



POLITECNICO
MILANO 1863

SCUOLA DI INGEGNERIA INDUSTRIALE
E DELL'INFORMAZIONE

Controllo di una centrale di teleraffrescamento tramite PLC e SCADA

TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN
AUTOMATION AND CONTROL ENGINEERING
INGEGNERIA DELL'AUTOMAZIONE

Autore: **Yousef Elgohary**

Matricola: 991251
Relatore: Prof. Alberto Leva
Anno accademico: 2023-24

*“Whoever treads a path in seeking knowledge,
Allah will make easy for him the path to Paradise.”*

Prophet Muhammad - peace be upon him
Riyad al-Salihin 1381

*“Are those who have knowledge
and those who have no knowledge alike?
Only the men of understanding are mindful.”*

Quran 39:9

“My Lord! Enrich me with knowledge.”

Quran 20:114

A Yasmin e alla mia famiglia

Sommario

La presente tesi si focalizza sullo studio, sviluppo e implementazione di un sistema di controllo automatizzato per una centrale di teleraffrescamento, utilizzando tecnologie PLC e SCADA. La centrale, denominata *Energy Center*, è stata realizzata per servire il nuovo quartiere *SeiMilano*, un innovativo progetto di rigenerazione urbana situato nella zona sud-ovest di Milano. La necessità di implementare un sistema efficiente e affidabile ha guidato la scelta di adottare una soluzione basata su PLC per il controllo dei processi e SCADA per la supervisione e monitoraggio delle operazioni.

Il lavoro descrive in dettaglio l'architettura hardware e software del sistema, la gestione dei diversi modi di funzionamento e delle priorità dei dispositivi, nonché le sequenze di avvio e arresto della centrale. Particolare attenzione è stata dedicata alla gestione dei sistemi di pompaggio e frigoriferi, alla regolazione dei parametri critici tramite regolatori PID e all'implementazione di interblocchi di sicurezza per garantire un funzionamento continuo e sicuro dell'impianto.

Durante lo sviluppo del progetto, sono emerse diverse sfide legate alla coerenza del lavoro e allo standard di programmazione, dovute anche all'integrazione di componenti e funzioni aggiuntive in tempi successivi e spesso molto distanti tra loro. Nonostante queste difficoltà, l'impianto è attualmente in marcia e operativo, servendo efficacemente le abitazioni e gli uffici del nuovo quartiere. Il risultato tangibile è la messa a regime della centrale, che testimonia il successo del progetto e la validità delle soluzioni adottate.

Parole chiave: teleraffrescamento, produzione acqua refrigerata, chiller, frigorifero a compressione, frigorifero ad assorbimento, PLC, SCADA, automazione industriale, sistema di controllo.

Abstract

This thesis focuses on the study, development, and implementation of an automated control system for a district cooling plant using PLC and SCADA technologies. The plant, named *Energy Center*, was built to serve the new *SeiMilano* district, an innovative urban regeneration project located in the southwest area of Milan. The need for an efficient and reliable system guided the choice of a PLC-based solution for process control and SCADA for operation supervision and monitoring.

The work details the hardware and software architecture of the system, the management of different operating modes and device priorities, as well as the start-up and shutdown sequences of the plant. Special attention has been given to the management of pumping and refrigeration systems, the regulation of critical parameters through PID controllers, and the implementation of safety interlocks to ensure continuous and safe operation.

Throughout the project development, various challenges related to maintaining work consistency and programming standards emerged, especially due to the integration of additional components and functions at later stages, often far apart in time. Despite these difficulties, the plant is currently up and running, effectively serving the residences and offices of the new district. The tangible result is the successful commissioning of the plant, demonstrating the project's success and the validity of the adopted solutions.

Keywords: district cooling, chilled water production, chiller, compression refrigerator, absorption refrigerator, PLC, SCADA, industrial automation, control system.

Indice

Sommario	i
Abstract	iii
Indice	v
Introduzione	1
1 Il teleraffrescamento	5
1.1 Contesto energetico europeo del raffrescamento	5
1.2 Vantaggi del teleraffrescamento	6
1.3 Macchina frigorifera a compressione	6
1.4 Macchina frigorifera ad assorbimento	8
2 Presentazione del caso studio	11
2.1 Il nuovo quartiere SeiMilano	11
2.1.1 Il contesto urbano del progetto SeiMilano	11
2.1.2 Fabbisogni energetici delle utenze	11
2.2 La nuova centrale Energy Center	12
2.2.1 Descrizione dell'impianto	13
2.2.2 Layout e organizzazione interna dell'Energy Center	14
2.2.3 Configurazione tecnica dell'impianto	14
2.3 Aree funzionali della centrale	17
3 Sistema di controllo realizzato	19
3.1 Architettura hardware e software	19
3.2 Gestione dei modi di funzionamento	23
3.3 Gestione delle priorità dei dispositivi	25
3.4 Sequenza di avvio e arresto della centrale	26
3.5 Gestione dei sistemi di pompaggio	27

3.5.1	Gestione inserzione pompe	29
3.6	Gestione dei sistemi frigoriferi	30
3.6.1	Gestione inserzione sistemi frigoriferi	31
3.6.2	Sequenze di avvio e fermata dei sistemi frigoriferi	34
3.7	Gestione lavaggio filtri acqua di falda	36
3.8	Gestione sistema trattamento acqua a osmosi	38
3.9	Interblocchi di sicurezza	38
3.10	Regolazioni PID implementate nella centrale	39
3.10.1	Regolazione pompaggio TLF	40
3.10.2	Regolazione valvola minimo flusso pompe TLF	42
3.10.3	Regolazione pompaggio acqua di falda	42
3.10.4	Regolazione condensazione sistemi frigoriferi	44
3.10.5	Regolazione valvole bypass e miscelazione	46
3.10.6	Regolazione valvole restituzione acqua di falda	48
3.11	Sistema di supervisione SCADA sviluppato	49
3.11.1	Layout della pagina	49
3.11.2	Tipici sviluppati per i principali oggetti grafici	51
3.11.3	Pagine grafiche implementate	57
4	Sviluppo, collaudo e messa in servizio	63
4.1	Descrizione del ciclo di sviluppo	63
4.1.1	Fase di progettazione e sviluppo	63
4.1.2	Fase di collaudo e messa in servizio	64
4.2	Descrizione delle principali prove di collaudo	65
5	Conclusioni	69
	Bibliografia	71
A	Figure di grandi dimensioni	75
A.1	Layout e P&ID della centrale	75
A.2	Pagine grafiche dello SCADA	87
B	Concetto di failsafe e PLC di sicurezza	99
B.1	Il concetto di sicurezza in ambito industriale	99
B.2	I PLC safety	101

C	Ridondanza nella topologia ad anello	103
D	Protocolli Profinet e Modbus	105
D.1	Il protocollo Profinet	105
D.2	Il protocollo Modbus	107
	Elenco delle figure	111
	Elenco delle tabelle	113
	Ringraziamenti	115

Introduzione

Contesto del progetto

Il presente lavoro di Tesi si focalizza sullo studio e lo sviluppo di un progetto di automazione relativo alla centrale di teleraffrescamento *Energy Center - SeiMilano*, realizzato presso l'azienda *SET Sviluppo e Tecnologia s.r.l. (Gruppo SET)*, ubicata a *Cinisello Balsamo (MI)*, nella sua divisione *EEM - Environment, Energy and Minerals*.

L'azienda, operante nel mercato dell'automazione industriale, è specializzata nella progettazione e realizzazione di sistemi avanzati per la gestione dei processi produttivi in una vasta gamma di settori. Dal 2007, Gruppo SET è *Solution Partner* livello *Specialist* di *Siemens* per il controllo di processo. Essere *Solution Partner Siemens* significa essere la scelta numero uno per l'ingegneria, l'integrazione di sistemi e l'implementazione di soluzioni superiori, personalizzate e orientate al futuro. Con ingegneri certificati *Siemens S7, WinCC e PCS7*, SET ha una vasta conoscenza ed esperienza nella tecnologia di processo. La certificazione garantisce che SET stia fornendo la massima qualità nell'automazione personalizzata.

La divisione *EEM* si concentra su progetti fornendo soluzioni su misura basate su piattaforme *DCS* o *PLC/SCADA* di Siemens per molteplici applicazioni, tra cui impianti di produzione e trattamento dell'energia, sistemi di gestione ambientale, e processi industriali legati all'estrazione e alla lavorazione dei minerali. Questi progetti spaziano dalla gestione delle cementerie al trattamento delle acque, dall'automazione delle centrali termiche alla gestione degli impianti di cogenerazione e trigenerazione.

L'azienda cliente coinvolta in questo progetto è *A2A Calore e Servizi s.r.l.*, una delle principali realtà italiane nel settore dell'energia e dei servizi ambientali. *A2A* opera in diversi ambiti, tra cui la produzione e distribuzione di energia termica, elettrica e da fonti rinnovabili, la gestione dei rifiuti, la distribuzione del gas e l'erogazione di servizi idrici. L'azienda si impegna costantemente nell'offrire soluzioni innovative e sostenibili per soddisfare le esigenze energetiche e ambientali delle comunità in cui opera.

L'obiettivo di questa tesi è di sviluppare e implementare un sistema di controllo automatizzato per una centrale di teleraffrescamento, utilizzando un controllore logico programmabile (PLC) e un sistema di supervisione, controllo e acquisizione dati (SCADA). La centrale, denominata *Energy Center*, è stata realizzata per servire il nuovo quartiere *SeiMilano*, un ambizioso progetto di rigenerazione urbana situato nella zona sud-ovest di Milano.

Il progetto *SeiMilano* rappresenta un'innovativa iniziativa di sviluppo urbano, integrando soluzioni sostenibili e tecnologie all'avanguardia per migliorare la qualità della vita dei residenti e ridurre l'impatto ambientale. In questo contesto, la centrale di teleraffrescamento gioca un ruolo cruciale, garantendo la produzione e distribuzione di acqua refrigerata per il condizionamento degli edifici residenziali e commerciali del quartiere.

La scelta di adottare un sistema basato su PLC e SCADA è stata guidata dalla necessità di implementare una soluzione efficiente, affidabile e flessibile per il controllo e la supervisione della centrale. I PLC offrono una piattaforma robusta e versatile per il controllo dei processi industriali, mentre i sistemi SCADA consentono di monitorare e gestire l'impianto in tempo reale, garantendo una risposta tempestiva a eventuali anomalie e ottimizzando le prestazioni complessive.

Struttura dell'elaborato

L'esposizione degli argomenti è articolata come segue.

Il primo capitolo presenta una panoramica sul consumo energetico per il condizionamento degli edifici in Europa e sui vantaggi del teleraffrescamento. Dopodiché, vengono illustrati i principi di funzionamento delle macchine frigorifere a compressione e ad assorbimento.

Il secondo capitolo introduce il caso studio dell'*Energy Center* del nuovo quartiere *SeiMilano*, presentando una panoramica delle apparecchiature installate nella centrale di teleraffrescamento.

Il terzo capitolo descrive il sistema di controllo implementato per l'impianto di teleraffrescamento. Vengono illustrati l'architettura hardware e software dei sistemi PLC e SCADA e le logiche di controllo implementate per gestire le diverse modalità operative, le priorità dei dispositivi, le sequenze di avvio e arresto, gli interblocchi di sicurezza e le regolazioni PID. Inoltre, vengono illustrate le pagine grafiche implementate su SCADA.

Il quarto capitolo presenta le fasi di sviluppo e integrazione del sistema di controllo,

inclusa la configurazione dei PLC, la programmazione delle logiche di controllo e la realizzazione delle pagine grafiche per il sistema SCADA. Viene inoltre descritto il processo di collaudo e messa in servizio della centrale.

Il quinto capitolo riassume i principali risultati del lavoro svolto.

Contributi della tesi

L'obiettivo di questa tesi è di contribuire alla conoscenza nel campo dei sistemi di controllo automatizzati per gli impianti di teleraffrescamento, fornendo un caso di studio dettagliato e applicabile ad altre realtà urbane in fase di sviluppo. Il lavoro svolto dimostra come l'integrazione di tecnologie PLC e SCADA possa migliorare significativamente le prestazioni e l'affidabilità di tali impianti, supportando gli sforzi per creare città più sostenibili e resilienti.

1 | Il teleraffrescamento

1.1. Contesto energetico europeo del raffrescamento

Lo *Studio relativo a reti di teleraffrescamento e reti neutre per il riscaldamento a bassa temperatura e il raffrescamento* del Dipartimento Energia (DENERG) del Politecnico di Torino in collaborazione con l'Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile (ENEA) [5], analizza il ruolo del riscaldamento e raffrescamento degli edifici in Europa. Questi rappresentano il 40 % della domanda energetica totale [12], mentre i condizionatori contribuiscono al 20 % della domanda elettrica degli edifici e al 10 % di quella globale [10]. Specialmente nei paesi più caldi, il fabbisogno di raffrescamento causa picchi elevati di richiesta elettrica nelle ore di punta, provocando anche instabilità nella rete. Infatti nei giorni più caldi il fabbisogno di raffrescamento può anche raggiungere il 50 % [8] della domanda di picco negli edifici.

Dal 1990, la domanda globale di raffrescamento è più che triplicata, diventando la componente di fabbisogno energetico in maggior crescita nel settore edilizio. Si prevede che nel 2050 due terzi delle abitazioni avranno impianti di raffrescamento [9]. Attualmente, il 75 % dell'energia per la climatizzazione in Europa proviene da fonti fossili [7], evidenziando l'impatto significativo del settore sul riscaldamento globale. Pertanto, è cruciale investire in tecnologie ad alta efficienza per evitare un aumento della domanda di potenza elettrica di picco e delle emissioni di CO₂ [5].

Migliorare l'efficienza della climatizzazione degli edifici richiede:

- il miglioramento tecnologico di pompe di calore e macchine frigorifere ad assorbimento;
- l'uso di macchine ad alta efficienza, soprattutto di grandi dimensioni;
- l'adozione di fonti rinnovabili per la produzione di freddo.

Le reti di teleraffrescamento e teleriscaldamento neutre, particolarmente efficaci in aree con alta densità energetica, possono ridurre significativamente le emissioni e i consumi energetici. Queste reti permettono l'utilizzo ottimale di macchine ad alta efficienza e

fonti rinnovabili, favorendo una maggiore sinergia con la rete elettrica e offrendo ulteriori benefici energetici e ambientali [5].

1.2. Vantaggi del teleraffrescamento

Un sistema di teleraffrescamento prevede la produzione centralizzata di freddo in una o più centrali, con successiva distribuzione alle utenze mediante una rete di tubazioni isolate termicamente contenenti acqua refrigerata [14]. Questo approccio è generalmente più efficiente rispetto al raffrescamento individuale poiché consente l'uso di fonti energetiche rinnovabili e sistemi ad alta efficienza, permettendo risparmi energetici superiori al 40% [5].

I sistemi di teleraffrescamento possono raggiungere rendimenti fino a 5-10 volte superiori rispetto agli impianti tradizionali. Questo è possibile grazie al serbatoio termico verso il quale si scambia il calore sottratto dagli ambienti da refrigerare. Negli impianti tradizionali, molto spesso il serbatoio termico è costituito dall'aria ambiente. In impianti di maggiori dimensioni, è più semplice superare le barriere tecnico-economiche e regolatorie, permettendo l'utilizzo di risorse fredde gratuite come bacini idrici superficiali o sotterranei sia come input per i sistemi frigoriferi sia come risorsa diretta, riducendo così il consumo energetico [6].

Inoltre, il calore residuo proveniente ad esempio da processi di raffreddamento industriali può essere utilizzato come risorsa gratuita per le macchine frigorifere ad assorbimento, evitando dispersioni e migliorando ulteriormente l'efficienza del sistema [5].

1.3. Macchina frigorifera a compressione

La macchina frigorifera a compressione funziona secondo i principi fondamentali della termodinamica, sfruttando i cambiamenti di fase di un fluido refrigerante per assorbire e dissipare calore. I componenti principali del sistema, in maniera molto semplificata, sono quattro: condensatore, evaporatore, valvola di espansione e compressore. Questo sistema scambia calore con un fluido sorgente di calore e un altro fluido dissipatore di calore [11]. Il fluido di lavoro è un refrigerante liquido circolante che, semplificando, attraversa quattro fasi principali:

Compressione: il refrigerante entra nel compressore come vapore saturo e viene compresso per aumentare la sua pressione e temperatura fino a diventare vapore surriscaldato;

Condensazione: nel condensatore, il refrigerante rilascia calore al fluido dissipatore di calore, tornando liquido saturo;

Espansione: attraverso la valvola di espansione, il refrigerante subisce una rapida riduzione di pressione e temperatura, diventando una miscela bifase;

Evaporazione: la miscela refrigerante passa nell'evaporatore, dove assorbe calore dal fluido sorgente di calore che si vuole raffreddare, tornando vapore saturo e ricomincia il ciclo.

Rispetto al ciclo ideale, bisogna tenere in considerazione che nel ciclo reale:

- il vapore in ingresso al compressore è spesso surriscaldato per evitare la presenza di liquido;
- il liquido all'uscita del condensatore è spesso sottoraffreddato per migliorare l'efficienza e prevenire la formazione di bolle all'ingresso della valvola di espansione;
- le temperature del refrigerante nell'evaporatore e nel condensatore differiscono da quelle dei fluidi secondari sorgente di calore e di dissipazione di calore.

Nella macchina frigorifera a compressione di vapore, diversi tipi di fluido secondario possono essere utilizzati come mezzo di dissipazione per rimuovere il calore dal condensatore tramite un sistema di scambio termico e condensare il fluido refrigerante:

Aria: è ampiamente disponibile e ha un basso costo, ma presenta variazioni di temperatura stagionali e giornaliere (ad esempio, a Milano può variare tra -10°C e 40°C) che, oltre alla bassa conduttività termica, riduce l'efficienza del sistema, dato che richiede ventilatori potenti che consumano una parte significativa dell'energia complessiva del sistema;

Acqua: fonti come fiumi, mari, laghi o falde acquifere offrono una conduttività termica più alta rispetto all'aria, con una temperatura di condensazione più bassa e una maggiore efficienza. La disponibilità dell'acqua dipende dalla posizione geografica, inoltre necessita di trattamenti e potrebbero esserci restrizioni burocratiche, come la quantità massima di acqua estraibile e la variazione massima di temperatura che l'acqua può subire, perciò richiede un maggiore investimento iniziale e costi operativi più elevati per il trattamento dell'acqua e una supervisione continua. Le temperature variano a seconda della fonte: i serbatoi naturali variano tra 5°C e 25°C , mentre le acque sotterranee hanno temperature più costanti, ad esempio circa 16°C a Milano.

1.4. Macchina frigorifera ad assorbimento

La macchina frigorifera ad assorbimento è un sistema termodinamico il cui funzionamento si basa su un ciclo azionato termicamente, diversamente dai cicli azionati elettricamente come nel caso dei sistemi a compressione di vapore. Questo sistema utilizza una miscela composta da un assorbente e un refrigerante che subiscono diverse trasformazioni cicliche grazie a specifiche condizioni di temperatura e pressione [11].

Il processo di assorbimento è simile a una reazione chimica tra vapore e liquido: il vapore viene catturato e assorbito dal liquido, ottenendo una miscela finale in stato liquido. Durante l'assorbimento viene rilasciato calore. Al contrario, fornendo calore alla miscela si ottiene il processo di desorbimento, durante il quale viene prodotto il vapore del refrigerante separandolo dall'assorbente [11].

Le macchine frigorifere ad assorbimento hanno il vantaggio di non avere una domanda elettrica elevata poiché utilizzano una fonte di calore per funzionare. Inoltre, se il refrigerante utilizzato è acqua, come nei casi più comuni, si ottiene un vantaggio ambientale poiché l'acqua ha un potenziale di distruzione dell'ozono pari a zero. Tuttavia, il costo iniziale delle macchine frigorifere ad assorbimento è superiore rispetto a quello delle macchine che utilizzano un compressore [11].

Una soluzione si caratterizza generalmente per:

Volatilità relativa: la capacità dell'assorbente di passare dallo stato liquido a quello di vapore;

Affinità: la capacità dell'assorbente di assorbire il refrigerante.

Quando si considera una miscela, è importante ricordare che a parità di pressione, se aumenta la concentrazione dell'assorbente, c'è un aumento della temperatura di saturazione liquido-vapore (temperatura di evaporazione) e della temperatura di saturazione solido-liquido (temperatura di congelamento) [11].

Una delle soluzioni più comuni utilizzate nelle macchine frigorifere ad assorbimento è composta da acqua come refrigerante e bromuro di litio come assorbente. Il bromuro di litio è un sale caratterizzato da una bassa volatilità e un'elevata affinità per l'acqua.

A differenza di un sistema a compressione di vapore, un sistema ad assorbimento comprende, oltre all'evaporatore, al condensatore e alla valvola di espansione, un compressore termico anziché un compressore meccanico. Il compressore termico di un ciclo a singolo effetto è composto da:

Generatore: produce vapore grazie a una fonte di calore;

Assorbitore: effettua l'assorbimento del vapore d'acqua;

Pompa: aumenta la pressione della miscela liquida.

Il ciclo termodinamico si svolge attraverso i seguenti passaggi:

Assorbimento: il refrigerante (acqua) viene assorbito da un materiale assorbente (bromuro di litio) per formare una soluzione nell'assorbitore;

Pompaggio: alla fine del processo di assorbimento, la soluzione viene pompata al generatore. In questo punto, la soluzione ha una bassa concentrazione di bromuro di litio poiché ha assorbito molta acqua, perciò la sua capacità di assorbire ulteriore acqua è bassa;

Riscaldamento: la soluzione viene riscaldata, solitamente con acqua calda o vapore, causando l'evaporazione del refrigerante dalla soluzione;

Separazione: il refrigerante vaporizzato viene separato dalla soluzione in un separatore;

Condensazione: il refrigerante vaporizzato viene condensato passando attraverso un condensatore, rilasciando calore;

Espansione: il refrigerante liquido passa attraverso una valvola di espansione, riducendo la sua pressione e temperatura;

Evaporazione: il refrigerante a bassa pressione e bassa temperatura viene inviato all'evaporatore, dove evaporando assorbe calore producendo l'effetto utile del frigorifero ad assorbimento;

Desorbimento: alla fine del processo di desorbimento nel generatore, la soluzione viene inviata, tramite una valvola di espansione, all'assorbitore per ricominciare il ciclo. In uscita dal generatore, la soluzione ha una alta concentrazione di bromuro di litio in stato liquido poiché, grazie all'uso di calore, si crea del vapore d'acqua inviato al condensatore, mentre il bromuro di litio rimane in forma liquida con una concentrazione di acqua molto bassa e quindi la capacità di assorbire vapore è alta;

Dal punto di vista pratico, il condensatore e l'assorbitore dissipano il calore nella stessa fonte, ad esempio scambiando il calore con acqua di falda.

2 | Presentazione del caso studio

2.1. Il nuovo quartiere SeiMilano

2.1.1. Il contesto urbano del progetto SeiMilano

Secondo il *2018 Revision of World Urbanization Prospects* [15] del *Department of Economic and Social Affairs* delle Nazioni Unite (UN DESA), nel 2018 circa il 55 % della popolazione mondiale viveva in aree urbane, con una previsione di crescita al 60 % entro il 2030 e al 68 % entro il 2050 [3, 15].

Le città svolgono un ruolo cruciale nel consumo energetico e nelle emissioni di gas serra, rappresentando tra il 71 % e il 76 % delle emissioni di CO₂ e tra il 67 % e il 76 % del consumo energetico globale, pur occupando solo una piccola porzione del territorio mondiale. A causa dei redditi più elevati, gli abitanti delle aree urbane tendono a consumare più risorse pro capite rispetto a quelli delle zone rurali. Pertanto, è essenziale sviluppare un nuovo quadro urbano che, attraverso il progresso tecnologico, riduca l'impatto ambientale e promuova l'efficienza energetica [3, 15].

SeiMilano è un nuovo quartiere nato da un progetto di rigenerazione urbana nella zona sud-ovest di Milano, tra via Calchi Taeggi e via Bisceglie, adiacente al capolinea della metropolitana Bisceglie M1. Questo innovativo quartiere polifunzionale si estende su un'area di oltre 330 000 m², comprendendo due zone residenziali complessivamente di 89 000 m², una zona commerciale di 8000 m², una zona per il terziario di 27 600 m² e un parco pubblico di 166 500 m² [1], come mostrato in figura 2.1 nella pagina seguente.

2.1.2. Fabbisogni energetici delle utenze

Il progetto utilizza la rete esistente di teleriscaldamento di Milano e prevede la realizzazione di una nuova centrale frigorifera per il teleraffrescamento. Questa centrale servirà il nuovo comparto di *SeiMilano* e potenzialmente altre future utenze, garantendo un sistema integrato ed efficiente di distribuzione di energia termica e frigorifera [1].



Figura 2.1: Inquadramento territoriale con indicazione delle utenze principali

Particolare attenzione è stata dedicata all'impatto ambientale, adottando soluzioni tecnologiche avanzate per raggiungere gli obiettivi di sostenibilità. Il quartiere viene riscaldato dalla rete di teleriscaldamento cittadina, che sfrutta il calore generato dal termovalorizzatore *Silla 2* [2]. Inoltre, tra i primi a Milano, è teleraffrescato tramite un sistema frigorifero ad assorbimento alimentato dalla rete di teleriscaldamento durante l'estate. Questo approccio consente un notevole risparmio sulle emissioni di CO₂, rendendo *SeiMilano* un quartiere a basse emissioni che risponde alle nuove esigenze abitative e agli standard energetici previsti dal *Green Deal* europeo¹ [3].

Secondo quanto riportato nella relazione illustrativa relativa al progetto [1], il fabbisogno energetico del nuovo quartiere *SeiMilano* è stato stimato in una potenza totale termica di 8118 kWt per il riscaldamento e la produzione di acqua calda sanitaria. Questo valore rappresenta la somma della potenza necessaria per riscaldare gli ambienti e quella richiesta per fornire acqua calda sanitaria. Inoltre, il fabbisogno energetico per il raffrescamento del quartiere è stato stimato in una potenza totale frigorifera di 8308 kWf.

2.2. La nuova centrale Energy Center

¹Iniziativa con scopo il raggiungimento della neutralità climatica entro il 2050.

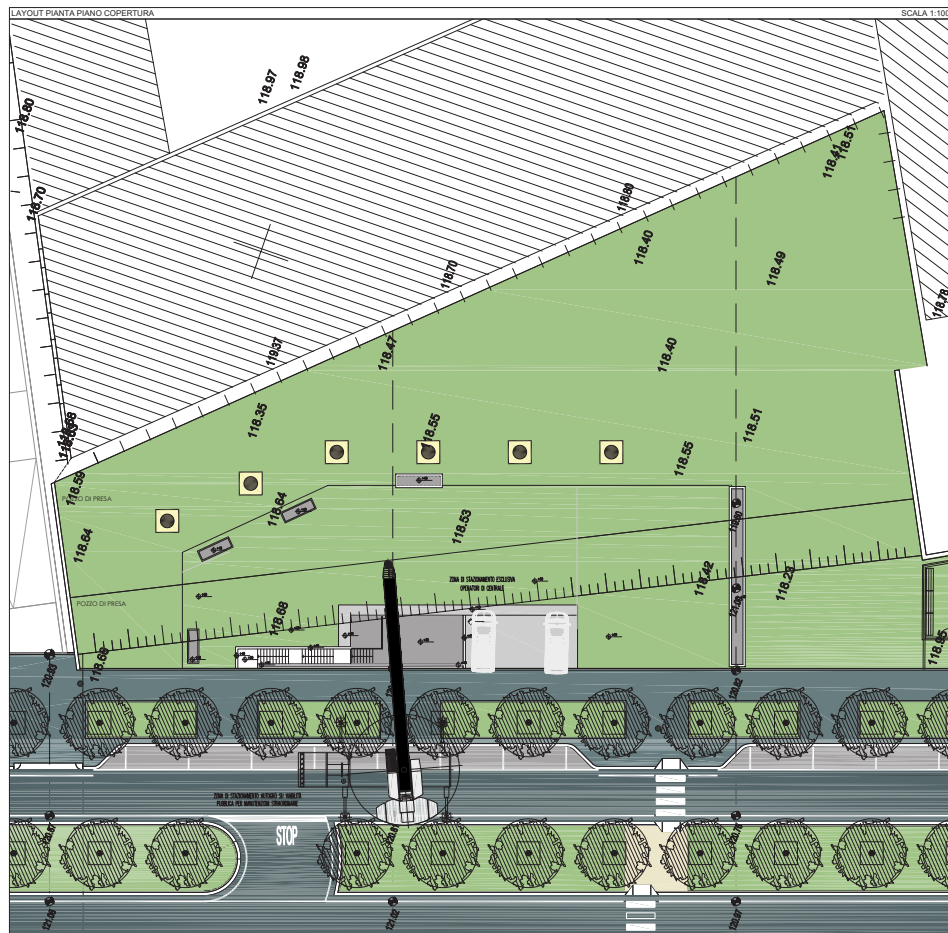


Figura 2.2: Planimetria del layout esterno della centrale (nord verso sinistra)

2.2.1. Descrizione dell'impianto

Questa sezione descrive la configurazione impiantistica a servizio delle utenze della nuova lottizzazione di *SeiMilano*, che prevede l'installazione di una doppia rete di distribuzione: una per il teleriscaldamento (TLR) e una per il teleraffrescamento (TLF). La rete TLR distribuisce il calore prelevato dalla rete cittadina, mentre la rete TLF è alimentata da una nuova centrale frigorifera.

La configurazione prevede l'estensione della rete di teleriscaldamento cittadina per alimentare le utenze mediante uno scambiatore di calore al piede di ciascuna utenza. Inoltre, un nuovo *Energy Center* è stato realizzato per fornire il raffrescamento tramite una rete parallela alla rete di teleriscaldamento. La centrale frigorifera, collegata alla rete di teleriscaldamento di Milano, produce energia frigorifera utilizzando un gruppo ad assorbimento alimentato ad acqua calda durante l'estate, integrato da gruppi frigoriferi a compressione. Entrambi i sistemi sono raffreddati con acqua di falda prelevata da nuovi pozzi.

La centrale è situata in un nuovo edificio costruito nella parte sud del lotto terziario. Oltre alle reti di distribuzione termiche e frigorifere, sono state sviluppate reti di adduzione e restituzione dell'acqua di falda per la condensazione dei gruppi frigoriferi. Sei pozzi di emungimento sono dislocati vicino alla centrale, con tre diverse soluzioni di restituzione: uno verso lo scolmatore Olona, uno verso un pozzetto di calma per l'irrigazione del parco e uno verso pozzi di resa lungo via Garegnanino [1].

2.2.2. Layout e organizzazione interna dell'Energy Center

Dalla planimetria mostrata in figura 2.2 nella pagina precedente si può notare che l'*Energy Center* è completamente interrato per minimizzare l'impatto visivo, con ingressi pedonali e carrabili per facilitare l'accesso e la movimentazione delle macchine frigorifere. La copertura è in parte cementificata e in parte verde, per ridurre l'impatto ambientale. L'ingresso carrabile, situato sul *Boulevard* di nuova realizzazione, è dotato di un cancello, mentre l'ingresso pedonale è nella parte nord. Una baia di carico permette la movimentazione delle macchine e dei componenti, e delle bocche di lupo lungo il perimetro garantiscono la ventilazione delle aree tecniche.

L'*Energy Center* è suddiviso in due compartimenti a differenti livelli di profondità. La parte nord, a $-3,75$ m dal piano campagna, ospita le opere elettriche, tra cui locali tecnici e trasformatori. Come si può osservare dalla planimetria mostrata in figura A.2 a pagina 77, la parte centrale e in basso è dedicata alla componentistica meccanica e idraulica, con sistemi di filtrazione, scambiatori di calore e macchine frigorifere. Questo dislivello garantisce la sicurezza dei componenti elettrici, situati a una quota superiore rispetto ai circuiti idraulici, riducendo il rischio di danni in caso di guasti. La baia di carico permette la movimentazione in entrambe le aree, con un'area di sbarco alla profondità di ingresso della parte elettrica.

L'edificio è leggermente sopraelevato rispetto al piano campagna circostante per prevenire allagamenti. I pozzi di presa sono realizzati lungo il pendio di raccordo, come mostrato nella sezione topologica D in figura A.1 a pagina 76 e in figura A.2 a pagina 77. La condensazione dei gruppi frigoriferi avviene tramite acqua di falda prelevata a 15°C , con la restituzione della portata termicamente sfruttata verso lo scolmatore Olona o i pozzi di resa a portata ridotta in condizioni emergenziali [1].

2.2.3. Configurazione tecnica dell'impianto

Per soddisfare la richiesta di energia termica nella nuova urbanizzazione di *SeiMilano*, è stata estesa la rete di teleriscaldamento esistente di Milano. Non è prevista l'installazione

locale di nuovi poli di produzione di energia termica. Sono escluse dallo sviluppo le reti “secondarie” interne ai lotti e i relativi accessori e impianti.

Per soddisfare la richiesta frigorifera, è stata installata una nuova rete di teleraffrescamento parallela a quella di teleriscaldamento, alimentata dall’Energy Center. La produzione frigorifera è basata sull’installazione di macchine operanti su diversi principi, sfruttando la rete di teleriscaldamento anche durante l’estate. Sono presenti due unità di gruppi frigoriferi a compressione di vapore da 2500 kWf ciascuna e una unità da 460 kWf, tutte condensate ad acqua di falda. Inoltre, è stato installato un gruppo frigorifero ad assorbimento da 1000 kWf, anch’esso condensato ad acqua di falda e alimentato dalla rete di teleriscaldamento cittadina.

I gruppi a compressione di vapore sono condensati tramite acqua di falda prelevata dai pozzi situati vicino alla centrale e restituita allo scolmatore Olona o a pozzi di resa. La produzione frigorifera avviene con fluido a temperatura di 7°C in mandata e tra 12 e 13°C in ritorno, compatibile con la rete di teleraffrescamento. Questa tecnologia si basa su un ciclo frigorifero standard con compressori elettrici che prevede fasi di evaporazione e condensazione del fluido frigorifero, raffreddato dall’acqua di falda. Per il lato condensazione delle macchine, è stato stimato un *Energy Efficiency Ratio (EER)* pari a 4,5, utilizzato come base per determinare l’andamento annuale delle portate di emungimento dai pozzi [1].

