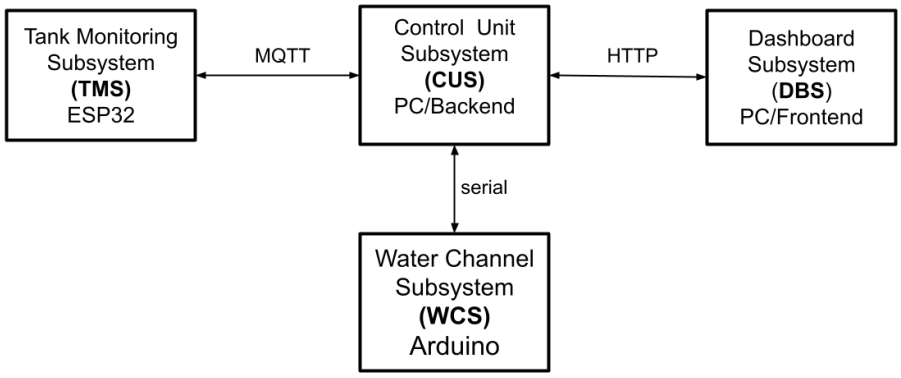
Alma Mater Studiorum · Università di Bologna

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA E SCIENZE INFORMATICHE
A.A. 2025/26

Assignment #03 - Smart Tank Monitoring System

Relazione per il corso di Sistemi Embedded e IoT



Bartocetti Enrico, matr. 0001115097

Indice

Capitolo 1

Traccia

1.1 Componenti

Il sistema è composto da quattro sottosistemi:

- **Tank Monitoring Subsystem** - `TMS`
  - Basato su sistema embedded **ESP** per monitorare il livello dell'acqua piovana nel serbatoio.
  - Interagisce con il Control Unit Subsystem (CUS) via **MQTT**.
- **Control Unit Subsystem** - `CUS`
  - **Back-end** eseguito su PC.
  - È il sottosistema principale che governa e **coordina l'intero sistema**.
  - Interagisce via **MQTT** con il TMS.
  - Interagisce tramite linea **seriale** con il Water Channels Subsystem (WCS).
  - Interagisce via **HTTP** con il Dashboard Subsystem (DBS).
- **Water Channel Subsystem** - `WCS`
  - Basato su **Arduino**.
  - Sistema embedded che controlla il canale di scolo che collega il serbatoio alla rete idrica.
  - Interagisce via **seriale** con il CUS.
  - Fornisce un pannello per l'**interazione in loco** degli operatori umani.
- **Dashboard Subsystem** - `DBS`
  - **Frontend / Web app** eseguita su PC o qualsiasi dispositivo.
  - Interfaccia per **operatori remoti** per visualizzare i dati e interagire con il sistema via **HTTP** con il CUS.

1.2 Comportamento

Il sistema monitora il livello dell'acqua piovana nel serbatoio e controlla l'apertura di un canale di scolo.
Opera in due modalità: **AUTOMATICA** (default all'avvio) o **MANUALE**.

1.2.1 Dettagli Operativi

- **TMS**: Monitora costantemente il livello dell'acqua tramite il sonar
  - Campiona i dati a una frequenza F e li invia al CUS.
  - LED: Verde acceso / Rosso spento se il sistema è online; Verde spento / Rosso acceso in caso di problemi di rete.
- **WCS**: Controlla una valvola motorizzata
  - Apertura: Da 0% (0°) a 100% (90°).
  - Interazione: Un pulsante commuta tra modalità AUTOMATICA e MANUALE. In modalità manuale, l'apertura è regolata dal potenziometro.
  - LCD: Visualizza il livello di apertura attuale e la modalità corrente (`AUTOMATIC`, `MANUAL` o `UNCONNECTED`).
- **CUS**: Gestisce la logica di controllo
  - Se il livello supera $L1$ (ma $< L2$) per un tempo $> T1$, la valvola si apre al 50% finché il livello non scende sotto $L1$.
  - Se il livello supera $L2$, la valvola si apre immediatamente al 100% finché il valore non scende sotto $L2$.
  - Se non riceve dati dal TMS per un tempo $> T2$, entra nello stato `UNCONNECTED`.
- **DBS**: Dashboard di visualizzazione che include
  - Grafico del livello dell'acqua (ultime N misurazioni).
  - Percentuale di apertura della valvola e stato del sistema (`MANUAL`, `AUTOMATIC`, `UNCONNECTED` o `NOT AVAILABLE` se il CUS non è raggiungibile).
  - Controlli GUI per cambiare modalità e regolare l'apertura (in `MANUAL`).

Capitolo 2

Progettazione dei Sottosistemi

2.1 TMS - Tank Monitoring Subsystem

2.1.1 Hardware

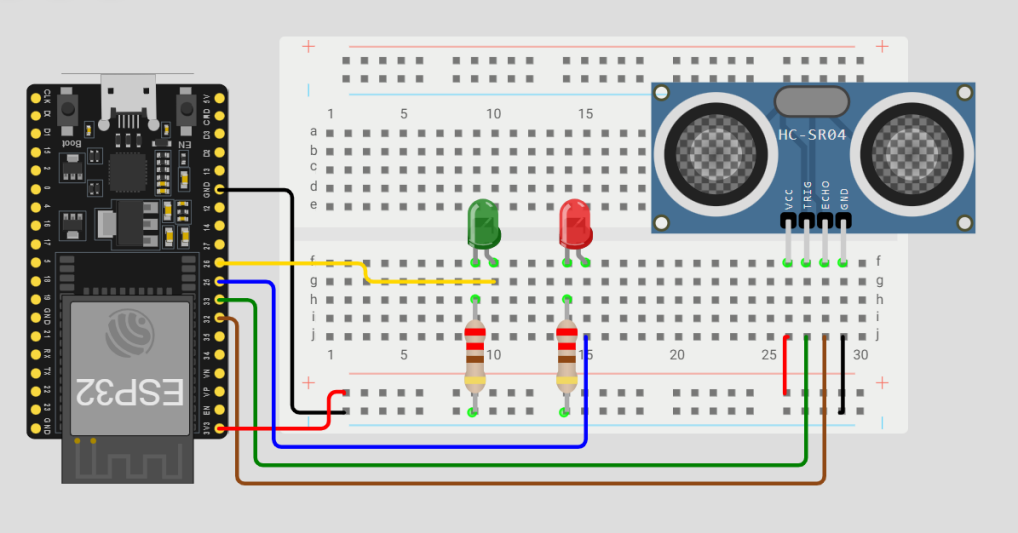


Figura 2.1: Rappresentazione schematica dell'hardware del TMS

Lato hardware sono stati utilizzati i seguenti componenti:

- SoC: ESP32
- Sensore livello acqua: Sonar HC-SR04
- LED verde e rosso

Nel circuito reale è stato utilizzato anche un Logic Level Converter per convertire il livello logico dell'ESP32 di 3.3V con quello del sensore di 5V, permettendo di alimentare il sensore con la tensione da lui richiesta.
Per l'elenco esaustivo dei pin utilizzati vedi Tabella A.1.

