



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea magistrale in Ingegneria Elettronica

**LINEA DI MONTAGGIO E TESTING SECONDO I4.0:
DALL'ANALISI MULTICRITERIO ALL'INTERAZIONE UOMO-
MACCHINA**

**Assembly and testing line according to I4.0: from multi-criteria
analysis to human-machine interaction**

Relatore

Prof. Ennio Gambi

Correlatori

Prof.ssa Susanna Spinsante

Ing. Andrea Andreucci

Tesi di Laurea di

Giorgio Mazzoni

Anno Accademico 2023/2024

INDICE

INTRODUZIONE	1
CAPITOLO 1: L'AZIENDA E IL PROGETTO	
1.1 <u>Presentazione dell'azienda <i>VISIONAR S.r.l.</i></u>	<u>5</u>
1.2 <u>Obiettivo del progetto di tesi</u>	<u>7</u>
CAPITOLO 2: DESCRIZIONE DELLA LINEA DI ASSEMBLAGGIO	
2.1 <u>Struttura generale della linea di assemblaggio</u>	<u>9</u>
2.2 <u>Gestione e tracciabilità del prodotto</u>	<u>15</u>
CAPITOLO 3: ANALISI MULTICRITERIO	
3.1 <u>L'analisi multicriterio per la scelta della configurazione ottima</u>	<u>19</u>
3.1.1 <u>Il Weighted Sum Model (WSM)</u>	<u>20</u>
3.2 <u>Analisi di progetto e delle caratteristiche dei dispositivi di lettura</u>	<u>24</u>
3.2.1 <u>Analisi e selezione dei dispositivi di lettura</u>	<u>27</u>
3.3 <u>Analisi delle configurazioni individuate e dei criteri di valutazione</u>	<u>31</u>
3.3.1 <u>I criteri di valutazione</u>	<u>33</u>
3.4 <u>Implementazione del metodo di analisi multicriterio</u>	<u>37</u>
CAPITOLO 4: FOCUS SULLA POSTAZIONE AUTOMATICA PRESA IN ESAME	
4.1 <u>Descrizione della postazione automatica presa in esame</u>	<u>45</u>
4.1.1 <u>Componenti principali e le loro funzioni</u>	<u>47</u>
4.1.1.1 <u>Modulo di assemblaggio NC</u>	<u>47</u>
4.1.1.2 <u>Sistema di monitoraggio dei processi maXYmos NC</u>	<u>47</u>
4.1.1.3 <u>Servoamplificatore IndraDrive</u>	<u>51</u>
4.1.1.4 <u>Display Interface Module (DIM)</u>	<u>53</u>
4.2 <u>Integrazione del progetto con il banco automatico</u>	<u>55</u>

CAPITOLO 5: TECNOLOGIE E STRUMENTI UTILIZZATI PER LA SOLUZIONE DI INTERFACCIA GRAFICA

5.1	<u>Componenti hardware</u>	57
5.1.1	<u>Switch Ethernet</u>	58
5.1.2	<u>Raspberry Pi 4 Model B</u>	59
5.1.3	<u>Display touchscreen</u>	63
5.2	<u>Software utilizzati</u>	66
5.2.1	<u>Raspberry Pi Imager</u>	66
5.2.2	<u>PuTTY</u>	67
5.2.3	<u>Software VNC</u>	68
5.2.3.1	<u>RealVNC</u>	70
5.2.3.2	<u>TightVNC</u>	70

CAPITOLO 6: SVILUPPO OPERATIVO E TEST

6.1	<u>Sviluppo operativo della soluzione di interfaccia grafica</u>	73
6.1.1	<u>Installazione e configurazione “headless” del Raspberry Pi 4</u>	73
6.1.2	<u>Personalizzazione del sistema operativo</u>	79
6.1.3	<u>Configurazione e collegamento del display touchscreen</u>	84
6.2	<u>Validazioni preliminari con PC Windows</u>	87
6.2.1	<u>Configurazione della rete locale di prova</u>	89
6.2.1.1	<u>Assegnazione di un indirizzo IP statico al Raspberry Pi</u>	89
6.2.1.2	<u>Configurazione del sistema VNC</u>	91
6.2.2	<u>Test di verifica della connessione VNC</u>	95
6.2.2.1	<u>Automatizzazione del processo di connessione</u>	96
6.3	<u>Integrazione del sistema con la rete della linea di produzione</u>	100

CONCLUSIONI	103
--------------------	------------

BIBLIOGRAFIA	107
---------------------	------------

INTRODUZIONE

Questo elaborato si colloca nel campo delle soluzioni tecnologiche avanzate e alternative a basso costo per l'ottimizzazione di ambienti industriali, dimostrando come dispositivi relativamente economici possano essere impiegati in contesti industriali per migliorare l'efficienza dei processi produttivi nell'interazione uomo-macchina all'interno del contesto dell'industria 4.0.

Le macchine sono elementi che supportano l'essere umano nella realizzazione di diverse attività per ragioni di efficienza, precisione e costo. La società moderna sta vivendo una nuova rivoluzione industriale; tale rivoluzione si concentra sui progressi nelle tecnologie dell'informazione e della comunicazione (ICT), come i sistemi cyber-fisici (CPS) e l'Internet delle cose (IoT) [1].

È quindi necessario essere in grado di sviluppare e saper adottare soluzioni efficienti, efficaci, ma anche economicamente sostenibili.

Il progetto descritto in questa tesi è stato sviluppato durante l'esperienza di tirocinio svolta presso l'azienda *VISIONAR S.r.l.*

Il lavoro che di seguito viene presentato si è integrato con un progetto aziendale nella fase di progettazione, realizzazione e gestione dei dati di produzione di un'architettura di una linea di assemblaggio su richiesta di un cliente.

Per motivi di riservatezza dell'azienda e del cliente stesso, all'interno dell'elaborato non verranno fornite informazioni sul cliente e informazioni troppo dettagliate sul progetto realizzato dal team di *VISIONAR S.r.l.*

Tuttavia, verranno comunque presentate le informazioni necessarie per aver un quadro generale del contesto all'interno del quale si è andato ad integrare il progetto presentato in questa tesi.

La linea di assemblaggio in questione è composta da 16 postazioni, tra manuali e automatiche, che comunicano con la postazione di controllo centrale tramite protocolli Ethernet ed EtherCAT.

Il lavoro di tirocinio si articola attorno a due temi principali:

- 1) Gestione e tracciabilità del prodotto lungo la linea: questa parte del lavoro è focalizzata sull'individuazione della configurazione ottimale tra diverse opzioni di dispositivi, come lettori a camera e scanner, mediante un'analisi multicriterio (MCA). Il compito di questi dispositivi è garantire la gestione e la tracciabilità del prodotto lungo la linea di montaggio, assicurando un'identificazione precisa e affidabile in ogni fase del processo produttivo. Utilizzando Microsoft Excel come strumento di supporto, l'analisi multicriterio ha permesso di valutare le varie configurazioni disponibili, individuando la soluzione migliore per soddisfare i requisiti richiesti dal progetto.
- 2) Progettazione di un'interfaccia grafica alternativa: la seconda parte del lavoro riguarda la realizzazione e l'implementazione di un'interfaccia grafica, economica e funzionale, basata sul single-board computer Raspberry Pi 4 Model B e una connessione VNC (Virtual Network Computing). La soluzione proposta si presenta come alternativa più accessibile al display, per il monitoraggio del processo fornito dal produttore del macchinario. Nel corso della tesi, il Raspberry Pi viene presentato come un piccolo ma potente computer in grado di svolgere molteplici funzioni, rappresentando quindi una soluzione ottimale per gli scopi che si intendeva perseguire.

Per quanto riguarda la gestione e tracciabilità del prodotto, la linea richiede un sistema efficace per identificare e tracciare i pezzi lungo tutte le fasi di lavorazione. Attraverso un'analisi multicriterio sono state valutate diverse opzioni di configurazione, al fine di individuare quella che più rispettava i criteri di valutazione delle specifiche di progetto. In parallelo, il progetto ha affrontato un'esigenza specifica del cliente: monitorare e interagire in "tempo reale" con il processo produttivo di una specifica postazione automatica. Il focus è quindi stato posto su un banco che coinvolge l'utilizzo di una pressa elettromeccanica forza-spostamento ed il suo "Measuring and Evaluation Module" (MEM).

Bisogna specificare che, all'interno della linea di assemblaggio, la stessa macchina automatica è presente in altre due postazioni e, di conseguenza, il lavoro svolto per un banco può essere applicato anche agli altri due.

L'alternativa grafica è stata realizzata con un Raspberry Pi ed un display touchscreen, che ha consentito agli operatori presenti nella postazione della pressa elettromeccanica di poter monitorare in “tempo reale” e interagire con il processo produttivo della macchina direttamente dalla postazione.

Il lavoro di tesi è suddiviso in capitoli come di seguito riportato:

- Il “Capitolo 1” presenta l'azienda *VISIONAR S.r.l.* e il contesto generale in cui si inserisce il tirocinio, delineandone gli obiettivi principali.
- Il “Capitolo 2” descrive la struttura generale della linea di produzione, con particolare attenzione alla gestione e tracciabilità del prodotto.
- Il “Capitolo 3” approfondisce l'analisi multicriterio utilizzata per selezionare la configurazione ottimale dei dispositivi di lettura.
- Il “Capitolo 4” si concentra sull'approfondire le caratteristiche della postazione automatica presa in considerazione e il ruolo dei diversi componenti coinvolti.
- Il “Capitolo 5” è dedicato alle tecnologie e agli strumenti utilizzati per la realizzazione di un'interfaccia grafica alternativa, con un focus sulle specifiche del Raspberry Pi 4 Model B, del display touchscreen e dei software impiegati durante lo sviluppo del progetto.
- Nel “Capitolo 6” viene presentato in dettaglio lo sviluppo operativo della soluzione partendo dall'installazione e la configurazione del Raspberry Pi, passando per i test preliminari effettuati con un PC dotato di sistema operativo Windows per validare la soluzione proposta, fino all'integrazione della soluzione alla rete industriale della linea di produzione evidenziando le modifiche necessarie.
- Infine, il lavoro si conclude con una sintesi dei risultati ottenuti e con un'analisi delle possibili aree di miglioramento.

CAPITOLO 1

L'AZIENDA E IL PROGETTO

Il seguente capitolo introduce la realtà aziendale presso cui si è svolto il progetto oggetto della presente tesi e il contesto generale in cui si inserisce il tirocinio, delineandone gli obiettivi principali. Le informazioni presenti in questo capitolo riguardanti l'azienda provengono dal sito ufficiale di *VISIONAR* [2].

1.1 Presentazione dell'azienda VISIONAR S.r.l.

VISIONAR S.r.l. (Figura 1.1) è una realtà italiana che progetta e sviluppa sistemi innovativi e soluzioni ingegneristiche su misura. La sede operativa si trova a Osimo (AN).



Figura 1.1: Logo dell'azienda VISIONAR S.r.l.

VISIONAR è un'azienda altamente specializzata nella fornitura di soluzioni ingegneristiche su misura, con un focus sull'innovazione e sull'ottimizzazione dei processi produttivi. L'azienda si occupa di seguire l'intero ciclo di vita dei progetti, a partire dall'analisi di fattibilità tecnico-economica, passando per la progettazione, fino alla realizzazione dei prototipi, al testing e alla messa a punto finale. La collaborazione continua con le università consente all'azienda di sfruttare tecnologie all'avanguardia e metodologie avanzate, garantendo soluzioni innovative e personalizzate.

La filosofia aziendale si basa su due principi fondamentali: maggiore efficienza e tempi ridotti, offrendo così ai clienti soluzioni per migliorare il controllo, accelerare le operazioni, ridurre i costi e semplificare la gestione dei processi produttivi e dei reparti R&D.

L'azienda progetta e realizza sistemi di misura e collaudo personalizzati, sviluppando internamente ogni fase del progetto per offrire ai clienti soluzioni chiavi in mano con un

servizio di assistenza dedicato. Tra le soluzioni proposte sono presenti banchi prova per il controllo qualità, per i laboratori di ricerca e sviluppo e per test di fine linea.

L'offerta si estende a numerosi settori, tra cui riscaldamento domestico e industriale, test sui veicoli e sviluppo di veicoli elettrici. L'azienda realizza banchi prova manuali, semi-automatici e automatici, soluzioni per test acustici e di vibrazioni e sistemi personalizzati per auto, moto e biciclette elettriche. L'azienda si occupa inoltre di progettazione fluidodinamica e meccatronica, modellazione e simulazione di sistemi complessi, infine di realizzazione di prototipi meccanici ed elettronici.

Visionar progetta e costruisce sistemi di misura e controllo multifunzionali con una tecnologia in grado di gestire un'ampia complessità di codici prodotto e di requisiti. I software di gestione dei sistemi prodotti dall'azienda consentono l'interconnessione con i sistemi di fabbrica secondo i principi dell'Industria 4.0 e producono una reportistica personalizzata.

Con una filosofia aziendale incentrata sull'efficienza e sull'ottimizzazione dei processi produttivi, *VISIONAR* mira a fornire soluzioni che garantiscano maggior controllo, velocità operativa e una riduzione significativa dei costi.

1.2 Obiettivo del progetto di tesi

Il lavoro di tesi, di seguito presentato, si è integrato con un progetto aziendale già avviato da *VISIONAR S.r.l.*, relativo alla progettazione, realizzazione e gestione dei dati di produzione di un'architettura di una linea di assemblaggio per un prodotto meccatronico. Questo prodotto, dato dalla combinazione di componenti meccaniche ed elettroniche, permette di ottenere prestazioni elevate.

Il lavoro di tirocinio si è articolato attorno a due obiettivi principali:

- il primo è la realizzazione di un metodo di analisi multicriterio, al fine di individuare la configurazione “ottima” dei dispositivi di lettura dei codici a barre, così da garantire una gestione e una tracciabilità del prodotto lungo tutta la linea di montaggio.
- il secondo si è concentrato sulla progettazione e implementazione di un'interfaccia grafica, economica e funzionale, per uno specifico banco automatico. La soluzione è stata raggiunta utilizzando il single-board computer Raspberry Pi 4 Model B ed una connessione VNC.

In sintesi, il lavoro di tesi ha avuto una duplice finalità: da un lato, supportare la gestione e la tracciabilità del prodotto lungo la linea di montaggio tramite un metodo analitico e strutturato di valutazione delle opzioni disponibili; dall'altro, sviluppare una interfaccia visuale alternativa, più economica, con il fine di migliorare l'efficienza e la funzionalità operativa di una specifica postazione automatica.

CAPITOLO 2

DESCRIZIONE DELLA LINEA DI ASSEMBLAGGIO

Il seguente capitolo descrive la struttura generale della linea di produzione, evidenziandone la struttura e le caratteristiche principali. Particolare attenzione viene posta sulla gestione e tracciabilità del prodotto lungo la linea, approfondendo il ruolo dei dispositivi di lettura.

Come precedentemente affermato, per motivi di riservatezza, non verranno fornite informazioni troppo dettagliate sul progetto, tuttavia, verranno comunque fornite le informazioni necessarie per aver un quadro generale del contesto nel quale si è andato ad integrare il progetto presentato in questa tesi.

2.1 Struttura generale della linea di assemblaggio

Il progetto di *VISIONAR* verte sulla progettazione, realizzazione e gestione dei dati di produzione di un'architettura di una linea di assemblaggio per un prodotto meccatronico. La linea di assemblaggio in questione è strutturata basandosi sul "one-piece flow ad U", costituita dalla successione di 16 postazioni di lavoro, che includono sia banchi manuali che automatizzati.

Il one-piece flow è una metodologia di organizzazione del sistema produttivo che mira ad ottimizzare l'efficienza e la fluidità del processo produttivo. Consiste nel far avanzare i componenti da una fase produttiva all'altra, uno alla volta, seguendo un flusso continuo. Quest'approccio riduce significativamente il tempo di attraversamento dei materiali eliminando o minimizzando le scorte intermedie, con un conseguente abbattimento dei costi legati alla gestione del magazzino e dei materiali in lavorazione. Oltre a migliorare la gestione del ciclo di produzione, un altro vantaggio del one-piece flow è la maggior flessibilità del processo produttivo, in quanto consente di rispondere più prontamente alle variazioni della domanda o alle richieste dei clienti, soprattutto in contesti che richiedono un'elevata personalizzazione o varietà di prodotti [3].

Questa metodologia permette una sensibile diminuzione della durata dei cicli produttivi, eliminando i tempi legati ad attività come la movimentazione dei prodotti [4].

In sintesi, nella linea di produzione viene caricato un pezzo alla volta; non è presente una parallelizzazione nella produzione, ma si tratta di una linea di assemblaggio in cui le varie fasi si susseguono in maniera sequenziale.

Nelle postazioni manuali vengono svolte semplici operazioni, come ad esempio quelle di montaggio e avvitatura di componenti, mentre le postazioni automatizzate sono dotate di attrezzature avanzate per operazioni più complesse, come il collaudo o l'assemblaggio preciso di componenti.

Per quanto riguarda le postazioni automatizzate è necessario fare una precisazione: le postazioni più complesse, come quelle di collaudo, hanno a bordo un PLC (Programmable Logic Controller) Beckhoff, dotato di un sistema operativo Windows (Embedded PCs). Questa architettura consente di eseguire contemporaneamente applicazioni di controllo (PLC) e applicazioni che richiedono le funzionalità di un sistema operativo completo come Windows, rappresentando quindi una soluzione più robusta e affidabile [5].

Le postazioni automatizzate che devono svolgere operazioni "più semplici", come assemblare o montare un componente, non sono dotate invece di un PLC a bordo, ma sono gestite da un PLC Master presente nella postazione di controllo centrale o postazione Server.

La linea di montaggio è caratterizzata da un controllo centralizzato, costituita da un PC Server e un PLC Master:

- Il PC Server, collegato ad uno switch Ethernet in una rete con topologia a stella, coordina tutte le operazioni lungo la linea di assemblaggio in base al codice prodotto e al piano di produzione e, inoltre, gestisce i dati provenienti dagli scanner dei codici.
- Il PLC Master, connesso tramite uno switch EtherCAT, comunica con le postazioni automatiche non dotate di PLC a bordo, ovvero le postazioni in cui è presente una pressa elettromeccanica forza-spostamento, attraverso i "Measuring and Evaluation Module" (MEM) di cui sono dotate. Tali moduli controllano e monitorano i processi specifici di questi banchi automatici.

Le postazioni automatizzate sono connesse alla postazione di controllo centrale tramite switch Ethernet e switch EtherCAT.

La linea segue una sequenza ben definita delle postazioni operative, che è riassunta in Tabella 2.1.

Numero postazione	Tipo postazione	Operazione
1	Automatica	Banco con pressa
2	Manuale	Montaggio
3	Manuale	Montaggio
4	Automatica	Banco con pressa
5	Manuale	Montaggio
6	Manuale	Avvitatura
7	Automatica	Banco con pressa
8	Manuale	Montaggio
9	Manuale	Avvitatura
10	Automatica, doppia	Collaudo
11	Manuale	Avvitatura
12	Automatica	Collaudo
13	Manuale	Avvitatura
14	Manuale	Avvitatura
15	Automatica, doppia	Collaudo
16	Manuale	Imballaggio

Tabella 2.1: Architettura della linea di assemblaggio

Per maggior chiarezza, in Figura 2.1 viene mostrato uno schema semplificato ma esplicativo dell'architettura della linea di assemblaggio.

L'intera linea di assemblaggio è caratterizzata da un controllo centralizzato e da una topologia di rete a stella, nella quale tutti le postazioni automatiche sono collegate al PC Server e al PLC Master attraverso switch Ethernet e EtherCAT. L'adozione di questi protocolli assicura una comunicazione efficiente e una gestione ottimizzata dei dati di produzione.

In base allo standard IEEE 802, il modello di riferimento di una LAN (Local Area Network) si focalizza soprattutto sull'utilizzo dei primi due livelli della pila ISO/OSI, ossia il livello fisico e il livello di data link, prevedendo anche il ricorso ai livelli superiori per la funzionalità di gestione di rete e di interconnessione tra LAN. La tecnologia di rete che si è affermata è la commutazione basata su Ethernet mentre, per quanto riguarda i livelli protocollari superiori, il protocollo TCP/IP è diventato lo standard [6].

Ethernet è una famiglia di tecnologie standardizzate per reti locali, che ne definisce le specifiche tecniche a livello fisico (ad esempio connettori, cavi, tipo di trasmissione) e a livello di collegamento di dati del modello architetturale di rete ISO/OSI [7].

Ethernet descrive come i dispositivi di rete formattano e trasmettono i dati in modo che, altre macchine sulla stessa LAN, possano riconoscere, ricevere ed elaborare le informazioni.

Il protocollo Ethernet opera ai livelli 1 e 2 del modello OSI per i sistemi di comunicazione; Ethernet fa riferimento alla tecnologia e al protocollo che viene utilizzato per la comunicazione tra i dispositivi all'interno di una stessa rete LAN.

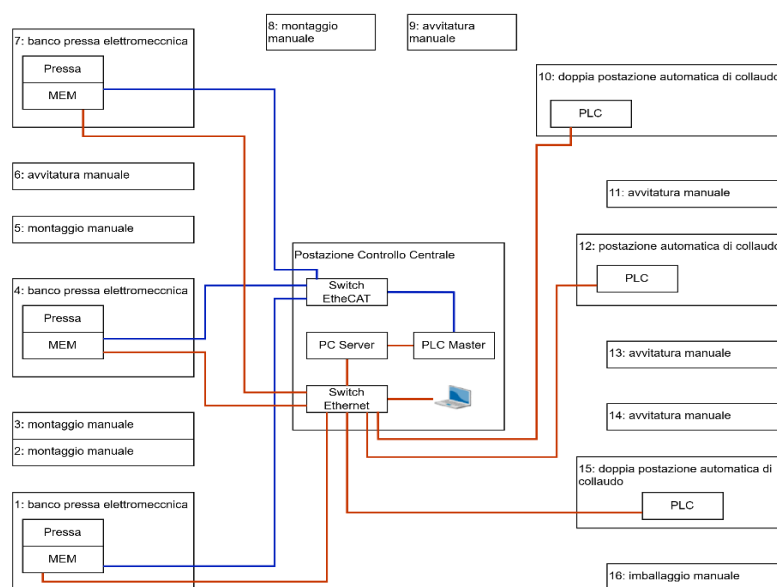


Figura 2.1: Schema semplificato della linea di assemblaggio

Come è possibile vedere dalla Figura 2.1, la topologia della rete è sostanzialmente una stella, caratterizzata dalla presenza di un nodo centrale al quale sono direttamente connessi tutti gli altri nodi. Questa topologia di rete prevede collegamenti di tipo point-to-point, per mezzo dei quali è possibile il collegamento tra due soli nodi. In questo tipo di rete, lo scambio dati può essere effettuato solo indirettamente attraverso il nodo centrale al quale tutti gli altri nodi sono collegati.

Il principale vantaggio della topologia di rete a stella è il fatto di essere semplice e veloce, in quanto la comunicazione tra due nodi avviene sempre e solo attraverso quello centrale. Questo implica che: un guasto a uno solo degli host non compromette il funzionamento

dell'intera rete. Un altro vantaggio della rete a stella è dato dalla facilità nell'aggiungere nuovi nodi e nel sostituire quelli vecchi. Allo stesso tempo però, la criticità principale della rete a stella è il fatto di essere totalmente dipendente dal funzionamento del nodo centrale al punto che le prestazioni dell'intera rete sono direttamente correlate alle prestazioni del suo nodo centrale [8].

Come precedentemente detto, la comunicazione tra le postazioni prive di PLC a bordo e la postazione Server avviene tramite protocollo EtherCAT.

EtherCAT (Ethernet for Control Automation Technology) è un protocollo che porta la potenza e la flessibilità di Ethernet nel mondo di automazione industriale, motion control, sistemi di controllo real-time e sistemi di acquisizione dati ed è standardizzato secondo IEC 61158 [9].

Come riportato nella brochure EtherCAT di “EtherCAT Technology Group” [10], EtherCAT è una tecnologia Ethernet Industriale caratterizzata da topologia flessibile, elevate prestazioni, bassi costi e semplicità d'uso. Utilizza frame e layer fisico così come definiti dallo standard Ethernet IEEE 802.3. Esso si propone però di rispondere anche alle specifiche esigenze dell'automazione industriale, dove sono richieste prestazioni hard real-time con tempi di risposta deterministici. Gli indirizzi dei nodi vengono impostati in modo automatico, non è quindi richiesta alcuna configurazione manuale, e la diagnostica integrata consente di individuare semplicemente gli errori.

EtherCAT semplifica notevolmente la configurazione di rete, eliminando la necessità di gestire complessi protocolli di rete. Come mostrato in Figura 2.2, EtherCAT si basa sui livelli fisici e dati di Ethernet, saltando i livelli superiori della pila ISO/OSI 3-6, che richiedono una configurazione di indirizzi MAC e IP [9].

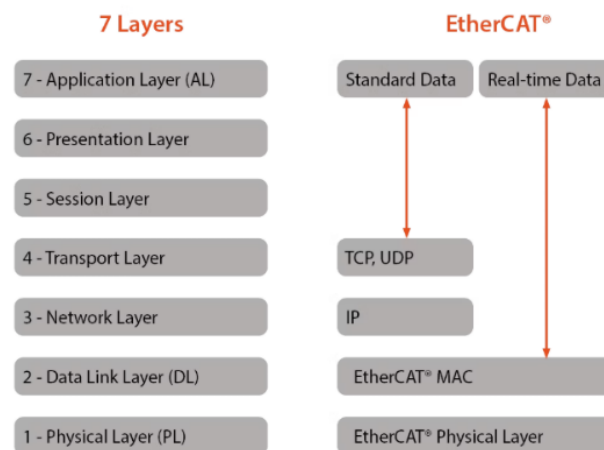


Figura 2.2: Confronto tra la pila a 7 livelli e l'architettura EtherCAT

Il dispositivo EtherCAT Master è l'unico nodo della rete in grado di inviare attivamente i frame, mentre i dispositivi slave possono aggiungere dati senza creare nuovi frame. Questo principio garantisce latenze estremamente basse e prestazioni altamente deterministiche.

Va aggiunto che, nella linea di montaggio, vanno integrati stampanti e scanner di codici, strumenti fondamentali per garantire la gestione e la tracciabilità del prodotto durante il transito nelle varie fasi del processo di montaggio. Questi dispositivi consentono di identificare ogni pezzo tramite il codice prodotto e altre informazioni, assicurandone il monitoraggio nelle varie fasi del processo.

2.2 Gestione e tracciabilità del prodotto

Non solo le postazioni automatizzate, ma anche le stampanti e gli scanner devono essere connessi alla postazione di controllo centrale tramite le tecnologie Ethernet ed EtherCAT utilizzate sulla linea.

Questa integrazione è essenziale per garantire il controllo della gestione e della tracciabilità del prodotto mecatronico lungo l'intera linea di montaggio. La gestione della linea di montaggio è affidata alla postazione Server, che svolge diverse funzioni fondamentali per il controllo e la supervisione delle operazioni.

