**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MODENA E REGGIO EMILIA**

Dipartimento di Scienze Fisiche, Informatiche e Matematiche

Corso di laurea in Informatica

**Riprogettazione e ottimizzazione di software per l’interfaccia uomo-macchina nell’ambito dell’automazione industriale**

**Relatore:** **Candidato:**

Giacomo Cabri Enrico Marras

**Anno Accademico 2022-2023**

**Indice**

[Introduzione 3](#_Toc147071905)

[Capitolo 1 – Contesto di sviluppo 4](#_Toc147071906)

[**1.1** **Caratteristiche Hardware** 4](#_Toc147071907)

[**1.2** **Architettura di comunicazione** 5](#_Toc147071908)

[**1.3** **Caratteristiche Software** 6](#_Toc147071909)

[**1.4** **Protocollo di comunicazione** 6](#_Toc147071910)

[1.4.1 Modbus RTU 7](#_Toc147071911)

[Capitolo 2 – Fase di analisi 9](#_Toc147071912)

[**2.1** **Aggiornamento componenti grafiche** 9](#_Toc147071913)

[**2.2** **Codice obsoleto** 10](#_Toc147071914)

[**2.3** **Sicurezza** 11](#_Toc147071915)

[**2.4** **Problematiche secondarie** 11](#_Toc147071916)

[**2.4** **Vincoli di sviluppo** 12](#_Toc147071917)

[Capitolo 3 – Fase di progettazione 13](#_Toc147071918)

[**3.1** **Tecnologie impiegate** 13](#_Toc147071919)

[**3.2** **Priorità comunicative** 14](#_Toc147071920)

[**3.3** **Task** 15](#_Toc147071921)

[**3.4** **Coda di priorità** 16](#_Toc147071922)

[3.4.1 Comportamento dei Task periodici 18](#_Toc147071923)

[3.4.2 Vita di un Task periodico ad alta priorità 19](#_Toc147071924)

# **Introduzione**

In questo elaborato si vuole descrivere l’attività di sviluppo effettuata durante il tirocinio curriculare, mettendo in evidenza tutto il processo che ha portato alla produzione di una soluzione conforme alle necessità evidenziate.

Il tirocinio in questione si è focalizzato sullo sviluppo di una **Human Machine Interface**, in breve HMI, ovvero un software che permette a un utente di comunicare con una macchina, un programma o un sistema, attraverso un’interfaccia grafica[[1]](#footnote-1), comunemente utilizzato in ambito industriale.

L’automazione industriale si occupa dell’impiego coordinato di soluzioni tecnologiche allo scopo di ridurre la necessità dell’intervento umano[[2]](#footnote-2), specialmente per quanto riguarda operazioni ripetitive, complesse o pericolose.

Nonostante questo campo abbia avuto una significativa evoluzione grazie a metodologie come l’industria 4.0, durante il tirocinio si è constatato come alcuni di questi settori siano rimasti più legati a un paradigma di lavoro antiquato, che predilige una maggiore dipendenza dal lavoro manuale e una carenza di tracciabilità e/o sicurezze.  
Per questo motivo, tramite l’analisi delle problematiche e delle necessità del caso di studio, sono state adottate tecnologie e paradigmi moderni che hanno permesso il miglioramento dell’efficienza operativa anche in contesti precedentemente identificati come critici.

Nel primo capitolo verrà contestualizzata la situazione preesistente, fornendo informazioni sulle caratteristiche software, hardware e sul protocollo del prodotto originale.

Il secondo capitolo sarà finalizzato alla fase di analisi, in cui verranno evidenziati e analizzati i vari problemi riscontrati.

Con il terzo capitolo si passerà alla fase di progettazione, nella quale si mostreranno le principali soluzioni impiegate sia dal punto di vista delle tecnologie scelte, che dall’effettiva riprogettazione della logica interna.

Successivamente, nel quarto capitolo verrà analizzata l’effettiva implementazione delle funzionalità presentate nel terzo capitolo, e infine, nel quinto capitolo, verranno analizzate le opportunità di ottimizzazione relative all’implementazione.

# **Capitolo 1 – Contesto di sviluppo**

Il tirocinio è stato svolto presso la DOT S.n.c., una realtà del territorio emiliano che da quasi trent’anni si occupa principalmente di progettazione e produzione di prodotti a servizio dell’industria.

Durante il tirocinio è stato preso in analisi “MultiBench”, un prodotto consolidato per la gestione di una HMI attualmente utilizzata in più macchinari e sviluppato in Visual Basic 6.0.

È importante notare come questo software sia completamente funzionante secondo le necessità per le quali è stato originariamente progettato, e non mostri problematiche evidenti che ne comprometterebbero il conseguimento delle mansioni.

Siccome MultiBench presenta più versioni, la fase di analisi si è concentrata principalmente sulla versione installata sul macchinario a disposizione durante il periodo di tirocinio, ovvero la prima sviluppata.

* 1. **Caratteristiche Hardware**

Il macchinario oggetto di analisi è una stazione di assemblaggio dei componenti di motori, che permette di svolgere diversi compiti al fine di personalizzare la fase dell’assemblaggio in base ai requisiti tecnici, il tutto comandabile da un operatore.

Le funzionalità sopra citate vengono comandate da cinque controllori logici programmabili, in breve *PLC*. Essi hanno il compito di monitorare e salvare nei propri registri interni stati riportati dai sensori del macchinario e, all’evenienza, anche di pilotare le sue componenti.

Si noti come l’attività di riprogettazione si è focalizzata esclusivamente sulla parte software che si interfaccia direttamente con i *PLC*, e pertanto non sono state necessarie modifiche sulla loro programmazione in quanto completamente funzionanti.

Tra i principali componenti pilotabili dai controllori vi sono quattro assi, ovvero gli effettivi protagonisti dell’attività di assemblaggio dei motori.

Per consentire un collegamento tra i vari controllori al **livello fisico** dello *stack* ISO/OSI[[3]](#footnote-3), è stato usato lo standard per le comunicazioni seriali **RS-485** a **due fili**. Questo implica il suo utilizzo in modalità **half-duplex**, la quale prevede che le comunicazioni possano viaggiare indipendentemente dalla direzione, ma che solo un dispositivo alla volta possa trasmettere informazioni.

In accordanza a quanto consigliato dallo standard RS-485[[4]](#footnote-4), i vari controllori, referenziati con il nome di “*Drive*”, “*Inverter*” e “*Stepper*”, sono interconnessi attraverso una *daisy-chain* o più comunemente chiamata struttura a bus (figura 1).



Figura – Struttura delle connessioni tra i vari dispositivi

* 1. **Architettura di comunicazione**

Per quanto riguarda la comunicazione, i vari controllori sono stati predisposti per lavorare in un’architettura di tipo **master-slave**, nella quale è sempre presente:

* Un **master.**
* Uno o più **slave**.