2.1.2 Software

Lato software l'architettura del TMS è basata su delle **task**, eseguite dal sistema operativo dell'ESP32.

Ogni task è basata su una **macchina a stati finiti** (FSM) (vedi schema in Fig. 2.2 a Pag. 7), da eseguire ogni certo periodo di tempo (vedi Tabella A.3) rendendole quindi **sincrone**. La comunicazione tra task avviene grazie a una struttura dati condivisa (la classe `SharedData`).

L'esecuzione periodica delle task avviene nella seguente maniera:

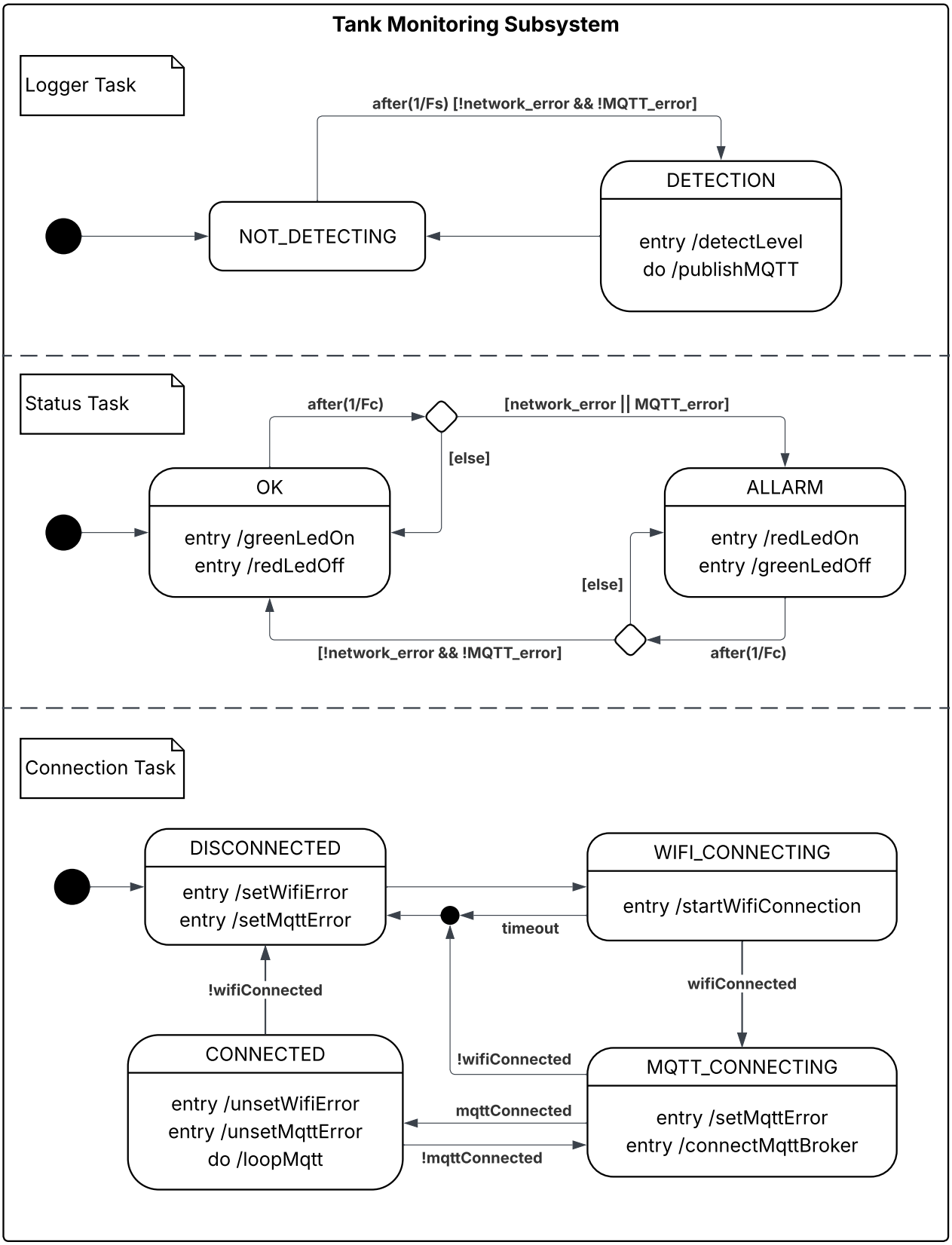
1. All'oggetto `Scheduler` viene passata la **task da eseguire** con il relativo **periodo**
2. Lo scheduler crea un oggetto `TaskExecutor`, contenente la task da eseguire, il periodo e la struttura dati condivisa
3. Tramite la **chiamata al sistema operativo** `xTaskCreatePinnedToCore` lo scheduler **mette in esecuzione** il metodo statico `execute` del TaskExecutor, passando come parametro l'oggetto `TaskExecutor` creato precedentemente
4. Il metodo execute esegue il metodo `init` della Task associata
5. Entra successivamente in un **ciclo infinito** in cui a ogni iterazione viene prima eseguito il metodo `tick` della Task, poi messa in pausa l'esecuzione sfruttando la primitiva `vTaskDelayUntil` di FreeRTOS per il periodo di tempo scelto

