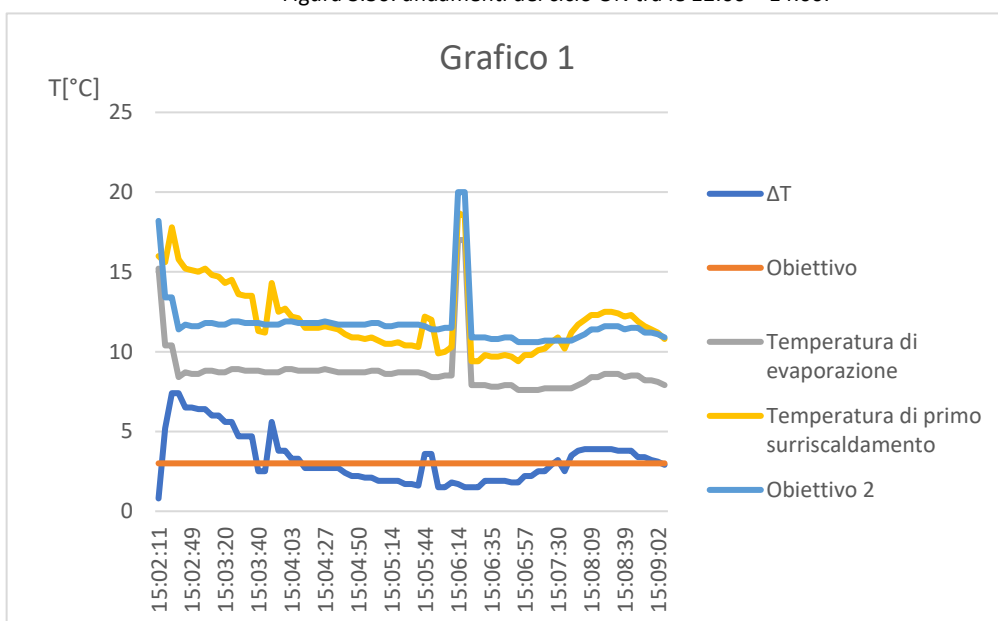
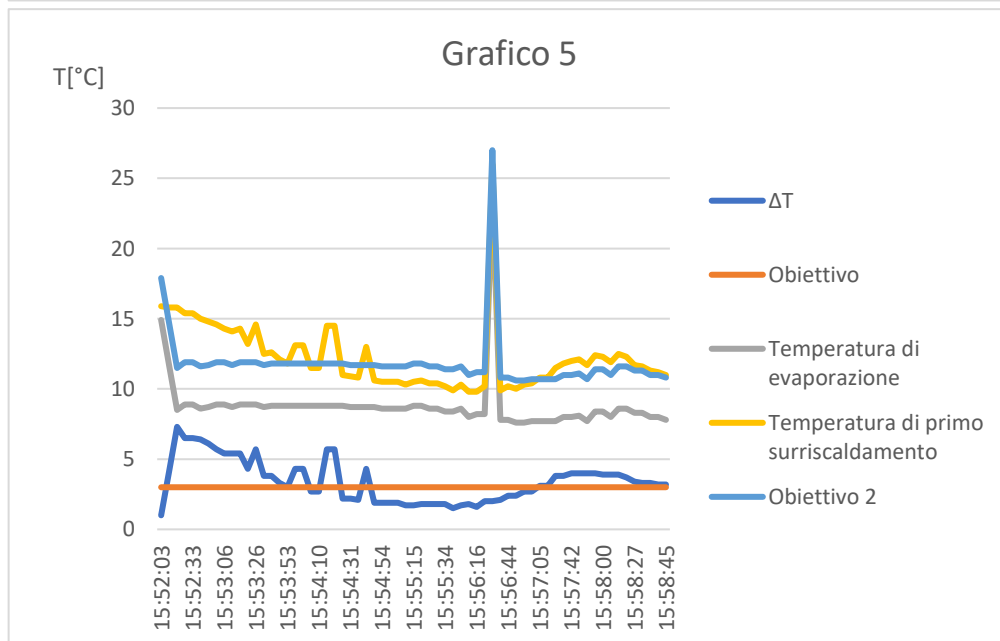
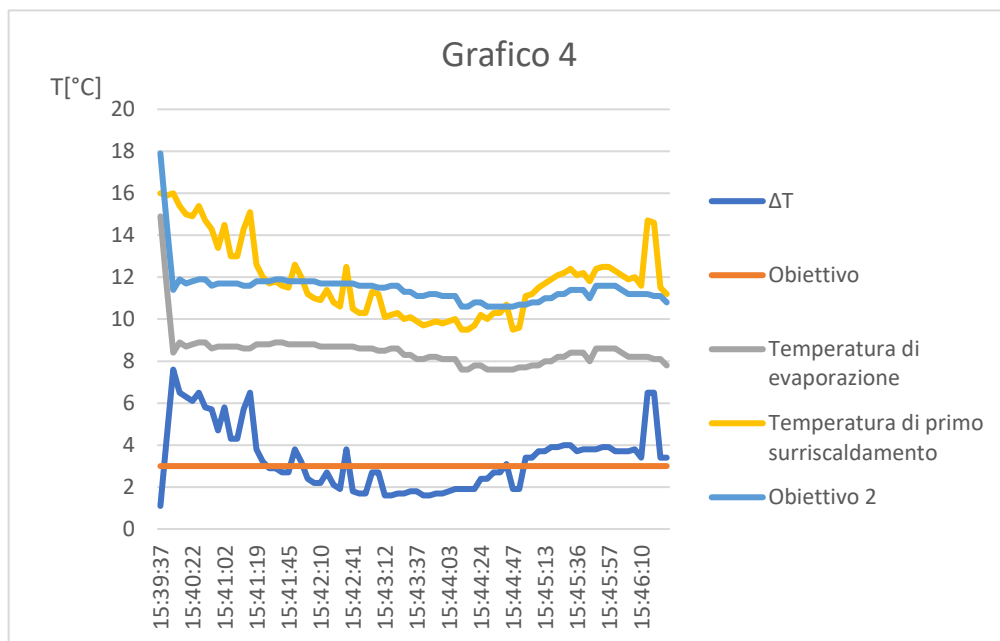
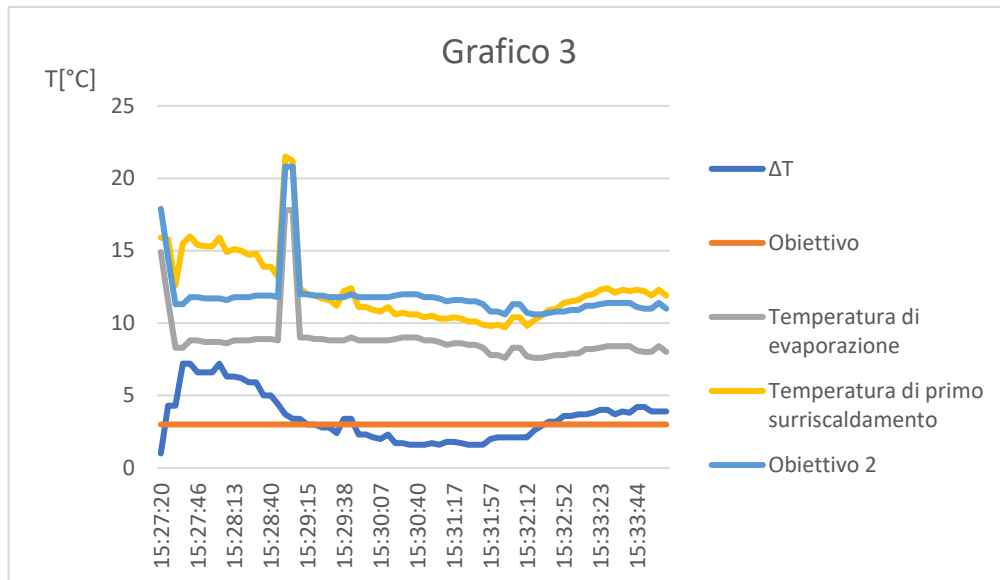


Figura 3.30: andamenti del ciclo ON tra le 12:00 – 14:00.





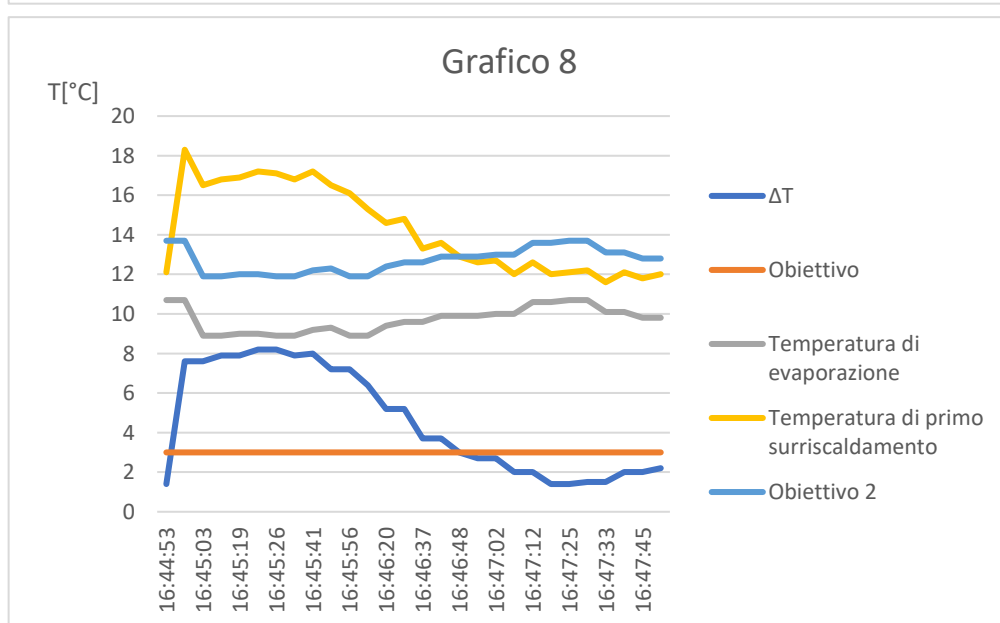
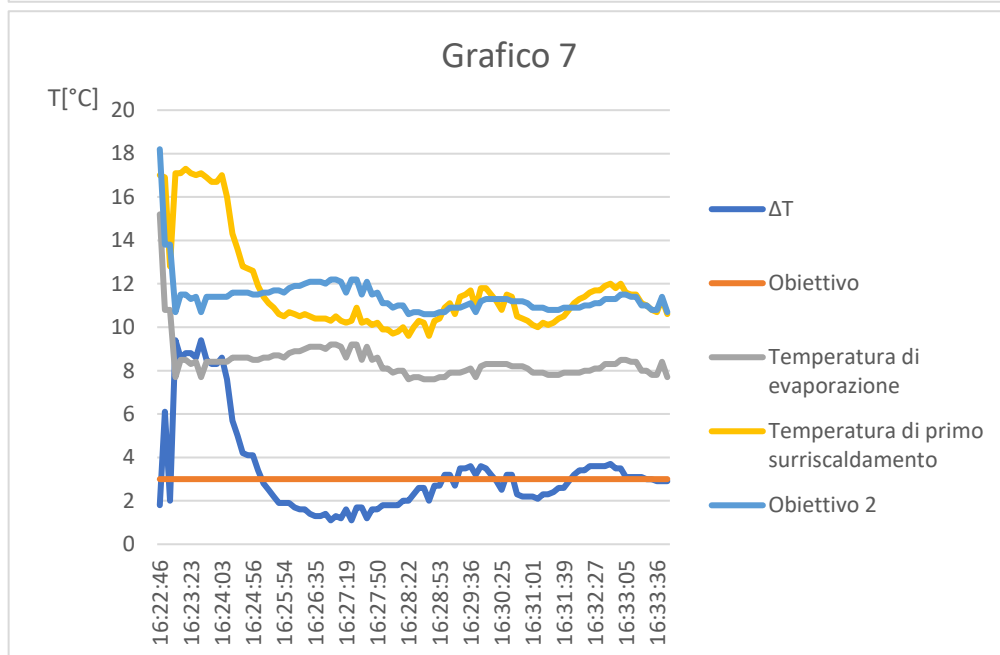
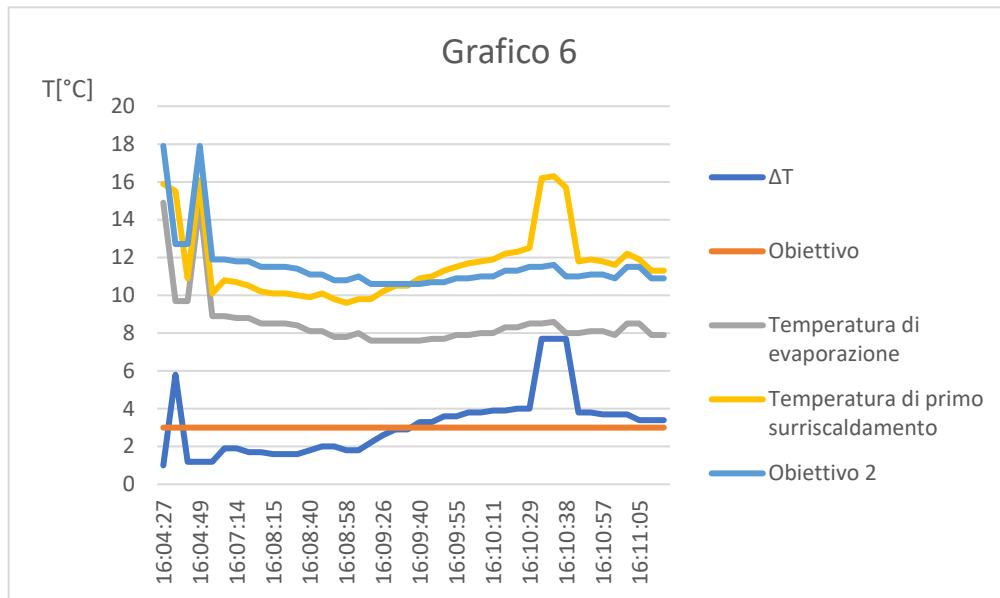


Figura 3.31: andamenti del ciclo ON tra le 15:00 – 17:00.