Il gruppo frigorifero ad assorbimento, alimentato dal circuito di teleriscaldamento primario cittadino e condensato ad acqua di falda, ha un COP pari a 0,8. Questo gruppo sfrutta il calore per separare la miscela di processo interna, invece dell’energia elettrica utilizzata dai compressori nei *chiller* elettrici [1]. Le macchine ad assorbimento sono utili per sfruttare l’energia termica attraverso la rete di teleriscaldamento durante l’estate, quando i carichi di funzionamento sono generalmente bassi. Anche per questa unità, il principio di utilizzo dell’acqua di falda è analogo a quello dei gruppi a compressione di vapore.

L’installazione delle macchine è avvenuta tramite una botola predisposta sulla copertura della centrale tecnologica.

L’*Energy Center* utilizza macchine dedicate alla produzione frigorifera sia tramite gruppi frigo a compressione di vapore sia tramite un gruppo frigo basato su ciclo di assorbimento. Entrambe le soluzioni impiegano acqua di falda emunta da nuovi pozzi di presa nell’area limitrofa alla centrale tecnologica. L’uso dell’acqua di falda a fini geotermici varia annualmente in funzione del carico frigorifero, causando una variabilità della portata emunta. Per separare le acque circolanti all’interno dell’*Energy Center* da quelle captate dai pozzi, sono stati installati scambiatori di disaccoppiamento. Questo garantisce che eventuali

sversamenti di fluido di processo nel circuito di condensazione non possano contaminare la falda.

La planimetria generale in figura 2.2 a pagina 13 indica sei pozzi di adduzione alla centrale tecnologica, dimensionati per garantire il necessario approvvigionamento. La restituzione dell'acqua di falda emunta dai pozzi può avvenire tramite tre sistemi di distribuzione: pozzi di resa emergenziali lungo via Garegnanino, scolmatore Olona tramite condotta diretta e parco per finalità irrigue tramite condotta diretta. La gestione degli scarichi è effettuata dall'*Energy Center* sulla base di informazioni esterne, come il segnale di livello dello scolmatore Olona, la portata e la temperatura dell'acqua di scarico. Al momento, l'unico trattamento predisposto per l'acqua consiste in una filtrazione/sedimentazione per proteggere gli scambiatori dei condensatori delle macchine frigorifere.

Le reti di distribuzione per i carichi termici e frigoriferi della nuova urbanizzazione sono di tre tipologie: rete TLR alimentata da uno stacco della rete esistente, rete TLF alimentata dalla nuova centrale frigorifera e rete acqua di falda, suddivisa in adduzione e tre soluzioni di restituzione.

La rete di teleraffrescamento parte dalla centrale frigorifera, con una temperatura di mandata di 7°C e una temperatura di ritorno di tra 12 e 13°C. All'interno dei fabbricati, le linee sono sviluppate a partire da una sottocentrale, che non è di competenza A2A Calore e Servizi. La contabilizzazione dell'energia termica e frigorifera fornita avviene nella sottocentrale, mentre la ripartizione dei consumi nei singoli moduli abitativi è a cura dei gestori interni.

La rete primaria del teleriscaldamento di Milano trasporta acqua surriscaldata con una temperatura di mandata tra 110 e 120°C e una temperatura di ritorno di 60°C. Questa rete è disconnessa idraulicamente dalle sottocentrali presenti in ogni fabbricato mediante scambiatori di calore. Nei fabbricati, la temperatura di mandata è di 75°C e la temperatura di ritorno è di 55°C. La rete di distribuzione si sviluppa lungo il *Boulevard* con stacchi di alimentazione alle utenze [1].

La rete di distribuzione delle acque di falda per la condensazione dei gruppi frigoriferi prevede un collettore unico di raccolta collegato agli impianti di filtraggio/sedimentazione nella centrale. Dopo l'uso, l'acqua è restituita tramite due soluzioni: scolmatore Olona e pozzi di resa emergenziali. I materiali utilizzati per la posa delle reti interrate sono tubazioni in *PEAD* [1].

Ogni lotto servito ha una sottocentrale di scambio con scambiatori per climatizzazione, usi igienici sanitari e climatizzazione frigorifera interna, oltre a contabilizzatori centraliz-

zati per energia termica e frigorifera in ingresso. I circuiti secondari, che partono dagli scambiatori, non sono di competenza A2A Calore e Servizi. La ripartizione dei consumi ai singoli utenti è a cura del gestore degli edifici.

2.3. Aree funzionali della centrale

La struttura, completamente interrata, ospita una serie di sistemi e impianti fondamentali per il funzionamento dell'impianto di teleraffrescamento, come mostrato in figura A.2 a pagina 77, che comprendono:

- sistemi elettrici di trasformazione, potenza e automazione, inclusi i relativi collegamenti;
- sistemi idraulici per la filtrazione delle acque di falda utilizzate per la condensazione, con tubazioni di collegamento tra i pozzi di captazione e l'impianto;
- sistemi idraulici per la distribuzione dei fluidi all'interno della centrale;
- sistemi di generazione del freddo, sia ad assorbimento sia a compressione;
- sistemi di pompaggio dedicati alle diverse aree della centrale, incluse pompe di rilancio scarichi;
- sistemi di scambio termico per la separazione dell'acqua di falda e l'acqua di condensazione delle macchine frigorifere;
- valvole di intercettazione e regolazione per le diverse aree funzionali.

I sistemi e i gruppi funzionali presenti nella centrale sono dettagliati nel P&ID della centrale mostrato in figura A.3 a pagina 78. Tra questi, vi sono:

Gruppo di pompaggio TLF: mostrato in figura A.4 a pagina 79, questo gruppo comprende tre pompe (P301A, P301B, P301C) progettate per la circolazione dell'acqua TLF attraverso la rete di distribuzione, e una pompa aggiuntiva (P302) per il periodo invernale con carico ridotto. È presente anche una valvola di minimo flusso (PCV-001) per mantenere il ricircolo delle pompe TLF;

Gruppo di pompaggio dell'acqua di falda: illustrato in figura A.9 a pagina 84, questo gruppo include sei pompe sommerse (P001A, P001B, P001C, P001D, P001E, P001F) per l'estrazione dell'acqua di falda dai pozzi di captazione. Due pompe aggiuntive di taglia inferiore (P001G, P001H) sono utilizzate per il periodo invernale. Nella figura A.9 a pagina 84 si trovano anche i filtri dell'acqua di falda (FCC-01, FCC-02, FCC-03);

Valvole di miscelazione e scarico: come mostrato in figura A.10 a pagina 85, queste includono la valvola di miscelazione (TCV-005), la valvola di bypass (MOV-101) e le valvole di scarico (FCV-002 per lo scarico in Olona, FCV-003 per lo scarico nel pozzetto di calma per l'irrigazione del parco, e MOV-095 per lo scarico nei pozzi di resa);

Sistemi frigoriferi: la figura A.5 a pagina 80 mostra le diverse unità frigorifere della centrale. Il sistema frigorifero ad assorbimento FA-01 è dettagliato nella figura A.6 a pagina 81, inclusi i relativi componenti e le valvole di intercetto mandata e ritorno TLR (MOV-091, MOV-092, MOV-093, MOV-094) in figura A.7 a pagina 82. In figura A.8 a pagina 83 viene illustrato anche il sistema frigorifero a compressione FC-01, mentre gli altri sistemi a compressione (FC-02, FC-03) sono simili e non vengono riportati in dettaglio.

3 | Sistema di controllo realizzato

3.1. Architettura hardware e software

Il sistema di controllo del progetto realizzato è caratterizzato da una complessa architettura hardware e software progettata per gestire un'ampia varietà di segnali e dispositivi. L'intero sistema di automazione, sia hardware sia software, è basato su prodotti Siemens. Di seguito vengono descritti i componenti principali del sistema.

L'impianto è costituito da una serie di segnali distribuiti come segue:

- 320 Ingressi digitali
- 160 Uscite digitali
- 200 Ingressi analogici
- 48 Uscite analogiche
- 8 Ingressi digitali *Failsafe*¹
- 8 Uscite digitali *Failsafe*¹

Inoltre, il sistema comprende 21 dispositivi in rete *Profinet* e 59 dispositivi in rete *Modbus*, con cui viene scambiata una varietà di dati².

Il sistema di automazione è basato su vari rack separati, interconnessi tramite una rete *Profinet* ad anello, come mostrato in figura 3.1 nella pagina seguente. Di seguito, si descrivono i componenti principali di ciascun rack.

Il rack PLC è composto dai seguenti elementi:

- Alimentatore di sistema PS 60W DC 24/48/60 V HF (codice: 6ES7 505-0RB00-0AB0)

¹Nell'appendice B a pagina 99 si trova un breve approfondimento sul concetto di *failsafe* e livello di sicurezza SIL.

²Nell'appendice D a pagina 105 si trova un breve approfondimento sui protocolli Profinet e Modbus.

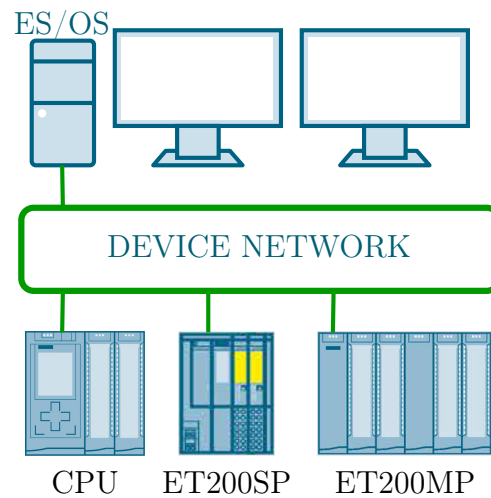


Figura 3.1: Architettura semplificata del sistema di automazione

- Controllore PLC Siemens S7-1500 CPU 1515F-2 PN (codice: 6ES7 515-2FM02-0AB0)
- 10 schede da 32 ingressi digitali DI 32x24VDC HF (codice: 6ES7 521-1BL00-0AB0)
- 5 schede da 32 uscite digitali DQ 32x24VDC/0.5A HF (codice: 6ES7 522-1BL01-0AB0)
- 6 schede da 8 uscite analogiche AQ 8xU/I HS 16-bit (codice: 6ES7 532-5HF00-0AB0)

Dato il numero elevato di schede, in particolare le uscite analogiche, è stato necessario aggiungere un alimentatore da 60W per garantire una potenza adeguata al backplane bus.

Il rack di remotaggio ET 200MP include:

- Alimentatore di sistema PS 60W DC 24/48/60 V HF (codice: 6ES7 505-0RB00-0AB0)
- Modulo d'interfaccia Profinet IO IM 155-5 PN HF (codice: 6ES7 155-5AA00-0AC0)
- 25 schede da 8 ingressi analogici AI8 x U/I/RTD/TC 16-bit (codice: 6ES7 531-7KF00-0AB0)

Anche in questo caso, è stato integrato un alimentatore aggiuntivo per supportare il numero elevato di schede di ingressi analogici.

Il rack di remotaggio *Failsafe* ET 200SP è costituito da:

- Modulo d'interfaccia Profinet IO IM 155-6 PN/2 HF (codice: 6ES7 155-6AU01-0CN0)
- 1 scheda da 8 ingressi digitali failsafe F-DI 8x24VDC HF (codice: 6ES7 136-6BA01-0CA0)
- 1 scheda da 8 uscite digitali failsafe F-DQ 8x24VDC/0.5A PP HF (codice: 6ES7 136-6DC00-0CA0)
- Modulo server per ET 200SP che completa il remotaggio (codice: 6ES7 193-6PA00-0AA0)

Nel quadro PLC sono presenti anche:

- 2 router LAN Scalance S615 (codice: 6GK5 615-0AA00-2AA2)
- 5 switch gestibili di livello 2 con 8 porte Industrial Ethernet (IE) conformi Profinet IO Scalance XC208 (codice: 6GK5 208-0BA00-2AC2)

I router garantiscono la protezione della comunicazione industriale tramite VPN e Firewall, consentendo l'accesso remoto alla rete di campo, per collegarla alla rete delle centrali di A2A. Gli switch formano una rete ad anello con ridondanza usando il protocollo *Media Redundancy Protocol (MRP)*, aumentando così la disponibilità della rete. La topologia ad anello consente di mantenere la connettività anche in caso di interruzione della rete, grazie alla rapida riconfigurazione dei percorsi di trasmissione.³

Nella rete ad anello sono collegati dispositivi Profinet, tra cui il PLC, i remotaggi, gli inverter delle pompe, i sistemi frigoriferi e l'UPS. I dispositivi con comunicazione Modbus sono collegati tramite una rete separata e connessi al PLC attraverso una seconda porta di rete, assegnando al PLC due indirizzi IP distinti.

Per la gestione del software PLC e SCADA, è utilizzato un PC Rack SIMATIC IPC547J che funge da stazione singola sia per l'ingegneria (ES⁴) sia per condurre l'intero impianto (OS⁵), scambiando i dati con il PLC. La risoluzione dello schermo è 1920x1080 pixel. Il software, sviluppato con il pacchetto SIMATIC TIA Portal V17, richiede le seguenti licenze:

- *Simatic Step 7 Professional V17* per la programmazione delle logiche PLC

³Nell'appendice C a pagina 103 si trova un breve approfondimento riguardo al funzionamento della ridondanza nella topologia ad anello.

⁴Engineering Station

⁵Operator Station

- *Simatic Step 7 Safety V17* per la programmazione delle logiche *failsafe* per i blocchi di sicurezza SIL 2 richiesti per questo impianto
- *Simatic WinCC Advanced V17* per la programmazione del sistema di supervisione
- *WinCC RT Advanced (8192)* per l'esecuzione del runtime SCADA con 8192 tag collegabili alle variabili nel PLC
- *Simatic WinCC Logging for RT Advanced* per l'archiviazione e l'elaborazione dei dati di processo e delle segnalazioni

Il sistema locale di controllo è integrato con il sistema SCADA centrale di A2A, sviluppato con WinCC OA⁶. La fornitura include la parte relativa al PLC e allo SCADA locale, mentre la parte WinCC OA è gestita da A2A. Il sistema locale fornisce dati sugli allarmi, la diagnostica e lo stato dell'impianto, permettendo anche il controllo remoto delle apparecchiature tramite lo SCADA di A2A. I parametri di soglia per gli allarmi delle misure analogiche sono condivisi tra i due sistemi.

Simatic Step 7 è il pacchetto software per lo sviluppo di progetti di automazione basati sui prodotti Siemens della serie SIMATIC. Un progetto in STEP 7 comprende:

- dati di configurazione della struttura hardware e di parametrizzazione delle unità;
- dati di progettazione per le comunicazioni di rete;
- programmi per le unità programmabili.

Il sistema di sviluppo include un software di base e vari componenti aggiuntivi, eseguibili su piattaforme Windows. Con il pacchetto base di STEP 7 è possibile:

- creare e gestire progetti;
- configurare e parametrizzare l'hardware e le comunicazioni dei sistemi di automazione;
- sviluppare programmi per PLC;
- caricare i programmi nei sistemi di destinazione;
- validare il software sviluppato;

Nelle versioni più vecchie di STEP 7, lo sviluppo delle logiche PLC avviene tramite il Simatic Manager, il software di ingegneria per la parte AS (*Automation System*). Ogni componente del progetto viene gestito in applicazioni separate, come l'editor di simboli per la dichiarazione delle aree di memoria, la configurazione hardware per la struttura

⁶Open Architecture

hardware e la parametrizzazione delle unità, NetPro per la comunicazione di rete, e l'editor di programma per le logiche.

Oltre a STEP 7, sono necessari altri pacchetti software a seconda delle esigenze specifiche. Ad esempio:

- Simatic WinCC per sviluppare ed eseguire lo SCADA;
- Sinamics Startdrive per parametrizzare e configurare gli inverter;
- PLCSim per simulare il PLC su PC e testare il programma;

TIA Portal (*Totally Integrated Automation Portal*) è l'ambiente di sviluppo per le versioni moderne di STEP 7. Si tratta di una piattaforma centralizzata di engineering per tutte le attività di automazione, caratterizzata da un'interfaccia utente comune e servizi condivisi (configurazione, comunicazione, diagnostica) e un unico database accessibile anche dagli altri pacchetti software. Il TIA Portal permette di gestire l'intera ingegneria del sistema da un'unica interfaccia, inclusi logiche PLC, SCADA, configurazione hardware, reti e parametrizzazione degli inverter. In questo modo, invece di avere molteplici progetti separati, si ha tutto centralizzato in un unico progetto.

3.2. Gestione dei modi di funzionamento

Il sistema di controllo e supervisione della centrale consente all'operatore di gestire i dispositivi in modalità automatica e manuale, garantendo la sicurezza operativa grazie a un blocco *SIL 2* gestito come catena di sicurezza *fail-safe* tramite tre pressostati di massima pressione con segnali ridondanti (PSHH-001A/B/C) sul collettore di mandata delle pompe TLF. Anche in modalità manuale, tutti i blocchi di sicurezza rimangono attivi.

La centrale è concepita per funzionare in modo continuativo 24 ore su 24 e 7 giorni su 7. Perciò, non ha una modalità automatica che preveda richieste di avvio e arresto automatici basate su programmazione oraria. Tali richieste possono essere impartite solo dall'operatore. Le zone dell'impianto, chiamate *gruppi funzionali*, e i singoli dispositivi dispongono di modalità automatica e manuale. I gruppi funzionali agiscono sui dispositivi posti in modalità automatica relativi al gruppo, gestendone in maniera automatica la sequenza di avvio, regolazione e arresto. I gruppi funzionali in modalità automatica ricevono le richieste di avvio e arresto direttamente dalla sequenza di avvio e arresto della centrale. In modalità manuale, i singoli gruppi funzionali possono essere operati senza avviare l'intera centrale, utile per test o gestioni particolari.

Le valvole, motorizzate con posizionatore, sono dotate di un comando e un feedback analogici di posizione e due finecorsa digitali di aperto e chiuso. Possono essere controllate in modalità manuale o automatica. In modalità manuale, l'operatore può impostarne la posizione di apertura; in modalità automatica, la posizione è decisa dalle logiche di controllo. Alcune valvole specifiche (MOV-089/090/091/092/093/094) sono comandabili solo manualmente dal PLC e non hanno una logica di controllo automatico.

Le pompe possono essere controllate in modalità manuale o automatica. In modalità manuale, l'operatore può accendere o spegnere la pompa e impostarne la velocità in percentuale, corrispondente alla frequenza di funzionamento. In modalità automatica, la velocità è determinata dalle logiche di controllo. Alcune pompe specifiche (P201/202/203/204), destinate alla circolazione dell'acqua TLF nei circuiti di condensazione dei gruppi frigoriferi, sono a velocità fissa e sono comandate solo in accensione e spegnimento, quindi non hanno un comando e un feedback analogici di velocità.

Per garantire un passaggio fluido (*bumpless*) tra modalità automatica e manuale, lo stato attuale del dispositivo viene mantenuto durante il cambio di modalità. In modalità automatica, il comando automatico è copiato sul comando manuale, mantenendo il dispositivo nello stato corrente al passaggio nella modalità manuale. In modalità manuale, i PID che regolano i dispositivi sono messi in *tracking*, alimentandone il *setpoint* con la variabile di processo e resettandone l'azione integrale.

Il PID opera in due modalità:

Tracking: il blocco PID viene alimentato con un ingresso che permette di aggiustare il suo stato interno cambiando l'output dell'integratore, permettendo all'output di inseguire il segnale in ingresso;

Controllo: il PID funziona normalmente.

Per ottenere un trasferimento di controllo senza salti, il blocco PID deve essere:

- in modalità tracking quando il dispositivo è in controllo manuale (open-loop);
- in modalità controllo quando il dispositivo è in controllo automatico (closed-loop).

Le valvole, le macchine frigorifere e gli inverter delle pompe possono essere controllati localmente o remotamente. In modalità locale, il controllo è gestito dai comandi sul quadro locale; in modalità remota è gestito dal PLC. Per ottenere un passaggio fluido bumpless dalla modalità locale a quella remota, viene copiato lo stato di marcia della pompa sul comando manuale, il feedback di velocità della pompa sul comando manuale di velocità e il feedback di posizione della valvola sul comando di posizione. Questo

risultato, ovviamente, non si può ottenere nel passaggio dalla modalità remota a quella locale, perché i comandi locali non sono gestiti dal PLC, che quindi non può controllare lo stato di questi comandi.

Se una valvola o una pompa presenta un'anomalia, rimane fuori servizio finché la condizione di guasto non viene risolta e l'allarme non viene riconosciuto. In caso di fault di un segnale analogico di ingresso, il segnale viene escluso dalla logica e visualizzato come indisponibile sulla pagina degli allarmi.

Le pagine grafiche, realizzate secondo lo standard delle centrali gestite da A2A, seguono la seguente convenzione cromatica:

- Valvola aperta: rosso
- Valvola chiusa: verde
- Pompa accesa: rosso
- Pompa spenta: verde
- Gruppo frigorifero in marcia: rosso
- Gruppo frigorifero in stop: verde

Questa convenzione mostra una condizione di pericolo (rosso) quando un dispositivo è in marcia o energizzato e una condizione di non pericolo (verde) quando un dispositivo è fermo o de-energizzato. Le pagine grafiche includono anche set di allarmi e anomalie, mostrati con diverse gradazioni di colore (ad esempio rosso e giallo) a seconda del livello di pericolo rappresentato dalla segnalazione.

3.3. Gestione delle priorità dei dispositivi

La logica di gestione delle priorità determina l'attivazione dei dispositivi, come pompe e macchine frigorifere, in base alle loro priorità di inserimento. La priorità viene assegnata automaticamente quando un dispositivo passa dalla modalità di controllo manuale a quella automatica, a condizione che sia in modalità remota e disponibile.

Inizialmente, tutti i dispositivi hanno una priorità nulla (0) e sono in modalità di controllo manuale. Quando vengono commutati in modalità automatica, acquisiscono un livello di priorità basato sulla sequenza di attivazione:

- il primo dispositivo in modalità automatica assume la priorità 1;
- il secondo dispositivo in modalità automatica assume la priorità 2;

- e così via, in ordine cronologico.

Se un dispositivo viene commutato da automatico a manuale, la sua priorità viene annullata, escludendolo dalla logica automatica. Le priorità dei dispositivi rimanenti vengono riassegnate automaticamente. Ad esempio, se un dispositivo con priorità 1 viene escluso, la priorità 1 viene assegnata al dispositivo che aveva la priorità 2, e così via. Anche quando un dispositivo passa a uno stato di indisponibilità (ad esempio, a causa di uno scatto termico), la sua priorità viene annullata e viene escluso dalla logica automatica. Quando un dispositivo precedentemente escluso torna disponibile, se viene messo in modalità automatica, acquisisce l'ultima priorità disponibile, riprendendo il controllo senza interrompere il funzionamento complessivo del sistema.

3.4. Sequenza di avvio e arresto della centrale

Il controllo di avvio e arresto della centrale è gestito da un operatore tramite due pulsanti di start/stop centrale.

L'avvio della centrale richiede il soddisfacimento di determinati requisiti, come ad esempio avere determinate valvole aperte, avere altre valvole, pompe e macchine frigorifere in modalità automatica e diversi regolatori PID in modalità automatica e con misure valide. Una volta avviata la centrale, questa rimane in marcia anche se si perdono i permissivi di avvio. Più nello specifico, i permissivi di avvio della centrale sono i seguenti:

- valvole MOV-089 e MOV-090 aperte (intercetto mandata e ritorno rete TLF)
- valvola MOV-101 di bypass in automatico oppure TCV-005 di miscelazione in automatico
- stato valvole restituzione OK, composto da uno dei seguenti permissivi:
 - valvola MOV-095 scarico falda in automatico e chiusa e una delle seguenti condizioni: valvola FCV-002 scarico Olona in automatico oppure FCV-003 scarico parco in automatico
 - valvola MOV-095 scarico falda aperta e valvole FCV-002 e FCV-003 indisponibili e chiuse
- almeno una pompa TLF in automatico
- almeno un gruppo frigorifero in automatico
- almeno una pompa di falda in automatico

- gruppi funzionali pompe TLF e pompe di falda in automatico
- tutti i seguenti regolatori PID in automatico: TIC-029, FIC-005, FIC-008, PIC-022, PIC-015, PIC-016, PDIC-001
- il regolatore PID FIC-001 in automatico e con setpoint esterno
- tutte le misure di tutti i regolatori PID citati devono essere valide, quindi non in allarme *bad quality*

Una volta soddisfatti questi requisiti, la sequenza di avvio segue questi passaggi:

1. richiesta di avvio del gruppo funzionale pompe TLF, che esegue la rampa di avvio e regolazione della pompa TLF prioritaria;
2. richiesta di avvio del gruppo funzionale pompe falda, che esegue la rampa di avvio e regolazione della pompa dei pozzi prioritaria;
3. abilitazione delle valvole di miscelazione TCV-005 e MOV-101;
4. abilitazione delle valvole di restituzione secondo una logica specifica che determina dove scaricare l'acqua prelevata;
5. avvio del gruppo frigorifero prioritario.

L'arresto della centrale viene gestito con una sequenza che include la riduzione graduale dei setpoint dei regolatori PID e la disattivazione dei dispositivi prioritari:

1. riduzione graduale dei setpoint dei PID che regolano le pompe TLF;
2. disattivazione automatica del gruppo frigorifero prioritario;
3. riduzione graduale dei setpoint dei PID che regolano le pompe dei pozzi;
4. arresto delle pompe TLF;
5. arresto delle pompe dei pozzi (se non richieste per l'irrigazione)
6. chiusura delle valvole di miscelazione;
7. chiusura delle valvole di restituzione.

3.5. Gestione dei sistemi di pompaggio

I sistemi di pompaggio dell'acqua TLF e dell'acqua di falda funzionano autonomamente seguendo una logica predefinita articolata nelle seguenti fasi:

- l'operatore sceglie tra il funzionamento *estivo* o *invernale*;

- l'operatore imposta le priorità delle pompe, mettendole in modalità automatica nella sequenza desiderata;
- l'operatore imposta le soglie di portata per l'inserzione e la disinserzione delle pompe per ogni livello di priorità e i tempi di attesa
- le pompe in modalità automatica si attivano all'abilitazione della sequenza di start secondo la logica di gestione inserzione pompe.

Le pompe operano in parallelo e sono di due dimensioni diverse: una per il funzionamento estivo e una più piccola per il funzionamento invernale a basso carico. La selezione del tipo di funzionamento avviene tramite un selettore su SCADA.

Sul collettore di mandata TLF sono presenti tre pompe (P301A/B/C) e una pompa di taglia inferiore (P302) per il funzionamento a basso carico invernale. Le pompe P301A/B/C garantiscono una portata di 500 m³/h e una prevalenza di 450 kPa ciascuna, mentre la pompa P302 garantisce una portata di 200 m³/h e una prevalenza di 200 kPa.

Sul collettore di estrazione dell'acqua di falda sono presenti sei pompe (P001A/B/C/D/E/F) e due pompe di taglia inferiore (P001G/H) per il funzionamento a basso carico invernale. Le pompe P001A/B/C/D/E/F garantiscono una portata di 270 m³/h e una prevalenza di 600 kPa ciascuna, mentre le pompe P001G/H garantiscono una portata di 90 m³/h e una prevalenza di 300 kPa.

Le pompe invernali, dotate di caratteristiche idrauliche differenti, operano esclusivamente durante l'inverno con priorità 1. Una pompa successiva si attiva solo se quella in servizio non è disponibile. Le tabelle di inserzione e disinserzione su soglie di portata sono disabilitate.

La gestione delle priorità delle pompe invernali cambia a seconda della modalità di funzionamento selezionata:

Funzionamento Estivo: la pompa invernale viene fermata e passa in modalità manuale con priorità 0. Le altre pompe estive, se in modalità automatica, assumono le priorità. Solo se tutte le pompe estive sono indisponibili, le pompe invernali possono essere poste in modalità automatica, assegnando loro delle priorità;

Funzionamento Invernale: la pompa invernale in modalità automatica assume automaticamente priorità 1, relegando le pompe estive a priorità inferiori.

Per ogni pompa TLF (P301A/B/C/P302), la selezione della modalità di controllo automatico è subordinata a specifiche condizioni:

- assenza di blocchi e allarmi che ne impediscano l'avvio;
- valvole MOV-089 e MOV-090 aperte (intercetto mandata e ritorno rete TLF).

Per ogni pompa dei pozzi di falda (P001A/B/C/D/E/F/G/H), la selezione della modalità di controllo automatico è subordinata alle seguenti condizioni:

- assenza di blocchi e allarmi che ne impediscano l'avvio;
- almeno uno dei seguenti regolatori PID in automatico PIC-022, FIC-008;
- il regolatore PID FIC-005 in automatico;
- misura di portata di falda FT-008 valida.

3.5.1. Gestione inserzione pompe

La gestione automatica dell'inserzione e disinserzione delle pompe su soglie di portata viene gestita dal cosiddetto *gruppo funzionale*, di cui si rimanda alla descrizione alla sezione 3.2 a pagina 23. Esiste un gruppo funzionale per le pompe TLF e uno per le pompe di falda. Per ciascun livello di priorità dal secondo in poi sono previsti quattro parametri impostabili dall'operatore e visibili su SCADA:

Soglia d'inserzione: superata questa soglia di portata, viene abilitata la richiesta di attivazione della pompa del relativo livello di priorità;

Soglia di disinserzione: sotto questa soglia di portata, viene abilitata la richiesta di disattivazione della pompa del relativo livello di priorità;

Ritardo d'inserzione: tempo di attesa prima di attivare la pompa superata la soglia d'inserzione;

Ritardo di disinserzione: tempo di attesa prima di disattivare la pompa scendendo sotto la soglia d'inserzione;

La pompa in prima priorità viene attivata dalla sequenza di avvio del gruppo funzionale. Le pompe con priorità successive si attivano o disattivano automaticamente in base a soglie di portata impostate dall'operatore. Quando la richiesta della rete aumenta, la velocità della pompa di prima priorità aumenta fino a raggiungere una portata predefinita. Superata questa soglia, dopo un tempo di attesa viene richiesta l'attivazione della pompa di priorità successiva tra quelle non in servizio. Una volta avviata, accelera gradualmente in rampa fino alla velocità stabilita dalla regolazione, operando in parallelo con la pompa di prima priorità. Le pompe di priorità successive vengono attivate seguendo lo stesso processo descritto precedentemente.

Quando la richiesta della rete diminuisce, la regolazione riduce gradualmente la velocità delle pompe in funzione fino a raggiungere una portata predefinita al di sotto della quale viene richiesto l'arresto della pompa rispettiva. La pompa di prima priorità viene arrestata dalla sequenza di arresto del gruppo funzionale.

La sequenza di avvio del gruppo funzionale delle pompe di falda può essere attivata sia dalla richiesta di avvio centrale sia da una richiesta di irrigazione. Questa configurazione consente l'abilitazione delle pompe di falda e delle valvole di restituzione per utilizzare l'acqua di falda nell'irrigazione del parco.

La valvola PCV-001 di minimo flusso pompe TLF viene abilitata dopo l'attivazione della pompa di prima priorità da parte della sequenza di start del gruppo funzionale pompe TLF, seguendo un incremento in rampa del riferimento di posizione fino a raggiungere il valore stabilito dalla regolazione che controlla l'apertura o la chiusura per mantenere il set-point di portata di ricircolo desiderato.

3.6. Gestione dei sistemi frigoriferi

Per *sistema frigorifero* si intende un insieme composto da:

- una pompa per il circuito di condensazione;
- una pompa per il circuito di evaporazione;
- uno scambiatore di calore che separa il circuito di condensazione da quello di acqua falda;
- una valvola di regolazione per il lato falda dello scambiatore;
- la macchina frigorifera.

Come descritto in precedenza, la centrale dispone di quattro sistemi frigoriferi:

FA-01: gruppo ad assorbimento con potenza frigorifera di 1000 kWf

FC-01: gruppo a compressione con potenza di 2500 kWf

FC-02: gruppo a compressione con potenza di 2500 kWf

FC-03: gruppo a compressione con potenza di 460 kWf

Il sistema di automazione assegna automaticamente un livello di priorità a ciascun sistema frigorifero, quando passa dalla modalità di controllo manuale alla modalità di controllo automatica. La logica di gestione delle priorità funziona esattamente nello stesso modo descritto nella sezione 3.3 a pagina 25.

Per attivare la modalità di controllo automatico per ciascun sistema frigorifero, devono verificarsi specifiche condizioni. Queste includono l'attivazione della modalità automatica per tutte le componenti associate (pompe, valvola e macchina frigorifera) e per i regolatori PID della valvola di regolazione dello scambiatore. Per il sistema frigorifero ad assorbimento, è inoltre necessario che le valvole TLR siano aperte e che la valvola di regolazione TLR sia impostata in modalità automatica.

Più nello specifico, la selezione della modalità di controllo automatico per il sistema frigorifero ad assorbimento FA-01 è subordinata alle seguenti condizioni:

- macchina frigorifera FA-01 in automatico;
- pompe P201 e P101 in automatico (circuito evaporatore e condensatore);
- valvola TCV-006 regolazione circuito acqua di falda scambiatore in automatico;
- valvola MOV-096 ingresso circuito generatore in automatico;
- valvole MOV-091 e MOV-094 aperte (intercetto mandata e ritorno rete TLR lato sud)
- i regolatori PID TIC-019 e TIC-020 in automatico.

Per il sistema frigorifero a condensazione FC-01 e analogamente anche per FC-02 e FC-03, la selezione della modalità di controllo automatico è subordinata alle seguenti condizioni:

- macchina frigorifera FC-01 in automatico;
- pompe P202 e P102 in automatico (circuito evaporatore e condensatore);
- valvola TCV-007 regolazione circuito acqua di falda scambiatore in automatico;
- i regolatori PID TIC-018 e TIC-022 in automatico.