L'etichettatura rappresenta un elemento chiave per consentire la tracciabilità dei prodotti lungo la linea. È importante sottolineare che quella di seguito descritta è un'idea progettuale, concepita dal team di Visionar, su come dovrebbe essere strutturata l'intera procedura di gestione e tracciabilità del prodotto lungo la linea. Tale approccio è stato pensato per garantire l'identificazione univoca di ogni pezzo, migliorare il monitoraggio delle operazioni e assicurare un controllo centralizzato lungo tutte le fasi di produzione. Per motivi di riservatezza, la descrizione delle fasi di etichettatura e tracciabilità non sarà trattata in tutti i suoi dettagli. Tuttavia, verranno fornite le informazioni sufficienti a delineare un quadro generale su come questa procedura è stata strutturata.

Una prima etichetta verrà stampata prima della quarta postazione, ovvero a monte della seconda pressa elettromeccanica. Questa etichetta avrà lo scopo di mantenere traccia delle fasi di lavorazione automatica e dovrà, inoltre, includere alcuni dati principali tra cui: il numero seriale e il codice prodotto. L'etichetta verrà applicata al prodotto per garantire una tracciabilità continua. Tuttavia, poiché durante alcune fasi successive l'etichetta potrebbe essere coperta dal montaggio di ulteriori componenti, sarà necessaria la ristampa dell'etichetta.

Sia il processo di stampa della prima etichetta, che quelli delle successive ristampe, saranno gestiti tramite la pressione di un pulsante che genera un segnale digitale. Questo segnale verrà trasmesso come "digital input" a dei moduli "EtherCAT I/O BOX" e verrà indirizzato al PLC Master attraverso lo switch EtherCAT nella postazione di controllo

centrale. Successivamente, il segnale sarà indirizzato verso le stampanti tramite rete Ethernet, permettendo la generazione di una nuova etichetta.

I moduli “EtherCAT I/O BOX” sono destinati all’acquisizione di segnali digitali/binari. Questo segnale viene trasmesso tramite EtherCAT al dispositivo di automazione di livello superiore per un’ulteriore elaborazione o per il controllo della macchina/impianto. Le varianti del modulo si differenziano per le diverse soglie di segnale, il numero di canali, le opzioni di connessione e/o i tempi di filtraggio degli ingressi [11].

A partire dalla fase 4, tutte le postazioni automatiche di montaggio e collaudo saranno dotate di scanner di codici. Questi dispositivi consentiranno l’esecuzione della fase automatica solo se quella precedente, oggettivabile tramite i dati raccolti, sarà stata completata con successo. Le fasi manuali, invece, non sono soggette a questa verifica, poiché non producono dati oggettivi.

Dopo l’ultima postazione di collaudo, corrispondente alla postazione 15, si arriva alla fase manuale di imballaggio. Qui uno scanner leggerà nuovamente l’etichetta applicata al prodotto, permettendo al server di verificare che il prodotto abbia superato con successo tutte le verifiche e i collaudi previsti. Una volta confermata la conformità, il server genererà un’ultima etichetta di prodotto finito. Quest’ultima ne certificherà la completa lavorazione e consentirà di procedere con la fase di imballaggio.

La gestione e la tracciabilità del prodotto lungo la linea di montaggio sono elementi centrali per garantire il corretto funzionamento del processo produttivo e l’affidabilità del risultato finale. Grazie all’integrazione di scanner, stampanti e moduli EtherCAT I/O BOX (Figura 2.3), il sistema consente un monitoraggio continuo delle operazioni e assicura che ogni pezzo sia univocamente identificato e tracciato in ogni fase dell’intero ciclo di produzione.

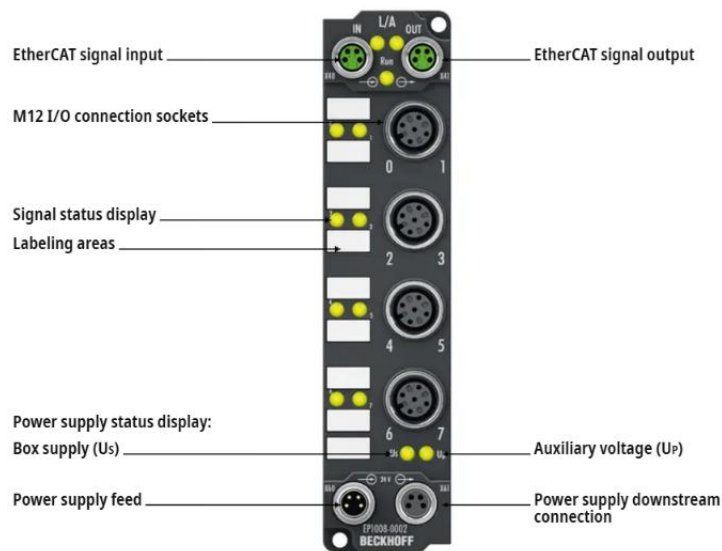


Figura 2.3: Esempio di EtherCAT I/O BOX della Beckhoff

Tuttavia, per implementare un sistema efficace e adeguato alle specifiche esigenze del progetto, è necessario identificare la configurazione ottimale tra le possibili combinazioni di dispositivi per la lettura delle etichette.

Nel prossimo capitolo verrà quindi presentata un'analisi multicriterio, sviluppata per valutare e selezionare la soluzione più adatta. Questo metodo di analisi permette di confrontare le diverse opzioni disponibili in base a criteri chiave come prestazioni, robustezza e costi, fornendo una base analitica per la scelta della configurazione "ideale" per la linea di assemblaggio.

CAPITOLO 3

ANALISI MULTICRITERIO

Il seguente capitolo approfondisce l'approccio metodologico adottato per individuare la configurazione migliore dei dispositivi di lettura delle etichette, con l'obiettivo di garantire una gestione e una tracciabilità efficienti del prodotto lungo la linea di assemblaggio. L'analisi multicriterio è stata impiegata come strumento di valutazione e confronto tra diverse combinazioni di dispositivi, considerando alcuni parametri chiave individuati in seguito ad un'analisi di progetto.

Questo capitolo fornisce una panoramica completa della metodologia adottata e dei risultati ottenuti, evidenziando come il metodo decisionale multicriterio rappresenti uno strumento essenziale per la progettazione di sistemi complessi.

3.1 L'analisi multicriterio per la scelta della configurazione ottima

L'analisi multicriterio (MCA), originata nel campo della ricerca operativa, è oggi ampiamente utilizzata in ambito aziendale e nella gestione progetti. Questo approccio è particolarmente utile per la pianificazione strategica, la selezione dei prodotti e le decisioni di allocazione delle risorse.

La ricerca operativa è una disciplina della matematica applicata in cui problemi decisionali complessi vengono analizzati e risolti mediante modelli matematici e metodi quantitativi avanzati (ottimizzazione, simulazione, ecc.) come supporto alle decisioni stesse. La ricerca operativa riveste un ruolo importante nelle attività decisionali perché permette di operare le scelte migliori per raggiungere un determinato obiettivo rispettando vincoli che sono imposti dall'esterno e non sono sotto il controllo di chi deve compiere le decisioni. Grazie al suo approccio analitico e metodico, la ricerca operativa ha molte applicazioni commerciali soprattutto negli ambiti economico, infrastrutturale, logistico, militare, della progettazione di servizi e di sistemi di trasporto e nelle tecnologie [12].

In particolare, il modello MCA aiuta a valutare e prioritizzare più opzioni basandosi su criteri specifici.

La forza di questo metodo risiede nella sua capacità di rendere il processo decisionale più obiettivo e sistematico. Quindi, l'obiettivo principale dell'MCA è quello di fornire un supporto basato su metodo, per identificare la soluzione più adeguata alle esigenze specifiche del problema analizzato.

Dal punto di vista operativo, l'MCA si sviluppa nel visualizzare il problema sotto forma di tabella in cui: le righe rappresentano le possibili alternative da valutare, le colonne sono i criteri di valutazione e le celle contengono i punteggi assegnati alle alternative in funzione dei criteri. Attraverso il metodo di analisi multicriterio, si possono considerare in un unico procedimento valutativo sia i criteri di carattere economico come il costo, sia i criteri "extra-economici" misurabili solo in termini fisici o qualitativi come la facilità d'uso [13].

In sintesi, l'AMC introduce un metodo sistematico per prendere decisioni riducendo l'impatto di fattori emotivi o soggettivi. Al contempo, va sottolineato che l'approccio dell'AMC è strettamente legato all'analisi delle preferenze dei decisori.

Nello specifico, il metodo di AMC utilizzato e di seguito presentato è il "Weighted Sum Model" (WSM).

Il WSM, o modello della somma ponderata, è il metodo di analisi delle decisioni multicriterio più noto per valutare un certo numero di alternative in termini di un certo numero di criteri decisionali. Tale metodo si basa sull'assegnazione di pesi ai criteri e sul calcolo di una somma ponderata per classificare le alternative [14].

3.1.1 Il Weighted Sum Model (WSM)

Prima di procedere con l'analisi di progetto e delle caratteristiche, presento di seguito una linea guida nella progettazione delle fasi del metodo WSM [15] [16] e alcuni principi progettuali operativi, tratti dal modello proposto "Foglio di calcolo di aiuto nelle scelte di acquisto, attraverso il metodo dell'analisi multicriterio" [17].

Il WSM è divisibile in sette fasi operative, di seguito spiegate:

- 1) Identificazione del contesto decisionale e degli obiettivi: il primo passo è quello di chiarire qual è l'obiettivo che si vuole raggiungere. Nel caso specifico di questo

elaborato, l'obiettivo è l'individuazione della configurazione ottima dei dispositivi per la lettura di codici.

- 2) Definizione delle alternative e dei criteri: bisogna individuare le diverse alternative possibili e capire quali sono i criteri sulla base dei quali si valuteranno le alternative.
- 3) Assegnazione dei pesi ai criteri: l'obiettivo di questa fase è determinare quanto ciascun criterio influisce sulla scelta. Ogni criterio ha un'importanza relativa nelle decisioni, rappresentata da un peso. Ad ogni singolo criterio si dà quindi un punteggio da 1 a 10 (1 è la minima importanza e 10 è la massima). I pesi sono assegnati in base alle esigenze di progetto. Ad esempio, nel caso preso in esame, il costo rappresenta il criterio più importante e, nell'analisi, gli viene attribuito un peso di 10.

Va aggiunto che la somma totale dei pesi deve essere 1 (lavorando con pesi normalizzati), al fine di garantire che ogni peso rappresenti una proporzione corretta. Infatti, per essere coerenti con questa specifica, nella fase del calcolo del punteggio finale, viene effettuata una normalizzazione dei pesi: ogni peso viene diviso per la somma totale dei pesi. Usando i pesi normalizzati, ogni peso rappresenta una frazione del totale e la somma dei pesi diventa 1, cosicché ogni criterio contribuisce correttamente al punteggio totale.

- 4) Valutazione delle alternative rispetto ai criteri: una volta individuate tutte le alternative, è necessario assegnare un punteggio ad ognuna di esse. Si procede assegnando un numero su una scala comune da 1 a 10 ad ogni opzione per ciascun criterio. Questo punteggio riflette il "gradimento", ovvero quanto bene l'alternativa soddisfa il criterio. Sono gli elementi che vanno a popolare la tabella di valutazione.

È importante precisare che il punteggio dell'alternativa in esame per i criteri "positivi" come la robustezza, risulta migliore se viene accostato ad un numero più alto. Al contrario, il "gradimento" di un'opzione per i criteri "negativi" come il costo, risulta preferibile se viene attribuito un numero più basso.

Per una valutazione coerente dell'analisi si fa in modo che, per tutti i criteri presi in esame, un punteggio più alto indica un "gradimento" migliore dell'opzione rispetto a quel criterio.

Nel caso specifico del "Costo" è stata applicata una normalizzazione per allinearla agli altri parametri.

- 5) Normalizzazione dei punteggi (dove necessario): come precedentemente introdotto, per la voce "Costo" è stata necessaria una procedura di normalizzazione, in modo che un punteggio più alto indichi un "gradimento migliore". La procedura di normalizzazione sul criterio è stata effettuata non solo per allinearne il comportamento agli altri criteri di valutazione, ma anche per rendere il punteggio adimensionale e coerente al range scelto come scala comune di valutazione (da 1 a 10).

La normalizzazione è stata eseguita utilizzando la formula:

$$\text{Valore normalizzato} = 10 * \frac{\text{Valore minimo}}{\text{Valore corrente}} \quad (3.1)$$

In questo modo, all'opzione con il costo più basso viene attribuito il punteggio più alto. Questo approccio garantisce che tutti i criteri possano essere confrontati equamente, utilizzando la stessa scala di riferimento.

- 6) Calcolo del punteggio totale per ciascuna alternativa: una volta popolata la tabella di valutazione, è possibile calcolare il punteggio totale dell'alternativa. Il punteggio totale di ciascuna alternativa è calcolato come la somma ponderata dei punteggi normalizzati.

Il contributo di ogni criterio viene calcolato come:

$$\text{Contributo del criterio} = \left(\frac{\text{Peso del criterio}}{\text{Somma totale dei pesi}} \right) * \text{Gradimento dell'opzione} \quad (3.2)$$

Utilizzando la formula sopra riportata (3.2), si applica implicitamente la normalizzazione ai pesi dei criteri e quindi, la somma totale dei contributi sarà bilanciata rispetto all'importanza relativa dei criteri.

Il punteggio totale di un'opzione viene quindi calcolato come:

$$Punteggio\ Totale = \sum_{i=1}^n \left(\frac{Peso\ del\ criterio\ i-esimo}{Somma\ totale\ dei\ pesi} \right) * Gradimento\ dell'\ opzione \quad (3.3)$$

dove n è il numero dei criteri considerati.

- 7) Analisi dei punteggi ottenuti: dopo avere calcolato il punteggio totale per ogni alternativa individuata, è possibile metterli a confronto. L'alternativa che avrà totalizzato il punteggio totale più alto è quella che, sulla base delle considerazioni e dei calcoli effettuati, corrisponde alla scelta ottima.

Ultimata la definizione delle fasi operative del WSM e dei principi progettuali adottati, si passa all'applicazione pratica di questa metodologia al caso specifico della linea di montaggio. Nel prossimo paragrafo vengono esaminate le specifiche di progetto da prendere in considerazione e un'analisi dei dispositivi selezionati per soddisfare i requisiti.

3.2 Analisi di progetto e delle caratteristiche dei dispositivi di lettura

Da un'analisi di progetto e del contesto applicativo, è emerso che sulla linea di assemblaggio sarà necessario integrare nove dispositivi di lettura dei codici, distribuiti tra le postazioni automatizzate nel seguente modo:

- Quattro scanner saranno destinati alle postazioni non dotate di PLC a bordo, corrispondenti alle postazioni 4, 7, 11 e 16.
- Cinque scanner saranno destinati alle postazioni di collaudo, ovvero quelle dotate di Embedded PC Beckhoff. Nelle postazioni doppie saranno installati due scanner ciascuna. Avremo quindi due scanner per la postazione 10, uno scanner per la postazione 12 e due nella postazione 15.

Beckhoff Automation è un'azienda che realizza sistemi aperti per automazione con tecnologia di controllo basata su PC: offre un'ampia gamma di prodotti e soluzioni per la tecnologia dell'automazione. Questi includono PC industriali, componenti di I/O, tecnologia di azionamento, software di automazione, automazione senza armadi di controllo e visione artificiale. L'azienda è specializzata nello sviluppo e nell'applicazione di tecnologie di controllo che consentono ai clienti di controllare i propri impianti e macchine, in modo flessibile ed efficiente. Numerosi standard della tecnologia di automazione, oggi divenuti di uso comune, sono stati scoperti inizialmente da Beckhoff e immessi sul mercato come innovazioni di successo [18].

Idealmente, tutti gli scanner dovrebbero comunicare attraverso interfaccia Ethernet, poiché garantisce maggiore efficienza e integrazione. Questa soluzione, tuttavia, risulta spesso accompagnata da costi elevati. Per ovviare a questo possibile problema, è possibile implementare una soluzione ibrida sfruttando la presenza dei PLC nelle postazioni di collaudo. Come precedentemente spiegato, gli Embedded PC sono dei PLC dotati di un sistema operativo Windows. Questi dispositivi possono eseguire contemporaneamente applicazioni di controllo (PLC) e applicazioni che richiedono le funzionalità di un sistema operativo completo come Windows. Una possibile soluzione potrebbe essere, quindi, quella di utilizzare l'interfaccia USB per connettere gli scanner direttamente al PLC. Questa configurazione però richiede alcune considerazioni specifiche.

Gli scanner USB destinati a essere collegati ai PLC dovranno essere configurati come porte USB Virtual COM (Virtual Communication Port). Questa impostazione è essenziale per consentire l'identificazione univoca di ciascun dispositivo, operazione che non sarebbe possibile configurandoli semplicemente come USB generici.

Quando si configura un dispositivo USB come USB Virtual COM si sta sostanzialmente trasformando la connessione fisica USB in una porta seriale virtuale. Questa porta virtuale può essere identificata dal sistema operativo come se fosse una porta seriale fisica collegata al computer. In questo modo, ogni scanner configurato come USB Virtual COM avrà una porta seriale virtuale unica assegnata [19]. Configurare gli scanner come USB Virtual COM permette di trattarli come dispositivi seriali, semplificando la loro gestione e facilitando la tracciabilità del prodotto lungo la linea di assemblaggio.

Sulla base di queste considerazioni, una possibile idea di configurazione che verrà presa in esame e valutata nella successiva AMC, consiste nello sfruttare la presenza degli Embedded PC nelle postazioni di collaudo. Bisogna però considerare anche che questa configurazione richiede passaggi di configurazione aggiuntivi, che dovranno essere considerati nella progettazione del sistema complessivo.

Si prosegue con l'analisi delle specifiche tecniche richieste dal progetto. Queste specifiche definiscono i requisiti operativi e funzionali dei dispositivi di lettura che verranno utilizzati nella linea di produzione, garantendo la loro idoneità rispetto alle esigenze del sistema.

Una specifica dei dispositivi di lettura dei codici, che è stata individuata durante l'analisi del contesto applicativo, riguarda la modalità di connessione. L'opzione che si è decisa di adottare è quella di una connessione con filo, o comunque fissa sulla postazione, rispetto ad una connessione wireless. Adottando questa soluzione si vuole evitare di creare disordine o confusione all'interno della linea di produzione: si vuole che il dispositivo rimanga alla postazione su cui è stato installato e che quindi eviti di essere scambiato con quello di un'altra postazione. Adottando questa soluzione però, bisogna anche tener conto dell'eventuale ingombro fisico dato dalla presenza del cablaggio.

Ulteriori specifiche individuate per i dispositivi di lettura da adottare, riguardano il vincolo relativo alla robustezza e alla distanza di lettura.

In un contesto industriale, è fondamentale adottare dispositivi caratterizzati da una certa robustezza, in grado di resistere all'usura e alle sollecitazioni tipiche di un ambiente produttivo.

Per quanto riguarda la distanza di lettura, è stata individuata una distanza operativa prevista attorno ai 200 mm. Questo valore è stato scelto per soddisfare le esigenze di scansione delle etichette in modo rapido ed efficace, minimizzando errori di lettura.

Un'ultima specifica individuata, prima di passare alla ricerca e selezione dei dispositivi, riguarda il tipo di codice da stampare sulle etichette.

L'etichetta utilizzata nella linea di produzione svolge un ruolo fondamentale per garantire la tracciabilità dei prodotti, lungo tutte le fasi del processo di assemblaggio. Come già descritto, l'etichetta viene stampata inizialmente prima della quarta postazione per identificare univocamente ogni pezzo. Successivamente, in specifiche fasi della produzione, può essere necessario ristamparla per garantire che le informazioni restino leggibili, anche dopo il montaggio di componenti che potrebbero coprirla.

In termini di contenuto, l'etichetta è stata progettata per includere diverse stringhe numeriche, tra cui il codice prodotto, il numero seriale e l'elenco delle fasi di lavorazione previste. Per rappresentare efficacemente questi dati in un formato compatto e leggibile dagli scanner, si è deciso di adottare un codice bidimensionale (2D) di tipo QR Code. Questo tipo di codice offre numerosi vantaggi, tra cui una maggiore capacità di archiviazione rispetto ai codici a barre lineari e una maggiore resilienza agli errori di stampa o danneggiamenti, grazie alle sue caratteristiche di correzione degli errori integrate. Grazie al loro design, i codici QR possono sopportare danni o distorsioni significativi ed essere comunque scansionabili. I dati possono essere recuperati con successo, anche se un codice QR è parzialmente oscurato o leggermente danneggiato. Al contrario, i codici a barre lineari sono più suscettibili agli errori di scansione in caso di danni [20].

Sulla base di queste considerazioni, si procede con un'analisi dei dispositivi di lettura disponibili sul mercato, al fine di individuare quelli in grado di soddisfare le specifiche tecniche e operative definite.

3.2.1 Analisi e selezione dei dispositivi di lettura

Sulla base dell'analisi di progetto e delle specifiche richieste, sono stati individuati tre dispositivi principali di lettura dei codici, identificati come soluzioni potenzialmente adatte alle esigenze del contesto applicativo. I tre dispositivi scelti sono realizzati da SICK, un'azienda leader mondiale che offre una vasta gamma di soluzioni sensoristiche per diversi settori industriali: dall'automazione di fabbrica alla logistica, fino ai processi produttivi più complessi [21].

I tre dispositivi selezionati sono:

- 1) Lettore a camera fissa, disponibile in due varianti:
 - V2D610R-MMSCE4, con una lunghezza focale di 12 mm.
 - V2D610R-MMSBE4, con una lunghezza focale di 6 mm.

Nonostante le due versioni siano caratterizzate da codici prodotto differenti, entrambe presentano la stessa interfaccia Ethernet integrata come caratteristica nativa. Questo rende le due versioni equivalenti in termini di connessione. Per questa ragione e per il fatto che il costo è identico per entrambe, nell'analisi che segue, le due versioni verranno trattate come un'unica opzione denominata "Lettore a camera" (Figura 3.1).

- 2) Pistola scanner manuale IDM240-411S (Figura 3.2), disponibile in due configurazioni:
 - USB Kit.
 - RS-232 Kit.

Anche in questo caso, il costo rimane invariato per entrambe le versioni.

- 3) Pistola a scanner manuale IDM260-411S (Figura 3.3), disponibile in due configurazioni:
 - USB Kit.
 - RS-232 Kit.

Come per gli altri dispositivi, il costo è identico per entrambe le versioni.

Va notato che gli scanner manuali, sia IDM240 che IDM260, con interfaccia USB presentano un codice prodotto diverso rispetto agli stessi dispositivi dotati di interfaccia seriale RS-232. Questo comporta alcune implicazioni pratiche, in particolare per la

gestione dei dispositivi sulla linea. Ad esempio, nel caso di un guasto che richieda la sostituzione di uno scanner, sarà necessario fare attenzione al codice prodotto specifico, poiché non sarà possibile ordinare lo stesso modello per entrambe le configurazioni. Questa differenziazione dei codici prodotto aumenta il rischio di confusione nella gestione dei dispositivi e può complicare la logistica.

Inoltre, la soluzione ibrida (combinazione di interfacce RS-232 e USB) precedentemente presentata, sebbene più vantaggiosa in termini di flessibilità operativa ed economici, richiede un'attenzione particolare sulla gestione delle varianti, sia in fase di implementazione che durante l'intero ciclo di vita della linea di produzione.



Figura 3.1: Lettore a camera



Figura 3.2: IDM240-411S



Figura 3.3: IDM260-411S

Per una visione sintetica delle caratteristiche principali dei dispositivi selezionati, viene presentata di seguito una tabella comparativa (Tabella 3.1) che ne evidenzia le caratteristiche chiave utilizzate per la formulazione delle alternative di configurazione e valutate nell'analisi multicriterio.

Va sottolineato che questi dispositivi sono stati selezionati sulla base delle loro caratteristiche tecniche e delle specifiche operative richieste dal progetto. Proprio per questo, nella successiva analisi multicriterio, al criterio "Prestazioni" è stato attribuito un peso relativo minore rispetto ad altri criteri più influenti nella valutazione complessiva, come il costo o la robustezza.

Inoltre, l'implementazione pratica di questi dispositivi nella linea di produzione richiede l'impiego di ulteriori dispositivi e componenti per rispondere appieno alle specifiche esigenze della linea. Tali dispositivi sono presentati nella Tabella 3.2, all'interno della

quale vengono riportati in maniera sintetica le caratteristiche chiave considerate all'interno del contesto del MCA.

Dispositivi	Pro	Contro	Extra
Lettore a camera	<ul style="list-style-type: none"> - Fisso sul banco - Evita il problema dell'ingombro del cavo, essendo installato sulla postazione stessa - Interfaccia Ethernet integrata - Grado di protezione: IP54 - Distanza di lettura: 50 mm – 300 mm - Minima risoluzione codice: 0.04 mm 	<ul style="list-style-type: none"> - Costo 750 € - Minore facilità di utilizzo da parte dell'operatore 	<ul style="list-style-type: none"> - Ideale se il prodotto da scansionare è posizionato sul banco con etichetta visibile. - Costi aggiuntivi: supporto fissaggio: 15 € cavo alimentazione: 35 € cavo ETH M12 RJ45: 37 €
Pistola scanner IDM240	<ul style="list-style-type: none"> - Variante con cavo - Grado di protezione: IP52 - Custodia semplice - Distanza di lettura: 30 mm – 400 mm 	<ul style="list-style-type: none"> - Costo 270 € - Ethernet non nativo (RS-232 o USB) - Necessita di un gateway CDF600-2200 	<ul style="list-style-type: none"> - Facilità d'uso maggiore rispetto al "Lettore a camera" - Costi aggiuntivi: supporto lettore: 20 € CDF600-2200: 260 € (bisogna aggiungere i componenti per l'utilizzo del gateway)
Pistola scanner IDM260	<ul style="list-style-type: none"> - Include tutte le caratteristiche dello scanner IDM240-411S - Grado di protezione: IP65 - Protezione aggiuntiva: custodia industriale 	<ul style="list-style-type: none"> - Costo 380 € - Ethernet non nativo (RS-232 o USB) - Necessita di un gateway CDF600 -2200 	<ul style="list-style-type: none"> - Facilità d'uso maggiore rispetto al "Lettore a camera" - Costi aggiuntivi: supporto lettore: 20 € CDF600-2200: 260 € (bisogna aggiungere i componenti per l'utilizzo del gateway)

Tabella 3.1: Analisi dei dispositivi di lettura dei codici

Dispositivi	Pro	Contro	Extra
Gateway CDF600-2200	- Gateway bus di campo per collegamento alle reti bus di campo	- Costo 260 € - PROFINET	- Costi aggiuntivi: adattatore IDM-CDF: 90 € cavo alimentazione: 9,50€ cavo ETH M12 RJ45: 37 €
NPORT MOXA	- Dispositivo robusto per conversione interfacce - 5110: 1 porta: RS-232, Ethernet - 5210A: 2 porte: RS-232, Ethernet - MGate 5103: PROFINET, Ethernet	- Costo 5110: 150 € - Costo 5210A: 270 € - Costo MGate 5103: 705 €	- Alimentatore 5110 (PWR-12050-EU-S2): 45 € (incluso nel pacchetto di acquisto) - Alimentatore 5210A (PWR-12150-EU-SAT): 55 € (incluso nel pacchetto di acquisto) - Alimentatore MGate 5301 (BBL-PJTB-10): 10 € - Costi aggiuntivi: cavo ETH (cat6, 5m): 9 €

Tabella 3.2: Dispositivi necessari all'applicabilità della linea

Proseguendo con il percorso metodologico definito dall'analisi multicriterio, ultimata l'analisi del contesto applicativo e individuati i dispositivi più idonei per la tracciabilità della linea, nel paragrafo successivo vengono presentate le alternative di configurazione individuate e analizzati in dettaglio i criteri adottati per la valutazione.

