

Università degli Studi di Verona

DIPARTIMENTO DI INFORMATICA

Corso di Laurea in Informatica

TESI DI LAUREA TRIENNALE

**Sistema domotico a basso costo
pilotato con protocollo Modbus**

Candidato:

Enrico Giordano

Matricola VR359169

Relatore:

Prof. Graziano Pravadelli

Introduzione

La domotica è una scienza interdisciplinare che si occupa di creare oggetti utili a migliorare la qualità della vita nella casa e più in generale negli ambienti abitati, favorendo la serenità e facendo risparmiare tempo (e soprattutto denaro) per la gestione delle faccende domestiche.

Con l'avanzare della tecnologia, vengono utilizzati strumenti sempre più complessi, favorendo un sistema “*user friendly*” ma costoso, che dal punto di vista finanziario non è accessibile per la maggior parte delle famiglie. Un fattore che avvicina gli sviluppatori a queste tecnologie è la semplicità di progettazione: più avanzata è l'architettura, quindi definibile “*general purpose*”, più è facile sviluppare nuovo software e mantenerlo nel tempo. Queste architetture però non sono dedicate esclusivamente all'ambito di utilizzo; questo è un fattore che impreziosisce tutto il progetto nel complesso e di conseguenza fa aumentare il prezzo di mercato del progetto stesso.

La soluzione a questo problema è progettare un sistema dedicato, “*embedded*”, in grado di occuparsi esclusivamente di alcuni compiti e ottimizzato sia nei costi che nell'esecuzione delle operazioni specifiche. Questo può essere un limite per vari fattori, ossia difficoltà di sviluppo, difficoltà di scelta della componentistica, ottimizzazione di risorse e codice, però offre il vantaggio di essere un progetto a basso costo dal punto di vista sia hardware che software, in quanto si propone qualcosa di più semplice ma efficace.

Questo progetto rappresenta un piccolo sistema domotico con cui si controllano le luci di una casa e i vari sensori che monitorano le stanze, utilizzando un pannello di controllo Master che comunica con le diverse periferiche slave tramite protocollo Modbus.

Indice

1 Il progetto	7
2 Architettura Hardware	9
2.1 LPC1788	9
2.2 LPC1768	9
2.3 PIC16F77	10
2.4 Bus RS232	10
2.5 Considerazioni	13
2.6 Altri componenti	13
2.6.1 Sensori	13
2.6.2 DHT11	15
2.6.3 Relè	16
2.6.4 Luci a led	17
2.6.5 Foto del sistema hardware	17
3 Architettura Software	23
3.1 Dispositivo Master	23
3.1.1 uEZ	23
3.1.2 emWin	24
3.2 Dispositivi Slave	25
3.2.1 FreeRTOS	25
4 Modello di sistema	27
4.1 Use Case Diagram	27
4.2 Sequence Diagram	29
5 Implementazione del sistema	31
5.1 Protocollo Modbus	31
5.1.1 Tipi di messaggi	31
5.1.2 Registri	31
5.1.3 Tipi di richiesta	32
5.1.4 CRC16	33
5.1.5 Sincronizzazione	33
5.2 Implementazione del protocollo Modbus	33
5.2.1 Master	34
5.2.2 Slave	37
5.3 Funzionamento generale di LPC1768	41
5.3.1 Main	41
5.3.2 Modello dei dati	41
5.3.3 MainTask	43
5.4 Funzionamento generale di PIC16F77	43
5.5 Funzionamento generale di LPC1788	43
5.6 Interfaccia grafica	43

5.6.1	Menù principale	44
5.6.2	Controllo Luci	45
5.6.3	Controllo Sensori	46
5.6.4	Schermata di Debug	47
5.7	Interazione con i componenti hardware	47
5.7.1	Sensori	47
5.7.2	Relè e luci	47
5.8	Diagramma dei componenti	48
5.8.1	Architettura Hardware	48
5.8.2	Architettura Software	48
6	Programmi utilizzati	49
6.1	LPC1788	49
6.2	LPC1768	49
6.3	PIC16F77	49

Capitolo 1

Il progetto

Il progetto consiste in un sistema domotico utilizzabile da un qualunque utente (quindi non esperto di informatica) mediante interfaccia grafica intuitiva ed essenziale. È composto da diversi dispositivi che devono comunicare tra loro in base alle scelte che l'utente attua navigando nell'interfaccia. Deve esserci quindi un dispositivo centrale che trasforma gli ordini ad alto livello dell'utente in istruzioni per gli altri dispositivi.

L'utente è in grado di eseguire operazioni di controllo della casa, tramite sensori presenti nelle stanze, e di interazione con oggetti fisici, ossia luci e motori per aprire o chiudere porte (non presenti in questo progetto). Tutto ciò deve risultare semplice e intuitivo all'utente, quindi la comunicazione e il controllo devono essere gestiti interamente dai dispositivi, mentre l'utente deve essere solo in grado di fare la scelta tramite appositi pulsanti che compaiono nell'interfaccia. È presente quindi un menù, in base al quale si sceglie il tipo di comando da eseguire e, in base alla scelta principale, si viene indirizzati alla schermata apposita.

Ogni sintomo di guasto può essere diagnosticato tramite un'interfaccia particolare, chiamata *debug*, che permette ad un tecnico di interfacciarsi con il sistema e capire il tipo di guasto (se è un guasto delle periferiche, se dei dispositivi, ecc ...). Anche l'utente può interfacciarsi con questa schermata seguendo le istruzioni del manuale; essendo basata la comunicazione su protocollo standard, è possibile imparare e comprendere i comandi per potersi interfacciare direttamente con i dispositivi fisici.

Per questioni di prestazioni, di modularità e di costi, è necessario che ci sia un dispositivo centrale (che mostra l'interfaccia grafica) in grado di comunicare con protocollo standard con gli altri dispositivi. Nell'architettura deve quindi esserci un dispositivo di tipo “Master” che comunica con dispositivi di tipo “Slave” in modo da inviargli i comandi scelti dall'utente tramite GUI. Il motivo di questa scelta è dovuto essenzialmente a due fattori:

- se ci fosse un dispositivo che si occupa di tutte le operazioni del sistema, le prestazioni sarebbero nettamente inferiori rispetto a ciò che ci si aspetta, altrimenti bisogna utilizzare un sistema più potente e quindi più costoso;
- più dispositivi possono essere posizionati in posti diversi in un'abitazione: in questo caso si assicura che ogni dispositivo sia efficace nel controllo di una sola stanza;
- per questioni estetiche, avere troppi fili in una casa può essere “brutto” e scomodo;
- tirare troppi fili da un unico dispositivo crea diversi problemi, sia di modularità (*da dove viene questo filo?*) sia di disponibilità da parte del dispositivo centrale (*quanti fili posso controllare con il dispositivo?*) piuttosto che di diagnostica (*questo filo cosa controlla?*).

A livello di costi, avere un dispositivo molto potente è molto più costoso di avere più dispositivi dedicati che, se ottimizzati, costano molto poco. Per questo progetto verranno utilizzate delle demoboard, quindi oggetti non ottimizzati e progettati per avere un ambiente di sviluppo facile da configurare; si vedrà alla fine che, ottimizzando le risorse, i costi generali saranno molto ridotti.

Infine il sistema è stato progettato per essere espandibile: seguendo questo documento, è possibile creare un nuovo dispositivo in grado di interfacciarsi con il dispositivo “Master”, in modo da controllare più periferiche e quindi più stanze. Inoltre, poiché la comunicazione utilizzata è standard, è possibile controllare anche dispositivi di diversa natura utilizzando la schermata di *debug*.

I sensori utilizzati devono generare un segnale comprensibile ai dispositivi che li devono controllare: devono essere quindi convertitori di condizioni ambientali analogici o digitali, il cui tasso di discretizzazione non deve superare i 16 bit. Questo vincolo è imposto per questioni economiche e di sistema, si vedrà in seguito che l’architettura scelta e il protocollo utilizzato gestiscono al meglio dati a 16 bit.

Le luci da pilotare devono essere a LED, per diversi fattori:

- sono la nuova tecnologia di luci;
- il voltaggio richiesto è adeguato al sistema, in questo modo si risparmia scegliendo un unico alimentatore di potenza adeguata;
- risultano essere un investimento, in quanto costano di più rispetto alle normali lampadine, però durano per molto più tempo, quindi si ha solo la spesa aggiuntiva iniziale, ma risulta meno costosa come tecnologia perché non ha ricambi (se non in casi eccezionali).

Capitolo 2

Architettura Hardware

È stato deciso di attuare maggiore modularità possibile, in modo da poter descrivere nel dettaglio ogni componente e la sua funzione, ma soprattutto per potenziare l'intero sistema nel corso del tempo. Per la realizzazione di questo sistema, sono state scelte 3 tecnologie differenti, associate ognuna ad un compito diverso e con software specifico.