3.6.1. Gestione inserzione sistemi frigoriferi

Il sistema frigorifero con la priorità più alta viene avviato automaticamente quando la richiesta di potenza frigorifera della rete TLF supera una soglia predefinita. L'inserzione dei sistemi frigoriferi con priorità inferiore viene effettuata automaticamente in base a soglie di potenza impostate dall'operatore, similmente a quanto descritto per i sistemi di pompaggio nella sezione 3.5 a pagina 27. L'avvio e l'arresto di ciascun sistema frigorifero seguono una sequenza specifica stabilita dal produttore delle macchine frigorifere, richiedendo l'attivazione e la gestione di sistemi ausiliari in momenti precisi.

L'inserzione e la disinserzione dei sistemi frigoriferi dipendono dalla potenza frigorifera richiesta, calcolata come mostrato in equazione (3.1) partendo dalla *portata netta* della rete TLF e dalle temperature di mandata e ritorno della rete TLF.

$$\dot{Q}_{Richiesta} = \dot{V}_{Netta} \frac{T_{Ritorno} - T_{Mandata}}{860} \quad (3.1)$$

Questa formula è derivata dall'espressione dell'energia termica (calore) ceduta alla centrale, calcolata come:

$$Q = m \cdot c_s \cdot (T_{ingresso} - T_{uscita})$$

Considerando il calore specifico dell'acqua $c_s = 1 \text{ kcal}/(\text{kg}^\circ\text{C})$, l'energia termica si esprime in kcal. La potenza termica, invece, corrisponde all'energia termica trasferita nell'unità di tempo e viene calcolata come:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_s \cdot (T_{ingresso} - T_{uscita})$$

Il termine \dot{m} corrisponde alla portata massica, che può essere espressa in kg/h. In questo specifico impianto, viene misurata la portata volumetrica \dot{V} espressa in m^3/h , che va convertita in portata massica considerando la densità dell'acqua approssimata $\rho = 1000 \text{ kg}/\text{m}^3$ con una temperatura compresa tra 7°C e 12°C :

$$\dot{m} = \rho \dot{V}$$

In questo modo si ottiene la potenza termica espressa in kcal/h. Per convertirla in kW, si considera l'equivalenza approssimata $1 \text{ kW} = 860 \text{ kcal}/\text{h}$, perciò in equazione (3.1) si divide il risultato per 860.

In riferimento alla equazione (3.1), il termine $T_{Mandata}$ è un *set-point* impostabile da operatore che corrisponde al riferimento di temperatura di mandata nella rete TLF. Il termine $T_{Ritorno}$, invece, corrisponde al valore di temperatura di ritorno nella rete TLF misurato dalla sonda TT-001G. Il termine \dot{V}_{Netta} corrisponde al valore di portata della rete TLF misurato dal sensore FT-001 sottraendo le singole portate lato evaporatore⁷ dei sistemi frigoriferi in marcia nella modalità manuale.

Nel sistema SCADA, l'operatore può compilare una tabella per gestire l'inserzione e la disinserzione dei sistemi frigoriferi, definendo la potenza nominale di ogni sistema frigorifero e la percentuale di potenza dei sistemi frigoriferi già in funzione necessaria per determinare la soglia di attivazione di un nuovo sistema frigorifero. A seconda del livello

⁷Rispettivamente FT-002 per il sistema frigorifero FA-01, FT-003 per FC-01, FT-004 per FC-02, FT-005 per FC-03.

Tabella 3.1: Soglie di potenza per l'inserzione e la disinserzione dei sistemi frigoriferi

Priorità	Soglia inserzione	Soglia disinserzione
1	$\%_{ON1} \cdot \dot{Q}_1$	—
2	$\%_{ON2} \cdot \dot{Q}_1$	$\%_{OFF2} \cdot \dot{Q}_1$
3	$\%_{ON3} \cdot (\dot{Q}_1 + \dot{Q}_2)$	$\%_{OFF3} \cdot (\dot{Q}_1 + \dot{Q}_2)$
4	$\%_{ON3} \cdot (\dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 + \dot{Q}_3)$	$\%_{OFF3} \cdot (\dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 + \dot{Q}_3)$

di priorità acquisito da ciascun sistema frigorifero, le logiche implementate assegnano automaticamente la potenza nominale del corrispondente sistema frigorifero a ogni livello di priorità. Le soglie di potenza vengono quindi calcolate basandosi su questi valori e sulle percentuali impostate dall'operatore, secondo le logiche mostrate in tabella 3.1. Il valore \dot{Q}_x corrisponde alla potenza nominale della macchina frigorifera di priorità x e il valore viene determinato dalle logiche implementate, mentre i valori $\%_{ONx}$ e $\%_{OFFx}$ sono impostabili da operatore su SCADA e corrispondono alle percentuali di potenza per calcolare le soglie di inserzione e disinserzione dei sistemi frigoriferi.

Le logiche di inserzione e disinserzione confrontano la soglia di potenza nominale disponibile delle macchine in funzione con la potenza richiesta dalla rete. Le stesse logiche si applicano sia per le soglie di inserzione sia per quelle di disinserzione, tranne per il sistema frigorifero di priorità 1, che ha una gestione separata del comando di arresto automatico.

Il sistema frigorifero di priorità 1 viene avviato quando si verificano contemporaneamente le seguenti condizioni:

- abilitazione della richiesta di avvio della centrale;
- pompa rete TLF di prima priorità in funzione;
- pompa falda di prima priorità in funzione;
- superamento della soglia di potenza di attivazione del sistema frigorifero di prima priorità.

Il sistema frigorifero di priorità 1 viene arrestato quando si verificano contemporaneamente le seguenti condizioni:

- abilitazione della richiesta di arresto della centrale;
- portata FT-001 della rete TLF al di sotto di una soglia impostabile dall'operatore.

3.6.2. Sequenze di avvio e fermata dei sistemi frigoriferi

La gestione automatica della sequenza dei sistemi frigoriferi avviene in maniera analoga al cosiddetto *gruppo funzionale*, di cui si rimanda alla descrizione alla sezione 3.2 a pagina 23. L'inserzione dei sistemi frigoriferi può avvenire su richiesta dell'operatore o tramite logica PLC, grazie a un selettore che permette di scegliere la modalità di avvio desiderata. In entrambe le modalità, devono essere soddisfatte le seguenti condizioni di avvio:

- almeno una pompa TLF accesa;
- almeno una pompa di falda accesa.

Quando viene richiesta l'attivazione del sistema frigorifero ad assorbimento FA-01, sia dall'operatore sia tramite logica di inserzione, e le condizioni di avvio precedentemente indicate sono soddisfatte, la sequenza di avvio procede come segue:

1. apertura della valvola MOV-096;
2. invio del comando di attivazione alla macchina frigorifera FA-01;
3. ricezione dalla macchina frigorifera FA-01 del segnale di richiesta attivazione della pompa P201 circuito evaporatore;
4. avvio della pompa P201;
5. invio alla macchina frigorifera FA-01 del segnale *pompa circuito evaporatore in marcia* dopo aver ricevuto il feedback di marcia della pompa P201;
6. ricezione dalla macchina frigorifera FA-01 del segnale di richiesta attivazione della pompa P101 circuito condensatore e del segnale analogico per modularne la velocità;
7. avvio della pompa P101 e invio del segnale analogico all'inverter della pompa;
8. invio alla macchina frigorifera FA-01 del segnale *pompa circuito condensatore in marcia* dopo aver ricevuto il feedback di marcia della pompa P101;
9. abilitazione della valvola TCV-006 in regolazione con i regolatori PID TIC-019 e TIC-020;
10. ricezione dalla macchina frigorifera FA-01 del segnale *macchina frigorifera FA-01 in marcia*.

Quando viene richiesta la disattivazione del sistema frigorifero ad assorbimento FA-01, sia dall'operatore sia tramite logica di inserzione, la sequenza di spegnimento procede come segue:

1. invio del comando di disattivazione alla macchina frigorifera FA-01;
2. ricezione dalla macchina frigorifera FA-01 del segnale di richiesta disattivazione della pompa P201 circuito evaporatore;
3. arresto della pompa P201;
4. invio alla macchina frigorifera FA-01 del segnale *pompa circuito evaporatore ferma* dopo aver ricevuto il feedback di stop;
5. ricezione dalla macchina frigorifera FA-01 del segnale di richiesta disattivazione della pompa P101 circuito condensatore;
6. arresto della pompa P101;
7. invio alla macchina frigorifera FA-01 del segnale *pompa circuito condensatore ferma* dopo aver ricevuto il feedback di arresto dall'inverter;
8. ricezione dalla macchina frigorifera FA-01 del segnale *macchina frigorifera FA-01 ferma*
9. disabilitazione dei regolatori PID TIC-019 e TIC-020 e chiusura della valvola TCV-006;
10. chiusura della valvola MOV-096.

L'inserimento dei sistemi frigoriferi a compressione FC-01, FC-02 e FC-03, similmente a FA-01, può avvenire su richiesta dell'operatore o tramite logica PLC, utilizzando un selettore per scegliere la modalità di avvio. Anche in questo caso, devono essere soddisfatte le condizioni di avvio precedentemente indicate. La sequenza di avvio del sistema frigorifero FC-01 e analogamente di FC-02 e FC-03 procede come segue:

1. avvio della pompa P202 circuito evaporatore;
2. invio del comando di attivazione alla macchina frigorifera FC-01;
3. ricezione dalla macchina frigorifera FC-01 del segnale di richiesta attivazione della pompa P102 circuito condensatore e del segnale analogico per modularne la velocità;
4. avvio della pompa P102 e invio del segnale analogico all'inverter della pompa;
5. abilitazione della valvola TCV-007 in regolazione con i regolatori PID TIC-018 e TIC-022;
6. ricezione dalla macchina frigorifera FC-01 del segnale *macchina frigorifera FC-01 in marcia*.

Quando viene richiesta la disattivazione del sistema frigorifero a compressione FC-01 e analogamente di FC-02 e FC-03, sia dall'operatore sia tramite logica di inserzione, la sequenza di spegnimento procede come segue:

1. invio del comando di disattivazione alla macchina frigorifera FC-01;
2. ricezione dalla macchina frigorifera FC-01 del segnale di richiesta disattivazione della pompa P102 circuito condensatore;
3. arresto della pompa P102;
4. disabilitazione dei regolatori PID TIC-018 e TIC-022 e chiusura della valvola TCV-007;
5. ricezione dalla macchina frigorifera FC-01 del segnale *macchina frigorifera FC-01 ferma*;
6. arresto della pompa P202 dopo un certo ritardo dalla ricezione del feedback arresto della macchina frigorifera FC-01 per smaltire il freddo generato nel circuito evaporatore.

È da notare come il PLC della centrale gestisca i dispositivi ausiliari dei sistemi frigoriferi, cioè pompe e valvole, ricevendo le richieste di avvio e arresto dalle macchine frigorifere e replicando tali comandi direttamente ai dispositivi ausiliari.

La gestione del circuito di condensazione è cruciale per il funzionamento ottimale delle macchine frigorifere. I circuiti di condensazione sono disaccoppiati da quelli di falda per preservare l'integrità delle macchine e operare a temperature compatibili con le specifiche tecniche. Questa separazione è necessaria poiché le temperature di condensazione richieste sono superiori rispetto alla temperatura dell'acqua di falda disponibile, che potrebbe causare problemi all'avvio a freddo delle macchine. Il circuito chiuso di condensazione è gestito dal sistema di automazione proprio della macchina frigorifera, sia essa a compressione o ad assorbimento. La regolazione della velocità delle pompe di circolazione (P101/-2/3/4), azionate dal PLC di centrale, è effettuata in funzione del carico di funzionamento della macchina, come previsto dall'automazione propria della macchina.

3.7. Gestione lavaggio filtri acqua di falda

La gestione automatica del lavaggio dei filtri acqua di falda (FCC-01, FCC-02, FCC-03) prevede una logica di funzionamento che consente sia il controllo manuale sia automatico dei cicli di lavaggio. Ogni filtro è dotato di un selettore software per scegliere tra modalità automatica e manuale:

Modalità manuale: l'operatore può avviare o fermare il lavaggio del singolo filtro;

Modalità automatica: i comandi di lavaggio sono gestiti automaticamente dalla logica.

Un gruppo funzionale gestisce i filtri in maniera simile a quello usato per le pompe TLF e di falda di cui si rimanda alla descrizione alla sezione 3.2 a pagina 23. Questo gruppo può essere messo in modalità automatica solo se almeno un filtro è in modalità automatica. L'avvio del gruppo funzionale, sia manualmente dall'operatore sia automaticamente dalla logica, attiva il ciclo di lavaggio come descritto di seguito. L'arresto avviene automaticamente al raggiungimento delle condizioni logiche previste o su comando manuale dell'operatore.

L'avvio del ciclo di lavaggio del gruppo funzionale attiva la seguente sequenza, che abilita il lavaggio solo per i filtri in modalità automatica:

1. attivazione lavaggio filtro FCC-01, se in modalità automatica, per un tempo impostato da operatore su SCADA;
2. arresto lavaggio filtro FCC-01 dopo lo scorrere del tempo;
3. attesa di un tempo impostato da operatore su SCADA;
4. attivazione lavaggio filtro FCC-02, se in modalità automatica, per il tempo impostato;
5. arresto lavaggio filtro FCC-02 dopo lo scorrere del tempo;
6. attesa del tempo impostato da operatore su SCADA;
7. attivazione lavaggio filtro FCC-03, se in modalità automatica, per il tempo impostato;
8. arresto lavaggio filtro FCC-03 dopo lo scorrere del tempo;
9. attesa del tempo impostato da operatore su SCADA;
10. verifica valore differenza di pressione (ΔP) massimo tra i filtri in modalità automatica

Al termine del primo ciclo di lavaggio, se il valore di ΔP massimo risultante da logica passa maggiore sui ΔP misurati su ciascun filtro (PDT-004, PTD-005, PDT-006) è inferiore a un valore di riferimento, il gruppo funzionale viene arrestato per fine sequenza di lavaggio. Se il valore di ΔP è ancora superiore al riferimento, inizia un secondo ciclo di lavaggio. Dopo il secondo ciclo, se il ΔP è ancora elevato, viene generato su SCADA un allarme mancato lavaggio filtri FCC e il gruppo funzionale si arresta.

Il tempo di durata lavaggio e il tempo di attesa prima di lavare il prossimo filtro, impostati da operatore su SCADA, sono valori comuni a tutti i filtri e configurabili dalla pagina parametri.

Il valore di ΔP di riferimento per l'attivazione automatica del lavaggio, comune a tutti i filtri, è calcolato in base alla portata attraverso ciascun filtro, determinata dividendo la portata totale dell'acqua di falda FT-008 per il numero di filtri in modalità automatica. Il valore di portata che attraversa ciascun filtro e il valore di ΔP di riferimento sono correlati tramite una curva di interpolazione lineare a quattro punti, caratterizzata in sito.

Indipendentemente dai valori di ΔP , un ciclo di lavaggio viene attivato automaticamente ogni volta che scorre un tempo configurabile da pagina parametri su SCADA.

3.8. Gestione sistema trattamento acqua a osmosi

La centrale è dotata di un sistema di trattamento dell'acqua a osmosi per la rete TLF, che include un serbatoio per l'accumulo dell'acqua trattata. La comunicazione tra il PLC della centrale e il PLC del sistema osmosi è limitata alla trasmissione dei comandi di avvio, arresto e blocco del sistema, nonché alla ricezione degli allarmi e dello stato operativo.

Il sistema di trattamento a osmosi viene avviato automaticamente quando il livello dell'acqua nel serbatoio scende al di sotto di una soglia di basso livello, definita dall'operatore tramite SCADA (LSL - *Level Switch Low*). Quando il livello dell'acqua nel serbatoio supera una soglia di alto livello, anch'essa impostata dall'operatore su SCADA (LSH - *Level Switch High*), il sistema di osmosi riceve il comando di arresto. Nella situazione in cui il livello dell'acqua scende sotto una soglia di bassissimo livello (LSLL), viene attivato un comando di blocco delle pompe. Il sistema di osmosi invia al PLC della centrale segnalazioni riguardanti gli allarmi e lo stato di funzionamento, indicando se il sistema è in produzione o in standby.

3.9. Interblocchi di sicurezza

Nella centrale, sono stati implementati interblocchi di sicurezza basati sui sensori presenti nell'impianto. Questi interblocchi, definiti da una *matrice causa-effetto*, garantiscono che l'impianto rispetti gli standard di sicurezza necessari per ottenere la certificazione. Di seguito, si descrivono gli interblocchi implementati per ciascun dispositivo.

La macchina frigorifera ad assorbimento FA-01 e la pompa P201 del suo circuito evaporatore sono interbloccate quando la misura di portata all'uscita del circuito evaporatore

FA-01 FT-002 scende sotto una soglia critica di bassissima portata. Questo assicura che il sistema operi solo quando c'è un flusso sufficiente per smaltire il freddo generato, prevenendo danni dovuti a portate inadeguate.

Le pompe TLF (P301A, P301B, P301C e P302) sono interbloccate dall'attivazione del pressostato di minima pressione all'aspirazione delle pompe TLF. Inoltre, queste pompe vengono interbloccate e arrestate con un comando di emergenza *SIL2* quando si attivano due dei tre pressostati di massima pressione sul collettore di mandata delle pompe TLF (PSHH-001A, PSHH-001B, PSHH-001C). Questo garantisce che le pompe funzionino solo entro i parametri di pressione sicuri, prevenendo situazioni di sovrappressione.

Ciascuna delle pompe di falda (P001A, P001B, P001C, P001D, P001E, P001F, P001G, P001H) è interbloccata quando la misura di pressione di scarico della falda (PT-022) supera una soglia critica di altissima pressione. Ulteriori interblocchi si attivano quando la pressione di mandata del pozzo di estrazione supera una soglia di altissima pressione e quando il livello del pozzo scende sotto una soglia di bassissimo livello. Questi interblocchi assicurano che le pompe operino solo quando i parametri di pressione e livello sono entro limiti sicuri, prevenendo danni da insabbiamento ai pozzi e danni alle tubazioni e alle pompe stesse.

3.10. Regolazioni PID implementate nella centrale

In questa sezione si descrivono in dettaglio le regolazioni implementate nell'impianto utilizzando regolatori PID. Verranno utilizzate le seguenti abbreviazioni:

PV: *Process Value*, misura di processo da regolare;

SP: *Set Point*, riferimento a cui si vuole far arrivare la misura di processo da regolare;

SP interno: riferimento impostato manualmente dall'operatore;

SP esterno: riferimento calcolato da logiche PLC;

CO: *Control Output*, uscita di controllo del regolatore PID.

Tutti i regolatori PID implementati in questo impianto dispongono di un selettore per la modalità automatica o manuale e di un selettore per utilizzare SP interno o esterno. In modalità automatica, il regolatore funziona normalmente come un PID, mentre in modalità manuale, l'uscita CO del PID viene impostata manualmente tramite SCADA.

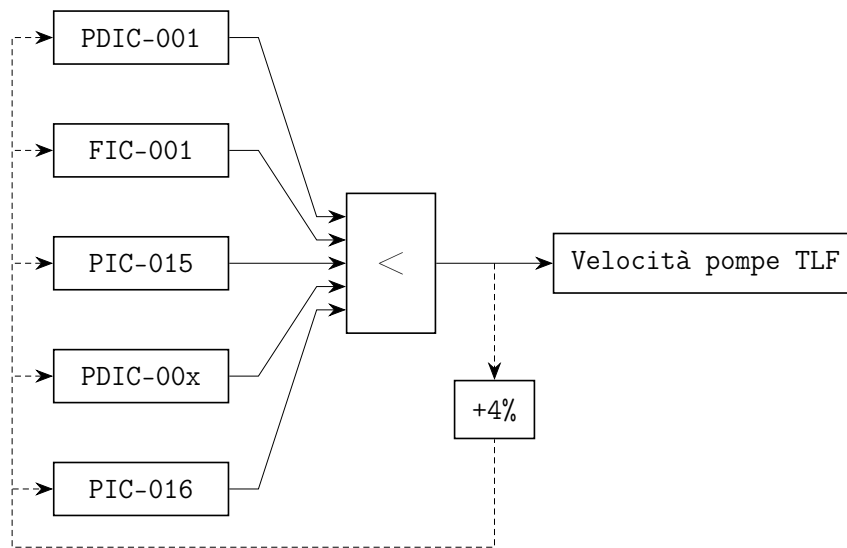


Figura 3.2: Schema di regolazione pompe TLF

3.10.1. Regolazione pompaggio TLF

Le pompe di spinta TLF (P301A, P301B, P301C, P302) sono gestite da inverter che variano la velocità delle pompe in base al setpoint di velocità comandato dai regolatori PID. Per il gruppo funzionale di pompaggio TLF, sono presenti cinque regolatori PID che lavorano in parallelo con una logica passa-basso, come mostrato nello schema in figura 3.2: il valore minore tra le uscite di controllo CO dei regolatori viene utilizzato per comandare il setpoint di velocità delle pompe, compreso tra 0% e 100%. Questo valore viene incrementato del 4% e utilizzato come limite superiore per le uscite degli altri regolatori con valori di uscita CO maggiori, evitando così la loro saturazione.

I regolatori implementati sono:

PDIC-001: regolatore pressione differenziale mandata-ritorno rete TLF

- PV: PDT-001, sostituita in caso di guasto dalla differenza tra le pressioni di mandata e ritorno rete TLF (PT-016 – PT-001)
- SP: solo interno impostabile da operatore su SCADA
- CO: velocità pompe P301A, P301B, P301C, P302

PDIC-00x: regolatore pressione differenziale remota rete TLF (solo predisposizione per futura installazione, CO forzata a 100%)

- PV: PDT-00x futura
- SP: solo interno impostabile da operatore su SCADA

- CO: velocità pompe P301A, P301B, P301C, P302

FIC-001: regolatore portata rete TLF

- PV: FT-001, sostituita in caso di guasto dalla somma delle portate del circuito evaporatore dei sistemi frigoriferi FA-01, FC-01, FC-02 e FC-03 (FT-002 + FT-003 + FT-004 + FT-005)
- SP: interno impostabile da operatore su SCADA ed esterno calcolato da PLC come PV + 30 per avere un setpoint in rampa durante la partenza del gruppo funzionale pompe TLF
- CO: velocità pompe P301A, P301B, P301C, P302

PIC-016: regolatore pressione mandata pompe TLF

- PV: PT-016, sostituita in caso di guasto dalla somma tra la pressione di ritorno rete TLF e differenza di pressione mandata e ritorno rete TLF: (PT-001 + PDT-001)
- SP: solo interno impostabile da operatore su SCADA
- CO: velocità pompe P301A, P301B, P301C, P302

PIC-015: regolatore pressione aspirazione pompe TLF

- PV: PT-015, sostituita in caso di guasto dalla pressione di ritorno rete TLF (PT-001)
- SP: solo interno impostabile da operatore su SCADA
- CO: velocità pompe P301A, P301B, P301C, P302

Il setpoint esterno del regolatore di portata rete TLF FIC-001 funge da riferimento per eseguire una rampa in incremento/inseguimento all'avvio del gruppo funzionale pompe TLF, quando viene attivata la pompa in prima priorità. Questo setpoint esterno è limitato superiormente a un valore impostabile dall'operatore e viene calcolato come $PV + 30 \text{ m}^3/\text{h}$ fino al raggiungimento del valore impostato.

Se uno dei regolatori ha una misura di processo invalida e almeno una delle misure sostitutive è invalida, il regolatore viene disattivato e la sua uscita CO forzata al 100% con la parte integrale a zero, e viene generato un allarme su SCADA.

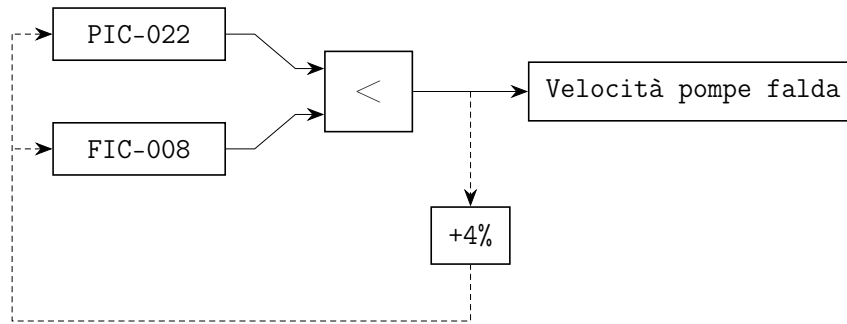


Figura 3.3: Schema di regolazione pompe falda

3.10.2. Regolazione valvola minimo flusso pompe TLF

La valvola PCV-001 di minimo flusso delle pompe TLF, una volta avviato il gruppo funzionale di pompaggio TLF, è comandata in modalità automatica dal seguente regolatore PID:

FIC-001.1: regolatore portata ricircolo rete TLF

- PV: FT-001, sostituita in caso di guasto dalla somma delle portate del circuito evaporatore dei sistemi frigoriferi FA-01, FC-01, FC-02 e FC-03 (FT-002 + FT-003 + FT-004 + FT-005)
- SP: solo interno impostabile da operatore su SCADA
- CO: posizione valvola PCV-001

Questo regolatore utilizza la stessa PV del regolatore di portata pompe TLF FIC-001, descritto nella sezione 3.10.1 a pagina 40, ma con un setpoint differente. Se la misura di processo è invalida e almeno una delle misure usate per calcolare il valore sostitutivo è invalida, il regolatore viene disattivato e la sua uscita CO forzata al 100% con la parte integrale a zero, e viene generato un allarme su SCADA.

3.10.3. Regolazione pompaggio acqua di falda

Le pompe di emungimento acqua di falda (P001A, P001B, P001C, P001D, P001E, P001F, P001G, P001H) sono dotate di inverter che regolano la velocità delle pompe in base ai setpoint determinati dai regolatori PID. La gestione delle pompe avviene tramite due regolatori PID che operano in parallelo seguendo una logica passa-basso, come mostrato nello schema in figura 3.3. Tra le uscite di controllo CO dei due regolatori, viene scelto il valore minore per impostare la velocità delle pompe, compresa tra 0% e 100%. Questo

valore viene poi aumentato del 4 % e utilizzato come limite superiore per l'altro regolatore, prevenendone la saturazione.

I regolatori implementati sono:

PIC-022: regolatore pressione di scarico acqua di falda

- PV: PT-022, sostituita in caso di guasto dalla pressione di mandata acqua di falda (PT-017)
- SP: solo interno impostabile da operatore su SCADA
- CO: velocità pompe P001A, P001B, P001C, P001D, P001E, P001F, P001G, P001H

FIC-008: regolatore portata acqua di falda

- PV: FT-008, sostituita in caso di guasto dalla somma delle portate dei pozzi di presa (FT-001A + FT-001B + FT-001C + FT-001D + FT-001E + FT-001F)
- SP: interno impostabile da operatore su SCADA ed esterno calcolato come descritto in seguito
- CO: velocità pompe P001A, P001B, P001C, P001D, P001E, P001F, P001G, P001H

Il setpoint esterno del regolatore di portata acqua di falda FIC-008 varia in base allo stato dell'allarme di alto livello dell'Olonà e allo stato di attivazione del gruppo funzionale pompe di falda:

Allarme alto livello Olona non attivo: siccome l'acqua viene scaricata in Olona o nel pozzetto di calma per fini irrigui, il setpoint esterno viene impostato a $745 \text{ m}^3/\text{h}$;

Allarme alto livello Olona attivo: siccome l'acqua viene scaricata nei pozzi di resa in questa condizione emergenziale, il setpoint esterno viene impostato a $432 \text{ m}^3/\text{h}$;

Gruppo funzionale pompe falda disattivato: siccome le pompe di falda vengono arrestate, il setpoint viene impostato a $0 \text{ m}^3/\text{h}$.

Questi setpoint sono fondamentali per garantire il rispetto dei limiti di portata di scarico delle acque di falda, evitando di incorrere in penali o multe.

Se il regolatore PIC-022 ha sia la misura di processo sia quella sostitutiva invalide, il regolatore viene disattivato e la sua uscita CO forzata al 100 % con la parte integrale a zero, e viene generato un allarme su SCADA.

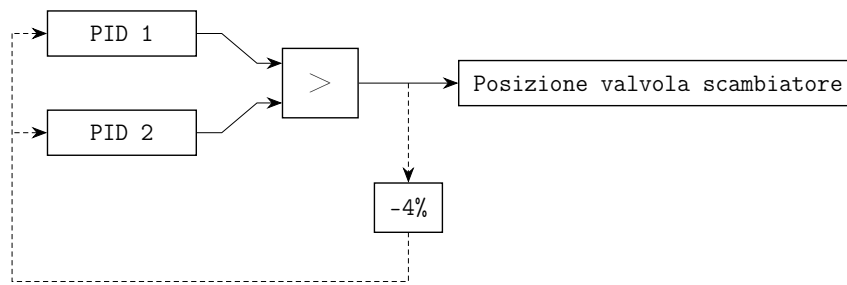


Figura 3.4: Schema di regolazione condensazione sistemi frigoriferi

Per quanto riguarda il regolatore FIC-008, il comportamento è differente. Se la misura di processo del regolatore e tutte le misure di portata che sommate formano la misura sostitutiva risultano invalide per almeno 30 secondi, viene richiesto l'arresto immediato della centrale, poiché la mancanza di misurazioni della portata prelevata dalla falda e scaricata rappresenta una condizione molto pericolosa per l'incapacità di regolare la portata.

3.10.4. Regolazione condensazione sistemi frigoriferi

Ogni sistema frigorifero è dotato di uno scambiatore di calore che separa il circuito di condensazione dal circuito di raffreddamento con acqua di falda. Il controllo della valvola di regolazione dello scambiatore è gestito automaticamente da due regolatori PID in parallelo, con una logica passa-alto che utilizza il valore maggiore tra le uscite di controllo per determinare la posizione della valvola, compresa tra 0% e 100%. Il valore maggiore viene ridotto del 4% e utilizzato come limite inferiore per l'uscita dell'altro regolatore, prevenendone la saturazione, come mostrato nello schema in figura 3.3 a pagina 42.

I regolatori implementati per la valvola TCV-006 di regolazione dello scambiatore E04 del sistema frigorifero FA-01 sono:

TIC-019: regolatore temperatura uscita primario (lato falda) scambiatore E04 sistema frigorifero FA-01

- PV: TT-019
- SP: interno impostabile da operatore su SCADA ed esterno calcolato come descritto in seguito
- CO: posizione valvola TCV-006

TIC-020: regolatore temperatura ingresso condensatore macchina frigorifera FA-01

- PV: TT-020
- SP: solo interno impostabile da operatore su SCADA

- CO: posizione valvola TCV-006

Per le valvole di regolazione degli scambiatori degli altri sistemi frigoriferi è stato implementato lo stesso schema di regolazione descritto sopra. Per la valvola TCV-007 di regolazione dello scambiatore E01 del sistema frigorifero FC-01 sono stati implementati i regolatori:

TIC-018: regolatore temperatura uscita primario (lato falda) scambiatore E01 sistema frigorifero FC-01

- PV: TT-018
- SP: interno impostabile da operatore su SCADA ed esterno calcolato come descritto in seguito
- CO: posizione valvola TCV-007

TIC-022: regolatore temperatura ingresso condensatore macchina frigorifera FC-01

- PV: TT-022
- SP: solo interno impostabile da operatore su SCADA
- CO: posizione valvola TCV-007

Per la valvola TCV-008 di regolazione dello scambiatore E02 del sistema frigorifero FC-02 sono stati implementati i regolatori:

TIC-017: regolatore temperatura uscita primario (lato falda) scambiatore E02 sistema frigorifero FC-02

- PV: TT-017
- SP: interno impostabile da operatore su SCADA ed esterno calcolato come descritto in seguito
- CO: posizione valvola TCV-008

TIC-024: regolatore temperatura ingresso condensatore macchina frigorifera FC-02

- PV: TT-024
- SP: solo interno impostabile da operatore su SCADA
- CO: posizione valvola TCV-008

Per la valvola TCV-009 di regolazione dello scambiatore E03 del sistema frigorifero FC-03 sono stati implementati i regolatori:

TIC-016: regolatore temperatura uscita primario (lato falda) scambiatore E03 sistema frigorifero FC-03

- PV: TT-016
- SP: interno impostabile da operatore su SCADA ed esterno calcolato come descritto in seguito
- CO: posizione valvola TCV-009

TIC-026: regolatore temperatura ingresso condensatore macchina frigorifera FC-03

- PV: TT-026
- SP: solo interno impostabile da operatore su SCADA
- CO: posizione valvola TCV-009

Il setpoint esterno dei regolatori TIC-016, TIC-017, TIC-018 e TIC-019 dipende dalla temperatura dell'acqua di falda (TT-015) e dalla posizione della valvola MOV-095 di scarico in direzione pozzi di resa:

MOV-095 non chiusa: siccome l'acqua viene scaricata nei pozzi di resa, il setpoint esterno viene calcolato come $TT-015 + 5^{\circ}\text{C}$, limitato a 21°C ;

MOV-095 chiusa: siccome l'acqua viene scaricata in Olona o nel pozzetto di calma per fini irrigui, il setpoint esterno viene calcolato come $TT-015 + 9^{\circ}\text{C}$.

Questi calcoli sono essenziali per garantire il rispetto dei limiti di temperatura di scarico delle acque di falda, evitando penali o multe.

Se una misura di processo risulta invalida, il regolatore viene disattivato e la sua uscita CO forzata al 100 %, con la parte integrale azzerata, e viene generato un allarme su SCADA.

3.10.5. Regolazione valvole bypass e miscelazione

La valvola MOV-101 di bypass viene aperta automaticamente quando la centrale è ferma e c'è una richiesta di irrigazione; altrimenti, rimane chiusa. Questo avviene poiché, con la centrale ferma, tutte le valvole di regolazione degli scambiatori dei sistemi frigoriferi sono chiuse, impedendo il passaggio dell'acqua di falda attraverso di essi, la quale viene quindi deviata dal collettore degli scambiatori al collettore di scarico.