3.3 Analisi delle configurazioni individuate e dei criteri di valutazione

Ultimata la parte di ricerca e selezione dei dispositivi di lettura dei codici più idonei per soddisfare le specifiche richieste dalla linea di assemblaggio, a partire da questi dispositivi, è stata effettuata un'analisi approfondita per identificare le possibili configurazioni adottabili. Questa fase ha portato alla definizione di undici alternative operative, realizzate combinando i dispositivi selezionati.

Per garantire una visione sintetica e chiara, le configurazioni individuate sono presentate sotto forma di tabelle (vedi Tabella 3.3, Tabella 3.4, Tabella 3.5 e Tabella 3.6) che consentono di confrontare rapidamente le diverse opzioni. Ogni configurazione rappresenta una diversa alternativa per l'implementazione della gestione e tracciabilità lungo la linea produttiva.

Opz.	Dispositivi coinvolti	Osservazioni	Costi ed Extra
1	9 lettori a camera; 9 supporti; 9 cavi alimentazione; 9 cavi ETH M12 RJ45;	- Stesso dispositivo in tutte le postazioni; - Nativo Ethernet;	- Ideale se il prodotto è posizionato correttamente sul banco; - Non è la soluzione di più facile utilizzo se l'operatore deve portare il prodotto verso il dispositivo, - Costo: $750*9 + 9*15+9*35*9*37= 7533$ €
2	9 pistole scanner IDM240 con interfaccia RS-232; 9 supporti lettore; 9 gateway CDF600-2200; 9 adattatori IDM-CDF; 9 cavi alimentazione CDF; 9 cavi ETH M12 RJ45; 9 MOXA MG5103 (da PROFINET a Ethernet); 9 cavi alimentazione (CBL-PJTB-10); 9 cavi ethernet (cat6, 5m);	- Codice prodotto unico (scanner) su tutte le postazioni; - Pistola manuale rimane di più facile utilizzo per l'operatore - PROFINET; - IDM240: custodia semplice;	- Costo per 9 scanner: $270*9= 2430$ € - Costo 9 supporti: $20*9 = 180$ € - Costo di 9 gateway: $9*260 = 2340$ € - Costo 9 adattatori: $9*90 = 810$ € - Costo 9 cavi alimentazione CDF: $9*9.50 = 85.50$ € - Costo 9 cavi ETH RJ45: $9*37 = 333$ € - Costo 9 MOXA MG5103: $9*705= 6345$ € - Costo 9 CBL-PJTB-10: $9*10= 90$ € - Costo 9 cavi ETH: $9*9 = 81$ € - Totale: $2430+180+2340+810+85.50+333+6345+90+81= 12694.50$ €
3	9 pistole scanner IDM260 con interfaccia RS-232; 9 supporti lettore; 9 gateway CDF600-2200; 9 adattatori IDM-CDF; 9 cavi alimentazione CDF; 9 cavi ETH M12 RJ45; 9 MOXA MG5103 (da PROFINET a Ethernet); 9 cavi alimentazione (CBL-PJTB-10); 9 cavi ethernet (cat6, 5m);	- Codice prodotto unico (scanner) su tutte le postazioni; - Pistola manuale rimane di più facile utilizzo per l'operatore; - PROFINET; - IDM260: custodia industriale;	- Costo per 9 scanner: $380*9= 3420$ € - Costo 9 supporti: $20*9 = 180$ € - Costo di 9 gateway: $9*260 = 2340$ € - Costo 9 adattatori: $9*90 = 810$ € - Costo 9 cavi alimentazione: $9*9.50 = 85.50$ € - Costo 9 cavi ETH RJ45: $9*37 = 333$ € - Costo 9 MOXA MG5103: $9*705= 6345$ € - Costo 9 CBL-PJTB-10: $9*10= 90$ € - Costo 9 cavi ETH: $9*9 = 81$ € - Totale: $3420+180+2340+810+85.50+333+6345+90+81= 13684.50$ €

Tabella 3.3: Analisi opzioni [1 – 3]

Opz.	Dispositivi coinvolti	Osservazioni	Costi ed Extra
4	4 pistole scanner IDM240 con interfaccia RS-232; 5 pistole scanner IDM240 con interfaccia USB; 9 supporti lettore; 4 gateway CDF600-2200; 4 adattatori IDM-CDF; 4 cavi alimentazione CDF; 4 cavi ETH M12 RJ45; 4 MOXA MG5103 (da PROFINET a Ethernet; 4 cavi alimentazione (CBL-PJTБ-10); 4 cavi ethernet (cat6, 5m);	- Riduco il costo rispetto all'opzione 2; - Contro: 2 codici prodotto diversi (RS-232 e USB); - Pistola manuale rimane di più facile utilizzo per l'operatore; - IDM240: custodia semplice;	- Costo 9 scanner: $270*9 = 2430$ € - Costo 9 supporti: $20*9 = 180$ € - Costo 4 gateway: $4*260 = 1040$ € - Costo 4 adattatori: $4*90 = 360$ € - Costo 4 cavi alimentazione: $4*9.50 = 38$ € - Costo 4 cavi ETH RJ45: $4*37 = 148$ € - Costo 4 MOXA MG5103: $4*705 = 2820$ € - Costo 4 CBL-PJTБ-10: $4*10 = 40$ € - Costo 4 cavi ETH: $4*9 = 36$ € - Totale: $2430+180+1040+360+38+148+2820+40+36 = 7092$ €
5	4 pistole scanner IDM260 con interfaccia RS-232; 5 pistole scanner IDM260 con interfaccia USB; 9 supporti lettore; 4 gateway CDF600-2200; 4 adattatori IDM-CDF; 4 cavi alimentazione CDF; 4 cavi ETH M12 RJ45; 4 MOXA MG5103 (da PROFINET a Ethernet; 4 cavi alimentazione (CBL-PJTБ-10); 4 cavi ethernet (cat6, 5m);	- Riduco il costo rispetto all'opzione 3; - Contro: 2 codici prodotto diversi (RS-232 e USB); - Pistola manuale rimane di più facile utilizzo per l'operatore; - IDM260: custodia industriale;	- Costo 9 scanner: $380*9 = 3420$ € - Costo 9 supporti: $20*9 = 180$ € - Costo 4 gateway: $4*260 = 1040$ € - Costo 4 adattatori: $4*90 = 360$ € - Costo 4 cavi alimentazione: $4*9.50 = 38$ € - Costo 4 cavi ETH RJ45: $4*37 = 148$ € - Costo 4 MOXA MG5103: $4*705 = 2820$ € - Costo 4 CBL-PJTБ-10: $4*10 = 40$ € - Costo 4 cavi ETH: $4*9 = 36$ € - Totale: $3420+180+1040+360+38+148+2820+40+36 = 8082$ €

Tabella 3.4: Analisi opzioni [4 - 5]

Opz.	Dispositivi coinvolti	Osservazioni	Costi ed Extra
6	9 pistole scanner IDM240 con interfaccia RS-232; 9 supporti lettore; 4 gateway CDF600-2200; 4 adattatori IDM-CDF; 4 cavi alimentazione CDF; 4 cavi ETH M12 RJ45; 4 MOXA MG5103 (da PROFINET a Ethernet; 4 cavi alimentazione (CBL-PJTБ-10); 2 NPORT MOXA 5210A; 1 NPORT MOXA 5110; 7 cavi ethernet (cat6, 5m);	- Codice prodotto unico (scanner) su tutte le postazioni; - Pistola manuale rimane di più facile utilizzo per l'operatore; - IDM240: custodia semplice;	- Costo 9 scanner: $270*9 = 2430$ € - Costo 9 supporti: $20*9 = 180$ € - Costo 4 gateway: $4*260 = 1040$ € - Costo 4 adattatori: $4*90 = 360$ € - Costo 4 cavi alimentazione: $4*9.50 = 38$ € - Costo 4 cavi ETH RJ45: $4*37 = 148$ € - Costo 4 MOXA MG5103: $4*705 = 2820$ € - Costo 4 CBL-PJTБ-10: $4*10 = 40$ € - Costo 2 NPORT 5210: $2*270 = 540$ € - Costo 1 NPORT 5110: $1*150 = 150$ € - Costo 7 cavi ETH: $7*9 = 63$ € - Totale: $2430+180+1040+360+38+148+2820+40+540+150+63 = 7809$ €
7	9 pistole scanner IDM260 con interfaccia RS-232; 9 supporti lettore; 4 gateway CDF600-2200; 4 adattatori IDM-CDF; 4 cavi alimentazione CDF; 4 cavi ETH M12 RJ45; 4 MOXA MG5103 (da PROFINET a Ethernet; 4 cavi alimentazione (CBL-PJTБ-10); 2 NPORT MOXA 5210A; 1 NPORT MOXA 5110; 7 cavi ethernet (cat6, 5m);	- Codice prodotto unico (scanner) su tutte le postazioni; - Pistola manuale rimane di più facile utilizzo per l'operatore; - IDM260: custodia industriale;	- Costo 9 scanner: $380*9 = 3420$ € - Costo 9 supporti: $20*9 = 180$ € - Costo 4 gateway: $4*260 = 1040$ € - Costo 4 adattatori: $4*90 = 360$ € - Costo 4 cavi alimentazione: $4*9.50 = 38$ € - Costo 4 cavi ETH RJ45: $4*37 = 148$ € - Costo 4 MOXA MG5103: $4*705 = 2820$ € - Costo 4 CBL-PJTБ-10: $4*10 = 40$ € - Costo 2 NPORT 5210: $2*270 = 540$ € - Costo 1 NPORT 5110: $1*150 = 150$ € - Costo 7 cavi ETH: $7*9 = 63$ € - Totale: $3420+180+1040+360+38+148+2820+40+540+150+63 = 8799$ €

Tabella 3.5: Analisi opzioni [6 - 7]

Opz.	Dispositivi coinvolti	- Osservazioni	- Costi ed Extra
8	9 pistole scanner IDM240 con interfaccia RS-232; 9 supporti lettore; 2 NPORT MOXA 5210A; 5 NPORT MOXA 5110; 7 Cavi ethernet (cat6, 5m);	- Codice prodotto unico (scanner) su tutte le postazioni; - Pistola manuale rimane di più facile utilizzo per l'operatore; - Interfaccia Ethernet; - IDM240: custodia semplice;	- Costo 9 scanner: $270*9 = 2430$ € - Costo 9 supporti: $20*9 = 180$ € - Costo 2 NPORT 5210: $2*270 = 540$ € - Costo 5 NPORT 5110: $5*150 = 750$ € - Costo 7 cavi ETH: $7*9 = 63$ € - Totale: $2430+180+540+750+63 = 3963$ €
9	9 pistole scanner IDM260 con interfaccia RS-232; 9 supporti lettore; 2 NPORT MOXA 5210A; 5 NPORT MOXA 5110; 7 Cavi ethernet (cat6, 5m);	- Codice prodotto unico (scanner) su tutte le postazioni; - Pistola manuale rimane di più facile utilizzo per l'operatore; - Interfaccia Ethernet; - IDM260: custodia industriale;	- Costo 9 scanner: $380*9 = 3420$ € - Costo 9 supporti: $20*9 = 180$ € - Costo 2 NPORT 5210: $2*270 = 540$ € - Costo 5 NPORT 5110: $5*150 = 750$ € - Costo 7 cavi ETH: $7*9 = 63$ € - Totale: $3420+180+540+750+63 = 4953$ €
10	4 pistole scanner IDM240 con interfaccia RS-232; 5 pistole scanner IDM240 con interfaccia USB; 9 supporti lettore; 4 NPORT MOXA 5110; 4 Cavi ethernet (cat6, 5m);	- Contro: 2 codici prodotto diversi (RS-232 e USB); - Pistola manuale rimane di più facile utilizzo per l'operatore; - IDM240: custodia semplice;	- Costo 9 scanner: $270*9 = 2430$ € - Costo 9 supporti: $20*9 = 180$ € - Costo 4 NPORT 5110: $4*150 = 600$ € - Costo 7 cavi ETH: $4*9 = 36$ € - Totale: $2430+180+600+36 = 3246$ €
11	4 pistole scanner IDM260 con interfaccia RS-232; 5 pistole scanner IDM260 con interfaccia USB; 9 supporti lettore; 4 NPORT MOXA 5110; 4 Cavi ethernet (cat6, 5m);	- Contro: 2 codici prodotto diversi (RS-232 e USB); - Pistola manuale rimane di più facile utilizzo per l'operatore; - IDM260: custodia industriale;	- Costo 9 scanner: $380*9 = 3420$ € - Costo 9 supporti: $20*9 = 180$ € - Costo 4 NPORT 5110: $4*150 = 600$ € - Costo 7 cavi ETH: $4*9 = 36$ € - Totale: $3420+180+600+36 = 4236$ €

Tabella 3.6: Analisi opzioni [8 -11]

Completata la presentazione delle possibili alternative, vengono di seguito analizzati i criteri utilizzati per l'analisi e il confronto delle configurazioni individuate. Tali criteri sono stati selezionati al fine di valutare in maniera metodica le prestazioni e la compatibilità di ciascuna opzione con le specifiche di progetto.

3.3.1 I criteri di valutazione

L'analisi multicriterio applicata al caso specifico della linea di montaggio ha come obiettivo l'individuazione della soluzione migliore tra le opzioni di configurazione individuate. La scelta riguarda la combinazione più adatta di scanner manuali a pistola o di lettori a camera da installare nelle diverse postazioni, al fine di garantire una tracciabilità efficiente del prodotto lungo la linea di produzione.

Per raggiungere questo scopo, è stata effettuata un'analisi basata su una serie di criteri definiti e selezionati in funzione delle esigenze progettuali.

I criteri su cui si è deciso di valutare le alternative individuate sono:

- 1) Costo: il primo criterio riguarda il costo complessivo stimato per ciascuna configurazione. Questo include non solo il costo dei dispositivi principali, ma anche quello dei componenti aggiuntivi necessari per garantire la piena funzionalità sulla linea, come adattatori e cavi.
- 2) Uniformità dei dati: come precedentemente discusso, la configurazione ideale è quella in cui tutti i dispositivi utilizzano l'interfacci Ethernet. Questo garantisce una maggiore coerenza e facilità di gestione dei dati lungo l'intera linea.
- 3) Robustezza: considerando che i dispositivi saranno installati in una linea di produzione industriale, si vogliono adottare dispositivi che siano dotati di una certa robustezza, in grado di resistere all'usura e alle sollecitazioni tipiche di un ambiente produttivo.
- 4) Facilità d'uso: un altro aspetto che è stato preso in considerazione riguarda la semplicità d'uso dei dispositivi. È importante che i dispositivi selezionati siano facilmente maneggiabili dagli operatori, evitando di rallentare il flusso operativo della linea di produzione.
- 5) Prestazioni operative: questo criterio valuta le caratteristiche tecniche dei dispositivi, come la risoluzione e la distanza di lettura, per assicurare che soddisfino le specifiche richieste dal progetto. Come precedentemente discusso, i dispositivi selezionati rispettano tutti le specifiche operative richieste dal progetto. Per questo motivo, nella successiva analisi multicriterio, è stato attribuito al criterio "Prestazioni" un peso relativo minore rispetto ad altri criteri più influenti nella valutazione complessiva, come il costo o la robustezza.
- 6) Conformità del codice prodotto: l'ultimo criterio considerato riguarda la gestione dei codici prodotto associati ai dispositivi. Considerando ad esempio il caso delle pistole manuali scanner, ogni dispositivo ha due codici prodotto distinti in base all'interfaccia utilizzata, sia essa RS-232 o USB. Questa differenziazione può rappresentare una complicazione nella gestione logistica della linea, rendendo

necessaria un'attenzione particolare per evitare errori o confusione nella fase di implementazione e manutenzione.

Una volta definiti i criteri di valutazione, si è passati alla fase di assegnazione dei pesi: l'obiettivo di questa procedura è determinare quanto ciascun criterio influirà sulla scelta finale. Adattando al caso specifico le indicazioni e gli esempi operativi proposti in due risorse video trovate su YouTube, che illustrano l'applicazione pratica del metodo WSM [22] [23], è stato possibile procedere con l'attribuzione dei pesi ai criteri.

Nella Tabella 3.7 sono riportati i sei criteri individuati e il peso a loro attribuito.

Numero criterio	Criterio	Peso
1	Costo	10
2	Uniformità	8
3	Robustezza	7
4	Facilità d'uso	6
5	Prestazioni	6
6	Conformità codice	8

Tabella 3.7: Criteri di valutazione e pesi associati

I pesi sono stati attribuiti in base all'importanza che quel criterio ha nella scelta dell'opzione. Come metrica di giudizio per l'assegnazione dei pesi, si è preso come riferimento il modello della "Scala di Saaty" (Tabella 3.8). Tale modello prevede un approccio analitico di supporto alle decisioni attraverso la scomposizione di un problema complesso in un sistema gerarchico [24].

Scala dell'intensità	Scala o definizione verbale	Commento
1	Uguale importanza degli elementi: ugualmente importanti	Entrambi gli elementi sono valutati allo stesso modo rispetto all'obiettivo.
3	Un elemento è leggermente più importante dell'altro: leggermente più importante	Il giudizio personale e l'esperienza favoriscono leggermente un elemento rispetto all'altro.
5	Un elemento è più importante dell'altro: molto importante	Il giudizio personale e l'esperienza verificano chiaramente una preferenza di un elemento rispetto all'altro.
7	Un elemento è decisamente più importante dell'altro: molto altamente importante	Un elemento è in gran parte dominante.
9	Un elemento è assolutamente più importante dell'altro: importanza assoluta	La dominanza di un elemento rispetto all'altro è dimostrata ed è assoluta.
2, 4, 6, 8	Valore intermedio tra due giudizi	Usato per affinare il giudizio.

Tabella 3.8: Scala di Saaty

Una volta terminata la fase di attribuzione dei pesi ai criteri di valutazione, è possibile entrare nel vivo del metodo WSM, procedendo alla valutazione delle alternative in funzione dei criteri definiti. Nel paragrafo successivo viene illustrata l'implementazione pratica del metodo di analisi multicriterio, realizzata utilizzando Microsoft Excel come strumento di supporto.

3.4 Implementazione del metodo di analisi multicriterio

Una volta portate a termine tutte le fasi preliminari, tra cui la definizione delle alternative, l'identificazione dei criteri di valutazione e l'attribuzione dei pesi a ciascun criterio, si può procedere alla fase applicativa del metodo WSM.

In questa fase le alternative sono state valutate rispetto ai criteri identificati, adottando Microsoft Excel come strumento di supporto per la gestione e l'elaborazione dei dati. Questo paragrafo descrive in dettaglio l'implementazione pratica del MCA, evidenziando il processo di calcolo e le funzionalità sfruttate di Excel per garantire una valutazione metodologica e oggettiva delle opzioni individuate.

Una volta attribuiti i pesi ai criteri di valutazione si è passati alla fase di valutazione delle alternative rispetto ai criteri. Ad ogni opzione verrà assegnato un punteggio per ciascun criterio su una scala da 1 a 10. Questo punteggio riflette il “gradimento”, ovvero quanto bene l'alternativa in esame soddisfa il criterio considerato.

Nel foglio di lavoro di Excel è stata creata una tabella contenente tutte le possibili configurazioni. Per ogni alternativa vengono elencati i dispositivi e gli accessori necessari alla realizzazione pratica sulla linea da cui è costituita, insieme alle quantità necessarie richieste per ogni componente. Questa struttura consente di richiamare direttamente il contenuto delle celle relative alle quantità nelle formule di calcolo, evitando di dover inserire manualmente i valori.

Successivamente alla ricerca dei costi si è realizzata un'altra tabella (Tabella 3.9) in cui ad ogni dispositivo si associa il relativo costo. Combinando queste informazioni con i dati sulle quantità dei dispositivi necessari per ciascuna alternativa, è stato calcolato il costo totale di ogni opzione individuata.

Dispositivo	Costo (€)
Lettoce a camera	750
Supporto fissaggio	15
Alimentazione Lettoce	35
Cavo ETH M12 RJ45	37
IDM240-411S	270
IDM260-411S	380
Supporto lettoce	20
CDF600-2200	260
Adattatore IDM-CDF	90
Alimentazione CDF	9,50
MOXA 5110	150
MOXA 5210°	270
MOXA Mgate 5103	705
Alimentatore Mgate 5310	10
Cavo ETH (cat6, 5m)	9

Tabella 3.9: Costo dei dispositivi e dei componenti aggiuntivi

Ai costi totali delle opzioni è stata applicata una normalizzazione al fine di allinearli agli altri parametri, facendo in modo che un punteggio più alto indichi un “gradimento migliore”. Tale procedura di normalizzazione, inoltre, è stata effettuata anche per rendere il punteggio adimensionale e coerente al range scelto come scala comune di valutazione (da 1 a 10).

La normalizzazione è stata eseguita utilizzando la formula (3.1). Grazie a questo approccio, all’opzione con il costo più basso viene attribuito il punteggio più alto. Questo garantisce che tutti i criteri possano essere confrontati equamente utilizzando la stessa scala di riferimento. In Tabella 3.10 sono riportate le opzioni, i loro costi totali e i valori normalizzati ottenuti.

Opzione	Costo totale (€)	Valore normalizzato
1	7533	4,31
2	12694,50	2,56
3	13684,50	2,37
4	7092	4,58
5	8082	4,02
6	7809	4,16
7	8799	3,69
8	3963	8,19
9	4953	6,55
10	3246	10
11	4236	7,66

Tabella 3.10: Costo e valore normalizzato

Per quanto riguarda l'attribuzione del punteggio di "gradimento" per il criterio "Costo", si utilizzano i valori normalizzati presenti in Tabella 3.10.

In seguito, si è realizzato sul foglio di lavoro Excel un'altra tabella (Tabella 3.11) in cui sono state inserite alcune caratteristiche chiave delle opzioni individuate. Sulla base del contenuto di queste celle sono stati attribuiti dei voti di "gradimento" alle alternative.

Opzione	Osservazioni	Robustezza
1 (Lettore a camera)	ethernet	fisso
2 (IDM240)	RS-232, profinet e ethernet	semplice
3 (IDM260)	RS-232, profinet e ethernet	industriale
4 (IDM240)	RS-232, USB, profinet e ethernet	semplice
5 (IDM260)	RS-232, USB, profinet e ethernet	industriale
6 (IDM240)	RS-232, profinet e ethernet	semplice
7 (IDM270)	RS-232, profinet e ethernet	industriale
8 (IDM240)	RS-232 e ethernet	semplice
9 (IDM260)	RS-232 e ethernet	industriale
10 (IDM240)	RS-232, USB e ethernet	semplice
11 (IDM260)	RS-232, USB e ethernet	industriale

Tabella 3.11: Specifiche chiave delle opzioni

Le attribuzioni dei punteggi adottate per le opzioni in relazione ai criteri "Robustezza", "Facilità d'uso" e "Prestazioni", sono riportate in Tabella 3.12, mentre, in Tabella 3.13, è possibile vedere l'attribuzione riferita ai criteri "Uniformità" e "Conformità codice".

Con riferimento alla Tabella 3.11	Fisso	Semplice	Industriale
Robustezza	8	5	9
Facilità d'uso	7	10	10
Prestazioni	10	8	8

Tabella 3.12: Punteggi in base alle specifiche fisiche

Con riferimento alla Tabella 3.11	Uniformità	
ethernet (lettore fisso)	10	
RS-232 e ethernet (IDM)	8	
RS-232, profinet e ethernet (IDM)	6	
RS-232, USB e ethernet (IDM)	5	
RS-232, USB, profinet e ethernet (IDM)	3	
		Conformità codice
ethernet (lettore a camera)		10
RS-232 (IDM)		10
RS-232 e USB (IDM)		5

Tabella 3.13: Punteggi in base ai protocolli

L'attribuzione dei punteggi alle diverse opzioni è stata realizzata sfruttando le funzionalità di Excel. In particolare, per ciascuna cella destinata all'assegnazione dei punteggi relativi ai criteri, è stata implementata una formula basata sull'uso di funzioni "SE annidate". Questa formula legge il contenuto delle celle della Tabella 3.11 e, in base al risultato del confronto, assegna i punteggi specificati in Tabella 3.12 e Tabella 3.13. Questa tecnica ha permesso di automatizzare il processo decisionale, consentendo di valutare ogni alternativa in modo dinamico e condizionale in base ai valori dei criteri specifici.

Un ulteriore vantaggio di questa implementazione è la flessibilità: volendo modificare i punteggi assegnati alle opzioni, visibili nella loro totalità in Tabella 3.14, sarà sufficiente aggiornare i valori presenti nelle Tabella 3.12 e 3.13.

Opzione	Costo	Uniformità	Robustezza	Facilità d'uso	Prestazioni	Conformità
1	4,31	10	8	7	10	10
2	2,56	6	5	10	8	10
3	2,37	6	9	10	8	10
4	4,58	3	5	10	8	5
5	4,02	3	9	10	8	5
6	4,16	6	5	10	8	10
7	3,69	6	9	10	8	10
8	8,19	8	5	10	8	10
9	6,55	8	9	10	8	10
10	10	5	5	10	8	5
11	7,66	5	9	10	8	5

Tabella 3.14: Punteggi attribuiti alle alternative

Popolata la tabella di valutazione delle alternative va calcolato il punteggio totale di ogni opzione. Seguendo l'esempio di [17], la formula utilizzata per calcolare il punteggio totale di ogni opzione pondera i voti per ogni criterio in base al peso relativo del criterio.

Tale formula è scomponibile nei seguenti passaggi:

- 1) Normalizzazione del peso per ciascun criterio: la normalizzazione del peso di ciascun criterio viene calcolata come:

$$Peso\ normalizzato = \left(\frac{Peso\ del\ criterio}{Somma\ totale\ di\ pesi} \right) \quad (3.4)$$

- 2) Calcolo del contributo di ogni criterio: il voto di ciascun criterio per l'opzione corrente viene moltiplicato per il peso normalizzato del criterio, come nella formula (3.2).
- 3) Somma di tutti i contributi: viene eseguita la somma dei contributi di ogni criterio per l'opzione presa in considerazione.
- 4) Arrotondamento: per una presentazione chiara dei dati, nella formula Excel implementata, si è deciso di arrotondare il risultato alla seconda cifra decimale.

Calcolati i punteggi totali di ogni opzione, si è arrivati all'ultima fase del metodo WSM: l'analisi dei risultati ottenuti.

Sono state create delle celle che, in automatico, mostrano: il numero dell'opzione che ha totalizzato il punteggio più alto, quale punteggio ha totalizzato e il costo totale di tale opzione. Inoltre, per fornire un approccio visivo più immediato e intuitivo ai risultati, sono stati realizzati due grafici (Figura 3.4, Figura 3.5). Questi grafici permettono di visualizzare e confrontare le alternative in modo chiaro, mostrando i punteggi assegnati per ciascun criterio e facilitando l'interpretazione dei risultati.

