



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA**



**DIPARTIMENTO
DI INGEGNERIA
DELL'INFORMAZIONE**

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA ELETTRONICA

**“Analisi e test di un Programmable Logic Controller (PLC): Arduino Opta
8A.04-8320”**

Relatore: Prof. / Dott. Mirco Rampazzo

Laureando: Alessandro Borgherini

ANNO ACCADEMICO 2022 – 2023

Data di laurea 29/09/2023

Indice

1	Introduzione	4
2	Edge computing	5
2.1	FAR-Edge Reference Architecture	7
3	Arduino Opta	8
4	Opta nel field layer	10
5	Opta nell'edge layer	14
6	Conclusione	17

Vis Engineering

Questa tesi tratta dei progetti e delle analisi condotte durante un periodo di tirocinio presso Vis Engineering, uno studio associato specializzato nello sviluppo di software e simulazioni nell'ambito dell'HVAC-R (Riscaldamento, Ventilazione, Aria Condizionata e Refrigerazione) a livello industriale.

1 Introduzione

Lo sviluppo della società moderna ha portato ad un notevole aumento dei bisogni delle persone, spingendo le industrie a innovare costantemente per soddisfare queste esigenze crescenti. Uno degli elementi chiave che ha contribuito a questa trasformazione è stata l'introduzione dei dispositivi intelligenti, i quali hanno avuto un impatto significativo in svariati settori e sono entrati nella vita quotidiana delle persone in modo diffuso. Le case intelligenti e i veicoli autonomi sono solo due esempi del modo in cui i dispositivi intelligenti hanno rivoluzionato il nostro stile di vita.

Questo ha portato una maggiore quantità di dispositivi connessi ad internet, quindi un progressivo passaggio al futuro dell'Internet of Things (IoT). Ovvero il fenomeno in cui viene descritta una rete di oggetti fisici, chiamati "things" (cose), che sono incorporati con sensori, software e altre tecnologie allo scopo di connettersi e scambiare dati con altri dispositivi e sistemi tramite Internet. Questi dispositivi possono variare tra oggetti comuni presenti nelle case a strumenti sofisticati usati nelle industrie. [1]

Nel contesto dell'HVAC-R, sono emersi sempre più sistemi intelligenti, i quali hanno assunto un ruolo di particolare rilevanza durante il periodo di pandemia, quando è divenuto cruciale garantire il trasporto e la conservazione sicura di beni sensibili alle variazioni di temperatura. [2]

Le pompe di calore controllate vocalmente, i dispositivi attivati da sensori e le applicazioni mobili che consentono di gestire le unità HVAC da qualsiasi luogo, stanno gradualmente diventando usufruibili anche nel settore dell'HVAC-R.

Un sistema HVAC-R intelligente sfrutta componenti in rete e sensori che si integrano con i sistemi di automazione degli edifici. I sensori raccolgono dati sulle condizioni presenti in tutto l'edificio, monitorando anche l'occupazione degli spazi nel corso del tempo. Questi dati vengono raccolti e utilizzati per informare, tracciare e programmare i sistemi HVAC-R, portando attualmente a vantaggi quali il risparmio energetico e un maggior livello di comodità. Questi sistemi intelligenti apprendono, attraverso algoritmi di machine learning, dove e quanto calore o aria distribuire in ciascuna sezione dell'edificio.

Per istruire questi algoritmi e avere impianti sempre più robusti e efficienti, le aziende hanno bisogno di fare vari prototipi e esperimenti per migliorare i sistemi. Il modo migliore per farlo è utilizzare software di simulazione. [3]

Non soltanto consentono ai produttori di impianti di ottimizzare le performance, bensì anche di individuare il metodo più efficace per instaurare un ambiente sicuro in cui ridurre al minimo la diffusione di particelle dannose. [4]

2 Edge computing

Il numero di dispositivi connessi all'IoT al mondo è previsto che raggiungerà i 29 miliardi entro il 2030, di cui 5 miliardi di loro saranno solo in Cina. [5]

Questo aumento di dispositivi comporterà inoltre un aumento del numero di byte di dati che dovranno essere elaborati al secondo.