2.1 LPC1788

Questo è un microprocessore ARM di famiglia Cortex-M3 utilizzato come dispositivo Master che controlla tutti gli altri dispositivi. È un processore a 32 bit, quindi in grado di avere 2^{32} spazi di indirizzamento. Le sue periferiche principali sono: GPIO, I2C, UART, USB, EMAC, Ethernet, AUX Stereo, INPUT Mono, PWM a 32 bit, ADC, DAC. Può essere alimentato con $3,3 \sim 5V$ e assorbe $200mA$. Possiede $512KB$ di memoria FLASH, $96KB$ di memoria SRAM, $8MB$ di SDRAM (esterna), $1KB$ di memoria sicura EEPROM (esterna) per poter resettare guasti irreparabili (perdita di BIOS, anomalie su codice, ecc...). La grande quantità di memoria FLASH permette di sviluppare un software molto esteso. Poiché al suo interno è stata integrata una GPU, offre maggiori prestazioni grafiche, quindi è stato utilizzato per presentare l'interfaccia grafica per poter interagire con tutto il sistema. Di questo processore sono state utilizzate queste periferiche:

- **GPU** per gestione di LCD TouchScreen VGA 640x480 5.7, utilizzato quindi per mostrare l'interfaccia grafica;
- **RS232** per la comunicazione seriale tra dispositivi;
- **Timer** per la gestione asincrona del tempo rispetto al ciclo di clock;
- **Cicalina** per riprodurre suoni di avviso o di errore.

Il costo associato quindi a questo componente è:

oggetto	Costo (in Euro)
processore	18
convertitore segnali TTL - RS232	2
LCD	20
Totale:	40

2.2 LPC1768

Questo è un microprocessore ARM di famiglia Cortex-M3 utilizzato come dispositivo Slave che viene controllato dal Master e interagisce direttamente con i sensori e luci. Anche questo processore è a 32 bit con quasi le stesse caratteristiche del processore precedentemente descritto, però risulta essere

meno prestante in quanto non possiede GPU integrata e possiede meno memoria (circa la metà). Per questo è stato deciso di usarlo per controllare i sensori, anche perché il codice del dispositivo Master sarebbe risultato troppo grande e computazionalmente oneroso per questo processore. Possiede un piccolo LCD TouchScreen, che viene utilizzato solo per presentare il firmware e le caratteristiche del settaggio del protocollo per comunicare. Può essere alimentato con $3,3 \sim 5V$ e assorbe $150mA$. Di questo processore è stato utilizzato:

- **UART** per la comunicazione seriale con il Master;
- **LCD** per presentare le impostazioni del protocollo;
- **GPIO** per controllare i sensori e le luci;

Il costo associato quindi a questo componente è:

oggetto	Costo (in Euro)
processore	18
convertitore segnali TTL - RS232	2
Totale:	20

2.3 PIC16F77

Questo è un microcontrollore PICMicro di famiglia PIC16 con memoria FLASH. Essendo un microcontrollore, è un'architettura diversa da quelle precedentemente descritte, in quanto risulta essere meno prestante ma più ottimizzato a livello di costi. È un piccolo sistema a 8 bit, quindi possiede 2^8 locazioni di indirizzamento; questo significa che è molto meno performante, in quanto sono disponibili poche locazioni e quindi meno memoria contigua utilizzabile. La memoria FLASH è un quarto di quella del microprocessore LPC1768, quindi il codice scritto deve risultare il più piccolo possibile. Le periferiche disponibili sono: UART, PWM, GPIO, DAC, TIMER. Può essere alimentato con $3,3 \sim 5V$ e assorbe $50mA$ (quindi consuma molto meno dei sistemi precedenti).

Di questo processore è stato utilizzato:

- **UART** per la comunicazione seriale con il Master;
- **GPIO** per controllare i sensori e le luci;

Il costo associato quindi a questo microcontrollore è:

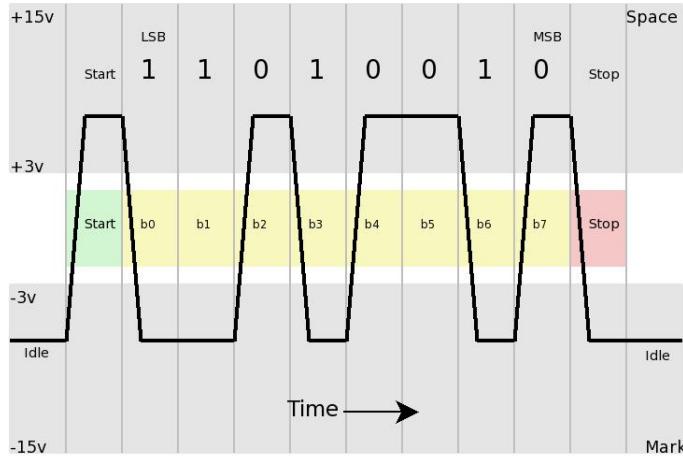
oggetto	Costo (in Euro)
microcontrollore	5
convertitore segnali TTL - RS232	2
Totale:	8

2.4 Bus RS232

Il problema principale di questo sistema è che i dispositivi LPC1768 e PIC16F77 supportano una comunicazione seriale con protocollo RS232, mentre per altri tipi di comunicazione, supportati da LPC1788 (RS485, CAN e Ethernet), sarebbe stato necessario aggiungere hardware (quindi aumentare il costo del progetto). Quindi si è deciso di adottare come protocollo di comunicazione RS232.

RS232 è un protocollo seriale che appartiene alle prime fasi dello sviluppo informatico ed è stato ormai sostituito in ambito dei PC, in quanto la velocità di comunicazione e la creazione dei dati

a pacchetto hanno fatto preferire l'utilizzo di altre tecnologie; è ancora molto utilizzato in ambito industriale in quanto risulta molto sicuro in ambienti con disturbi elettrici. Questo protocollo consiste nell'inviare segnali con una alta differenza di potenziale ($\pm 12V$) con una soglia di commutazione di $\pm 3V$; quando il segnale è negativo, si interpreta come "1" il segnale, altrimenti "0". Per identificare ogni byte, si definisce la velocità di comunicazione, ossia il *baudrate* (il massimo baudrate secondo lo standard è 19200).



L'aspetto positivo dell'utilizzo di questo protocollo è la facilità di implementazione di comunicazione: si deve semplicemente impostare la porta seriale e inviare i byte tramite l'apposito registro dell'architettura; l'aspetto negativo è invece la proprietà punto-punto di questa: non possono essere collegati più dispositivi alla stessa porta in invio-ricezione.

Questo protocollo però supporta un dispositivo *spy*, ossia un dispositivo che sta in ascolto su una linea Tx della seriale; in questo modo può leggere i byte inviati da uno dei due dispositivi. Questa informazione si è dimostrata importantissima per l'implementazione del bus.

Per far comunicare tutti i dispositivi, è stato creato un bus che permettesse di mantenere le proprietà del protocollo RS232 (quindi comunicazione punto-punto) ma che permettesse anche di far comunicare i dispositivi secondo la logica master-slave di Modbus (quindi ad ogni richiesta del Master deve rispondere lo Slave interrogato). Il bus ha quindi una parte esclusivamente hardware, che consiste nel collegamento fisico tra i dispositivi e un Relè che commuta il canale Tx degli Slave verso il Master, e una parte logica programmata, composta dal microcontrollore PIC16F628A. Questo microcontrollore funge da dispositivo spy, in quanto ha il canale della seriale Rx collegato al canale Tx del Master.

Il funzionamento del bus si basa sulla lettura del primo carattere del messaggio Modbus: il Master invia un messaggio a tutti i dispositivi, il cui primo carattere indica l'indirizzo dello Slave che dovrà rispondere; dal momento che il microcontrollore del bus è un dispositivo spy, ha la possibilità di leggere il primo carattere per ogni messaggio inviato dal Master. Una volta letto il primo carattere, il microcontrollore commuta il canale Tx del bus, in modo che lo Slave abbia accesso esclusivo al canale Rx del Master. In questo modo, tutti ricevono il messaggio Modbus, ma solo chi dovrà rispondere avrà il canale Tx attivato verso il Master.

Per commutare il canale, è stato utilizzato un relè pilotato dal microcontrollore del bus, in base alla lettura del primo carattere del messaggio del Master.

Poichè il microcontrollore PIC16F628A non era provvisto di commutatore di segnali RS232 a TTL, è stato aggiunto un MAX222 in modo da trasformare la logica RS232 proveniente dall'esterno in TTL (comprendibile quindi dal microprocessore).

Per collegarsi a questo bus, è necessario utilizzare un cavo seriale di tipo cross per il dispositivo Master, mentre per i dispositivi Slave serve un cavo dritto.