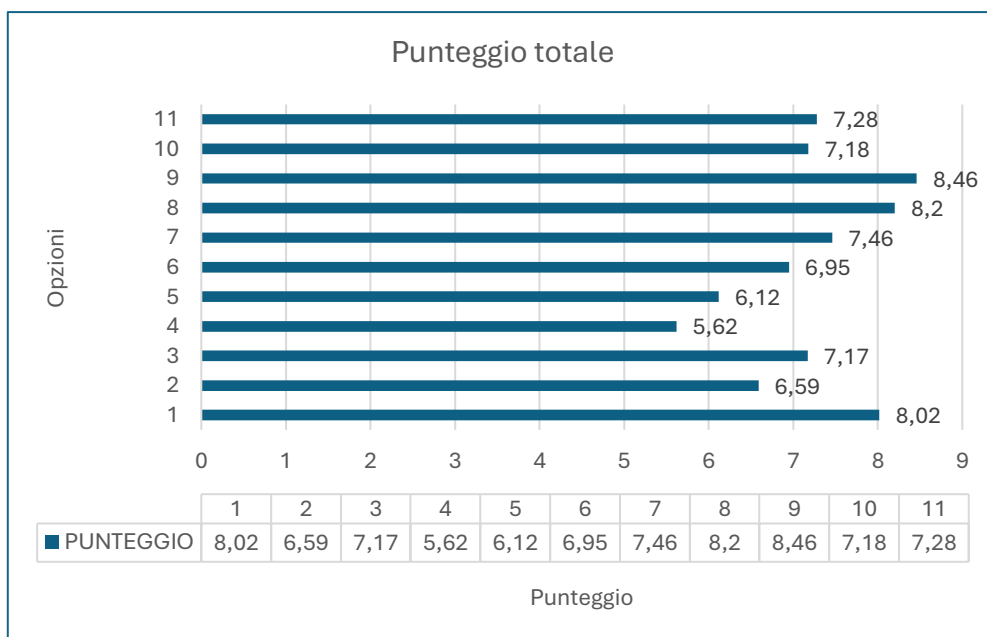


Figura 3.4: Punteggio totale di ogni opzione

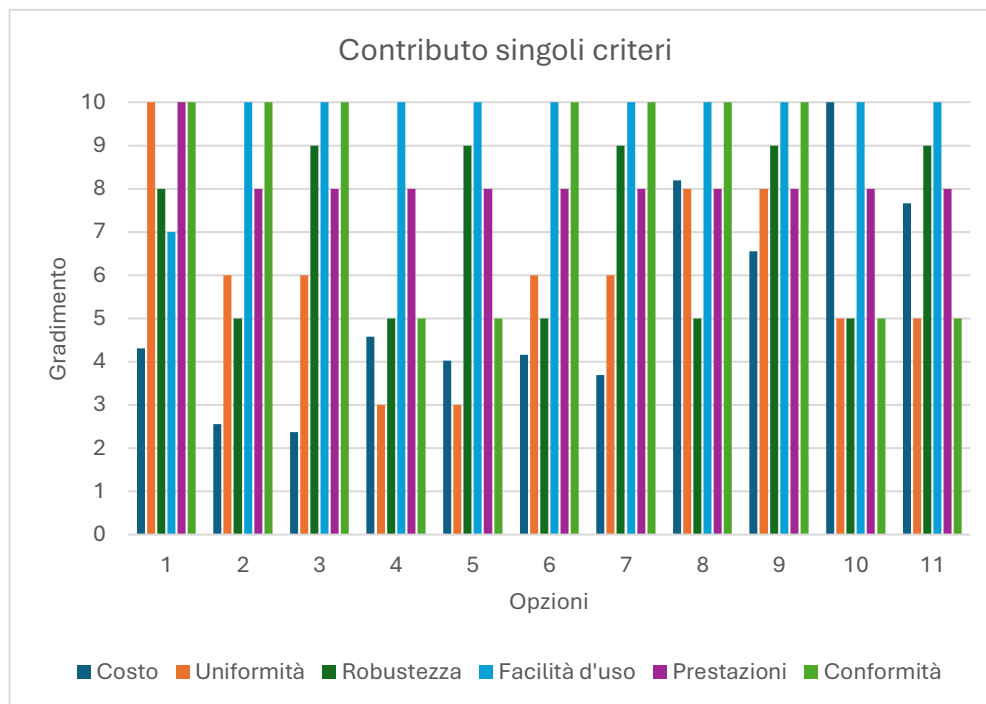


Figura 3.5: Contributo dei criteri per ogni opzione

Come funzionalità aggiuntiva, si è implementata la possibilità di salvare il foglio di lavoro in un file PDF direttamente premendo un “Pulsante (controllo modulo)” posizionato all’interno del foglio di lavoro. Questa funzionalità è stata realizzata utilizzando “Visual Basic for Applications” (VBA), un linguaggio di programmazione integrato nelle applicazioni Microsoft Office, che consente di automatizzare attività e creare funzionalità personalizzate.

Le fasi necessarie per l’implementazione di questa funzione possono essere sintetizzate come segue:

- Attivazione della scheda “Sviluppo” nella barra multifunzione di Excel, per abilitare la gestione di macro e script VBA.
- Inserimento di un “Pulsante (controllo modulo)” sul foglio di lavoro, per consentire l’interazione con l’utente.
- Scrittura della macro in VBA per automatizzare il salvataggio del foglio di lavoro in formato PDF.
- Associazione della macro al pulsante, in modo che la funzione venga eseguita automaticamente quando il pulsante viene premuto.

- Salvataggio del file Excel in formato “Cartella di lavoro con attivazione macro di Microsoft Excel” (.xlsm), necessario per garantire il corretto funzionamento della macro.
- Impostazione della scala di stampa, per adattare automaticamente il contenuto del foglio alla pagina PDF, garantendo una presentazione leggibile.

Questa implementazione non solo migliora la praticità e l’usabilità del foglio di lavoro ma, grazie alle funzionalità di Excel e al modo in cui è stato progettato, consente di modificare facilmente i pesi assegnati ai criteri. Intervenendo direttamente sui valori presenti nelle tabelle è possibile osservare in automatico come varia l’individuazione della “scelta ottima”.

In questo capitolo si è approfondito il processo decisionale basato sull’analisi multicriterio (MCA), utilizzata per selezionare la configurazione ottimale dei dispositivi di lettura da adottare nella linea di assemblaggio. Attraverso la metodologia WSM, è stato possibile identificare la soluzione che meglio soddisfa i criteri progettuali individuati.

È il momento ora di analizzare in dettaglio il secondo tema affrontato in questo elaborato: la realizzazione e l’implementazione di una soluzione di interfaccia grafica, economica e funzionale, basata sul single-board computer Raspberry Pi 4 Model B e una connessione VNC. Il fine è quello di monitorare e modificare, in caso di necessità, i profili forza-spostamento del processo produttivo di una specifica postazione automatica presente sulla linea di assemblaggio (Figura 2.1).

CAPITOLO 4

FOCUS SULLA POSTAZIONE AUTOMATICA PRESA IN ESAME

In parallelo all'analisi multicriterio, il progetto ha affrontato un'esigenza specifica del cliente: monitorare il processo produttivo di una specifica postazione automatica. Il focus è quindi stato posto su una specifica postazione della linea di montaggio. Il cliente vuole poter visionare, ed eventualmente intervenire, l'avanzamento del processo e il comportamento delle variabili fisiche che lo caratterizzano. Il banco automatico coinvolge l'utilizzo di una pressa elettromeccanica forza-spostamento e il suo modulo di misurazione e valutazione (Measuring and Evaluation Module, MEM).

La soluzione proposta, basata sull'utilizzo di un Raspberry Pi 4 Model B, di un display touchscreen e una connessione VNC, si presenta come alternativa più accessibile al display per il monitoraggio del processo proposto dal produttore del macchinario.

Prima di passare alla descrizione della postazione automatizzata presa in esame, è importante evidenziare che tre delle postazioni automatiche presenti nella linea di assemblaggio utilizzano la stessa servo pressa elettromeccanica forza-spostamento. Il lavoro proposto, quindi, può essere applicato in modo efficace anche alle altre due postazioni, garantendo uniformità e coerenza nell'intero processo produttivo.

4.1 Descrizione della postazione automatica presa in esame

Come spiegato nei capitoli precedenti, tre delle postazioni automatizzate presenti nella linea di assemblaggio utilizzano una servo pressa elettromeccanica forza-spostamento: un dispositivo che rappresenta un elemento essenziale per garantire precisione e affidabilità nelle operazioni del processo produttivo.

La postazione automatica presa in esame utilizza in maniera combinata un modulo di assemblaggio NC, ovvero la servo pressa, un sistema di monitoraggio dei processi "maXYmos NC", un servo amplificatore "IndraDrive" e una "Safety zone box".

Il maXYmos NC e la pressa sono prodotti dal Kistler Group: pioniere e leader mondiale nella tecnologia di misura dinamica di pressione, forza, coppia e accelerazione [25]. Mentre il servoamplificatore è prodotto da Bosch Rexroth, un'azienda leader nel settore dell'automazione industriale.

Il banco prova in esame è progettato per eseguire operazioni che richiedono un alto grado di precisione, sfruttando una combinazione di tecnologie avanzate e dispositivi integrati tra loro.

La Figura 4.1, tratta dal manuale del maXYmos NC [26], fornisce una panoramica dello schema generale, evidenziando il collegamento in rete tra i dispositivi e illustrando il principio di funzionamento del sistema.

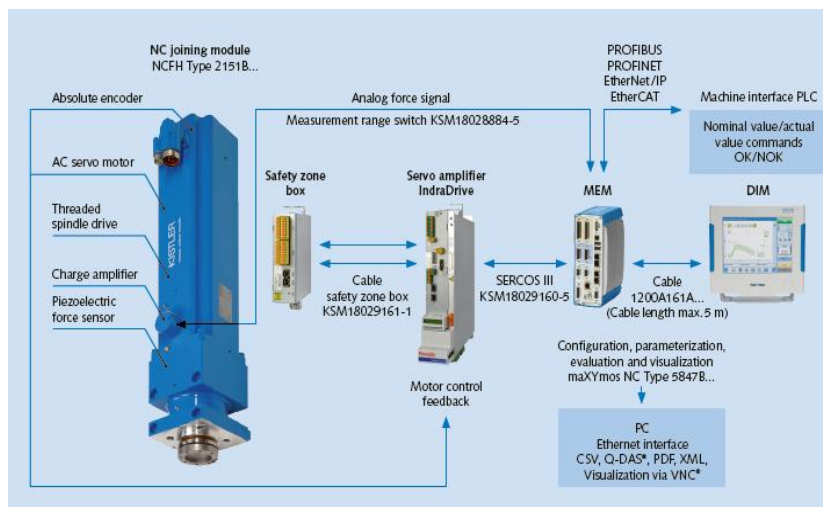


Figura 4.1: Collegamento in rete e principio di funzionamento di un sistema di assemblaggio NC

Va sottolineato che, nella configurazione della postazione automatica presa in esame, non è presente il DIM (Display Interface Module), ovvero il modulo di interfaccia display che invece è presente nello schema raffigurato nella Figura 4.1.

Questo perché, come precedentemente anticipato, il lavoro svolto è consistito nell'integrare una soluzione alternativa per dotare la postazione di un'interfaccia grafica. Tale soluzione si basa sull'utilizzo di un Raspberry Pi 4 Model B e sulla possibilità di integrarlo con un display touchscreen, al fine di offrire una soluzione funzionale e più accessibile. Di seguito vengono descritti i componenti della postazione presa in esame e le loro principali caratteristiche tecniche e funzionali.

4.1.1 Componenti principali e le loro funzioni

Per comprendere il funzionamento della postazione automatica in esame, è necessario analizzare i dispositivi che la compongono e il ruolo che ciascuno di essi svolge nel processo produttivo. La seguente sezione esamina i componenti integrati nella postazione, illustrandone le caratteristiche tecniche.

4.1.1.1 Modulo di assemblaggio NC

La servo pressa elettromeccanica forza-spostamento è il dispositivo responsabile dell'esecuzione fisica dell'operazione di giunzione. La pressa elettromeccanica viene utilizzata per applicare una forza controllata su un componente o materiale e misurare contemporaneamente il suo spostamento.

Sulla pressa sono presenti sia la cella di carico, che misura la forza applicata durante il processo di giunzione, sia l'encoder, che rileva con precisione la posizione dello stelo della pressa. Grazie a questi strumenti integrati, il sistema è in grado di monitorare il processo in tempo reale, generando profili forza-spostamento, che consentono un controllo dettagliato del ciclo di lavoro.

Gli esempi di servo presse prodotti da Kistler includono sistemi di giunzione elettromeccanici per produrre giunti di vari tipi utilizzando processi come pressatura, calandratura, rivettatura, goffratura e così via. Le presse sono utilizzate in impianti di produzione automatizzati e anche in postazioni di lavoro a controllo manuale. I sistemi di giunzione elettromeccanici migliorano e garantiscono la qualità del prodotto grazie al monitoraggio del processo durante la produzione, riducendo gli scarti e abbassando così i costi operativi. Per tal motivo, questo tipo di macchina, è ampiamente utilizzata in settori industriali dove è fondamentale eseguire operazioni come l'assemblaggio di componenti, la formatura di materiali o test di resistenza [27].

4.1.1.2 Sistema di monitoraggio dei processi maXYmos NC

Il sistema di monitoraggio maXYmos NC (Numerical Control) è progettato per controllare, monitorare, valutare e documentare le caratteristiche forza-spostamento di processi di giunzione e pressatura, rappresentandole in forma di profili XY. Il sistema

rappresenta una soluzione avanzata e flessibile per il controllo del processo produttivo in ambito industriale [28].

Combinato con i moduli di assemblaggio NC e il servoamplificatore IndraDrive, il maXYmos NC consente una gestione precisa e ripetibile delle sequenze operative, definibili dall'utente tramite parametri numerici come posizione, velocità, forza ed altre specifiche. Il sistema è programmato per eseguire una serie di operazioni, precise e ripetibili, sulla base di valori numerici immessi dall'utente. Questo approccio numerico permette di eseguire operazioni altamente sincronizzate e ottimizzate, con una comunicazione in tempo reale garantita dal protocollo SERCOS III: un bus in tempo reale full duplex, basato sullo standard Ethernet IEEE 802.3, che assicura un trasferimento dati deterministico e senza collisioni con metodo time-slot, ideale per applicazioni industriali ad alta precisione [29].

Il maXYmos NC è composto da due componenti di base (Figura 4.2): il modulo di misurazione e valutazione (MEM) e il modulo di interfaccia display (DIM).



Figura 4.2: Modulo DIM e modulo MEM

Questi moduli possono essere utilizzati come unità compatta, oppure possono essere installati separatamente l'uno dall'altro.

Il MEM offre due modalità di visualizzazione: tramite DIM o attraverso una connessione VNC (Virtual Network Computing) [30].

Poiché l'obiettivo di questa tesi è proporre una soluzione alternativa all'utilizzo del DIM, il modulo di interfaccia grafica non sarà approfondito in questa sezione, ma verrà trattato separatamente in seguito. Inoltre, verrà presentata anche la modalità operativa adottata nello sviluppo del progetto, basata sull'utilizzo di una connessione VNC.

Concentriamoci ora su uno degli elementi chiave del sistema: il modulo di misura e valutazione (MEM).

Questo modulo supporta una coppia di canali XY: registra e analizza i dati relativi alla forza e allo spostamento in direzioni X e Y durante ogni ciclo operativo, elaborando modelli matematici che vengono confrontati con un modello campione rappresentativo. Qualsiasi discrepanza permette di identificare anomalie e implementare interventi correttivi in tempo reale [31].

Il sistema di monitoraggio dei processi maXYmos può utilizzare un profilo per monitorare e valutare la qualità di un prodotto o di una fase di produzione. Per raggiungere questo obiettivo, il sistema mette in relazione tutte le misure: quelle acquisite tramite il canale Y con sensori di forza, coppia o pressione e quelle acquisite tramite il canale X con sensori di spostamento o angolo di rotazione.

Per analizzare le sezioni delle curve misurate che vengono acquisite dalle funzioni di misura, il maXYmos utilizza degli “oggetti di valutazione” (EO: Evaluation Objects).

Un ampio numero di EO può essere selezionato per l’analisi dell’andamento della curva. Le caratteristiche misurate sono valutate in modo dettagliato per garantire che ogni prodotto rispetti gli standard richiesti.

Inoltre, il MEM è dotato di interfacce dati e di controllo che consentono la comunicazione con altri dispositivi, sia attraverso segnali digitali che analogici (Figura 4.3). Le interfacce di rete permettono l’integrazione con reti industriali e sistemi di supervisione garantendo un’elevata flessibilità operativa. Il modulo di valutazione è dotato di un’interfaccia fieldbus, un sistema di comunicazione digitale utilizzato per collegare dispositivi di controllo e automazione industriale, potendo quindi comunicare direttamente con il PLC di sistema. Inoltre, i valori di processo generati per la valutazione possono essere trasmessi al PLC di sistema tramite il fieldbus.

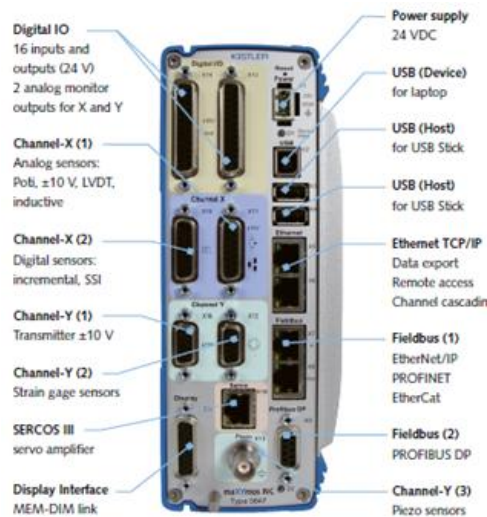


Figura 4.3: Interfacce MEM

L'implementazione del fieldbus consente la trasmissione bidirezionale di segnali di controllo e il trasferimento bidirezionale di EO in un telegramma, il cui contenuto è liberamente definibile dall'utente [32].

Grazie al controllo di processo integrato nel sistema di monitoraggio e valutazione maXYmos NC, il processo di giunzione è controllato in base alla macchina e al PLC Beckhoff dell'impianto.

Come spiegato nel manuale per l'utilizzo del maXYmos NC, sono disponibili due modalità operative per il sistema di giunzione NC: la modalità "jog" e modalità "sequenza". La prima è la modalità di funzionamento manuale, in cui l'operatore controlla direttamente il funzionamento del sistema mentre, la modalità "sequenza", rappresenta la modalità automatica in cui il PLC può inviare comandi al modulo per eseguire una sequenza di movimenti predefinita in modo automatico. Il PLC seleziona il programma desiderato, la modalità operativa e, se necessario, la sequenza e avvia il movimento o il processo tramite i corrispondenti segnali di controllo. Il posizionamento del modulo di giunzione NC viene eseguito dal servoamplificatore: un dispositivo che converte un segnale elettrico in un segnale meccanico, controllando il movimento dello stelo di pressatura.

Alcune funzioni possono essere eseguite direttamente dall'utente utilizzando il monitor maXYmos NC, senza bisogno del PLC. Tuttavia, è importante notare che, quando si

utilizzano queste funzioni il controllo del PLC viene disabilitato. È pertanto necessario tenere conto di questa situazione durante la programmazione del PLC per evitare conflitti o comportamenti inattesi [26].

Il controllo della servo pressa elettromeccanica può essere gestito in due modi: sia tramite il maXYmos NC, sia tramite PLC: la possibilità di controllare la pressa in questi due modi offre un'elevata flessibilità e adattabilità, rendendola una soluzione ideale per una vasta gamma di applicazioni industriali.

Questo sistema avanzato di monitoraggio migliora la qualità del processo produttivo garantendo un'elevata ripetibilità, documentazione completa e la possibilità di intervenire in tempo reale. Le sue capacità diagnostiche includono messaggi di allarme, analisi delle cause di anomalie e sequenze di tendenza, rendendolo uno strumento indispensabile per il controllo della qualità nei cicli produttivi moderni [26].

In sintesi, il maXYmos NC è uno strumento potente per migliorare la qualità e l'efficienza dei processi industriali, garantendo la conformità ai requisiti di produzione, integrando misurazione, analisi e controllo in un'unica soluzione.

4.1.1.3 Servoamplificatore IndraDrive

Un servoamplificatore è un dispositivo elettronico che converte un segnale digitale, come un segnale di controllo proveniente da un PLC, in un segnale meccanico, controllando la velocità, la posizione e la forza di un motore elettrico. Nel caso del banco automatico preso in considerazione, il servoamplificatore IndraDrive controlla il movimento del modulo di giunzione, assicurando che si muova con la precisione e la velocità richieste per eseguire il montaggio in modo corretto.

Gli IndraDrive sono servoamplificatori prodotti da Bosch Rexroth, un'azienda leader nel settore dell'automazione industriale. Il pacchetto di un servoamplificatore IndraDrive include i seguenti componenti: una sezione di potenza con il firmware necessario, un set di parametri predefiniti, una "safe zone box" per la sicurezza e i cavi necessari per il collegamento [33].

La Figura 4.4, mostra un servoamplificatore IndraDrive insieme ai suoi componenti associati: la sezione di potenza, l'unità di controllo e la "safety zone box".



Figura 4.4: Servoamplificatore e safety zone box

Il servoamplificatore converte i segnali elettrici in movimento meccanico; la sezione di potenza fornisce l'energia necessaria al servoamplificatore per azionare il motore e l'unità di controllo può essere configurata per eseguire specifiche operazioni.

La safety zone box ha lo scopo di garantire la sicurezza del sistema implementando funzioni di sicurezza come l'arresto di emergenza o la limitazione della velocità.

Questo sistema garantisce prestazioni ottimali e allo stesso tempo riduce al minimo il tempo di progettazione richiesto al progettista per la tecnologia di azionamento.

Il motore del modulo di giunzione NC è controllato dal servoamplificatore IndraDrive: ciò ha un impatto diretto sulla corsa, sulla velocità di traslazione e sulla forza massima del modulo di giunzione NC. Le specifiche di questo controllo vengono trasferite direttamente tramite bus SERCOS III in conformità alla sequenza parametrizzata nel maXYmos NC [34].

In sintesi, il servoamplificatore IndraDrive è un componente fondamentale del sistema maXYmos NC. Grazie alla sua capacità di controllare con precisione il movimento del modulo di giunzione, contribuisce a garantire la qualità e la ripetibilità del processo di produzione.

4.1.1.4 Display Interface Module (DIM)

Il modulo di visualizzazione (DIM) per i sistemi di monitoraggio dei processi maXYmos NC serve come interfaccia uomo-macchina, consentendo la configurazione del sistema e la visualizzazione delle curve di valutazione.

Questo modulo fornisce una rappresentazione visiva chiara e intuitiva dello stato della postazione (Figura 4.5) [35].

Attraverso il display l'operatore può svolgere diverse operazioni tra le quali:

- Monitorare i parametri di processo in tempo reale.
- Intervenire per regolare o modificare le impostazioni operative.
- Consultare notifiche sullo stato della postazione.

Il DIM semplifica la gestione del sistema tramite un'interfaccia intuitiva, accessibile sia da touchscreen opzionale che da PC. Questa interfaccia semplifica la configurazione e la parametrizzazione delle sequenze operative, migliorando l'interazione con il sistema.



Figura 4.5: Modulo di interfaccia grafica (DIM)

Il display è un touchscreen a colori da 10,4 pollici, con una risoluzione video di 800 x 600 pixel [35].

Il design modulare consente di adattare l'installazione alle diverse esigenze: da un montaggio su scrivania ad un'integrazione a parete o a pannello modificabile in qualsiasi momento. La versatilità del sistema di fissaggio permette di passare facilmente da una configurazione all'altra in base alle necessità del progetto [28].

Tuttavia, il DIM è fornito come accessorio opzionale acquistabile separatamente.

Il MEM offre quindi due modalità di visualizzazione:

- 1) tramite connessione VNC, è possibile monitorare l'avanzamento del processo nella postazione Server.
- 2) tramite DIM, è possibile visualizzare direttamente l'avanzamento del processo direttamente nella postazione del banco automatico.

Come illustrato, il cliente richiede la possibilità di monitorare il processo e le relative variabili fisiche, direttamente nella postazione del banco automatico in esame, ed eventualmente intervenire sui profili forza-spostamento.

Per soddisfare questa esigenza, la scelta ricadrebbe sulla modalità di visualizzazione tramite utilizzo del DIM. Questa soluzione è tuttavia accompagnata da un costo significativo, soprattutto considerando che il modulo di visualizzazione dovrebbe essere installato su tre diverse postazioni.

Per offrire una soluzione più economica, ma ugualmente funzionale, è stata realizzata una un'alternativa basata sull'utilizzo del Raspberry Pi 4 Model B e una connessione VNC. Analogamente al DIM, la soluzione adottata consente all'operatore della postazione di lavoro del banco della pressa elettromeccanica, di monitorare e interagire con il processo produttivo direttamente dalla propria postazione. Tale interfaccia garantisce un controllo completo e immediato, pur mantenendo costi contenuti e un'elevata semplicità d'uso.

4.2 Integrazione del progetto con il banco automatico

L'integrazione del progetto di tesi con il banco automatico rappresenta un elemento chiave per il completamento e l'ottimizzazione della linea di assemblaggio. La postazione descritta nei paragrafi precedenti, composta dalla servo pressa, dal sistema maXYmos NC e dal servoamplificatore IndraDrive, è stata messa in funzione dal team di Visionar, garantendo il corretto funzionamento di tutti i componenti e la piena interazione con l'infrastruttura di controllo centralizzata della linea.

Grazie ai protocolli Ethernet ed EtherCAT, la postazione comunica costantemente con la postazione di controllo centrale, inviando dati relativi al processo e ricevendo istruzioni operative. Questa architettura garantisce un controllo efficace lungo l'intera linea di produzione, creando un ambiente integrato e altamente efficiente.

Il progetto presentato si inserisce in questo contesto, aggiungendo al banco automatico una soluzione di interfaccia grafica remota.

L'accesso remoto alla postazione è stato realizzato utilizzando il VNC, che consente di monitorare e controllare il sistema maXYmos NC tramite un Raspberry Pi 4 Model B collegato alla rete Ethernet.

L'accesso remoto al sistema maXYmos NC tramite connessione VNC offre una serie di vantaggi operativi, tra cui:

- L'interazione con il sistema avviene attraverso un'interfaccia che riproduce fedelmente le funzionalità del display DIM.
- Tramite l'interfaccia grafica è possibile modificare i parametri di processo, avviare o arrestare le operazioni e risolvere eventuali problemi.
- È possibile monitorare lo stato operativo del banco automatico direttamente nella postazione senza dover andare alla postazione di controllo centrale.

L'integrazione del progetto con il banco automatico rappresenta un esempio pratico di come tecnologie avanzate come il Raspberry Pi 4 Model B e i software di interfaccia, possano essere sfruttati per migliorare le operazioni industriali.