La valvola TCV-005 di miscelazione dell'acqua di falda ha il compito di mantenere costante la temperatura dell'acqua scaricata, in base ai setpoint dei regolatori PID. L'abilitazione della valvola avviene automaticamente quando il gruppo funzionale di pompaggio acqua

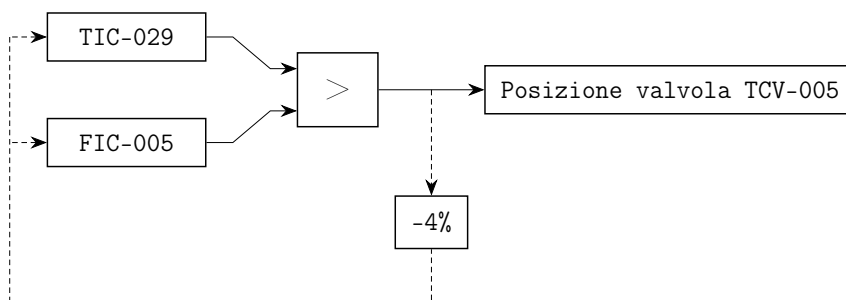


Figura 3.5: Schema di regolazione valvola TCV-005

di falda è attivo e la pompa in prima priorità è in marcia. Questa abilitazione rimane attiva finché il gruppo funzionale delle pompe di falda è operativo o c'è una richiesta di irrigazione. La valvola è controllata da due regolatori PID che operano in parallelo con una logica passa-alto. Tra le uscite di controllo CO dei due regolatori, viene scelto il valore maggiore per determinare la posizione della valvola, compresa tra 0% e 100%. Questo valore viene ridotto del 4% e utilizzato come limite inferiore per l'altro regolatore, prevenendone la saturazione, come mostrato nello schema in figura 3.3 a pagina 42. I regolatori PID che comandano la valvola TCV-005 sono:

TIC-029: regolatore temperatura scarico falda generale

- PV: TT-029
- SP: interno impostabile da operatore su SCADA ed esterno calcolato come descritto in seguito
- CO: posizione valvola TCV-005

FIC-005: regolatore portata acqua di falda

- PV: FT-008, sostituita in caso di guasto dalla somma delle portate dei pozzi di presa (FT-001A + FT-001B + FT-001C + FT-001D + FT-001E + FT-001F)
- SP: solo interno impostabile da operatore su SCADA
- CO: posizione valvola TCV-005

Il regolatore TIC-029 utilizza lo stesso setpoint dei regolatori TIC-016, TIC-017, TIC-018, e TIC-019, che controllano la temperatura in uscita dal lato primario (falda) degli scambiatori dei sistemi frigoriferi. Per una descrizione dettagliata del calcolo del setpoint, si rimanda alla sezione 3.10.4 a pagina 44.

Se il regolatore TT-029 ha sia la misura di processo sia quella sostitutiva invalide, il regolatore viene disattivato e la sua uscita CO forzata al 100% con la parte integrale a zero, e viene generato un allarme su SCADA.

Il regolatore FIC-005 utilizza la stessa PV del regolatore di portata pompe di falda FIC-008, descritto nella sezione 3.10.3 a pagina 42, ma con un setpoint differente. Se la misura di processo del regolatore e tutte le misure di portata che sommate formano la misura sostitutiva risultano invalide per almeno 30 secondi, viene richiesto l'arresto immediato della centrale, poiché la mancanza di misurazioni della portata prelevata dalla falda e scaricata rappresenta una condizione molto pericolosa per l'incapacità di regolare la portata.

3.10.6. Regolazione valvole restituzione acqua di falda

La regolazione della valvola FCV-002 per lo scarico in Olona è abilitata quando viene richiesto l'avvio del gruppo funzionale pompe di falda (in modalità automatica o manuale) e l'allarme di alto livello Olona non è attivo. La valvola viene chiusa in caso di allarme di alto livello Olona o quando il gruppo funzionale pompe di falda viene arrestato e la pompa di falda in prima priorità è ferma. Attualmente, non è stato implementato un regolatore PID per questa valvola, poiché il cliente non ha ancora definito il tipo di regolazione necessario. Pertanto, nella pagina dei parametri su SCADA è stato inserito un riferimento di posizione modificabile dall'operatore, che funge da valore di regolazione fino all'implementazione del regolatore PID.

La valvola MOV-095 per lo scarico dell'acqua di falda nei pozzi di resa si apre automaticamente quando la pompa in prima priorità è in funzione e l'allarme di alto livello Olona è attivo; altrimenti, rimane chiusa.

La regolazione della valvola FCV-003 per lo scarico nel pozzetto di calma per l'irrigazione del parco è abilitata quando la pompa di falda in prima priorità è in funzione, c'è una richiesta di irrigazione e l'allarme di alto livello Olona non è attivo. Questa valvola è controllata automaticamente dal seguente regolatore PID:

FIC-007: regolatore portata scarico acqua di falda per irrigazione parco

- PV: FT-007
- SP: interno impostabile da operatore su SCADA ed esterno calcolato come descritto in seguito
- CO: posizione valvola FCV-003

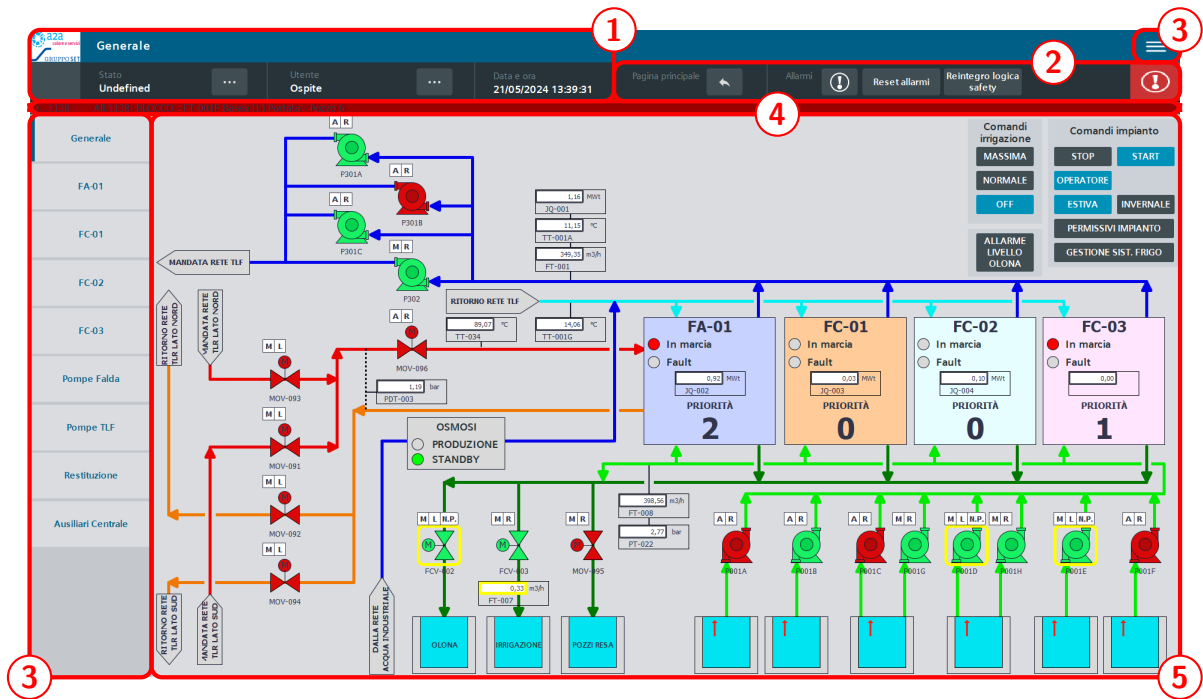


Figura 3.6: Layout delle pagine grafiche sviluppate

Il setpoint esterno del regolatore FIC-007 dipende dalla presenza dell'allarme di alto livello Olona e dalla richiesta di irrigazione:

Richiesta irrigazione attiva: siccome l'acqua viene scaricata nel pozzetto di calma per fini irrigui, il setpoint esterno viene impostato a $288 \text{ m}^3/\text{h}$;

Richiesta massima portata di irrigazione: il setpoint viene impostato a $432 \text{ m}^3/\text{h}$;

Allarme alto livello Olona attivo: siccome l'acqua viene scaricata nei pozzi di resa in questa condizione emergenziale, il setpoint esterno viene impostato a $0 \text{ m}^3/\text{h}$.

Se la misura di processo del regolatore FT-007 risulta invalida, il regolatore viene disattivato e la sua uscita CO forzata al 0%, con la parte integrale azzerata, e viene generato un allarme su SCADA. In questo caso la valvola si chiude, poiché è pericoloso scaricare nel pozzetto senza la capacità di regolare la portata in assenza di una misura affidabile.

3.11. Sistema di supervisione SCADA sviluppato

3.11.1. Layout della pagina

La schermata grafica, come mostrato in figura 3.6, si suddivide nelle sezioni seguenti:

1. informazioni generali;

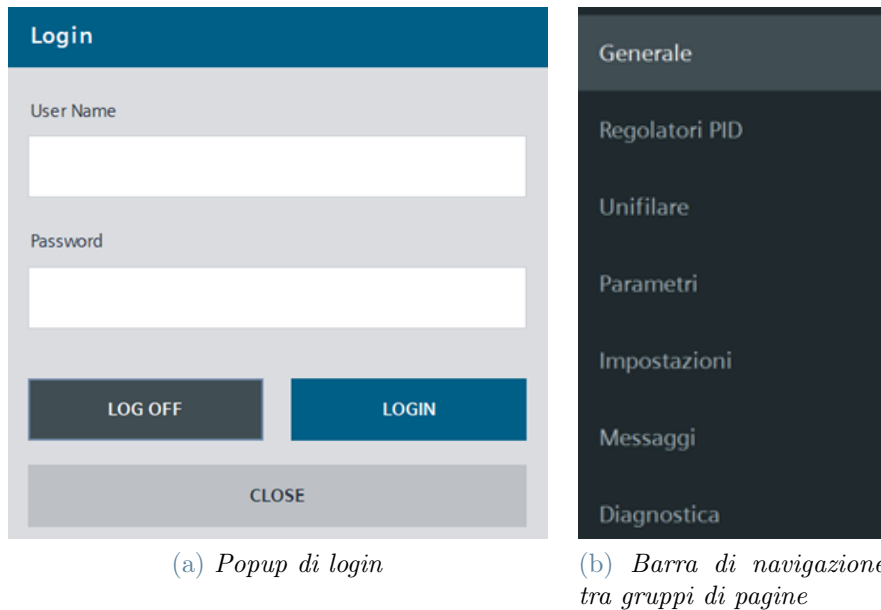


Figura 3.7: Popup di login e barra di navigazione tra gruppi di pagine

2. barra multifunzione;
3. pulsanti di navigazione;
4. barra degli allarmi;
5. sinottico.

Nella sezione *informazioni generali* viene mostrato il titolo del gruppo di pagine, come ad esempio: *Generale, Regolatori PID, Parametri, Impostazioni, Unifilare*. Inoltre, vengono visualizzati data, ora, l'utente attualmente attivo e il pulsante di *login*. Di default, l'utente *ospite* utilizza la supervisione come *operatore*. Cliccando sul pulsante di *login*, è possibile effettuare l'accesso con un altro utente inserendone le credenziali nel popup mostrato in figura 3.7a. Ciascun utente può avere attivi dei permessi differenti, a seconda del livello di accesso assegnato. Il riquadro con la dicitura *stato* e il relativo pulsante sono solo una predisposizione per poter aggiungere funzionalità in futuro.

Nella sezione *barra multifunzione*, in figura 3.6 nella pagina precedente, sono presenti pulsanti che consentono di utilizzare funzionalità comuni tra i vari gruppi di pagine e che quindi sono presenti in tutte le pagine del sistema di supervisione. Il pulsante a forma di freccia permette di tornare a visualizzare la pagina *Generale* da qualsiasi punto della supervisione. Premendo sul pulsante che riporta il simbolo del punto esclamativo, si accede al sistema di registrazione di allarmi e segnalazioni relative all'impianto. Il pulsante *reset allarmi* effettua il riconoscimento globale di tutti gli allarmi attualmente

attivi. In caso scattasse un blocco SIL comandato dalle schede I/O safety del PLC, il pulsante *reintegro logica safety* lampeggia e premendolo si riarmano le logiche safety e si effettua il riconoscimento dello stato di emergenza nel PLC. L'ultimo pulsante a destra in questa vista permette di accedere direttamente alla pagina di diagnostica di sistema.

Utilizzando i pulsanti di navigazione, l'operatore può navigare tra tutte le pagine del sistema SCADA dell'impianto. Il pulsante in alto a destra apre la barra di navigazione principale tra i gruppi di pagine, come mostrato in figura 3.7b nella pagina precedente. Ogni pulsante di questa barra apre la pagina iniziale del gruppo selezionato. Il pulsante evidenziato di colore grigio indica a quale sezione si sta facendo riferimento. A ogni sezione è associato un gruppo di pagine, per cui compariranno a sinistra dello schermo ulteriori pulsanti di navigazione tra le pagine della medesima sezione.

Nella barra degli allarmi viene visualizzato l'allarme o segnalazione più recente che si è verificato nell'impianto. Nel sinottico viene visualizzato il contenuto della pagina selezionata.

3.11.2. Tipici sviluppati per i principali oggetti grafici

Di seguito vengono mostrati gli oggetti principali con cui è possibile interagire:

- pompa;
- valvola;
- ingresso analogico;
- parametro/setpoint;
- interruttore digitale.

Sopra l'icona di pompe, valvole e interruttori digitali, è possibile trovare dei simboli che ne riassumono alcuni stati: *M* per la modalità manuale, *A* per la modalità automatica, *L* per la modalità locale, *R* per la modalità remota, *N.P.* per mancanza permissivi.

Pompa

La pompa è rappresentata nelle pagine grafiche dai simboli mostrati in figura 3.8a nella pagina seguente. Nel sinottico, in prossimità di alcune pompe, è possibile visualizzare la corrente assorbita dal motore, il feedback di velocità e il setpoint di velocità in prossimità dell'icona del motore, come mostrato in figura 3.8b nella pagina successiva.

La convenzione dei colori implementata è la seguente:

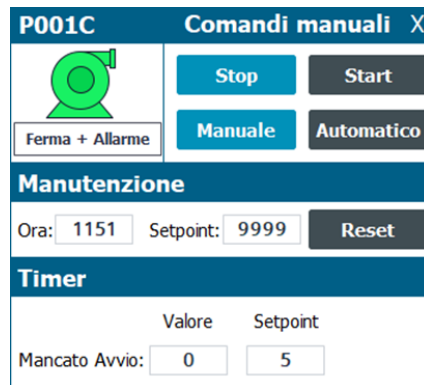
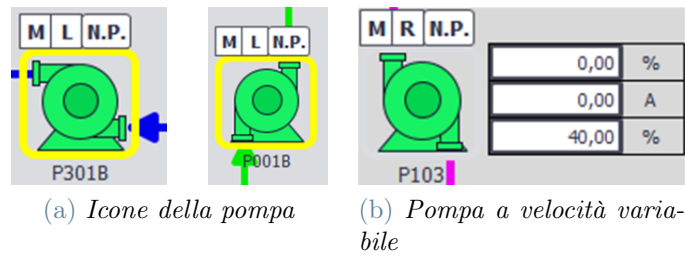


Figura 3.8: Icone e faceplate pompa

corpo verde fisso: motore fermo;

corpo rosso fisso: motore in marcia;

base verde fisso: comando arresto;

base rosso fisso: comando avvio;

rettangolo giallo lampeggiante: in allarme.

Tramite click sinistro sull'icona, si apre la finestra di popup contenente il faceplate relativo all'oggetto, come mostrato in figura 3.8c. Le funzioni principali disponibili da questa vista sono le seguenti:

- impostare la modalità del motore in automatico/manuale;
- dare comandi di marcia/arresto al motore se in modalità manuale;
- impostare un setpoint temporale di ore di servizio prima di generare un allarme di richiesta di manutenzione e visualizzare il cumulativo di ore di servizio e resettarlo;
- impostare un timer che conta il tempo in secondi da quando viene dato il comando di avvio al motore che genera un allarme in caso di mancato avvio del motore e visualizzare il valore attuale del tempo conteggiato.

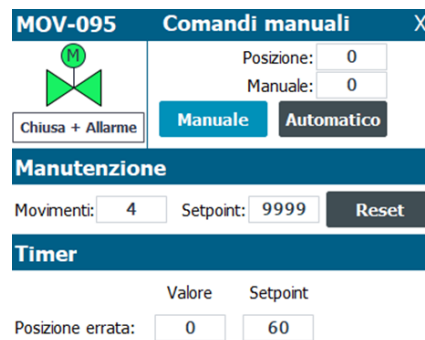
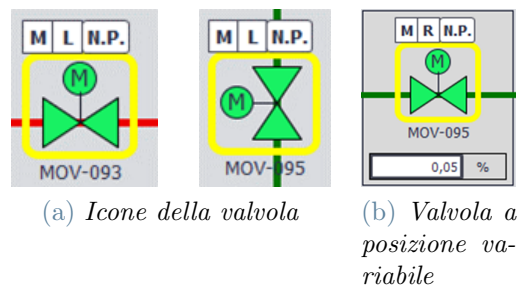


Figura 3.9: Icone e faceplate valvola

Se un motore viene messo in modalità locale tramite il selettore locale/remoto in campo, non è possibile effettuare qualsiasi azione da questo popup finché il selettore in campo rimane su locale. Lo stesso vale anche in caso di blocco, scatto termico, allarme o mancanza permissivi.

Valvola

La valvola è rappresentata nelle pagine grafiche dai simboli mostrati in figura 3.9a. Nel sinottico, è possibile visualizzare il feedback di posizione direttamente in pagina in prossimità dell'icona della valvola, come mostrato in figura 3.9b.

La convenzione dei colori implementata è la seguente:

corpo verde fisso: valvola chiusa;

corpo rosso fisso: valvola aperta;

corpo lampeggiante metà verde metà rosso: in apertura o chiusura;

cerchio verde fisso: comando chiusura;

cerchio rosso fisso: comando apertura;

rettangolo giallo lampeggiante: in allarme.

Tramite click sinistro sull'icona, si apre la finestra di popup contenente il faceplate relativo all'oggetto, come mostrato in figura 3.9c nella pagina precedente. Le funzioni principali disponibili da questa vista sono le seguenti:

- impostare la modalità della valvola in automatico/manuale;
- impostare un setpoint di posizione se in modalità manuale e visualizzarne il feedback, se la valvola è analogica;
- impostare un setpoint di numero di movimenti di servizio prima di generare un allarme di richiesta di manutenzione e visualizzare il cumulativo di movimenti di servizio e resettarlo;
- impostare un timer che conta il tempo in secondi da quando viene dato un comando alla valvola che genera un allarme di posizione errata della valvola in caso di mancato raggiungimento della posizione comandata entro il tempo impostato e visualizzare il valore attuale del tempo conteggiato.

Se una valvola viene messa in modalità locale tramite il selettore locale/remoto in campo, non è possibile effettuare qualsiasi azione da questo popup finché il selettore in campo rimane su locale. Lo stesso vale anche in caso di blocco, scatto termico, allarme o mancanza permissivi.

Ingresso analogico

L'ingresso analogico è rappresentato nelle pagine grafiche dal simbolo mostrato in figura 3.10a a fronte.

La corrispondenza dei colori è la seguente:

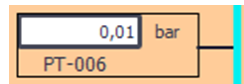
rettangolo giallo lampeggiante: in allarme di superamento soglia bassa (L) o alta (H);

rettangolo rosso lampeggiante: in allarme di superamento soglia bassissima (LL) o altissima (HH);

campo del valore con sfondo grigio: in allarme *broken wire* o valore invalido.

Tramite click sinistro sull'icona, si apre la finestra di popup contenente il faceplate relativo all'oggetto, come mostrato in figura 3.10b nella pagina successiva. Le funzioni principali disponibili da questa vista sono le seguenti:

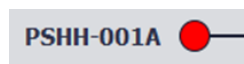
- visualizzare il valore attuale dell'ingresso analogico;
- impostare i valori di scalatura dell'ingresso analogico;



(a) Icona dell'ingresso analogico

PT-006		Soglie		X
0,01	bar	<input type="checkbox"/> High High:	0,00	
Scalatura		<input type="checkbox"/> High:	0,00	
Massimo:	10,00	<input type="checkbox"/> Low:	0,00	
Minimo:	0,00	<input type="checkbox"/> Low Low:	0,00	

(b) Faceplate ingresso analogico



(c) Icona dell'ingresso digitale

Figura 3.10: Icona e faceplate ingresso analogico e icona ingresso digitale

- visualizzare, impostare e abilitare le soglie di allarme della misura: altissimo (HH), alto (H), basso (L) e bassissimo (LL). Il superamento di una soglia di allarme genera una segnalazione o un allarme in supervisione.

Ingresso digitale

L'ingresso digitale è rappresentato nelle pagine grafiche dal simbolo mostrato in figura 3.10c.

La corrispondenza dei colori implementata è la seguente:

verde: condizioni normali;

rosso: segnalazione attiva;

Comando analogico

I comandi analogici inseribili da operatore sono rappresentati nelle pagine grafiche come mostrato nella figura 3.11a nella pagina successiva

Tramite click sinistro sull'icona, si apre la finestra di popup contenente il faceplate relativo all'oggetto, come mostrato in figura 3.11b nella pagina seguente. La funzione principale disponibile da questo popup è quella di visualizzare e modificare il valore attuale del



(a) Icona del comando

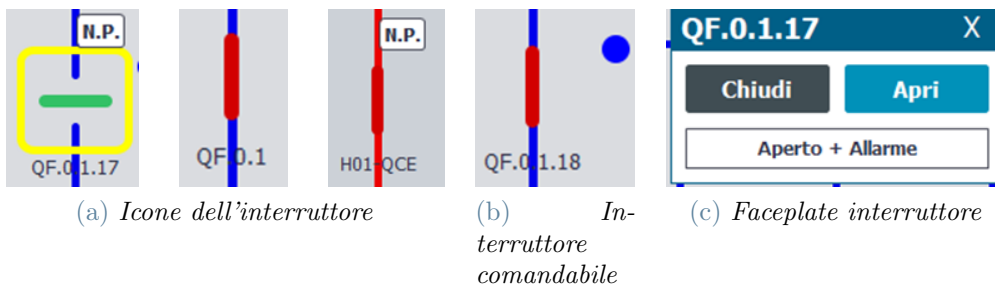


(b) Faceplate comando



(c) Icona del parametro

Figura 3.11: Icona e faceplate comando analogico e icona parametro



(a) Icone dell'interruttore

(b) Interruttore comandabile

(c) Faceplate interruttore

Figura 3.12: Icone e faceplate interruttore

comando analogico. I valori di scalatura dell'uscita analogica sono prefissati nel PLC per richiesta del cliente e quindi non sono impostabili da HMI.

Parametro

I parametri o setpoint inseribili da operatore sono rappresentati nelle pagine grafiche come mostrato in figura 3.11c. Tramite click sinistro è possibile modificare direttamente il valore attuale del parametro.

Interruttore digitale

L'interruttore digitale è rappresentato nelle pagine grafiche dal simbolo mostrato in figura 3.12a.

La corrispondenza dei colori è la seguente:

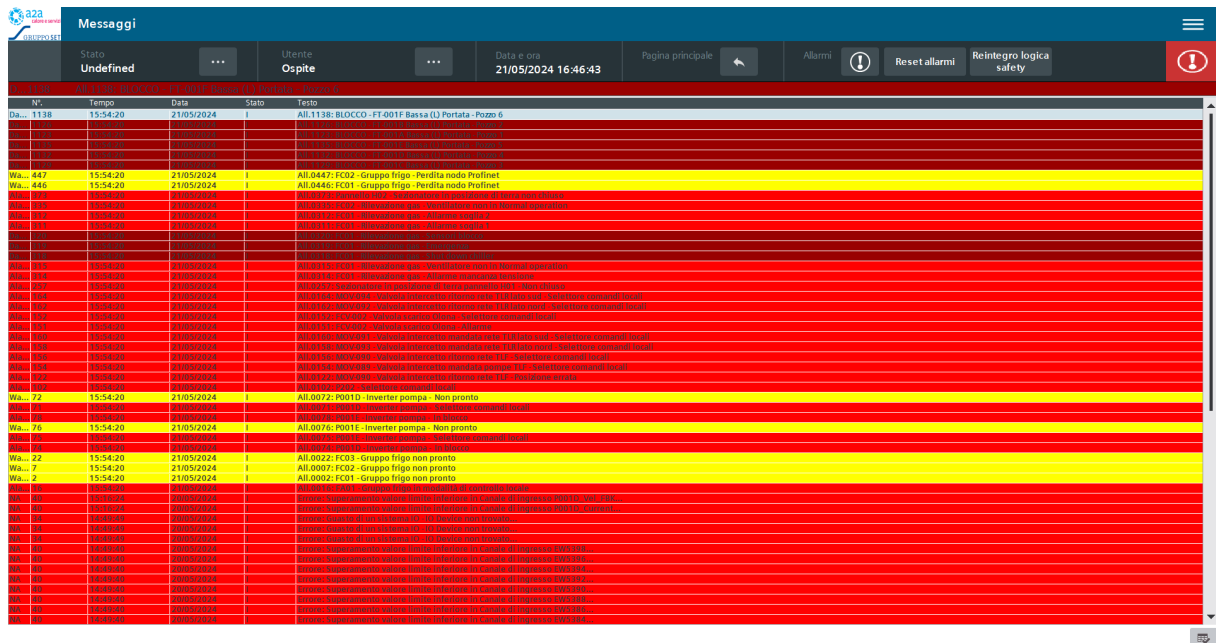


Figura 3.13: Pagina messaggi e allarmi

corpo verde: interruttore aperto;

corpo rosso: interruttore chiuso;

rettangolo verde: comando apertura;

rettangolo rosso: comando chiusura;

rettangolo giallo lampeggiante: scattato o in allarme;

Tramite click sinistro sull'icona, si apre la finestra di popup contenente il faceplate relativo all'oggetto, come mostrato in figura 3.12c nella pagina precedente. La funzione principale disponibile da questo popup è quella di aprire e chiudere l'interruttore e visualizzarne lo stato. Non tutti gli interruttori sono comandabili. Quelli che lo sono possono essere riconoscibili da un cerchio colorato di fianco all'icona dell'interruttore, come mostrato nella figura 3.12b a fronte.

3.11.3. Pagine grafiche implementate

Pagina messaggi e allarmi

Da qualsiasi pagina, premendo sul pulsante contenente il simbolo del punto esclamativo nella barra multifunzione, illustrata nella sezione 3.11.1 a pagina 49, si accede al sistema di registrazione di allarmi, segnalazioni e operazioni dell'impianto.

La corrispondenza dei colori degli allarmi è la seguente:

giallo: segnalazione attiva;

rosso: allarme attivo;

rosso scuro: allarme livello pericolo attivo;

nero: allarme di sistema legato a PLC, SCADA o connessioni;

grigio: operazioni di sistema come login e logout.

Per ogni allarme, sono presenti una serie di informazioni, che comprendono il tipo di segnalazione, il numero identificativo della segnalazione, data e ora, descrizione testuale dell'allarme e stato dell'allarme. Lo stato può assumere più valori: *I* indica un allarme attivo (evento entrante), mentre *U* rappresenta un allarme rientrato (evento uscente); il punto esclamativo rappresenta un allarme non ancora riconosciuto, mentre la spunta rappresenta un allarme già riconosciuto.

Pagina sinottico generale

Quella mostrata in figura A.11a a pagina 88, è la pagina di riferimento per avere una visione d'insieme di tutto l'impianto e del funzionamento attuale del sistema. Sono rappresentati pompe, valvole, sistemi frigoriferi e alcune principali misure analogiche e segnali digitali. È possibile visualizzare anche le priorità assegnate ai sistemi frigo. Da questa pagina è possibile accedere agli altri sinottici di dettaglio delle varie aree funzionali cliccando sull'area dell'impianto interessata oppure utilizzando i pulsanti laterali di navigazione. È possibile avviare e fermare la sequenza automatica della centrale utilizzando i comandi Start/Stop. È presente anche il selettore tra le modalità invernale/estiva. Inoltre, è possibile visualizzare i permissivi all'avvio dell'impianto, come mostrato in figura A.11b a pagina 88, e il dettaglio della gestione sistemi frigoriferi e le relative soglie di inserzione/disinserzione in base alle priorità, mostrato in figura A.11c a pagina 88.

Il popup in figura A.11b a pagina 88, aperto cliccando col tasto sinistro sul pulsante *Permissivi impianto* nel riquadro *Comandi impianto*, mostra i permissivi di avvio della sequenza automatica dell'impianto. Il pulsante di start/stop della sequenza automatica dell'impianto viene abilitato dalla presenza di tutti i permissivi sopracitati, cioè quando diventano tutti verdi e quindi quando il pulsante *permissivi impianto* è illuminato. Il selettore *estiva/invernale* permette di scegliere la modalità di funzionamento dell'impianto. Cliccando su *Gestione sist. Frigo*, si apre il popup in figura A.11c a pagina 88 da cui è possibile visualizzare i parametri della sequenza dei sistemi frigoriferi. In questo sinottico sono presenti anche i comandi di irrigazione, a seconda della richiesta da servire, e un

Parametri sequenza pompe TLF				
	ON		OFF	
	Soglia	Ritardo	Soglia	Ritardo
Priorità 2	500,00 m ³ /h	15 s	400,00 m ³ /h	10 s
Priorità 3	800,00 m ³ /h	15 s	700,00 m ³ /h	10 s
Priorità 4	1000,00 m ³ /h	15 s	900,00 m ³ /h	10 s

(a) *Popup gestione pompe TLF.*

Parametri sequenza pompe falda				
	ON		OFF	
	Soglia	Ritardo	Soglia	Ritardo
Priorità 2	150,00 m ³ /h	15 s	100,00 m ³ /h	10 s
Priorità 3	300,00 m ³ /h	15 s	250,00 m ³ /h	10 s
Priorità 4	400,00 m ³ /h	15 s	350,00 m ³ /h	10 s
Priorità 5	550,00 m ³ /h	15 s	500,00 m ³ /h	10 s
Priorità 6	600,00 m ³ /h	15 s	550,00 m ³ /h	10 s
Priorità 7	700,00 m ³ /h	15 s	650,00 m ³ /h	10 s
Priorità 8	800,00 m ³ /h	15 s	750,00 m ³ /h	10 s

(b) *Popup gestione pompe falda.*

Figura 3.14: Popup gestione pompe TLF e falda.

pulsante che attiva/disattiva l'allarme di alto livello Olona, che è stato inserito in via temporanea dato che non è ancora stato fisicamente montato il livellostato.

Pagine sistemi frigoriferi

Nei sinottici relativi ai sistemi frigoriferi ad assorbimento (FA-01) e a compressione (FC-01, FC-02, FC-03)⁸, mostrati in figura A.12 a pagina 89, è possibile comandare e visualizzare gli stati delle utenze relative al sistema frigorifero di cui è aperta la pagina. Nella sezione a destra della pagina si trovano:

- comandi sequenza sistema frigo e priorità assegnata;
- comandi macchina frigorifera e stato comando di marcia inviato alla macchina e setpoint;
- permissivi per la modalità automatica e per l'avviamento;
- segnali digitali di stato ricevuti dalla macchina frigorifera.

Pagine pompe TLF e falda

Nella pagina pompe TLF mostrata in figura A.13a a pagina 90 è possibile comandare e visualizzare gli stati delle utenze relative al sistema di pompaggio TLF. Nel sinottico si possono trovare i permessivi relativi al sistema di pompaggio della rete TLF. Premendo sul pulsante *gestione pompe TLF* compare il popup mostrato in figura 3.14a nella pagina precedente dove è possibile impostare i parametri della sequenza delle pompe TLF in base alla priorità. Cliccando sul pulsante *JQ-001* è possibile visualizzare ulteriori misure prelevate da un misuratore *Kamstrup*.

Nella pagina pompe falda mostrata in figura A.13b a pagina 90, come per la pagina pompe TLF, è possibile comandare e visualizzare gli stati delle utenze relative al sistema di emungimento acqua di falda. Nel sinottico si possono trovare i permessivi relativi al sistema di pompe di falda. Premendo sul pulsante *gestione pompe falda* compare il popup mostrato in figura 3.14b nella pagina precedente dove è possibile impostare i parametri della sequenza delle pompe di falda in base alla priorità. Anche in questo caso ci sono delle misure aggiuntive che possono essere visualizzate cliccando sui pulsanti relativi ai misuratori FT-001x.

Pagine valvole restituzione e sistemi ausiliari

Nella pagina valvole di restituzione mostrata in figura A.14a a pagina 91 è possibile comandare e visualizzare gli stati delle utenze relative al sistema di valvole di restituzione. Nel sinottico si possono trovare i permessivi relativi al sistema di valvole di restituzione, abilitano la possibilità di avviare la centrale.

Nella pagina ausiliari centrale mostrata in figura A.14b a pagina 91 è possibile comandare e visualizzare gli stati delle utenze ausiliarie della centrale. Nel sinottico si possono trovare:

- comandi di attivazione e disattivazione dell'illuminazione esterna;
- serbatoio sistema trattamento acqua a osmosi e relativo livello;
- soglie di livello impostabili per il comando del sistema di pompaggio dell'impianto di trattamento acqua a osmosi;
- segnali digitali di stato ricevuti dal sistema di trattamento acqua a osmosi;
- pannello di comando ventilatori, dove è possibile metterli in modalità manuale e comandarli manualmente oppure impostarli in modalità automatica per rice-

⁸Si riporta il sinottico di un solo sistema frigorifero a compressione (FC-01), gli altri (FC-02, FC-03) sono identici.

vere comandi automatici sulla base delle soglie di temperatura di attivazione e disattivazione che vengono impostate qui.