In questo tipo di architettura, “ogni scambio di informazioni è originato dal master, il quale invia […] sul bus una particolare richiesta”[[5]](#footnote-5).

Gli slave “sono normalmente in ricezione e ascoltano le richieste del master. Solo lo specifico slave interrogato cattura le informazioni inviate dal master […] e risponde inviando a sua volta le proprie informazioni sulla rete”[[6]](#footnote-6).

In questo tipo di predisposizione, il PC che esegue l’HMI prende il ruolo di *master*, mentre tutti gli altri controllori saranno gli *slave*.

**1.3 Caratteristiche Software**

Tra le principali funzionalità di MultiBench per questo macchinario sono presenti:

* Gestione dell’autenticazione su diversi profili utente in base alla tipologia di utilizzatore (ospite, operaio, manutentore, …).
* Continuo monitoraggio degli input/output del sistema e della comunicazione software-hardware.
* Visualizzazione del log eventi e feedback degli allarmi in tempo reale.
* Attuazione di movimenti manuali comandati da una figura umana.
* Configurazione dei parametri globali di riferimento.
* Creazione, salvataggio, caricamento ed esecuzione di programmi automatici di lavoro.
* Traduzione del testo delle componenti grafiche in più lingue.

## **Protocollo di comunicazione**

Al fine di gestire tutte le comunicazioni tra i vari controllori è stato adottato lo standard comunicativo del protocollo **Modbus**. Seppur sia stato pubblicato originariamente nel 1979, rimane ad oggi uno dei protocolli di comunicazione più usati per connettere dispositivi elettronici industriali.

Il protocollo Modbus ha il compito di gestire le comunicazioni su più *layer* dello *stack* ISO/OSI.

Al livello ***Data Link****[[7]](#footnote-7)*, prevede tutte le specifiche relative allo scambio dei *frame* [[8]](#footnote-8) (sequenze di byte) tra un dispositivo e l’altro, le quali comprendono:

* Invio dei dati sul bus.
* Controllo delle temporizzazioni.
* Controllo degli errori mediante *checksum*.

Al livello **Applicativo**, si occupa della codifica delle possibili richieste del *master* e le relative risposte degli slave all’interno dei *frame*.

Questo livello permette inoltre di interagire con le varie applicazioni in esecuzione sui dispositivi.

* + 1. Modbus RTU

Modbus è disponibile in tante varianti comunicative, tra cui *RTU*, *ASCII* e *TCP/IP*.

Per questo progetto è stata utilizzata la modalità **RTU** o *Remote Terminal Unit[[9]](#footnote-9)*.

Figura – Struttra del frame Modbus in modalità RTU

Come si evince dalla figura 2, il messaggio Modbus è suddiviso in diversi campi[[10]](#footnote-10):

* *Address* indica l’indirizzo dello slave destinatario del messaggio e può variare da 1 a 247. Il valore 0 è riservato per messaggi in broadcast dove non verranno effettuate risposte.
* *Function* permette al destinatario di capire quale azione dovrà svolgere e al mittente di capire quale azione è stata svolta dallo *slave*. In seguito verranno approfondite nel contesto di questo caso di studio.
* *Data* contiene informazioni addizionali che lo slave deve sapere per portare a termine la richiesta indicata tramite il *function code*.
* *CRC*, o *Cyclic Redundancy Check* è un codice di controllo effettuato su tutto il frame per verificare la sua integrità dopo la trasmissione. Viene inizialmente calcolato dal master e successivamente dallo slave destinatario e, qualora il valore *CRC* calcolato dallo slave differisca da quello indicato dal master, il frame verrà scartato.
* Analogamente alla logica degli *Internal Frame Gap*, si ricorre a utilizzare i campi *start* ed *end* per cercare di fornire più garanzie sulla corretta ricezione del pacchetto prima dell’invio del successivo.
* Opzionalmente, è possibile anche aggiungere un bit di parità alla fine del messaggio che rappresenta un’ulteriore garanzia sullo stato dell’integrità del *frame*.

Per quanto concerne la codifica dei dati, Modbus utilizza una rappresentazione ‘*Big-Endian*’ per indirizzi e per l’effettivo contenuto informativo (ad eccezione del controllo CRC, che usa una codifica ‘*Little-Endian*’). Questo implica che all’invio di una quantità numerica superiore a un singolo byte, verrà inviato per primo il byte più significativo[[11]](#footnote-11).

È infine importante marcare che per garantire la corretta comunicazione tra i dispositivi è necessario assicurarsi che mittente e destinatario possano comunicare alla stessa velocità e che utilizzino la stessa struttura del messaggio Modbus.

# **Capitolo 2 – Fase di analisi**

Durante lo svolgimento del tirocinio, è stata posta molta importanza alla fase di progettazione in quanto è stato necessario individuare preventivamente le maggiori problematiche prima di passare all’effettiva implementazione della soluzione da applicare.

Nel corso di questo capitolo, verranno esaminate in dettaglio le principali criticità riscontrate e le limitazioni progettuali imposte.

## **2.1 Aggiornamento componenti grafiche**

Tra le principali criticità d’uso identificate, una delle più significative ha riguardato la lentezza generale dell’interfaccia utente.

Questa ritardo si è presentato sia per le operazioni che richiedevano l’aggiornamento di elementi dell’interfaccia, ma anche, seppur in maniera minore, per tutte le interazioni tra l’utente e la macchina, dove vi era la necessità di cambiare lo stato interno di registri attraverso l’HMI.

L’esempio più rilevante per questa tematica riguarda la parte superiore dell’interfaccia di MultiBench mostrata nella figura 3, la quale presenta una serie di indicatori che riportano misure inerenti a stati interni degli assi.



Figura – Pannello superiore dell’interfaccia di MultiBench

Il ritardo dell’aggiornamento di queste misurazioni rappresenta un problema vista la loro importanza nelle scelte decisive dell’operatore, ma anche per il corretto funzionamento della macchina stessa.

Una delle principali cause di questo ritardo di aggiornamento è dovuta all’inefficienza del *polling* per il controllo dei vari *widget*, ovvero “all’attività di campionamento attivo degli stati di un dispositivo esterno da parte di un programma client come un’attività sincrona”[[12]](#footnote-12).

Seppur rappresenti una soluzione adatta per software prevedibili e di piccole dimensioni, il *polling* non permette di gestire efficacemente la potenza di calcolo[[13]](#footnote-13), talvolta sprecata non potendola fornire su richiesta delle attività che ne hanno bisogno.