Al termine di tale analisi, si è visto come il set di parametri scelto permettesse di soddisfare gli obiettivi prefissati nell'arco dell'intera giornata: infatti, nei cicli ON della pompa di calore il grado di surriscaldamento assume valori prossimi al valore di set point e la risposta del sistema presenta un andamento stabile. Inoltre, si può notare come il sistema sia reattivo; infatti, il transitorio ha una durata breve confrontata con quella del ciclo ON della macchina.

CAPITOLO 4

4. Determinazione della durata ottimale dei cicli ON della pompa di calore

4.1 Introduzione

Come anticipato nei paragrafi precedenti, il risparmio energetico è direttamente correlabile al miglioramento delle prestazioni della pompa di calore, ossia all'aumento del COP. Quest'ultimo è dato dal rapporto fra la potenza termica e la potenza elettrica, che tuttavia può essere considerata pressoché costante al variare della temperatura di mandata dell'impianto. Pertanto, se l'obiettivo è quello di migliorare il COP di una pompa di calore, uno dei metodi possibili per attuarlo è quello di aumentare la potenza termica. Quest'ultima, inoltre, è direttamente proporzionale alla differenza di temperatura fra mandata e ritorno dell'impianto ΔT , che diviene quindi la grandezza da aumentare ai fini del miglioramento delle prestazioni della macchina.

L'analisi è incentrata sui cicli ON – OFF delle pompe di calore e si vuole ottenere un aumento del coefficiente di prestazione durante il ciclo ON della macchina. Per porre l'attenzione sui cicli operativi delle pompe di calore, si prenda come esempio un ciclo ON – OFF della macchina Tina 115, situata a Mappano.

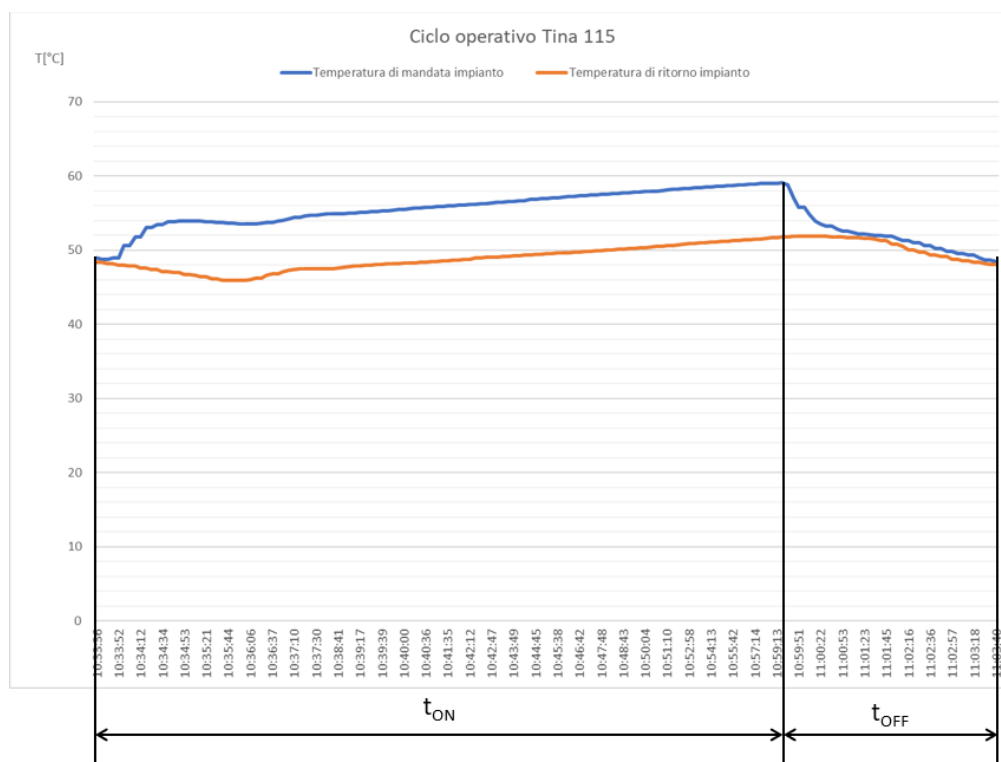


Figura 4.1: ciclo operativo della pompa di calore Tina 115.

La potenza termica ceduta dalla macchina è rappresentata dall'area compresa fra le due curve, rappresentanti la temperatura di mandata (in blu) e di ritorno dell'impianto (in rosso). L'obiettivo, pertanto, è quello di massimizzare tale area.

Tuttavia, nello sviluppo dell'algoritmo si devono considerare due aspetti:

- per aumentare l'efficienza della pompa di calore, si deve incrementare la potenza termica, ovvero si deve fare in modo tale che la pompa presenti una durata del ciclo ON maggiore e di conseguenza si ottenga un'area (potenza termica), compresa fra le due curve, maggiore;
- se si osservano le schede tecniche delle pompe di calore si nota come all'aumentare della temperatura di mandata la potenza termica diminuisca, mentre quella elettrica aumenti, e pertanto il COP diminuisca. Di conseguenza, non si deve confondere l'ottimizzazione della durata del

ciclo ON con il suo aumento poiché non è detto che per migliorare le prestazioni della macchina occorra esclusivamente aumentare t_{ON} .

Per sviluppare un algoritmo, che ottimizzi la durata del ciclo ON, sono state considerate due vie:

- dapprima, si è analizzato attraverso l'utilizzo del software "Studio 3T" il funzionamento della Tina 115, situata a Mappano, nella giornata del 2 novembre 2021. Attraverso i dati ricavati, sono stati ottimizzati i COP dei cicli ON effettuati dalla macchina durante la giornata analizzata.
- Inoltre, si è considerata e applicata l'ottimizzazione bayesiana e si è sviluppato un codice nel linguaggio di programmazione "R"®, che è un linguaggio di programmazione e un ambiente di sviluppo specifico per l'analisi statistica dei dati. Con tale approccio si è potuto considerare un modello estremamente semplice, che simuli la realtà.

4.1.1 Approccio bayesiano

L'analisi bayesiana è un metodo di inferenza statistica, che consente di combinare informazioni preliminari su un parametro di popolazione attraverso delle prove e utilizzare le osservazioni per cambiare e aggiornare le probabilità degli eventi osservabili. Pertanto, l'ottimizzazione bayesiana tiene conto delle prestazioni passate del parametro in esame che influenzano quelle future. La funzione per calcolare l'errore quadratico medio, detto RMSE, ossia la differenza tra i valori campioni previsti da un modello e i valori osservati, è chiamata funzione obiettivo. Pertanto, si può affermare che l'ottimizzazione bayesiana costruisce un modello di probabilità della funzione obiettivo e lo utilizza per selezionare l'iperparametro da valutare nella vera funzione obiettivo.

La vera funzione obiettivo è una funzione fissa, che prima di aver definito l'iperparametro non è nota ma viene supposta come riportato nella figura sottostante.

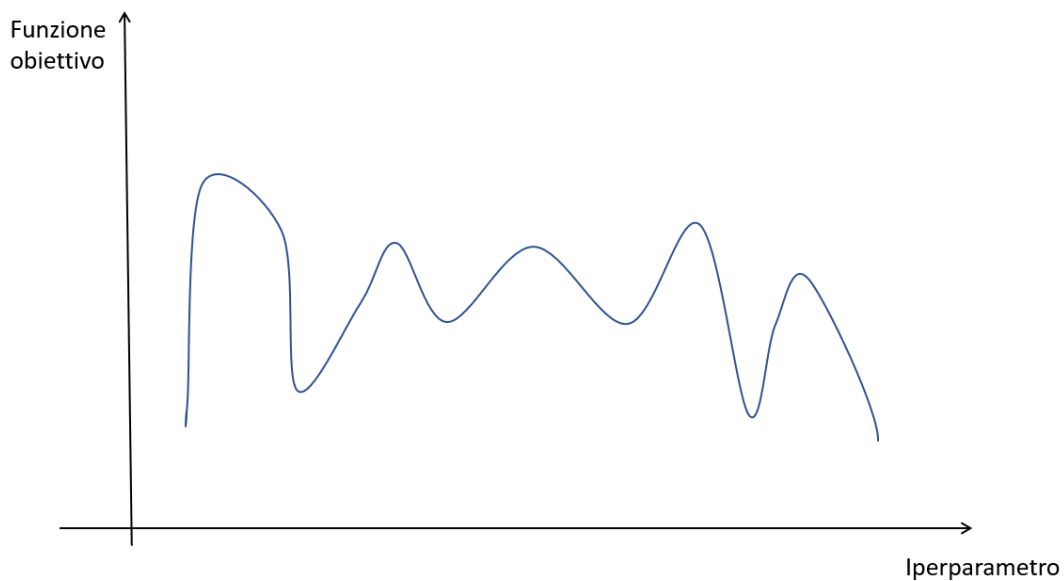


Figura 4.2: funzione obiettivo.

Se ci fossero delle risorse illimitate, si calcolerebbe ogni singolo punto della funzione obiettivo in modo da conoscerne la forma effettiva. Tuttavia, poiché ciò è impossibile, si suppone di conoscere solo otto campioni della vera funzione obiettivo, rappresentati come cerchi nella figura sottostante.

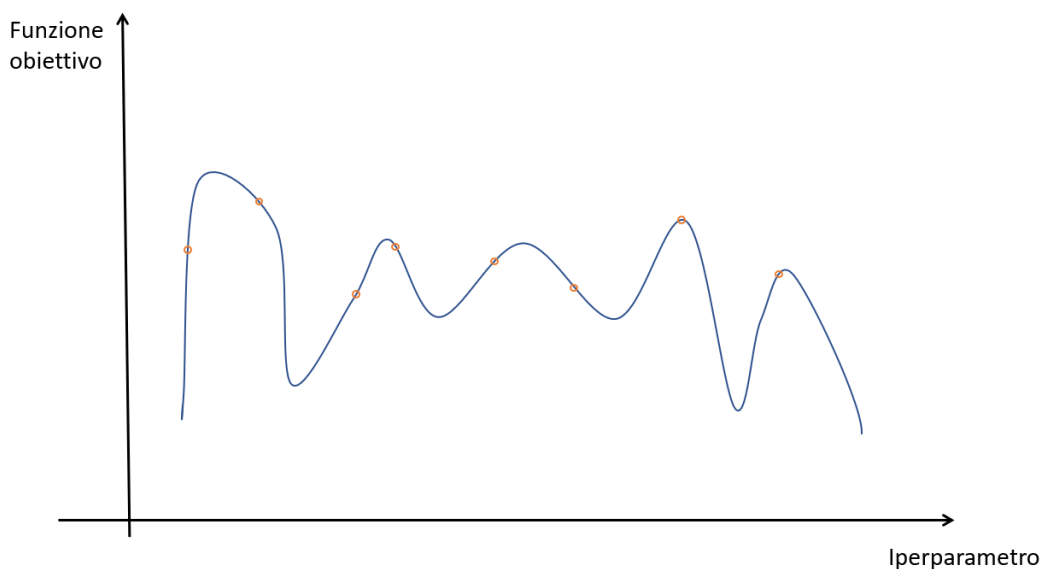


Figura 4.3: funzione obiettivo con 8 campioni.

Utilizzando questi otto esempi, si deve costruire un modello surrogato, detto anche modello di superficie di risposta, per approssimare la vera funzione obiettivo. Si consideri, pertanto, il modello surrogato e la deviazione.