Questi in passato venivano processati attraverso il cloud computing, ovvero un modello che consente l'accesso onnipresente, comodo e su richiesta a una risorsa condivisa di risorse configurabili (ad esempio: reti, server, servizi, ecc.). [6]

Il processo di elaborazione dei dati con questo metodo ha portato però tre problematiche [7] [8]:

- **Real-time:** Se si aggiungono un gran numero di sensori e dispositivi periferici, una grande quantità di dati viene trasmessa al cloud per essere elaborata, il volume di trasmissione dei dati intermedio aumenterà notevolmente. In alcuni scenari di applicazione che richiedono un feedback in tempo reale (come ad esempio il traffico, la videosorveglianza, ecc.), il cloud computing non sarà in grado di soddisfare le esigenze in tempo reale.
- **Sicurezza e privacy:** utilizzando gli smartphone e varie applicazioni, questi richiederanno dati dell'utente, inclusi quelli sensibili. Ciò comporta un alto rischio di violazione della privacy o di attacchi informatici quando questi vengono caricati nel cloud.
- **Consumo di energia:** il numero di dispositivi intelligenti continua ad aumentare e il consumo energetico dei data center è aumentato notevolmente. Migliorare l'efficienza dell'uso del consumo energetico del cloud computing, invece di trovare altre soluzioni, non potrà mai soddisfare la crescente domanda di consumo energetico dei dati.

Per risolvere questi problemi negli ultimi anni nell'industria si è sempre più diffuso l'uso dell'edge computing.

La differenza principale tra cloud computing e edge computing è la posizione in cui si verifica l'elaborazione dei dati.

Nel cloud computing, i dati vengono elaborati su un server cloud centrale, che di solito si trova lontano dalla fonte di informazioni.

L'Edge computing invece si verifica principalmente direttamente sui dispositivi a cui sono collegati i sensori o su un dispositivo gateway che si trova in prossimità dei sensori, i dati quindi vengono elaborati sul sensore o sul dispositivo stesso

senza spostarsi da nessun'altra parte. [9]

Characteristics	Cloud	Edge/Fog
Location	Centralized.	Distributed in different geographical locations.
Capacity	Very large size data centers.	A lot of small size fog nodes that form a large system.
Energy consumption	High.	Low.
Latency	High, because of the large distance between the end users and the cloud.	Low, because of the short distance between the edge and the end users.
Proximity of resources and services	Far from end users, in the data centers.	Close to end users, in the edge of network.
Applications	Supports applications that does not require short delay. Mainstream cloud applications.	Support most types of applications. VR. Smart homes. Smart vehicles. Smart cities.
Service Cost	High, due to the monopoly of data centers by big companies.	Lower cost, due to the processing of data at the network edge.

Figura 1: Tabella comparativa delle differenza tra l'utilizzo dell'edge computing e del cloud computing [10]

Nel contesto dell'HVAC-R, i nuovi sistemi rappresentano ambienti in cui grandi quantità di dati vengono generati in tempo reale. Il monitoraggio e il controllo di questi sistemi richiedono potenti strumenti di analisi e un'ampia quantità di informazioni digitali. Inoltre, dispositivi edge e IoT possono essere impiegati per sostenere sia la raccolta dei dati che l'analisi iniziale per identificare le tendenze di utilizzo.

L'analisi dei sistemi HVAC-R tramite edge computing offre l'opportunità di sfruttare l'infrastruttura dei dispositivi IoT già presente in molti edifici. Le capacità dell'edge computing supportano inoltre l'ottimizzazione energetica degli edifici, costituendo un'alternativa affidabile ai metodi di ottimizzazione tradizionali o manuali. [11] All'interno di questa tesi, assieme allo studio associato di ingegneri Vis Engineering, si è voluto testare se il nuovo micro-PLC Arduino Opta è utilizzabile come dispositivo edge nell'ambito delle simulazioni di ambienti e sistemi HVAC-R.

2.1 FAR-Edge Reference Architecture

Una "Reference Architecture" (Architettura di Riferimento) è un documento o un insieme di documenti che propongono strutture, prodotti e servizi raccomandati per aiutare a trovare una soluzione. Un'architettura di riferimento incorpora le migliori pratiche accettate dal settore, suggerendo di solito il metodo di consegna o le tecnologie ottimali specifiche.

Per questa ricerca e analisi si è scelto di ispirarsi all'architettura sviluppata dal progetto FAR-Edge [12].

La FAR-Edge RA è caratterizzata da due concetti principali: scopes (o ambiti) e tiers (o livelli).

Gli scopes sono gli elementi in un impianto o sistema industriale come i dispositivi, le macchine e i controllori. Invece i tiers forniscono informazioni sui componenti del sistema e sulle relazioni tra di essi [13].