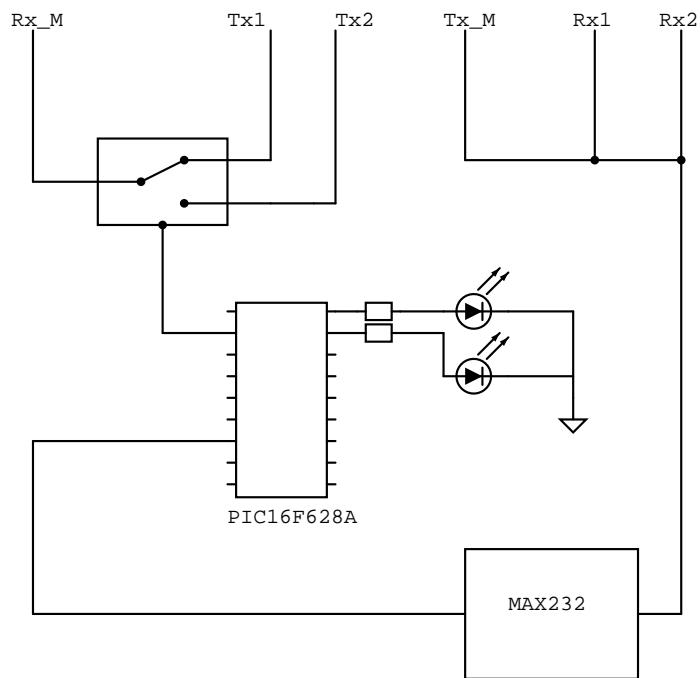


Figura 2.1: Architettura del bus

2.5 Considerazioni

È stato deciso di sfruttare tecnologie diverse per far capire come questo sistema possa essere versatile, sfruttando la modularità, e quanti limiti possono esserci utilizzando tecnologie sempre più semplici. Ovviamente si potrebbero prediligere periferiche a basso costo, come nel nostro caso il PIC, però, come si vedrà in seguito, i limiti di progettazione sono talmente vincolanti che è difficile con un singolo PIC gestire tante periferiche quante ne gestisce un Cortex-M3.

Sostituire LPC1768 con PIC16F77 sarebbe svantaggioso perché non si avrebbe la stessa potenza di calcolo, quindi servirebbero più PIC e quindi costerebbe relativamente di più, oltreché non si avrebbero le stesse features. Non si avrebbe nemmeno la stessa versatilità, in quanto se si vuole collegare un nuovo sensore particolare a LPC1768, la riprogrammazione sarebbe molto più veloce e semplice del PIC16F77, quindi porterebbe dei costi maggiori anche a livello di sviluppo software.

Se invece il sistema può essere calato in un contesto statico, in cui i cambiamenti di apparecchiature sono molto rare e i sensori che vengono installati sono semplici e pochi, si può pensare di utilizzare un PIC in sostituzione al Cortex-M3.

L'unico oggetto che non può essere sostituito con qualcosa di meno costoso è il dispositivo Master, poiché porterebbe a problemi di potenza di calcolo, di rimappatura di tutto il sistema ma soprattutto di costi maggiori di sviluppo software, in quanto il software di questo oggetto è il più complesso di tutto il sistema e di conseguenza riprogettarlo per un'architettura diversa, magari meno potente, porterebbe a dei costi aggiuntivi inutili.

2.6 Altri componenti

Oltre alla parte operativa del sistema, ci sono vari altri oggetti hardware che devono essere pilotati dai dispositivi slave. Questi sono gli oggetti osservabili del sistema da parte degli utenti e controllano l'ambiente permettendo agli slave di osservare la scena o di illuminarla.

2.6.1 Sensori

I sensori di questo sistema sono di due tipi:

- **attivi**, che hanno una componente hardware/software da alimentare che genera un messaggio o un segnale in base agli avvenimenti che controllano;
- **passivi**, che semplicemente generano un segnale in base alle circostanze, senza che debbano essere pilotati da un hardware/software esterno; alcuni non hanno nemmeno bisogno di essere alimentati.

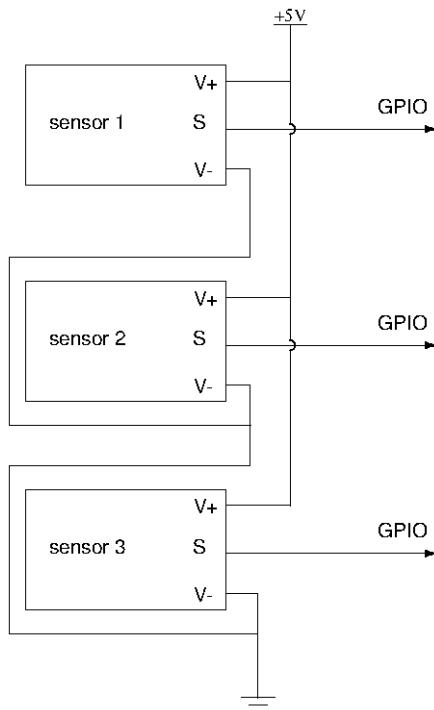
Inoltre possono essere digitali, che generano un segnale digitale per inviare l'analisi al destinatario tramite GPIO, oppure analogici, che generano un segnale analogico che quindi deve essere interpretato tramite ADC dal destinatario.

Questi sensori hanno un costo commerciale molto basso (circa 1 Euro ciascuno) e quindi si adattano benissimo al nostro sistema a basso costo.

Di seguito sono riportati i sensori utilizzati.

nome	informazione	funzionamento
sensore di umidità e temperatura	Digitale	attivo
sensore di luminosità	Digitale	passivo
sensore di distanza	Digitale	passivo
sensore di rumore	Digitale	passivo
sensore di distanza ad infrarossi	Digitale	passivo
sensore di vibrazione	Digitale	passivo
Total:	6 sensori	

Poichè questi sensori sono stati saldati su piccole schede elettriche, per rendere possibile l'allacciamento con i dispositivi slave in maniera semplice è stato creato un piccolo circuito per sfruttare facilmente le loro interfacce hardware. Il circuito, semplificato per tre sensori che mandano il loro messaggio alle rispettive GPIO di uno slave, è il seguente.



I sensori offrono diversi controlli per l'ambiente esterno al processore, però la maggior parte di essi restituisce un segnale logico, non un segnale analogico (anche se tutti lo supportano). La scelta del segnale logico è stata imposta da alcune restrizioni della demoboard utilizzata per controllare i sensori: questa demoboard infatti ha il canale ADC occupato da una resistenza variabile, quindi risulta impossibile utilizzare questo canale esternamente.

Il comportamento dei sensori è il seguente:

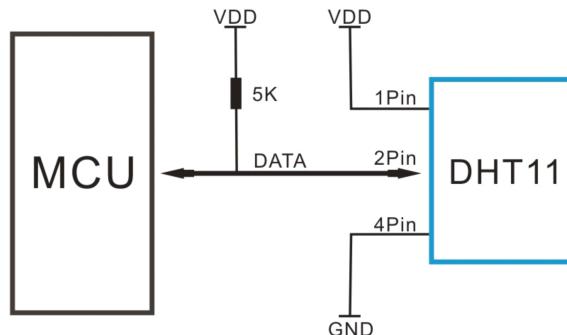
- sensore di luminosità: quando si raggiunge la quantità di luce prestabilita, regolabile tramite la resistenza variabile nel circuito, viene inviato un segnale (interpretabile come 1), altrimenti non si invia alcun segnale;

- sensore di distanza: quando si raggiunge la distanza dal sensore prestabilita, regolabile tramite la resistenza variabile nel circuito, non si invia alcun segnale, altrimenti si invia un segnale interpretabile come “1” (ha logica invertita);
- sensore di rumore: quando si raggiunge una quantità di rumore prestabilita, regolabile tramite la resistenza variabile nel circuito, viene inviato un segnale (interpretabile come 1), altrimenti non si invia alcun segnale;
- sensore di distanza ad infrarossi: quando si raggiunge la distanza dal sensore prestabilita, regolabile tramite le due resistenze, una per la sensibilità di controllo infrarosso e l'altra per la frequenza dell'infrarosso emesso, non si invia alcun segnale, altrimenti si invia un segnale interpretabile come “1” (ha logica invertita);
- sensore di vibrazione: quando viene scosso il sensore, quindi quando la molla interna al sensore crea un contatto con la parete di questo chiudendo il circuito, viene inviato un segnale (interpretabile come 1), altrimenti non si invia alcun segnale.

Per un corretto funzionamento di questi sensori, è necessario collegare la massa dei sensori con quella delle GPIO che li andranno a pilotare, altrimenti non funzioneranno.