Pagine regolatori PID

Le pagine relative ai regolatori PID, illustrate a partire da figura A.15 a pagina 92 in poi, sono formate da due sezioni: una barra a sinistra che permette di navigare tra le varie pagine relative ai regolatori, mentre la parte restante contiene i regolatori dell'area a cui si sta facendo riferimento. In queste pagine è possibile impostare i parametri dei regolatori PID, come il guadagno, il tempo integrale, il tempo derivativo, i limiti minimo e massimo dell'uscita dei PID, l'uscita manuale e il setpoint interno, oltre a visualizzare i valori della variabile di processo, setpoint e uscita di ciascun regolatore PID.

Pagine SCADA elettrico

Queste sono le pagine di riferimento per visualizzare stati e comandi relativi allo SCADA elettrico. Da qui è possibile comandare l'apertura e chiusura di alcuni interruttori e visualizzare vari stati relativi all'impianto elettrico della centrale. Inoltre, nella colonna di sinistra è possibile navigare tra le pagine di questa sezione. Le pagine sono illustrate dalla figura A.18 a pagina 94 in poi.

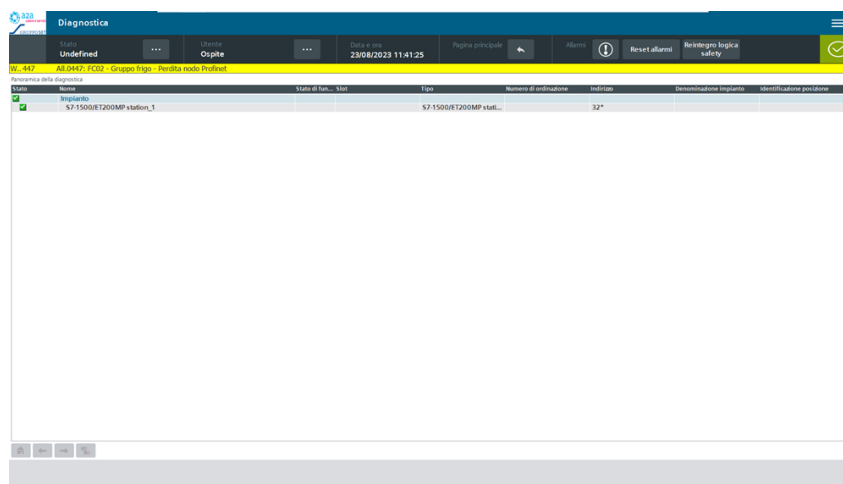
Pagine parametri e impostazioni

La pagina mostrata in figura A.21a a pagina 97 permette di impostare vari parametri che regolano le logiche automatiche. Dalla pagina impostazioni, mostrata in figura A.21b a pagina 97 è possibile:

- resettare i passi delle sequenze automatiche in caso di problemi cliccando sul pulsante *Reset*, che è abilitato solo quando tutte le pompe sono ferme;
- uscire dal *Runtime* grafico della supervisione, cliccando sul pulsante *Esci*;
- gestire gli utenti che possono utilizzare il sistema di supervisione.

Pagina di diagnostica

Nella pagina mostrata in figura 3.15a nella pagina seguente è possibile visualizzare tutti i messaggi di diagnostica relativi al sistema di automazione. È possibile ad esempio visualizzare il buffer di diagnostica della CPU, mostrato in figura 3.15b nella pagina successiva, selezionando la CPU nella lista in questa prima schermata e poi cliccando sull'ultimo pulsante a destra che si trova nella barra in basso.

(a) *Pagina di diagnostica.*

S7-1500/ET200MP station_1 | 49AP2 | Vista del buffer di diagnostica

N°	Data	Tempo	Evento	
1	02/10/2023	11:30:39	Richiesta avviata dal sistema: STOP - CPU passa dallo stato RUN a STOP	✓
2	02/10/2023	11:30:38	Errore temporale (evento di avvio dell'OB) - CPU passa allo stato STOP (nessuna elaborazione OB)	✗
3	02/10/2023	11:30:38	Tempo di ciclo max. disponibile superato - Errore temporale: è richiesto l'avvio dell'OB 80	✗
4	02/10/2023	10:01:40	Richiesta avviata mediante comunicazione: AVVIAMENTO A CALDO - CPU passa dallo stato STOP a AVVIAMENTO a RUN	✓
5	02/10/2023	10:01:40	Richiesta avviata mediante comunicazione: AVVIAMENTO A CALDO - CPU passa dallo stato STOP a AVVIAMENTO	✓
6	02/10/2023	10:01:12	Comunicazione ES/HMI: commutazione stato di funzionamento da Messa a disposizione a sicuro	✓
7	02/10/2023	10:00:36	Stato di funzionamento successivo alla transizione - CPU passa dallo stato STOP (inizializzazione) a STOP	✓
8	02/10/2023	10:00:36	Avviso sui dati a ritenzione: Dati a ritenzione persi - stato di funzionamento CPU attuale: STOP (inizializzazione)	✓
9	02/10/2023	10:00:35	Avviamento - CPU passa dallo stato OFF a STOP (inizializzazione)	✓

(b) *Buffer di diagnostica della CPU del PLC.*

Figura 3.15: Pagina diagnostica e buffer di diagnostica.

4 | Sviluppo, collaudo e messa in servizio

4.1. Descrizione del ciclo di sviluppo

Il ciclo di sviluppo di un software di controllo PLC e di supervisione SCADA comprende diverse fasi principali: progettazione e sviluppo, collaudo e assistenza. Queste fasi possono sovrapporsi, come quando i moduli software vengono testati dopo lo sviluppo ma prima dell'integrazione nel programma completo.

4.1.1. Fase di progettazione e sviluppo

La fase di progettazione inizia con comunicazioni ripetute con il cliente per comprendere le esigenze e ottenere la documentazione tecnica necessaria, come disegni dell'impianto, schemi di processo (P&ID¹), specifiche funzionali dell'automazione e schemi elettrici. Durante questa fase, si valutano soluzioni alternative se le richieste del cliente sono inapplicabili o incomplete, per fornire un prodotto su misura per l'impianto specifico.

La configurazione e programmazione del progetto richiedono documenti come la lista segnali *input/output* (I/O) e la specifica funzionale. Se non forniti dal cliente, questi documenti vengono preparati utilizzando gli schemi elettrici e attraverso incontri con il cliente. Una volta ottenuta la documentazione completa, si procede con la configurazione dell'hardware, inserendo componenti come CPU del PLC, moduli di I/O e il sistema di supervisione, definendo le reti di comunicazione. È fondamentale che la configurazione corrisponda esattamente agli schemi ricevuti per evitare di interrompere l'impianto per caricare la configurazione corretta.

Successivamente, si definiscono le variabili di ingresso e uscita del PLC, assegnando nomi simbolici o *tag*, tipi di dati e commenti per facilitare la comprensione del software. Dopo la

¹*Piping and Instrumentation Diagram* è un disegno meccanico schematico che rappresenta i dettagli di tubazioni, collegamenti meccanici, strumentazione di controllo e misurazione di un impianto, utilizzato per le fasi di progettazione, gestione e manutenzione dell'impianto.

mappatura dei segnali, si sviluppano le logiche di controllo, suddividendo le funzionalità in moduli software riutilizzabili. I moduli più basilari, come quelli per la gestione di motori, valvole e allarmi, vengono testati ripetutamente prima di essere integrati nel software, per garantire la loro corretta funzionalità e per poter escludere che eventuali guasti siano dovuti a un loro malfunzionamento.

Parallelamente, si sviluppano le pagine grafiche SCADA per facilitare il collaudo delle logiche implementate. Durante tutto il ciclo di sviluppo, si stende anche la documentazione di progetto, includendo la specifica hardware, i diagrammi di flusso delle logiche, la specifica funzionale e un manuale d'uso per gli operatori.

Durante la fase di sviluppo, vengono eseguiti dei test preliminari per collaudare i moduli software prima di implementarli. Una volta completato lo sviluppo, viene redatto un documento che rappresenta il protocollo di collaudo che elenca le prove da effettuare per verificare che il software soddisfi le specifiche iniziali. Questo protocollo viene firmato dalle parti coinvolte per confermare la conformità o indicare modifiche necessarie.

In sintesi, i documenti prodotti al termine dello sviluppo includono:

- lista I/O di tutti i segnali cablati;
- specifica hardware;
- specifica di comunicazione in caso ci sia scambio dati con protocolli come Profinet o Modbus;
- specifica funzionale che descrive le logiche implementate;
- manuale d'uso che illustra le pagine grafiche SCADA per l'operatore;
- protocollo di collaudo che descrive le prove da effettuare.

4.1.2. Fase di collaudo e messa in servizio

Una volta completato lo sviluppo, si entra nella fase di collaudo, necessaria per verificare il corretto funzionamento del software nella sua interezza e prepararlo per l'implementazione finale. Il collaudo preliminare inizia in ufficio con la simulazione del software utilizzando una funzionalità del *TIA Portal* denominata *PLCsim*, che permette di simulare l'esecuzione del codice del PLC su un computer. Questo passaggio è essenziale per identificare e correggere eventuali errori prima di caricare il software nel PLC reale. Durante questa fase, si verificano tutte le funzionalità implementate per assicurarsi che rispondano alle specifiche funzionali concordate con il cliente.

Completata la simulazione, si procede con il *Factory Acceptance Test* (FAT), che può essere eseguito anche in simulazione. Questo test viene condotto alla presenza del cliente seguendo un protocollo di collaudo dettagliato che illustra tutte le operazioni da eseguire. Il FAT serve a confermare ufficialmente che il software soddisfi i requisiti stabiliti e che non vi siano errori significativi. Durante il test, ogni operazione viene documentata e i risultati vengono annotati per eventuali correzioni. Al termine, il documento di collaudo viene firmato dal cliente e dal produttore del software per certificare l'accettazione preliminare.

Successivamente, si passa alla messa in servizio sul campo. Questa fase inizia con il caricamento del software nel PLC dell'impianto e la verifica della configurazione hardware per assicurarsi che corrisponda ai parametri di progetto. Si controllano anche le reti di comunicazione per garantirne la corretta configurazione. Eventuali errori di collegamento vengono corretti in loco. Il test dei segnali di ingresso e uscita (I/O) viene condotto in collaborazione con gli elettricisti. Si verifica che tutti i segnali digitali e analogici siano correttamente acquisiti e comandati dal PLC, correggendo eventuali discrepanze di cablaggio, in modo da garantire che ogni segnale sia indirizzato correttamente.

Una volta completati i test I/O, si passa al sistema di supervisione SCADA. Si testano i selettori delle modalità manuale/automatica, la navigazione tra le pagine grafiche e la gestione delle segnalazioni e degli allarmi, per verificare che il sistema di supervisione funzioni correttamente e che le informazioni visualizzate siano accurate. Successivamente, si eseguono i test manuali dei dispositivi. Questo include l'avvio e l'arresto delle pompe, l'apertura e la chiusura delle valvole, e la verifica dei comandi e dei feedback di velocità e posizione per assicurarsi che i dispositivi rispondano correttamente ai comandi manuali e forniscano feedback accurati.

Il *Site Acceptance Test* (SAT) è una fase del collaudo eseguita direttamente in impianto. Durante il SAT, si testano le sequenze automatiche e le logiche di controllo per confermare che l'impianto funzioni correttamente in modalità automatica. Si verifica che tutte le specifiche progettuali siano soddisfatte e che l'impianto risponda adeguatamente alle condizioni operative. Dopo la messa in servizio, si può offrire assistenza continua per risolvere eventuali problemi operativi e per aggiornare il software secondo le esigenze del cliente, per assicurare un funzionamento ottimale dell'impianto e un supporto continuo per eventuali miglioramenti o modifiche necessarie.

4.2. Descrizione delle principali prove di collaudo

Di seguito vengono descritte in dettaglio le principali prove effettuate per il collaudo del software, con l'obiettivo di garantire che il sistema di automazione dell'impianto soddisfi

pienamente i requisiti e le specifiche del cliente.

È stata verificata la conformità delle pagine grafiche del sistema ai diagrammi P&ID di riferimento, insieme alla corretta navigazione tra le pagine, per assicurare che l'interfaccia utente rifletta accuratamente le specifiche di progetto e consenta una navigazione intuitiva e priva di errori. Per verificare il corretto funzionamento del sistema di gestione degli allarmi, si è generata una condizione di allarme per controllare sul sistema di supervisione la corrispondenza del testo e della classe dell'allarme, compresa la colorazione. Sono stati inoltre effettuati il riconoscimento dell'allarme e la verifica della sua persistenza, seguiti dalla rimozione della condizione di allarme per assicurarsi che scompaia dal sistema di supervisione.

È stato verificato il funzionamento delle logiche e degli interblocchi di sicurezza relativi alle catene classificate SIL2, nonché la congruenza del software con la matrice causa-effetti, per prevenire condizioni di pericolo e assicurare che tutti gli interblocchi funzionino correttamente. Sono stati esaminati i permissivi necessari per l'avvio della centrale, garantendo che la centrale possa essere avviata solo quando tutte le condizioni di sicurezza e operatività sono soddisfatte, prevenendo avvii non autorizzati o non sicuri. È stato verificato il corretto funzionamento della sequenza di avvio e arresto della centrale, assicurandosi che il software fosse conforme alle specifiche funzionali, per garantire che le operazioni di avvio e arresto avvengano in modo sicuro e coordinato.

La verifica del sistema di pompaggio TLF ha incluso l'esame del corretto funzionamento e della congruenza del software con le specifiche funzionali, in particolare la gestione delle priorità delle pompe, i permissivi alla modalità di controllo automatico, la gestione di inserzione delle pompe, l'avvio e la regolazione tramite PID delle pompe, e la regolazione tramite PID della valvola PCV-001. Per i sistemi frigoriferi, sono state verificate la gestione delle priorità, i permissivi alla modalità di controllo automatico, la gestione di inserzione, l'avvio e l'arresto automatico di ciascuno.

È stato verificato il funzionamento del circuito di condensazione, esaminando la gestione delle priorità, i permissivi alla modalità di controllo automatico, la gestione di inserzione, l'avvio, l'arresto automatico e la regolazione delle pompe di falda. È stata controllata la regolazione della valvola TCV-005, il calcolo dei setpoint dei regolatori PID relativi all'area funzionale, e la regolazione della valvola FCV-002, per assicurare il corretto funzionamento del circuito di condensazione e mantenere i parametri operativi entro i limiti stabiliti.

Si è esaminato il corretto funzionamento e la congruenza del software con le specifiche funzionali per la gestione delle misure di scarsa qualità o invalide, garantendo che il sistema gestisca correttamente la perdita delle misure di processo dovuta a problemi di

cablaggio, sensori o canali di ingresso nei moduli I/O del PLC, prevenendo errori operativi e mantenendo l'affidabilità del sistema di controllo.

5 | Conclusioni

Il presente lavoro di tesi ha esaminato e sviluppato un sistema di controllo per una centrale di teleraffrescamento, utilizzando PLC e SCADA. L'obiettivo principale è stato quello di progettare e implementare un sistema automatizzato che garantisca un funzionamento efficiente, sicuro e affidabile dell'impianto, rispondendo alle esigenze specifiche del nuovo quartiere SeiMilano.

Il sistema di controllo è stato progettato con una robusta architettura hardware e software, in grado di gestire i vari componenti dell'impianto. L'architettura include UN PLC per il controllo diretto dei processi e un sistema SCADA per la supervisione e il monitoraggio in tempo reale.

Sono stati definiti e implementati vari gruppi funzionali, ciascuno dedicato a una specifica area dell'impianto:

Sistemi di pompaggio TLF: controllo delle pompe, gestione delle priorità, avvio e arresto automatico e regolazione tramite PID;

Sistemi frigoriferi: implementazione delle logiche di controllo per l'inserzione, l'avvio e l'arresto dei sistemi frigoriferi, assicurando il mantenimento delle condizioni operative ottimali;

Circuito di condensazione: gestione delle pompe di falda e delle valvole di regolazione per mantenere i parametri di funzionamento entro i limiti stabiliti.

Particolare attenzione è stata dedicata agli aspetti di sicurezza, con la verifica delle logiche di interblocco e dei permissivi necessari per l'avvio sicuro della centrale. Il sistema è stato progettato per prevenire condizioni di pericolo, garantendo che tutti gli interblocchi funzionino correttamente e che il software sia conforme alle specifiche funzionali.

Il sistema SCADA sviluppato offre un'interfaccia grafica intuitiva per gli operatori, con pagine sinottiche che rappresentano in modo chiaro e dettagliato lo stato operativo dell'impianto. Questo consente un monitoraggio efficace e una gestione tempestiva degli eventi critici.

Il progetto ha dimostrato l'efficacia delle tecnologie di automazione nel migliorare la gestione degli impianti di teleraffrescamento. L'implementazione di un sistema di controllo avanzato ha permesso di ottimizzare le operazioni, riducendo i consumi energetici e migliorando la sostenibilità ambientale dell'impianto.

Tuttavia, è importante sottolineare che l'impianto non è ancora completo al 100%. Di conseguenza, alcune parti del software e delle pagine SCADA sono ancora incomplete. Questo stato di incompletezza riflette le varie aggiunte e modifiche che sono state apportate nel corso del tempo, spesso in momenti successivi e distanti tra loro, il che ha reso difficile mantenere una coerenza e uno standard uniforme nella filosofia di programmazione e nella progettazione delle pagine grafiche.

La gestione e l'integrazione di questi aggiornamenti hanno richiesto un notevole sforzo di coordinamento e adattamento, per garantire che tutte le componenti del sistema funzionino in armonia. Nonostante queste sfide, l'impianto è attualmente in marcia e sta servendo efficacemente le abitazioni e gli uffici del nuovo quartiere SeiMilano. Il successo operativo dell'impianto è visibile dal fatto che esso è a regime e sta funzionando come previsto, fornendo i servizi necessari ai residenti e alle strutture del quartiere.

In sintesi, sebbene ci siano ancora degli aspetti da completare e migliorare, il progetto ha raggiunto un livello di operatività che dimostra la sua validità e funzionalità. Il continuo sviluppo e perfezionamento del sistema contribuiranno ulteriormente a garantire l'efficienza e la sostenibilità del servizio di teleraffrescamento, consolidando l'impegno verso soluzioni innovative e rispettose dell'ambiente.

Per il futuro, si suggerisce di esplorare ulteriori miglioramenti e ottimizzazioni del sistema:

Integrazione con tecnologie IoT: implementazione di sensori IoT per un monitoraggio ancora più dettagliato e una gestione predittiva delle manutenzioni;

Analisi dei dati: utilizzo di algoritmi di apprendimento automatico per analizzare i dati operativi e identificare pattern di efficienza energetica;

Espansione del sistema: estensione del sistema di controllo ad altre aree funzionali dell'impianto, inclusi eventuali ampliamenti futuri del quartiere SeiMilano.

In conclusione, il lavoro svolto rappresenta un passo significativo verso l'automazione degli impianti di teleraffrescamento, contribuendo allo sviluppo di soluzioni energetiche sostenibili e all'avanguardia.

Bibliografia

- [1] A2A Calore e Servizi s.r.l. Relazione illustrativa nuova centrale e relative reti tele-riscaldamento – teleraffrescamento per lottizzazione SeiMilano. Documento interno, 2021.
- [2] A2A S.p.A. Il termovalorizzatore di Silla 2. <https://www.gruppoa2a.it/it/chi-siamo/nostri-impianti/ciclo-rifiuti/termovalorizzatori/termovalorizzatore-milano-silla2>, 2024. Online, visitato: 26/05/2024.
- [3] Associazione Italiana Riscaldamento Urbano. District heating (and cooling)? Milano dice ancora sì! <https://www.airu.it/district-heating-and-cooling-milano-dice-ancora-si/>, 2024. Online, visitato: 26/05/2024.
- [4] automazione-plc.it. I plc di sicurezza per l'automazione industriale (safety plc), 2024. URL <https://automazione-plc.it/plc-sicurezza.html>. Online, visitato: 02/06/2024.
- [5] Elisa Guelpa, Marco Badami, Stefano Caldarone, Andrea Carpignano, Manfredi Neri, Vittorio Verda. Studio relativo a reti di teleraffrescamento e reti neutre per il riscaldamento a bassa temperatura e il raffrescamento. Technical Report RdS/PTR2020/145, ENEA, Apr. 2021. URL https://www2.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/adp-mise-enea-2019-2021/tecnologie-efficienza-risparmio-edifici/report-rds_ptr_2020_145.pdf. Online, visitato: 10/06/2024.
- [6] Euroheat. Possibilities with more district cooling in europe, 2021. URL https://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/sites/iee-projects/files/projects/documents/ecoheatcool_more_district_cooling_in_europe.pdf.
- [7] Executive Agency for Small and Medium-sized Enterprises (European Commission). Overview of support activities and projects of the european commission on energy efficiency and renewable energy in the heating and cooling sector. Technical report, Publication Office of the European Union, Luxembourg, 2016.

- [8] I. Dincer, A. Abu-Rayash. *Community energy systems*. 2020.
- [9] International Energy Agency. The future of cooling. Technical report, 2018.
- [10] International Energy Agency. Cooling report, 2021. URL <https://www.iea.org/reports/cooling>.
- [11] Lucia Lo Caso. Energetic and economic analysis of possible solutions for chilled water production to serve a district cooling network. Tesi di laurea magistrale in energy engineering (ingegneria energetica), Politecnico di Milano, 2023.
- [12] S. Buffa, M. Cozzini, M. D'Antoni, M. Baratieri, R. Fedrizzi. 5th generation district heating and cooling systems: A review of existing cases in europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 104, 2019.
- [13] Siemens AG. *SCALANCE X-200 Configuration Manual*. Siemens AG, Division Process Industries and Drives, Nürnberg, Germany, 2016. URL https://cache.industry.siemens.com/dl/files/376/109744376/att_907659/v1/PH_SCALANCE-X-200_76.pdf. C79000-G8976-C285-08, Online, visitato: 02/06/2024.
- [14] Strategy&. Increased adoption of district cooling could save us\$1 trillion in energy costs worldwide, 2021. URL <https://www.strategyand.pwc.com/m1/en/press-releases/increased-adoption-of-district-cooling.html#:~:text=We%20estimate%20that%20worldwide%2C%20increased,are%20%240.20%20per%20kilowatt%2Dhour>.
- [15] United Nations Publications. *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision*. UN, 2019. ISBN 9789211483192. URL <https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-Report.pdf>.
- [16] Wikipedia. Safety integrity level, 2023. URL https://en.wikipedia.org/wiki/Safety_integrity_level. Online, visitato: 02/06/2024.
- [17] Wikipedia. Modbus, 2024. URL <https://en.wikipedia.org/wiki/Modbus>. Online, visitato: 02/06/2024.
- [18] Wikipedia. Profinet, 2024. URL <https://en.wikipedia.org/wiki/Profinet>. Online, visitato: 02/06/2024.
- [19] Wikipedia. Royalty-free, 2024. URL <https://en.wikipedia.org/wiki/Royalty-free>. Online, visitato: 02/06/2024.

- [20] Wikipedia. Functional safety, 2024. URL https://en.wikipedia.org/wiki/Functional_safety. Online, visitato: 02/06/2024.

A | Figure di grandi dimensioni

In questa appendice si riportano le figure di grandi dimensioni per evitare di interrompere il flusso di lettura del documento.

A.1. Layout e P&ID della centrale

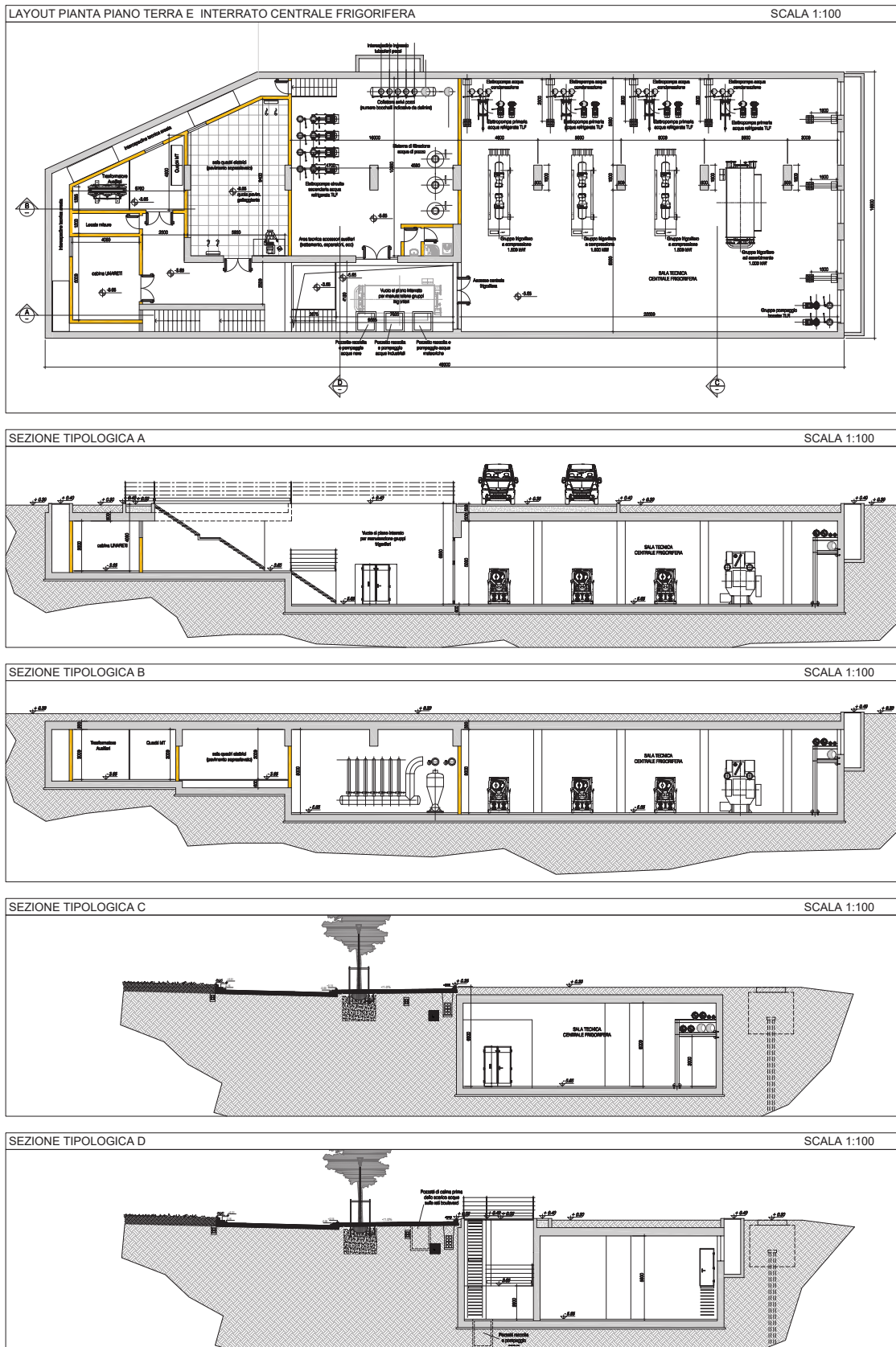


Figura A.1: Layout interno della centrale (nord verso sinistra nella vista dall'alto)

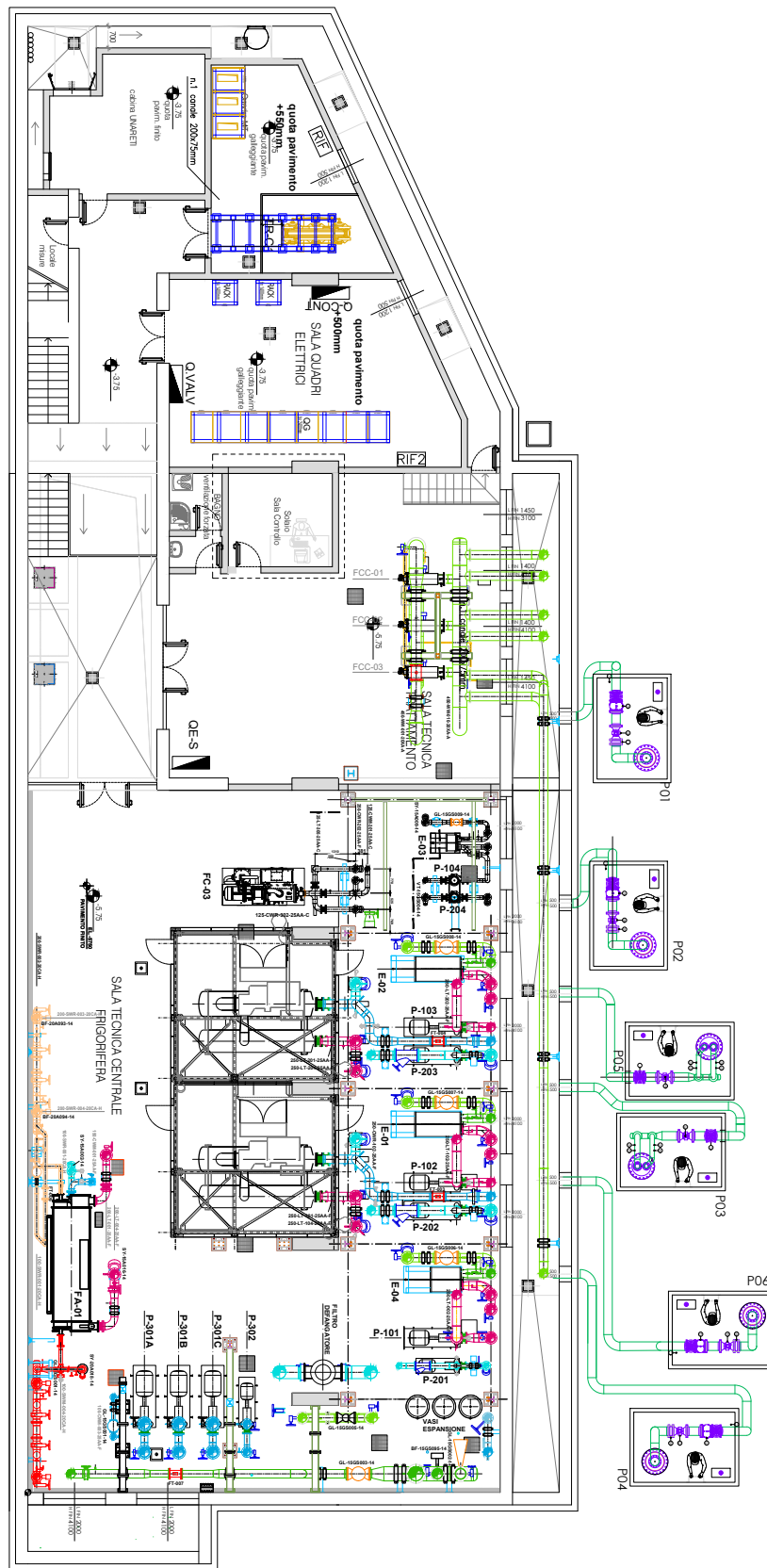


Figura A.2: Planimetria interna della centrale (nord verso l'alto)