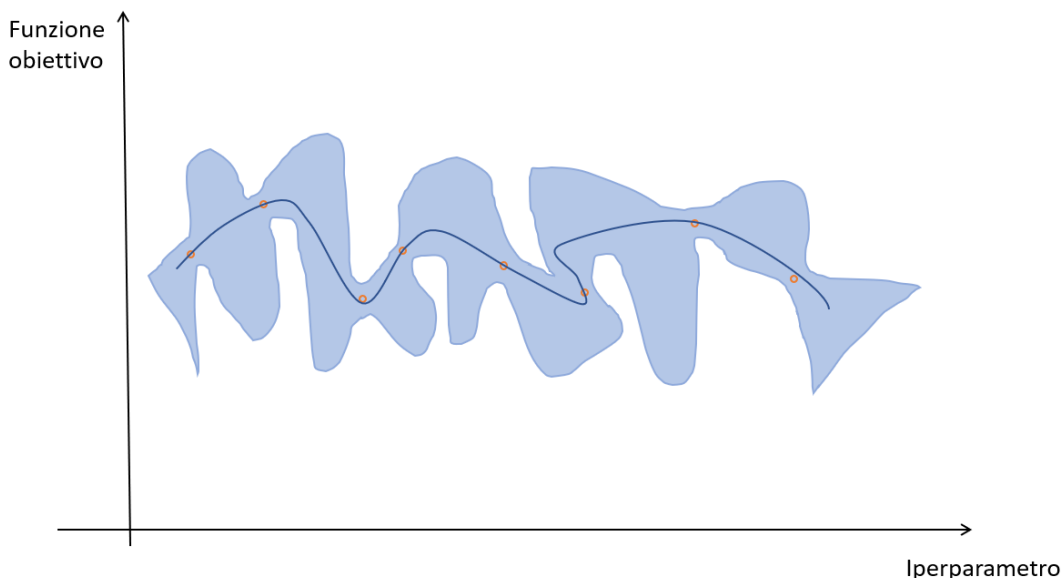


Figura 4.4: modello surrogato e deviazione.

Un modello surrogato per definizione è la rappresentazione di probabilità della funzione obiettivo, che è essenzialmente un modello addestrato sulle coppie. Una volta determinato ciò, si deve capire come scegliere il parametro da utilizzare come nono campione. Si deve costruire una funzione di acquisizione, detta anche funzione di selezione. Il prossimo iperparametro di scelta è dove la funzione di acquisizione è massimizzata. Si consideri, pertanto, in verde la funzione di acquisizione e la linea rossa è dove essa è massimizzata. Pertanto, come viene mostrato nella figura 4.5, l'iperparametro corrispondente e il suo punteggio di funzione obiettivo, rappresentato con un cerchio rosso, viene utilizzato come nono campione per aggiornare il modello surrogato.

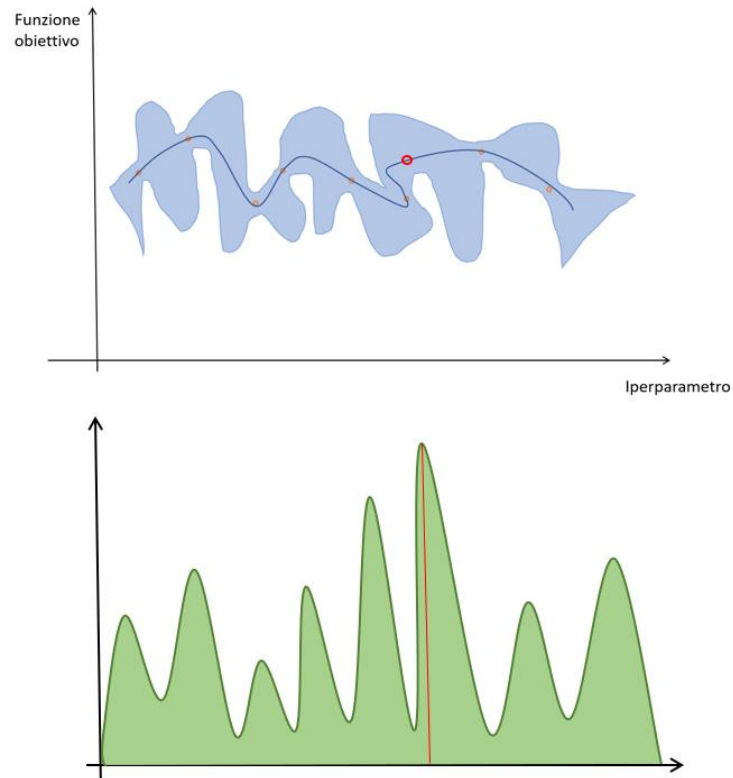


Figura 4.5: massimizzazione della funzione di acquisizione per selezionare il punto successivo.

Dopo aver utilizzato una funzione di acquisizione per determinare l'iperparametro successivo, si ottiene il vero punteggio della funzione obiettivo di questo nuovo iperparametro. Poiché il modello surrogato viene addestrato sulle coppie, l'aggiunta di un nuovo punto aggiorna il modello surrogato. Si ripetono i passaggi precedenti fino al raggiungimento del tempo massimo o dell'iterazione massimo.

In tal modo si ha un'approssimazione accurata della vera funzione oggettiva e si può ricavare il minimo globale dai campioni valutati, ossia si completa l'ottimizzazione bayesiana.

4.2 Analisi dei cicli ON della Tina 115

Per l'ottimizzazione del tempo t_{ON} , ossia la durata di un ciclo ON della macchina, si è presa in esame la Tina 115, situata a Mappano, nella giornata del 2 novembre 2021. Attraverso l'utilizzo del software "Studio 3T" sono state ricavate le seguenti grandezze: temperatura di mandata, temperatura di ritorno, temperatura esterna, energia elettrica e potenza termica, da cui si è ricavata l'energia termica. Infine, sono stati analizzati singolarmente i cicli ON della macchina in modo tale da ottimizzare ciascuno ed in conclusione si è ottenuto un miglioramento del COP giornaliero della macchina. A partire da tale analisi, si può procedere allo studio di ogni giornata in modo tale da calcolare i COP giornalieri della macchina nell'intera stagione di riscaldamento e ricavare lo SCOP.

4.2.1 Considerazioni iniziali

Osservando le schede tecniche delle pompe di calore, si deduce che all'aumentare della temperatura di mandata la potenza termica e il COP diminuiscono, mentre la potenza elettrica aumenta. Nel loro funzionamento le pompe di calore arrivano a raggiungere determinate temperature di mandata e determinate durate dei cicli ON – OFF in funzione della temperatura dell'ambiente esterno circostante: in particolare, per temperature esterne basse la macchina raggiunge temperature di mandata elevate e presenta dei cicli ON di durata notevolmente maggiore rispetto al ciclo OFF, mentre per temperature esterne elevate, la macchina presenta un comportamento opposto a quello sopra descritto.

Si prenda in esame due generici cicli della Tina 115 in modo tale da poter opportunamente analizzare l'andamento delle temperature di mandata e di ritorno.

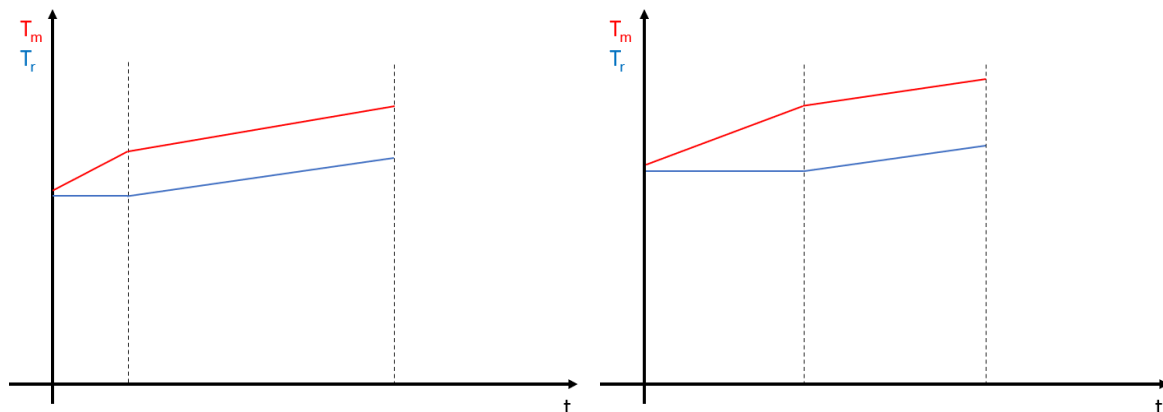


Figura 4.6: due ipotetici cicli ON della pompa di calore Tina 115.

Considerando i due ipotetici cicli ON riportati nella figura 4.6, si può suddividere ciascun ciclo in due parti, una che presenta una forma triangolare ed una seconda rettangolare. Come si osserva, il ciclo di sinistra, che è un ciclo tipico per temperature esterne basse, è caratterizzato da un'area rettangolare maggiore rispetto a quella triangolare, mentre il ciclo di destra, caratteristico per temperature esterne elevate, presenta una forma opposta al primo. Il metodo di ottimizzazione di t_{ON} proposto permette di allungare l'area rettangolare e di conseguenza consente un miglioramento del coefficiente di prestazione per i cicli che presentano una struttura come il ciclo di destra (ciclo a temperature esterne elevate), mentre non ha alcun riscontro per i cicli come quello di sinistra.

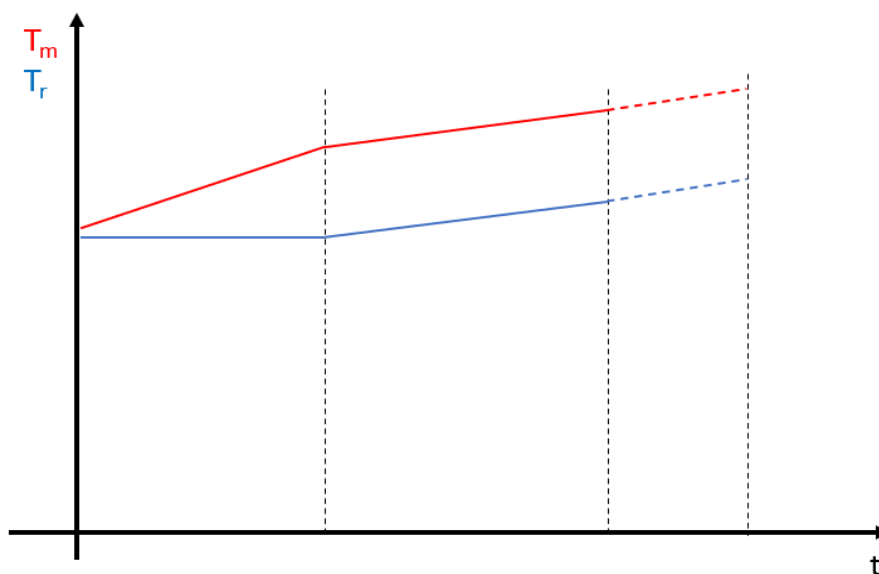


Figura 4.7: applicazione del metodo di ottimizzazione del tempo t_{ON} .

Pertanto, l'applicazione di tale metodo e il conseguente miglioramento del COP del singolo ciclo ON dipende da due grandezze fondamentali:

- la temperatura esterna T_{ext} ;
- le durate dell'area triangolare t_1 e dell'area rettangolare t_2 , in funzione della quali è stato definito il parametro l :

$$l = \frac{t_1}{t_2} \quad (4.1)$$

Infine, per l'applicazione del metodo implementato bisogna tener conto della zona di appartenenza del sito ove la macchina è situata: se la pompa di calore è in funzione in una località appartenente alla zona climatica C non si può imporre una temperatura di mandata superiore a 60°C.

4.2.2 Metodo proposto

Una volta individuati e graficati i diversi cicli operativi della macchina nella giornata in esame, si determinano i tempi t_1 e t_2 e utilizzando la formula 4.1 si calcola il parametro l . Dividendo il ciclo nelle due parti descritte in precedenza si determinano i rispettivi COP. Per determinare di quanto è possibile aumentare la durata t_2 si calcola:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_f - T_o}{t_2} \quad (4.2)$$

Ove:

- T_f è la temperatura di mandata in corrispondenza della quale si ha la fine ciclo ON;
- T_o è la temperatura di mandata, in corrispondenza della quale si ha la fine dell'area triangolare e l'inizio di quella rettangolare.

In tal modo decidendo di quanto aumentare la temperatura di mandata ΔT , espressa in Kelvin, si ricava la durata Δt , espressa in secondi, della parte di ciclo aggiuntivo attraverso la seguente formula:

$$\Delta t = \frac{\Delta T}{\frac{\partial T}{\partial t}} \quad (4.3)$$

Determinando la temperatura media della parte di ciclo aggiuntivo e utilizzando le schede tecniche della pompa di calore, si calcola il COP della parte aggiuntiva. Di conseguenza, per ogni ciclo ON è possibile calcolare il COP considerando o meno la parte aggiuntiva individuata:

$$COP_{iniziale} = \frac{COP_{1^\circ parte} \cdot t_1 + COP_{2^\circ parte} \cdot t_2}{t_1 + t_2} \quad (4.4)$$

$$COP_{finale} = \frac{COP_{1^\circ parte} \cdot t_1 + COP_{2^\circ parte} \cdot t_2 + COP_{parte\ agg} \cdot \Delta t}{t_1 + t_2 + \Delta t} \quad (4.5)$$

Infine, si calcola l'aumento percentuale di COP che si ottiene applicando il metodo proposto:

$$aumento [\%] = \frac{COP_{finale} - COP_{iniziale}}{COP_{iniziale}} \cdot 100 \quad (4.6)$$

4.2.3 Risultati ottenuti

Si è presa in esame la Tina 115, situata a Mappano, nella giornata del 2 novembre 2021 e sono stati individuati attraverso l'utilizzo del software "Studio 3T" 25 cicli operativi della pompa di calore. Per ogni ciclo si è applicato il metodo descritto nel sottoparagrafo 4.2.2 e sono stato stati ottenuti i risultati, riportati nella tabella sottostante.