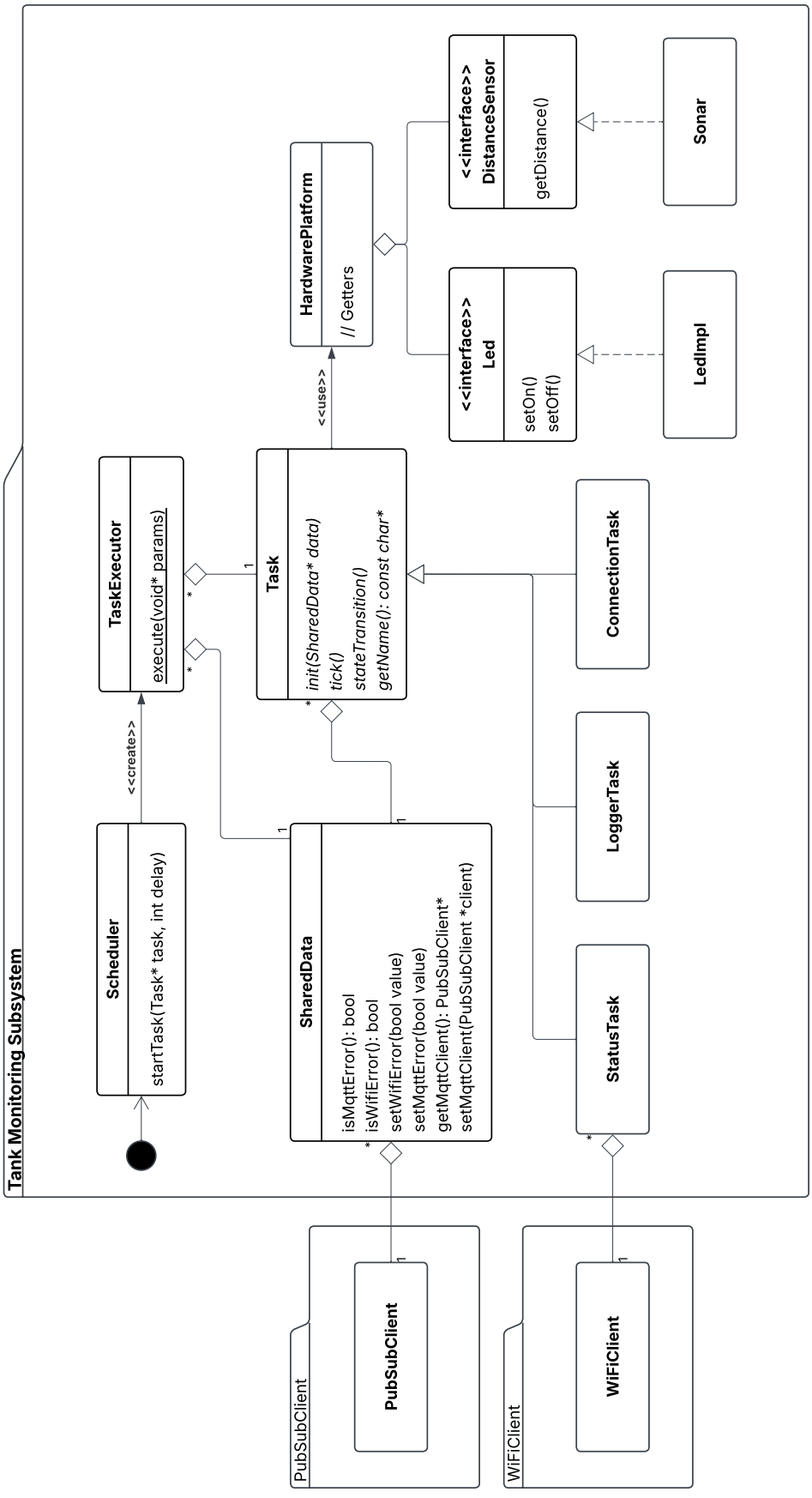
Le classi sono descritte nel diagramma delle classi Fig. 2.3, Pag. 8.

La comunicazione dei dati rilevati al CUS avviene tramite protocollo **MQTT**, pubblicando la lettura nel topic `water_level` (spiegazione dettagliata nella Sezione 3.3).

Breve descrizione delle task:

- **LoggerTask:** In assenza di errori di rete, esegue la lettura per poi pubblicarla tramite MQTT.
- **StatusTask:** Accende e spegne i LED di stato, verde in caso di connessione corretta e rosso in caso di problemi.
- **ConnectionTask:** Controlla che le connessioni WiFi e MQTT siano funzionanti, tentando di riconnettersi in caso di problemi.


Tank Monitoring Subsystem
Logger Task
after(1/Fs) [!network_error && !MQTT_error]
DETECTION
entry /detectLevel
do /publishMQTT
NOT_DETECTING
Status Task
after(1/Fc)
[network_error || MQTT_error]
[else]
OK
entry /greenLedOn
entry /redLedOff
ALLARM
entry /redLedOn
entry /greenLedOff
[else]
[!network_error && !MQTT_error]
after(1/Fc)
Connection Task
DISCONNECTED
entry /setWifiError
entry /setMqttError
WIFI_CONNECTING
entry /startWifiConnection
timeout
!wifiConnected
wifiConnected
CONNECTED
entry /unsetWifiError
entry /unsetMqttError
do /loopMqtt
!wifiConnected
MQTT_CONNECTING
entry /setMqttError
entry /connectMqttBroker
mqttConnected
!mqttConnected


Tank Monitoring Subsystem
Scheduler
startTask(Task* task, int delay)
<<create>>
TaskExecutor
execute(void* params)
Task
init(SharedData* data)
tick()
stateTransition()
getName(): const char*
<<use>>
HardwarePlatform
// Getters
<<interface>>
DistanceSensor
getDistance()
Sonar
<<interface>>
Led
setOn()
setOff()
LedImpl
SharedData
isMqttError(): bool
isWifiError(): bool
setWifiError(bool value)
setMqttError(bool value)
getMqttClient(): PubSubClient*
setMqttClient(PubSubClient *client)
ConnectionTask
LoggerTask
StatusTask
PubSubClient
PubSubClient
WiFiClient
WiFiClient

2.2 CUS - Control Unit Subsystem

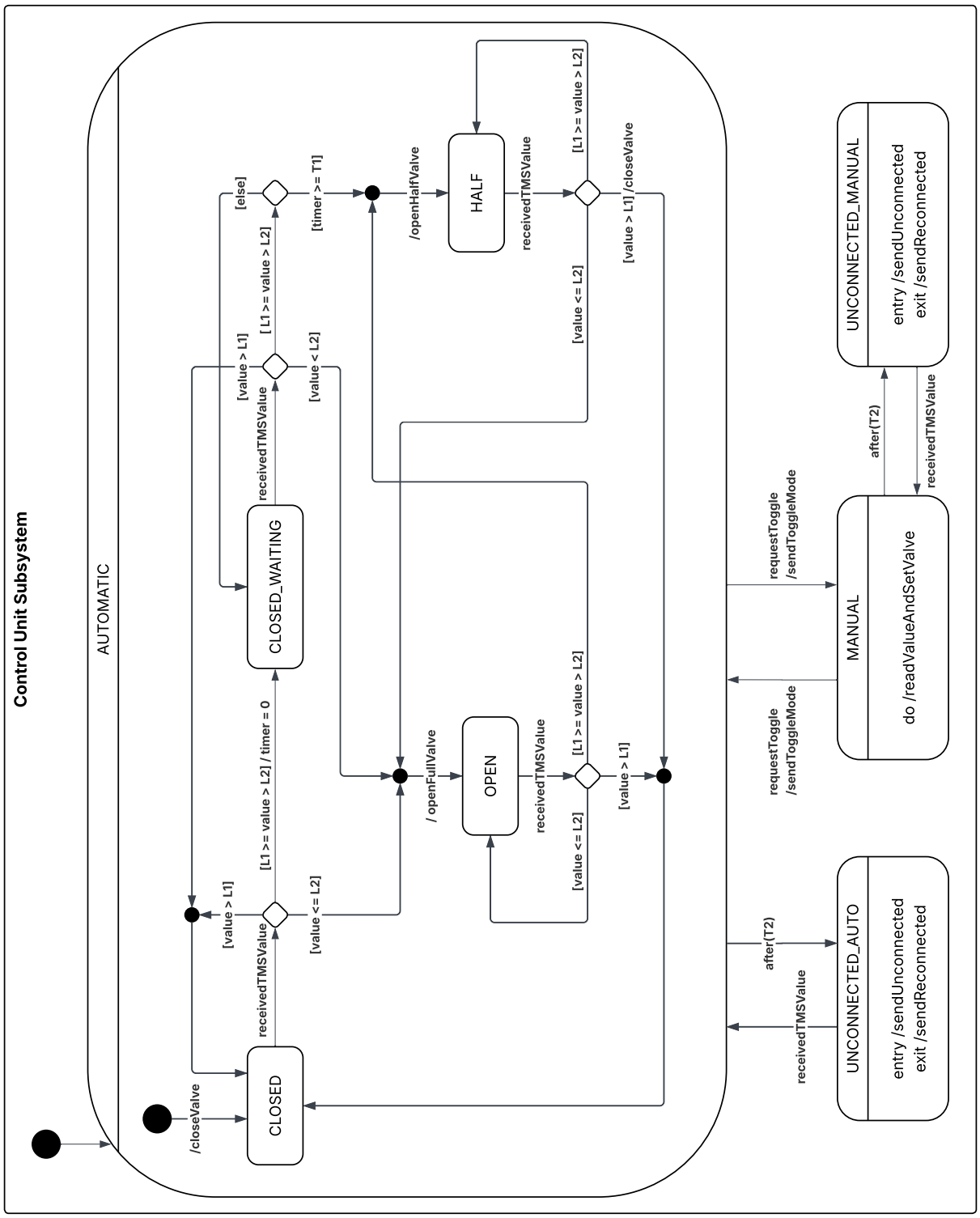
Il CUS è il cuore del sistema: per questo necessita di avere una propria rappresentazione interna dello stato complessivo, descritto nel diagramma degli stati in Fig. 2.4 a Pag. 10. I valori dei parametri utilizzati nel diagramma degli stati sono specificati nell'Appendice A.3.