CAPITOLO 5

TECNOLOGIE E STRUMENTI UTILIZZATI PER LA SOLUZIONE DI INTERFACCIA GRAFICA

La realizzazione della soluzione di interfaccia grafica remota è stata possibile grazie all'integrazione e all'uso di tecnologie hardware e software. Questo capitolo descrive nel dettaglio gli strumenti impiegati evidenziandone le caratteristiche e il ruolo nel contesto dell'implementazione. L'obiettivo di questo capitolo è fornire una panoramica completa delle tecnologie che hanno permesso di integrare la soluzione proposta nella linea di assemblaggio automatica.

Si analizzeranno i componenti hardware, come lo Switch Ethernet, il Raspberry Pi 4 Model B e il display touchscreen compatibile con il computer a scheda singola e si approfondiranno le soluzioni software adottate, con un focus sulla realizzazione della connessione remota tramite VNC.

5.1 Componenti hardware

La progettazione e lo sviluppo della soluzione proposta si basano su una serie di componenti hardware capaci di integrarsi con il sistema del banco automatico descritto nel capitolo precedente.

Di seguito vengono descritti i principali elementi hardware utilizzati:

- Switch Ethernet: un dispositivo essenziale per garantire la connessione tra i vari componenti della linea di assemblaggio, creando una rete locale (LAN) tra i dispositivi ad esso collegati.
- Raspberry Pi 4 Model B: tale dispositivo ha un ruolo centrale nel sistema di controllo e gestione remota; è stato scelto per le sue prestazioni e versatilità.
- Display touchscreen: un'interfaccia utente compatibile con il single-board computer Raspberry Pi, utilizzata per il monitoraggio e il controllo del sistema.

Questi componenti non solo offrono robustezza e flessibilità al progetto, ma si integrano perfettamente con l'infrastruttura Ethernet già in funzione della linea di assemblaggio.

5.1.1 Switch Ethernet

Lo Switch Ethernet rappresenta un nodo centrale nella configurazione della linea di assemblaggio. La sua funzione principale è quella di creare una rete locale o LAN (Local Area Network), garantendo una comunicazione stabile e affidabile tra i vari nodi connessi alla rete.

La principale caratteristica della rete LAN è il fatto di essere locale (o privata) quindi non direttamente esposta ad Internet: una Local Area Network riconosciuta attraverso l'indirizzamento IP che le è stato assegnato ed attraverso il quale comunicano i dispositivi interconnessi [36].

Grazie allo switch Ethernet, è possibile gestire con precisione il flusso di dati tra le postazioni automatiche e l'infrastruttura di controllo centralizzata, come descritto nel capitolo precedente.

Gli switch Ethernet sono caratterizzati da un'elevata affidabilità ed offrono numerosi vantaggi per la configurazione della linea: permettono di collegare un numero variabile di dispositivi e garantiscono una comunicazione rapida ed efficiente tra i componenti della rete.

Nel contesto del progetto, lo switch Ethernet è stato configurato per supportare il protocollo Ethernet per il funzionamento della linea di produzione: i dispositivi sono connessi tramite cavi Ethernet.

Oltre alla creazione della rete, lo switch Ethernet svolge altre funzioni fondamentali per garantire prestazioni ottimali [37], tra cui:

- L'instradamento dei pacchetti in base agli indirizzi MAC dei dispositivi connessi.
- Lo switch suddivide la rete in segmenti più piccoli, riducendo il traffico complessivo e migliorando l'efficienza della comunicazione.

In aggiunta, esso rappresenta il punto di accesso per il Raspberry Pi, consentendo l'implementazione della soluzione VNC per l'accesso remoto.

Il Raspberry Pi funge in questo caso da terminale per visualizzare e interagire con il MEM, sfruttando la connessione di rete per comunicare con il dispositivo.

Un diagramma schematico della configurazione LAN, in cui il Raspberry Pi 4 è stato integrato è mostrato in Figura 5.1.

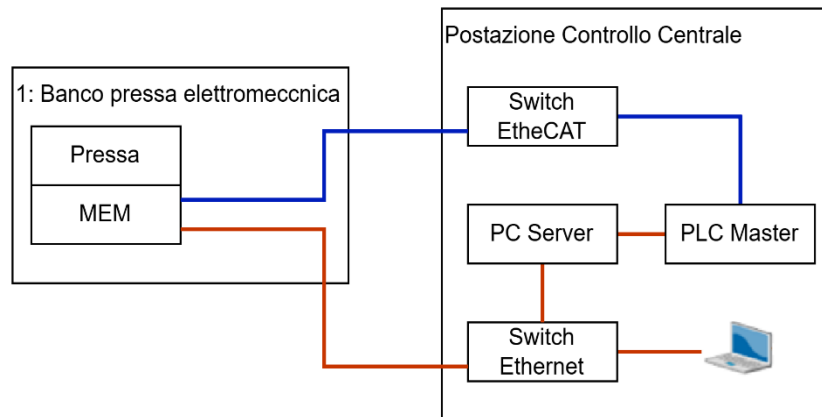


Figura 5.1: Schema della situazione in esame

La figura include esclusivamente il collegamento tra la postazione di controllo centrale ed il banco della pressa elettromeccanica considerata nel progetto.

5.1.2 *Raspberry Pi 4 Model B*

Il Raspberry Pi è un “single-board computer” (SBC) sviluppato nel Regno Unito dalla Raspberry Pi Foundation, presentato al pubblico per la prima volta nel 2012. Da allora sono stati sviluppati nuovi modelli che si adattano ai progressi della tecnologia moderna, consolidando il Raspberry Pi come uno dei minicomputer più versatili e diffusi al mondo. La “Raspberry Pi Foundation” produce computer in diverse serie, nello specifico: la serie principale di dispositivi, spesso indicata semplicemente come “Raspberry Pi”, offre un hardware dalle alte prestazioni, un sistema operativo Linux completo e una serie di porte comuni in un formato compatto delle dimensioni di una carta di credito [38].

Nel progetto è stato scelto il Raspberry Pi 4 Model B (Figura 5.2): questo modello rappresenta un’ottima combinazione di versatilità, potenza e basso costo che lo rendono ideale per applicazioni industriali e didattiche.



Figura 5.2: Raspberry Pi 4 Model B

Il Raspberry Pi 4 Model B è un dispositivo compatto ma potente, capace di offrire prestazioni desktop paragonabili ai sistemi PC x86 entry-level: le sue prestazioni sono paragonabili a quelle di un PC di fascia bassa, ma il dispositivo vanta una maggiore flessibilità e un consumo energetico inferiore.

Le caratteristiche principali di questo dispositivo includono:

- **Processore:** il Raspberry Pi 4 Model B è dotato di un processore Broadcom BCM2711, quad-core Cortex-A72 (ARM v8) a 64 bit, con una frequenza di clock di 1.5 GHz. Questo garantisce un'elevata capacità di elaborazione.
- **Memoria RAM:** è disponibile in diverse configurazioni da 1 GB, 2 GB, 4 GB fino ad 8 GB di RAM LPDDR4, offrendo opzioni per diversi progetti, dai più leggeri a quelli più complessi.
- **GPIO (General Purpose Input/Output):** dispone di un connettore GPIO a 40 pin, retrocompatibile con le schede Raspberry Pi precedenti, per collegare una vasta gamma di sensori, attuatori e altri dispositivi esterni.
- **Connettività:**
 - Supporta Wi-Fi dual-band 2.4 GHz e 5.0 GHz (IEEE 802.11 b/g/n/ac) e Bluetooth 5.0, BLE.
 - È dotato di una porta Gigabit Ethernet per connessioni cablate ad alta velocità.

- Include due porte USB 3.0 e due porte USB 2.0, consentendo una rapida interfaccia con periferiche e dispositivi esterni.
- Video e audio:
 - Due porte micro-HDMI consentono di collegare fino a due schermi con risoluzioni 4K (4Kp60 supportato su entrambe).
 - Offre un'interfaccia MIPI DSI per display e una MIPI CSI per fotocamere, oltre a una porta audio stereo a quattro poli con uscita composita video.
- Multimedia: supporta la decodifica video hardware fino a 4Kp60 per H.265, 1080p60 per H.264, e 1080p30 per la codifica. Il dispositivo include anche il supporto a OpenGL ES 3.0 per la grafica avanzata.
- Archiviazione: è presente uno slot per schede microSD, utilizzabile sia per il sistema operativo che per l'archiviazione dati.
- Alimentazione:
 - Supporta alimentazione 5 V tramite porta USB Type-C (minimo 3 A richiesti).
 - Include anche un'opzione di alimentazione tramite GPIO (minimo 3 A).
 - È compatibile con Power over Ethernet (PoE), se abbinato a un modulo PoE HAT separato.

Il Wi-Fi dual-band e il Bluetooth dispongono di certificazioni di conformità modulari, consentendo di progettare il prodotto finale con test di conformità significativamente ridotti, migliorando sia i costi che i tempi di commercializzazione.

In sintesi, il Raspberry Pi 4 Model B rappresenta un dispositivo potente e versatile, capace di offrire un equilibrio ideale tra prestazioni elevate, consumi energetici ridotti e costi contenuti [39].

Nello specifico caso di questo progetto, è stata scelta la versione del Raspberry Pi 4 Model B dotata di 4 GB di RAM.

La scelta tra il Raspberry Pi 4 Model B da 4 GB e le altre versioni disponibili è stata effettuata principalmente dopo un'analisi delle necessità operative e del rapporto costi-benefici.

Durante il processo decisionale, è stato preso in considerazione anche l'ultimo modello della serie di punta, il Raspberry Pi 5, che rappresenta un significativo passo avanti in termini di prestazioni rispetto al Raspberry Pi 4 [40].

Tuttavia, sono state individuate diverse ragioni per preferire il Raspberry Pi 4 Model B, tra cui i requisiti del progetto e il costo complessivo.

Le prestazioni offerte dal Raspberry Pi 4 Model B sono sufficienti per soddisfare le esigenze del progetto, che non include operazioni di calcolo intensivo, applicazioni grafiche avanzate o multitasking complesso. Il processore Broadcom BCM2711 del Raspberry Pi 4 garantisce già un'esperienza fluida per il controllo remoto tramite un software "VNC Viewer" e per l'utilizzo di un'interfaccia grafica.

In confronto, il Raspberry Pi 5 è caratterizzato da un prezzo di mercato significativamente più elevato, unito ad un consumo energetico maggiore, richiede infatti fino a 12 W rispetto agli 8 W del modello precedente. Questo comporta una maggiore produzione di calore e quindi anche un incremento dei requisiti per il sistema di alimentazione e raffreddamento. In sintesi, la scelta del Raspberry Pi 4 Model B rappresenta una soluzione affidabile, economica ed efficiente. Sebbene il Raspberry Pi 5 offra prestazioni migliori significativi, tali miglioramenti sarebbero stati superflui per le esigenze specifiche di questo progetto, introducendo al contempo costi e complessità maggiori.

Una volta che la scelta è ricaduta sul Raspberry Pi 4, un altro fattore di scelta ha riguardato il dimensionamento della RAM.

Tra le versioni disponibili, quella con 4 GB di RAM è stata ritenuta la più adatta, rispetto al dispositivo dotato di 8 GB, sulla base delle seguenti considerazioni:

- Esigenze del progetto: il progetto descritto in questo elaborato richiede l'utilizzo di un software VNC per il controllo remoto del banco di prova preso in esame. Tale operazione non prevede un carico di lavoro intensivo. Inoltre, la risoluzione grafica prevista per l'interfaccia è standard e non include l'uso di schermi multipli o configurazioni ad alta risoluzione, casi che avrebbero potuto giustificare l'utilizzo di una RAM maggiore.
- Analisi costi-benefici: il modello da 4 GB offre un rapporto qualità-prezzo ideale per applicazioni industriali leggere che non richiedono un multitasking complesso. Al contrario, il costo del modello da 8 GB è significativamente più

alto e avrebbe rappresentato un investimento non necessario per un progetto come quello che è stato sviluppato.

Data la natura del progetto, non sono previste future espansioni che richiedano una maggiore quantità di RAM. Qualora fosse necessario aumentare la capacità di calcolo, in futuro si potrebbe valutare l'utilizzo di un modello caratterizzato da prestazioni superiori. L'adozione del modello con 8 GB è stata scartata poiché, tale dispositivo, è progettato per applicazioni che richiedono una maggior potenza di calcolo come il machine learning o la visione artificiale, ambiti che non rientrano tra gli obiettivi di questo progetto.

In conclusione, il Raspberry Pi Model B con 4 GB di RAM è sufficiente per il carico di lavoro richiesto da questa applicazione, permettendo di ridurre i costi senza compromettere le prestazioni.

5.1.3 Display touchscreen

Il display touchscreen costituisce l'interfaccia utente, consentendo il monitoraggio e il controllo tramite il "single-board computer" Raspberry Pi. Al fine di garantire una rapida e semplice integrazione con il dispositivo, è stato selezionato un display compatibile con il Raspberry Pi.

La scelta del monitor da adottare è ricaduta sul "7inch HDMI Display-C" prodotto da LAFVIN, un'azienda specializzata che si occupa della progettazione, dello sviluppo e della produzione di schede Arduino, moduli sensori, robot car, stampanti 3D ed altri articoli STEM (Science, Technology, Engineering and Mathematics) [41].

La Figura 5.3 mostra il monitor selezionato per il progetto.

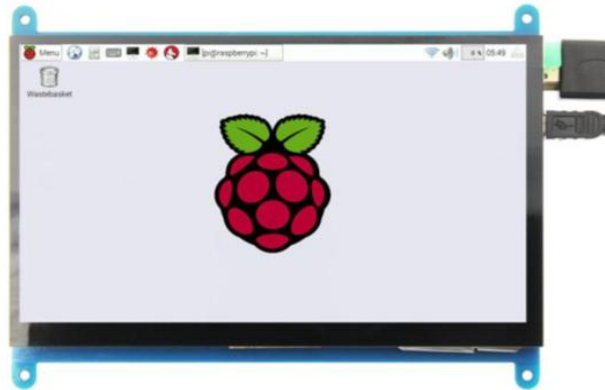


Figura 5.3: 7inch HDMI Display-C

Per una panoramica completa delle specifiche tecniche del monitor è possibile consultare il manuale del prodotto [42]. Di seguito vengono presentate quelle che sono le specifiche tecniche più rilevanti.

Il monitor è un display standard da 7 pollici, con dimensioni 164.9 x 124.27 mm. La risoluzione hardware è di 1024 x 600, ma può essere configurata a livello software fino a 1920 x 1080. Lo schermo è di tipo touch capacitivo, supporta fino a cinque tocchi simultanei e dotato di retroilluminazione. È compatibile con diversi sistemi operativi, tra cui Raspberry Pi OS, Ubuntu, Kali-Linux, Kodi e Windows 10 IoT, e offre funzionalità touch a singolo punto senza necessità di installare driver aggiuntivi.

La Figura 5.4 mostra un particolare del retro dello schermo dove sono etichettate quattro componenti di interesse.

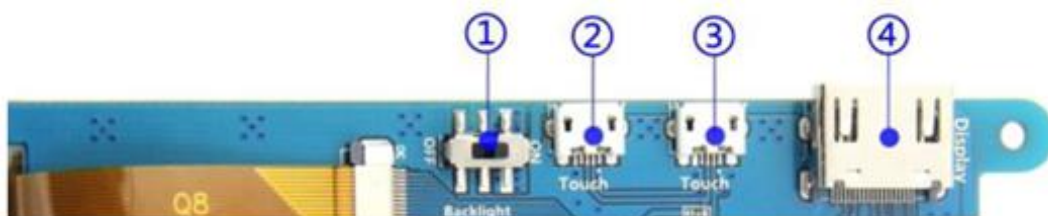


Figura 5.4: Sezione del retro del display

L'interruttore di alimentazione della retroilluminazione, indicato con (1), consente di controllare l'accensione e lo spegnimento della retroilluminazione del display, ovvero la sorgente di luce che illumina il pannello LCD da dietro. Questo interruttore rappresenta una funzione utile per risparmiare energia quando il display è inutilizzato.

I due connettori USB touch/alimentazione, indicati come i punti (2) e (3), sono una coppia di porte micro-USB che hanno una doppia funzione; servono sia per fornire alimentazione al display sia per trasmettere i segnali touch necessari per l'interazione con lo schermo. L'interfaccia HDMI, indicata nel punto (4), costituisce l'interfaccia principale per collegare il display al Raspberry Pi. L'HDMI (High-Definition Multimedia Interface) è uno standard digitale che consente la trasmissione video e audio in alta definizione.

Il monitor viene fornito con un set di accessori che includono: un cavo HDMI maschio-maschio e un adattatore HDMI-micro-HDMI femmina-maschio, necessario per collegare il monitor alla porta micro-HDMI presente sul Raspberry Pi 4 Model B.

La struttura hardware del display e i suoi accessori garantiscono un'integrazione semplice e funzionale con il SBC, rendendolo adatto alle esigenze del progetto.

5.2 Software utilizzati

La realizzazione del progetto è stata resa possibile grazie all'integrazione di tecnologie hardware e software. Dopo aver analizzato i componenti hardware utilizzati, in questo paragrafo vengono presentati e approfonditi i software utilizzati nello sviluppo del progetto.

Tra i software adottati troviamo il "Raspberry Pi Imager", utilizzato per installare il sistema operativo sul Raspberry Pi, e "PuTTY", uno software fondamentale per la gestione remota del dispositivo tramite connessione SSH. Per quanto riguarda il controllo remoto con l'interfaccia grafica, si è utilizzata una connessione VNC, che consente di accedere e controllare il desktop di un dispositivo da un altro, garantendo semplicità e versatilità nell'interazione con il sistema.

Nel corso del paragrafo vengono analizzate nel dettaglio i software utilizzati e il ruolo svolto nell'integrazione della soluzione proposta, con particolare attenzione al Virtual Network Computing.

5.2.1 Raspberry Pi Imager

Per una corretta funzione, la scheda Raspberry Pi richiede l'installazione di un sistema operativo su una scheda microSD da inserire nell'apposito slot.

"Raspberry Pi Imager" rappresenta il modo più rapido e semplice per preparare la scheda microSD, rendendola pronta per essere usata sul Raspberry Pi.

Raspberry Pi Imager permette di scegliere il sistema operativo desiderato da installare e configura la scheda microSD per accoglierlo. Il software è disponibile per il download gratuito sul sito ufficiale del single-board computer [43]. La versione utilizzata in questo progetto è la 1.8.5.0.

Una volta scaricato e installato il programma sul computer, è sufficiente inserire la scheda di memoria nel PC e avviare Raspberry Pi Imager per procedere con il flashing del sistema operativo sulla scheda microSD.

Il programma offre un'interfaccia intuitiva che permette di scegliere tra numerosi sistemi operativi. Tra questi è incluso il sistema ufficialmente supportato Raspberry Pi OS, oltre

a opzioni sviluppate da altre organizzazioni, tra cui: Ubuntu, Debian, LibreELEC, RetroPie e Recalbox.

Le procedure operative per l'installazione e configurazione del sistema operativo verranno illustrate in dettaglio nella sezione dedicata alle attività pratiche di realizzazione del progetto.

5.2.2 PuTTY

PuTTY è un client SSH e Telnet per piattaforme Windows e Unix, combinato con un emulatore di terminale per la gestione remota di sistemi informatici. Il software è disponibile gratuitamente per il download dal sito ufficiale [44] e la versione utilizzata in questo progetto è la 0.81.

SSH (Secure Shell) è un protocollo di rete che consente l'accesso remoto tramite una connessione crittografata. Inoltre, SSH supporta funzionalità avanzate come la gestione delle identità, il controllo degli accessi e l'automazione dei processi. Questo protocollo permette di accedere a un sistema multiutente, come quelli basati su Unix, da un altro computer attraverso una rete. I sistemi operativi multiutente forniscono solitamente un'interfaccia a riga di comando, dove l'utente può digitare comandi che il sistema eseguirà. Grazie all'utilizzo di SSH, non è necessario essere fisicamente presenti sulla macchina per impartire i comandi: questi possono essere inviati da remoto tramite la rete [45].

In fase realizzativa del progetto, PuTTY è stato utilizzato per completare alcune fasi di configurazione del Raspberry Pi. Per stabilire la connessione via SSH, è necessario che il PC e il Raspberry Pi siano collegati alla stessa rete. Questa connessione consente di inviare comandi dal client al server e ricevere le risposte. Si avrà accesso al medesimo prompt dei comandi che si otterrebbe collegandosi fisicamente al Raspberry Pi. In questo modo è possibile eseguire comandi da remoto sul dispositivo.

Le operazioni svolte utilizzando PuTTY verranno descritte in dettaglio nella sezione dedicata allo sviluppo operativo della soluzione adottata.

5.2.3 *Software VNC*

I software Virtual Network Computing (VNC) sono applicazioni di controllo remoto utilizzate per l'utilizzo di un computer, o di un server, a distanza.

Il sistema per la realizzazione di una connessione VNC è composto da un dispositivo che opera da server e da un dispositivo configurato come “viewer” (client). Il VNC server è un software da installare sulla macchina che si vuole controllare a distanza, mentre il VNC viewer è il programma da installare sulla macchina da cui si vuole accedere e operare sul server.

Installando un server VNC sulla macchina che si vuole controllare, si consente ai client VNC di visualizzare il desktop del dispositivo server e di interagire con esso, inviando input da tastiera e mouse tramite una connessione remota. I software VNC consentono in pratica di gestire e controllare un dispositivo server direttamente da un altro dispositivo.

Il protocollo di comunicazione utilizzato a livello di trasporto (livello 4 della pila protocollare) è il TCP (Transmission Control Protocol), con la porta di default 5900 per la connessione principale. Nel caso in cui più server siano configurati allo stesso indirizzo IP, vengono utilizzate le porte adiacenti [46].

A livello applicativo, i dati scambiati tra il client e il server avvengono tramite protocollo RFB (Remote Framebuffer), che consente al client di controllare lo schermo del server da remoto [47].

Il TCP è un protocollo full-duplex, connection-oriented, in grado di garantire una consegna affidabile e in sequenza, implementando anche un controllo sulla velocità di emissione dei dati. Tra le principali caratteristiche del TCP vi è la capacità di ritrasmettere i pacchetti dati in caso di mancata ricezione di una conferma, assicurando così l'affidabilità della comunicazione. TCP esegue inoltre un controllo di congestione end-to-end per evitare che la rete venga utilizzata oltre le sue capacità. Il protocollo frammenta o ricomponde l'informazione in segmenti di dimensione opportuna e mette inoltre in sequenza i datagram IP che arrivano fuori sequenza [48].

RFB (Remote Framebuffer) è un protocollo per l'accesso remoto alle interfacce utente. Funziona al livello della memoria di quadro che corrisponde grossomodo all'immagine mostrata sullo schermo, il che significa che può essere usato con tutti i sistemi operativi

a finestre. Le applicazioni per gestire il protocollo RFB esistono per molte piattaforme e spesso possono essere liberamente ridistribuite [49].

Nel caso specifico del progetto, durante le fasi di installazione e configurazione del Raspberry Pi, è stato utilizzato un PC dotato di sistema operativo Windows 11 come client, mentre il Raspberry Pi ha svolto il ruolo di server. Questa configurazione è stata adottata per semplificare e accelerare il processo di configurazione del dispositivo, considerando che è stata effettuata una installazione “headless”. In un’installazione headless, il Raspberry Pi non viene collegato a periferiche fisiche come monitor, tastiera o mouse. Questa scelta ha permesso di ridurre l’ingombro, alleggerire il sistema e rendere più semplice lo spostamento del dispositivo.

Durante la fase di test della connessione VNC, effettuata tra il Raspberry Pi e il PC, e nella successiva integrazione del sistema con la linea di produzione, il ruolo dei dispositivi cambia: il Raspberry Pi viene configurato come viewer. In questa configurazione, tramite il display che verrà collegato al Raspberry Pi, è possibile visualizzare il desktop del PC durante la fase di test e, una volta integrato nella linea di assemblaggio, l’interfaccia grafica del MEM.

I software VNC sono prodotti “cross-platform”, utilizzabili perciò su diversi sistemi operativi. Esistono numerose versioni di programmi VNC, ma nello specifico quelli impiegati per la realizzazione di questo progetto sono:

- RealVNC.
- TightVNC.

Sia RealVNC che TightVNC possono essere definiti come “applicazioni di desktop remoto”, poiché sono software ad interfaccia grafica. Oltre a questa funzionalità principale, includono strumenti per l’interazione tramite tastiera e mouse locali. Molte di queste applicazioni VNC offrono ulteriori funzionalità, come lo scambio di file o la possibilità di comunicare tramite una chat integrata.

5.2.3.1 RealVNC

RealVNC è un'azienda che fornisce software di accesso remoto: offre sia l'applicazione server (RealVNC Server), che il software client (RealVNC Viewer). Questi due componenti comunicano tramite il protocollo RFB per consentire al Viewer di controllare lo schermo del server da remoto.

RealVNC Viewer è disponibile per il download dal sito ufficiale [50] e la versione utilizzata in questo progetto è la 7.13.0.45.

RealVNC Viewer è stato inizialmente utilizzato sul PC durante le fasi di installazione e configurazione del Raspberry Pi. Successivamente è stato installato sul Raspberry Pi, così da poterlo utilizzare come client, sia durante i test con il PC, sia nell'integrazione nella linea di assemblaggio per avere un'interfaccia grafica del MEM.

RealVNC Server, già incluso di default nel sistema operativo scelto Raspberry Pi OS, è stato utilizzato sul Raspberry Pi durante le fasi di installazione e configurazione iniziali.

Tuttavia, nelle fasi di test della connessione VNC in cui il Raspberry Pi viene utilizzato come client, è stato preferito TightVNC Server come software da utilizzare sul PC.

Inizialmente si è provato ad utilizzare RealVNC Server. Durante lo sviluppo del progetto, sono tuttavia emerse alcune difficoltà nel suo utilizzo. Per superare tali limitazioni, si è deciso di adottare TightVNC, una soluzione alternativa che ha garantito una maggiore flessibilità e facilità di configurazione, pur mantenendo elevate le prestazioni del sistema.

5.2.3.2 TightVNC

TightVNC è un software di controllo remoto open source, compatibile con la maggior parte dei client VNC, composto da un server e da un viewer.

Dopo aver preso in considerazione le situazioni di seguito riportate, si è scelto di utilizzare TightVNC Server.

La versione Enterprise di RealVNC Server offre funzionalità aggiuntive, tra cui:

- Offline licesing, consente la distribuzione di RealVNC Server su dispositivi non connessi a Internet. Questa modalità richiede una connettività diretta per la configurazione.

- Connettività diretta (LAN): permette di stabilire una connessione TCP/IP diretta al dispositivo remoto. Questa configurazione necessita di indirizzi IP statici o nomi host disponibili agli utenti.

Le altre versioni di RealVNC Server, inclusa quella gratuita, supportano solo connessioni “Cloud”, ovvero connessioni tra dispositivi remoti che passano attraverso internet.

Avendo osservato queste limitazioni e considerando che il software sarebbe stato utilizzato esclusivamente per i test di connessione con il PC Windows, RealVNC Server è stato ritenuto inadatto per le esigenze specifiche del progetto. Si è quindi optato per TightVNC Server, che si è dimostrato più idoneo alle richieste operative.

TightVNC è disponibile gratuitamente per il download dal sito ufficiale [51] e, la versione utilizzata in questo progetto è la 2.8.85.0. La procedura guidata di installazione di TightVNC consente di scegliere i componenti da installare (TightVNC Server e/o TightVNC Viewer) e di regolare alcune impostazioni di installazione.