N° ciclo	T _{ext}	I	$\frac{\partial T}{\partial t}$	ΔT	Δt	COP iniziale	COP finale	aumento percentuale
[-]	[°C]	[-]	[K/sec]	[K]	[secondi]	[-]	[-]	[%]
1	7,9	0,349	0,011	0	0,0	3,895	3,895	0,000
2	8,2	0,298	0,011	0	0,0	3,892	3,892	0,000
3	8,5	0,126	0,005	0	0,0	4,009	4,009	0,000
4	9,7	0,364	0,013	0	0,0	4,287	4,287	0,000
5	10	0,511	0,013	2,2	173,1	3,911	3,936	0,639
6	10,4	0,763	0,015	3,8	258,6	3,806	3,889	2,199
7	10,7	0,461	0,014	2,9	207,3	3,914	3,958	1,122
8	11,1	0,699	0,013	2,1	155,8	3,994	4,020	0,646
9	11,3	0,756	0,018	3,3	183,9	3,874	3,928	1,382
10	11,5	0,024	0,017	0	0,0	4,296	4,296	0,000
11	11,8	0,187	0,014	2,3	159,4	4,026	4,064	0,943
12	12	0,709	0,017	3,1	183,4	3,941	3,999	1,472
13	12,2	0,717	0,017	4	235,6	3,847	3,939	2,394
14	12,5	0,586	0,016	4,8	299,1	3,771	3,973	5,359
15	12,7	0,388	0,015	3	197,5	4,031	4,099	1,697
16	12,9	0,389	0,014	3,7	256,8	3,947	4,058	2,802
17	13,2	0,760	0,017	3,7	218,4	3,952	4,047	2,405
18	13,4	0,672	0,017	5,1	303,8	3,772	4,021	6,623
19	13,7	0,660	0,018	4,7	265,7	3,858	4,053	5,047
20	13,9	0,705	0,018	4,5	252,7	3,910	4,080	4,343
21	14,2	0,209	0,020	0	0,0	3,969	3,969	0,000
22	14,9	0,892	0,020	6,7	327,9	3,535	3,998	13,111
23	15	0,714	0,018	6	339,2	3,734	4,043	8,290
24	14,9	0,491	0,019	4,9	261,8	3,932	4,122	4,844
25	14,4	0,173	0,012	0	0,0	4,073	4,073	0,000

Tabella 4.1: analisi dei cicli ON della Tina 115 il 2 novembre 2021.

Tuttavia, nell'analisi effettuata bisogna tener conto di due aspetti importanti:

- la pompa di calore in esame alimenta un capannone industriale in cui si hanno degli aerotermi, la cui accensione o spegnimento influenza notevolmente i cicli operativi della macchina.
- Poiché con tale metodo sto aumentando la durata dei cicli ON della macchina, ogni qualvolta si effettua ciò ad un ciclo i cicli successivi traslano del tempo calcolato. Pertanto, in tale analisi si deve scegliere se cancellare alcuni cicli finali per confrontare i COP nello stesso arco temporale o tenere fisso il numero di cicli per considerare l'intera variazione della temperatura

esterna nella giornata in esame. Quindi, si è deciso di attuare la seconda ipotesi, ossia si considera l'intero range di variazione della T_{ext} .

Infine, si può calcolare il COP giornaliero considerando o meno l'aumento dei cicli ON della macchina.

COP GIORNALIERO		
COP iniziale	3,93	[-]
COP finale	4,03	[-]
Aumento percentuale	2,520	[%]

Tabella 4.2: aumento percentuale del COP giornaliero grazie all'applicazione del metodo proposto.

Si osserva, pertanto, che attraverso l'applicazione del metodo di ottimizzazione del tempo t_{ON} proposto si ottiene un miglioramento del COP giornaliero pari a **2,520 %**.

4.2.4 Considerazioni finali

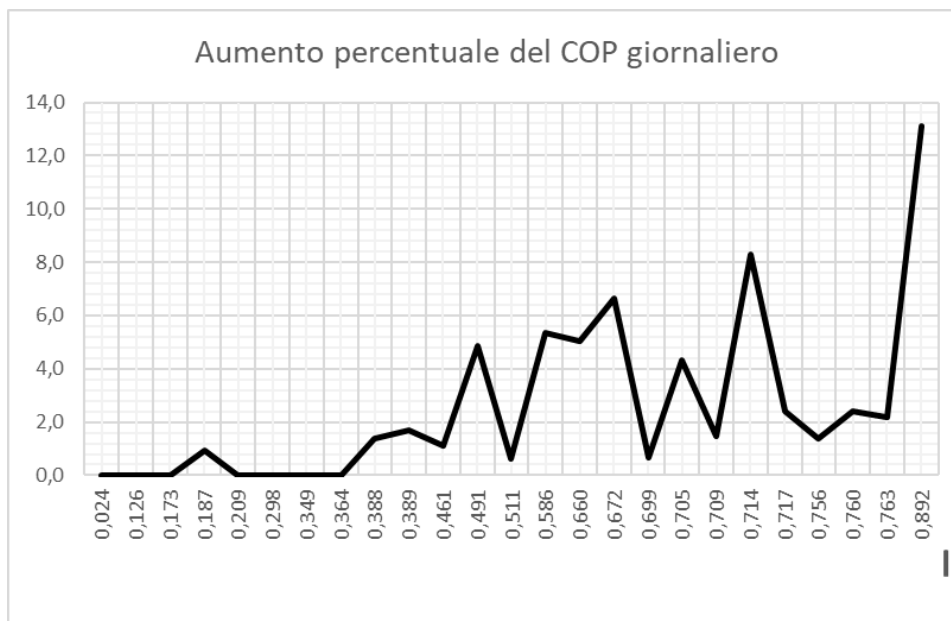
Come descritto in precedenza, l'applicazione di tale metodo e il conseguente aumento del COP dipendono fondamentale dalla temperatura esterna T_{ext} e dal parametro denominato l . Pertanto, utilizzando l'analisi effettuata è possibile ricavare due grafici, in cui si riporta l'aumento in percentuale del COP giornaliero in funzione di T_{ext} e l .

I dati utilizzati sono i seguenti:

I	aumento percentuale	T ext	aumento percentuale
[-]	[%]	[°C]	[%]
0,024	0,000	7,9	0,000
0,126	0,000	8,2	0,000
0,173	0,000	8,5	0,000
0,187	0,943	9,7	0,000
0,209	0,000	10	0,639
0,298	0,000	10,4	2,199
0,349	0,000	10,7	1,122
0,364	0,000	11,1	0,646
0,388	1,382	11,3	1,382
0,389	1,697	11,5	0,000
0,461	1,122	11,8	0,943
0,491	4,844	12	1,472
0,511	0,639	12,2	2,394
0,586	5,359	12,5	5,359
0,660	5,047	12,7	1,697
0,672	6,623	12,9	2,802
0,699	0,646	13,2	2,405
0,705	4,343	13,4	6,623
0,709	1,472	13,7	5,047
0,714	8,290	13,9	4,343
0,717	2,394	14,2	0,000
0,756	1,382	14,9	13,111
0,760	2,405	15	8,290
0,763	2,199		
0,892	13,111		

Figura 4.8: dati utilizzati per graficare l'aumento percentuale in funzione della temperatura esterna e di I.

Si ottengono di conseguenza i seguenti grafici:



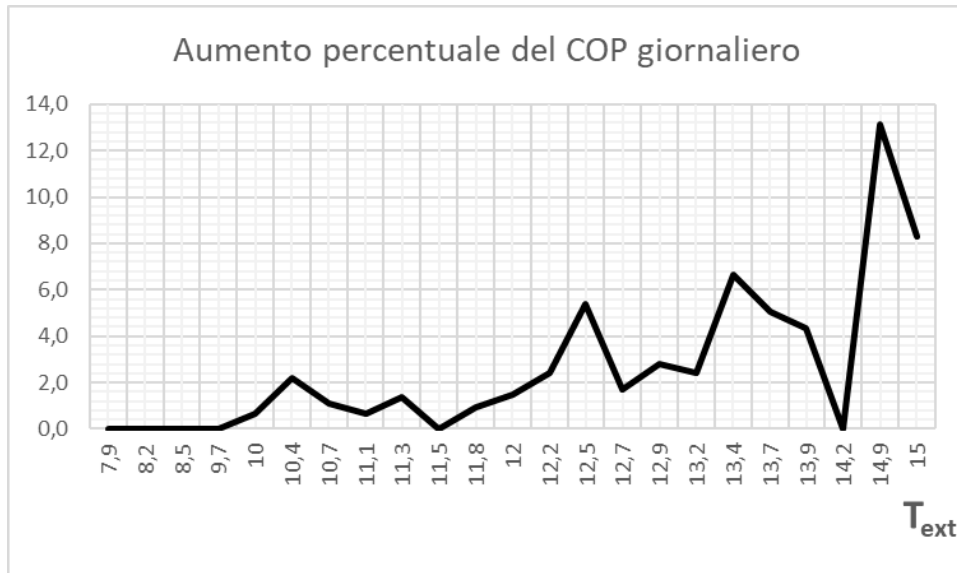


Figure 4.9 e 4.10: aumento del COP giornaliero in funzione della temperatura esterna e del parametro l.

4.3 Ottimizzazione Bayesiana

4.3.1 Basi teoriche sull'ottimizzazione numerica

Nel determinare l'efficienza di uno scambiatore di calore entra in gioco un gran numero di fattori, alcuni controllabili e conosciuti (e.g., temperature di set point, potenza elettrica erogata, caratteristiche strutturali) altri invece non noti o non controllabili, come le caratteristiche dell'edificio, l'umidità dell'aria, l'uso dei termostati da parte degli utenti. Inoltre, è difficile modellare chiaramente la relazione funzionale fra tali variabili e l'outcome di interesse, ovvero il COP.

Come tali fattori influenzino l'outcome di interesse è determinato dalla cosiddetta "funzione obiettivo" (FO) f o funzione target [12] – [14].

Lo scopo del progettista è trovare il set di input \vec{x} della FO che ne massimizzi/minimizzi il valore:

$$\vec{x}_{best} = \arg \max_{\vec{x}} f(\vec{x}) \quad (4.7)$$

Se $f(\vec{x})$ è nota, differenziabile ovunque e presenta un massimo/minimo globale, questa è ottimizzabile analiticamente [12], [15], [16]. Nella realtà spesso la forma funzionale di $f(\vec{x})$ è non nota, vi sono ottimi locali multipli (non-convessità), o la sua soluzione analitica non è computazionalmente affrontabile.

In queste situazioni ci si affida a modelli di “ottimizzazione globale” tramite “ottimizzazione numerica” (ON) [12], [17], [18]. Con ON si intende la massimizzazione (o minimizzazione) di una FO “iterativamente”, ovvero tramite “valutazione”, “evaluations” ripetute della stessa con set di dati input \vec{x} diversi. Le combinazioni di dati da testare vengono scelte empiricamente in funzione del risultato delle precedenti valutazioni, permettendo la ricostruzione della relazione fra questi e l’outcome (response surface).

Più precisamente, viene generato un “modello surrogato” (MS) \tilde{f} che mappa l’output osservato $y = f(\vec{x})$ ad ogni valutazione della FO ai dati di input utilizzati $f(\vec{x})$ [19], [20]. Tale modello permette poi di stimare l’outcome con un certo quantitativo di bias ϵ dovuto al grado di approssimazione.

$$\tilde{y} = (y + \epsilon_{\tilde{f}, \vec{x}}) = \tilde{f}(\vec{x}, f(\vec{x})) \quad (4.8)$$

Tale modello surrogato permette, quindi, di ipotizzare quale nuova combinazione di input possa migliorare l’outcome senza acquisire nuovi dati tramite la FO, guidando quindi la scelta delle nuove iterazioni. Ogni iterazione a sua volta migliora \tilde{f} , cioè, rendendo ϵ arbitrariamente piccolo e permette la scelta di input sempre migliori: l’algoritmo permette di “convergere” verso l’optimum della FO.

Vi sono una molteplicità di algoritmi di ON, sia basati sulle esplorazioni di gradienti come “L-BFGS-B” [21] o attraverso soluzioni non parametriche deterministiche come l’approccio di “Nelder-Mead” [22] o stocastiche come il “Simulated Annealing” [23]. Questi algoritmi hanno il pregio di essere notevolmente veloci nel valutare il MS per scegliere i nuovi valori candidati, a costo però di una peggiore performance per iterazione che deve essere compensata da un gran numero di evaluation [24].