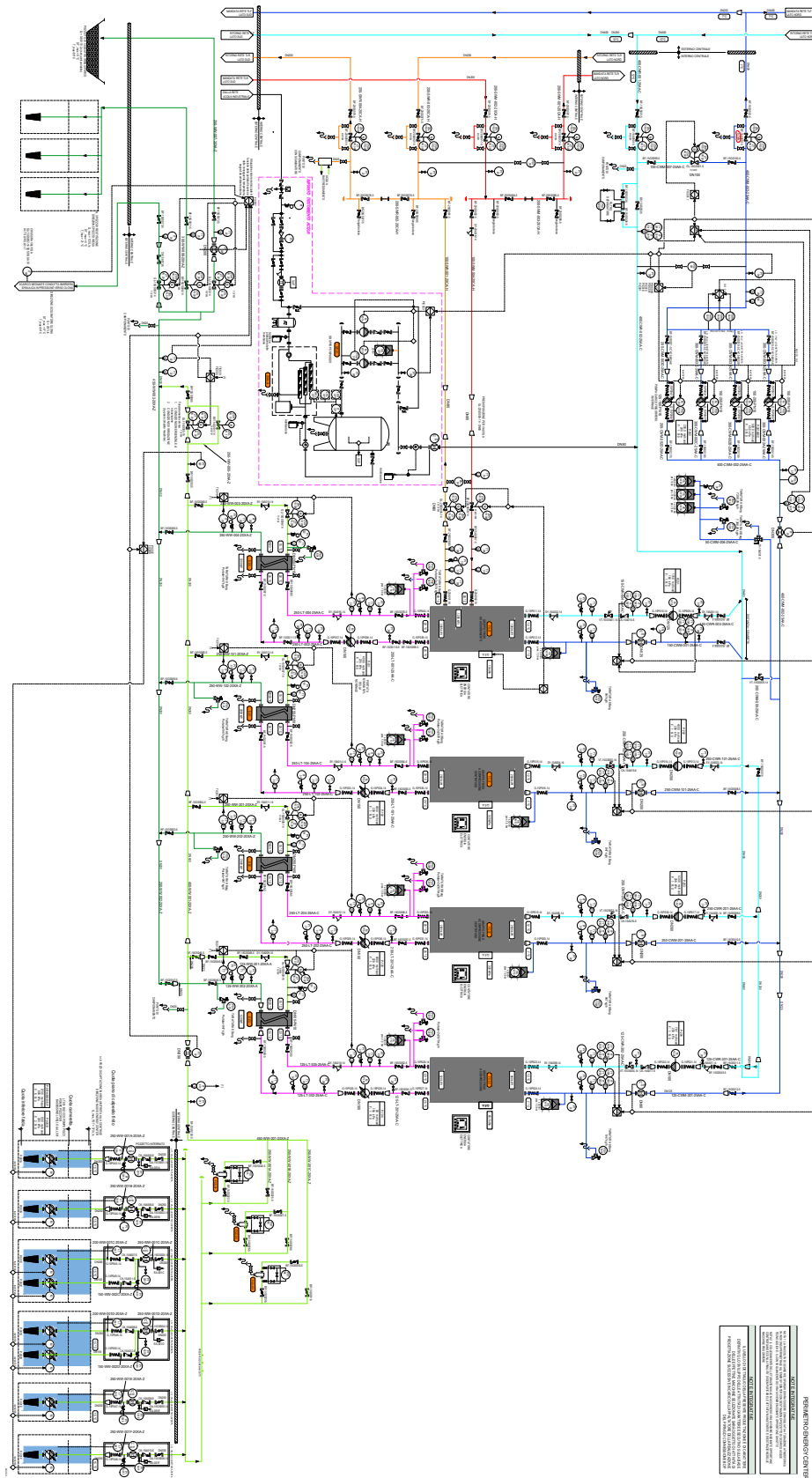


Figura A.3: P&ID della centrale

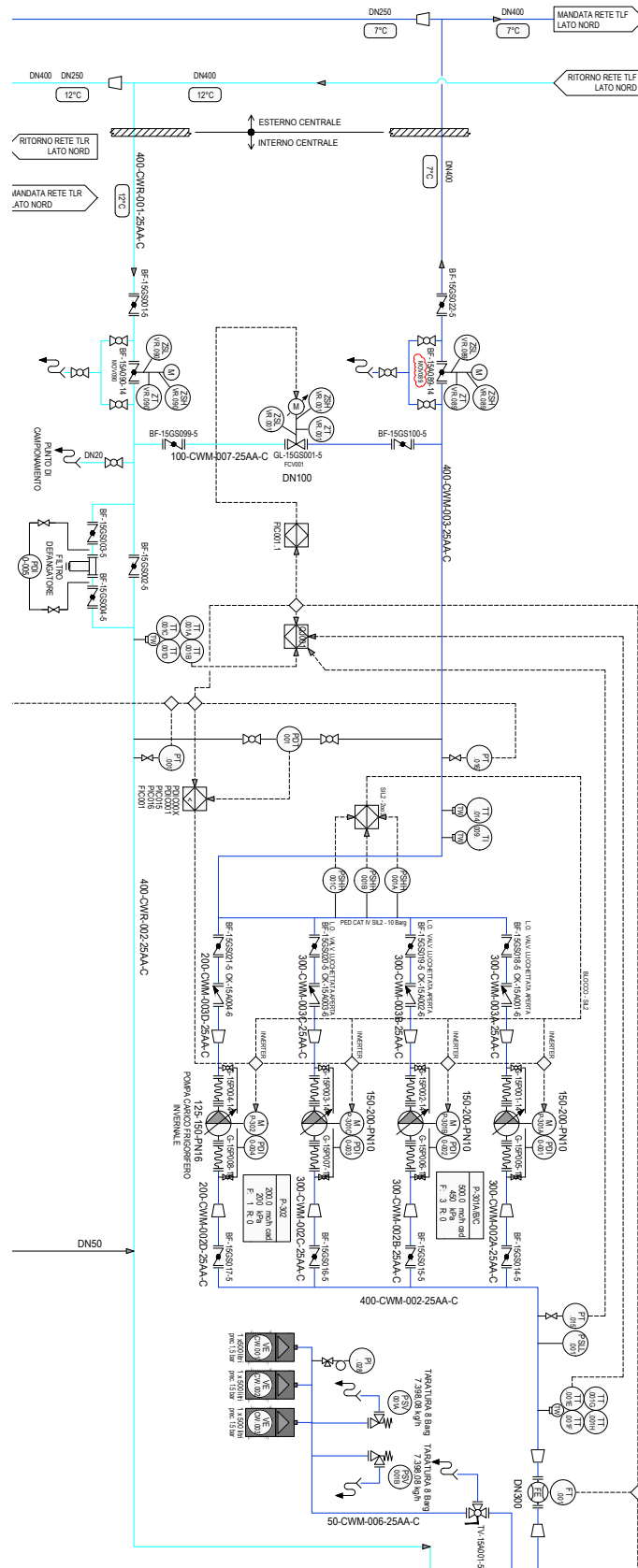


Figura A.4: Estratto del P&ID che mostra il gruppo funzionale pompaggio TLF

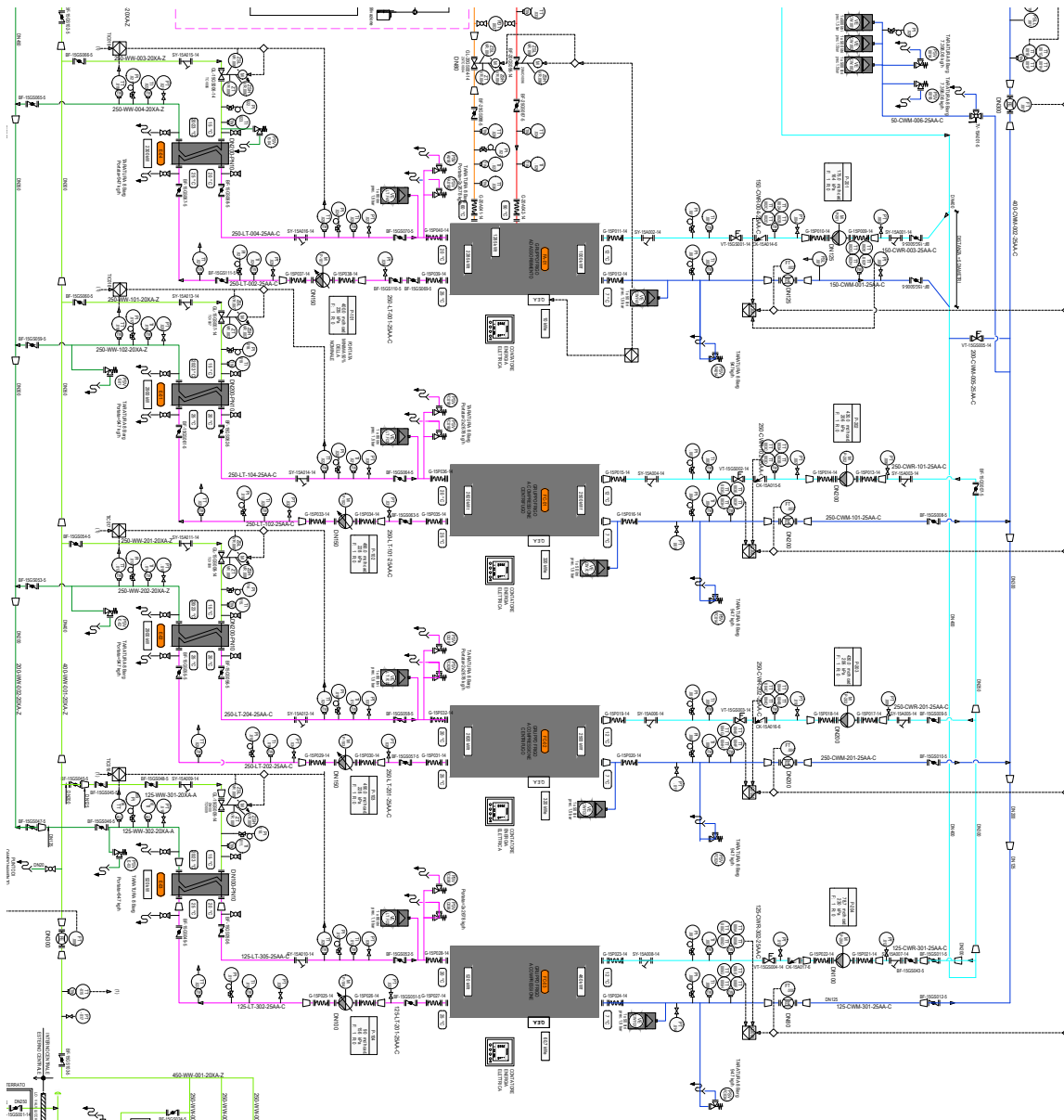


Figura A.5: Estratto del P&ID che mostra i sistemi frigoriferi

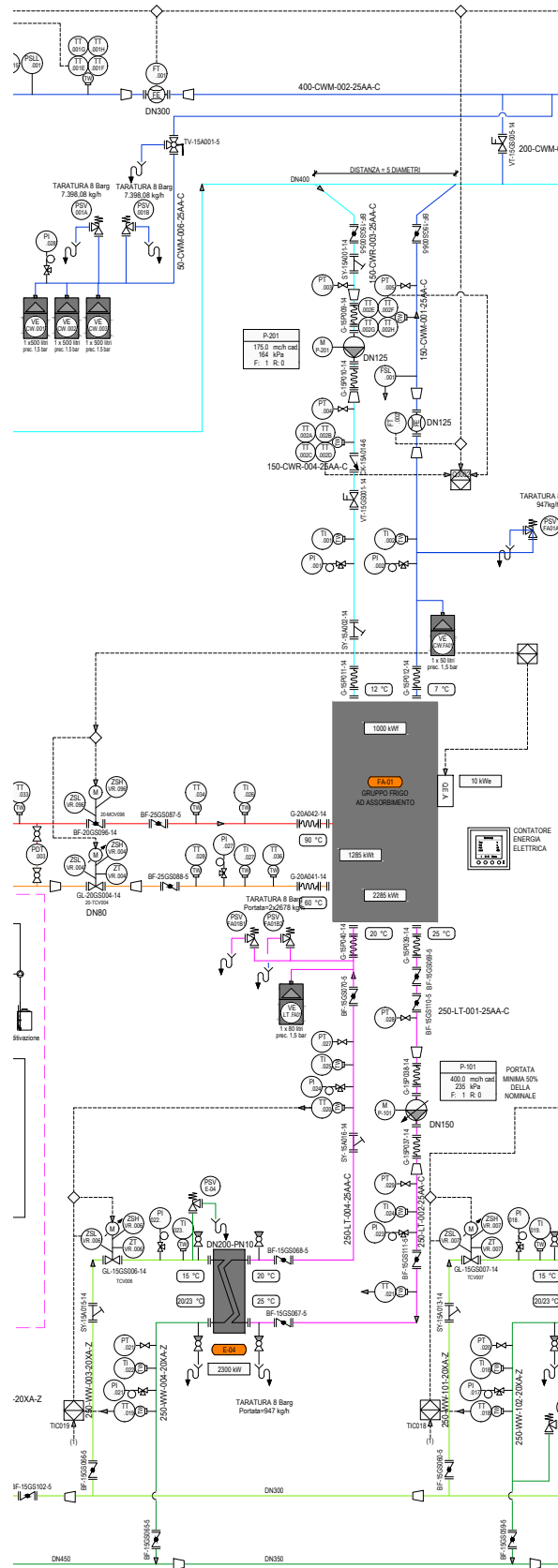


Figura A.6: Estratto del P&ID che mostra il sistema frigorifero ad assorbimento FA-01

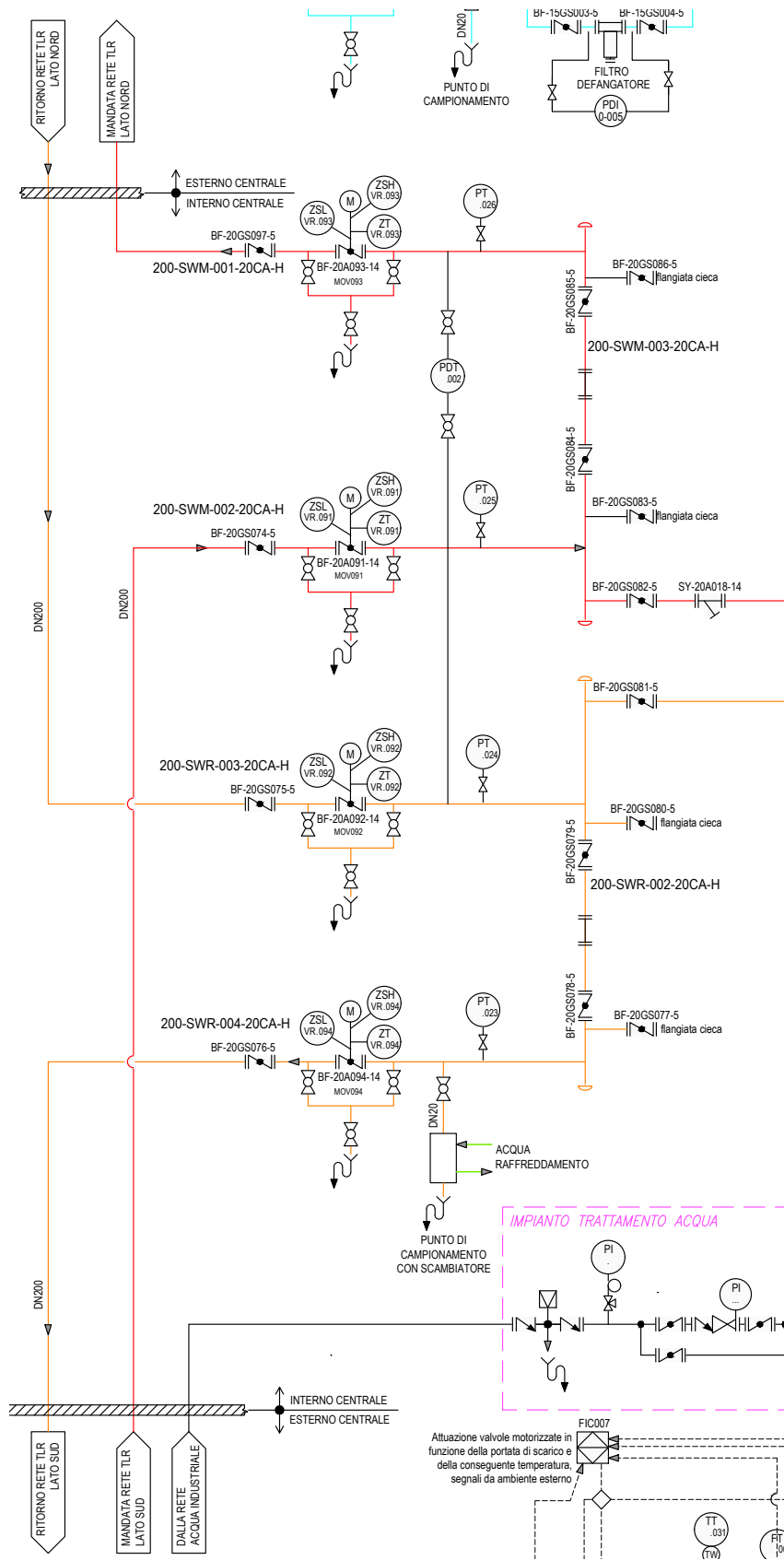


Figura A.7: Estratto del P&ID che mostra le valvole TLR del sistema frigorifero FA-01

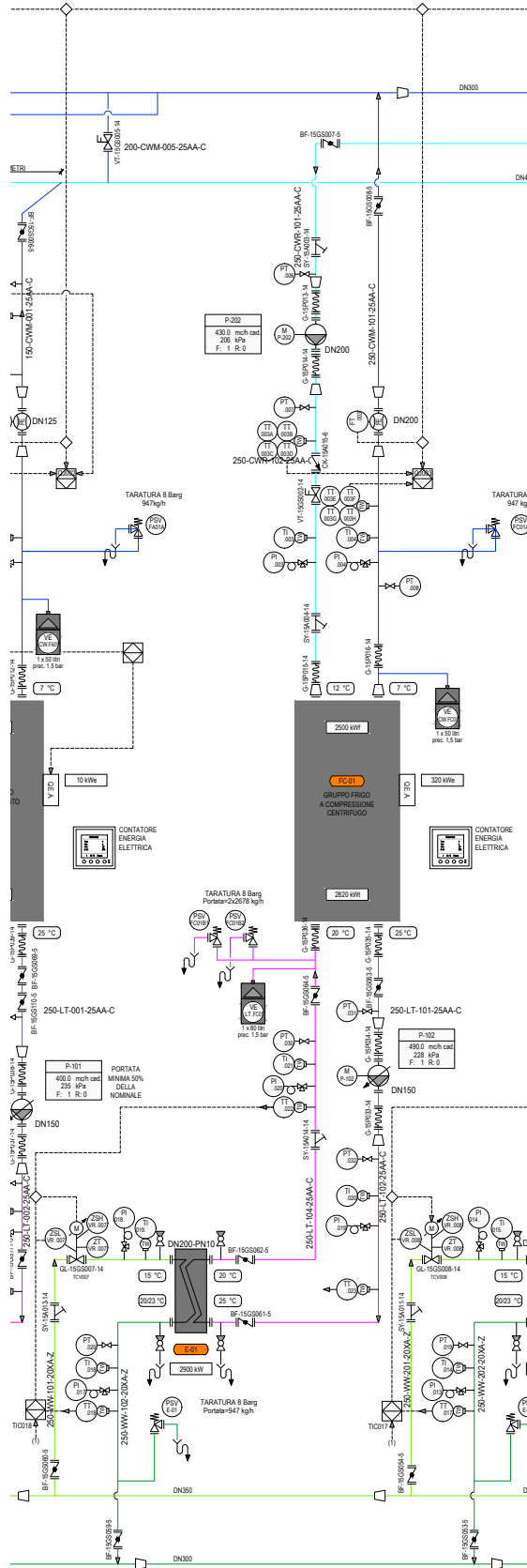


Figura A.8: Estratto del P&ID che mostra un sistema frigorifero a compressione (FC-01)

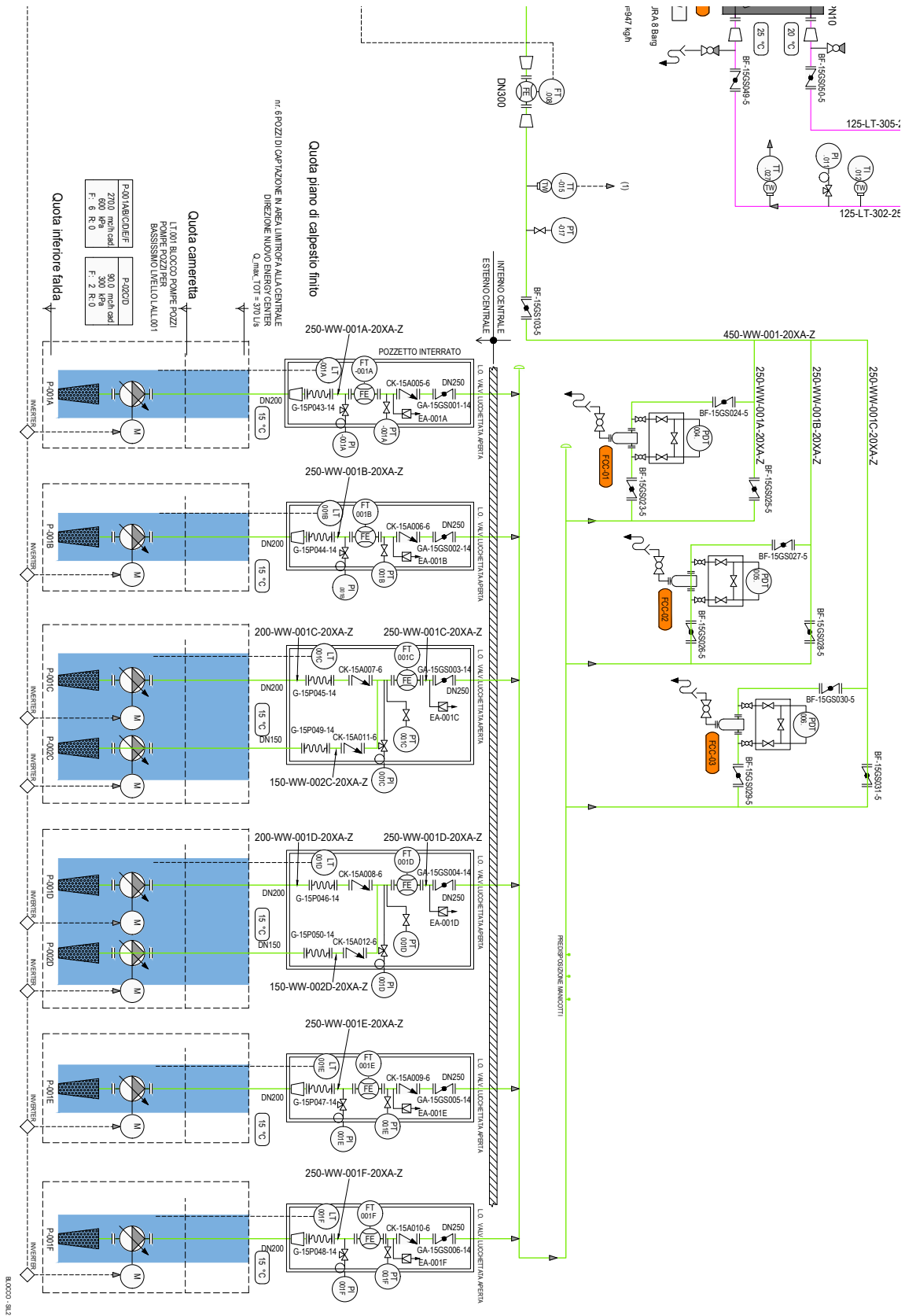
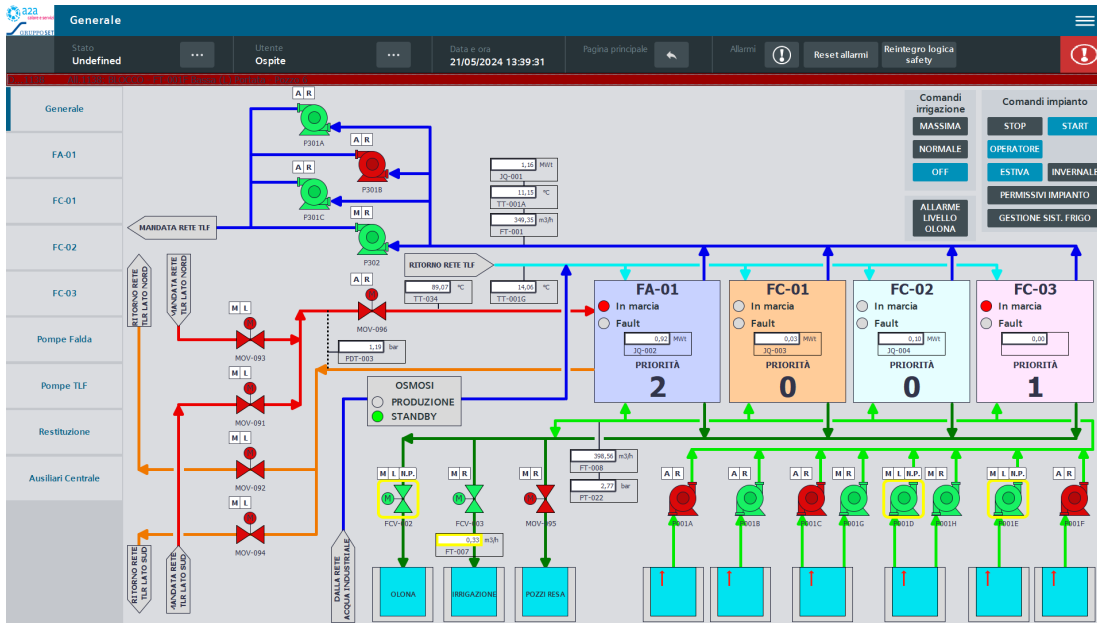


Figura A.9: Estratto del P&ID che mostra il gruppo funzionale pompaggio falda

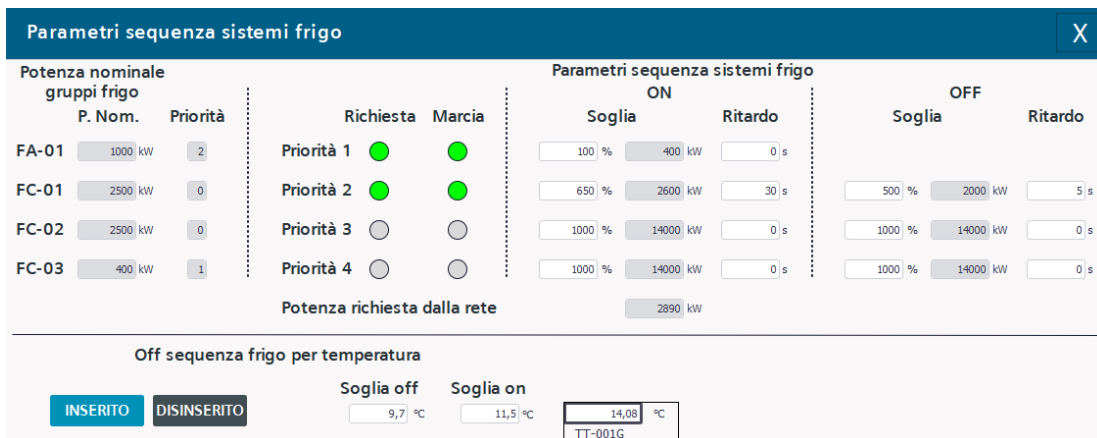
A.2. Pagine grafiche dello SCADA



(a) Pagina sinottico generale.

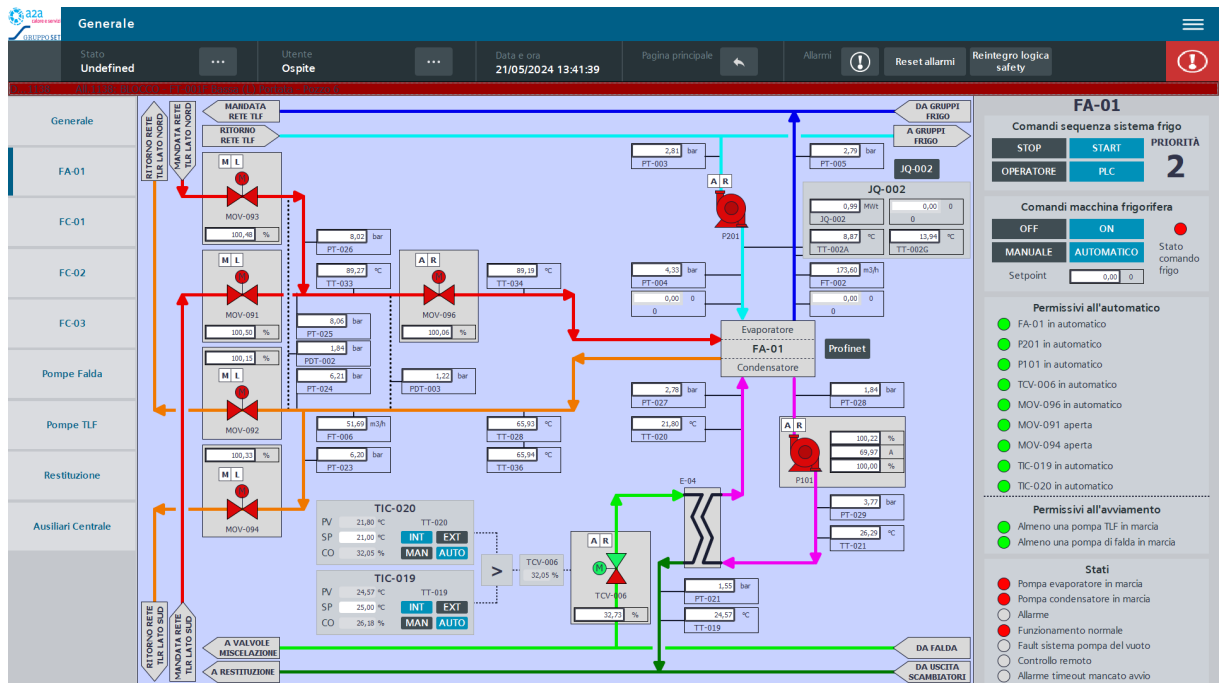


(b) Popup che mostra i permissivi di avvio centrale.

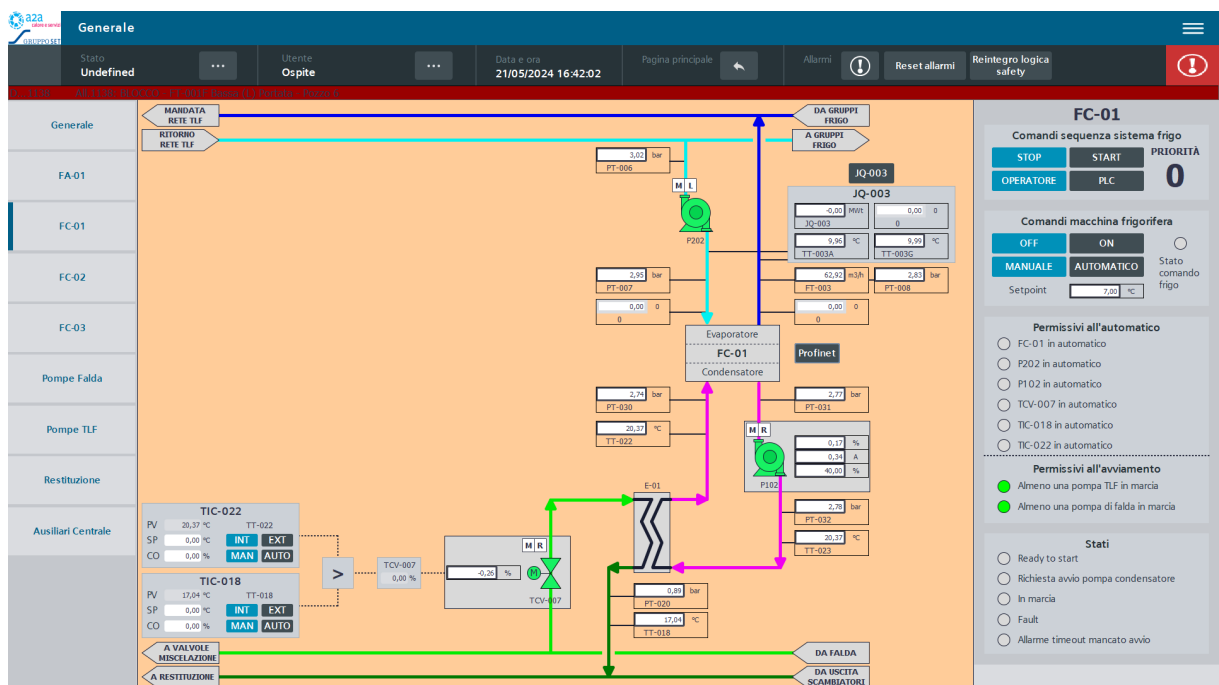


(c) Popup per la gestione dei sistemi frigoriferi

Figura A.11: Sinottico generale, popup permissivi impianto e gestione sistemi frigoriferi.

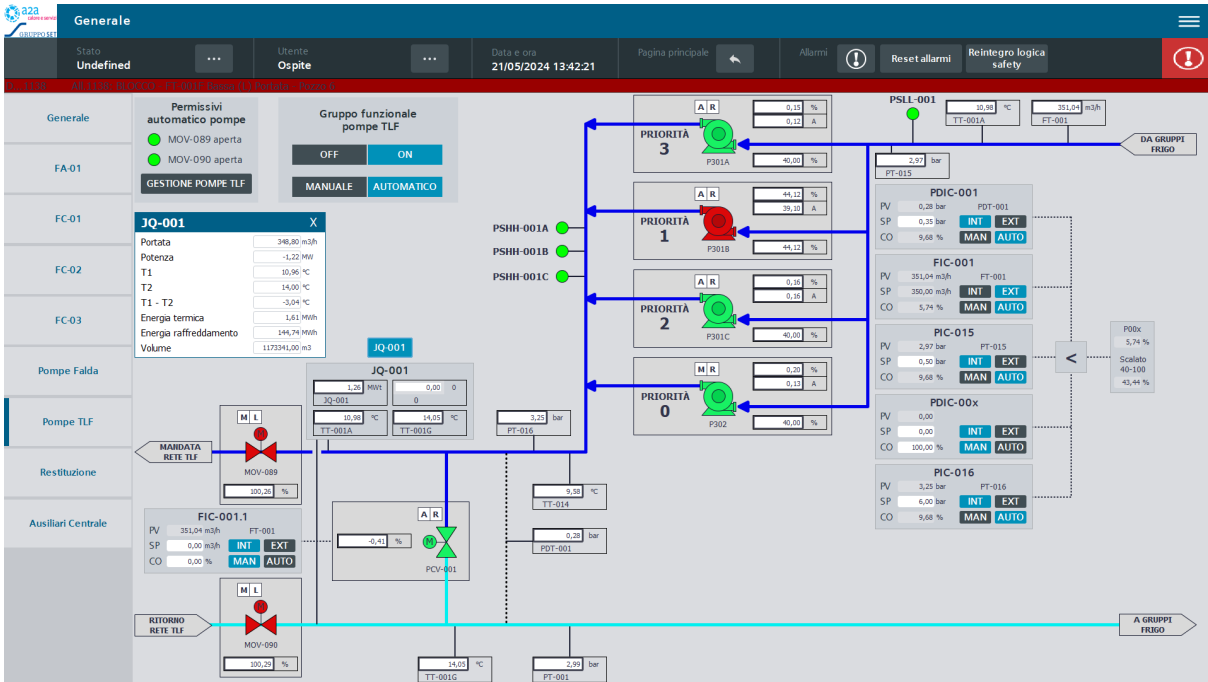


(a) Pagina sinottico sistema frigorifero ad assorbimento FA-01.