## **2.2 Codice obsoleto**

Il codice sorgente di MultiBench si distanza notevolmente dai moderni paradigmi di programmazione in quanto, in primo luogo, non prende spunto da un *design pattern*, presentando una struttura talvolta monolitica e poco modulare.

Questa scarsa modularità la si può notare molto di frequente nelle parti di controllo del programma relative al *polling*, dove spesso molti stati di registri sono gestiti attraverso sequenze molto lunghe di *if-else* o *switch* *case*. Seguendo questo paradigma di scrittura, nel caso dell’estensione di una *feature*, implicherebbe un aumento significativo della complessità di comprensione e di manutenzione del codice esistente, con la possibilità di introdurre errori difficili da individuare.

Per questo motivo, risulta evidente la necessità di avere una logica costruttiva che consenta agilmente l’aggiunta di *widget* o di controlli di stato senza l’appesantimento eccessivo del codice.

Seppur supportato già dalla versione 4.0[[14]](#footnote-14), al momento della scrittura del sorgente originale non è stato adottato un paradigma di programmazione a oggetti. Di conseguenza, MultiBench non presenta alcuna delle caratteristiche principali della *OOP[[15]](#footnote-15)*, tra cui si ricordano:

* Uso e divisione concettuale in classi.
* Polimorfismo.
* Ereditarietà.
* Incapsulamento.

Al posto di organizzare le funzionalità in classi con metodi e proprietà correlate, è stato originariamente utilizzato un approccio più procedurale che tendeva a complicare la comprensione tra le diverse parti del sistema.

Inoltre, l’assenza di ereditarietà e polimorfismo limitava la capacità di estendere e personalizzare le componenti grafiche per adattarle alle proprie esigenze.

In aggiunta a quelli che verranno trattati nel capitolo 2.3, la mancanza di incapsulamento poteva comportare problemi di sicurezza e la possibilità di accessi non autorizzati ad attributi sensibili.

## **2.3 Sicurezza**

Dal punto di vista meccanico, il macchinario preso in oggetto presenta molteplici accorgimenti sul punto di vista della sicurezza, come l’uso di una barriera protettiva, molteplici interruttori di abilitazione, e vari sistemi secondari che forniscono garanzie anche in caso di fallimento dei primari.

Evitando di focalizzarsi in questa sede sulle caratteristiche fisiche o sulle vulnerabilità delle più vecchie versioni di visual basic, sarebbe il caso di porre l’attenzione sull’assenza di occultazione dei dati sensibili degli utenti da parte di MultiBench.

Poiché è stato necessario avere un sistema che garantisse l’utilizzo di specifiche funzionalità a precisi utenti, era stato originariamente creato un file contenente le loro informazioni necessarie.

Il file in questione era completamente visibile in chiaro, esponendo i dati degli utenti a potenziali rischi di accesso non autorizzato e in maggior modo inadatto a un paradigma di progetto sicuro per future interazioni con l’industria 4.0.

## **2.4 Problematiche secondarie**

Oltre a quelle precedentemente elencate, sono state identificate altre problematiche, sicuramente minori, ma che potrebbero comunque fornire spazio di miglioramento. Tra queste:

* Carenza di una documentazione esaustiva e talvolta precisa, che ha rappresentato una problematica per la manutenzione del codice, nonché una complessità maggiore nella riprogettazione.
* Programma originale legato unicamente all’ambiente Windows, in quanto utilizzatore del *runtime environment* necessario all’esecuzione di codice visual basic.
* Assenza di un vero paradigma di programmazione per *multithreading* che avrebbe permesso di sfruttare più efficientemente l’hardware messo a disposizione.

## **2.4 Vincoli di sviluppo**

Nel corso del progetto, sono stati imposti determinati vincoli che hanno influenzato le scelte e le direzioni prese nello sviluppo del sistema.

Anche se non si trattava di un obbligo progettuale formale, è stato necessario rispettare una limitazione temporale ben definita per l'intero sviluppo del software. La durata del progetto doveva essere rigorosamente contenuta entro il periodo di tirocinio, che corrispondeva a un totale di 375 ore.

Nonostante in fase progettuale si fosse discusso dell’idea di svincolare il prodotto da un preciso sistema operativo, l’azienda ha ritenuto più opportuno continuare lo sviluppo mirato alla distribuzione su ambiente Windows, in quanto più familiare e più adatto alle loro necessità. Ciononostante, è rimasto un obiettivo importante da tenere in considerazione nella scelta delle tecnologie impiegate, per non limitare future adozioni di altri sistemi operativi.

In aggiunta all’ambiente Windows, il prodotto finale avrebbe dovuto disporre anche di un *installer* che semplificasse l’installazione del software e che fornisse l’accesso al programma da un singolo file eseguibile (*.exe*).

Infine, è stato vincolante evitare l’utilizzo di *framework* o librerie che richiedessero l’acquisto di licenze per uso professionale, ed è anche stato ritenuto fondamentale utilizzare tecnologie consolidate, per minimizzare la possibilità che il loro supporto cessasse nell’immediato futuro.

# **Capitolo 3 – Fase di progettazione**

In questo capitolo verranno discusse in primo luogo le tecnologie scelte e successivamente, seppur a un livello più astratto, le soluzioni metodologiche usate per risolvere i problemi precedentemente discussi.

## **3.1 Tecnologie impiegate**

Visto il contesto di sviluppo in parte di basso livello, si era inizialmente valutato il linguaggio C++, in quanto avrebbe garantito un’ottima gestione specifica della comunicazione, delle risorse e avrebbe permesso lo sviluppo non vincolato a un sistema operativo. Tuttavia, durante le prime prove, è stato notato come l’organizzazione e l’utilizzo di diverse librerie grafiche di C++ nell’ambiente Windows fosse complesso e poco agevole. Per questo motivo l’attenzione si è spostata sul linguaggio Python.

Seppur più lento per via della sua natura, Python avrebbe consentito una gestione più semplificata delle librerie grafiche e, grazie alla sua maggiore astrazione, avrebbe permesso di completare con più garanzie le funzionalità precedentemente discusse entro il periodo di tirocinio.

Nativamente, Python non fornisce alcun supporto diretto per la comunicazione con il protocollo Modbus, tuttavia sono presenti molti moduli esterni alla libreria standard.

La scelta per questo ambito è ricaduta su MinimalModbus*[[16]](#footnote-16)*, un modulo *open-source* che implementa il protocollo Modbus e permette la comunicazione tra un computer (*master*) e gli strumenti (*slaves*)[[17]](#footnote-17).

Questo modulo fornisce diverse *API[[18]](#footnote-18)* di basso livello che consentono una vasta gamma di operazioni di comunicazione, incluso il controllo dei parametri ad essi associati.