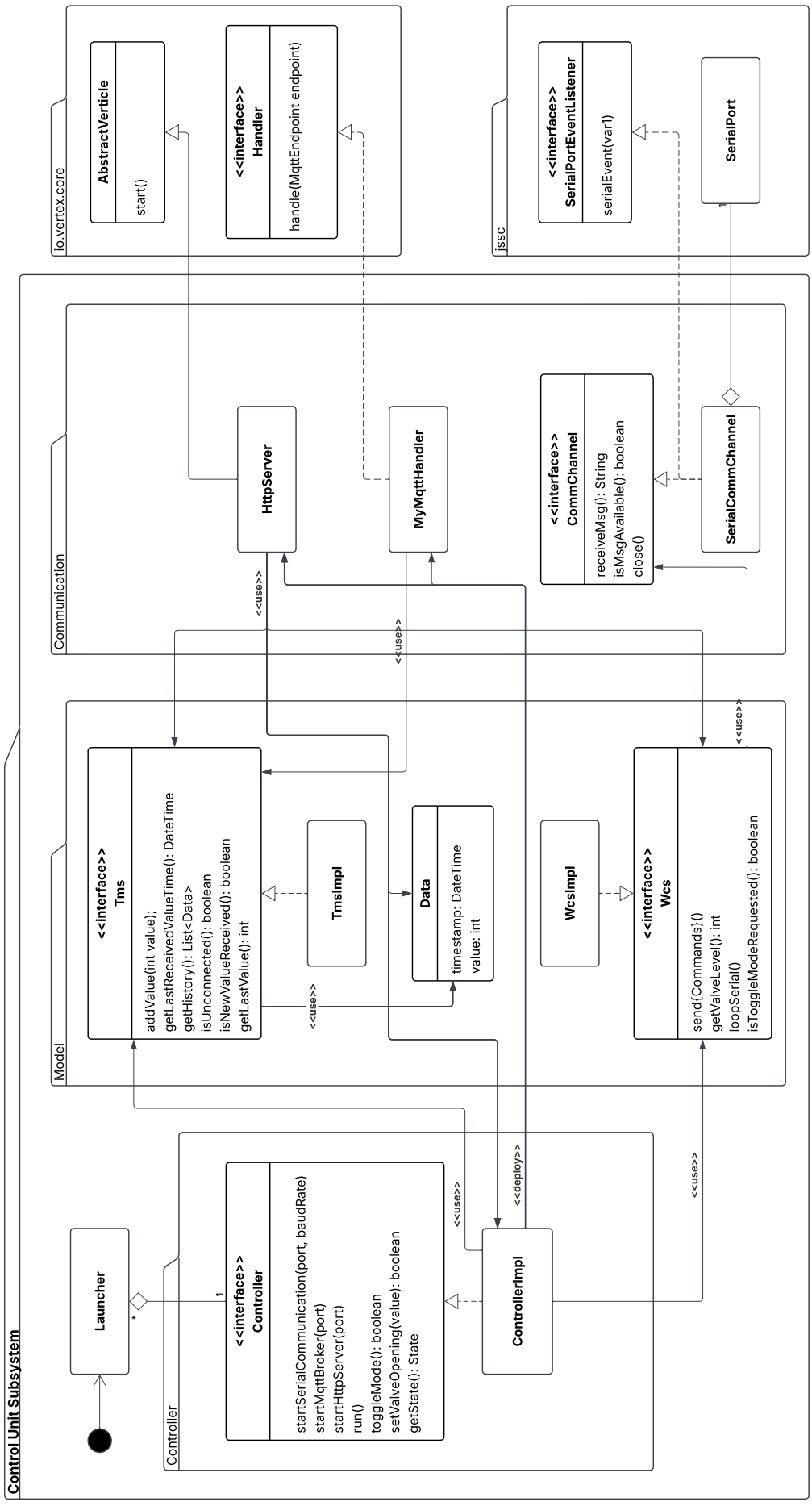
È un **processo server** che controlla e mette in comunicazione i vari sottosistemi, realizzato utilizzando il linguaggio `Java` e sfruttando `Gradle` per la compilazione. Per i server HTTP e MQTT è stata sfruttata la libreria `VertX`, specificando le azioni da eseguire per ogni evento da gestire, mentre per la comunicazione seriale viene utilizzata la libreria `jssc`. Si riporta il diagramma delle classi in Fig. 2.5 a Pag. 11.

Nello specifico:

- **Memorizza** i dati ricevuti dal TMS via **MQTT**, controllando che non passi troppo tempo dall'ultima comunicazione (entrando altrimenti nello stato `UNCONNECTED`).
- **Risponde** alle richieste **HTTP** create dal DBS (descritte nella Sezione 3.2):
  - Restituisce le ultime N letture del TMS
  - Restituisce lo stato del sistema e il livello di apertura della valvola
  - Cambia la modalità tra `AUTOMATIC` e `MANUAL`
  - Se in manuale, imposta l'apertura della valvola sulla base del parametro comunicato
- Quando in modalità automatica, **comunica** al WCS tramite seriale il **livello di apertura della valvola** sulla base delle letture inviate dal TMS.
- Quando in modalità manuale, riceve tramite seriale il livello di apertura corrente della valvola (sia che sia stato impostato tramite potenziometro, sia che sia stato impostato tramite seriale).