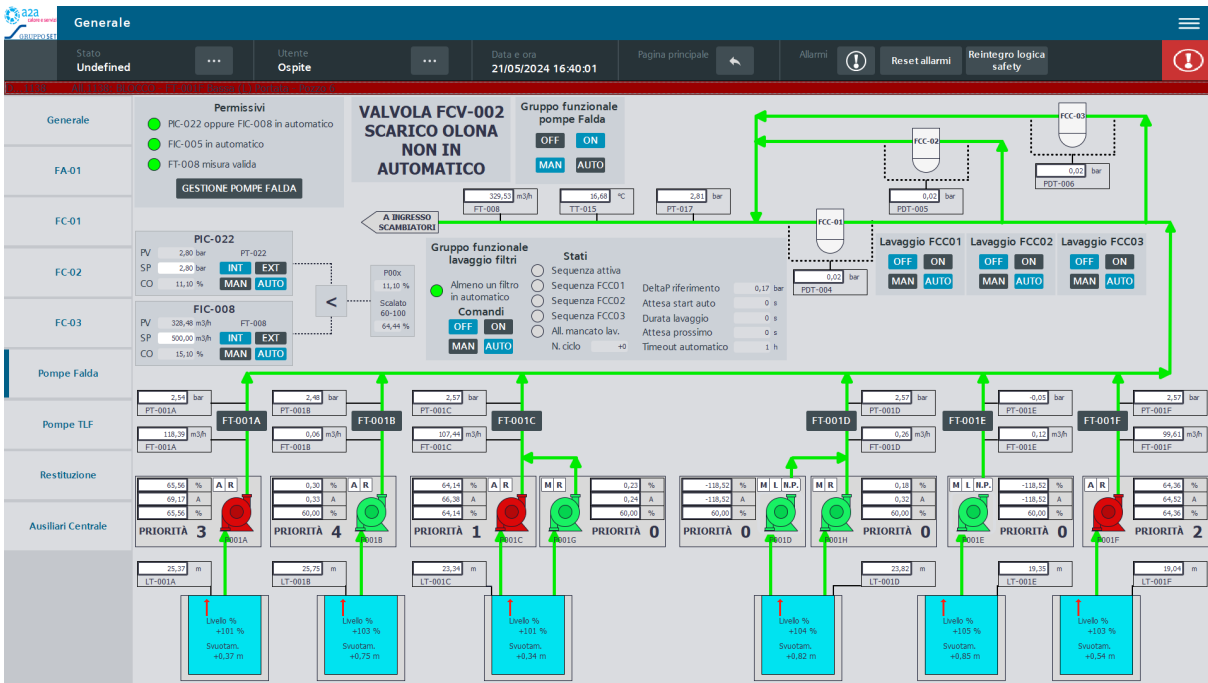


(b) Pagina sinottico sistema frigorifero a compressione FC-01.

Figura A.12: Sinottici sistema frigorifero ad assorbimento e a compressione.

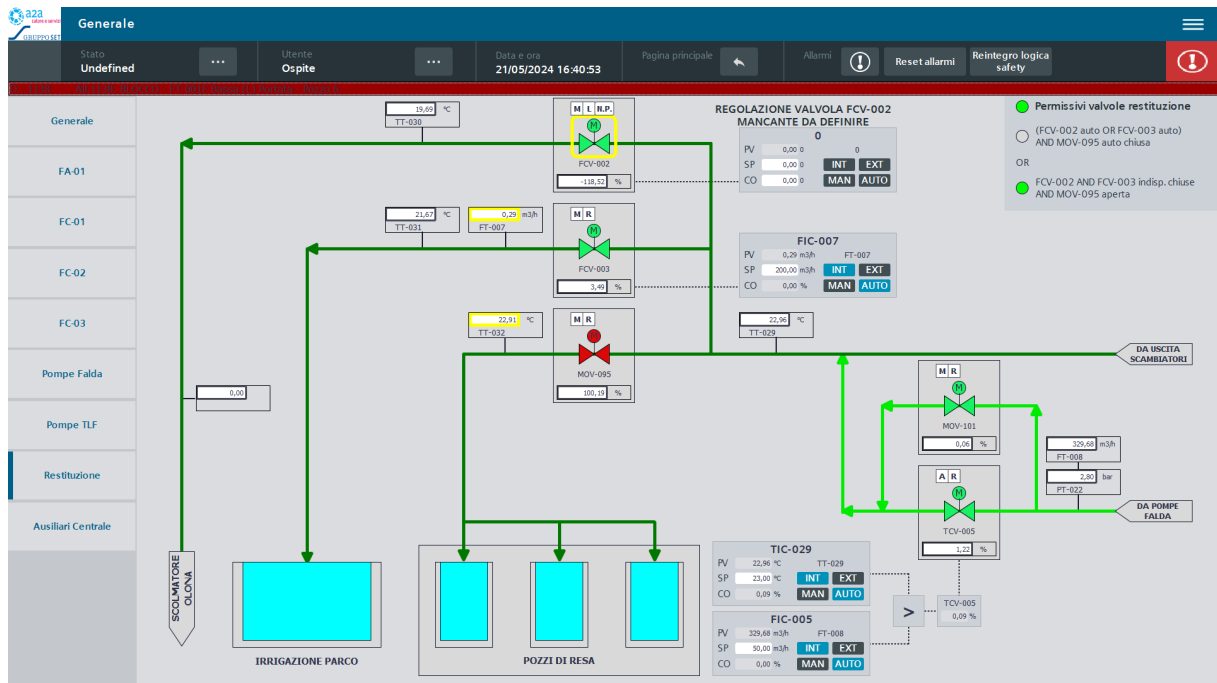


(a) Pagina sinottico pompe TLF.

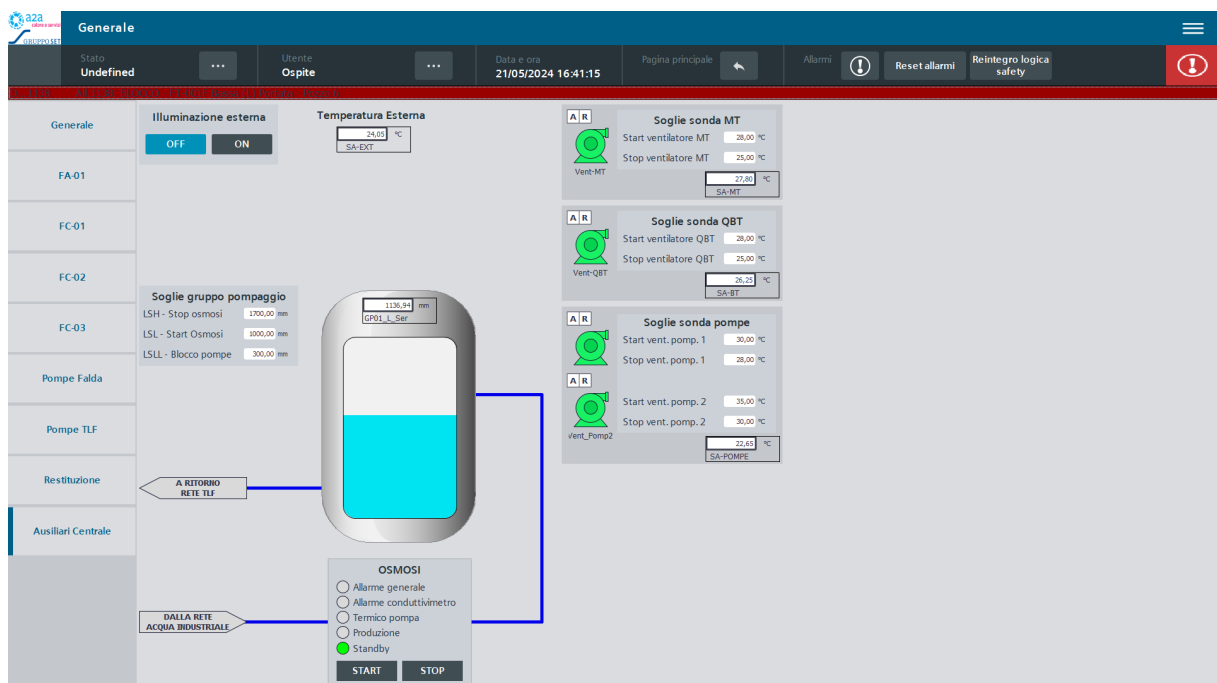


(b) Pagina sinottico pompe falda.

Figura A.13: Sinottici pompe TLF e falda.

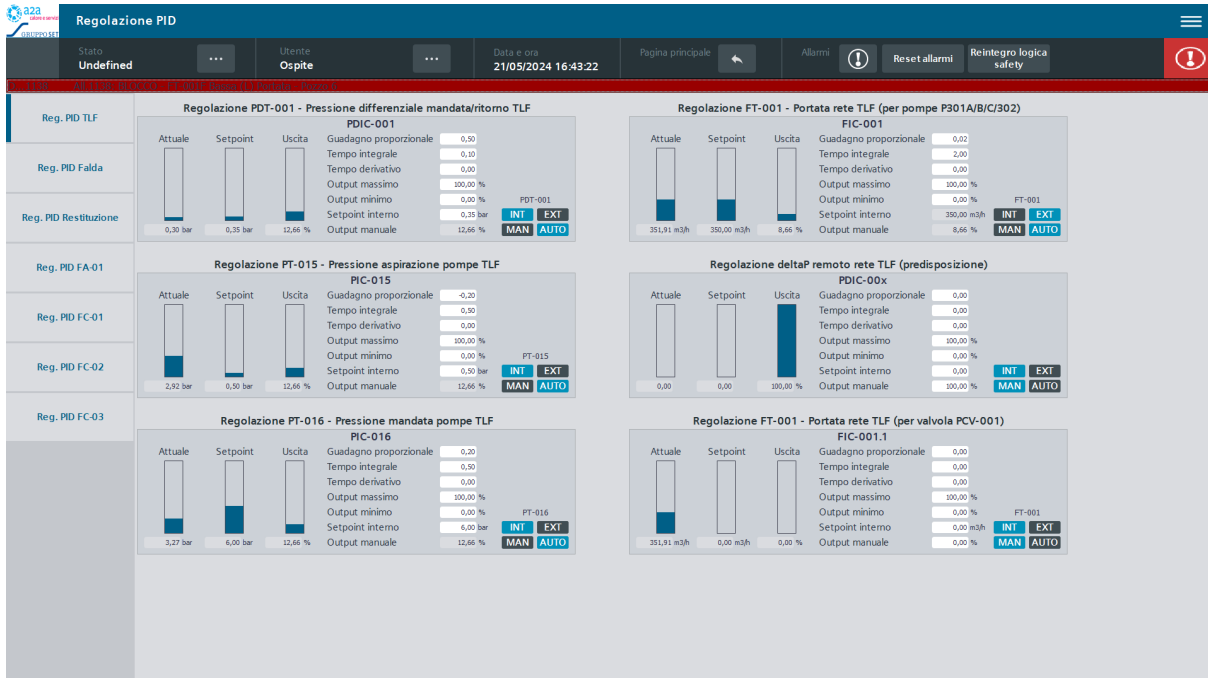


(a) Pagina sinottico valvole restituzione.

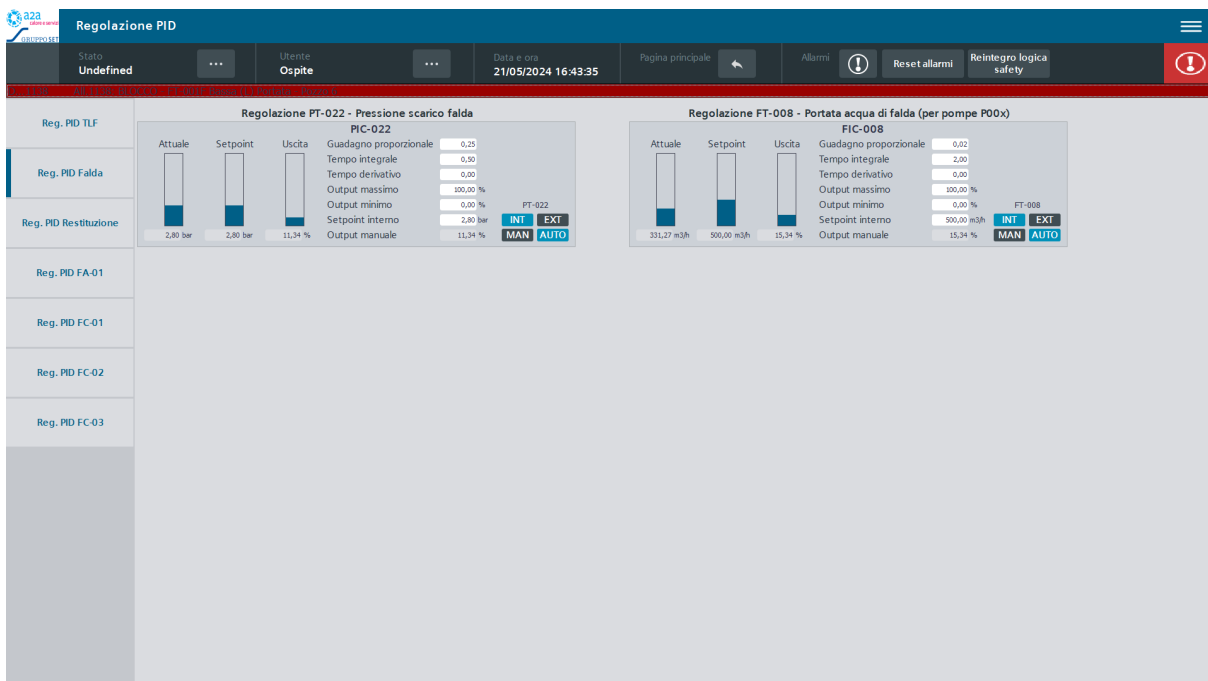


(b) Pagina sinottico sistemi ausiliari centrale.

Figura A.14: Sinottici valvole restituzione e sistemi ausiliari centrale.

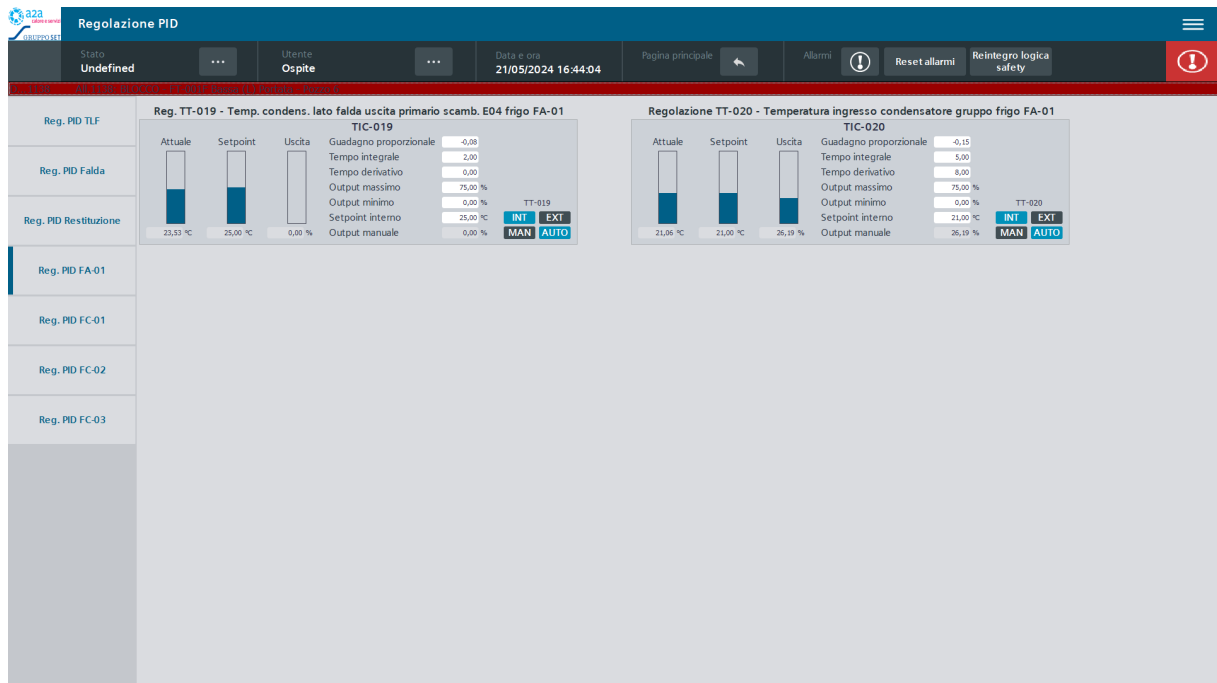


(a) Pagina sinottico regolatori PID pompaggio TLF.

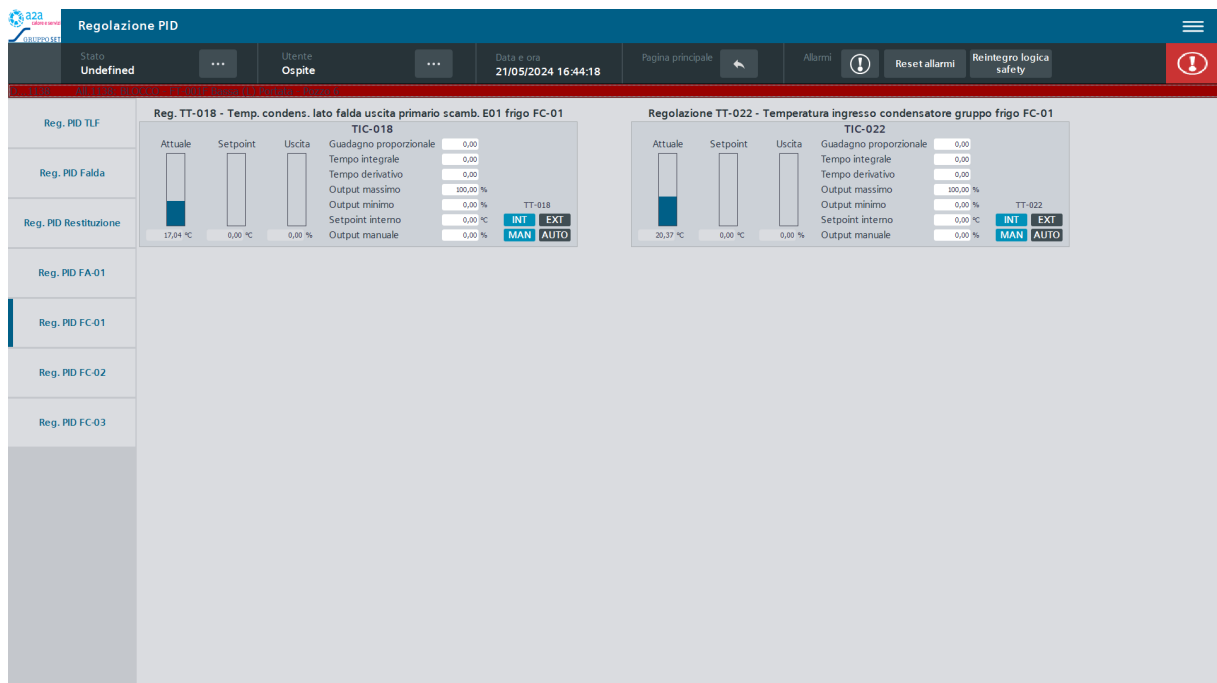


(b) Pagina sinottico regolatori PID pompaggio falda.

Figura A.15: Sinottici regolatori PID pompaggio TLF e falda.



(a) Pagina sinottico regolatori PID sistema frigorifero ad assorbimento FA-01.



(b) Pagina sinottico regolatori PID sistema frigorifero a compressione FC-01.

Figura A.16: Sinottici sistema frigorifero ad assorbimento e a compressione.

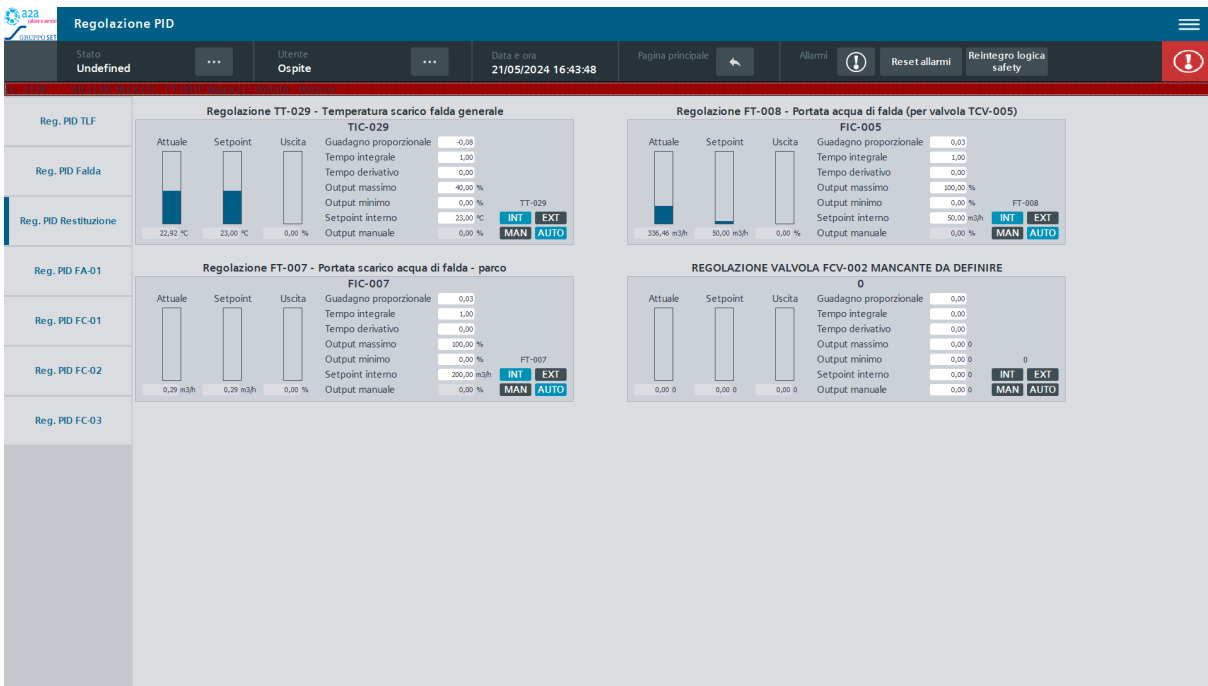


Figura A.17: Pagina sinottico regolatori PID valvole restituzione.

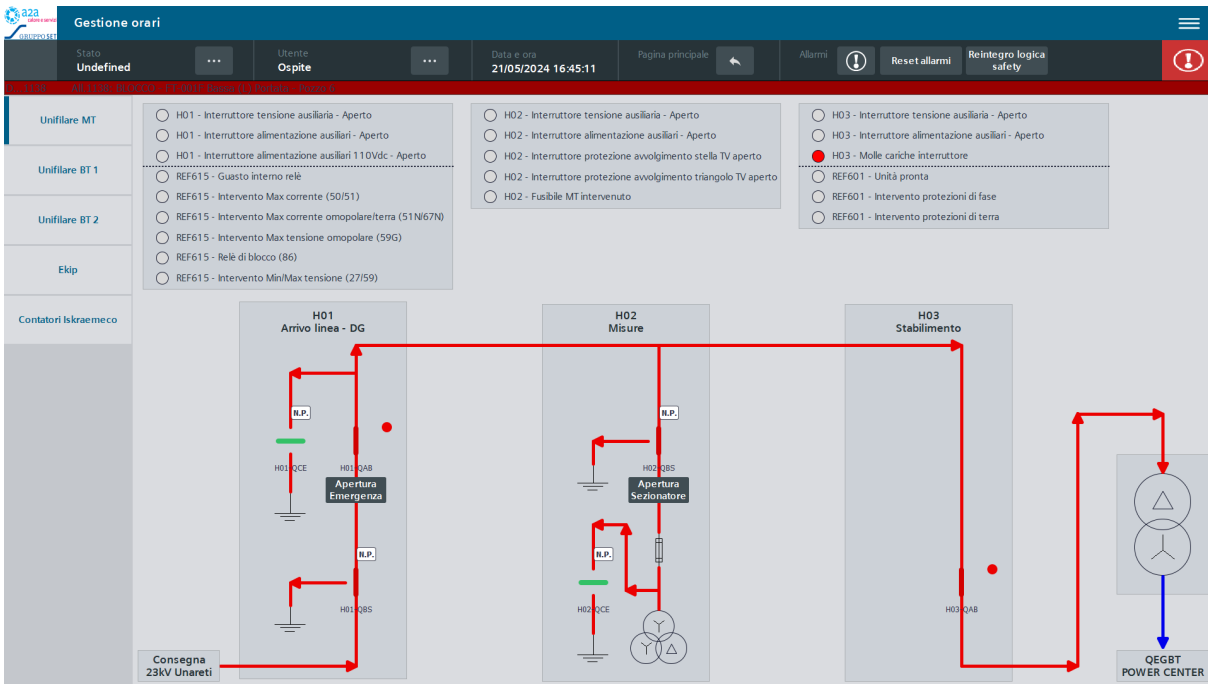
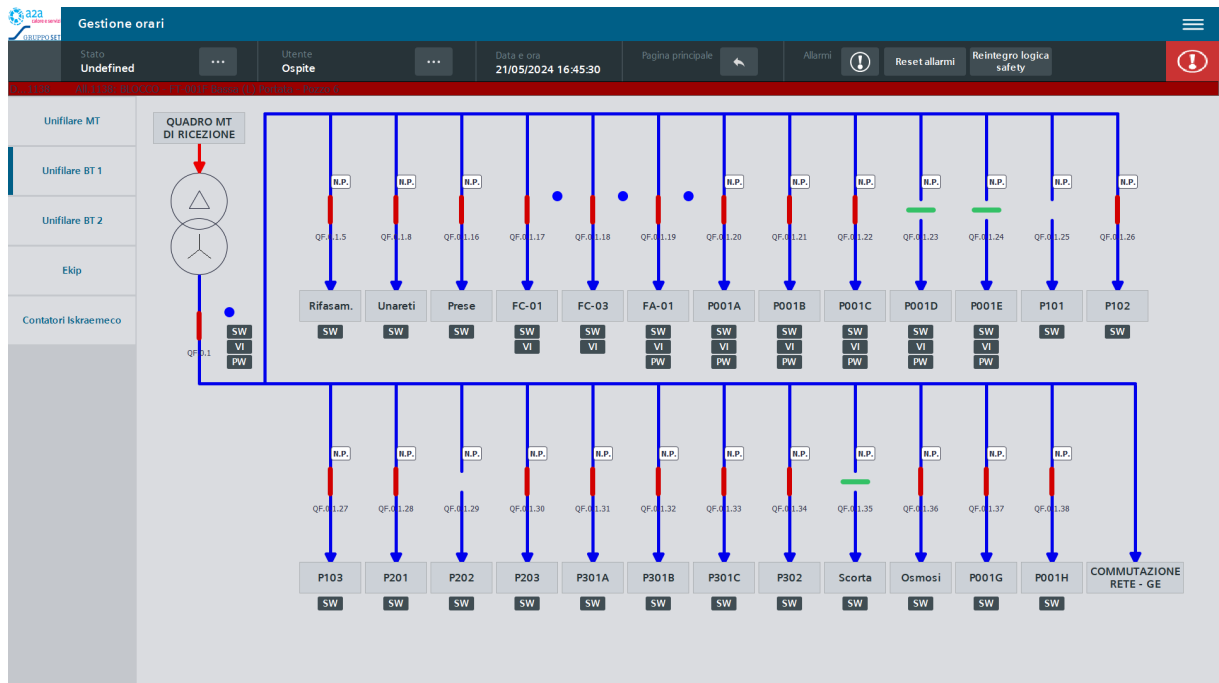
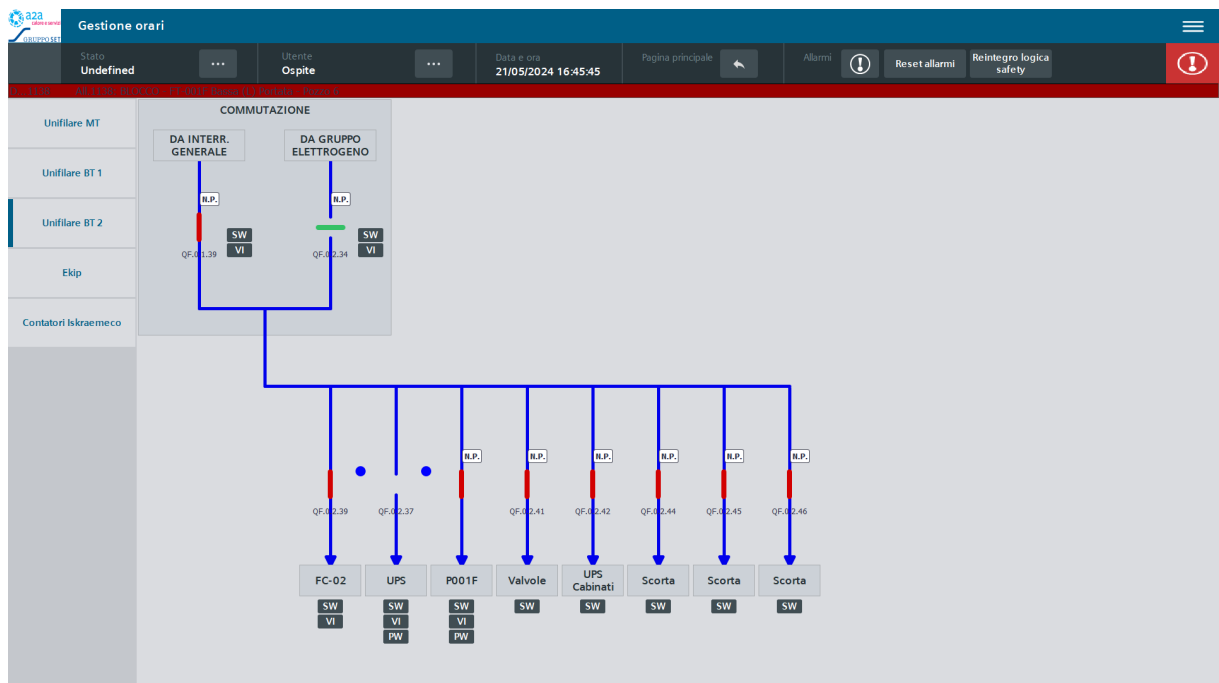


Figura A.18: Pagina sinottico unifilare media tensione (MT).

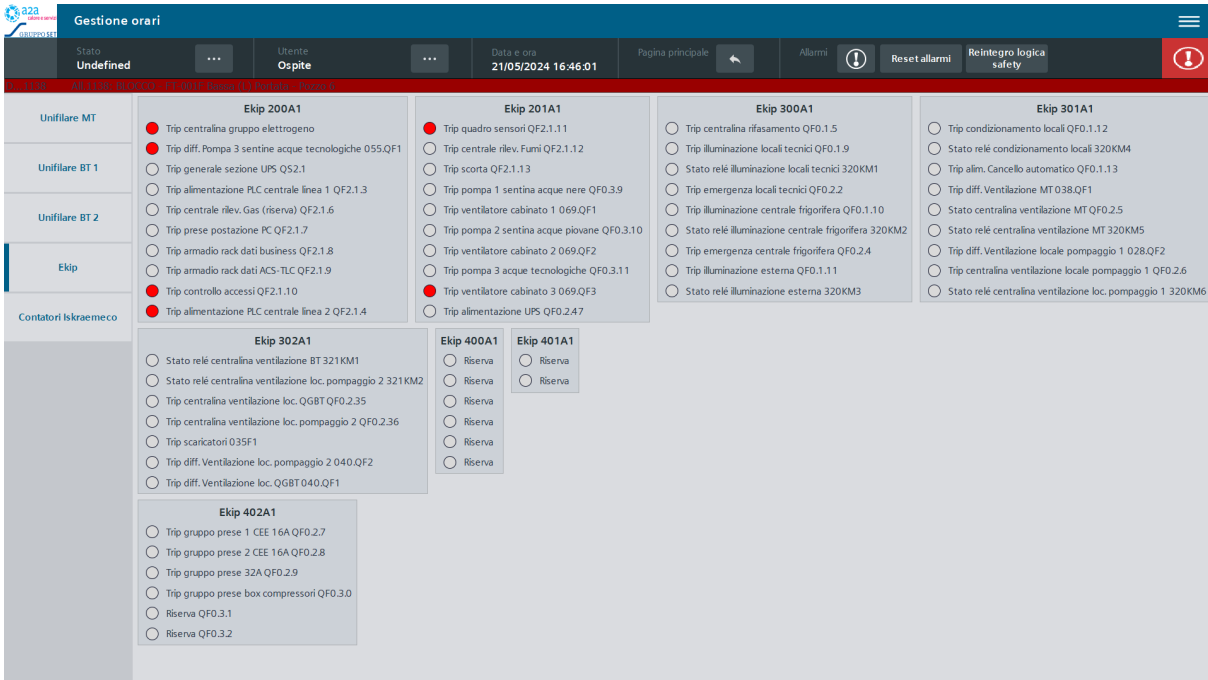


(a) Pagina sinottico unifilare bassa tensione (BT) 1.

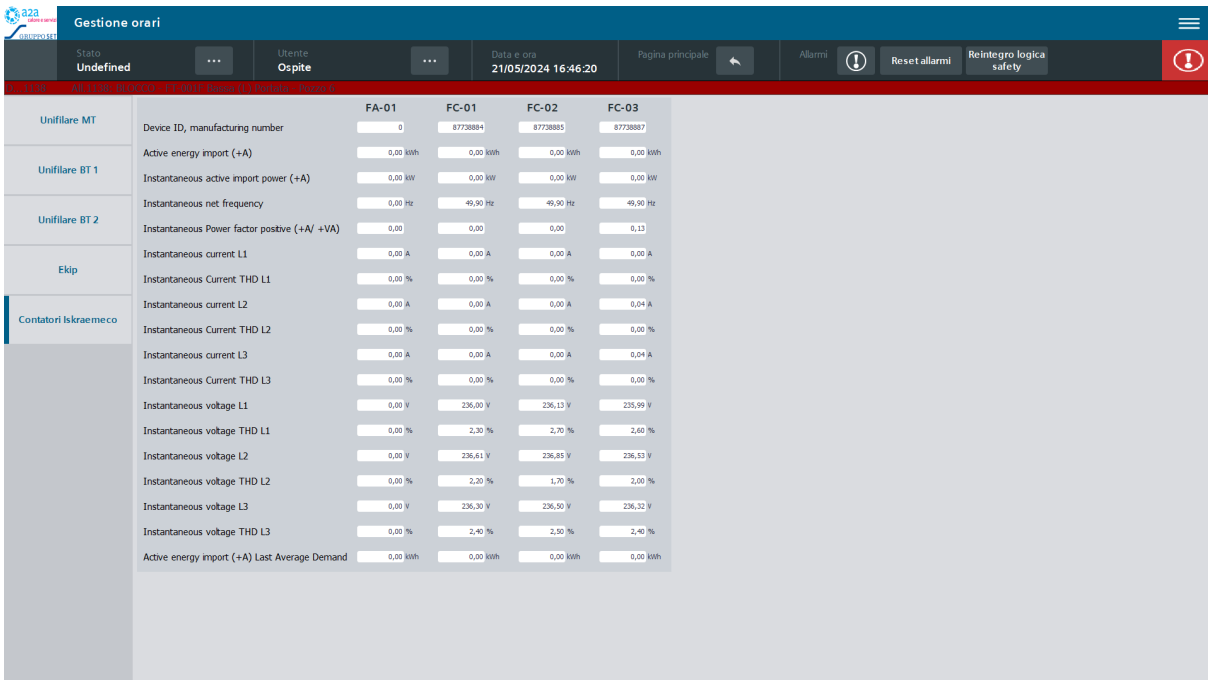


(b) Pagina sinottico unifilare bassa tensione (BT) 2.