I componenti nella FAR-Edge RA sono divisi in tre diversi layers (o strati):

- Field layer: lo strato più basso dell'architettura, composto da dispositivi differenti, che vanno da macchine intelligenti a semplici sensori e attuatori.
- Edge layer: lo strato composto da dispositivi di elaborazione con la funzione di fare da gateway tra il field layer e il cloud layer.
- Cloud layer: consiste nel server cloud che ha la funzione di eseguire il software responsabile della pianificazione, monitoraggio e gestione delle risorse, occupandosi dell'esecuzione degli altri componenti dell'architettura.

Data la limitata potenza di calcolo dell'Arduino Opta, è stato possibile sperimentarne l'uso solo come dispositivo all'interno del field layer e dell'edge layer.

Nel primo strato, l'Opta è stato impiegato all'interno di un circuito per simulare il comportamento di una termoresistenza. Mentre, nell'edge layer, è stato utilizzato come dispositivo di calcolo accoppiato al digital twin di una pompa di calore per un'analisi più approfondita delle sue funzionalità.

3 Arduino Opta

L'Arduino Opta è un PLC prodotto e creato da una collaborazione tra le aziende Finder e Arduino. Rilasciato all'inizio del 2023, è anche definito come Relè Logico Programmabile (PLR) a causa della sua minore potenza di calcolo e prestazioni, ma offre anche un prezzo più contenuto rispetto ad altri PLC di maggiore qualità presenti sul mercato.

Nella tabella 1 sono indicati i tre modelli diversi a seconda della connettività del dispositivo. [14]

L'Opta ha un design affidabile che opera a temperature industriali (-20°C a +50°C) grazie a un'architettura a doppio core che non richiede alcun sistema di raffreddamento esterno.

All'interno del dispositivo troviamo il processore che è un dual core STM32H747 strutturato in un Cortex® M7 che arriva fino a 480 MHz e un Cortex® M4 che invece raggiunge solo i 240 MHz. Invece la memoria è composta da 2 MB di memoria programma e 1 MB di SDRAM.

Può essere montato su un sistema di fissaggio a guida DIN, offrendo un accesso rapido a tutte le I/O.

Come input il PLC ne possiede 8 configurabili sia digitali che analogici con un range da 0 a 24 Volt, invece come output ha 4 relè che supportano una corrente massima di 10 Ampere.

Tuttavia, ciò che distingue l'Arduino Opta in modo significativo è proprio il fatto di esser prodotto e sviluppato da Arduino. Questo significa avere una comunità di supporto molto attiva e varie librerie dietro ma, soprattutto, nella capacità di essere programmato utilizzando il linguaggio Arduino, basato sul C++, oltre ad altri linguaggi di programmazione per PLC conformi allo standard IEC-61131-3. Questi includono il Ladder Diagram (LD), Function Block Diagram (FBD), Sequential Function Chart (SFC), Structured Text (ST) e Instruction List (IL).

L'azienda ha messo a disposizione degli utenti due IDE da utilizzare a seconda del linguaggio scelto, l'IDE normale Arduino (Arduino IDE) e una creata apposta per i PLC (Arduino PLC IDE).

Una delle potenziali applicazioni del dispositivo è nei sistemi HVAC-R. Ad es-



Figura 2: Arduino Opta 8A.04-320

Name	Opta Lite (8A.04-300)	Opta Plus(8A.04-310)	Opta Advanced (8A.04-320)
Ethernet support	10/100BASE-T Port	10/100BASE-T Port	10/100BASE-T Port
RS-485	N/A	Half-duplex	Half-duplex
Wi-Fi	N/A	N/A	802.11 b/g/n
Bluetooth	N/A	N/A	Bluetooth® Low Energy

Tabella 1: Le tre varianti dell'Arduino Opta

empio può essere utilizzato per controllare e monitorare vari parametri come temperatura, umidità, pressione e portata nei sistemi. [15]

4 Opta nel field layer

Il concetto fondamentale alla base della simulazione hardware-in-the-loop consiste nell'integrare una porzione di hardware reale all'interno del ciclo di simulazione durante la fase di sviluppo di un sistema. Questo approccio evita di limitare il test dell'algoritmo di controllo a un mero modello matematico teorico. Ad esempio, è noto che modellare gli attuatori tramite software rappresenta una sfida, pertanto è possibile incorporarli nel ciclo di simulazione per migliorare l'accuratezza dell'analisi. Un ulteriore vantaggio è dato dalla possibilità di condurre test e valutazioni del sistema in tempo reale, assicurando così che il sistema di controllo incorporato possa fornire l'input di controllo entro l'intervallo di campionamento desiderato. Questo aspetto riveste un'importanza cruciale poiché l'assenza di un segnale di controllo al termine dell'intervallo di campionamento può influenzare la stabilità complessiva del sistema. [16]