All'avvio dell'app verranno richiesti all'utente di indicare tutti i parametri di connessione, ovvero porta seriale e velocità in baud del WCS, porta del server HTTP e porta del broker MQTT.


Control Unit Subsystem
AUTOMATIC
/closeValve
CLOSED
receivedTMSValue
[value > L1]
[value <= L2]
[L1 >= value > L2] / timer = 0
CLOSED_WAITING
receivedTMSValue
[value > L1]
[L1 >= value > L2]
[value < L2]
[else]
[timer >= T1]
/openHalfValve
HALF
receivedTMSValue
[L1 >= value > L2]
[value <= L2]
[value > L1]/closeValve
/ openFullValve
OPEN
receivedTMSValue
[L1 >= value > L2]
[value <= L2]
[value > L1]
requestToggle
/sendToggleMode
requestToggle
/sendToggleMode
after(T2)
receivedTMSValue
UNCONNECTED_AUTO
entry /sendUnconnected
exit /sendReconnected
MANUAL
do /readValueAndSetValve
after(T2)
receivedTMSValue
UNCONNECTED_MANUAL
entry /sendUnconnected
exit /sendReconnected


Control Unit Subsystem
io.vertex.core
AbstractVerticle
start()
<<interface>>
Handler
handle(MqttEndpoint endpoint)
jssc
<<interface>>
SerialPortEventListener
serialEvent(var1)
SerialPort
Communication
HttpServer
MyMqttHandler
<<interface>>
CommChannel
receiveMsg(): String
isMsgAvailable(): boolean
close()
SerialCommChannel
<<use>>
Model
<<interface>>
Tms
addValue(int value);
getLastReceivedValueTime(): DateTime
getHistory(): List<Data>
isUnconnected(): boolean
isNewValueReceived(): boolean
getLastValue(): int
TmsImpl
Data
timestamp: DateTime
value: int
WcsImpl
<<interface>>
Wcs
send{Commands}()
getValveLevel(): int
loopSerial()
isToggleModeRequested(): boolean
Controller
Launcher
1
*
<<interface>>
Controller
startSerialCommunication(port, baudRate)
startMqttBroker(port)
startHttpServer(port)
run()
toggleMode(): boolean
setValveOpening(value): boolean
getState(): State
ControllerImpl
<<deploy>>

2.3 WCS - Water Channel Subsystem

2.3.1 Hardware

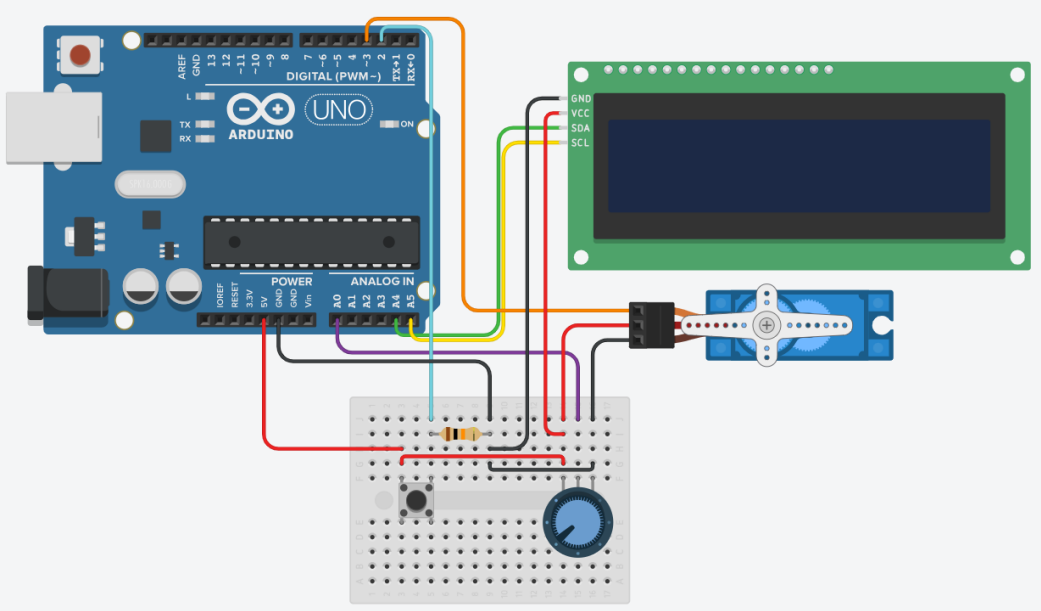


Figura 2.6: Rappresentazione schematica dell'hardware del WCS

Lato hardware sono stati utilizzati i seguenti componenti:

- Microcontrollore: Arduino Uno
- Display: LCD con interfaccia I2C
- Servomotore: Microservo SG90
- Selettore apertura valvola: Potenziometro analogico
- Switch tra modalità: Pulsante tattile

Per l'elenco esaustivo dei pin utilizzati vedi Tabella A.2.

2.3.2 Software

Come per il TMS, l'architettura del WCS è basata su delle **task**: l'Arduino non è però dotato di un sistema operativo, rendendo quindi necessaria l'implementazione di uno **scheduler** cooperativo, basato in questo caso sul Timer2 del microcontrollore.

Data la semplicità di questo sottosistema, è stata sviluppata una sola task basata su una **macchina a stati finiti sincrona** (FSM), di cui si riporta lo schema in Fig. 2.7 a Pag. 14.

In questo caso è importante che il **periodo della task** legato alla lettura del pulsante di cambio modalità non sia superiore al **MEST** per non perdere la pressione dello stesso.

Lo scheduler ogni 50ms controlla se è passato abbastanza tempo per eseguire una task, e in caso affermativo la esegue. Durante questi 50ms l'arduino viene posto in **sleep mode** di tipo IDLE, e viene risvegliato tramite il Timer2. La scelta della sleep mode è ricaduta sulla IDLE così che non vengano persi eventuali comandi ricevuti sulla seriale.