Infine, MinimalModbus soddisfa i vincoli di sviluppo posti dall’azienda poiché pubblicato attraverso la licenza Apache 2.0che, nel rispetto delle sue linee guida, permette l’uso commerciale e la distribuzione*[[19]](#footnote-19)*.

Per quanto riguarda la libreria grafica è stata scelta Tkinter, un *framework* attualmente incluso nella libreria standard di Python di relativamente facile utilizzo.

La scelta è ricaduta su Tkinter principalmente per via della sua stabilità, in quanto è una libreria grafica ampiamente utilizzata, leggera, documentata e già presente da diversi anni.

Benché Tkinter possa apparire datato dal punto di vista dell'aspetto grafico, ha comunque soddisfatto i requisiti del progetto, poiché non erano imposti vincoli riguardanti l'aspetto estetico dell'interfaccia utente.

In linea con MinimalModbus, Tkinter offre la possibilità d’utilizzo commerciale e la distribuzione dei prodotti che ne fanno uso come dipendenza, in quanto rilasciato con la licenza Tcl/Tk[[20]](#footnote-20).

## **3.2 Priorità comunicative**

Come menzionato nel capitolo 2.1, durante la fase di analisi era stata evidenziata la necessità di migliorare la responsività generale del programma, con particolare riferimento alle misurazioni indicate nella figura 3. Prendendo spunto dalla pagina “DIAGNOSI I/O #1” in figura 4, una delle interfacce di controllo più numerosa dal punto di vista delle trasmissioni, è stata scelta una logica di comunicazione con priorità.

A screenshot of a computer

Description automatically generated

Figura – Interfaccia “DIAGNOSI I/O #1 di Multibench

La scelta è stata possibile per via di una minore necessità di aggiornamento di tutti i *widget* contenuti nella pagina che, in contrapposizione alle misurazioni presenti nel pannello superiore della figura 3, non avrebbero richiesto necessariamente un continuo aggiornamento tempestivo.

Questo significa che al posto di effettuare continue misurazioni su tutti i registri interessati dai *widget*, si sarebbero potuti effettuare più spesso campionamenti su quelli più “importanti” e più di rado su quelli secondari.

Conseguentemente a questa decisione, sono state stabilite due tipologie di priorità comunicative:

* **Alta priorità**: per tutte le comunicazioni inerenti a *widget* che necessitano di essere aggiornati tempestivamente, e per tutti i cambi di stato che l’utente decide di apportare ai registri interni degli slave per mezzo di scritture.
* **Bassa priorità**: per tutte le comunicazioni inerenti a *widget* che non necessitano di un aggiornamento tempestivo, e possono essere aggiornati in un secondo momento rispetto alle comunicazioni ad alta priorità, senza pregiudicare il funzionamento del macchinario.

## **3.3 Task**

Al fine di organizzare al meglio ogni singola comunicazione, e quindi anche le priorità definite nel capitolo 3.2, è stata creata un’unità informativa composta da tutti i parametri riguardanti una singola trasmissione, il Task.

Internamente al Task, saranno quindi contenuti:

* **Priorità**: alta o bassa.
* **Porta**: identificatore della porta seriale (ad esempio “COM1”, “COM2”, … , “COM256” su Windows).
* **Slave-id**: Identificatore univoco dello slave.
* **Codice** **funzione**: codice dell’operazione Modbus da eseguire.
* **Indirizzo** **del registro**: indirizzo iniziale dell’operazione del Task.
* **Bytesize**: lunghezza del messaggio.
* **Baud-rate**: determina la velocità della comunicazione sul canale trasmissivo.
* **Bit di stop**: numero di bit di stop alla fine di ogni messaggio Modbus.
* **Bit di parità**: usato per determinare se i dati trasmessi sono stati ricevuti correttamente.
* **Timeout**: secondi dopo i quali il destinatario della comunicazione è considerato irraggiungibile.
* **Periodicità**: indicatore booleano per differenziare i Task da eseguire una singola volta da quelli periodici.
* **Register count**: numero di registri sul quale operare.

Questo tipo di organizzazione per le comunicazioni consente di avere oggetti più facili da maneggiare, in quanto una volta costruiti contengono già tutte le informazioni necessarie a un determinato compito, e pertanto non devono essere istanziati a ogni uso. Inoltre, agevolano il processo di ottimizzazione in quanto diventa più facile costruire e gestire dei Task fatti appositamente per un dispositivo rispetto a un altro.

Si prenda come esempio la velocità trasmissiva. È noto che in molti contesti applicativi si tende a sfruttare al massimo la velocità di trasmissione disponibile per ridurre al minimo il tempo necessario alle comunicazioni. In tal senso, ci si aspetta che tutti i dispositivi operino al massimo delle loro capacità di trasmissione, tuttavia ciò non implica che si possa sempre comunicare allo stesso modo. È questo il caso dei due *Inverter*, che possono trasmettere al più con un *baud-rate* di 38400 bit/secondo[[21]](#footnote-21), ben lontano dai 115200 bit/secondo[[22]](#footnote-22) di tutti gli altri dispositivi.

## **3.4 Coda di priorità**

Ora che si è definita un’unità informativa contenente i compiti da eseguire, è necessario definire una struttura dati che permetta la loro gestione. A questo scopo è stata scelta una coda di priorità, la quale ha i seguenti compiti:

* Permettere l’inserimento dei vari Task, tra i quali:
  + Task **periodici** con **priorità normale**
  + Task **periodici** ad **alta priorità**
  + Task **non periodici** ad **alta priorità**
* Gestire l’accodamento dei vari task periodici che sono stati eseguiti o alternativamente, la rimozione dalla coda dei task non periodici eseguiti.

Si noti come ai fini del progetto, non è stato ritenuto fondamentale discriminare anche tra i Task non periodici a bassa priorità, in quanto non rappresentano una tipologia di compito necessario alle necessità progettuali.

Al fine di permettere a Task diversi di eseguire più o meno frequentemente si definiscono i seguenti puntatori della coda:

* Un **puntatore all’ultimo elemento della coda,** o fondo, per gli inserimenti dei Task periodici con priorità normale.
* Un **puntatore al primo elemento della coda** o cima.
* Un **puntatore al secondo elemento con priorità normale a partire dalla cima della coda**. Nel caso in cui non ce ne siano o ce ne sia solo uno, punterà al fondo della coda. Quest’ultimo puntatore è utilizzato per gli inserimenti dei Task periodici ad alta priorità.

La priorità di esecuzione dei singoli Task è determinata dalla loro posizione all’interno della coda. In particolare, i Task più vicini alla cima nella coda saranno eseguiti prima di quelli più lontani.

Inoltre, l’effettiva priorità di un Task non garantisce alcun vantaggio di esecuzione tutt’ora che il compito è stato inserito nella coda, bensì viene utilizzato per **fornire una posizione più o meno vantaggiosa al momento del reinserimento**.