La realizzazione dell’interfaccia grafica remota è stata quindi possibile grazie all’integrazione e all’uso di tecnologie hardware e software. L’analisi proposta in questo capitolo rappresenta la base per affrontare le fasi operative che hanno portato alla realizzazione del progetto.

CAPITOLO 6

SVILUPPO OPERATIVO E TEST

Nel seguente capitolo viene presentato in dettaglio lo sviluppo operativo della soluzione: partendo dall'installazione e la configurazione del Raspberry Pi, passando per i test preliminari effettuati con un PC dotato di sistema operativo Windows al fine di validare la soluzione proposta, fino all'integrazione del sistema nella rete della linea di produzione. I test hanno avuto l'obiettivo di verificare il corretto funzionamento del sistema di gestione grafica prima della sua applicazione finale nella linea di assemblaggio.

Di seguito vengono illustrate passo dopo passo le procedure implementate, evidenziando le scelte tecniche e operative che hanno permesso di integrare la soluzione nell'ambiente di lavoro.

6.1 Sviluppo operativo della soluzione di interfaccia grafica

Per la realizzazione della soluzione alternativa di interfaccia grafica remota, è stato necessario seguire una serie di operazioni operative, dall'installazione del sistema operativo all'integrazione nella linea di montaggio. Di seguito vengono descritte, passo dopo passo, tutte le attività svolte per raggiungere l'obiettivo prefissato, evidenziando le procedure adottate per garantire il corretto funzionamento della soluzione.

6.1.1 Installazione e configurazione "headless" del Raspberry Pi 4

Per iniziare la fase di installazione e configurazione "headless" del Raspberry Pi 4 Model B si ha bisogno di:

- un alimentatore.
- un supporto di avvio, come una scheda microSD.

Come precedentemente illustrato, si è scelto di configurare il Raspberry Pi 4 in modalità headless, ovvero senza collegare al dispositivo alcuna periferica fisica come monitor,

tastiera o mouse. Questa scelta ha permesso di ridurre l'ingombro, alleggerire il sistema e rendere più semplice lo spostamento del dispositivo.

Il Raspberry Pi 4 Model B deve essere alimentato con un alimentatore da 5 V/3 A DC e connettore USB di tipo C. È possibile utilizzare qualsiasi alimentatore di buona qualità, che fornisca la modalità di alimentazione corretta. Per alimentare il Raspberry Pi basta collegare l'alimentatore alla porta contrassegnata con "POWER IN" [39].

I modelli Raspberry Pi non dispongono di memoria integrata, è quindi necessario fornirla. Il Raspberry Pi può essere avviato da un'immagine del sistema operativo installata su qualsiasi archivio di memoria supportato: sono comunemente utilizzate schede microSD, ma sono disponibili anche memorie USB, memorie di rete e memorie collegate tramite HAT PCIe.

È possibile utilizzare qualsiasi scheda microSD con una capacità inferiore a 2 TB. Come per qualsiasi altro supporto di avvio, si otterranno prestazioni migliori su schede SD con velocità di lettura e scrittura più elevate. Il Raspberry Pi si avvia automaticamente dallo slot microSD quando nello slot è inserita una scheda. La scheda microSD funge da memoria permanente del Raspberry Pi. Su questa viene salvato non solo il sistema operativo, ma anche tutti i file che si creeranno e i software che si andranno a installare. Per questo motivo si è deciso di utilizzare una scheda microSD con: capacità da 64 GB, classe di velocità 10 UHS-I e di tipo microSDXC.

La prima operazione da fare per iniziare ad utilizzare il Raspberry Pi è quella di installare il sistema operativo sulla scheda microSD. Per farlo si è utilizzato il programma Raspberry Pi Imager che, come descritto in precedenza, è uno strumento per scaricare e scrivere immagini. Attraverso l'interfaccia messa a disposizione da Raspberry Pi Imager, è possibile preconfigurare credenziali, impostazioni di accesso remoto, la connessione WiFi e molto altro.

Dopo aver inserito la scheda microSD nel PC, è possibile avviare Raspberry Pi Imager, visualizzando la seguente schermata (Figura 6.1).

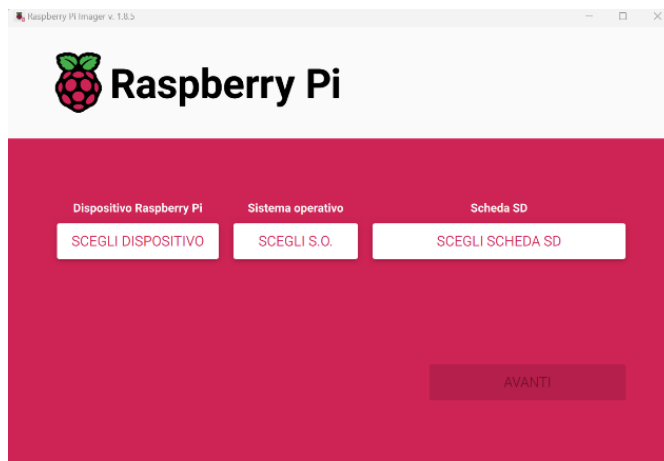


Figura 6.1: Schermata Raspberry Pi Imager

Premendo la voce “Scegli dispositivo” è possibile selezionare il modello di Raspberry Pi dall’elenco. Quindi, cliccando su “Scegli S.O.”, è possibile selezionare il sistema operativo da installare. Imager mostra, in cima all’elenco, la versione di Raspberry Pi OS, il sistema operativo ufficiale sviluppato da a Raspberry Pi Foundation, consigliata per il modello di Raspberry Pi selezionato.

In questo progetto si è scelto di installare Raspberry Pi OS (64-bit), il sistema operativo Unix-lite basato sulla distribuzione Debian Linux ottimizzati per l’hardware Raspberry Pi. Questo sistema operativo include anche un ambiente grafico (desktop) progettato specificatamente per il Raspberry Pi. Inoltre, essendo il sistema operativo ufficiale per Raspberry Pi, Raspberry Pi OS beneficia di un supporto continuo e di aggiornamenti regolari, garantendone stabilità e sicurezza. In sintesi, Raspberry Pi OS rappresenta un sistema operativo semplice da configurare e utilizzare.

Cliccando su “Scegli Scheda SD” è possibile selezionare il dispositivo di archiviazione su cui si farà il “flashing” del sistema operativo.

Premendo su “Avanti” in una finestra pop-up, Raspberry Pi Imager chiederà se si vuole applicare la personalizzazione del sistema operativo. Avendo scelto di effettuare una configurazione headless, queste modifiche applicabili da una finestra come quelle mostrate in Figura 6.2a e 6.2b, sono essenziali. Il menù di personalizzazione del sistema operativo permette di configurare il Raspberry Pi 4 Model B prima del primo avvio.

Figura 6.2a: Menu Generale

Figura 6.2b: Menu Servizi

La seguente procedura è stata sviluppata dopo aver consultato “inDomus”, un blog divulgativo [52] dove vengono riportati alcuni consigli pratici di configurazione. Di seguito vengono riportate quelle che sono le configurazioni impostate.

- Nome host del dispositivo: come nome host è stato lasciato “raspberrypi.local”, il nome preimpostato. Il nome host definisce il nome che il Raspberry Pi trasmette alla rete.
- Username e password dell’utente amministratore: come username è stato scelto “pi” e come password è stata impostata “raspberry”.
- Wi-Fi: nella riga SSID (Service Set Identifier) va inserito il nome della rete Wi-Fi a cui ci si vuole collegare, nella riga “Password” va inserita la password di accesso alla rete e, infine, alla voce Wireless LAN Country va inserito “IT”. Quest’ultima impostazione controlla le frequenze di trasmissione Wi-Fi utilizzate dal Raspberry Pi. La connessione Wi-Fi è necessaria per configurare correttamente la scheda in modalità headless.
- Impostazioni locali: in questa sezione è possibile impostare il fuso orario su “Europe/Rome” e il layout della tastiera in italiano selezionando “IT”.

Il menu riportato in Figura 6.2b, include le impostazioni per collegarsi al Raspberry Pi in remoto. Volendo utilizzare il Raspberry Pi in remoto per completare la sua configurazione, va abilitata la connessione SSH e scelta la preferenza “Autenticazione

con password” per accedere al dispositivo, tramite SSH, utilizzando il nome utente e la password impostati nella scheda generale (Figura 6.2a).

Una volta terminate le impostazioni di personalizzazione del sistema operativo, premere su “Salva” per salvare le modifiche apportate e cliccare su “Write” per scrivere il sistema operativo sullo storage. Una volta terminato il task è possibile scollegare la microSD e procedere alla prima accensione.

Inserita la microSD nell’apposito slot, è possibile accendere il Raspberry Pi collegandolo al cavo di alimentazione. Al termine del boot è possibile collegarsi via SSH dal computer di supporto al computer a scheda singola.

Per collegarsi via SSH al Raspberry Pi è necessario scaricare PuTTY: un client SSH combinato con un emulatore di terminale per la gestione in remoto di sistemi informatici. Va sottolineato che il PC e il Raspberry Pi devono trovarsi sulla stessa rete affinché possa avvenire il collegamento via SSH. In questo caso i due dispositivi sono collegati alla stessa rete Wi-Fi. Per indirizzare il lavoro verso quella che è la rete locale in cui il Raspberry Pi andrà a collegarsi, i due dispositivi (PC e Raspberry Pi) sono stati collegati tramite cavo Ethernet, creando una rete locale.

Una volta aperto PuTTY (Figura 6.3) alla voce “Host Name”, va inserito l’host name del Raspberry Pi scelto in fase di installazione.

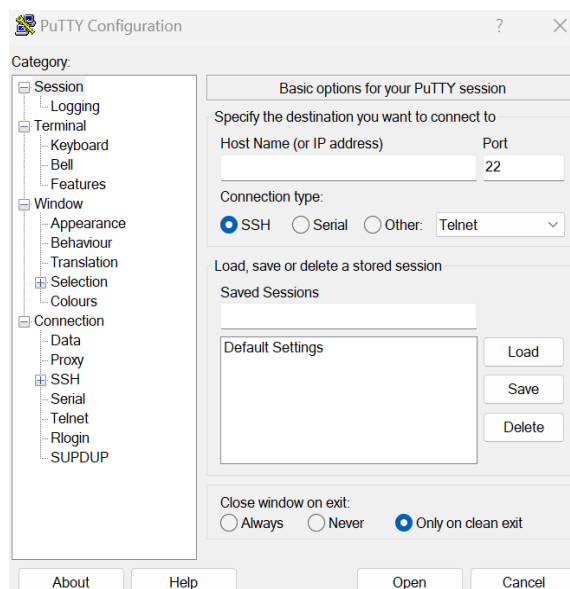
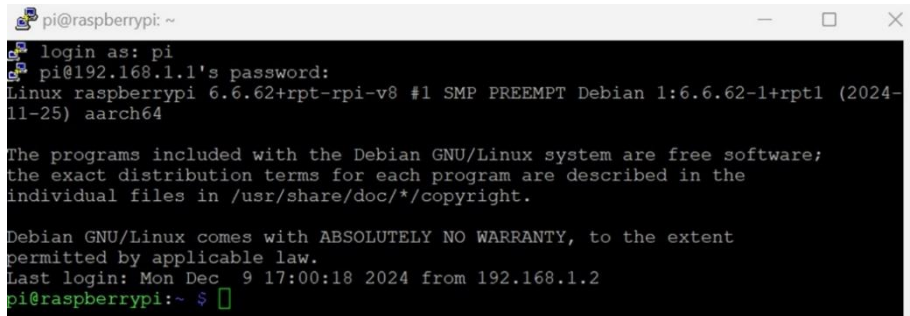


Figura 6.3: Interfaccia grafica PuTTY

Avvenuta la connessione, si apre un'interfaccia testuale che chiede quale utenza utilizzare per collegarsi: vanno inseriti l'username e la password scelti in fase di installazione. Una volta inserite le credenziali di accesso, si visualizza il medesimo prompt di comandi che si otterrebbe collegandosi fisicamente al Raspberry Pi (Figura 6.4).



```
pi@raspberrypi: ~
login as: pi
pi@192.168.1.1's password:
Linux raspberrypi 6.6.62+rpt-rpi-v8 #1 SMP PREEMPT Debian 1:6.6.62-1+rpt1 (2024-11-25) aarch64

The programs included with the Debian GNU/Linux system are free software;
the exact distribution terms for each program are described in the
individual files in /usr/share/doc/*/copyright.

Debian GNU/Linux comes with ABSOLUTELY NO WARRANTY, to the extent
permitted by applicable law.
Last login: Mon Dec 9 17:00:18 2024 from 192.168.1.2
pi@raspberrypi:~ $
```

Figura 6.4: Prompt dei comandi visualizzato tramite PuTTY

È ora possibile eseguire comandi remoti sul Raspberry, come ad esempio abilitare il server VNC. Nella sessione SSH di PuTTY va eseguito il comando:

```
sudo raspi-config
```

Questa riga di codice avvia un'applicazione grafica (Figura 6.5) che consente, tramite tastiera, di configurare il Raspberry Pi.

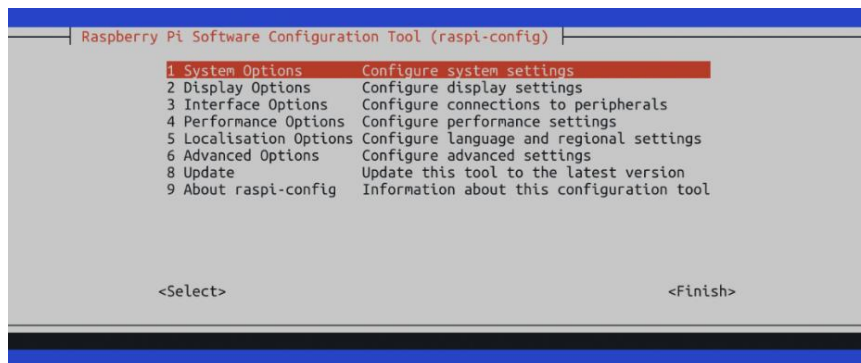


Figura 6.5: Strumento di configurazione del terminale

All'interno di questo tool di configurazione: con i tasti freccia su e giù ci si sposta nel menu, premendo "Invio" si entra nelle sotto-opzioni e si conferma la scelta, con il tasto "Esc" si risale di un livello.

La prima cosa da fare in questa interfaccia grafica è abilitare il server VNC.

Nell'applicazione grafica: selezionare l'opzione "3 Interface Options", poi selezionare "I3 VNC" nel sottomenu e infine "Yes" per abilitare il server VNC (Figura 6.6).

Il software RealVNC Server è integrato nel sistema operativo Raspberry Pi OS (64-bit) che si è installato sulla scheda microSD.

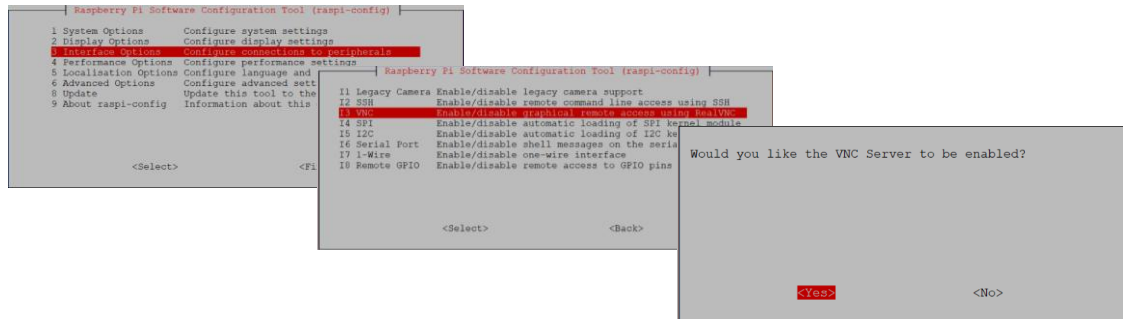


Figura 6.6: Procedura attivazione server VNC

Fatta questa procedura è possibile continuare con la configurazione di altre impostazioni. Premere «Esc» per tornare alla schermata di PuTTY.

6.1.2 Personalizzazione del sistema operativo

Dopo essersi collegati via SSH al Raspberry Pi, è necessario procedere con una prima configurazione per adattare il sistema operativo alle specifiche esigenze richieste dal progetto [53].

- Configurazione Sudo e Sudoers: come prima cosa, è stato aggiunto l'utente "pi" al gruppo "sudoers" così da consentirgli di eseguire i comandi con privilegi di amministratore tramite il comando `sudo`. Sudo (Super-user do) è un programma progettato per far sì che gli amministratori di sistema permettano ad alcuni utenti di eseguire certi comandi come root. Sudo è anche un modo efficace per registrare chi ha usato un dato comando e quando.

Per abilitare questa funzione sono stati eseguiti i seguenti comandi nel terminale messo a disposizione da PuTTY (Figura 6.4):

- 1) Aprire il file di configurazione `sudoers` dall'editor di testo "nano":

```
sudo nano /etc/sudoers
```

2) Aggiungere la seguente stringa alla fine del file:

```
pi ALL=(ALL) NOPASSWD:ALL
```

dove “pi” è il nome utente che si vuole rendere abile al `sudo`.

3) Salvare le modifiche e uscire dall’editor di testo con la combinazione di tasti

```
Ctrl+x, y e Invio.
```

4) Riavviare il sistema per rendere effettive le modifiche:

```
sudo reboot
```

- Primo aggiornamento del sistema: successivamente, sono stati aggiornati il software e il firmware del Raspberry Pi.

I comandi eseguiti dal prompt di comandi di PuTTY sono stati:

1) Controllo delle versioni più recenti disponibili per i pacchetti già installati:

```
sudo apt update
```

2) Aggiornamento di tutti i pacchetti installati alle loro versioni più recenti:

```
sudo apt full-upgrade -y
```

3) Rimozione dei pacchetti che sono stati installati come dipendenze di altri pacchetti ma che non sono più necessari:

```
sudo apt autoremove -y
```

4) Installazione degli header del kernel del Raspberry Pi:

```
sudo apt install raspberrypi-kernel-headers
```

Una volta terminata la procedura di aggiornamento è stato necessario riavviare il Raspberry Pi per rendere effettive le modifiche.

- Configurazione del file di Swap: è stato configurato un file di swap per gestire eventuali picchi di utilizzo della memoria RAM. Questo file consente al sistema di utilizzare una porzione del disco come estensione temporanea della memoria.

Le operazioni eseguite sono state:

1) Disattivare temporaneamente il servizio di swap:

```
sudo dphys-swapfile swapoff
```

2) Aprire l’editor di testo del file di configurazione dello swap:

```
sudo nano /etc/dphys-swapfile
```

- 3) Cercare la stringa CONF_SWAPSIZE e impostarla a 1024 MB, una scelta di dimensionamento comune:

```
CONF_SWAPSIZE=1024
```

- 4) Salvare le modifiche e uscire dall'editor di testo con la combinazione di tasti Ctrl+x, y e Invio.

- 5) Riattivare lo swap:

```
sudo dphys-swapfile swapon
```

- Rimozione LXPolkit: per ottimizzare le prestazioni del sistema è stato rimosso LXPolkit, un componente che si avvia all'accensione del sistema utilizzato per la gestione dei privilegi nell'ambiente desktop. Viene solitamente utilizzato per richiedere password di autenticazione quando necessario. Rimuovere tale componente può ridurre l'utilizzo di memoria e CPU su un sistema a risorse limitate come il Raspberry Pi.

Per rimuoverlo è stato eseguito il comando:

```
sudo rm /etc/xdg/autostart/lxpolkit.desktop
```

- Configurazione Keepalive per connessioni SSH: per evitare che le connessioni SSH possano interrompersi a causa dell'inattività.

Dal terminale di PuTTY sono stati eseguiti i seguenti comandi:

- 1) Apertura del file di configurazione del server SSH in un editor di testo:

```
sudo nano /etc/ssh/sshd_config
```

- 2) Aggiungere in fondo al file:

```
ClientAliveInterval 300
```

```
ClientAliveCountMax 2
```

Queste due stringhe specificano al client SSH di inviare un pacchetto di mantenimento al server ogni 300 secondi e, se il server non riceve alcuna risposta a tre pacchetti di mantenimento consecutivi, la connessione verrà chiusa.

- 3) Uscire dall'editor di testo salvando e modificare il file di configurazione del client SSH:

```
sudo nano /etc/ssh/ssh_config
```

aggiungendo in fondo:

```
ServerAliveInterval 30
```

(notare i quattro spazi prima del comando).

4) Salvare le modifiche ed uscire dall'editor di testo.

- **Avvio senza rete:** il suo scopo è quello di permettere al Raspberry Pi di ignorare la ricerca di una connessione di rete all'avvio e di procedere con il boot anche in assenza di una rete attiva. Non apportando questa modifica, il dispositivo impiegherebbe più tempo ad avviarsi nel caso non fosse presente una connessione di rete al momento dell'accensione.

1) Aprire il file di configurazione di gestione di reti NetworkManager:

```
sudo nano /etc/NetworkManager/NetworkManager.conf
```

2) Aggiungere le seguenti stringhe all'interno dell'editor di testo:

```
[connection]
ipv4.may-fail=true
ipv6.may-fail=true
```

Queste opzioni indicano a NetworkManager di non bloccare il sistema se non è disponibile una connessione di rete.

3) Salvare il file e applicare le modifiche:

```
sudo systemctl disable NetworkManager-wait-
online.service per impedire al sistema di attendere una connessione
internet durante il processo di boot;
```

```
sudo systemctl restart NetworkManager per riavviare
NetworkManager al fine di applicare le modifiche.
```

Ultimate le modifiche applicabili dal terminale PuTTY, si passa alle personalizzazioni del sistema operativo eseguibili dal "Raspberry Pi Software Configuration Tool" (Figura 6.5). Nell'interfaccia grafica di personalizzazione, visibile dopo aver eseguito `sudo raspi-config` nel terminale PuTTY, le principali personalizzazioni effettuate includono:

- 1) System Options: entrando in questa sezione è possibile modificare le opzioni mostrate in Figura 6.7.

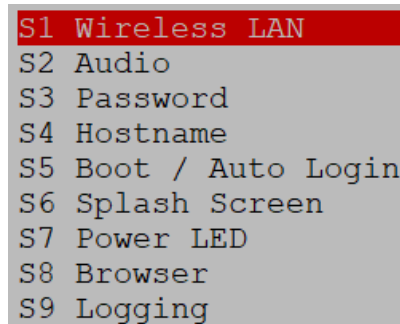


Figura 6.7: Sottomenu System Options

In questa sezione alcune delle possibili modifiche che si possono effettuare riguardano: le impostazioni Wi-Fi, l'uscita audio, il cambio dell'hostname e della password dell'utente pi.

Una cosa consigliata è cambiare la password, altrimenti ad ogni avvio, comparirà un messaggio di avviso che consiglia di cambiare la password.

La voce "Boot/Autologin" permette di configurare le impostazioni di avvio: entrando nel suo sottomenu si hanno altre quattro voci che indicano al sistema come comportarsi all'avvio: Console, Console Autologin, Desktop e Desktop Autologin. Selezionando "Desktop Autologin", una volta terminato il boot, viene avviato l'ambiente grafico senza che venga richiesta la password all'avvio.

- 2) Display Options: entrando in questa sezione si possono scegliere tra le opzioni mostrate in Figura 6.8.

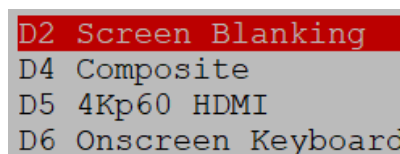


Figura 6.8: Sottomenu Display Options

In questa sessione è possibile abilitare o disabilitare la risoluzione 4Kp60 per le uscite HDMI.

È possibile, inoltre, abilitare l'uso di una tastiera sullo schermo, utile in caso di necessità di un rapido inserimento o di qualche modifica nelle fasi operative.

Avendo deciso di utilizzare il Raspberry Pi collegandolo solo ad un display, questa opzione può risultare utile.

- 3) Advance Options: entrando in questa sezione si può scegliere tra le opzioni mostrate in Figura 6.9.

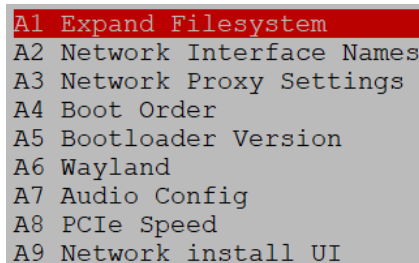


Figura 6.9: Sottomenu Advance Options

Selezionando “Network Interface Names” è possibile abilitare o disabilitare i nomi delle interfacce di rete prevedibili. Questa opzione è utile per rendere più stabili i nomi delle interfacce di rete (come eth0, wlan0), evitando che cambino ad ogni riavvio.

Terminata la procedura di personalizzazione del sistema operativo, il sistema è stato riavviato con il comando `sudo reboot` al fine di applicare tutte le modifiche effettuate durante queste operazioni di configurazione.

Ora il Raspberry Pi 4 Model B è pronto all’uso ed è possibile procedere con le successive fasi operative, che porteranno alla realizzazione dell’interfaccia grafica remota alternativa al DIM.

6.1.3 Configurazione e collegamento del display touchscreen

Dopo aver completato la personalizzazione del sistema operativo, in cui è stata abilitata l’interfaccia desktop del Raspberry Pi, è stato possibile dotare il computer a scheda singola di un display, collegandolo tramite interfaccia HDMI.

Come descritto nei capitoli precedenti, si è scelto di adottare un display compatibile con il sistema Raspberry Pi: il “7inch HDMI Display-C” della LAFVIN (Figura 5.3).

Il kit del display include, oltre al cavo HDMI, anche un adattatore HDMI – micro-HDMI necessario per collegarlo alla porta micro-HDMI presente sul Raspberry Pi 4 Model B.

Prima di collegare fisicamente il display al Raspberry Pi è stato necessario effettuare una procedura di configurazione. Tale procedura è consultabile sul manuale di installazione ufficiale del display [42].

Eseguendo questa procedura di configurazione, il Raspberry Pi sarà configurato correttamente e al suo avvio saranno evitati potenziali problemi di riconoscimento del display o della qualità video.

Per eseguire la configurazione:

- 1) Spegnerne il Raspberry Pi e rimuovere la microSD.
- 2) Collegare la microSD al PC utilizzato in precedenza per la configurazione headless.
- 3) Accedere ai file contenuti nella scheda microSD e individuare il file “`config.txt`”.

Il file `config.txt` contiene le impostazioni di base del sistema operativo e può essere modificato per personalizzare il comportamento del Raspberry Pi senza accedere direttamente al sistema operativo.

- 4) Aprire il file e in fondo ad esso aggiungere il seguente script:

<code>max_usb_current=1</code>	limita la corrente massima erogata dalle porte USB del Raspberry Pi a 1A.
<code>hdmi_force_hotplug=1</code>	forza il Raspberry Pi a rilevare all'avvio un dispositivo HDMI collegato.
<code>config_hdmi_boost=7</code>	aumenta l'ampiezza del segnale HDMI per renderlo più resistente a interferenze lungo il cavo.
<code>hdmi_group=2</code>	specifica il gruppo HDMI.
<code>hdmi_mode=87</code>	specifica le modalità video: risoluzione, frequenza di aggiornamento e altri parametri video.
<code>hdmi_drive=1</code>	attiva l'output video sull'HDMI.
<code>display_rotate=0</code>	imposta la rotazione dello schermo: lo 0 indica che lo schermo non è ruotato.
<code>hdmi_cvt 1024 600 60 6 0 0 0</code>	imposta una modalità video personalizzata.