Avendo già a disposizione un software che consente la simulazione delle variazioni di temperatura in un ambiente specifico, lo studio Vis Engineering aveva l'esigenza di integrare un sistema fisico in grado di emulare il comportamento di una termoresistenza all'interno di quest'ambiente, al fine di creare un loop di retroazione completo.

Sfruttando questa opportunità, è stata presa la decisione di mettere alla prova le capacità dell'Arduino Opta all'interno di un circuito progettato per simulare in modo accurato il funzionamento di una termoresistenza.

In particolare il suo compito è quello di leggere in input la tensione V_{adc} e da essa ricavare la temperatura misurata.

Per quanto riguarda la simulazione della termoresistenza, l'obiettivo è stato quello di svilupparne un sensore virtuale, conosciuto come 'virtual sensor' [17]. Questo sistema si basa sull'utilizzo di informazioni ottenute da altre misurazioni o dati (nel nostro caso, la temperatura simulata tramite il software), al fine di emularne il comportamento che il sensore avrebbe in un ambiente reale. Poiché l'Opta, essendo privo di uscite analogiche, non era idoneo per questo scopo, è stato necessario impiegare una scheda Arduino Uno R3. [18]

Per simulare la termoresistenza è stato scelto di basarsi su una di tipo NTC (Negative Temperature Coefficient) [19], la quale in un intervallo di temperature tra i -60°C e i 30°C può essere approssimata con la seguente caratteristica della re-

sistenza in funzione della temperatura:

$$\begin{cases} R = e^{aT^2 + bT + c} \\ a = 1.332 * 10^{-4} \\ b = -0.01334 \\ c = 10.20102 \end{cases} \quad (1)$$

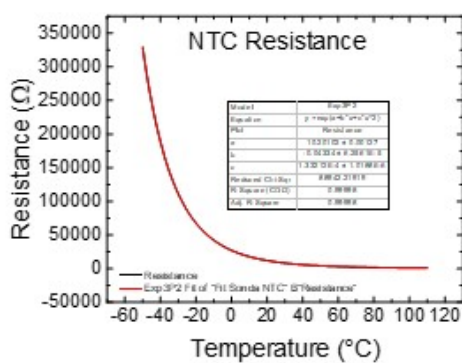


Figura 3: Relazione tra la resistenza di una termoresistenza NTC e la temperatura

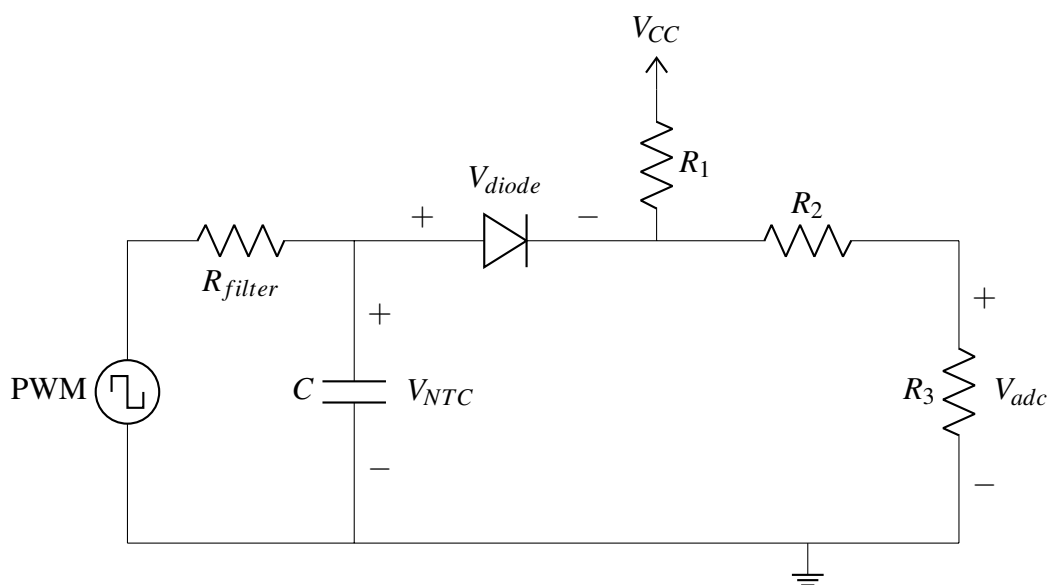


Figura 4: Circuito utilizzato per simulare il funzionamento di una termoresistenza NTC: $R_1 = 10k\Omega$, $R_2 = 4.7k\Omega$, $R_3 = 1M\Omega$, $R_{filter} = 1k\Omega$, $C = 1\mu F$, $V_{cc} = 3.3V$