2.6.2 DHT11

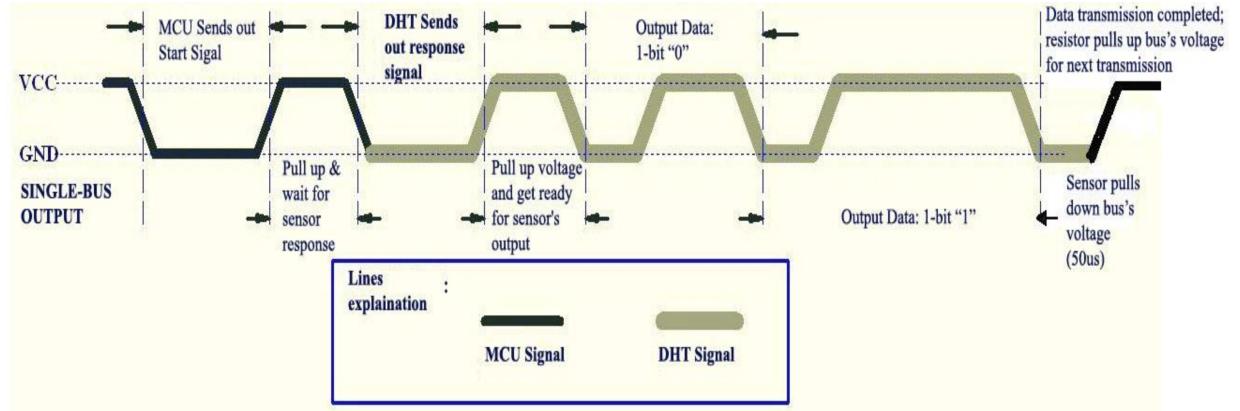
Il sensore temperatura e umidità DHT11 merita particolare attenzione, in quanto utilizza un protocollo di comunicazione standard particolare nonostante sia un sensore piccolo e a basso costo. Questo sensore è in grado di comunicare i dati acquisiti (con aggiornamento di 1 Hz) tramite protocollo *1-Wire*, comunicando in 4 millisecondi il risultato. Per collegare il sensore all'unità di controllo, è necessario realizzare questo piccolo circuito:



La particolarità del protocollo 1-Wire è la semplicità di implementazione e la capacità di non richiedere un hardware specifico (infatti il protocollo è stato implementato utilizzando una GPIO del processore LPC1768). Il funzionamento è il seguente:

1. si esegue un ack, ossia il microprocessore invia un segnale logico basso per 20 millisecondi e alto per 40 microsecondi, il sensore risponde con un segnale basso di 80 microsecondi e alto per 40 microsecondi;
2. il sensore invia il dato, ossia invia un segnale basso per almeno 40 microsecondi, poi alto per un tempo variabile di microsecondi: se il segnale dura più di 30 microsecondi, il segnale deve essere interpretato come “1”, altrimenti come “0”.

Questo sensore invia in totale 40 segnali, che corrisponderanno a 40 bit: 8 per l'umidità, 8 per la parte decimale dell'umidità, 8 per la temperatura, 8 per la parte decimale della temperatura, 8



per il CRC, che dovrebbe corrispondere alla somma dei numeri precedenti rappresentati dagli 8 bit interpretati in modulo.

L'aspetto positivo dell'utilizzo di questo sensore è la semplicità di implementazione del protocollo, oltreché l'utilizzo di una GPIO piuttosto che l'utilizzo di un'ingresso ADC; questo aspetto è da considerare ottimo quando l'architettura utilizzata non dispone di un convertitore analogico-digitale. L'utilizzo di questo sensore ha anche diversi aspetti negativi:

- nonostante la comunicazione duri 4 ms, occupa completamente l'utilizzo del processore, poiché questo deve contare per quindici microsecondi il sensore invia i segnali, quindi un calcolo molto oneroso in quanto 1 microsecondo corrisponde a 1 MHz;
- pur avendo il controllo CRC, la comunicazione molto spesso non funziona; infatti essendoci anche il minimo disturbo durante la comunicazione, dovuto sia da aspetti software (un task asincrono che viene schedulato può essere interpretato come disturbo in questo caso) che hardware (disturbi o ossido nei contatti), il segnale ricevuto risulta corrotto e quindi è necessario richiedere nuovamente la misurazione.

Questi due aspetti sono stati molto importanti durante la progettazione in quanto si è cercato di ottimizzare al massimo l'utilizzo del processore incaricato di leggere la temperatura, eliminando tutti i possibili disturbi software e hardware.

2.6.3 Relè

Poiché sarà necessario pilotare anche luci di abitazioni, gli slave non possono essere in grado di erogare abbastanza corrente per queste. Per risolvere questo problema, è necessario utilizzare un componente hardware chiamato Relè. Questo oggetto consiste in un avvolgimento di rame e una lamina di rame che funge da switch di canale; appena l'avvolgimento viene eccitato con la corrente, genera un campo magnetico che sposta la lamina di rame in modo da deviare la corrente da un canale all'altro. Anche la bobina di rame però necessita di molta corrente per generare un campo magnetico; è presente quindi un fotocopiatore che riceve in input sia la corrente necessaria alla bobina per generare il campo magnetico sia la corrente dello slave per pilotare via software le luci; in output invierà la corrente necessaria per il relé solo quando lo slave invia il segnale.

Questo oggetto può quindi essere utilizzato come interruttore automatico pilotato dal processore. È stata utilizzata una scheda per pilotare 8 relè tramite le GPIO di uno slave, in modo da accendere o spegnere le luci a led a basso consumo.

Per un corretto funzionamento, è necessario collegare la massa di questo circuito alla massa del processore che lo deve pilotare, altrimenti non funzionerà l'invio del segnale.

2.6.4 Luci a led

È stato deciso di pilotare delle luci a led tramite i Relè per dimostrare un'ulteriore applicazione di questo progetto, ossia l'illuminazione della casa automatizzata. Per non utilizzare troppo spazio e non consumare troppa corrente, è stato deciso di utilizzare delle strip led da arredamento a basso consumo.