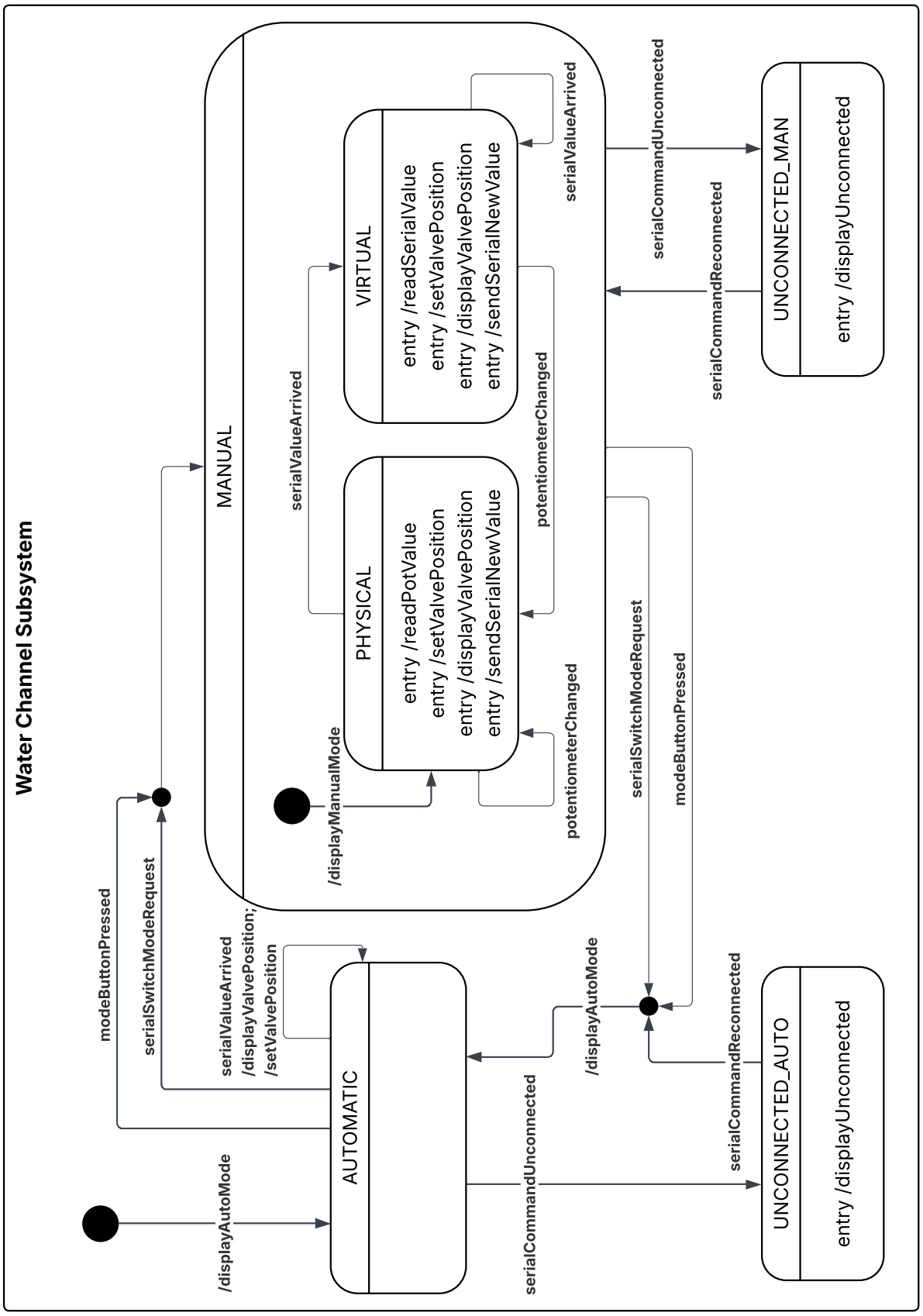
Si riporta il diagramma delle classi dell'**architettura software** in Fig. 2.8 a Pag. 15.

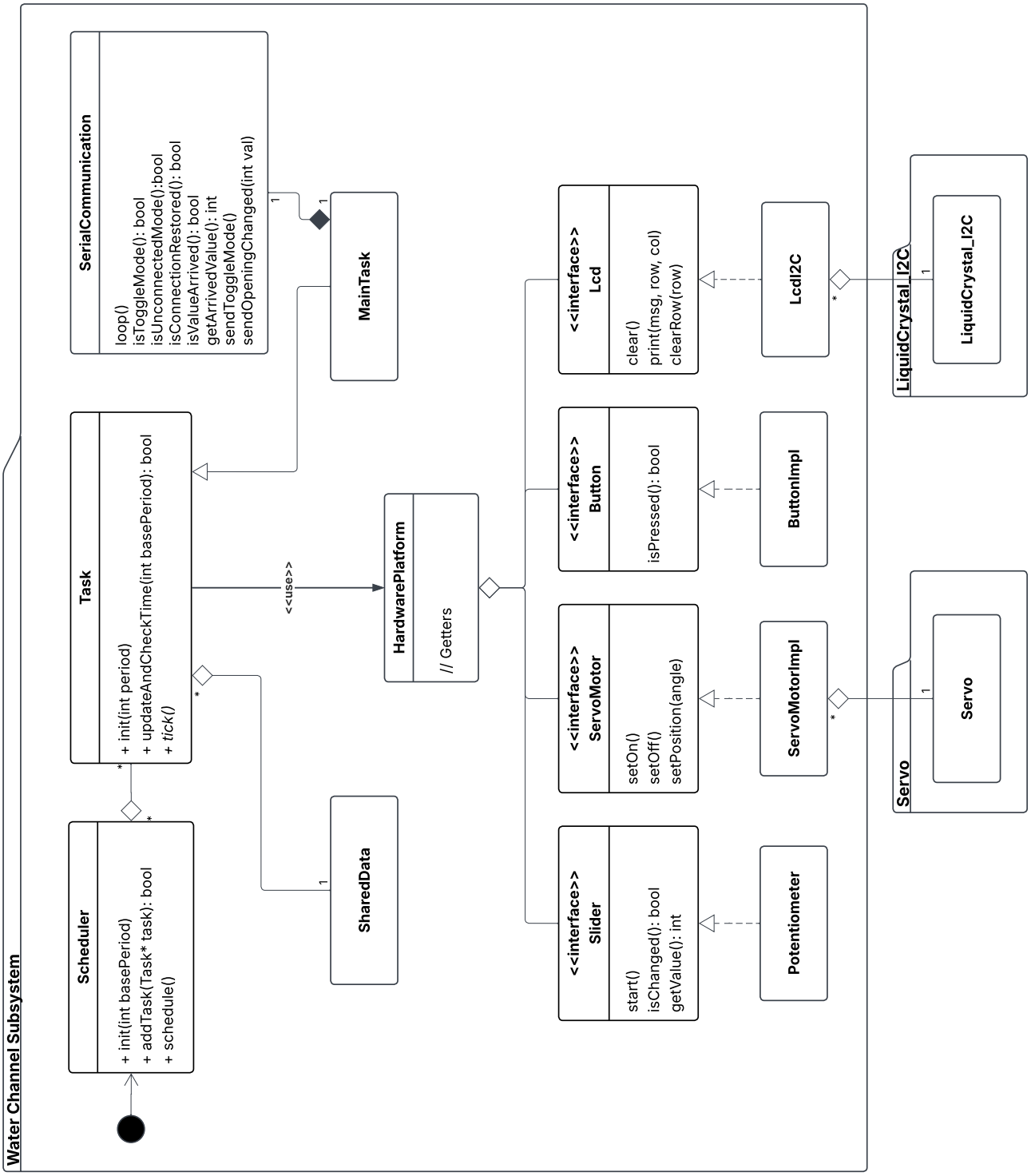
La comunicazione con il CUS avviene tramite **porta seriale**, seguendo il protocollo indicato nella Sezione 3.1.