Nella figura 5 si può osservare un generico stato della coda e dei suoi puntatori.



Figura - Generico stato della coda e dei suoi riferimenti

Nei capitoli 3.4.1 e 3.4.2 verranno analizzate le metodologie di inserimento e di vita di ogni tipologia di Task, utilizzando per brevità la notazione , con e rispettivamente per i Task periodici ad alta priorità, periodici a priorità normale e non periodici ad alta priorità.

* + 1. Comportamento dei Task periodici

I Task periodici a priorità normale seguono due regole:

* In fase di inserimento verranno accodati, ovvero verranno inseriti nella posizione più lontana dalla cima.
* Dopo la loro esecuzione, verranno accodati in fondo alla coda.

Il comportamento differisce per i Task periodici ad alta priorità, i quali:

* Al momento dell’inserimento prenderanno la posizione del secondo Task con priorità normale dalla cima della coda.
* Dopo la loro esecuzione, verranno nuovamente inseriti all’interno della coda, nella posizione del secondo Task con priorità normale più vicino alla cima.

Come esempio, si consideri la figura 6, nella quale sono stati delineati i seguenti stati:

* 6.1: Stato iniziale della coda.
* 6.2: Inserimento nella coda del Task periodico 4 a priorità normale in ultima posizione.
* 6.3: Inserimento nella coda del Task periodico 5 ad alta priorità nella posizione occupata dal task 3.
* 6.4: Esecuzione del Task periodico 1 ad alta priorità e conseguente reinserimento in coda nella posizione occupata dal Task 3.
* 6.5: Esecuzione del Task periodico 2 a priorità normale e conseguente reinserimento nel fondo della coda.
* 6.6: Esecuzione del Task periodico 5 ad alta priorità e conseguente reinserimento in coda nella posizione occupata dal task 4.



Figura - Inserimento, esecuzione e reinserimento di Task periodici

Si noti come il puntatore di reinserimento per i Task ad alta priorità sia stato scelto appositamente in coincidenza con la posizione del secondo Task a priorità normale dalla cima della coda, per via dei vincoli progettuali di reattività. Tuttavia, questa scelta non preclude la possibilità di valutare eventuali bilanciamenti, in cui le varie priorità di Task competono in minor modo per la loro esecuzione più o meno frequente.

Questa caratteristica permette inoltre di gestire la velocità di convergenza della coda in uno stato “standard”, nel quale i Task con priorità più alta si troveranno genericamente più vicini alla cima della coda di quanto siano i Task a priorità minore.

Definendo il **periodo** come il ciclo completo di esecuzione dei Task che riportano la coda allo stato iniziale, in cui tutti i Task sono stati completati almeno una volta, è possibile ottenere informazioni su quali e quanti Task sono stati eseguiti più o meno spesso.

Prendendo come stato di partenza il 6.3 in figura 6, a completamento del periodo si otterrebbero i seguenti risultati:

Figura - Totale esecuzioni dei Task dallo stato 6.2 della figura 6

* + 1. Comportamento di Task non periodici ad alta priorità

Si può pensare ai Task non periodici o Task immediati come quei compiti chiesti dall’utente in un particolare momento che richiedono una e una sola modifica di uno stato interno, come la pressione di un pulsante e il conseguente cambiamento di un valore in uno o più registri. Come suggerito dal nome e in contrapposizione alla controparte periodica, un Task non periodico non viene reinserito nella coda dopo la sua esecuzione.

Il loro inserimento iniziale nella coda differisce dai Task periodici, in quanto per motivi di reattività dovranno essere inseriti nel punto più alto possibile della coda.

Per motivazioni legate all’implementazione che verranno ulteriormente elaborate nel capitolo 4, si è preferito un inserimento dei Task immediati nella seconda posizione dalla cima della coda.

L’inserimento differisce inoltre per via del numero di altri Task immediati interni alla coda al momento dell’inserimento. Se la coda contiene Task non periodici, l’inserimento di un nuovo Task non periodico dovrà avvenire dopo tutti gli altri Task immediati già presenti, ma comunque prima di tutti quelli periodici.

Come esempio, si consideri la figura 8 e i seguenti stati:

* 8.1: Stato iniziale della coda.
* 8.2: Inserimento nella coda del Task immediato 4 nella posizione occupata dal Task 2.
* 8.3: Esecuzione del Task periodico 1 ad alta priorità e conseguente reinserimento in coda nella posizione occupata dal Task 3.
* 8.4: Esecuzione del Task immediato 4 e conseguente rimozione del medesimo dalla coda.
* 8.5: Inserimento nella coda del Task immediato 5 nella posizione occupata dal Task 1.
* 8.6: Inserimento nella coda del Task immediato 6 nella posizione occupata dal Task 1.



Figura - Inserimento, esecuzione e rimozione di Task non periodici

# **Capitolo 4 – Strategie implementative**

Nel corso di questo capitolo, verranno esaminate le strategie e le tecniche utilizzate per concretizzare i punti delineati in fase di analisi e di progettazione, focalizzandosi sui dettagli di implementazione più rilevanti.

## **4.1 Design pattern**

Con l'aumentare della dimensione e della complessità dei software, emerge la necessità di adottare approcci strutturati ed efficienti per la progettazione e lo sviluppo. Uno di questi è l'utilizzo dei design pattern. Nell’ambito della progettazione di software, un design pattern è una soluzione generale e ripetibile a un problema comune e ricorrente[[23]](#footnote-23), e il loro utilizzo comporta miglioramenti del codice su diversi aspetti[[24]](#footnote-24), tra cui:

* Manutenibilità
* Riusabilità
* Comprensibilità
* Scalabilità

## **4.2 Classe TaskHandler**

La classe *TaskHandler* implementa la coda di priorità discussa nel capitolo 3.4.

Per questa classe si è scelta una struttura minimale con pochi e semplici metodi, dal momento che rappresenta una delle fondamenta di tutto il processo comunicativo ed è estremamente importante che sia il quanto più possibile affidabile.

Al suo interno, sono presenti diversi metodi primitivi, tra cui:

* *get\_high\_priority\_requeuer\_index*: per il recupero dell’indice di inserimento in coda per i Task ad alta priorità.
* *append\_task*: per l’inserimento nella coda dei Task periodici.
* *insert\_task*: per l’inserimento di un generico Task in un preciso punto della coda.
* *requeue\_task*: per il reinserimento nella coda dei Task periodici, con discriminazione in base alla priorità.
* *pop\_task*: per la rimozione del primo Task dalla coda.
* *insert\_immediate\_task*: per l’inserimento di un Task immediato nella coda.