Tale approccio può essere quindi problematico quando si vuole ottimizzare un processo reale, per il quale la FO ha un costo rilevante in termini di tempo e/o risorse [24]. Una possibile soluzione è spostare il costo dalla FO al MS, se questo permette di diminuire ϵ e quindi diminuire il numero di iterazioni necessarie. Essendo il MS un costrutto computazionale, la sua efficienza è limitata solo dalla

potenza di calcolo e dalla sua progettazione, mentre non ha i vincoli fisici della FO. Una tecnica di ON che sfrutta questo concetto è la cosiddetta “Ottimizzazione Bayesiana” (OB) [24] – [26].

4.3.2 Principi di analisi Bayesiana

L’analisi Bayesiana è un metodo probabilistico formale per aggiornare la probabilità percepita di un evento o delle sue caratteristiche (parametri) in funzione dei dati osservati, al fine di affinare la conoscenza dello stesso (e.g., diminuire l’incertezza sulla frequenza dell’evento o sulla valutazione quantitativa dei suoi parametri) [27] – [29]. Il costrutto centrale di tale metodo è il teorema di Bayes:

$$p(\theta|D) = \frac{p(D|\theta)p(\theta)}{p(D)} \quad (4.9)$$

Tale teorema postula che la probabilità di un parametro θ *a posteriori* (i.e., dopo aver osservato un set di dati D) dipenda da:

- $p(D|\theta)$: probabilità di osservare tali dati in base ai valori del parametro (anche detta “Likelihood”);
- $p(\theta)$: la probabilità *a priori* del parametro, determinata prima di osservare i dati, a partire da esperienza nel settore o da valutazioni precedenti;
- $p(D)$: la probabilità non condizionale (marginale, scissa dal parametro) di osservare tali dati.

Riassumendo, dato un parametron, la probabilità a posteriori è proporzionale alla probabilità dei dati osservati pesata sulla probabilità del parametro stesso di assumere un determinato valore. Nella seguente figura viene mostrato come la probabilità di evento di un fenomeno binomiale (e.g., lancio di una moneta) la cui probabilità mediana a priori è del 26,4% (intervallo di credibilità al 90%, 90%CrI: [6,28%; 58,2%]), venga modificata dopo aver osservato 15 successi su 20, portandola al 63,3% [47,4%; 77,4%] [27]. L’aggiunta di nuovi dati sposta sia il valore mediano del parametro (e.g., prob. dell’evento), sia ne diminuisce l’incertezza (l’ampiezza dell’intervallo di credibilità).

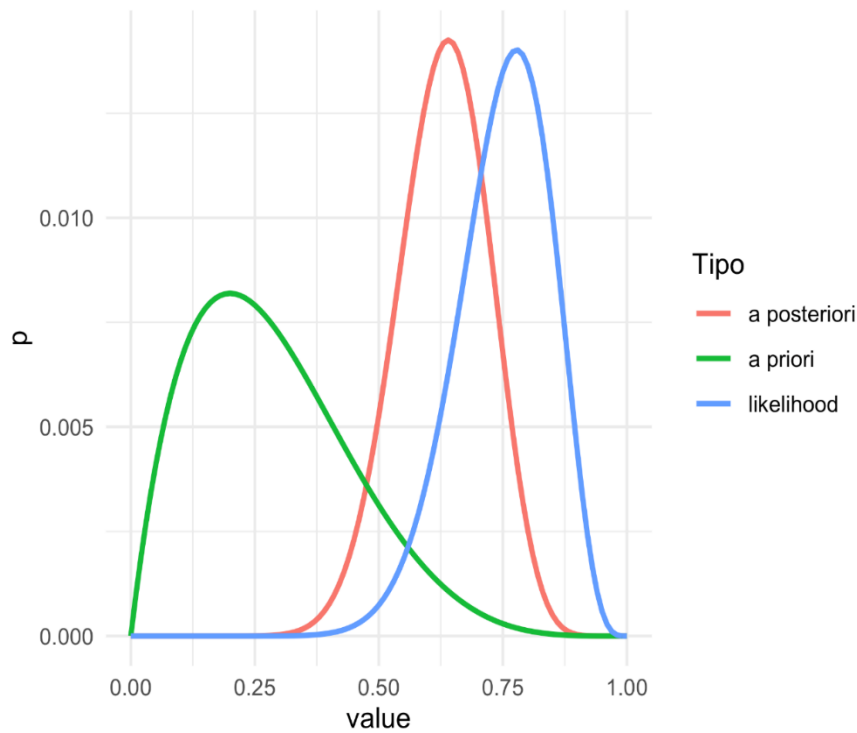


Figura 4.11: andamenti dei tre tipi di probabilità.

A partire dalla distribuzione a posteriore dei parametri $p(\theta|D)$ è possibile ricostruire la cosiddetta “distribuzione predittiva a posteriori” (PPD dall’inglese) [30]:

$$p(\tilde{D}|D) = \int_{\theta} p(\tilde{D}|D, \theta)p(\theta|D)d\theta \quad (4.10)$$

Ciò equivale ad utilizzare il modello stimato per generare nuovi dati in funzione di combinazioni di input per le quali non sono state ancora effettuate osservazioni.

Questi strumenti permettono di modellare un fenomeno fisico stimando una approssimazione a posteriori dello stesso, affinando iterativamente la sua precisione (cioè, diminuendo l’incertezza dei suoi parametri) man mano che nuovi dati vengono acquisiti.

Per esempio, nella seguente figura si può vedere una ricostruzione orografica generata attraverso un modello a spline Bayesiano a partire da un set random di 200 rilevazioni altimetriche. Il colore indica il l’altezza stimata e la trasparenza l’incertezza della stima, a sua volta funzione del numero di

osservazioni in ogni regione dello spazio di input. Il modello è quindi in grado di ricostruire la superficie di interesse anche nelle zone non osservate.

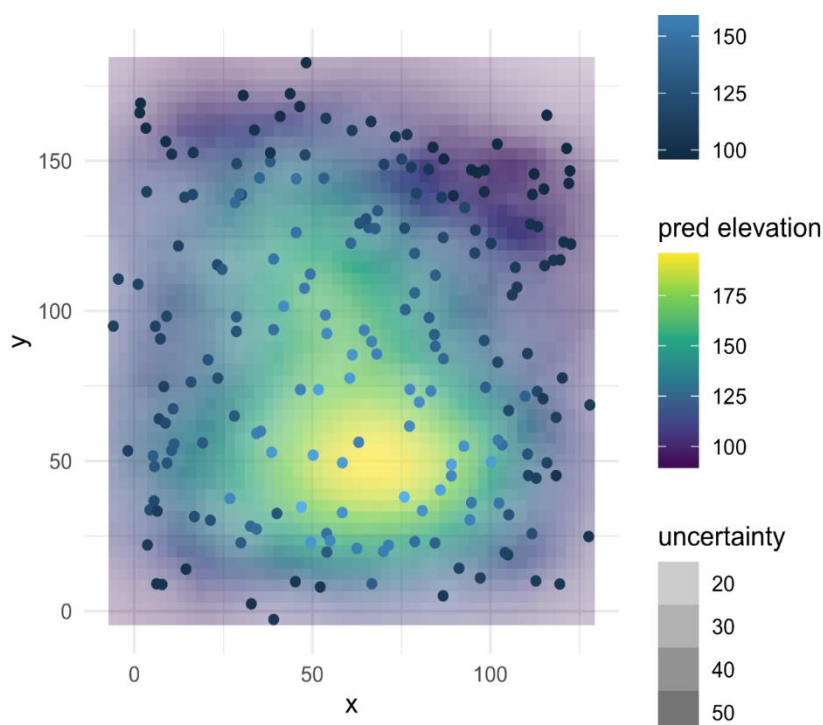


Figura 4.12: ricostruzione orografica generata attraverso un modello a spline Bayesiano.

Un altro dei vantaggi dei modelli Bayesiani è la capacità di gestire dati mancanti e rumore statistico, fenomeno comune nei processi fisici dato il gran numero di fattori non misurati. Difatti, nel modello appena descritto è stato volutamente aggiunto del rumore statistico, senza che questo impattasse sulle stime in maniera rilevante.

Il grande potere inferenziale dei metodi Bayesiani comporta però un maggiore costo computazionale aggiuntivo. Infatti, solo i modelli più semplici hanno una soluzione analitica chiusa, mentre generalmente è necessario un approccio numerico basato su Markov Chain Monte Carlo (MCMC) per stimare la distribuzione a posteriori dei parametri [27], [30]. Tale tecnica esplora in maniera empirica combinazioni di parametri (parameter space) in maniera proporzionale alla loro distribuzione a posteriori.

Un altro aspetto a cui fare attenzione è la scelta dei parametri a priori, in quanto questi hanno sia un forte peso in mancanza di molti dati, ma tale influenza cala velocemente ma mano che vengono raccolte informazioni. La scelta dei valori

a priori può impattare sulla velocità di esecuzione del MCMC, limitando l'esplorazione a combinazioni plausibili dei parametri [30],[31].

4.4. Implementazione generale del modello di ottimizzazione

L'applicazione dell'inferenza Bayesiana nell'ottimizzazione consiste nel generare un MS che approssimi il meglio possibile la FO, con accuratezza crescente ad ogni iterazione [24] – [26]. Il vantaggio dell'approccio Bayesiano è che attraverso la PPD possiamo ricostruire la surface anche in luoghi in cui non abbiamo ancora osservato dati, ovviamente con incertezza inversamente proporzionale. Tale surface e la sua incertezza può essere utilizzata nella scelta degli input nella successiva valutazione iterativa della FO.

È stato dimostrato che tale approccio converga verso l'ottimo della FO molto più velocemente dei metodi basati su MS non probabilistica, al costo di tempi di stima della stessa esponenzialmente maggiori. Inoltre, l'incertezza nel modello permette di gestire variazioni stocastiche nell'output della FO che renderebbero la convergenza problematica per algoritmi deterministici.

4.4.1 Simulatore della pompa di calore

Per testare l'approccio di ottimizzazione è necessario poter generare un outcome da ottimizzare a partire dal vettore input. Siccome effettuare il testing su macchine reali è oneroso dal punto di vista delle tempistiche, è stato creato un modello di simulazione di una pompa di calore. Il sistema è formato da un tubo contenente acqua in movimento a velocità proporzionale al diametro del tubo; il fluido nel tubo acquisisce calore nella sezione esposta allo scambiatore se questo è attivo; lo scambiatore acceso è sempre alla stessa temperatura. Lo scambiatore si accende e si spegne in funzione di due temperature di set point registrate all'uscita dallo stesso. Il calore acquisito viene disperso ad un ambiente chiuso con un determinato volume. L'ambiente chiuso a sua volta rilascia calore all'esterno, dove trova una temperatura ambiente più bassa che varia col tempo.

Segui la rappresentazione matematica del modello sotto forma di sistema di equazioni differenziali:

$$\begin{aligned} \frac{dT_i}{dt} &= (dT_{i,\text{flow}} + dT_{i,\text{diff}} + dT_{i,\text{exch}}) \\ dT_{i,\text{flow}} &= \frac{v_i}{L_i} (T_{i-1} - T_i) \\ dT_{i,\text{diff}} &= \alpha * \frac{d^2 T_i}{dL_i^2} \\ dQ_i &= h_i 2\pi r_i L_i * (T_i - T_{i,\text{target}}) \\ dT_{i,\text{exch}} &= \frac{-dQ_i}{V_i \rho_{\text{water}} c_{\text{water}}} \end{aligned}$$

with $T_{i,\text{target}}, h_i, r_i, v_i = \begin{cases} T_{\text{amb}}, h_{\text{pipe}/\text{amb}}, r_{\text{pipe}}, v_{\text{pipe}} & \text{if pipe exposed to external ambient,} \\ T_{\text{house}}, h_{\text{pipe}/\text{house}}, r_{\text{pipe}}, v_{\text{pipe}} & \text{if pipe exposed to internal ambient,} \\ T_{\text{flame}}, h_{\text{pipe}/\text{pump}}, r_{\text{pump}}, v_{\text{pipe}} \frac{r_{\text{pipe}}^2}{r_{\text{pump}}^2} & \text{if pipe inside heat pump AND flame is ON,} \\ \frac{1}{n} \sum_{i:i \in \text{pump}}^n T_i, h_{\text{pipe}/\text{pump}}, r_{\text{pump}}, v_{\text{pipe}} \frac{r_{\text{pipe}}^2}{r_{\text{pump}}^2} & \text{if pipe inside heat pump AND flame is OFF} \end{cases}$

$$\begin{aligned} \frac{dT_{\text{house}}}{dt} &= dT_{\text{house},\text{in}} - dT_{\text{house},\text{out}} \\ dT_{\text{house},\text{in}} &= \frac{\sum_{i \in \text{house}} dQ_i}{V_{\text{house}} \rho_{\text{air}} c_{\text{air}}} \\ dT_{\text{house},\text{out}} &= \frac{h_{\text{house}/\text{amb}} S_{\text{house}} (T_{\text{house}} - T_{\text{amb}})}{V_{\text{house}} \rho_{\text{air}} c_{\text{air}}} \\ T_{\text{amb}} &= T_{\text{amb},\text{base}} + 2.5 \sin \left(2\pi \frac{t}{60 \times 24} \right) \end{aligned}$$

con T_i la temperatura del tubo in ogni segmento i di lunghezza L_i e raggio r_i (differente nelle sezioni interne e esterne alla pompa di calore), $dT_{i,\text{flow}}$ il contributo al cambio di temperatura nell'intervallo di tempo dt dovuta allo scorrere dell'acqua a velocità v_i (differente in base al raggio r_i), $dT_{i,\text{diff}}$ il contributo della diffusione della temperatura fra segmenti adiacenti, con coefficiente di diffusione termica α , e $dT_{i,\text{exch}}$ il contributo dovuto allo scambio di calore dQ_i in ogni segmento del tubo; quest'ultimo ha valore diverso in funzione della sezione di tubo considerata (ovvero se a contatto con l'interno dell'edificio, l'esterno e lo scambiatore di calore della pompa accesso o spento), e dipende dal coefficiente di trasmissione termica h_i e la temperatura $T_{i,\text{target}}$ con cui sono a contatti i segmenti del tubo. Nel determinare lo scambio di calore vengono infine considerati il volume V_i del segmento di tubo e la densità ρ e la capacità termica

c

dell'acqua.