2.6.5 Foto del sistema hardware



Figura 2.2: LPC1788

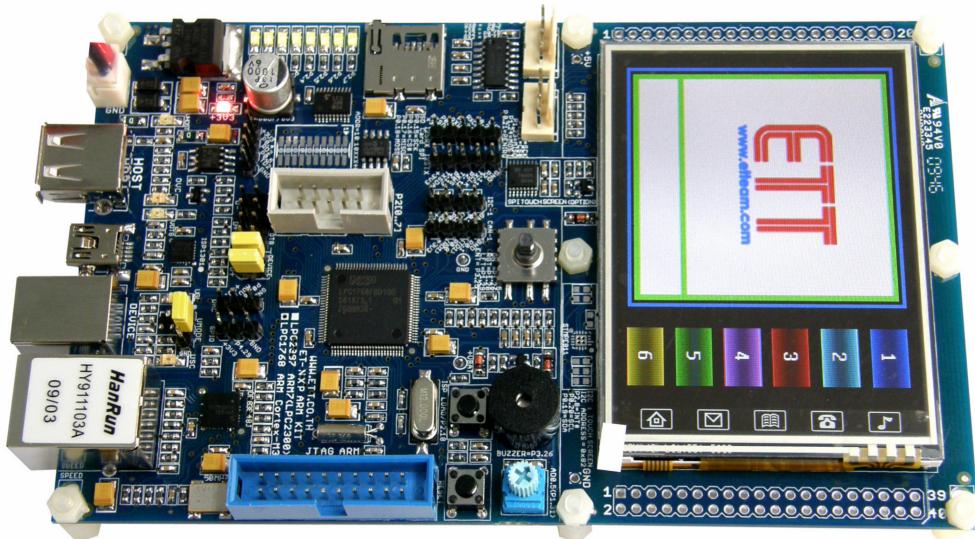


Figura 2.3: LPC1768

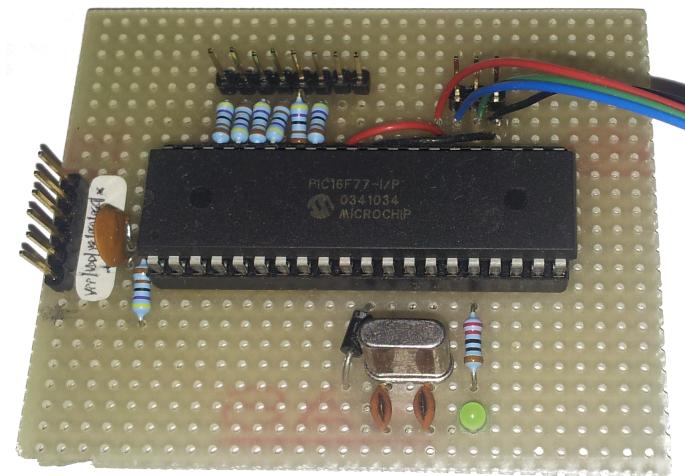


Figura 2.4: PIC16F77

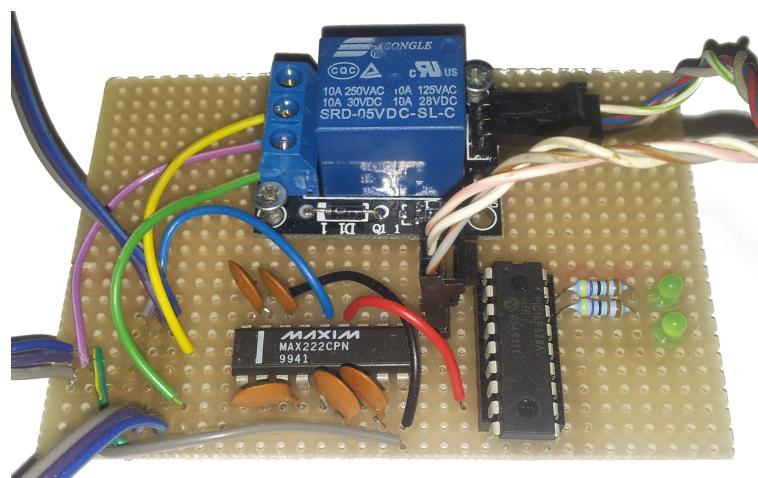


Figura 2.5: BUS RS232

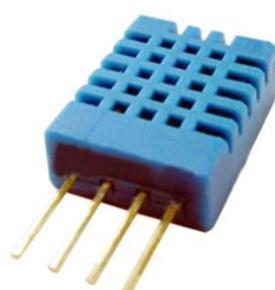


Figura 2.6: Sensore DHT11



Figura 2.7: Sensore di distanza a infrarossi

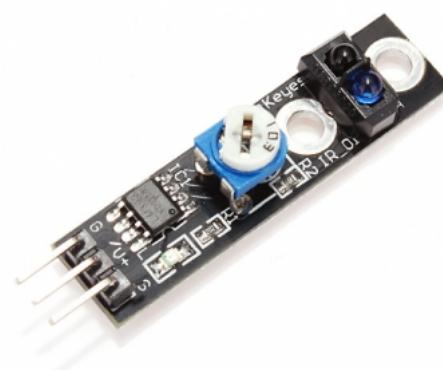


Figura 2.8: Sensore di distanza

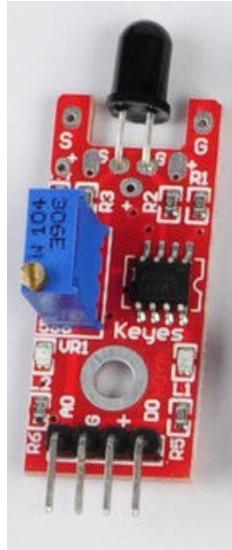


Figura 2.9: Sensore luminosità

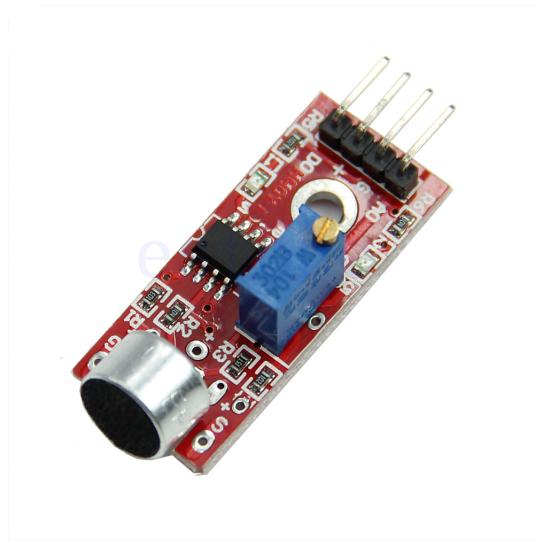


Figura 2.10: Sensore di rumore

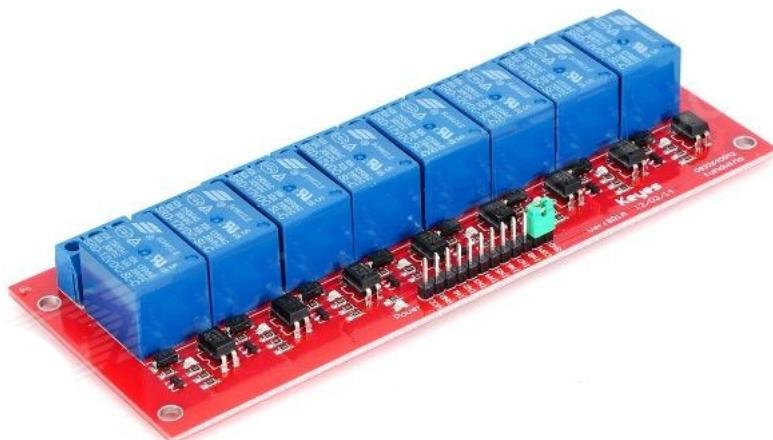


Figura 2.11: 8 relè



Figura 2.12: Strip led

Capitolo 3

Architettura Software

La parte più interessante di questo preambolo al progetto realizzato è lo scheletro software su cui si basa tutta la progettazione. È facile pensare alla programmazione in un ambiente in cui il sistema operativo offre un “*hardware abstraction layer*” che garantisce una facile programmazione. Nell’ambito però dei sistemi embedded, un HAL è pressochè assente, quindi la programmazione si complica in quanto bisogna ragionare sul funzionamento dell’architettura stessa.

3.1 Dispositivo Master

Per LPC1788 il problema principale era quello di gestire l’interfaccia grafica e l’invio di messaggi agli Slave. Per gestire facilmente ciò, è stato utilizzato un sistema preconfezionato che offre delle API utili alla gestione di periferiche e per la progettazione.

3.1.1 uEZ

Questo sistema si chiama μ EZ, chiamato così perché dovrebbe “ispirare” il designer di software embedded durante la progettazione e semplificiarla. Sono state comunque modificate delle API per semplificare l’utilizzo della porta seriale e dei timer.

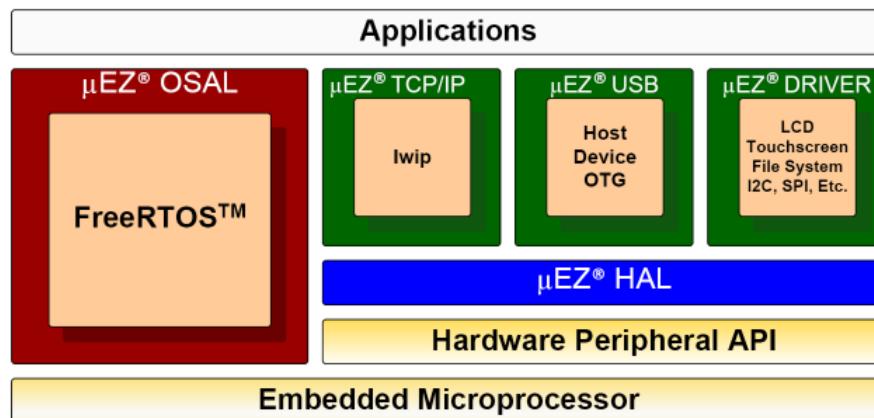


Figura 3.1: architettura del sistema uEZ

Il sistema offre innanzitutto un HAL completo, in quanto permette di trattare ad alto livello la configurazione di tutte le periferiche. Inoltre non è necessario definire il boot di sistema (cosa non banale per questi sistemi). Esiste un porting standard per ogni processore, se non è presente è possibile scriverlo facilmente. Il sistema deve essere compilato in due passaggi: il primo consiste

nel compilare μEZ per la propria architettura, ottenendo un file di libreria da linkare al proprio progetto, il secondo consiste nello sviluppare il proprio progetto basandosi su questo sistema. È possibile, al tempo di compilazione, decidere quali periferiche utilizzare prima di generare la libreria da linkare, ottimizzando per area il proprio software.

Ciò che ha portato allo sviluppo su questo sistema software è stato, oltre all’astrazione dell’hardware che facilita la programmazione, alla predisposizione da parte del sistema di usare risorse di rete come lo stack di rete lwIP e alla presenza di sistema operativo FreeRTOS, è stata la capacità di utilizzare una libreria grafica per i sistemi embedded, ossia la libreria **emWIN**.

3.1.2 emWin

Questa è una libreria grafica per sistemi embedded basata su una grafica molto simile alle prime versioni di Windows (sia per l’estetica sia per la gestione ottimale delle risorse grafiche). Essa offre un HAL ad alto livello molto semplice da utilizzare, con cui è possibile progettare interfacce con oggetti grafici ben noti (bottoni, input text, ecc...) senza dover interfacciarsi direttamente con l’oggetto hardware. Può sembrare una soluzione poco ottimale, visto che tutti gli elementi ad “alto livello” nella progettazione di sistemi embedded può essere reputata poco efficiente in ambito di risorse e computazione, in realtà è stata progettata in maniera altamente ottimizzata.

La gestione dell’interfaccia tramite questa libreria ha un’implementazione molto semplice:

1. si descrive l’interfaccia implementandola personalmente o tramite appositi programmi di generazione di codice (GUIBuilder incluso nel pacchetto emWin);
2. si associa al codice corrente l’interfaccia appena creata ricordandosi di usare il comando `ExecDialogBox()` (vedere manuale emWin);
3. si associa ai widget creati il codice che viene eseguito in base agli eventi generati.

Particolare interesse deve essere prestato al metodo con cui si può interagire con i widget: per modificare o eseguire azioni generiche sul widget, è necessario farsi restituire un puntatore specifico e lavorare su di esso. Un esempio di codice:

```

2 #define ID_WIDGET ID_GUI + 0x00
4 ...
6 EMWIN_WIDGET_TYPE my_widget;
8 ...
10 WM_HWIN hItem = WM_GetDialogItem(pMsg->hWin, ID_WIDGET);
    my_widget = my_value;
```

Il porting che è stato fatto di questa libreria per questo processore dipende dalla board di sviluppo che si vuole considerare (soprattutto per il nostro LCD TouchScreen), nel nostro caso dipende in maniera esclusiva da μEZ . Infatti per questioni di modularità, emWin si appoggia alle API di μEZ , in modo da sfruttarle senza interfacciarsi direttamente con l’hardware sottostante, essendo già state ottimizzate le API di μEZ (quindi emWin nel nostro caso non può funzionare senza di μEZ).