Nell’effettiva implementazione, al momento dell’inizializzazione della coda e dei Task periodici, non si è ricorso al loro inserimento selettivo in punti precisi della coda in base alla priorità. Questo, perché si sfrutta la caratteristica delineata nel capitolo 3.4.1, che permette alla coda di convergere autonomamente a uno stato “standard” indipendentemente dalla situazione di partenza.

### 4.2.1 Gestione dei Task immediati

Come precedentemente anticipato nel capitolo 3.4.2, i Task immediati dovranno essere inseriti nella coda di priorità in una posizione più vicina possibile alla cima. L’inserimento andrà eseguito tenendo conto di tutti gli altri Task non periodici già presenti e in particolare, qualora la coda non sia vuota, senza mai inserire un Task immediato in cima.

La motivazione di questa scelta implementativa è una misura di prevenzione per comportamenti anomali a tempo di esecuzione.

Si consideri lo stato iniziale 9.1 della coda in figura 9, nel quale ha inizio l’esecuzione del Task 1, che occupa la posizione più prioritaria nella coda. Siccome il Task 1 è di tipo periodico, dovrà essere reinserito nella coda al termine della sua esecuzione.

Si consideri ora il caso in cui un Task immediato 3 venga inserito in cima alla coda. Se il Task immediato 3 è stato inserito nel momento nel quale il Task 1 aveva iniziato la sua esecuzione ma non si era ancora concluso, al momento della sua effettiva conclusione verrà rimosso il Task immediato 3 e non il Task 1. Portando dunque alla mancata esecuzione del Task immediato 3 e una doppia esecuzione del Task 1.



Figura - Esempio di anomalia nell'esecuzione di Task immediati

## **4.3 Classe UserInterface e Task**

Al fine di comprendere al meglio il funzionamento delle classi *UserInterface* e *Task* è necessario esaminarle contemporaneamente, in quanto intrinsecamente connesse.

La classe *UserInterface*, è il nucleo di controllo centrale dell’applicazione e si occupa di:

* Recuperare i dati di configurazione.
* Controllare, o generare in caso non esistano, le cartelle e i file relativi al database e agli utenti.
* Istanziare tutti i Task.
* Istanziare tutte le code di priorità inserendo al loro interno i Task opportuni.
* Allocare le varie strutture dati di supporto alle letture dei registri.
* Allocare, e renderizzare tutti i *widget* nella finestra grafica.
* Gestire l’avvio dei thread.
* Regolare e gestire l’esecuzione dei Task della coda.
* Controllare e avviare a richiesta le funzionalità attivabili dall’utente.

Nei controllori logico programmabili, al fine di risparmiare i non abbondanti registri, si sceglie spesso di utilizzare un singolo bit come interruttore di controllo per una funzionalità interna. Questo pone una difficoltà aggiuntiva allo sviluppo, in quanto nell’interfaccia grafica, più *widget* potrebbero dover interrogare lo stesso registro. Conseguentemente, senza una logica efficiente, si occuperebbe ripetutamente il mezzo comunicativo in intervalli di tempo molto ravvicinati, creando rallentamenti generali e interrogando il registro più volte del necessario.

In aggiunta, un ulteriore livello di complessità è dato dal fatto che ogni singolo *widget* deve avere un comportamento unico in base allo stato della comunicazione, e talvolta anche in base al valore ricevuto in fase di comunicazione.

È quindi necessario un meccanismo che consenta di definire comportamenti personalizzati per ciascun *widget*, evitando interrogazioni multiple dello stesso registro per diversi elementi grafici e che sia al contempo modulare e facilmente estensibile.

La soluzione impiegata si sviluppa inizialmente nel costruttore della classe *UserInterface*.

Qui, vengono create nuove strutture dati di supporto che, in aggiunta ai parametri specificati nel capitolo 3.3, verranno fornite ai Task al momento della loro creazione:

* *object\_references*: dizionario di riferimenti ai *widget* che necessitano un aggiornamento, nel quale ogni elemento grafico è identificato da una chiave corrispondente all’indirizzo del registro da cui deve ottenere le informazioni per aggiornarsi.
* *success*: dizionario di funzioni che delineano le azioni da svolgere in caso la comunicazione abbia successo, dove ogni funzione è identificata da una chiave corrispondente al riferimento del widget che dovrà aggiornare.
* *failure*: dizionario di funzioni che delineano le azioni da svolgere in caso di fallimento della comunicazione, dove ogni funzione è identificata da una chiave corrispondente al riferimento del widget che dovrà aggiornare.

Per passare funzioni all’interno dei dizionari *success* e *failure* si sono usati dei riferimenti, e nello specifico è stato utilizzato la funzione *partial[[25]](#footnote-25)* del modulo *functools*.

*Partial* permette di creare nuove funzioni parzialmente complete, ovvero consente di generare riferimenti a funzioni potenzialmente incomplete ma con alcuni argomenti fissati in modo predefinito.

Nel contesto delle componenti grafiche, questa scelta ci consente di distinguere tra azioni predefinite che devono essere eseguite in ogni aggiornamento e altre azioni che dipendono da stati ed eventi che si verificano durante l'esecuzione del programma.

Come esempio, si consideri il semaforo dell’interfaccia “DIAGNOSI I/O #1” presente nella figura 3.

Nel caso in cui la lettura dei dati abbia successo, è necessario assegnare un comportamento specifico per ogni componente del semaforo, ossia le tre luci. A questo scopo è stata usata la funzione della figura 10 *success\_traffic\_light*, che permette di gestire singolarmente tutte e tre le componenti del semaforo senza la necessità di dichiarare una funzione per ognuna.



Figura 10 – Funzione per l’aggiornamento delle luci del semaforo

Definito il comportamento, è possibile inserire all’interno del dizionari *success* e *failure* le componenti grafiche e i loro comportamenti predefiniti.

In figura 10, si mostrano i riferimenti alle funzioni per le componenti del semaforo nel dizionario *success* dell’interfaccia “DIAGNOSI I/O #1”.

A screen shot of a computer program

Description automatically generated

Figura 11 - Dizionario dei comportamenti delineati in caso di successo della comunicazione del semaforo dell'interfaccia "DIAGNOSI I/O #1"

Si noti come il parametro *value* della funzione *success\_traffic\_light* sia stato volutamente omesso nelle definizioni delle funzioni parziali del dizionario *success*, in quanto risultato della comunicazione che avverrà solamente a tempo di esecuzione. Al contrario, nel caso in cui la comunicazione fallisca, il parametro *value* da passare alla specifica funzione parziale del dizionario *failure* sarà uguale a *None* già a “*compile time”*.