L'acqua nelle sezioni di tubo interne allo scambiatore di calore viene riscaldata se la pompa è accesa, altrimenti si uniforma verso la temperatura media dell'acqua. Anche l'edificio subisce delle variazioni di temperatura dovute al calore acquisito cumulativamente dal tubo $\sum_{i \in \text{house}} dQ_i$ limitamente ai segmenti interni all'edificio stesso e alla perdita di calore tramite le pareti di superficie S_{house} verso l'esterno a temperatura T_{amb} , con coefficiente di trasmissione termica fra interno e esterno $h_{\text{house}/\text{amb}}$; lo scambio di calore si trasforma in una variazione di temperatura dT_{house} considerando il volume della casa V_{house} la densità ρ_{air} e la capacità termica dell'aria c_{air} .

La temperatura esterna T_{amb} varia nel tempo con oscillazioni sinusoidali intorno ad una temperatura base $T_{\text{amb,base}}$.

Nello specifico il sistema viene inizializzato con i seguenti parametri:

- temperatura dello scambiatore acceso: 80 °C;
- temperatura iniziale ambiente chiuso: 20 °C;
- volume spazio chiuso: 800 m³;
- coefficiente di trasmissione termica ambiente chiuso / esterno: 5 W / (m² K);
- superficie dell'ambiente chiuso a contatto con l'esterno: 111.8034 m²;
- temperatura esterna: 15 °C;
- temperatura media nel tubo ad inizio simulazione: 39 °C;
- lunghezza del tubo: 10 m;
- diametro del tubo: 6 cm;
- lunghezza della sezione di tubo interna allo scambiatore: 62 cm;
- diametro della sezione di tubo interna allo scambiatore: 17,4 cm;
- velocità dell'acqua nel tubo: 0,1 m/s;
- velocità dell'acqua nello scambiatore: 0.012 m/s;

- porzione di tubo a contatto con l'ambiente esterno: 10%;
- coefficienti di trasmissione termica ambiente dal tubo verso (rispettivamente) ambiente chiuso, esterno, scambiatore di calore: 5000, 10 e 31447,2 W/ (m² K);
- coefficiente di diffusione termica in acqua = 1,02 x 10⁻⁵.

Tali parametri simulano una pompa di calore che riscalda un open space industriale e sono stati scelti al fine di simulare i dati generati da un apparato simile presente nello stabilimento di Teon.

I parametri sono utilizzati in un sistema di equazioni differenziali (ODE) che simula il flusso dell'acqua e gli scambi termici fra le componenti del sistema. Tale sistema viene risolto attraverso un ODE solver [32].

Come output della simulazione estraiamo il COP/minuto, ovvero la differenza degli integrali di temperatura nel tubo misurati all'uscita e all'entrata dello scambiatore di calore, fratto il tempo di ciclo.

$$COP_{min} = \frac{\int_{t_{start}}^{t_{stop}} T_{out,t} dt_{cycle} - \int_{t_{start}}^{t_{stop}} T_{in,t} dt_{cycle}}{\int_{t_{start}}^{t_{stop}} dt_{cycle}} \quad (4.11)$$

$$t_{start} = t | T_{out,t} < T_{start}$$

$$t_{stop} = t | T_{out,t} - T_{in,t} < 0.1^{\circ}C$$

Per tempo di ciclo si intende il tempo trascorso tra accensione e successivo spegnimento dello scambiatore di calore, fino al momento in cui lo scambiatore è spento e il delta fra le temperature di uscita T_{out} e entrata T_{in} è minore di 0,1 °C. Lo scambiatore si accende se la temperatura di uscita T_{out} è inferiore alla temperatura set point di start T_{start} , mentre si spegne se la stessa supera il set point di stop T_{stop} , con $T_{out} > T_{start}$.

4.4.2 Scelta del modello surrogato

Il primo step è scegliere la forma funzionale del MS [24]. La scelta del MS dipende fondamentalmente dal trade off fra complessità computazionale, fedeltà

predittiva e generalizzabilità (cioè, accuratezza predittiva su nuovi dati non ancora osservati).

Dato che la forma funzionale fra gli input e l'output da ottimizzare non è conosciuta si usa scegliere dei modelli che approssimino spontaneamente tale relazione (cioè, modelli non-parametrici o data-driven). Fra i modelli più utilizzati vi sono i Gaussian Processes (GP) [33] e gli Spline Models (SM).

I GP stimano il valore dell'outcome in base alla distanza fra punti osservati vicini, con incertezza crescente con la distanza fra essi. Tale incertezza è distribuita come una multivariata normale fra tutti i punti osservati. Nella seguente figura vediamo un GP applicato ad una serie di punti e come sia in grado di tracciare una traiettoria fra esse (linea blu) e come l'incertezza (linea rossa tratteggiata) aumenti fra i punti.

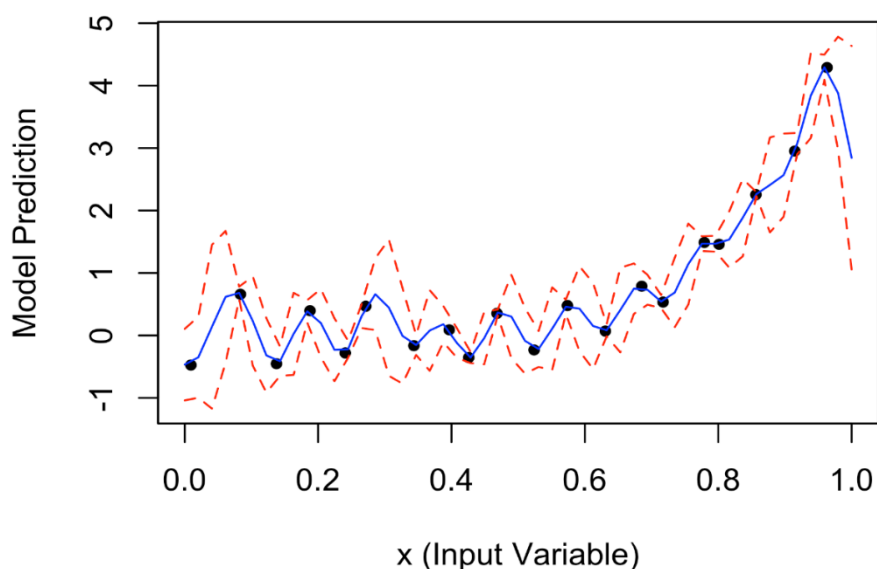


Figura 4.13: Gaussian process applicato ad una serie di punti.

Gli SM invece si basano sulla generazione di una serie di curve (base splines) la cui somma pesata riproduce i dati osservati. Rispetto ai GP, gli SM hanno il vantaggio di essere più veloci da stimare, al costo di maggiore incertezza, come mostrato nella figura seguente. Tale incertezza però può essere vantaggiosa in presenza di fenomeni stocastici o di parametri non misurati.

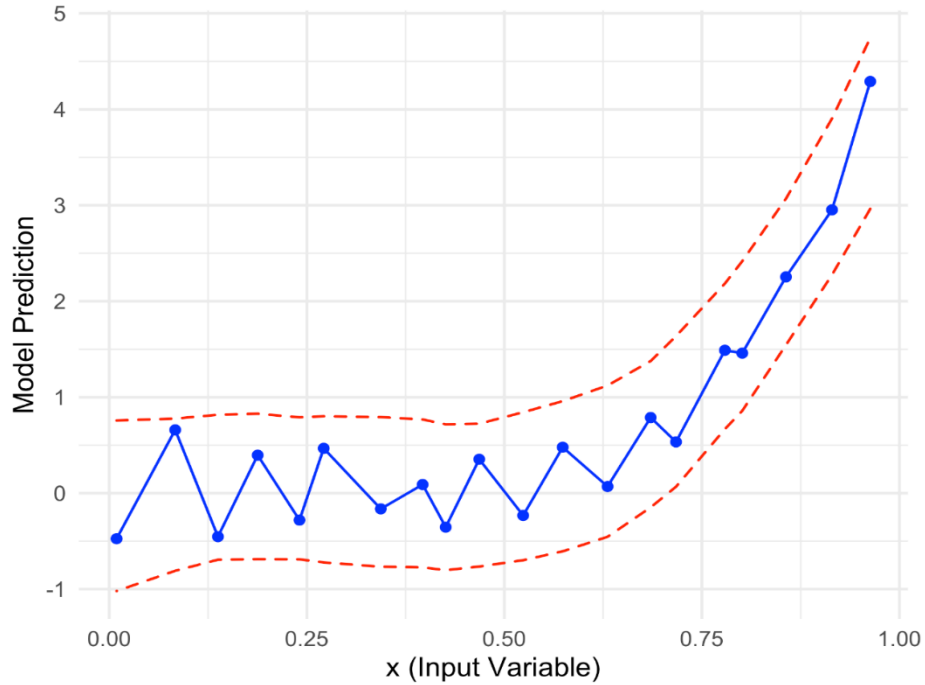


Figura 4.14: Spline Models.

Nel nostro caso si è utilizzato un modello a spline per il MS:

$$y \sim w(N + 1 - i) \times \logNormal(\mu, \sigma)$$

$$\mu = \alpha + \sum_{k=1}^K \beta_k h(\vec{x})$$

$$\alpha \sim StudentT(3, E[y], 2.5) \tag{4.12}$$

$$\beta_k \sim StudentT(3, 0, s_k)$$

$$s_k \sim HalfStudentT(3, 0, 2.5)$$

$$\sigma \sim HalfStudentT(3, 0, 2.5)$$

$$w(i) = e^{-i \cdot \eta}$$

dove il valore medio predetto (su scala logaritmica) è dato dalla sommatoria di K funzioni “thin plate spline” h , pesate per dei coefficienti β_k , più un valore medio α . Il numero di spline K è deciso in base ai dati. Per ogni

parametro sono stati usati dei prior poco informativi basati sulla distribuzione T di Student con standard deviation = 2.5. I valori di likelihood vengono pesati tramite il parametro $w(i)$ che fa sì che vi sia un decadimento esponenziale negativo dell'importanza delle osservazioni, con la conseguenza che venga data più importanza ai dati più recenti. La velocità del decadimento è regolata dal parametro $\eta = 0.05$. Il MS viene fittato su dati raccolti durante le precedenti iterazioni in cui è stata valutata la FO per una combinazione di candidate inputs.

4.4.3 Funzione di acquisizione

Una volta generato il modello surrogato, questo può essere utilizzato per la scelta degli input per la successiva valutazione della FO. La modalità con cui viene effettuata è formalizzata nelle "funzione di acquisizione" (FA) f_a [24]. Questa prende in input una serie di "candidate inputs" \vec{x}_c da valutare nella FO e la response surface rappresentata dalla PPD generata a partire da tali input e ritorna candidate input \vec{x}_c^* che massimizzano la probabilità di migliorare la FO alla successiva valutazione:

$$\vec{x}_c^* = f_a(\tilde{f}(x_c)) \quad (4.13)$$

Vi sono molti esempi di FA: expected improvement, probability of improvement, entropy search, upper confidence bound, e altre [37]. La probability of improvement è un indicatore con una buona robustezza metodologica e tende a convergere verso il vero massimo, ma non dà informazioni sull'entità del miglioramento, ma solo sulla sua possibilità. Per questo motivo abbiamo selezionato l'expected improvement (EI) che ai vantaggi del precedente utilizza anche la magnitudo dell'improvement nel decidere il set di input da selezionare. La scelta dei best candidate inputs tramite EI è formulata nel seguente modo:

$$\begin{aligned} \vec{x}_c^* = f_a(\vec{x}_c) &= \operatorname{argmax}_{x \in \vec{x}_c} (Z\sigma(\tilde{y}_x)\Phi(Z) + \sigma(\tilde{y}_x)\phi(Z)) \\ Z &= (\mu(\tilde{y}_x) - y^* - \zeta) / \sigma(\tilde{y}_x) \\ \tilde{y}_x &= \tilde{f}(\vec{x}_c) \end{aligned} \quad (4.14)$$

Con $\mu(\tilde{y})$ e $\sigma(\tilde{y})$ che rappresentano rispettivamente la media e la deviazione standard della PPD di \tilde{y}_x prodotta dal modello surrogato \tilde{f} per ogni combinazione di input \vec{x}_c . y^* rappresenta il maggior valore dell'outcome osservato finora; $zeta$ è un termine di regolarizzazione che inibisce convergenze precoci. $\phi(Z)$ sono $\Phi(Z)$ sono rispettivamente la densità di probabilità e la probabilità cumulativa secondo una distribuzione normale, valutate a Z . In pratica, la funzione valuta quale è il miglioramento rispetto al best osservato finora per ogni combinazione di input, scalando tale valore per l'incertezza in quei punti. La FA ritorna a un valore di EI per ogni combinazione di candidate inputs, selezionando poi il set che massimizza tale valore.