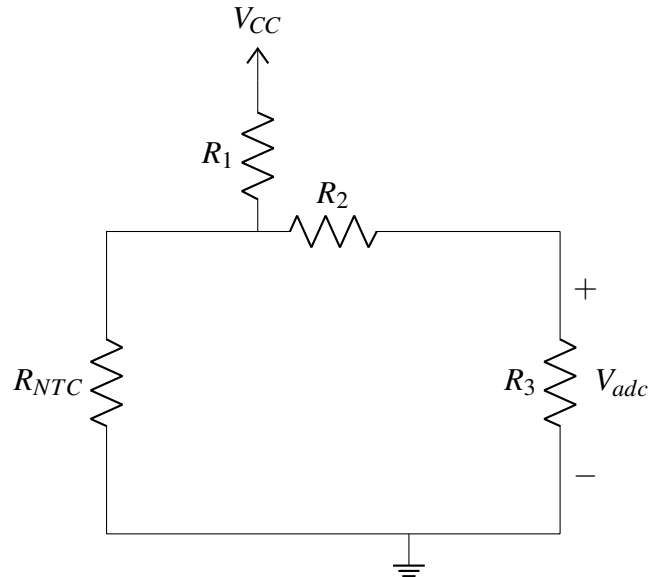


Figura 5: Circuito da simulare

Il circuito illustrato nella figura 4 opera secondo la seguente modalità: Utilizzando l'Arduino Uno, viene effettuato il calcolo della resistenza che caratterizzerebbe l'NTC, dato un certo valore di temperatura in ingresso. Questa resistenza è calcolata utilizzando l'equazione 1. Inoltre, viene stimata la caduta di tensione che si verrebbe a creare a causa di tale resistenza all'interno del circuito. La formula che descrive la caduta di tensione è la seguente:

$$V_{NTC} = V_{cc} \frac{R_p}{R_p + R_1} \quad (2)$$

Dove R_p rappresenta il valore del parallelo tra la resistenza R_{NTC} e la serie $R_2 + R_3$ ed è calcolato tramite la formula:

$$R_p = \frac{R_{NTC}(R_2 + R_3)}{R_{NTC} + R_2 + R_3} \quad (3)$$

Questa tensione sarà generata come segnale in uscita dalla scheda e introdotta nel circuito. Tuttavia, va notato che poiché l'Arduino Uno non dispone di uscite analogiche, si è fatto ricorso a un'uscita PWM (modulazione a larghezza di impulso)

combinata con un filtro RC passa-basso [20]. Inoltre, al fine di prevenire disturbi causati dall'accumulo di carica nell'alimentazione, è stato integrato un diodo nel circuito per evitare che il condensatore venga caricato dalla tensione di alimentazione V_{cc} .

L'Arduino Opta, invece, è responsabile della lettura della tensione V_{adc} . Da essa, possiamo ricavare il valore di tensione ai capi della termoresistenza simulata utilizzando la formula:

$$V_{NTC} = V_{ADC} \frac{R_2 + R_3}{R_3} \quad (4)$$

Per ottenere una maggiore accuratezza dei risultati, nel software è stata sottratta la caduta di tensione dovuta al diodo (V_{diode}) al risultato.

Una volta trovato il valore di V_{NTC} , è possibile ottenere la resistenza simulata R_{NTC} invertendo le equazioni 2 e 3.

Infine, invertendo l'equazione 1, è possibile ricavare il valore della temperatura T misurata, "chiudendo" così il loop di simulazione.

Al momento, il collegamento tra il software che simula la temperatura e il circuito hardware non è ancora stato implementato. Attualmente, la temperatura da simulare sull'Arduino Uno viene inserita manualmente attraverso la console, ma in futuro potrà essere implementato.