Questo tipo di soluzione permette anche di unificare il modo in cui le componenti grafiche vengono aggiornate, perché non sempre i *widget* del *framework* Tkinter utilizzano le stesse modalità di aggiornamento in modo uniforme, come ad esempio la funzione *config* per alcuni elementi grafici e la funzione *configure* per altri. Così facendo, attraverso la separazione delle definizioni dei comportamenti dalla logica di esecuzione, si assicura che il componente responsabile dell'aggiornamento non debba identificare quale metodo utilizzare in base al tipo di *widget* da aggiornare.

Durante l’esecuzione dei compiti, si evidenzia un nuovo problema, legato al fatto che non tutti i Task comunicano allo stesso modo. In altre parole, avendo compiti potenzialmente diversi, potrebbero non usare gli stessi codici funzione Modbus, che in questo contesto applicativo vorrebbe dire dover ricorrere a diverse *API* del modulo MinimalModbus.

Un Task potrebbe infatti dover leggere un registro tramite la funzione *read\_register*, mentre un altro potrebbe dover scrivere un registro tramite la funzione *write\_register*. Similmente, un Task potrebbe dover leggere solo un registro tramite *read\_register*, mentre un altro potrebbe dover leggere più registri per mezzo di *read\_registers*.

Per risolvere questo ulteriore problema si è preso spunto dal pattern *Command*:

“*The Command pattern suggests that GUI objects shouldn’t send […] requests directly. Instead, […] should extract all of the request details, such as the object being called, the name of the method and the list of arguments into a separate command class with a single method that triggers this request.*

*Command objects serve as links between various GUI and business logic objects. From now on, the GUI object doesn’t need to know what business logic object will receive the request and how it’ll be processed. The GUI object just triggers the command, which handles all the details*.”[[26]](#footnote-26)

La classe *Task* si ispira a questo design pattern e implementa l’omonima unità informativa descritta nel capitolo 3.3. Oltre a raccogliere in un unico oggetto tutte le informazioni relative a una trasmissione, implementa anche il metodo “*trigger*” descritto dal pattern *Command* per azionare l’evento di comunicazione stesso, ovvero il metodo *communicate*.

Tuttavia, va notato che internamente alla classe Task non è presente una definizione esplicita per un metodo di nome “*communicate”* secondo la sintassi standard del linguaggio Python, bensì viene dinamicamente generato all’interno del costruttore della classe. In particolare, il *function code* e *register count* passati al costruttore della classe Task, verranno utilizzati come parametro per distinguere il compito della funzione *communicate*.

Per conseguire questo obiettivo è stata usata la funzione *built-in* *setattr*, la quale consente la creazione, o la modifica degli attributi di un oggetto dopo la sua creazione*[[27]](#footnote-27)*.

In altre parole, questo ci consente di generare dinamicamente un attributo che referenzi un una precisa funzione, il tutto a tempo di esecuzione.

Per ottenere una comprensione più dettagliata di questo concetto, si consideri l’esempio applicativo in figura 12:



Figura - Creazione dinamica del metodo “communicate” in base alle esigenze comunicative del Task

In questo esempio, il primo match-case utilizza la funzione del protocollo Modbus dal *function code* 3 “*Read Holding Registers”*, che indica una lettura di registri interni[[28]](#footnote-28).

Il successivo *statement* *if-else* discrimina i casi in cui il numero di registri da leggere sia uno o più di uno. Stabilita la funzione Modbus e il numero di registri da leggere si può procedere con la generazione del metodo *communicate*, dove:

* *Setattr* imposta l'attributo *communicate* dell'oggetto corrente (*self*) come un nuovo metodo.
* Il metodo sarà creato attraverso l’incapsulamento di una *lambda function*, ovvero una funzione anonima[[29]](#footnote-29), in un oggetto di tipo metodo. Al suo interno, si verifica l’effettiva chiamata all’*API* del modulo MinimalModbus con i relativi parametri.

Questo approccio, permette di risolvere un’altra problematica architetturale riguardante lo slave *Stepper*, il quale indirizza i suoi registri partendo da 0 e non da 1 come tutti gli altri, tramite la creazione di uno specifico metodo *communicate* con un offset specializzato per i suoi Task.

A questo punto, lo step rimanente consiste nell’aggiornare le componenti grafiche, e per farlo è necessario fornire le strutture dati di riferimento *object\_references*, *success*, e *failure* generate nel costruttore della classe *UserInterface*, ai vari Task.

La funzione *update\_objects* della classe *Task* si occupa dell’aggiornamento delle componenti grafiche legate a una comunicazione, eseguendo opportunamente le funzioni dei dizionari *success* e *failure* in base all’esito della trasmissione. Durante l’esecuzione di *update\_objects*, è necessario distinguere i registri che richiedono l’aggiornamento di una sola componente grafica rispetto a quelli che ne richiedono più di una. Una soluzione consiste nell’aggregare tutti gli oggetti di un registro che richiede l’aggiornamento di più componenti all’interno di una lista, come ad nell’esempio in figura 13.



Figura - Widget da aggiornare per mezzo delle informazioni provenienti dal registro 1801 del Drive 1

All’interno della funzione *update\_objects* si verificherà la presenza di questa lista, e in tal caso, verranno invocate le opportune funzioni per tutti gli oggetti al suo interno, come illustrato nella figura 14.



Figura – Gestione dell’aggiornamento dei widget della funzione update\_objects

Riassumendo, questo approccio permette alla classe *UserInterface* di non preoccuparsi di che tipo di comunicazione è assegnata a un determinato Task, bensì solamente del suo avvio.

Nel capitolo 5 riguardante l’ottimizzazione, si analizzerà come inserire controlli periodici per nuovi registri.

# IMPLEMENTAZIONE

- [ ] "uniformazione" delle azioni -> communicate(), pattern COMMAND

- [ ] Translator - static vs active translation

- [ ] Modularizzazione elementi -> rendere più facile inserire nuovi componenti e delineare i loro comportamenti

- [ ] Migliorare interfaccia utente: rendere per quanto possibile le pagine più intuitive + estendere funzionalità preesistenti

- [ ] Gestione registri che non possono essere letti -> sweep e mapping

# OTTIMIZZAZIONE

- [ ] Leggere e scrivere più gruppi di registri contemporaneamente

- [ ] No asincronia -> mezzo comunicativo half-duplex

- [ ] Minimizzare i tempi "morti" -> skip task e minimizzare timeout

- [ ] Multi-threading per gestire l'aggiornamento di molti componenti grafici a schermo

- [ ] Ottimizzazione delle risorse richieste a runtime ->

preferenza a precaricare tutte le strutture dati e usarle immediatamente quando necessario

- [ ] Creare comportamenti selettivi per ogni tab del notebook per evitare di effettuare compiti non necessari

- [ ] Se uno slave non risponde -> saltare al prossimo task e saltare ogni task di quello slave fino a che non si ritorna al primo fallito

IMPOSSIBILE EFFETTUARE ASINCRONIA (IMPLEMENTAZIONE O PROGETTO OD OTTIMIZZAZIONE?)