Una volta computato il nuovo set di candidate input, questi vengono di nuovo testati tramite la FO, un nuovo valore y viene prodotto e questi dati vengono usati per aggiornare il MS.

4.4.4 Implementazione grafica

Di seguito gli step che compongono l'implementazione dell'algoritmo di ottimizzazione nel modello di scambiatore di calore. Gli input sono rappresentati da una matrice $2 \times i$ di valori di temperature di set point (start e stop) testate per i iterazioni. L'output è il COP_{min} , definito precedentemente.

- Fare una prima valutazione delle FO: effettuare una prima simulazione con delle T_{start} e T_{stop} iniziali per ricavare un valore di COP_{min} .
- Per un numero di iterazioni $i = 60$:
 - Se vi sono abbastanza dati per poter applicare il MS:
 - addestrare lo spline model sulle combinazioni di temperature di set point e il COP_{min} ;
 - stimare una matrice di 2500 combinazioni random generate tramite latin hypercube nello spazio fra 18 e 80 °C. Successivamente vengono eliminate le combinazioni in cui $T_{start} > T_{stop}$.
 - Stimare l'EI per ogni combinazione;

- selezionare la combinazione che corrisponde all'EI massimo.
- Se NON vi sono abbastanza dati per poter applicare il MS:
 - generare una coppia di temperature di set point random, partendo dalle ultime utilizzate più un rumore Gaussiano con $sd = 5$, rispettando sempre il limite 18 e 80 °C.
- Utilizzare le coppie di temperature scelte con uno dei due metodi per generare un nuovo valore di COP_{min} tramite la FO simulata.
- Incrementare la matrice input e output con le nuove temperature ed il COP_{min} relativo e ripetere il ciclo.

Non è possibile applicare il MS se non vi sono abbastanza combinazioni di temperature di input e relativi COP_{min} , quindi inizialmente le temperature da testare vengono generate in maniera random su tutto lo spazio di temperature consentite. Nel modello considerato sono state necessarie almeno 30 valutazioni della FO con valori random prima di poter applicare il MS. La presenza dell'esplorazione random preliminare è utile per caratterizzare bene la response surface ed evitare che il MS rimanesse bloccato in un minimo locale.

4.4.5 Software impiegato

Per le analisi è stato utilizzato R v4.1.2 [38] con l'uso dei seguenti pacchetti:

- *dplyr* [39] e *tidyr* [40] per la gestione dei dati;
- *ggplot2* per la produzione di grafici [41];
- *deSolve* per la risoluzione del modello di scambiatore di calore utilizzato nelle simulazioni [32];
- *brms* [42] e *stan* [43] per l'implementazione dei modelli Bayesiani.

4.5 Risultati

Il modello di ottimizzazione è stato fatto girare per 60 iterazioni. Si descrivono ora i principali risultati derivanti dalla simulazione.

4.5.1 Distribuzione dei candidate inputs

La seguente figura mostra le coordinate delle temperature di start e stop che sono state provate. La forma dei punti riportati rappresenta la modalità con cui sono stati generati, ovvero quadrati se tramite rumore random e cerchi se tramite ottimizzazione Bayesiana (l'unico triangolo rappresenta la valutazione di FO di input). La trasparenza e la grandezza dei punti differenziano le evaluation della FO più recenti (punti più grandi e marcati) da quelle più vecchie (punti più piccoli e trasparenti). Il colore rappresenta il COP/min relativo a quelle coordinate.

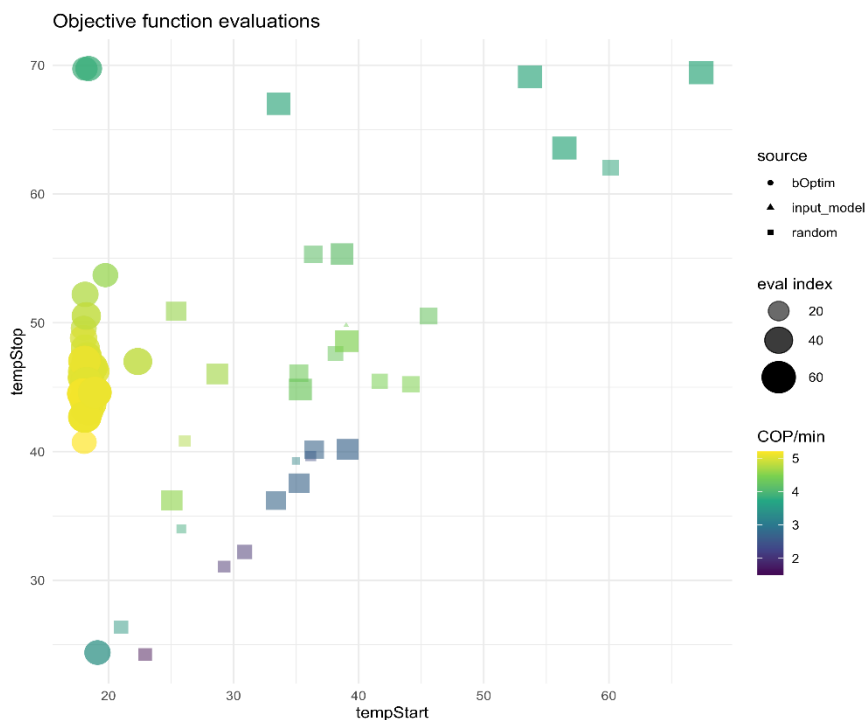


Figura 4.15: coordinate delle temperature di start e stop provate.

È evidente come i candidate input generati dal sistema di ottimizzazione siano ben concentrati in un'unica zona, mentre nella fase random questi coprono tutto spazio campionario. Il grafico mostra anche come la zona associata ad un maggiore COP è particolarmente concentrata e coperta dalle soluzioni proposte dall'ottimizzazione.

4.5.2 Evoluzione della response surface

In questa figura vediamo l'evoluzione della surface response predetta dal MS, man mano che aumentano le valutazioni della FO. Nello specifico vengono

mostrate le valutazioni numero 30, 50 e 60. Si nota come il modello tende convergere verso una zona di interesse, mentre “dimentica” (a causa del decay esponenziale), le zone prima interessate dal campionamento random.

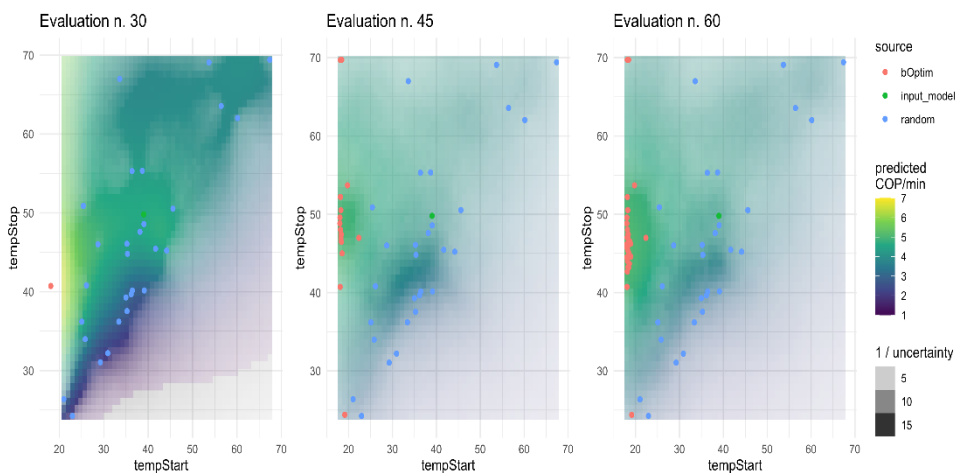


Figura 4.16: evoluzione della response surface.

4.5.3 Valutazione della COP/min

Nella figura seguente si vede come il COP/min tende ad essere più uniforme e di valore maggiore una volta cominciato il processo di ottimizzazione.

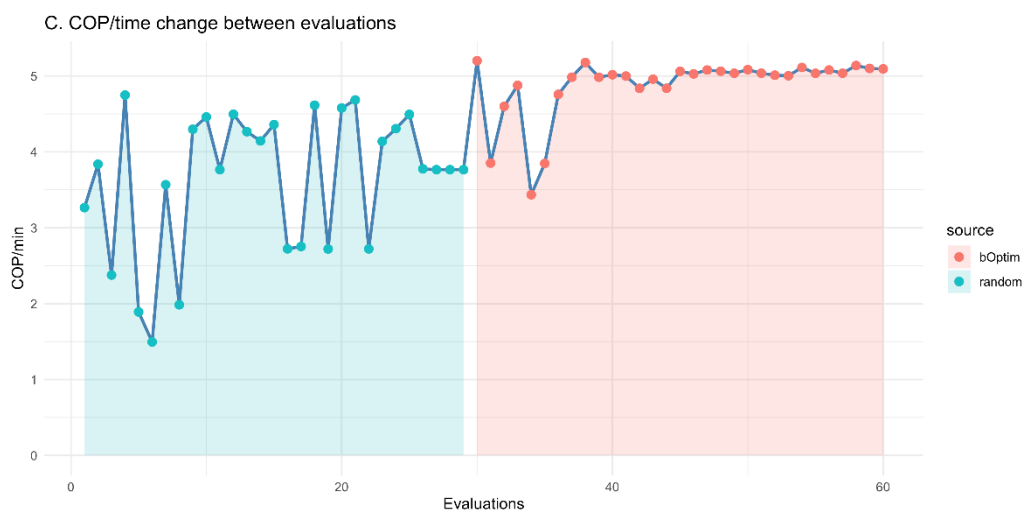


Figura 4.17: evoluzione del COP/min.

Tramite un modello si può stimare il valore medio dei COP/min stimati prima e dopo l’inizio dell’ottimizzazione, più l’incertezza sulla stima (95% CrI).

Value	Stima Mediana	[95% CrI]
Valore medio (Random)	3.53	[3.3; 3.78]

Value	Stima Mediana	[95% CrI]
Cambiamento relativo	1.38	[1.25; 1.52]
Valore medio (Ottimizzato)	4.86	[4.55; 5.19]

Tabella 4.3: stima del valore medio del COP/min.

Si veda come il COP/min medio migliori fra il 25% e il 50% dopo l'introduzione dell'ottimizzazione.

Infine, viene presentato il confronto fra un ciclo simulato prima e dopo la simulazione.

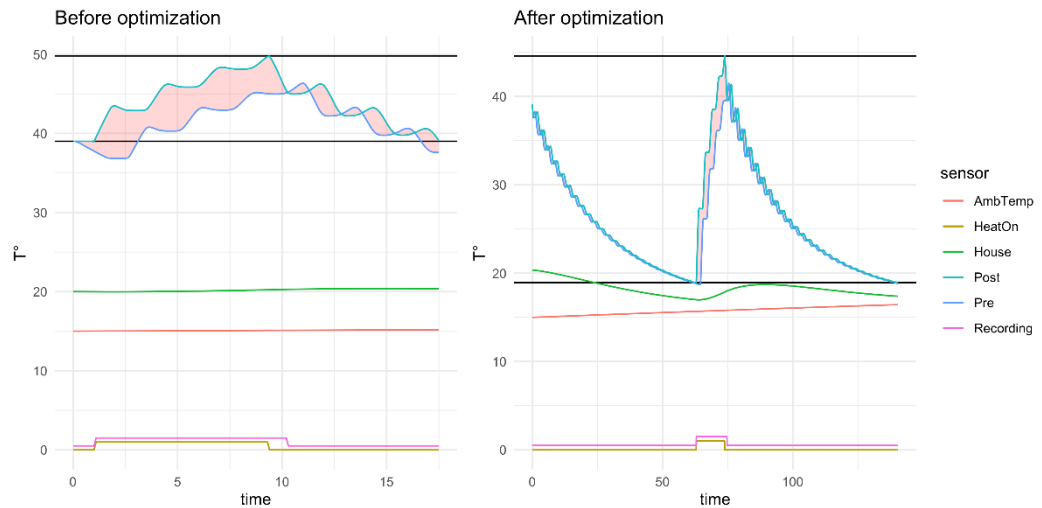


Figura 4.18: evoluzione del ciclo prima e dopo l'ottimizzazione.