Inoltre nel caso in cui venisse rilasciata un'espansione per l'Arduino Opta che includa un'uscita analogica, ciò potrebbe permettere di gestire l'intero processo tramite l'Arduino Opta senza la necessità di utilizzare una seconda scheda, semplificando il tutto.

5 Opta nell'edge layer

Il Digital Twin, o gemello digitale, consiste in una rappresentazione virtuale di un oggetto o sistema fisico. Questa rappresentazione viene costantemente aggiornata in tempo reale grazie ai dati provenienti dai sensori, e attraverso programmi di simulazione, fornisce informazioni riguardanti il sistema e la sua evoluzione rispetto a specifici input. [21]

I gemelli digitali hanno il potenziale di stimare accuratamente eventi futuri, il che rappresenta una grande combinazione nel mondo degli affari e nella vita quotidiana delle persone comuni.

Sebbene la tecnologia dei gemelli digitali sia specificamente concepita per simulare esperienze future, calcolare il contesto e sviluppare una catena di risultati, può anche aiutare il calcolo dei dispositivi edge ad ottimizzare il loro algoritmo in tempo reale, creando un ambiente progressivamente più sicuro in ogni singolo momento. Ad esempio, se un veicolo a guida autonoma si trova di fronte a cambiamenti drastici delle condizioni meteorologiche, a ingorghi di traffico appena generati o a modifiche di percorso, possedere un gemello digitale sviluppato del terreno e del veicolo può aiutare le tecnologie di calcolo a prevedere quali cambiamenti deve attuare per rendere il viaggio sicuro e di successo. [23]

Invece prendendo per esempio l'ambito dell'HVAC-R di cui si occupa l'azienda, un gemello digitale di una pompa di calore potrebbe consentire di simulare e prevedere il suo funzionamento in risposta a variazioni di temperatura esterna, flussi d'aria e carichi termici. Questo permetterebbe agli ingegneri di ottimizzare l'efficienza dell'impianto, prevedere eventuali necessità di manutenzione e anticipare situazioni che richiedono interventi tempestivi. [22]

Questo approccio è stato adottato anche nell'ambito del nostro progetto di valutazione dell'Arduino Opta come dispositivo nell'edge layer. In questo caso, il dispositivo è stato integrato con il gemello digitale di una pompa di calore, fornito dall'azienda Visengineering, per valutare l'efficienza e la capacità del dispositivo nel contesto operativo reale.

I parametri in ingresso verranno trasmessi al PLC tramite una HMI (Human Machine Interface). Il PLC avrà quindi il compito di risolvere un polinomio composto da centinaia di coefficienti, ottenuti grazie al digital twin, per effettuare le opportune operazioni di controllo e gestione della pompa di calore.

Per realizzare il progetto, si è fatto uso di LabView[24] per realizzare una semplice HMI, tramite la quale l'utente può inserire determinati parametri e interagire con la simulazione. I quattro parametri inseribili sono:

- la temperatura esterna all'impianto (T_{source})
- la temperatura desiderata scelta dall'utente (T_{user})
- l'umidità relativa dell'aria, ovvero il rapporto tra la massa del vapore acqueo contenuto nell'aria e la massima quantità di vapore contenibile (rh)
- il carico parziale, che indica la capacità totale della pompa che si vuole utilizzare (plr)

Per stabilire la comunicazione tra il PC con LabView e il PLC, è stato utilizzato un collegamento Modbus seriale [25]. Questo collegamento è stato realizzato tramite un adattatore USB a RS-485, che consente la trasmissione dei dati tra i due dispositivi.

Nel PLC vengono definiti i quattro Holding Registers specifici in cui i coefficienti verranno salvati. Attraverso questa configurazione, i parametri necessari vengono inviati dall'interfaccia LabView al PLC, che a sua volta li memorizza nei rispettivi Holding Registers. L'Arduino Opta può quindi accedere ai coefficienti dai registri e utilizzarli per le operazioni richieste all'interno dell'edge layer.

L'Opta quindi eseguiti i calcoli ritornerà in uscita alla HMI due coefficienti salvati in altri due Holding Registers:

- il trasferimento di calore fornito dalla pompa per arrivare alle condizioni desiderate (Q_h)
- la pressione alla quale verrà sottoposta la pompa (P_{abs})

I coefficienti del polinomio ricavati dal digital twin della pompa di calore sono salvati all'interno del codice Arduino come file header in c++.

Durante lo svolgimento del progetto questo file è stato caricato manualmente nel PLC. Ma in futuro si farà in modo di caricarlo direttamente dal software nel quale è simulato il digital twin della pompa di calore.