3.2 Dispositivi Slave

Questi dispositivi non hanno una parte software che funge da scheletro per l'applicazione, essenzialmente per due motivi:

- le architetture sono troppo semplici, non è necessario interfacciarsi con l'hardware tramite API visto che i comandi che devono eseguire sono diretti alle diverse periferiche;
- non è presente molta memoria e non è garantita molta capacità di calcolo, quindi sarebbe svantaggioso utilizzare qualcosa di più “astratto” (e quindi inefficiente) per gestire le operazioni.

L'unica eccezione di questo argomento è l'utilizzo, per il dispositivo ARM, di un sistema operativo. Per il dispositivo PIC non è stato possibile inserire il sistema operativo, in quanto non è presente abbastanza memoria e il sistema di calcolo è troppo semplice.

3.2.1 FreeRTOS

Il sistema operativo utilizzato sul dispositivo di tipo ARM Cortex-M3 si chiama FreeRTOS.

È un sistema operativo di tipo Real Time, ossia il sistema deve essere “prevedibile” o piuttosto “determinista”, nel senso che nel sistema si deve conoscere la tempistica reale (nei migliori o peggiori dei casi) di un determinato processo o elaborazione. In pratica un sistema real-time deve garantire che una elaborazione (o task) termini entro un dato vincolo temporale o scadenza (detta in gergo deadline). Per garantire questo è richiesto che la schedulazione delle operazioni sia fattibile. Il concetto di fattibilità di schedulazione è alla base della teoria dei sistemi real-time ed è quello che ci permette di dire se un insieme di task sia eseguibile o meno in funzione dei vincoli temporali dati.

Il sistema operativo non è stato utilizzato per utilizzare una HAL per programmare, ma per creare dei task separati per gestire la parte di protocollo e la parte di applicazione, in quanto continui polling sui sensori possono disturbare l'invio della risposta al dispositivo Master. Alla fine della progettazione però, per i vincoli dettati dal sensore DHT11, si è deciso di creare un unico task che permettesse di sfruttare la velocità di FreeRTOS nell'esecuzione di un task.

Capitolo 4

Modello di sistema

Di seguito si riporta il modello del sistema secondo lo standard ingegneristico, ossia presentando:

- “*Use Case Diagram*”, ossia la presentazione ad alto livello dei diversi attori del sistema (nel nostro caso gli attori sono: l’utente, il dispositivo Master e il dispositivo Slave), in modo da rendere chiari i ruoli degli attori e le loro azioni all’interno dello scenario;
- “*Sequence Diagram*”, ossia la presentazione ad alto livello dello scambio di “messaggi” tra i diversi attori e dispositivi del sistema (vengono identificate le interazioni nel sistema come messaggi).

È stato deciso di ingegnerizzare questo progetto in quanto le risorse disponibili erano troppo poche per permettere errori di valutazione, oltreché si voleva creare un progetto mantenibile nel tempo, quindi era necessaria una documentazione appropriata.

4.1 Use Case Diagram

Con questo tipo di diagramma, viene presentata una tabella per ogni attore, ciascuna contenente nell’intestazione il nome dell’attore considerato e all’interno le rispettive azioni. Ogni attore coinvolto nel sistema ha delle precondizioni da rispettare affinchè tutte le operazioni vadano a buon fine e una postcondizione. Vengono presentate infine le azioni sotto forma di algoritmo o insieme di attività da svolgere per eseguire un task.

L’attore principale, cioè l’utente, ha tre tipi di attività, ossia la scelta del task da far eseguire al sistema, l’avvio di esecuzione di tale task (premendo l’opportuno tasto nell’interfaccia) e l’osservazione dei valori che vengono mostrati nella GUI.

L’altro attore è il dispositivo Master, che ha il compito di mostrare ed aggiornare l’interfaccia grafica e di interrogare il dispositivo Slave in base alla scelta dell’utente. Questo attore ha quindi queste attività: mostrare l’interfaccia grafica, avviare i task scelti dall’utente e inviare i messaggi ai dispositivi Slave.

Gli ultimi attori da considerare sono i dispositivi Slave, che hanno il compito di eseguire polling sui sensori a loro associati e di rispondere alle richieste Modbus del dispositivo Master. Le loro attività quindi sono: controllo sensori e ricezione e risposta di messaggi Modbus.

Attore	Utente
Precondizione	Il sistema è avviato e mostra la GUI a seguito del logo μEZ , tutti i tasti sono selezionabili e tutti i dispositivi sono avviati. L'utente è munito di penna specifica per interfacciarsi col dispositivo TouchScreen.
Postcondizione	La scelta dell'utente è stata soddisfatta
Scelta task	<ol style="list-style-type: none"> 1. interfaccia gestione LED 2. interfaccia monitoraggio sensori 3. interfaccia di debug
Esecuzione task	<ol style="list-style-type: none"> 1. accendere o spegnere luci 2. controllo sensori 3. attività di debug
Osserva valori	<ol style="list-style-type: none"> 1. valutazione valori mostrati dalla GUI

4.2 Sequence Diagram

Questo diagramma rappresenta una generica interazione tra utente e sistema. Ad ogni scelta dell'utente, visualizzabile come un messaggio (ovviamente non testuale) inviato dall'utente al dispositivo Master, viene trasformata in messaggio Modbus da inviare al corrispondente dispositivo Slave. Il dispositivo Slave, prima di essere interrogato via Modbus, continua ad eseguire polling sui sensori a lui collegati, per tenersi aggiornato sul loro valore. Al momento della richiesta Modbus, il dispositivo Slave termina momentaneamente di eseguire polling sui sensori e invia l'ultimo valore acquisito da questi al dispositivo Master. Quest'ultimo, appena riceve i valori, aggiorna l'interfaccia grafica e mostra all'utente il risultato dell'interrogazione. Fatto ciò, il dispositivo Master rimane in attesa di ordini dall'utente, mentre il dispositivo Slave continua a fare polling sui sensori a lui collegati.

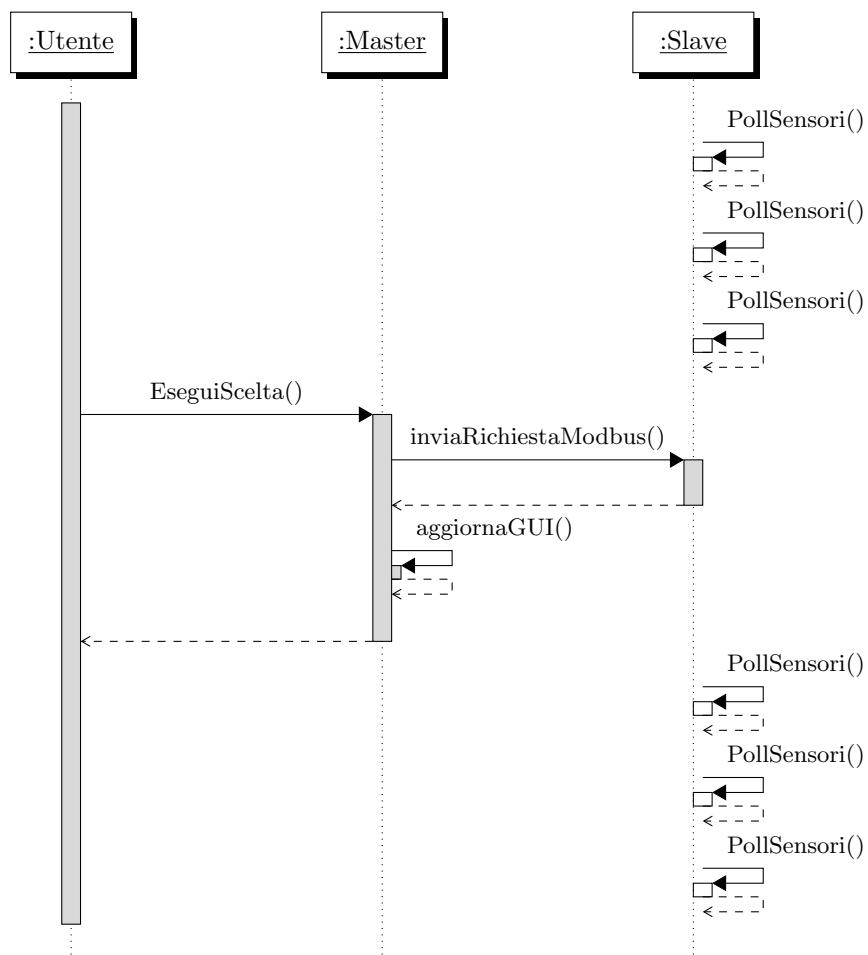


Figura 4.1: Esempio di attività generica con il sistema.

Capitolo 5

Implementazione del sistema

A seguito di tutte le considerazioni sul modello di sistema e sulla tecnologia utilizzata, è stato deciso di utilizzare un protocollo di comunicazione industriale standard chiamato *Modbus*, che sfrutta la comunicazione seriale, un’interfaccia grafica basata su *emWin* e uno strato applicativo che verrà discusso in questa sezione.