Nello specifico:

- All'accensione il sistema entra nello stato `AUTOMATIC`, aspettando un **valore di apertura** sulla linea **seriale**.
- Controlla se viene **premuto il pulsante** per il **cambio modalità** o se viene ricevuto il corrispondente **comando seriale**, permettendo di passare tra `AUTOMATIC` e `MANUAL`.
- Quando in `MANUAL` **imposta la valvola** sul valore scelto tramite **potenziometro** o comunicato tramite **seriale**: in entrambi i casi viene comunicato al CUS il livello di apertura corrente.
- Entra nello stato `UNCONNECTED` se richiesto dal CUS, ritornando allo stato precedente al ripristino della connesione

Dato che il sistema è dotato di una sua logica, anche in **assenza di connessione seriale** al server CUS, un operatore fisico può impostare la modalità manuale e regolare l'apertura della valvola tramite potenziometro.


Water Channel Subsystem
MANUAL
VIRTUAL
entry /readSerialValue
entry /setValvePosition
entry /displayValvePosition
entry /sendSerialNewValue
PHYSICAL
entry /readPotValue
entry /setValvePosition
entry /displayValvePosition
entry /sendSerialNewValue
/displayManualMode
serialValueArrived
potentiometerChanged
serialValueArrived
potentiometerChanged
serialCommandUnconnected
serialCommandReconnected
UNCONNECTED_MAN
entry /displayUnconnected
serialSwitchModeRequest
modeButtonPressed
/displayAutoMode
AUTOMATIC
serialValueArrived
/displayValvePosition;
/setValvePosition
modeButtonPressed
serialSwitchModeRequest
/displayAutoMode
serialCommandUnconnected
serialCommandReconnected
UNCONNECTED_AUTO
entry /displayUnconnected


Water Channel Subsystem
SerialCommunication
loop()
isToggleMode(): bool
isUnconnectedMode():bool
isConnectionRestored(): bool
isValueArrived(): bool
getArrivedValue(): int
sendToggleMode()
sendOpeningChanged(int val)
MainTask
Task
+ init(int period)
+ updateAndCheckTime(int basePeriod): bool
+ tick()
<<use>>
HardwarePlatform
// Getters
Scheduler
+ init(int basePeriod)
+ addTask(Task* task): bool
+ schedule()
SharedData
<<interface>>
Lcd
clear()
print(msg, row, col)
clearRow(row)
<<interface>>
Button
isPressed(): bool
<<interface>>
ServoMotor
setOn()
setOff()
setPosition(angle)
<<interface>>
Slider
start()
isChanged(): bool
getValue(): int
LcdI2C
ButtonImpl
ServoMotorImpl
Potentiometer
LiquidCrystal_I2C
LiquidCrystal_I2C
Servo
Servo

2.4 DBS - Dashboard Subsystem

La dashboard è stata realizzata tramite una **pagina HTML**, utilizzando il framework **bootstrap** per lo stile, la libreria **Chart.js** per la visualizzazione dello storico delle letture e il linguaggio **JavaScript (API Fetch)** per la comunicazione in HTTP con il CUS (protocollo descritto nella Sezione 3.2).

All'apertura è richiesto l'indirizzo del server su cui sono messe a disposizione le API HTTP; è comunque possibile cambiarlo in qualsiasi momento tramite l'apposito pulsante.

Tutti i dati visualizzati vengono aggiornati a intervalli regolari tramite nuove richieste HTTP al CUS.

La dashboard è comoposta da due sezioni:

- **Distanza dall'acqua**: Riporta il grafico con le ultime letture del TMS
- **Pannello di controllo**:
  - Stato attuale del sistema (modalità e livello di apertura della valvola)
  - Comando per passare tra modalità `AUTOMATIC` e `MANUAL`
  - Se in `MANUAL`, slider per impostare manualmente l'apertura della valvola

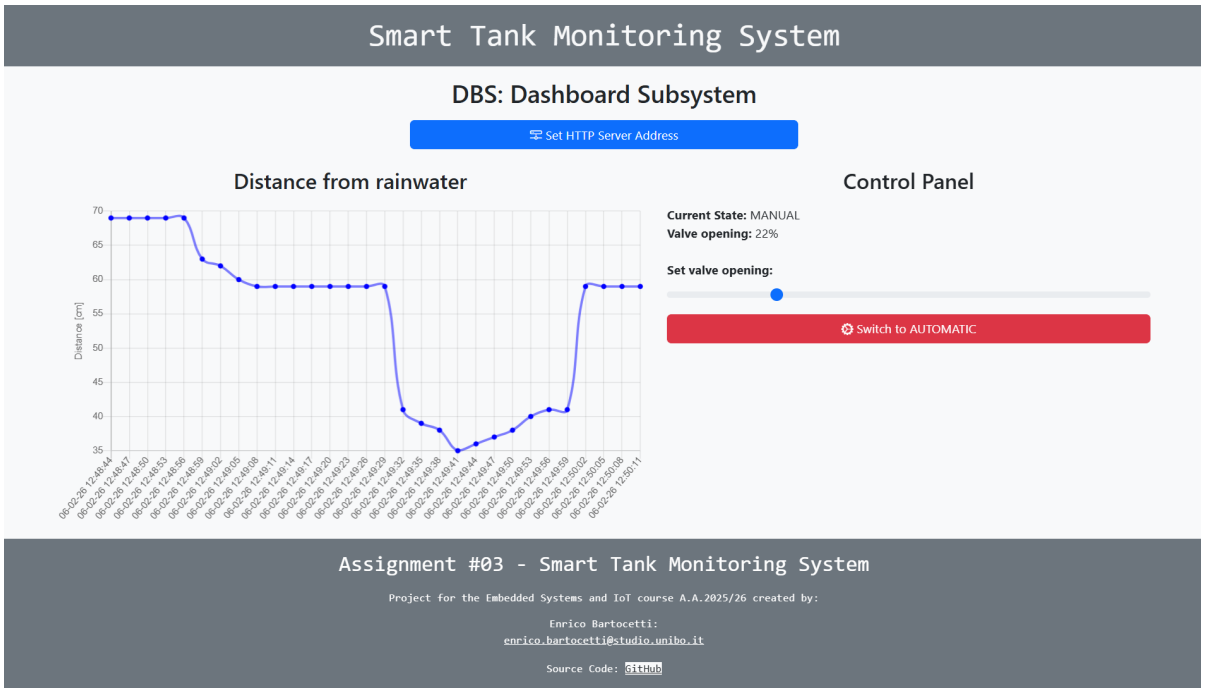


Figura 2.9: Screenshot della DashBoard mentre il sistema era in stato `MANUAL` con la valvola impostata al 22%

Capitolo 3

Comunicazione tra Sottosistemi

3.1 Protocollo Seriale

Per agevolare la comunicazione è stato stabilito un protocollo basato su stringhe separate da un carattere di `Line Feed`.