- 5) Una volta apportate le modifiche, salvare e chiudere il file `config.txt`.
- 6) Rimuovere la microSD dal PC e reinserirla nello slot del Raspberry Pi.

Dopo aver configurato il sistema, è possibile procedere con il collegamento fisico del display touchscreen (Figura 6.10) seguendo i seguenti passaggi:

- 1) Collegare il cavo HDMI tra il Raspberry Pi e il display, utilizzando l'adattatore HDMI-micro-HDMI fornito con lo schermo.
- 2) Collegare il cavo USB a una delle quattro porte USB del Raspberry e l'altra estremità del cavo USB ad una delle due porte MicroUSB nel display.
- 3) Spostare su "ON" l'interruttore di alimentazione della retroilluminazione del display.
- 4) Collegare il Raspberry Pi all'alimentazione.

All'avvio del sistema operativo, il desktop del Raspberry Pi sarà visualizzabile sul display touchscreen. Con il display touchscreen configurato e correttamente collegato al Raspberry Pi, il sistema è ora operativo e adeguatamente configurato per le esigenze del progetto.



Figura 6.10: Collegamento del display touchscreen

6.2 Validazioni preliminari con PC Windows

Prima di procedere con l'integrazione del Raspberry Pi sulla linea di assemblaggio, è stata testata la connessione VNC tra un PC dotato di sistema operativo Windows 11 e il Raspberry Pi 4 Model B.

Di seguito vengono illustrati e spiegati nel dettaglio i passaggi operativi che hanno portato all'esecuzione dei test preliminari, finalizzati a verificare il corretto funzionamento del sistema di gestione grafica prima della sua applicazione finale sulla linea di produzione.

Grazie alle procedure di configurazione e personalizzazione preliminari effettuate, all'avvio del sistema operativo del Raspberry Pi si ha accesso al suo desktop. Ciò consente di utilizzare l'interfaccia grafica fornita dal dispositivo per configurare le connessioni di rete. Il tool grafico "Network Connection" offre funzionalità simili a quelle di gestione di rete di altri computer, rendendo l'operazione più rapida e intuitiva.

Come prima operazione, considerando che la linea di assemblaggio non richiede una connessione a Internet, è stata disattivata la connessione wireless del Raspberry Pi. Per farlo, è stato sufficiente cliccare sull'icona della rete nella barra delle applicazioni e selezionare "Turn Off Wireless LAN" dal menu a tendina (Figura 6.11).

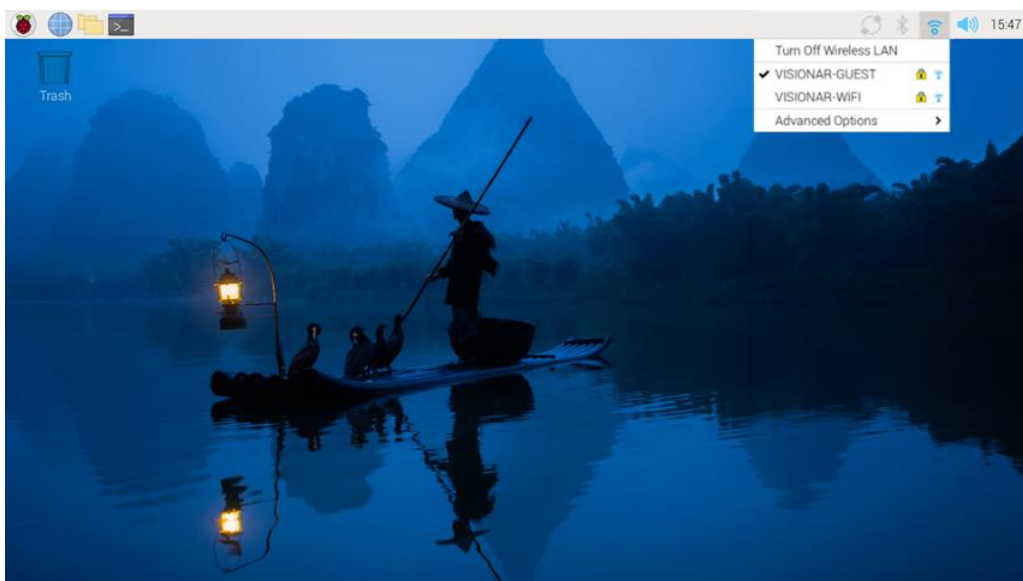


Figura 6.11: Desktop del Raspberry Pi 4 Model B

Successivamente è stata disattivata anche la rete Wi-Fi sul PC utilizzato per fare il test, così da simulare condizioni operative più simili a quelle di utilizzo reale sulla linea di assemblaggio.

Per semplificare le procedure di configurazione della rete, è stato sfruttato il server VNC abilitato sul Raspberry Pi durante la fase di personalizzazione preliminare.

Per collegarsi al Raspberry Pi tramite una connessione VNC, è stato utilizzato il software RealVNC Viewer precedentemente installato sul PC. Per stabilire una connessione VNC tra i due dispositivi, è necessario conoscere l'indirizzo IP del Raspberry Pi.

Per scoprire l'indirizzo IP del computer a scheda singola è stato utilizzato il prompt dei comandi del PC, sul quale è stato inserito il comando:

```
ping -4 raspberrypi.local
```

- `ping`: è un comando che invia un pacchetto di dati a un host specificato e attende una risposta.
- `-4`: è un flag che specifica l'utilizzo del protocollo IPv4.
- `raspberrypi.local`: è l'hostname assegnato al Raspberry Pi durante la configurazione.

Una volta ottenuto l'indirizzo IP del dispositivo server VNC che si vuole controllare da remoto, è stato possibile aprire il software RealVNC Viewer sul PC e, alla voce "VNC Server", inserire l'indirizzo IP individuato. Cliccando su "Connect" viene richiesta l'autenticazione con il nome utente e la password del Raspberry Pi (Figura 6.12).

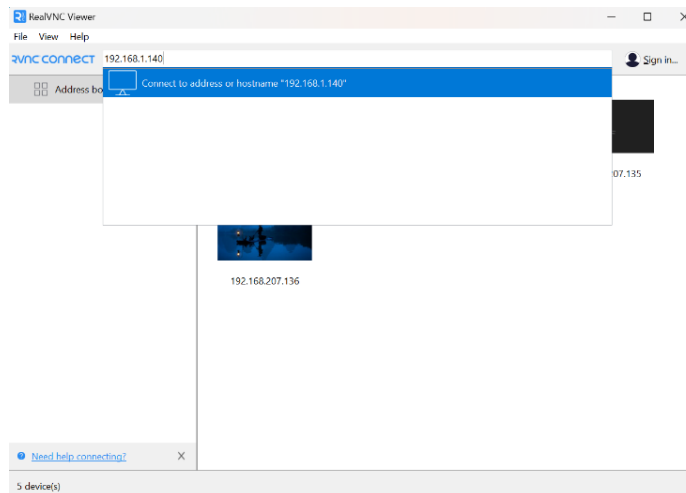


Figura 6.12: Interfaccia grafica di RealVNC Viewer

6.2.1 Configurazione della rete locale di prova

Dopo l'autenticazione si ottiene l'accesso all'ambiente grafico del Raspberry Pi direttamente dal PC, consentendo di gestirlo da remoto utilizzando le periferiche fisiche del computer. Questo approccio rende la configurazione della rete più comoda e veloce.

6.2.1.1 Assegnazione di un indirizzo IP statico al Raspberry Pi

Assegnare indirizzi IP statici ai dispositivi, all'interno di una rete locale, offre diversi vantaggi significativi. Questa configurazione garantisce che ogni dispositivo mantenga un indirizzo costante nel tempo, semplificando notevolmente la gestione della rete. È particolarmente utile per stabilire connessioni remote sicure, configurare servizi in modo più efficiente e diagnosticare eventuali problemi di rete con maggiore rapidità. In conclusione, la scelta di attribuire IP statici contribuisce a rendere la rete più stabile, prevedibile e facile da amministrare.

L'IP (Internet Protocol), operando al livello 3 (rete) del modello OSI, è alla base della comunicazione tra dispositivi, supportando protocolli come TCP e UDP per il trasferimento dati. Un indirizzo IP è un'etichetta numerica univoca utilizzata per identificare dispositivi collegati a una rete basata su IP, sia essa una rete locale o Internet. L'IPv4, definito nell'RFC 791, è la versione più diffusa del protocollo IP. Un indirizzo IPv4 è composto da 32 bit, rappresentati in notazione decimale puntata come quattro

numeri separati da punti. Ogni numero rappresenta un ottetto (8 bit) e può variare da 0 a 255. Ogni indirizzo IPv4 è suddiviso in due parti principali: la prima specifica la rete a cui appartiene il dispositivo; la seconda identifica il dispositivo all'interno della rete.

Gli indirizzi IP privati sono riservati per l'utilizzo in reti locali (LAN) e non sono instradabili su Internet. Questo approccio riduce la necessità di indirizzi IP pubblici, ormai limitati, permettendo a più reti locali di utilizzare gli stessi intervalli senza conflitti.

I principali intervalli di indirizzi privati sono:

- Classe A: 10.0.0.0 - 10.255.255.255
- Classe B: 172.16.0.0 - 172.31.255.255
- Classe C: 192.168.0.0 - 192.168.255.255

Questo sistema consente a più dispositivi all'interno di una rete locale di comunicare tra loro senza richiedere un indirizzo IP univoco a livello globale, garantendo una gestione più efficiente delle risorse di rete [48].

Per assegnare un IP statico al Raspberry Pi 4 Model B, è stato utilizzato il tool grafico "Network Connection", seguendo i passaggi di seguito riportati:

- 1) Cliccare sull'icona della rete situata nell'angolo in alto a destra della barra delle applicazioni.
- 2) Selezionare la voce "Advanced Options".
- 3) Dal menu a tendine, scegliere la voce "Edit Connections...".

Questi passaggi aprono il tool "Network Connections" (Figura 6.13a), all'interno del quale è visibile un elenco delle connessioni configurate:

- Ethernet (Wired connection): visibile se il dispositivo è collegato tramite cavo.
- Wireless: per le connessioni Wi-Fi.

- 4) Selezionare la connessione che si vuole editare.

Nel caso specifico è stata selezionata "Wired connection 1".

- 5) Spostarsi nella scheda "IPv4 Setting" e cambiare il metodo da "Automatic (DHCP)" a "Manual" (Figura 6.13b).

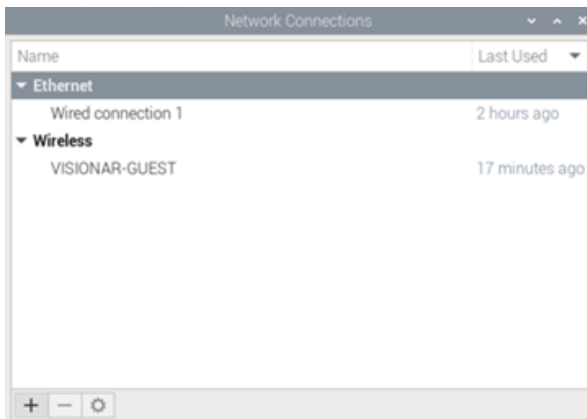


Figura 6.13a: Interfaccia Network Connections

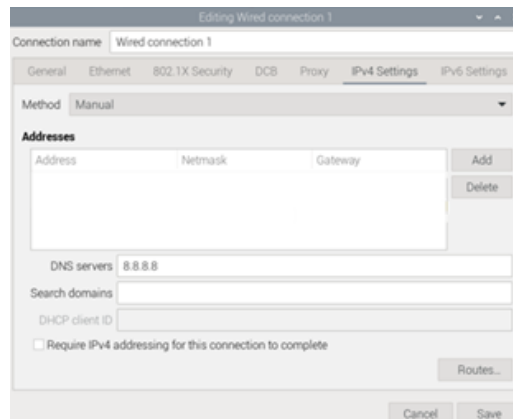


Figura 6.13b: Inserimento IP statico

- 6) Cliccare su “Add” per aggiungere un nuovo indirizzo IP e compilare i seguenti campi:
 - Address: 192 . 168 . 1 . 1, l’indirizzo IP statico desiderato.
 - Netmask: 255 . 255 . 255 . 0, la maschera di sottorete.
 - DNS Servers: 8 . 8 . 8 . 8, l’indirizzo IP del server DNS, in questo caso il DNS di Google.
- 7) Cliccare su “Save” per salvare le impostazioni e chiudere la finestra di configurazione.
- 8) Riavviare il Raspberry Pi o il servizio “NetworkManager” per applicare le modifiche, eseguendo nel terminale il comando:


```
sudo systemctl restart NetworkManager
```

6.2.1.2 Configurazione del sistema VNC

Per configurare il Raspberry Pi come client VNC, è stato installato RealVNC Viewer, che rappresenta una soluzione semplice da configurare e altamente personalizzabile. Questo software è ottimizzato per l'hardware del Raspberry Pi, anche perché, il sistema operativo utilizzato include di default la versione server del software.

Per installare RealVNC Viewer utilizzando il desktop del Raspberry Pi, cliccare sul simbolo del “lampona” nell’angolo in alto a sinistra dello schermo. Nel menu a tendina selezionare “Preferences” ed infine, cliccare su “Add / Remove Software” per accedere

al gestore delle applicazioni del repository Raspberry Pi OS. Nella barra di ricerca della finestra che si apre, digitare “realvnc” per visualizzare tutti pacchetti relativi. Si vuole installare il software client VNC, mettere quindi un segno di spunta accanto al pacchetto che si vuole installare. Una volta selezionato il pacchetto, premere sul pulsante “Apply” in basso a destra ed inserire la password di amministratore per confermare l’installazione (Figura 6.14).

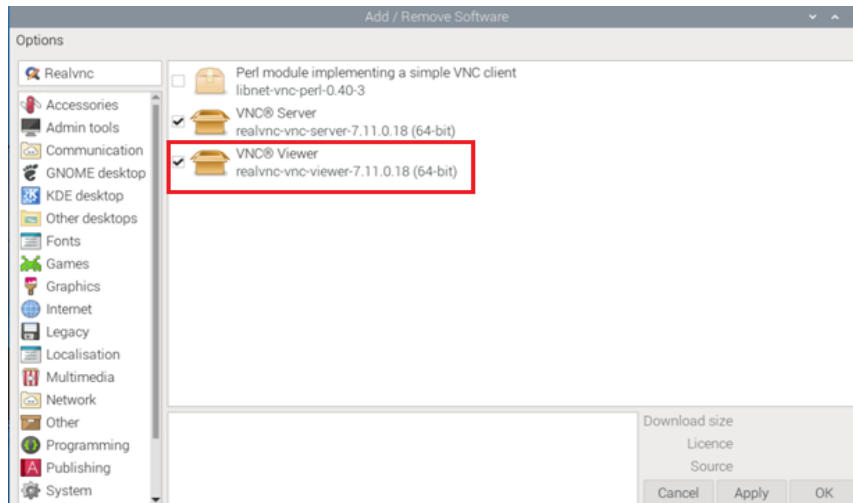


Figura 6.14: Interfaccia Add / Remove Software

Dopo aver configurato il Raspberry Pi 4 come client VNC, prima di procedere con il collegamento al Measuring and Evaluation Module, è stato utilizzato un PC come server VNC per eseguire dei test preliminari sulla connessione. Per facilitare questa operazione e semplificare la gestione della rete, anche al PC è stato assegnato un indirizzo IP statico.

L’assegnazione dell’indirizzo IP statico al PC è stata effettuata seguendo i passaggi di seguito riportati:

- 1) Aprire il tool grafico “Impostazioni” del sistema operativo Windows 11 e accedere alla scheda “Rete e Internet”.
- 2) Selezionare la connessione Ethernet per procedere con le modifiche desiderate.
- 3) Nella sezione IPv4, cliccare su “Modifica” e cambiare l’impostazione predefinita da “Automatico (DHCP)” a “Manuale”.

4) Impostare i seguenti campi per definire l'indirizzo IP:

- Indirizzo IP: 192.168.1.2, l'indirizzo IP statico desiderato.
- Mask IPv4: 255.255.255.0, la maschera di sottorete.
- Gateway predefinito: 192.168.1.1, l'indirizzo IP statico assegnato al Raspberry Pi.
- DNS preferito: 8.8.8.8, l'indirizzo IP del server DNS, in questo caso il DNS di Google.

5) Cliccare su “Salva” per confermare le modifiche.

A questo punto, per testare la connessione VNC, è stato necessario configurare il PC come server VNC. Per farlo è stato utilizzato il software TightVNC: un programma leggero, facile da configurare e compatibile con l'utilizzo di RealVNC Viewer sul Raspberry Pi. Durante l'installazione del programma, viene chiesto di configurare una password per l'autenticazione della connessione, opzione che può essere disabilitata in seguito.

Per creare una connessione diretta e privata tra i due dispositivi, senza che questi debbano connettersi al servizio cloud, è consigliabile riconfigurare preventivamente il firewall del PC per consentire l'accesso remoto VNC. Per impostazione predefinita, RealVNC utilizza la porta 5900 TCP, è pertanto necessario consentire l'ingresso e/o l'uscita da questa porta [54].

Per consentire la connessione in entrata al server VNC sulla porta predefinita, sono stati eseguiti i seguenti passaggi operativi:

- 1) Aprire il menu “Start” di Windows e cercare il tool “Windows Defender Firewall con sicurezza avanzata”.
- 2) Nel pannello laterale di sinistra selezionare “Regole connessioni in entrata” (Figura 6.15a).
- 3) Nel pannello laterale di destra cliccare su “Nuova regola...” per aprire la procedura guidata, chiamata “Creazione guidata nuova regola connessioni in entrata” (Figura 615b).

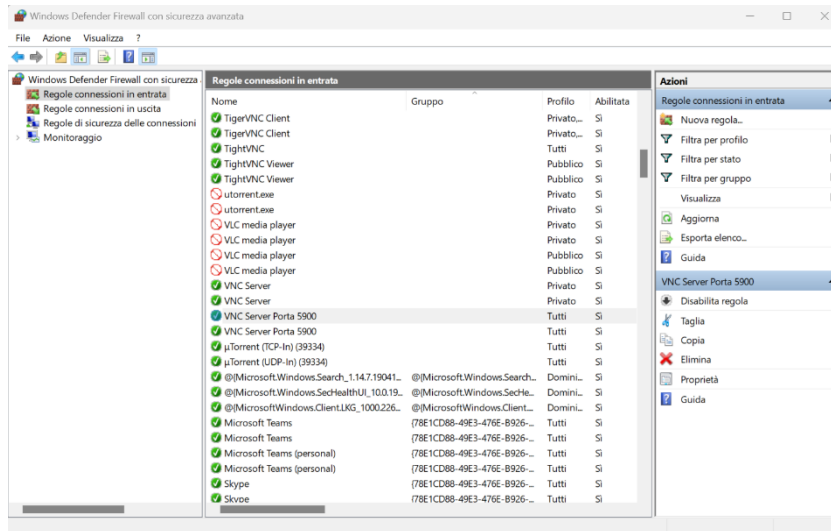


Figura 6.15a: Windows Defender Firewall con sicurezza avanzata

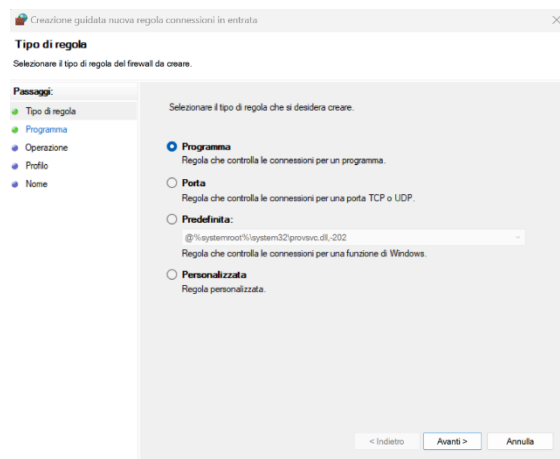


Figura 6.15b: Creazione guidata nuova regola connessioni in entrata

4) Configurare la regola per consentire il traffico sulla porta 5900 compilando i campi come segue:

- Tipo di regola: selezionare “Porta” e cliccare su “Avanti”.
- Protocollo e porte:
 - Scegliere “TCP”.
 - Selezionare “Porte locali specifiche” e inserire il numero “5900”.
- Cliccare su “Avanti”.
- Operazioni: selezionare “Consenti la connessione” e cliccare su “Avanti”.

- Profilo: assicurarsi che siano selezionate le opzioni “Dominio”, “Privato” e “Pubblico”, quindi cliccare su “Avanti”.
- Nome della regola: dare un nome alla regola che faccia capire il suo scopo, ad esempio “VNC Server Porta 5900”, e cliccare su “Fine”.

Una volta completata la configurazione, il PC è pronto per essere configurato come server VNC, così da poter verificare la connessione VNC con il Raspberry Pi 4 Model B.

6.2.2 Test di verifica della connessione VNC

Dopo aver configurato il PC per ricevere in entrata una connessione VNC, è stato il momento di configurare il server VNC.

Per utilizzare TightVNC come Server VNC è sufficiente aprire l’interfaccia grafica del software (Figura 6.16a) e cliccare su “Listening mode”. Questo avvierà in background il processo di server VNC.

Cliccando sull’icona del servizio VNC presente nella barra degli strumenti, si aprirà la finestra “TightVNC Service Configuration” (Figura 6.16b), all’interno della quale è possibile rimuovere la spunta dall’opzione “Require VNC authentication”, disabilitando la richiesta di password al momento della connessione. Questa impostazione semplifica il test, eliminando la necessità di inserire credenziali di accesso.

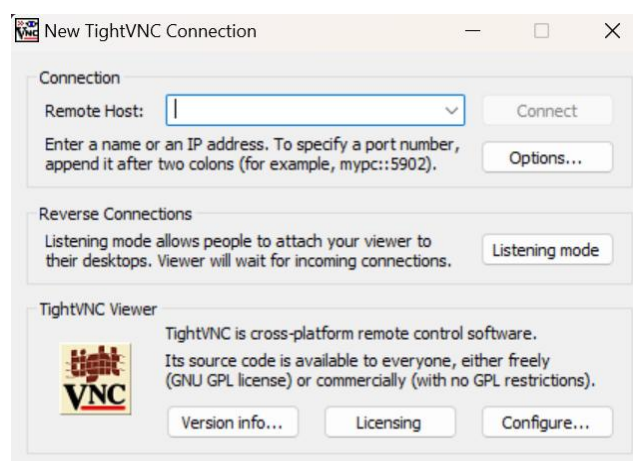


Figura 6.16a: Interfaccia TightVNC

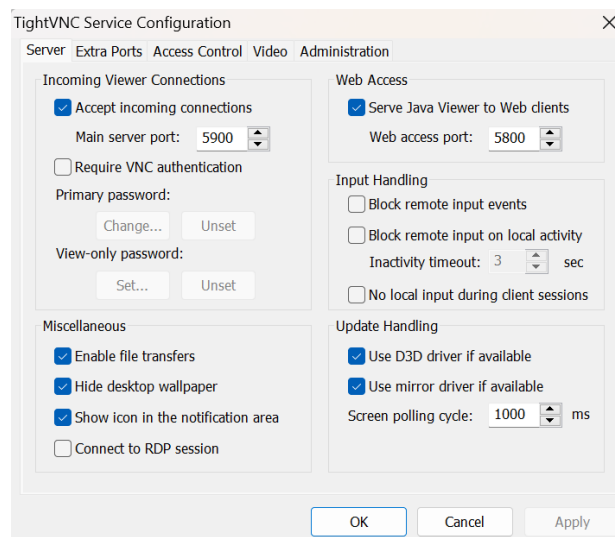


Figura 6.16b: TightVNC Service Configuration

Configurato anche il server VNC, è stato possibile procedere con il test di connessione VNC tra il Raspberry Pi 4 Model B e il PC.

Per effettuare la connessione, è stato avviato il client RealVNC Viewer sul Raspberry Pi e inserito l'indirizzo IP statico assegnato al PC. Se la connessione è avvenuta con successo, il desktop del PC sarà visibile sul display del Raspberry Pi, consentendo l'interazione remota. Attraverso queste procedure, il Raspberry Pi configurato come client VNC è in grado di visualizzare e controllare da remoto il desktop del PC utilizzato per il test, verificando così l'efficacia e il corretto funzionamento della soluzione implementata.

6.2.2.1 Automatizzazione del processo di connessione

Per ottimizzare la configurazione, è stato deciso di rendere automatico l'avvio di RealVNC Viewer all'accensione del Raspberry Pi, così da stabilire automaticamente una connessione VNC con il server, che durante le fasi di test è rappresentato dal PC.

Di seguito sono riportati i passaggi necessari per configurare l'avvio automatico del software:

- 1) Aprire il terminale dal desktop del Raspberry Pi ed eseguire il seguente comando per creare la directory autostart all'interno della cartella di configurazione dell'utente pi:

```
sudo mkdir -p /home/pi/.config/autostart
```

- 2) Creare un nuovo file chiamato vnc-autostar.desktop all'interno della directory autostart e aprirlo con l'editor di testo eseguendo il comando:

```
sudo nano ~/.config/autostart/vnc-autostart.desktop
```

- 3) Inserire il seguente script all'interno del file:

```
[Desktop Entry]
Name=VNC Viewer Autostart
Comment=Starts VNC Viewer on startup
Exec= vncviewer 192.168.1.2 -FullScreen -Scaling
AspectFit
Terminal=false
Type=Application
```

Il contenuto dello script specifica:

- Name: il nome con cui l'applicazione apparirà nel menu.
- Comment: fornisce una breve descrizione dell'applicazione.
- Exec: specifica il comando da eseguire nell'applicazione.
- Terminal: specifica se deve essere aperta una finestra del terminale per l'output.
- Type: specifica il tipo di applicazione.

- 4) Salvare e chiudere il file con la combinazione di tasti Ctrl+o, Invio, Ctrl+x.

- 5) Rendere eseguibile lo script con il comando:

```
sudo chmod +x ~/.config/autostart/vnc-
autostart.desktop
```

- 6) Riavvia il Raspberry Pi con il comando `sudo reboot` o utilizzando l'interfaccia desktop.

All'avvio del Raspberry Pi, RealVNC Viewer si avvierà in automatico stabilendo una connessione VNC con l'indirizzo IP specificato del server.

Va posta particolare attenzione alla stringa di esecuzione contenuta nello script scritto all'intero del file `vnc-autostart.desktop`, nello specifico:

```
Exec= vncviewer 192.168.1.2 -FullScreen -Scaling AspectFit
```

Le voci presenti nel comando hanno il seguente scopo:

- `Exec`: indica al sistema operativo che si sta definendo un comando da eseguire.
- `vncviewer`: rappresenta il nome del software da eseguire.
- `192.168.1.2`: è l'indirizzo IP del server VNC che si vuole controllare da remoto.
- `FullScreen`: questa è un'opzione che indica a RealVNC Viewer di avviare la connessione a schermo intero. Questo significa che, l'interfaccia grafica del PC riempirà completamente lo schermo del Raspberry Pi e non saranno visibili elementi del desktop locale.
- `Scaling AspectFit`: questa opzione specifica come gestire il ridimensionamento dell'immagine. `AspectFit` significa che l'immagine verrà ridimensionata per adattarsi allo schermo del dispositivo locale, mantenendo le proporzioni originali e, quindi, non distorcendo l'immagine.