Versione	Durata Ciclo Totale (min)	Durata Scambiatore Acceso (min)	COP	COP/min
Iniziale	16.4	8.2	39.99253	4.394784
Dopo ottimizzazione	77.4	10.8	59.60223	5.094208

Tabella 4.4: valori del COP/min prima e dopo l'ottimizzazione.

Come è possibile notare sebbene il periodo di accensione dello scambiatore sia simile (8-10 min), il modello ottimizzato permette un rilascio prolungato di calore che equivale ad una maggiore COP assoluto che al minuto.

Capitolo 5

5. Conclusioni

Questa tesi incentra l'attenzione su tre metodi che consentono il miglioramento delle prestazioni delle pompe di calore analizzate. L'incremento delle prestazioni della macchina, visto in termini di SCOP, consente sia una riduzione delle emissioni clima – alteranti sia un beneficio in termini di risparmio economico. L'obiettivo, quindi, è stato quello di garantire all'utente un minor consumo di energia elettrica, ma anche quello di salvaguardare l'ambiente. Il primo metodo sviluppato consente di aumentare lo SCOP della macchina del 17,6%, solo attraverso l'utilizzo della formula Climatica.

Con l'ottimizzazione dei parametri della regolazione PID della valvola di laminazione, invece, sono stati ottimizzati i tempi di raggiungimento del grado di surriscaldamento ossia, arrivare al valore target nel minor tempo possibile e rimanerci stabilmente per l'intero ciclo ON della macchina.

Infine, nel terzo algoritmo implementato è stata ottimizzata la durata del ciclo ON della pompa di calore attraverso un codice in linguaggio di programmazione R. Focalizzando l'attenzione sul rapporto fra COP e durata del ciclo ON della macchina si è ricavato un incremento di tale rapporto compreso fra il 25% e il 50%.

5.1 Sviluppi futuri

Il terzo algoritmo implementato che consente l'ottimizzazione della durata del ciclo ON della macchina può essere sviluppato ulteriormente attraverso la modifica dei parametri di outcome e attraverso l'utilizzo della formula Climatica. Inoltre, sia la variazione e il perfezionamento del modello utilizzato per l'implementazione di tale algoritmo sia l'utilizzo di dati reali consentono un ulteriore sviluppo dell'algoritmo.

Infine, gli ultimi due algoritmi implementati non sono stati testati al banco prova e pertanto l'applicazione di questi ultimi su macchine in funzionamento reale può essere occasione di ulteriore approfondimento e sviluppo.

Ringraziamenti

Questa tesi la dedico ai miei genitori, luce della mia vita. Vi devo tutto quello che ho ottenuto in vita mia e tutto quello che otterrò. Per me rappresentate più di quanto possiate minimamente immaginare. Siete il faro che mi guida quando da solo ho difficoltà ad andare avanti: mamma in ogni situazione difficile della mia vita in te ho trovato riparo e conforto; ho trovato una lezione di vita, un consiglio per andare avanti o una mano dove appoggiarmi e potermi sentire fragile; papà in te trovo ogni giorno consigli preziosi su come affrontare qualsiasi situazione della mia vita: non mi scorderò mai le ore passate in macchina in cui mi insegnavi letteralmente a vivere. Siete il mio modello, se dovessi mai diventare la metà delle persone che siete voi mi riterrei soddisfatto: di te mamma ammiro la tua caparbità, la tua ingenuità fanciullesca e la tua voglia di vivere sempre e comunque. Hai negli occhi quella luce viva, che mi fa credere ogni volta che nella vita l'entusiasmo è tutto, che non devo mai perdere la curiositas, tanto cara al nostro amato Ulisse. Ma mamma tu sei molto ma molto altro: tu sei una donna super brillante, intelligentissima, che in ogni sua scelta ha avuto il coraggio e la forza di mettere la sua famiglia al primo posto. Papà tu per me rappresenti il mito, ossia colui a cui vorrei assomigliare un giorno: per me sei stato, sei e sarai sempre il mio supereroe. Riesci in tutto quello che fai: sei il miglior papà che potessi mai sognare, sempre presente in ogni momento, sempre disposto ad aiutare senza mai prevaricare, sempre pronto a risolvere i problemi dai più piccoli ai più grandi; sei il miglior ingegnere che incontrerò mai nella mia carriera: hai una cultura infinita, una dialettica invidiata anche dal miglior oratore, una capacità innata di reagire ad imprevisti e risolvere problematiche; sei una delle persone più belle e buone che io conoscerò mai: tratti ogni persona con la stessa bontà che ti contraddistingue, porti rispetto anche a persone che non si meriterebbero un tuo saluto, ma tu mi hai sempre insegnato il rispetto, ma il rispetto quello vero non di facciata (te lo ricordi sì?!). Mi avete insegnato l'amore per la cultura: da piccolo leggendomi gli antichi miti greci o nelle infinite sfide in macchina a distruggerci di tabellini e forme

verbali; l'amore per lo sport, che mi porterò sempre dietro; l'amore per la famiglia e per gli amici, elementi fondamentali della nostra vita.

Infine, però, vi vorrei ringraziare per avermi donato coloro che mi accompagneranno sempre, in ogni momento della mia vita: i miei fratelli. Grazie perché ci avete insegnato a stare insieme, a rimanere uniti e a fare affidamento sempre gli uni agli altri. Il 5 aprile di 25 anni fa siete convogliati a nozze: quell'amore che vi siete promessi 25 anni fa oggi ha tre nomi, anzi quattro: Luca, Iacopo, Simone e Leyla. Grazie, vi amo.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Veronesi Massimiliano (2021), *Regolazione PID*, Milano: FrancoAngeli.
- [2] Ambiente Piemonte,
<http://relazione.ambiente.piemonte.it/2021/it/aria/impatti/salute/>, (consultato in data 20 Novembre 2021).
- [3] Wikipedia (2021), “Comorbilità”,
<https://it.wikipedia.org/wiki/Comorbilit%C3%A0>, (consultato in data 10 Dicembre 2021).
- [4] Università del Piemonte Orientale (2021), “Studio di coorte”, <https://www.agingproject.unipo.it/glossario/studio-di-coorte/>, (consultato in data 10 Dicembre 2021).
- [5] Meteo Rete (2021),
<https://www.meteorete.it/globalwarming/riscaldamentoglobale-4.html>, (consultato in data 15 Dicembre 2021).
- [6] Boffa Cesare e Paolo Gregorio (1981), *Elementi di fisica tecnica*, Torino: Libreria editrice Universitaria Levrotto e Bella.
- [7] Livio Gallo (2021), <https://www.teon.it/2021/08/31/la-famiglia-tina/>, (consultato in data 3 Gennaio 2022).
- [8] Livio Gallo (2020),
<https://www.teon.it/2020/11/25/green-economy-crescere-con-ambiente/>, (consultato in data 3 Gennaio 2022).
- [9] Livio Gallo (2020), <https://www.teon.it/2020/12/09/tina-la-pompa-di-calore-ad-alta-temperatura/>, (consultato in data 3 Gennaio 2022).
- [10] Gianfranco Pellegrini (2021), “Calore in movimento”, *Ecofuturo Magazine*, (consultato in data 28 Dicembre 2021).

- [11] Gianfranco Pellegrini (2021), “Il ruolo del termico nella rivoluzione energetica”, Key Energy, (consultato in data 20 Dicembre 2021).
- [12] J. Martins and A. Ning, Engineering design optimization. 2021. doi: 10.1017/9781108980647.
- [13] X. Yang, Introduction to mathematical optimization. Cambridge international science publishing, 2008.
- [14] A. Tangian and J. Gruber, “Constructing and applying objective functions,” in Proceedings of the fourth international conference on econometric decision models: Constructing and applying objective functions. University of hagen, held in haus nordhelle, august, 2002, vol. 2831, p. 2000.
- [15] E. Polak, “On the mathematical foundations of nondifferentiable optimization in engineering design,” SIAM review, vol. 29, no. 1, pp. 21–89, 1987.
- [16] X.-S. Yang and X.-S. He, “Introduction to optimization,” in Mathematical foundations of nature-inspired algorithms, Springer, 2019, pp. 1–20.
- [17] M. A. Luersen and R. Le Riche, “Globalized nelder–mead method for engineering optimization,” Computers & structures, vol. 82, no. 23–26, pp. 2251–2260, 2004.
- [18] B. A. Conway, “A survey of methods available for the numerical optimization of continuous dynamic systems,” Journal of Optimization Theory and Applications, vol. 152, no. 2, pp. 271–306, 2012.
- [19] A. Cozad, N. V. Sahinidis, and D. C. Miller, “Learning surrogate models for simulation-based optimization,” AIChE Journal, vol. 60, no. 6, pp. 2211–2227, 2014.

- [20] P. Jiang, Q. Zhou, and X. Shao, *Surrogate model-based engineering design and optimization*. Springer, 2020.
- [21] C. Zhu, R. H. Byrd, P. Lu, and J. Nocedal, "Algorithm 778: L-BFGS-b: Fortran subroutines for large-scale bound-constrained optimization," *ACM Transactions on mathematical software (TOMS)*, vol. 23, no. 4, pp. 550–560, 1997.
- [22] S. Singer and J. Nelder, "Nelder-mead algorithm," *Scholarpedia*, vol. 4, no. 7, p. 2928, 2009.
- [23] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt Jr, and M. P. Vecchi, "Optimization by simulated annealing," *science*, vol. 220, no. 4598, pp. 671–680, 1983.
- [24] P. I. Frazier, "A tutorial on bayesian optimization," *arXiv preprint arXiv:1807.02811*, 2018.
- [25] B. Shahriari, K. Swersky, Z. Wang, R. P. Adams, and N. De Freitas, "Taking the human out of the loop: A review of bayesian optimization," *Proceedings of the IEEE*, vol. 104, no. 1, pp. 148–175, 2015.
- [26] P. I. Frazier, "Bayesian optimization," in *Recent advances in optimization and modeling of contemporary problems*, *Informs*, 2018, pp. 255–278.
- [27] J. Kruschke, *Doing bayesian data analysis: A tutorial with r, JAGS, and stan*. Academic Press, 2014.
- [28] S. Doraiswamy and S. Krishnamurty, "Bayesian analysis in engineering model assessment," in *International design engineering technical conferences and computers and information in engineering conference*, 2000, vol. 35142, pp. 29–40.
- [29] J. O. Berger, *Statistical decision theory and bayesian analysis*. Springer Science & Business Media, 2013.

- [30] A. Gelman, J. B. Carlin, H. S. Stern, and D. B. Rubin, Bayesian data analysis. Chapman; Hall/CRC, 1995.
- [31] F. Ghaderinezhad and C. Ley, “On the impact of the choice of the prior in bayesian statistics,” in Bayesian inference on complicated data, IntechOpen, 2019, p. 22.
- [32] K. Soetaert, T. Petzoldt, and R. W. Setzer, “Solving differential equations in R: Package deSolve,” Journal of Statistical Software, vol. 33, no. 9, pp. 1–25, 2010, doi: 10.18637/jss.v033.i09.
- [33] M. Ebden, “Gaussian processes: A quick introduction,” arXiv preprint arXiv:1505.02965, 2015.
- [34] B. Lei et al., “Bayesian optimization with adaptive surrogate models for automated experimental design,” npj Computational Materials, vol. 7, no. 1, pp. 1–12, 2021.
- [35] E. Merrill, A. Fern, X. Z. Fern, and N. Dolatnia, “An empirical study of bayesian optimization: Acquisition versus partition.” J. Mach. Learn. Res., vol. 22, pp. 4–1, 2021.
- [36] S. N. Wood, “Thin plate regression splines,” Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology), vol. 65, no. 1, pp. 95–114, 2003.
- [37] E. Brochu, V. M. Cora, and N. De Freitas, “A tutorial on bayesian optimization of expensive cost functions, with application to active user modeling and hierarchical reinforcement learning,” arXiv preprint arXiv:1012.2599, 2010.
- [38] R Core Team, R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2021. Available: <https://www.R-project.org/>

[39] H. Wickham, R. François, L. Henry, and K. Müller, Dplyr: A grammar of data manipulation. 2022. Available: <https://CRAN.R-project.org/package=dplyr>

[40] H. Wickham and M. Girlich, Tidy: Tidy messy data. 2022. Available: <https://CRAN.R-project.org/package=tidyr>

[41] H. Wickham, ggplot2: Elegant graphics for data analysis. Springer-Verlag New York, 2016. Available: <https://ggplot2.tidyverse.org>

[42] P.-C. Bürkner, “Bayesian item response modeling in R with brms and Stan,” *Journal of Statistical Software*, vol. 100, no. 5, pp. 1–54, 2021, doi: 10.18637/jss.v100.i05.

[43] Stan Development Team, “The Stan Core Library.” 2018. Available: <http://mc-stan.org/> 7.