Comando	Direzione	Descrizione
0	CUS ↔ WCS	Passaggio di stato `AUTOMATIC` ⟷ `MANUAL` (e viceversa)
1	CUS → WCS	Passaggio a stato `UNCONNECTED`
2	CUS → WCS	Connessione ripristinata, ritorno allo stato precedente
3 + valore	CUS ↔ WCS	Nuovo valore di apertura della valvola

Tabella 3.1: Protocollo di comunicazione seriale tra CUS e WCS

Alcuni comandi sono bidirezionali, visto che:

- Il passaggio di stato `AUTOMATIC` ⟷ `MANUAL` può essere richiesto sia tramite DBS (quindi CUS → WCS), ma anche tramite pulsante fisico nel WCS rendendo necessario l'aggiornamento del CUS (WCS → CUS).
- Per impostare un valore manuale da remoto, è utilizzato il comando `3` (CUS → WCS). In ogni caso, sia per valore impostato tramite potenziometro sia tramite DBS, quando in modalità manuale il WCS aggiorna il CUS sul valore di apertura corrente (WCS → CUS).

3.2 API HTTP

Route	Metodo	Descrizione
`api/data`	`GET`	Restituisce un JSON con le ultime letture del TMS
`api/status`	`GET`	Restituisce un JSON con lo stato del sistema (modalità e apertura valvola)
`api/toggle`	`POST`	Richiede il passaggio di modalità `AUTOMATIC` $\longleftrightarrow$ `MANUAL`
`api/opening`	`POST`	Imposta il nuovo valore di apertura contenuto nel campo `value` del JSON passato nel body della richiesta

Tabella 3.2: API HTTP messe a disposizione dal CUS

Nella Tabella 3.2 si riporta una breve descrizione delle API HTTP messe a disposizione dal CUS grazie alla classe `HttpServer`.

3.3 MQTT

Per comunicare la distanza del livello dell'acqua dalla cima della cisterna, il **TMS pubblica** la lettura del sonar a **intervalli regolari** tramite MQTT nel **topic** `water_level`, utilizzando il broker messo a disposizione dal CUS (che **non richiede autenticazione**). Poiché è presente un solo dato da comunicare non è stato utilizzato un particolare formato di comunicazione (ad esempio JSON), ma viene inviato solo il valore letto. Nel caso di errori (ad esempio mancata lettura del sonar), il TMS pubblica il valore -1 che viene scartato dal CUS, entrando quindi in stato `UNCONNECTED` se gli errori di lettura persistono.

Per l'utilizzo del protocollo MQTT è stata utilizzata la libreria `PubSubClient`. Questa libreria ha la limitazione di eseguire il **publish** solo con **QoS 0** (At Most Once): nel nostro caso non è comunque un problema grave, poiché se un messaggio dovesse andare perso basterebbe attendere il prossimo visto che vengono pubblicati con una certa frequenza.

Capitolo 4

Test

Sono stati realizzati una serie di test: di ognuno si riporta il link al video (in cui si visualizzano DBS, TMS e WCS) e una breve descrizione. Tutte le configurazioni utilizzate sono quelle descritte nell'Appendice A.

- **Accensione** del sistema: Inizialmente il DBS mostra `NOT_AVAILABLE` e il TMS ha il LED rosso acceso. Quando il CUS viene messo in esecuzione, tutti i sistemi si aggiornano, partendo in modalità `AUTOMATIC`: il TMS accende il LED verde, il WCS si riavvia con il valore corretto di apertura e il DBS mostra lo stato corrente del sistema. Link
- **Modalità automatica**: Il sistema in modalità `AUTOMATIC` imposta l'apertura della valvola basandosi sul livello di riempimento della cisterna. Quando rimangono meno di 50cm per più di 5 secondi la valvola viene aperta al 50%, quando rimangono meno di 30cm la valvola viene immediatamente aperta al 100%. Alla diminuzione del livello dell'acqua invece, non appena si sale sopra i 30cm la valvola viene ridotta prima al 50% e poi chiusa completamente sopra i 50cm. Link
- **Modalità manuale**: Il sistema quando entra in modalità `MANUAL` imposta la valvola sul valore letto dal potenziometro. Il livello di apertura della valvola può essere impostato sia tramite potenziometro nel WCS sia tramite slider del DBS. È possibile passare dalla modalità automatica alla manuale utilizzando il bottone nel DBS oppure il pulsante fisico nel WCS. Mentre il sistema è in modalità manuale il TMS continua a registrare valori, e non appena si torna in modalità `AUTOMATIC` la valvola viene impostata sul valore corretto basato sulla lettura del TMS. Link
- **Errore di rete**: Quando il TMS non invia dati per più di 7 secondi per un qualasi motivo (in questo caso mancata alimentazione), il sistema passa in modalità `UNCONNECTED`. Non appena la connessione viene ripristinata e il TMS comunica una nuova lettura al CUS, viene ripristinato lo stato in cui ci si trovava prima dell'errore. Link

Appendice A

Configurazioni Utilizzate

Tutti i parametri di configurazione possono essere impostati nei file `include/config.h` di ogni sottosistema. Si riportano in seguito tutti quelli utilizzati ai fini del test.

A.1 Cablaggio

A.1.1 TMS - ESP32

Componente	**Pin**	**Tipo**
Led Verde	26	Digital Output
Led Rosso	25	Digital Output
Sonar Trigger	33	Digital Output
Sonar Echo	32	Digital Input

Tabella A.1: Elenco completo dei pin utilizzati nell'ESP32

A.1.2 WCS - Arduino Uno

Componente	**Pin**	**Tipo**
Pulsante cambio modalità	2	Digital Input
Potenziometro controllo manuale	A0	Analog Input
Servomotore valvola	3	Digital Output (PWM)
LCD I2C SDA/SCL	A4/A5	I2C

Tabella A.2: Elenco completo dei pin di Arduino utilizzati

A.2 Periodo delle Task

A.2.1 TMS - ESP32

Task	Periodo [ms]
Logger Task	3000
Connection Task	500
Status Task	1000

Tabella A.3: Periodo di esecuzione di ogni Task

A.2.2 WCS - Arduino Uno

Task	Periodo [ms]
Main Task	100

Tabella A.4: Periodo di esecuzione di ogni Task

A.3 Parametri Operativi

A.3.1 Distanze

Quando il sistema è in modalità `AUTOMATIC`, il livello di apertura della valvola viene stabilito sulla base dei seguenti valori, impostati nella classe `ControllerImpl` del CUS:

Descrizione	Nome parametri	Distanza dalla cima	Apertura valvola
Cisterna Vuota	$> L1$	> 50 cm	0%
Cisterna Semipiena	$> L2$ & $\leq L1$	> 30 cm & ≤ 50 cm	50%
Cisterna Piena	$\leq L2$	≤ 30 cm	100%

Tabella A.5: Parametri per l'identificazione dello stato della cisterna

A.3.2 Tempi

Descrizione	Classe	Nome parametro	Tempo
Isteresti per transizione `Cisterna Vuota` → `Cisterna Semipiena`	`TmsImpl`	T1 - HYSTERESIS	5s
Passaggio ad `UNCONNECTED`	`ControllerImpl`	T2 - TIMEOUT	7s

Tabella A.6: Tempi presenti nel CUS per effettuare i cambi di stato