5.1 Protocollo Modbus

Modbus è un protocollo semplice di tipo Master-Slave, cioè esiste un dispositivo centrale che invia una richiesta e i diversi slave soddisfano la richiesta dando una risposta al Master. Il dispositivo Master è sempre pronto ad inviare una richiesta, mentre gli Slave rimangono sempre in ascolto e non inviano alcun tipo di messaggio se non vengono interpellati dal Master.

Questo protocollo è stato progettato in modo da far comunicare un Master con un massimo di 256 Slave, inviando un messaggio in cui si specifica l’indirizzo del destinatario Slave e il tipo di richiesta. Quando uno Slave riceve un messaggio, controlla se gli appartiene tramite l’indirizzo del messaggio, altrimenti lo scarta; questo deve avvenire poichè la comunicazione seriale non necessita di apparecchiature che indirizzano il messaggio al giusto destinatario, ma la comunicazione è garantita da una rete di “fili” che collegano i diversi dispositivi.

5.1.1 Tipi di messaggi

Il messaggio tipico del protocollo è formato da questi campi:

campo	byte	descrizione
Indirizzo	1	l’indirizzo del dispositivo con cui il master ha stabilito la transazione
Funzione	1	il codice della funzione che deve essere o è stata eseguita
Dati	$2 \cdot n_{\text{dati}}$	i dati che devono essere scambiati tra i due dispositivi in base alla funzione scelta
CRC	2	il controllo d’errore composto secondo l’algoritmo CRC16

Se un dispositivo individua un errore nel messaggio ricevuto (di formato, di parità o nel CRC16) il messaggio viene considerato non valido e viene notificato al Master (o scartato); se uno slave quindi rileva un errore nel messaggio, non eseguirà l’azione e non risponderà alla domanda, così come se ricevesse un messaggio con l’indirizzo non corrispondente al suo.

5.1.2 Registri

Il protocollo Modbus permette la comunicazione tra master e slave tramite diversi tipi di variabili chiamate “registri”. In base al tipo di registro, sonomesse diverse operazioni:

- i registri di “**Input**” rappresentano dei booleani (registri a bit singolo) che possono essere solo letti, quindi in questi può essere eseguita una funzione di tipo read;
- i registri di “**Input Discreti**” hanno lo stesso funzionamento, in generale il master può solo leggere i registri di questo tipo;
- i registri di “**Holding**” rappresentano una word a 16 bit che può essere sia letta sia scritta;
- i registri di “**Coil**” rappresentano un booleano che può essere sia letto che scritto dal Master;

Ogni registro può essere quindi associato ad una variabile di stessa grandezza o che rappresenta una grandezza simile (facendo un opportuno cast). Il motivo per cui vengono identificate queste variabili come registri deriva dal fatto che questo protocollo veniva utilizzato in un sistema in cui erano effettivamente presenti dei registri fisici associati a componenti hardware. In particolare i registri di Coil erano associati a dei Relè (infatti Coil significa “avvolgimento”) e per questo vengono rappresentati con un booleano (1 e 0 rappresentano bene la situazione acceso-spento).

5.1.3 Tipi di richiesta

Modbus ha diversi tipi di richiesta, ognuna riguardante un registro specifico:

Numero funzione	Nome funzione	Registro associato
01	Read Coil Status	Coil
02	Read Input Status	Input
03	Read Holding Registers	Holding
04	Read Input registers	Input Discreto
05	Force Single Coil	Coil
06	Prese Single register	Holding
15	Force multiple Coils	Coil
16	Preset Multiple Registers	Holding

Viene riportata di seguito la descrizione dettagliata delle funzioni più utilizzate:

- **Read Coil Status (01)**: permette di richiedere lo stato ON o OFF di variabili logiche binarie (registri output R/W). La modalità broadcast non è permessa.
- **Read Input Status (02)**: è operativamente identica alla precedente ma riguarda i registri input.
- **Read Output Registers (03)**: permette di richiedere il valore di registri a 16 bit (word) contenenti variabili numeriche (registri output R/W). La modalità broadcast non è permessa.
- **Read Input Registers (04)**: è operativamente identica alla precedente ma riguarda i registri Input.
- **Force Single Coil (05)**: permette di forzare lo stato di una singola variabile binaria ON o OFF. La modalità broadcast è permessa.
- **Preset Single Register (06)**: permette di impostare il valore di un singolo registro a 16 bit. La modalità broadcast è permessa.
- **Force Multiple Coils (15)**: permette di forzare lo stato di ciascuna variabile binaria in un blocco consecutivo. La modalità broadcast è permessa.
- **Preset Multiple Registers (16)**: permette di impostare il valore di un blocco consecutivo di registri a 16 bit. La modalità broadcast è permessa.

5.1.4 CRC16

Gli ultimi due caratteri del messaggio contengono il codice di ridondanza ciclica (Cyclic Redundancy Check) calcolato secondo l'algoritmo CRC16.

Per il calcolo di questi due caratteri il messaggio (indirizzo, codice funzione e dati scartando i bit di start, stop e l'eventuale parità) viene considerato come un unico numero binario “continuo” di cui il bit più significativo (MSB) viene trasmesso prima. La procedura passo-passo per il calcolo del CRC16 è la seguente:

1. Caricare un registro a 16 bit con FFFFh (tutti i bit a 1).
2. Fare l'OR esclusivo del primo carattere con il byte superiore del registro , porre il risultato nel registro.
3. Spostare il registro a destra di un bit.
4. Se il bit uscito a destra dal registro (flag) è un 1, fare l'OR esclusivo del polinomio generatore 1010000000000001 con il registro.
5. Ripetere per 8 volte i passi 3 e 4.
6. Fare l'OR esclusivo del carattere successivo con il byte superiore del registro, porre il risultato nel registro.
7. Ripetere i passi da 3 a 6 per tutti i caratteri del messaggio.
8. Il contenuto del registro a 16 bit è il codice di ridondanza CRC che deve essere aggiunto al messaggio

Questa parte del messaggio è particolarmente importante perché garantisce la correttezza del messaggio; in un sistema industriale, quindi disturbato, è possibile che un messaggio su seriale possa essere afflitto da disturbi, quindi è necessario garantire la sicurezza della richiesta. Comandare un dispositivo con un messaggio sbagliato corrisponde a fare danni al sistema o a ciò che lo circonda. In un contesto casalingo, potrebbe non creare molti danni, però può creare disagio; ad esempio, se piove e l'utente vuole chiudere le finestre, se il messaggio risulta corrotto potrebbe essere interpretato come “aprire le finestre” e ciò crea problemi.

5.1.5 Sincronizzazione

La sincronizzazione del messaggio tra trasmettitore e ricevitore viene ottenuta interponendo una pausa tra i messaggi pari ad almeno 3.5 volte il tempo di un carattere. Se il dispositivo ricevente non riceve per un tempo di 3,5 caratteri, ritiene completato il messaggio precedente e considera che il successivo byte ricevuto sarà il primo di un nuovo messaggio e quindi un indirizzo.

5.2 Implementazione del protocollo Modbus

Per implementare questo protocollo, sono state prese due vie alternative, rispettivamente per il dispositivo Master e per i dispositivi Slave:

- Master: è stato implementato il protocollo basandosi sulla descrizione dello standard;
- Slave: è stato eseguito il porting di una libreria chiamata FreeModbus e la creazione di una libreria ridotta MiniModbus.

Di seguito verranno descritte le implementazioni nel dettaglio.

5.2.1 Master

L'implementazione del software del dispositivo Master è molto più semplice dello Slave e la procedura per la programmazione non presenta particolari problemi.

Per prima cosa, bisogna aggiungere una struttura dati che consente di manipolare facilmente i messaggi Modbus. La struttura presente nel progetto è la seguente:

```

1  typedef struct
2  {
3      int8_t address; //indirizzo del ricevente
4      int8_t len;    //numero di byte del messaggio
5      function func; //funzione richiesta del messaggio
6      exception error; //eccezione riscontrata nel messaggio
7      uint8_t data[MODBUS_SERIAL_RX_BUFFER_SIZE]; //sezione dati del messaggio
8      uint16_t data_converted[125]; //dati omogenei convertiti
} _modbus_rx;

```

In questo modo, si semplifica notevolmente il lavoro di interpretazione del messaggio: ogni carattere potrà popolare i campi di questa struttura, essendo anche ottimizzati rispetto alla grandezza dei byte.

Bisogna notare che il campo CRC non è presente, in quanto l'elaborazione di questo non è utilizzata all'esterno del protocollo e deve essere calcolato real time durante la ricezione del messaggio (quindi non serve memorizzarlo).

Bisogna notare inoltre che esiste una sezione **data[]** diversa da **data_converted[]**, poiché i dati arrivano a coppie di byte (memorizzati in **data[]**), in modo da rappresentare non un **char** ma una **word**; in questo modo si può rappresentare un numero molto più grande, però deve essere convertito shiftando i bit dei due singoli **char** in una singola **word**. Questo spiega perché vengono rappresentate da variabili di tipo diverso, ossia un **uint8_t** per il **char** e **uint16_t** per la **word**.