Queste e altre impostazioni possono essere modificate anche durante una sessione VNC attiva (Figura 6.17). Per accedere alle opzioni avanzate:

- 1) Posizionare il cursore nella parte superiore centrale dello schermo remoto per visualizzare il menu a tendina.
- 2) Cliccare sull'icona "Impostazioni" (ingranaggio).
- 3) Accedere alla scheda "Expert", dove è possibile modificare vari parametri secondo le proprie necessità.

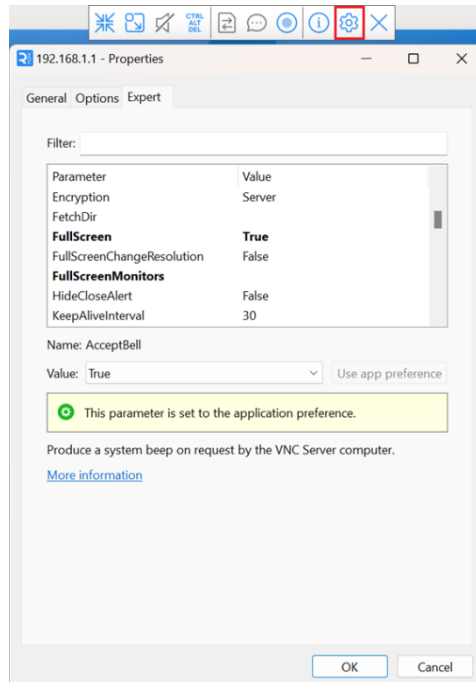


Figura 6.17: Scheda Expert del software RealVNC Viewer

Le modifiche effettuate durante una sessione in corso, tuttavia, saranno valide solo finché questa rimarrà aperta. Per renderle permanenti all'avvio automatico della sessione, è necessario aggiornare lo script presente nel file `vnc-autostart.desktop`, aggiungendo le nuove impostazioni desiderate.

Questi passaggi hanno permesso di verificare il corretto funzionamento del sistema di gestione grafica prima della sua applicazione finale sulla linea di produzione.

In particolare, è stata testata la connessione VNC e la relativa automatizzazione del processo all'avvio del sistema operativo del Raspberry Pi 4, simulando le condizioni operative reali della linea di assemblaggio. Completata questa fase di validazione, il passaggio successivo è rappresentato dall'integrazione del sistema all'interno della linea di montaggio del prodotto mecatronico.

6.3 Integrazione del sistema con la rete della linea di produzione

Completati i test di validazione del sistema, è stato possibile integrare il Raspberry Pi 4 Model B, dotato di display touchscreen, alla rete locale della linea di produzione e in particolare alla postazione automatica della pressa elettromeccanica forza-spostamento presa in esame.

Prima di procedere con il collegamento fisico del sistema con il MEM, è stato necessario adattare quanto fatto alla situazione di reale utilizzo eseguendo le seguenti operazioni:

- 1) Modifica dello script presente all'interno del file `vnc-autostart.desktop` con l'indirizzo IP statico del MEM che si vuole gestire da remoto attraverso il display del Raspberry Pi.
- 2) Assegnazione di un nuovo indirizzo IP statico al Raspberry Pi, per renderlo conforme agli altri indirizzi IP presenti sulla linea di assemblaggio.

Dal desktop del Raspberry Pi, è stato aperto il terminale ed è stato eseguito il comando per aprire l'editor del file `vnc-autostart.desktop`, responsabile dell'apertura automatica del software RealVNC Viewer:

```
sudo nano ~/.config/autostart/vnc-autostart.desktop.
```

La modifica è stata apportata alla stringa `Exec`, responsabili della definizione del comando da eseguire. All'interno della stringa:

```
Exec= vncviewer 192.168.1.2 -FullScreen -Scaling AspectFit
```

è stato sostituito l'indirizzo IP del PC utilizzato nei test, con l'indirizzo IP statico assegnato alla postazione della pressa forza-spostamento:

```
Exec= vncviewer 10.0.0.31 -FullScreen -Scaling AspectFit
```

Dopo aver salvato le modifiche e chiuso l'editor di testo, con la combinazione di tasti: `Ctrl+o`, `Invio`, `Ctrl+x`, lo script è stato reso eseguibile con il comando:

```
sudo chmod +x ~/.config/autostart/vnc-autostart.desktop
```

Terminata la modifica dello script con il nuovo indirizzo IP, è stato aggiornato anche l'indirizzo IP statico al Raspberry Pi, così da renderlo conforme agli indirizzi IP presenti sulla linea di montaggio.

Questa operazione è stata eseguita seguendo lo stesso metodo adottato durante la fase di test. È stato quindi utilizzato il tool grafico Network Connections, seguendo i seguenti passaggi:

- 1) Cliccare sull'icona della rete situata nell'angolo in alto a destra della barra delle applicazioni.
- 2) Selezionare la voce “Advanced Options”.
- 3) Dal menu a tendina, scegliere la voce “Edit Connections...” per aprire il tool di gestione delle reti.
- 4) Selezionare la connessione da editare, in questo caso “Wired connection 1”, e accedere alle sue impostazioni.
- 5) Spostarsi nella scheda “IPv4 Setting” e modificare l’indirizzo IP con il nuovo indirizzo IP statico che si vuole assegnare, ad esempio 10.0.0.40 (Figura 6.18).
- 6) Cliccare su “Save” per salvare le impostazioni e chiudere la finestra di configurazione.
- 7) Per applicare le modifiche, riavviare il Raspberry Pi o il servizio “NetworkManager”, eseguendo da terminale il comando:

```
sudo systemctl restart NetworkManager
```

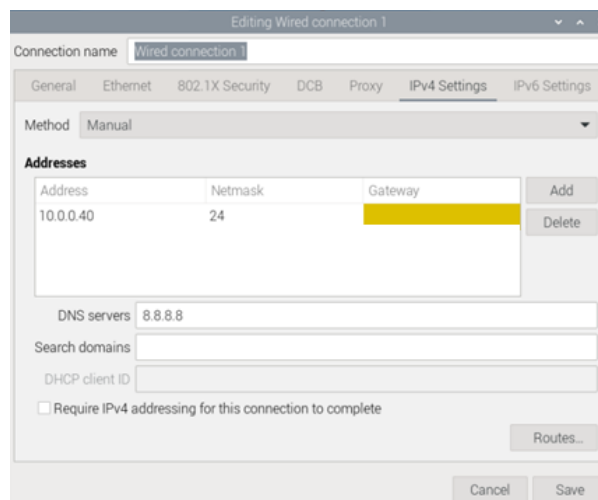


Figura 6.18: Modifiche alla rete Ethernet

Dopo aver ultimato queste ulteriori configurazioni, è stato possibile collegare il Raspberry Pi allo switch Ethernet della rete locale.

All'avvio del sistema operativo del Raspberry Pi, quest'ultimo stabilirà in automatico una connessione VNC con il modulo di misurazione e valutazione della pressa automatica.

Grazie al lavoro svolto, l'operatore presente nella postazione della pressa elettromeccanica può monitorare l'avanzamento del processo di lavoro della macchina. Inoltre, grazie all'utilizzo del display touchscreen, ha la possibilità di interagire direttamente con il sistema andando a modificare, se necessario, i profili forza-spostamento e i relativi parametri fisici che ne caratterizzano il comportamento (Figura 6.19).

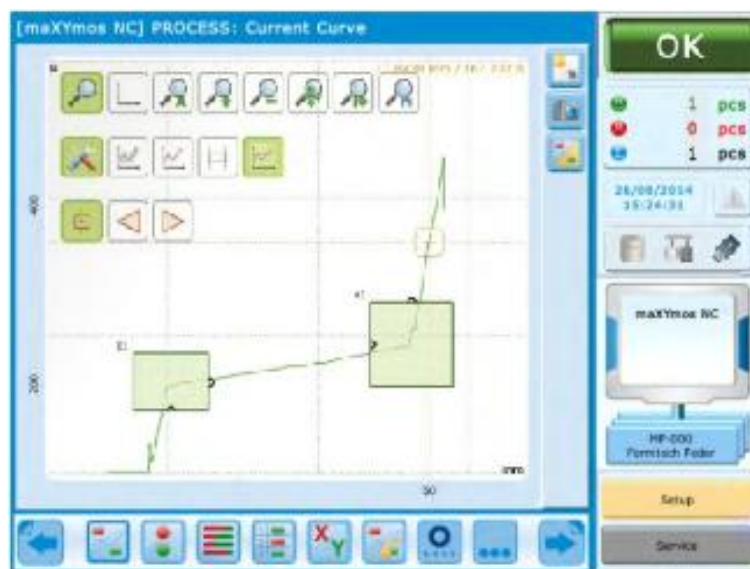


Figura 6.19: Interfaccia grafica del MEM

CONCLUSIONI

Il progetto descritto in questa tesi è stato sviluppato durante l'esperienza di tirocinio svolta presso l'azienda *VISIONAR S.r.l.* Il lavoro presentato si è integrato con un progetto aziendale volto alla progettazione, realizzazione e gestione dei dati di produzione di una linea di assemblaggio su richiesta di un cliente.

L'elaborato si colloca nel campo delle soluzioni tecnologiche avanzate e alternative a basso costo per l'ottimizzazione di ambienti industriali, dimostrando come, dispositivi relativamente economici, possano essere impiegati in contesti industriali per migliorare l'efficienza dei processi produttivi nell'interazione uomo-macchina. Nel contesto dell'industria 4.0, è necessario essere in grado di sviluppare e saper adottare soluzioni alternative efficienti, efficaci, ma anche economicamente sostenibili.

Il lavoro di tirocinio si è articolato attorno a due temi principali: il primo riguardante la gestione e la tracciabilità del prodotto lungo la linea di montaggio; il secondo tema ha riguardato la realizzazione e l'implementazione di una soluzione alternativa per una interfaccia grafica remota.

Per quanto riguarda la gestione e tracciabilità del prodotto, la linea di montaggio ha richiesto un sistema efficace per identificare e tracciare i pezzi lungo tutte le fasi della lavorazione. In funzione di questo, la prima parte del lavoro è stata focalizzata sull'individuazione della configurazione ottimale tra diverse opzioni di dispositivi di lettura di codici a barre mediante un'analisi multicriterio (MCA). Utilizzando Microsoft Excel come strumento di supporto, l'analisi multicriterio ha permesso di valutare le varie configurazioni disponibili, individuando la soluzione migliore per soddisfare i requisiti richiesti dal progetto.

L'analisi multicriterio ha permesso di confrontare le diverse opzioni in base a criteri chiave come prestazioni, robustezza e costi, fornendo una base analitica per la scelta della configurazione ideale per la linea di assemblaggio. Nel corso della tesi è stato approfondito l'approccio metodologico adottato per l'individuazione della configurazione migliore dei dispositivi di lettura delle etichette, con l'obiettivo di garantire una gestione e tracciabilità efficiente del prodotto lungo la linea di assemblaggio.

Nello specifico, il metodo di analisi multicriterio utilizzato e presentato è stato il “Weighted Sum Model” (WSM), o modello della somma ponderata. Il WSM è il metodo di analisi delle decisioni multicriterio più noto per valutare un certo numero di alternative in termini di un certo numero di criteri decisionali. Tale metodo si basa sull’assegnazione di pesi ai criteri e sul calcolo di una somma ponderata per classificare le alternative. Utilizzando questo metodo è stato possibile identificare la soluzione che meglio soddisfa i criteri progettuali individuati.

Il metodo decisionale multicriterio rappresenta uno strumento essenziale per la progettazione di sistemi complessi. La forza di questo metodo risiede nella capacità di rendere il processo decisionale più obiettivo e sistematico. L’obiettivo principale del MCA è quello di fornire un supporto basato su metodo, per identificare la soluzione più adeguata alle esigenze specifiche del problema analizzato.

Terminata la parte relativa alla gestione e tracciabilità del prodotto lungo la linea di produzione, il focus è stato posto su uno specifico banco automatico che coinvolge l’utilizzo di una pressa elettromeccanica forza-spostamento, ed il suo “Measuring and Evaluation Module” (MEM). L’elaborato ha quindi affrontato un’esigenza specifica del cliente: monitorare il processo produttivo della postazione e, in caso di necessità, interagire con il sistema andando ad intervenire sui profili forza-spostamento e sulle variabili che ne determinano i comportamenti, direttamente dalla postazione di lavoro e non dalla postazione di controllo centrale.

Dopo un’analisi delle caratteristiche e delle specifiche della postazione automatica presa in considerazione, sono state presentate le tecnologie e gli strumenti utilizzati per la realizzazione dell’interfaccia grafica remota, con un focus sulle specifiche del Raspberry Pi 4 Model B, del display touchscreen e dei software impiegati durante lo sviluppo del progetto.

È stata quindi trattata la realizzazione e l’implementazione di un’interfaccia grafica, economica e funzionale, basata sul single-board computer Raspberry Pi 4 Model B e una connessione VNC. La soluzione proposta ha rappresentato un’alternativa più accessibile rispetto al display fornito dal produttore del macchinario. L’utilizzo del DIM, il monitor commercializzato dal fornitore, è infatti accompagnato da un costo significativo, soprattutto considerando che il modulo di visualizzazione dovrebbe essere installato su

tre diverse postazioni poiché, all'interno della linea di assemblaggio, la pressa automatica forza-spostamento è presente in altre due postazioni, oltre a quella presa in esame. Il Raspberry Pi 4 Model B viene quindi presentato come un piccolo ma potente computer in grado di svolgere molteplici funzioni e rappresentando una soluzione precisa ed economica.

La soluzione adottata consente all'operatore della postazione di lavoro del banco della pressa elettromeccanica di monitorare e interagire con il processo produttivo direttamente dalla propria postazione. Tale interfaccia garantisce un controllo completo e immediato, pur mantenendo costi contenuti e un'elevata semplicità d'uso.

L'integrazione del progetto con il banco automatico rappresenta un esempio pratico di come tecnologie come il Raspberry Pi 4 Model B e i software di interfaccia remota, possano essere sfruttati per migliorare le operazioni industriali.

Sono infine state presentate nel dettaglio le fasi operative di sviluppo della soluzione partendo dall'installazione e la configurazione del Raspberry Pi, passando per i test preliminari effettuati con un PC al fine di validare la soluzione proposta, fino all'integrazione del sistema nella rete della linea di produzione. Grazie al lavoro svolto, l'operatore presente nella postazione della pressa elettromeccanica può monitorare l'avanzamento del processo di lavoro della macchina. Inoltre, grazie all'utilizzo del display touchscreen, ha la possibilità di interagire direttamente con il sistema andando a modificare, se necessario, i profili forza-spostamento e i relativi parametri fisici che ne caratterizzano il comportamento.

In conclusione, il lavoro presentato si è articolato attorno a due obiettivi principali:

- il primo è la realizzazione di un metodo di analisi multicriterio, al fine di individuare la configurazione “ottima” dei dispositivi di lettura dei codici, così da garantire una gestione e una tracciabilità del prodotto lungo tutta la linea di montaggio.
- il secondo si è concentrato sulla progettazione e implementazione di un'interfaccia grafica remota, economica e funzionale, per uno specifico banco automatico.

L'elaborato di tesi ha avuto quindi una duplice finalità: da un lato, supportare la gestione e la tracciabilità del prodotto lungo la linea di montaggio tramite un metodo di analisi analitico e strutturato delle opzioni disponibili. Dall'altro, sviluppare una soluzione grafica alternativa, più economica, con il fine di migliorare l'efficienza e la funzionalità operativa di una specifica postazione automatica.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Liu C., Xu X. (2017). “Cyber-Physical Machine Tool – the Era of Machine Tool 4.0”. 50th CIRP Conference on Manufacturing Systems. Taiching City (Taichung City, Taiwan).
- [2] VISIONAR S.r.l. <https://visionarprogetti.com/>.
- [3] Project Group. (6 aprile 2020). “Cosa è il One Piece Flow: scopriilo con noi”. <https://www.projectgroup.it/blog/cose-il-one-piece-flow-scopriilo-con-noi/>.
- [4] Make Group. (s.d.). “Massimizzare l’efficienza operativa: il potere del One Piece Flow”.
<https://make-group.it/massimizzare-lefficienza-operativa-il-potere-del-one-piece-flow/#:~:text=Il%20One%20Piece%20Flow%20%C3%A8,volta%2C%20seguendo%20un%20flusso%20continuo.>
- [5] Beckhoff Automation. (2025). “Embedded PCs: PLC and Motion Control in a small format”. https://www.beckhoff.com/en-en/products/ipc/embedded-pcs/?gad_source=1.
- [6] IEEE Std802-1990, cap.3 Reference and Implementation Models, paragrafo 3.1.
- [7] Santitoro, R. (2003). “Metro Ethernet Services - A Technical Overview”. https://web.archive.org/web/20181222184046/http://www.mef.net/Assets/White_Papers/Metro-Ethernet-Services.pdf.
- [8] IT Impresa. (s.d.). “Rete a stella: caratteristiche, vantaggi e svantaggi”. <https://www.it-impresa.it/blog/cosa-sono-caratteristiche-rete-stella/>.
- [9] Gabriele Ribichini. (13 febbraio 2023). “Cosa è il protocollo EtherCAT e come funziona?”. <https://dewesoft.com/it/blog/protocollo-ethercat>.
- [10] EtherCAT Technology Group. (marzo 2023). “EtherCAT - il Fieldbus Ethernet”. https://www.ethercat.org/download/documents/ETG_Brochure_it.pdf.

- [11] Beckhoff Automation. (2025). “EtherCAT Box, digital input”. <https://www.beckhoff.com/it-it/products/i-o/ethercat-box/epxxxx-industrial-housing/ep1xxx-digital-input/>.
- [12] “Ricerca operativa”. (21 settembre 2024). Wikipedia, L'enciclopedia libera. https://it.wikipedia.org/wiki/Ricerca_operativa.
- [13] Santini L. (2019). Materiale didattico del corso di Tecnica Urbanistica I. Università di Pisa, Facoltà di Ingegneria, Corso di Laurea in Ingegneria Edile-Architettura. “L'analisi Multicriterio”. <http://www.dic.unipi.it/l.santini/edilearchitettura/AA2018-2019/LEZIO%206%20AMC.pdf>.
- [14] Munich Business School. (2024). “Weighted Sum Model Simply explained”. <https://www.munich-business-school.de/en/l/business-studies-dictionary/weighted-sum-model>.
- [15] Twproject. (2025). “La matrice decisionale: come prendere decisioni importanti in un progetto”. <https://twproject.com/blog/it/la-matrice-decisionale-come-prendere-decisioni-importanti-un-progetto/>.
- [16] Cavalli F. (21 giugno 2024). “10 passi fondamentali per creare una matrice decisionale vincente”. <https://www.bitrix24.it/articles/10-passi-fondamentali-per-creare-una-matrice-decisionale-vincente.php>.
- [17] Rizzo A. (s.d.). “Analisi multicriterio per acquisti”. A2C. <https://shop.a2c.it/shop/decisioni/analisi-multicriterio>.
- [18] Beckhoff Automation. (2024). “Chi siamo”. <https://www.beckhoff.com/it-it/company/>.
- [19] Olga Weis. (27 agosto 2021). “Guida esaustiva alla specifica della porta seriale”. <https://www.virtual-serial-port.org/it/article/what-is-serial-port/#virtual>.
- [20] Roselle V. (22 novembre 2024). “Codice QR e codice a barre: qual è il migliore per il settore manifatturiero?”. <https://www.qrcode-tiger.com/it/qr-code-vs-barcode>.

- [21] SICK. (2025). “Informazioni su SICK”. <https://www.sick.com/it/it/informazioni-su-sick/w/about-sick/>.
- [22] A2C-Salerno. (8 febbraio 2023): “Analisi Multicriterio - Foglio di Excel di supporto alle scelte di acquisto”. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=PQLwIrAwEVk>.
- [23] The Excel Hub. (31 marzo 2022). “Multi Criteria Decision Analysis (MCDA) In Excel - Objective Decisions Using Operational Research”. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=4lyEhr0Xznc>.
- [24] Ferrara M., Merenda D. S. (s.d.). Materiale didattico del corso di Business Analytics and Decision Theory. Università degli Studi “Mediterranea” di Reggio Calabria. “Analisi multicriteriale”. https://www.unirc.it/documentazione/materiale_didattico/1465_2019_476_35499.pdf.
- [25] Gruppo Kistler. (2024). “Chi siamo”. https://www.kistler.com/IT/it/chi-siamo/C00000001?gad_source=1&gclid=CjwKCAiApsm7BhBZEiwAvIu2X0FIp55bggDmQGKfGxV1bs0WcFaeM7K1KXI2VFdRCUmn5pIsWIUSMxoCRg8QAvD_BwE.
- [26] Kistler Instrumente AG. (2019). “maXYmos NC Type 5847... Instruction Manual [NCFH, Type 2151B...., NCFB, Type 2152B...., NCFN, Type 2153A...., NCFT, Type 2157B...., NCFB, Type 2160A...., NCFE, Type 2162A....]”. Winterthur, Switzerland: Kistler Group. <https://anyflip.com/xjff/hxwz/basic>.
- [27] Gruppo Kistler. (2024). “Servo presses”. <https://www.kistler.com/IT/it/servo-presses/C00000153>.
- [28] Gruppo Kistler. (2024). “XY Monitor for Monitoring and Controlling NC Joining Modules”. https://kistler.cdn.celum.cloud/SAPCommerce_Download_original/003-272e.pdf.
- [29] Schneider Electric. (2019). “Introduzione a Sercos”. https://product-help.schneider-electric.com/Machine%20Expert/V1.1/it/m262serc/m262serc/Sercos_Basics/Sercos_Basics-2.htm.

- [30] Gruppo Kistler. (2024). “Process Monitoring Systems”.
https://kistler.cdn.celum.cloud/SAPCommerce_Download_original/960-338e.pdf.
- [31] Gruppo Kistler. (2024). “Opuscolo applicazione”.
https://kistler.cdn.celum.cloud/SAPCommerce_Download_original/960-283e.pdf.
- [32] Gruppo Kistler. (2024). “Sistema di monitoraggio del processo maXYmos NC per i moduli di assemblaggio NC/5847B”. https://www.kistler.com/IT/it/cp/sistema-di-monitoraggio-del-processo-maxymos-nc-per-i-moduli-di-assemblaggio-nc-5847b/P0000378?gad_source=1&gclid=Cj0KCQiA4L67BhDUARIsADWr17Hlfn5S4bz hIAQjBjeRTg7VEb09O8xnIckV5UrD8nivlnLHpFtxy4EaAnjsEALw_wcB.
- [33] Gruppo Kistler. (2024). “Servoamplificatore IndraDrive C con accessori”.
<https://www.kistler.com/IT/it/cp/servoamplificatore-indradrive-c-con-accessori-2180a/P0000186>.
- [34] Gruppo Kistler. (2024). “Scheda tecnica”.
https://kistler.cdn.celum.cloud/SAPCommerce_Download_original/003-125e.pdf.
- [35] Gruppo Kistler. (2024). “Prolunga monitor per il sistema di monitoraggio del processo maXYmos TL e NC / 5877AZ000”. <https://www.kistler.com/IT/it/p/prolunga-monitor-5877az000/000000000018005236>.
- [36] Massimo Montedoro. (s.d). “Cos’è una rete LAN e quali sono le sue caratteristiche”.
<https://universeit.blog/rete-lan/>.
- [37] Francesco La Trofa. (s.d). “Switch di rete: cosa sono, a cosa servono e come configurarli”. <https://universeit.blog/switch-di-rete/>.
- [38] Raspberry Pi. (2024). “Raspberry Pi hardware”.
<https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/raspberry-pi.html>.
- [39] Raspberry Pi. (aprile 2024). “Raspberry Pi 4 Model B product brief”.
<https://datasheets.raspberrypi.com/rpi4/raspberry-pi-4-product-brief.pdf>.

- [40] Antonello Ciccarello. (ottobre 2023). “Raspberry Pi 5 è due volte più veloce del Pi 4”. <https://www.html.it/magazine/raspberry-pi-5-e-due-volte-piu-veloce-del-pi-4/>.
- [41] LAFVIN. (s.d). “About Us”. <https://lafvintech.com/>.
- [42] LAFVIN. (2024). “7inch HDMI Display-C User Manual”. [http://www.lcdwiki.com/res/MPI7002/7inch_HDMI_Display-C_User_Manual\(En\).pdf](http://www.lcdwiki.com/res/MPI7002/7inch_HDMI_Display-C_User_Manual(En).pdf).
- [43] Raspberry Pi. (s.d.). “Install Raspberry Pi OS using Raspberry Pi Imager”. <https://www.raspberrypi.com/software/>.
- [44] PuTTY. (s.d.). “Download PuTTY”. <https://www.putty.org/>.
- [45] Simon Tatham. (s.d.). “Introduction to PuTTY”. <https://the.earth.li/%7Esgtatham/putty/0.78/html/doc/Chapter1.html#intro>.
- [46] Roberto Bisceglia. (18 luglio 2015). “VNC per la gestione remota di computer”. <https://www.bisceglia.eu/ict/vnc.html#:~:text=VNC%20sta%20per%20Virtual%20Network,e%20di%20interagire%20con%20esso>.
- [47] Wikipedia. (7 gennaio 2025). “VNC”. <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=VNC&oldid=1268011750>.
- [48] Pierleoni P. (2023). Materiale didattico del corso di Wireless Sensor Networks for IoT. Università Politecnica delle Marche, Facoltà di Ingegneria, Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Elettronica. “IP Protocol Architecture”. https://learn.univpm.it/pluginfile.php/941669/mod_resource/content/1/2.2%20-%20IoT%20-%20IP%20Protocol%20Architecture.pdf.
- [49] KDE Documentation. (s.d.). “Il protocollo Remote Frame Buffer”. <https://docs.kde.org/stable5/it/krdc/krdc/what-is-RFB.html>.
- [50] RealVNC. (2024). “Download RealVNC® Viewer”. https://www.realvnc.com/en/connect/download/viewer/windows/?lai_vid=aqKaJnlIXFm03&lai_sr=35-39&lai_sl=m.

[51] TightVNC Software. (2023). “Download TightVNC”.
<https://www.tightvnc.com/download.php>.

[52] inDomus. (2024). “Installare e configurare Raspberry Pi OS (Raspbian) in modalità headless”. <https://indomus.it/guide/come-installare-e-configurare-raspbian-in-modalita-headless/>.

[53] inDomus. (2024). “Le prime cose da fare dopo aver installato Raspberry Pi OS (Raspbian)”. <https://indomus.it/guide/le-prime-cose-da-fare-dopo-aver-installato-raspberry-con-raspbian/>.

[54] Tegan. (17 dicembre 2024). “All About Direct Connections”.
<https://help.realvnc.com/hc/en-us/articles/360002249797-All-About-Direct-Connections>.