PUNTATORI: FONDO DELLA CODA? + indice di accodamento per task ad alta priorità

TASK SINGOLI NON PERIODICI CHE DEVONO ESSERE ESEGUITI UNO DIETRO L’ALTRO PER EVITARE PROBLEMI DI AGGIORNAMENTO

GESTIONE DEGLI ERRORI: MANCATA RISPOSTA DI UNO SLAVE (SKIP TASK) -> MAGARI DA METTERE NELL’IMPLEMENTAZIONE

VELOCITà TRASMISSIVE DIVERSE + REGISTRI NON INTERROGABILI

INSERIRE NELLA BIBLIOGRAFIA GLI AUTORI COMPLETI PER Design Patterns: Elements of Reusable Object-Oriented Software

1. What is an HMI, Copadata, consultato il 10 Settembre 2023, <https://www.copadata.com/en/product/zenon-software-platform-for-industrial-automation-energy-automation/visualization-control/what-is-hmi/> [↑](#footnote-ref-1)
2. Automazione Industriale, Treccani, consultato il 9 Settembre 2023, <https://www.treccani.it/enciclopedia/automazione-industriale_%28Enciclopedia-Italiana%29/> [↑](#footnote-ref-2)
3. ISO/IEC 7498-1:1994, Information technology – Open Systems Interconnection – Basic Reference Model: The Basic Model, 7.7 Physical Layer [↑](#footnote-ref-3)
4. The RS-485 Design Guide, TI, consultato il 10 Settembre 2023, pagina 1-2, <https://www.ti.com/lit/an/slla272d/slla272d.pdf> [↑](#footnote-ref-4)
5. Protocollo Modbus su RS485 – Introduzione, Overdigit, consultato il 9 settembre 2023, pagina 3, <https://www.overdigit.com/data/Blog/RS485-Modbus/Protocollo%20Modbus%20su%20RS485.pdf> [↑](#footnote-ref-5)
6. What is the OSI Model?, Forcepoint, consultato il 9 Settembre 2023,   
   <https://www.forcepoint.com/cyber-edu/osi-model> [↑](#footnote-ref-6)
7. Introduction to Modbus Serial and Modbus TCP, Ccontrols, consultato il 10 Settembre 2023, pagina 1, <https://www.ccontrols.com/pdf/Extv9n5.pdf> [↑](#footnote-ref-7)
8. Unità informativa del livello 2 dello stack ISO/OSI. [↑](#footnote-ref-8)
9. Modbus RTU communication guide, Virtual-serial-port, consultato il 10 settembre 2023, <https://www.virtual-serial-port.org/articles/modbus-rtu-guide/> [↑](#footnote-ref-9)
10. Modbus Networking Guide, libelium, consultato il 10 settembre 2023, <https://development.libelium.com/modbus_networking_guide/introduction> [↑](#footnote-ref-10)
11. Unidrive M700 / M701 / M702 Guida dell'utente al controllo Versione numero: 2, 9.1.5 Codifica dei dati, pagina 122, consultato il 12 settembre 2023 [↑](#footnote-ref-11)
12. Polling (computer science), Wikipedia, consultato il 29 settembre 2023, <https://en.wikipedia.org/wiki/Polling_(computer_science)> [↑](#footnote-ref-12)
13. Polling, Teach-ict, consultato il 30 settembre 2023,

    <https://teach-ict.com/2016/A_Level_Computing/OCR_H446/1_2_software/121_operating_systems/interrupts/miniweb/pg2.php> [↑](#footnote-ref-13)
14. Programming Microsoft Visual Basic 6, Chapter 6 – Classes and Objects, Visualbasicbooks, consultato il 25 settembre 2023, <https://www.visualbasicbooks.com/progVB6samplepg1.html> [↑](#footnote-ref-14)
15. Object-oriented programming [↑](#footnote-ref-15)
16. MinimalModbus, Github, consultato il 3 ottobre 2023, <https://github.com/pyhys/minimalmodbus> [↑](#footnote-ref-16)
17. Features, MinimalModbus, consultato il 3 ottobre 2023, <https://minimalmodbus.readthedocs.io/en/stable/readme.html> [↑](#footnote-ref-17)
18. Application Program Interface [↑](#footnote-ref-18)
19. Apache License, Version 2.0, Apache, consultato il 3 ottobre 2023, <https://www.apache.org/licenses/LICENSE-2.0> [↑](#footnote-ref-19)
20. Tcl/Tk License Terms, Tcl.tk, consultato il 4 ottobre 2023,

    <https://www.tcl.tk/software/tcltk/license.html> [↑](#footnote-ref-20)
21. Commander SK Advanced User Guide – Issue Number: 8, consultato il 5 ottobre 2023, <https://www.nidec-netherlands.nl/media/2125-frequentieregelaars-commander-sk-advanced-user-guide-en-iss10-0472-0001-10.pdf> [↑](#footnote-ref-21)
22. Unidrive M700 / M701 / M702 Guida dell'utente al controllo Versione numero: 2, 9.1.5 Codifica dei dati, pagina 121 [↑](#footnote-ref-22)
23. Design Patterns, Sourcemaking, consultato il 4 ottobre 2023, <https://sourcemaking.com/design_patterns> [↑](#footnote-ref-23)
24. Introduction to Design Patterns in Software Development, Stackify, consultato il 4 ottobre 2023, <https://stackify.com/introduction-to-design-patterns-in-software-development> [↑](#footnote-ref-24)
25. functools — Higher-order functions and operations on callable objects, Python Docs, consultato il 9 ottobre 2023, <https://docs.python.org/3/library/functools.html> [↑](#footnote-ref-25)
26. Command, Refactoring Guru, consultato il 5 ottobre 2023,

    <https://refactoring.guru/design-patterns/command> [↑](#footnote-ref-26)
27. Built-in Functions, Python Docs, consultato il 7 ottobre 2023, <https://docs.python.org/3/library/functions.html#setattr> [↑](#footnote-ref-27)
28. Modbus Functions, Schneider Electric, consultato il 9 ottobre 2023,

    <https://product-help.schneider-electric.com/ED/ES_Power/NT-NW_Modbus_IEC_Guide/EDMS/DOCA0054EN/DOCA0054xx/Master_NS_Modbus_Protocol/Master_NS_Modbus_Protocol-4.htm> [↑](#footnote-ref-28)
29. Lambdas, Python Docs, consultato il 9 ottobre 2023, <https://docs.python.org/3/reference/expressions.html#grammar-token-python-grammar-lambda_expr> [↑](#footnote-ref-29)