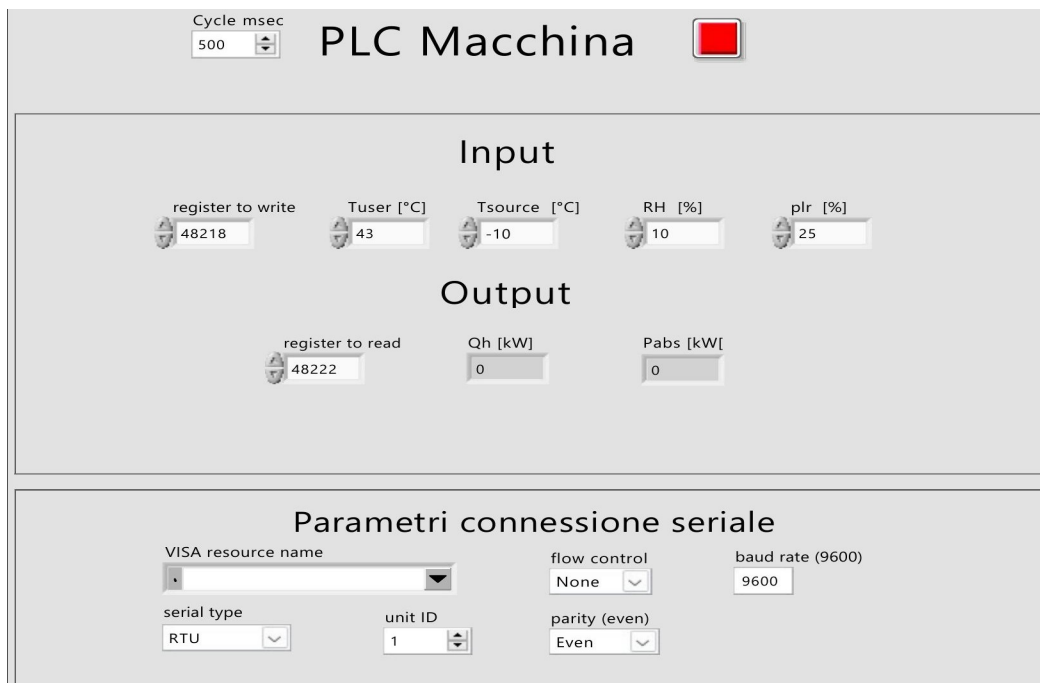


Figura 6: HMI realizzata in LabView per comunicare con l'Arduino Opta tramite collegamento Modbus

6 Conclusione

In conclusione, attraverso l'analisi e l'implementazione dei progetti discussi, è stato dimostrato che l'Arduino Opta rappresenta un valido e versatile strumento nell'ambito dell'edge computing. I risultati ottenuti hanno solidamente sostenuto l'ipotesi iniziale: l'Arduino Opta può essere impiegato con successo sia come dispositivo di sensore nel field layer che come unità di elaborazione nell'edge layer. L'integrazione dell'Opta all'interno di simulazioni di sistemi HVAC-R ha confermato la sua capacità di svolgere ruoli cruciali nella gestione e nell'ottimizzazione di complessi processi industriali.

L'utilizzo del PLC per simulare il comportamento di una termoresistenza ha dimostrato la sua adattabilità come sensore nel field layer. L'Opta è stato in grado di leggere in modo preciso e affidabile i dati simulati, facilitando una retroazione in tempo reale che può essere fondamentale per garantire il controllo e il monitoraggio accurato dei sistemi termici.

Allo stesso modo, l'integrazione dell'Opta nell'edge layer attraverso la comunicazione Modbus seriale ha evidenziato la sua efficacia come dispositivo di elaborazione. Il suo ruolo nell'esecuzione di calcoli complessi e nell'elaborazione dei dati ottenuti dal digital twin di una pompa di calore ha mostrato la sua capacità di partecipare attivamente al processo decisionale e all'ottimizzazione dei sistemi industriali.