Figura A.19: Sinottici unifilare bassa tensione (BT).

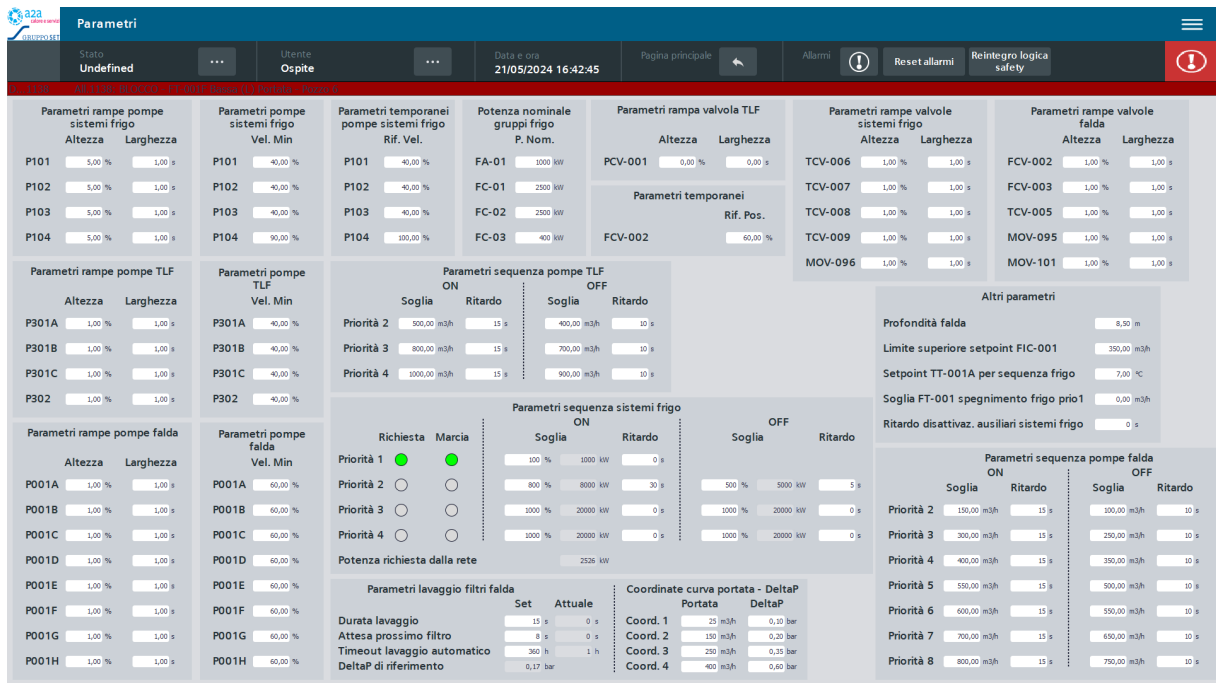


(a) Pagina sinottico segnali da Ekip.

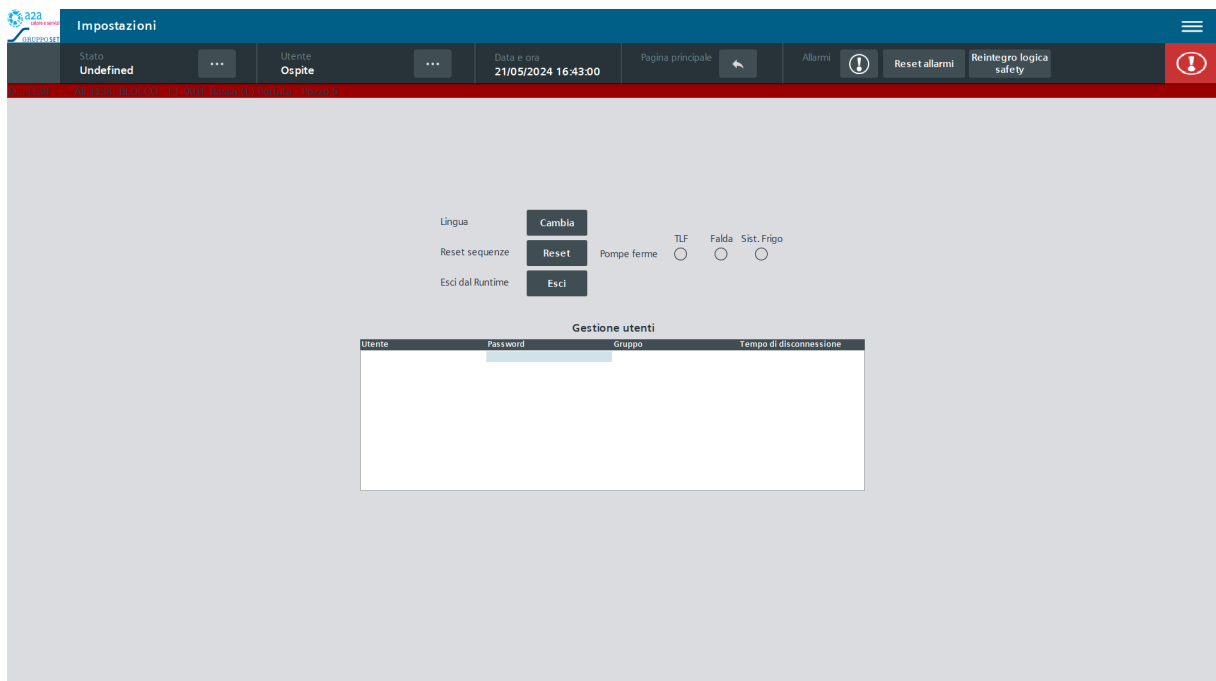


(b) Pagina sinottico contatori Iskraemeco.

Figura A.20: Sinottici segnali da Ekip e misure da contatori Iskraemeco.



(a) Pagina sinottico parametri.



(b) Pagina sinottico impostazioni.

Figura A.21: Sinottici parametri e impostazioni.

B | Concetto di failsafe e PLC di sicurezza

B.1. Il concetto di sicurezza in ambito industriale

La sicurezza funzionale è quella parte della sicurezza complessiva di un sistema o di un apparecchio che dipende dal corretto funzionamento di un sistema di protezione automatica in risposta ai suoi input o in caso di guasto, in modo prevedibile (*fail-safe*). Questo sistema di protezione deve essere progettato per gestire correttamente errori sistematici, guasti hardware e stress operativi o ambientali. L'obiettivo è l'assenza di rischi inaccettabili di lesioni fisiche o danni alla salute delle persone, direttamente o indirettamente (attraverso danni a proprietà o ambiente), mediante l'implementazione corretta di una o più funzioni di protezione automatica (spesso chiamate funzioni di sicurezza). Un sistema di sicurezza, o sistema correlato alla sicurezza, consiste in una o più funzioni di sicurezza [20].

La sicurezza funzionale ha una portata intrinsecamente *end-to-end*, poiché deve considerare la funzione di un componente o sottosistema come parte della funzione complessiva di protezione automatica del sistema. Anche se gli standard di sicurezza funzionale si concentrano su sistemi elettrici, elettronici e programmabili (E/E/PS), la portata *end-to-end* implica che in pratica i metodi di sicurezza funzionale debbano estendersi anche alle parti non E/E/PS del sistema, come attuatori, valvole e controlli motore. La sicurezza funzionale è raggiunta quando ogni funzione di sicurezza specificata è eseguita e il livello di prestazione richiesto per ciascuna funzione di sicurezza è rispettato [20].

L'analisi del rischio associato alla funzione di sicurezza richiede una valutazione del livello di integrità della sicurezza (SIL¹) o altri metodi di quantificazione. Un SIL si applica a una funzione di sicurezza end-to-end del sistema correlato alla sicurezza, non solo a un componente o parte del sistema. Garantire che la funzione di sicurezza operi secondo le intenzioni progettuali, inclusi input operatori errati e modalità di guasto, richiede che il progetto e il ciclo di vita siano gestiti secondo standard riconosciuti di sicurezza funzionale,

¹Safety Integrity Level

come la norma IEC 61508 in Europa. La sicurezza, inclusa la sicurezza funzionale, non può essere determinata senza considerare il sistema nel suo complesso e l'ambiente con cui interagisce [20].

I moderni sistemi spesso hanno software che comandano e controllano funzioni critiche per la sicurezza. Pertanto, la funzionalità del software e il suo comportamento corretto devono far parte dell'ingegneria della sicurezza funzionale per garantire un rischio accettabile a livello di sistema. Qualsiasi dichiarazione di sicurezza funzionale per un componente, sottosistema o sistema dovrebbe essere certificata indipendentemente secondo uno degli standard riconosciuti. Un prodotto certificato può essere dichiarato sicuro funzionalmente a un particolare livello di integrità della sicurezza o livello di prestazione in un determinato range di applicazioni, con il certificato e il rapporto di valutazione forniti ai clienti che descrivono l'ambito e i limiti delle prestazioni [20].

Il *Safety Integrity Level (SIL)* rappresenta il livello di riduzione del rischio. Secondo gli standard di sicurezza funzionale basati sulla norma IEC 61508, sono definiti quattro livelli SIL, con SIL 4 che è il più affidabile e SIL 1 il meno affidabile. Il SIL applicabile è determinato in base a fattori quantitativi e qualitativi, come le valutazioni del rischio e la gestione del ciclo di vita della sicurezza. La norma IEC 61508 definisce i requisiti SIL raggruppati in due categorie principali: integrità della sicurezza hardware e integrità della sicurezza sistemica. Un dispositivo o sistema deve soddisfare i requisiti di entrambe le categorie per raggiungere un determinato SIL. I requisiti SIL per l'integrità della sicurezza hardware si basano su un'analisi probabilistica del dispositivo. Per raggiungere un determinato SIL, il dispositivo deve soddisfare obiettivi per la massima probabilità di guasto pericoloso e una frazione minima di guasti sicuri. I pericoli di un sistema di controllo devono essere identificati e analizzati attraverso l'analisi del rischio. La mitigazione di questi rischi continua fino a quando il loro contributo complessivo al pericolo è considerato accettabile. Il livello tollerabile di questi rischi è specificato come requisito di sicurezza sotto forma di un target di "probabilità di un guasto pericoloso" in un dato periodo di tempo, espresso come SIL discreto [16].

I dispositivi elettrici ed elettronici possono essere certificati per l'uso in applicazioni di sicurezza funzionale secondo la norma IEC 61508. Esistono numerosi standard specifici per applicazioni basati o adattati dalla IEC 61508, come la IEC 61511 per il settore dell'industria di processo [16].

B.2. I PLC safety

Nel settore dell'automazione industriale, alcune applicazioni richiedono elevati gradi di sicurezza per proteggere sia gli operatori che i macchinari. I PLC di sicurezza sono progettati per rispettare specifiche normative e garantire questi elevati standard di sicurezza [4].

I PLC di sicurezza utilizzano la ridondanza delle CPU per evitare guasti e, se questi non possono essere evitati, per gestirli in modo controllato. Sebbene simili ai PLC comuni per quanto riguarda funzioni e istruzioni programmabili, i PLC di sicurezza includono funzioni aggiuntive per la gestione degli ingressi e delle uscite di sicurezza. Ad esempio, alcune parti del programma non possono essere modificate mentre il sistema è in esecuzione. Questi PLC generano checksum che richiedono una sorta di compilazione per essere cambiati. Le routine contenenti oggetti di sicurezza sono generalmente gestite separatamente dalle routine normali [4].

In un sistema con PLC di sicurezza, gli ingressi e le uscite sono monitorati continuamente tramite routine di diagnostica che rilevano eventuali malfunzionamenti, permettendo al sistema di gestire le anomalie in modo prevedibile. Va sottolineato che questi I/O non possono essere gestiti con istruzioni normali. Anche i moduli di ingresso e uscita devono essere di sicurezza. Nell'industria automatizzata, l'area di sicurezza è identificata dal colore giallo, visibile sia sulle componenti hardware sia all'interno del programma del PLC. I PLC di sicurezza ricevono ingressi doppi ad esempio dai pulsanti di emergenza (*E-Stop*), monitorandoli costantemente alla ricerca di discrepanze. Le uscite possono avere sistemi con due contattori per spegnere in sicurezza un macchinario in caso di guasto di uno dei due [4].

I sistemi di sicurezza *Siemens* combinano hardware e software per garantire la sicurezza funzionale, includendo moduli specifici come le CPU e i moduli di ingresso/uscita *fail-safe*. Questi funzionano in modo affidabile anche in presenza di guasti, grazie a tecniche come la ridondanza e l'auto-diagnostica continua. I PLC di sicurezza *Siemens* sono certificati secondo normative internazionali, garantendo l'uso in applicazioni critiche dove la sicurezza è fondamentale. La certificazione fino a SIL 3, li rende adatti per una vasta gamma di applicazioni industriali. Strumenti di ingegneria come il *TIA Portal* offrono funzionalità avanzate per configurazione, programmazione e diagnostica dei PLC di sicurezza, permettendo di integrare facilmente le funzioni di sicurezza nei progetti di automazione e di monitorarle in tempo reale.

C | Ridondanza nella topologia ad anello

Per configurare una topologia ad anello con protocollo MRP (*Media Redundancy Protocol*), si uniscono le due estremità libere di una topologia a bus lineare in un unico dispositivo. La chiusura della topologia a bus lineare per formare un anello viene realizzata con due porte (chiamate porte di anello) di un dispositivo nell'anello. Questo dispositivo è il gestore della ridondanza. Tutti gli altri dispositivi nell'anello sono client di ridondanza. Come mostrato in figura C.1, le due porte di anello di un dispositivo sono quelle che stabiliscono la connessione ai due dispositivi vicini nella topologia ad anello e vengono selezionate e impostate nella configurazione del dispositivo pertinente [13].

Quando si utilizza la ridondanza MRP, i percorsi dei dati tra i singoli dispositivi vengono riconfigurati se l'anello viene interrotto in un punto. Dopo la riconfigurazione della topologia, i dispositivi possono essere nuovamente raggiunti nella nuova topologia risultante. Nel gestore della ridondanza, le 2 porte di anello sono disconnesse l'una dall'altra se la rete è ininterrotta. Questo previene la circolazione dei frame di dati. In termini di trasmissione dei dati, la topologia ad anello è una topologia a bus lineare. Il gestore della ridondanza monitora la topologia ad anello. Lo fa inviando frame di test sia dalla porta 1

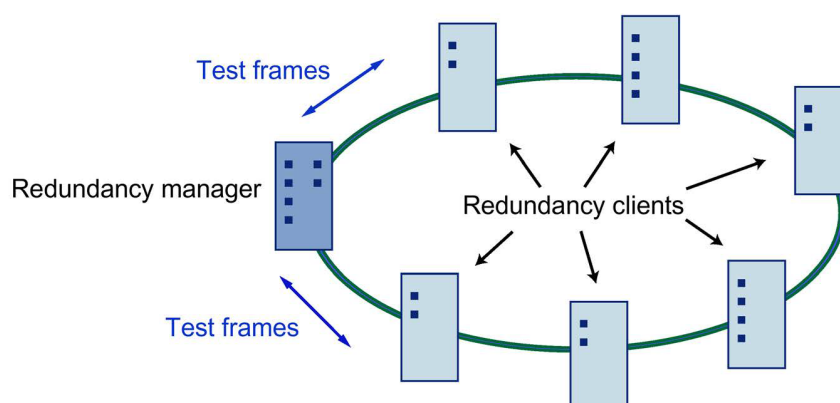


Figura C.1: Dispositivi in una topologia ad anello con protocollo MRP

di anello sia dalla porta 2 di anello. I frame di test girano intorno all'anello in entrambe le direzioni fino ad arrivare all'altra porta di anello del gestore della ridondanza [13].

Un'interruzione dell'anello può essere causata dalla perdita della connessione tra due dispositivi o dal guasto di un dispositivo nell'anello. Se i frame di test del gestore della ridondanza non arrivano più all'altra porta di anello a causa di un'interruzione nell'anello, il gestore collega le sue due porte di anello. Questo percorso sostitutivo ripristina una connessione funzionante tra tutti i dispositivi rimanenti sotto forma di una topologia a bus lineare. Non appena l'interruzione viene eliminata, i percorsi di trasmissione originali vengono nuovamente stabiliti, le due porte di anello del gestore della ridondanza vengono disconnesse e i client di ridondanza vengono informati del cambiamento. I client utilizzano quindi i nuovi percorsi verso gli altri dispositivi. Il tempo tra l'interruzione dell'anello e il ripristino di una topologia lineare funzionale è noto come tempo di riconfigurazione. Se il gestore della ridondanza si guasta, l'anello diventa un bus lineare funzionale. Il tempo di riconfigurazione dopo un'interruzione dell'anello è massimo di 200 ms [13].

D | Protocolli Profinet e Modbus

D.1. Il protocollo Profinet

Profinet (*Process Field Network*) è uno standard di comunicazione basato su *Industrial Ethernet* progettato per la trasmissione di dati in tempo reale e il controllo delle apparecchiature nei sistemi industriali, sviluppato da *Siemens* e gestito da *PROFIBUS & PROFINET International (PI)*. È ampiamente utilizzato nell'automazione industriale per collegare dispositivi come PLC, sensori e attuatori all'interno di una rete di industriale. Supporta sia la trasmissione di dati ciclici che aciclici, offre un'integrazione trasparente con altre reti industriali ed è particolarmente efficace nel fornire dati con vincoli temporali rigorosi [18].

Profinet definisce l'intero scambio di dati tra i controller (chiamati *IO-Controllers*) e i dispositivi (chiamati *IO-Devices*), oltre alla configurazione dei parametri e alla diagnostica. Gli *IO-Controllers* sono tipicamente PLC¹, DCS² o IPC³, mentre gli *IO-Devices* possono variare da periferiche I/O a motori, sensori o attuatori [18].

Un sistema Profinet è costituito dai seguenti dispositivi:

IO-Controller: controlla il task di automazione;

IO-Device: è un dispositivo di campo monitorato e controllato da un *IO-Controller*. Un *IO-Device* può essere costituito da diversi moduli e sottomoduli;

IO-Supervisor: è un software, generalmente basato su PC, per la configurazione dei parametri e la diagnostica dei singoli *IO-Devices*.

Un sistema Profinet IO minimo consiste di almeno un *IO-Controller* che controlla uno o più *IO-Devices*. Inoltre, uno o più *IO-Supervisors* possono essere temporaneamente collegati per l'ingegneria degli *IO-Devices*, se necessario [18].

¹Programmable Logic Controller

²Distributed Control System

³Industrial PC

Se due sistemi IO sono nella stessa rete IP, gli *IO-Controllers* possono condividere un segnale di ingresso come input condiviso, accedendo allo stesso sottomodulo in un *IO-Device*. Questo semplifica la combinazione di un PLC con un controllore di sicurezza separato o con un *motion controller*. Allo stesso modo, un intero *IO-Device* può essere condiviso come dispositivo condiviso, in cui singoli sottomoduli di un *IO-Device* sono assegnati a diversi *IO-Controllers* [18].

Le proprietà di un *IO-Device* sono descritte dal produttore del dispositivo in un file GSD (*General Station Description*). La lingua utilizzata per questo è GSDML (*GSD Markup Language*), un linguaggio basato su XML. Il file GSD serve come base per la pianificazione della configurazione di un sistema Profinet IO [18].

Tutti i dispositivi di campo Profinet determinano i loro vicini, permettendo la sostituzione dei dispositivi in caso di guasto senza strumenti aggiuntivi e conoscenze pregresse. La topologia dell'impianto può essere visualizzata graficamente per una migliore chiarezza leggendo queste informazioni. L'ingegneria può essere supportata da strumenti come *PROFINET Commander* o *PRONETA* [18].

Profinet è sempre più utilizzato in applicazioni critiche. In tali contesti, esiste sempre il rischio che le funzioni richieste non possano essere soddisfatte. Questo rischio può essere ridotto attraverso misure specifiche identificate da analisi di affidabilità. Gli obiettivi principali includono:

Sicurezza funzionale: garantire la sicurezza funzionale, in modo che il sistema entri in uno stato sicuro in caso di guasto;

Disponibilità: aumentare la disponibilità, permettendo al sistema di eseguire la funzione minima richiesta anche in caso di guasto;

Sicurezza delle informazioni: garantire l'integrità del sistema attraverso la sicurezza delle informazioni.

Questi obiettivi possono interferire tra loro o completarsi a vicenda [18].

Profisafe definisce come i dispositivi di sicurezza (ad esempio: pulsanti di arresto di emergenza, barriere fotoelettriche, dispositivi di prevenzione del riempimento eccessivo) comunicano con i controller di sicurezza tramite Profinet in modo sicuro, così da poter essere utilizzati in task di automazione legati alla sicurezza fino al livello SIL 3 secondo la normativa IEC 61508. Profisafe implementa la comunicazione sicura attraverso un profilo, cioè tramite un formato speciale dei dati utente e un protocollo speciale. È progettato come uno strato separato sopra lo strato applicativo del bus di campo per ridurre la probabilità di errori nella trasmissione dei dati. I messaggi Profisafe utilizzano cavi e messaggi

standard del bus di campo e non dipendono dai meccanismi di rilevamento degli errori dei canali di trasmissione sottostanti, supportando così la sicurezza di interi percorsi di comunicazione, inclusi i backplane all'interno dei controller o I/O remoti [18].

La disponibilità di un sistema di automazione può essere aumentata aggiungendo ridondanza agli elementi critici. Si può distinguere tra ridondanza di sistema e ridondanza dei media.

La ridondanza di sistema può essere implementata con Profinet per aumentare la disponibilità. In questo caso, due *IO-Controllers* che controllano lo stesso *IO-Device* sono configurati. L'*IO-Controller* attivo segna i suoi dati di output come primari. I dati di output non segnati vengono ignorati da un *IO-Device* in un sistema IO ridondante. In caso di errore, il secondo *IO-Controller* può quindi prendere il controllo di tutti gli *IO-Devices* senza interruzioni, segnando i suoi dati di output come primari. Il Protocollo MRP (*Media Redundancy Protocol*) consente la creazione di una topologia ad anello indipendente dal protocollo con un tempo di commutazione inferiore a 50 ms, sufficiente per la comunicazione in tempo reale standard con Profinet [18].

Il concetto di sicurezza informatica per Profinet prevede che l'impianto di produzione venga protetto contro gli attacchi, in particolare dall'esterno, usando dei *firewall* [18].

D.2. Il protocollo Modbus

Modbus è un protocollo di comunicazione client/server a livello di applicazione, pubblicato originariamente da *Modicon* (ora *Schneider Electric*) nel 1979 per l'uso con i suoi PLC. Nel tempo, è diventato uno standard de facto per la comunicazione tra dispositivi elettronici industriali su vari bus e reti. Modbus è molto diffuso negli ambienti industriali grazie alla sua pubblicazione aperta e all'assenza di *royalty*⁴. È stato sviluppato per applicazioni industriali ed è relativamente facile da implementare e mantenere rispetto ad altri standard, con poche restrizioni sul formato dei dati da trasmettere [17].

Il protocollo utilizza linee di comunicazione seriali oppure Ethernet con la suite di protocolli Internet come livello di trasporto, supportando la comunicazione tra più dispositivi collegati allo stesso cavo o rete Ethernet. Ad esempio, un dispositivo che misura la temperatura e un altro che misura l'umidità possono essere collegati allo stesso cavo, comunicando entrambi le misurazioni a un computer tramite Modbus. Viene spesso utilizzato per collegare un computer supervisore di impianto/sistema con un'unità terminale

⁴Royalty-free indica che il materiale soggetto a copyright o ad altri diritti di proprietà intellettuale può essere utilizzato senza dover pagare royalty o diritti di licenza per ciascun utilizzo, per ogni copia o volume venduto o per un determinato periodo di tempo o di vendite [19].

remota (RTU⁵) nei sistemi di controllo di supervisione e acquisizione dati (SCADA⁶). Molti dei tipi di dati sono denominati a partire dal controllo industriale dei dispositivi di fabbrica, come la logica *Ladder* utilizzata per comandare i relè: un'uscita fisica a singolo bit è chiamata *coil* (bobina), e un ingresso fisico a singolo bit è chiamato *discrete input* o *contact* (contatto) [17].

Esistono due versioni del protocollo: su porta seriale (*RS485* di default, ma anche *RS232*) e su Ethernet. Modbus su linea seriale è un protocollo *master-slave* che supporta un *master* e più *slave* sul bus seriale. Nel modello *client/server* del protocollo Modbus, il ruolo di *client* è svolto dal *master*, mentre quello di *server* è svolto dallo *slave*. Un bus seriale Modbus può avere un massimo di 247 *slave* che comunicano con un *master*, ciascuno con un indirizzo unico da 1 a 247. Il *master* avvia la comunicazione, mentre gli *slave* rispondono solo alle richieste del *master* e non possono comunicare tra loro. Modbus su linea seriale ha due modalità di trasmissione, RTU e ASCII. Modbus RTU (*Remote Terminal Unit*) utilizza una rappresentazione compatta e binaria dei dati, mentre Modbus ASCII utilizza caratteri ASCII. Modbus TCP/IP è una variante basata su Ethernet utilizzata per la comunicazione su reti TCP/IP, con connessione sulla porta 502 e non richiede il calcolo del checksum poiché i livelli inferiori già forniscono protezione tramite checksum [17].

A ogni dispositivo che comunica tramite Modbus viene assegnato un indirizzo unico. Generalmente, solo un dispositivo agisce come *master* nel caso di comunicazione seriale. Un comando Modbus include l'indirizzo del dispositivo di destinazione, e solo quest'ultimo agirà sul comando ricevuto. Tutti i comandi Modbus includono informazioni di controllo per garantire la correttezza del comando ricevuto. I comandi possono chiedere a un dispositivo di modificare un valore in uno dei suoi registri o di restituire uno o più valori contenuti nei registri. Modbus definisce un'unità di dati (PDU⁷) indipendentemente dai protocolli di livello inferiore. La dimensione massima della PDU è di 253 byte. Per la codifica dei dati, Modbus utilizza una rappresentazione *big-endian*, il che significa che ad esempio, per un valore a 16 bit, il byte più significativo viene inviato per primo [17].

Una transazione Modbus tra client e server include i seguenti passaggi:

1. il client avvia una richiesta con PDU contenente il codice funzione e la richiesta dati;
2. il server riceve la richiesta, interpreta il codice funzione, legge l'indirizzo del campo dati della PDU, ottiene il valore del campo dati ed esegue l'azione richiesta. Se non

⁵Remote Terminal Unit

⁶Supervisory Control And Data Acquisition

⁷Protocol Data Unit

ci sono errori, il server risponde con PDU contenente il codice funzione e la risposta dati. In caso di errore, il server risponde con PDU contenente un codice di eccezione e un codice di errore;

3. il client riceve la risposta e termina la transazione.

Modbus è stato progettato negli anni '70 per comunicare con PLC, quindi il numero di tipi di dati è limitato a quelli riconosciuti dai PLC dell'epoca. Non supporta oggetti binari di grandi dimensioni e non esiste un metodo standard per descrivere o rappresentare i registri dei dispositivi. È necessario possedere una specifica fornita dal produttore del dispositivo che identifichi e descriva i registri [17].

Essendo un protocollo client/server, non esiste un modo per un dispositivo di campo di ottenere dati tramite un meccanismo di gestione degli eventi, il client deve periodicamente interrogare ogni dispositivo di campo, consumando larghezza di banda e tempo di rete. Modbus è limitato a 247 dispositivi su un singolo collegamento dati, limitando il numero di dispositivi di campo che possono essere collegati a una stazione madre. Inoltre, Modbus non offre sicurezza contro comandi non autorizzati o intercettazioni di dati [17].

A causa della dimensione massima della PDU Modbus di 253 byte, vi è un limite ai dati che possono essere inviati in un singolo pacchetto. Per leggere più registri, è necessario effettuare più richieste di lettura, rallentando la comunicazione.

Elenco delle figure

2.1	Inquadramento territoriale con indicazione delle utenze principali	12
2.2	Planimetria del layout esterno della centrale (nord verso sinistra)	13
3.1	Architettura semplificata del sistema di automazione	20
3.2	Schema di regolazione pompe TLF	40
3.3	Schema di regolazione pompe falda	42
3.4	Schema di regolazione condensazione sistemi frigoriferi	44
3.5	Schema di regolazione valvola TCV-005	47
3.6	Layout delle pagine grafiche sviluppate	49
3.7	Popup di login e barra di navigazione tra gruppi di pagine	50
3.8	Icone e faceplate pompa	52
3.9	Icone e faceplate valvola	53
3.10	Icona e faceplate ingresso analogico e icona ingresso digitale	55
3.11	Icona e faceplate comando analogico e icona parametro	56
3.12	Icone e faceplate interruttore	56
3.13	Pagina messaggi e allarmi	57
3.14	Popup gestione pompe TLF e falda.	59
3.15	Pagina diagnostica e buffer di diagnostica.	62
A.1	Layout interno della centrale (nord verso sinistra nella vista dall'alto)	76
A.2	Planimetria interna della centrale (nord verso l'alto)	77
A.3	P&ID della centrale	78
A.4	Estratto del P&ID che mostra il gruppo funzionale pompaggio TLF	79
A.5	Estratto del P&ID che mostra i sistemi frigoriferi	80
A.6	Estratto del P&ID che mostra il sistema frigorifero ad assorbimento FA-01	81
A.7	Estratto del P&ID che mostra le valvole TLR del sistema frigorifero FA-01	82
A.8	Estratto del P&ID che mostra un sistema frigorifero a compressione (FC-01)	83
A.9	Estratto del P&ID che mostra il gruppo funzionale pompaggio falda	84
A.10	Estratto del P&ID che mostra il gruppo funzionale valvole scarico	85
A.11	Sinottico generale, popup permissivi impianto e gestione sistemi frigoriferi.	88

A.12 Sinottici sistema frigorifero ad assorbimento e a compressione.	89
A.13 Sinottici pompe TLF e falda.	90
A.14 Sinottici valvole restituzione e sistemi ausiliari centrale.	91
A.15 Sinottici regolatori PID pompaggio TLF e falda.	92
A.16 Sinottici sistema frigorifero ad assorbimento e a compressione.	93
A.17 Pagina sinottico regolatori PID valvole restituzione.	94
A.18 Pagina sinottico unifilare media tensione (MT).	94
A.19 Sinottici unifilare bassa tensione (BT).	95
A.20 Sinottici segnali da Ekip e misure da contatori Iskraemeco.	96
A.21 Sinottici parametri e impostazioni.	97
C.1 Dispositivi in una topologia ad anello con protocollo MRP	103

Elenco delle tabelle

3.1	Soglie di potenza per l'inserzione e la disinserzione dei sistemi frigoriferi . .	33
-----	---	----

Ringraziamenti

Innanzitutto, desidero esprimere la mia più profonda gratitudine ai miei genitori e alla mia famiglia. Senza il vostro amore, sostegno incondizionato e l'ambiente favorevole che avete creato, non sarei la persona che sono oggi. Grazie per avermi incoraggiato a dare sempre il massimo, anche nei momenti di difficoltà.

Un ringraziamento speciale va a Yasmin, la mia dolce metà, migliore amica, sorella, figlia e futura moglie. Grazie per avermi ascoltato, sostenuto, incoraggiato e amato in ogni momento. La tua pazienza e il tuo amore mi hanno dato la forza e l'energia necessarie per affrontare questo percorso con grinta e determinazione.

Adriano Demetrio, mio carissimo amico, grazie per il tuo costante incoraggiamento e per avermi ascoltato. Le giornate trascorse insieme a imparare e divertirci sono state preziose. Grazie anche per avermi aiutato a creare un diagramma in TikZ in un momento critico.

Un sentito ringraziamento al Professor Alberto Leva, mio relatore, per la sua pazienza, disponibilità e supporto costante. Grazie per aver reso questo percorso meno stressante con la sua guida equilibrata.

Grazie al *Gruppo SET*, dove ho lavorato durante la mia magistrale. La vostra flessibilità e supporto mi hanno permesso di bilanciare lavoro e studio, offrendomi un'opportunità preziosa per imparare e crescere professionalmente.

Un grazie speciale ad *A2A Calore e Servizi* per avermi permesso di utilizzare i dettagli del progetto nella mia tesi. La vostra collaborazione e documentazione aggiuntiva sono stati fondamentali per il mio lavoro.

Ringrazio il trio di A2A, Christian Mazzuchelli, Alberto Petrosilli e Simone Bosotti, per la loro gentilezza, pazienza e simpatia durante le fasi di test e messa in servizio. La vostra amicizia ha reso le giornate di lavoro molto più piacevoli e gratificanti.

Un sincero ringraziamento all'*Associazione Studenti Musulmani - ASM PoliMi*. Grazie per avermi dato l'opportunità di sviluppare competenze gestionali e di costruire una rete di amicizie che ha arricchito la mia esperienza universitaria.

Infine, un grazie speciale a Donald Ervin Knuth per aver creato il sistema $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ e a Leslie Lamport per $\text{L}_{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$. Grazie anche a Lorenzo Pantieri, il cui libro *Arte $\text{L}_{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$* mi ha aiutato enormemente nella scrittura di questa tesi.