References

- [1] <https://www.oracle.com/internet-of-things/what-is-iot/>
- [2] <https://thermalcontrolmagazine.com/cover-story/smart-hvacr-systems/>
- [3] <https://www.gtisoft.com/blog-post/machine-learning-simulation-hvacr-industry/>
- [4] <https://www.ansys.com/blog/how-hvac-simulation-can-improve-safety>
- [5] L. S. Vailshery, "Number of IoT connected devices worldwide 2019-2021, with forecasts to 2030" in <https://www.statista.com/statistics/1183457/iot-connected-devices-worldwide/>
- [6] P. Mell and T. Grance, The NIST definition of cloud computing <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/SP/nistspecialpublication800-145.pdf>
- [7] K. Cao, Y. Liu, G. Meng and Q. Sun, "An Overview on Edge Computing Research," in IEEE Access, vol. 8, pp. 85714-85728, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2991734.
- [8] J. Pan and J. McElhannon, "Future Edge Cloud and Edge Computing for Internet of Things Applications," in IEEE Internet of Things Journal, vol. 5, no. 1, pp. 439-449, Feb. 2018, doi: 10.1109/JIOT.2017.2767608.
- [9] V. Lavecchia, "Caratteristiche e Differenza tra Cloud, Fog e Edge Computing", in <https://vitolavecchia.altervista.org/caratteristiche-e-differenza-tra-cloud-fog-e-edge-computing/>
- [10] M. Laroui, B. Nour, H. Moun gla, M. A. Cherif, H. Afifi, M. Guizani, "Edge and fog computing for IoT: A survey on current research activities & future directions, Computer Communications", in <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140366421003327>
- [11] Petri I, Rana O, Rezgui Y, Fadli F. Edge HVAC Analytics. Energies. 2021; 14(17):5464. <https://doi.org/10.3390/en14175464>

- [12] Inès Sittòn-Candanedo, R. S. Alonso, S. Rodríguez-González, J. A. G. Coria, and F. De La Prieta, "Edge Computing Architectures in Industry 4.0: A General Survey", IoT Digital Innovation HUB, University of Salamanca, Salamanca, Spain
- [13] FAR-EDGE Project: "FAR-EDGE Architecture and Components Specification"
- [14] Arduino Opta datasheet:
<https://docs.arduino.cc/static/e55c57a983429e2febd160185485d3b1/AFX00001-AFX00002-AFX00003-datasheet.pdf>
- [15] <https://www.arduino.cc/pro/hardware-arduino-opta/>
- [16] M. Basic, "On hardware-in-the-loop simulation," Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control, Seville, Spain, 2005, pp. 3194-3198, doi: 10.1109/CDC.2005.1582653.
- [17] Lichuan Liu, S. M. Kuo and M. Zhou, "Virtual sensing techniques and their applications," 2009 International Conference on Networking, Sensing and Control, Okayama, Japan, 2009, pp. 31-36, doi: 10.1109/ICNSC.2009.4919241.
- [18] <https://docs.arduino.cc/static/182b8c4f8af5d1a952d82bd6486dd9a7/A000066-datasheet.pdf>
- [19] <https://www.qtisensing.com/wp-content/uploads/Negative-Temperature-Coefficient-Thermistors.pdf>
- [20] <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/low-pass-filter-a-pwm-signal-into-an-analog-voltage/>
- [21] Singh, Maulshree, Evert Fuenmayor, Eoin P. Hinchy, Yuansong Qiao, Niall Murray, and Declan Devine. 2021. "Digital Twin: Origin to Future" Applied System Innovation 4, no. 2: 36. <https://doi.org/10.3390/asi4020036>
- [22] <https://www.challenge.org/insights/digital-twin-edge-computing/>

- [23] B. Fan, Y. Wu, Z. He, Y. Chen, T. Q. S. Quek and C. -Z. Xu, "Digital Twin Empowered Mobile Edge Computing for Intelligent Vehicular Lane-Changing," in IEEE Network, vol. 35, no. 6, pp. 194-201, November/December 2021, doi: 10.1109/MNET.201.2000768.
- [24] <https://www.ni.com/it-it/shop/labview.html>
- [25] <https://www.ni.com/it-it/shop/seamlessly-connect-to-third-party-devices-and-supervisory-system/the-modbus-protocol-in-depth.html>

Ringraziamenti

Innanzitutto volevo ringraziare il professore Mirco Rampazzo, che oltre ad avermi guidato nella stesura di questa tesi ha anche fatto da ponte per presentarmi all'azienda Vis Engineering.

Inoltre volevo ringraziare gli ingegneri Andrea Cervato e Riccardo Brignoli che mi hanno aiutato molto nel mio periodo di tirocinio.

Infine voglio ringraziare anche i miei genitori e la mia ragazza che mi hanno sostenuto in questi anni di università.