Successivamente bisogna attivare e dirigere nel dispositivo la seriale e il timer interno; in questo modo si implementa la ricezione e invio dei messaggi e la sincronizzazione dei dispositivi. Dal momento che la sincronizzazione corrisponde a “contare” il tempo tra un carattere e l’altro (quando il Master riceve la risposta), basta attivare un timer appena si riceve il primo carattere di risposta e comportarsi come segue:

1. rimango in ascolto per leggere un carattere e contemporaneamente conto;
2. ho finito di contare?
 - SI, allora ho terminato la lettura del messaggio;
 - NO, allora continuo ad ascoltare;
3. ho ricevuto un carattere?
 - SI, allora resetto il contatore quindi ricomincio a contare da 0, poi torno al punto 1;
 - NO, allora torno al punto 1;

Nel codice, è stata usata una variabile chiamata **modbus_serial_wait** che rappresenta il tempo contato secondo il delay gestito dalla API di **μEZ** **void UEZTaskDelay(int ms)**; finché non ci sono

caratteri disponibili, il valore di questa variabile viene decrementato ogni millisecondo finché non vale zero (indica il tempo scaduto).

Il codice che si occupa di questo è rappresentato dalla funzione sotto trascritta, presente nel file *modbus_function.c*:

```
110 void MODBUS_SERIAL_WAIT_FOR_RESPONSE()
111 {
112     modbus_serial_state=MODBUS_GETADDY;
113     modbus_serial_new = TRUE;
114
115     while(--modbus_serial_wait >= 0)
116         //se non ci sono caratteri disponibili, aspetto o vado in timeout
117         if(!modbus_kbhit())
118             delay_us(1);
119         else
120             //resetto il timer per 30 ms e mi preparo per aspettare di nuovo
121             modbus_serial_wait=30;
122
123     //se non ho letto nulla
124     if(frame_received == FALSE)
125         //errore!
126         modbus_rx.error=TIMEOUT;
127
128     else
129         modbus_rx.error = 0;
130
131
132     modbus_serial_wait = MODBUS_SERIAL_TIMEOUT;
133     modbus_serial_new = TRUE;
134     frame_received = FALSE;
135
136 }
```

Per quanto riguarda la seriale, visto che il sistema utilizzato è molto semplice (quindi senza gestione ad alto livello degli eventi del sistema), l'unico modo per non sprecare cicli di clock per il polling su seriale è stato quello di utilizzare gli interrupt. È stato quindi implementato un sistema di interrupt che si potesse adattare al protocollo Modbus: ad ogni carattere ricevuto si attiva la funzione `uart_rx_interrupt()`, in base al contatore globale dei caratteri (la variabile `modbus_serial_state`) si gestisce in maniera automatica l'interpretazione dei singoli caratteri inserendoli nel campo giusto della struttura dati, incrementando, dopo aver acquisito un nuovo carattere, il valore di questa variabile. Di fatto questa rappresenta la “posizione” che ha il carattere appena ricevuto all'interno della struttura dati. In particolare questa variabile acquisisce questa forma:

```

2 enum {
3     MODBUS_GETADDY=0,
4     MODBUS_GETFUNC=1,
5     MODBUS_GETDATA=2
6 } modbus_serial_state;

```

questa enumerazione rappresenta con il primo campo la parte di indirizzo del messaggio, la seconda indica la funzione, la terza la sezione dati. In questo modo è molto più semplice (ed ottimizzato) gestire l'inserimento dei valori nella struttura.

Il codice associato a questa procedura si trova nel file `modbus_function.c`:

```

202 void uart_rx_interrupt(void)
203 {
204
205     char c;
206
207     c = UART_ReceiveByte(_LPC_UART);
208
209
210     if(modbus_serial_state == MODBUS_GETADDY)
211     {
212         modbus_serial_crc.d = 0xFFFF;
213         modbus_rx.address = c;
214         modbus_serial_state++;
215         modbus_rx.len = 0;
216         modbus_rx.error=0;
217     }
218     else if(modbus_serial_state == MODBUS_GETFUNC)
219     {
220         modbus_rx.func = c;
221         modbus_serial_state++;
222     }
223     else if(modbus_serial_state == MODBUS_GETDATA)
224     {
225         if (modbus_rx.len>=MODBUS_SERIAL_RX_BUFFER_SIZE)
226             modbus_rx.len=MODBUS_SERIAL_RX_BUFFER_SIZE-1;
227
228         modbus_rx.data[modbus_rx.len]=c;
229         modbus_rx.len++;
230     }
231
232     Message[indix++] = c;
233
234     modbus_serial_new = FALSE;
235     frame_received = TRUE;
236 }

```

5.2.2 Slave

L'implementazione del protocollo di tipo Slave è molto diversa e risulterebbe molto più complessa di quella di un generico Master.

FreeModbus

Esiste una libreria embedded “portable” (dal punto di vista implementativo) chiamata **FreeModbus**, che propone uno stack Modbus completo a patto che si scriva il porting delle funzioni che si interfacciano con il nostro hardware. Queste funzioni riguardano la seriale e il timer, utilizzate per lo stesso motivo del Master, e si trovano nei rispettivi file di porting:

- *portserial.c*
- *porttimer.c*

Nel file *portserial.c* è necessario modificare le funzioni di interrupt, di come si ricevono i caratteri da seriale e come si inviano. Nel file *porttimer.c* si modifica invece l'interrupt del timer e la modalità di attivazione e setting. In entrambi i casi, bisogna scrivere la funzione di inizializzazione della corretta periferica. È importante sapere che bisogna cambiare il contenuto delle funzioni, ma non il nome, perché le altre funzioni dipendono dai nomi già scritti.

In particolare per *portserial.c* bisogna implementare queste funzioni:

```

//abilitazione dei canali Rx e Tx
2 void vMBPortSerialEnable( BOOL xRxEnable, BOOL xTxEnable )
{
    ...
}

//chiusura porta seriale
8 void vMBPortClose( void )
{
    ...
}

//inizializzazione della porta seriale
14 BOOL xMBPortSerialInit( UCHAR ucPORT,
                           ULONG ulBaudRate,
                           UCHAR ucDataBits,
                           eMBParity eParity )
{
    ...
}

//invio di un carattere
22 BOOL xMBPortSerialPutByte( CHAR ucByte )
{
    ...
}

//ricezione di un carattere
28 BOOL xMBPortSerialGetByte( CHAR * pucByte )
{
    ...
}

//interrupt della seriale
34

```

```

36     BOOL UART_IRQHandler( void )
37 {
38     ...
39
40     /* Receive Data Available */
41     prvvUARTRxISR( );
42 }

```

mentre per *porttimer.c* bisogna implementare queste funzioni:

```

1 //inizializzazione del timer
2 BOOL xMBPortTimersInit( USHORT usTim1Timerout50us )
3 {
4     ...
5 }
6
7 //abilitazione start del timer
8 void vMBPortTimersEnable( )
9 {
10    ...
11 }
12
13 //stop del timer e reset
14 void vMBPortTimersDisable( )
15 {
16    ...
17 }
18
19 //interrupt del timer
20 void TIMERO_IRQHandler(void)
21 {
22     ( void )pxMBPortCBTimerExpired( );
23 }

```

Una volta implementate queste funzioni, è necessario creare i registri nel main e le relative funzioni per interfacciarsi con essi. Dei registri bisogna, prima di dichiararli sotto forma di variabili, scrivere il loro “indirizzo fisico”, cioè l’indirizzo da cui si parte a contarli (è arbitrario) e quanti se ne vogliono creare. Tutto questo è da fare tramite delle macro, in modo da poter verificare tramite protocollo le corrette richieste Modbus, per poter generare un errore da protocollo (NON da software, perché significherebbe andare a leggere o a scrivere in una zona di memoria non consona e quindi si genererebbe un grave errore o uno stallo di sistema). Un esempio:

```

2 //indirizzo dei registri di input
3 #define REG_INPUT_START 1000
4 //quantita' di registri di input
5 #define REG_INPUT_NREGS 4
6
7 //indirizzo dei registri di holding
8 #define REG_HOLDING_START 2000
9 //quantita' di registri di holding
10 #define REG_HOLDING_NREGS 130
11
12 //assegnamento alla variabile nota alle API
13 static USHORT usRegHoldingStart = REG_HOLDING_START;

```

```

14 //dichiarazione dei registri di holding
15 static USHORT usRegHoldingBuf[REG_HOLDING_NREGS];
16
17 //assegnamento alla variabile nota alle API
18 static USHORT usRegInputStart = REG_INPUT_START;
19 //dichiarazione dei registri di input
20 static USHORT usRegInputBuf[REG_INPUT_NREGS];

```

MiniModbus

Poichè l'architettura target non sempre offre grande disponibilità di memoria e di stack, è necessario utilizzare una libreria più ottimizzata e performante in modo che possa offrire il protocollo Modbus anche nelle architetture più semplici. Per questo motivo è stata implementata una libreria “portatile” (dal punto di vista implementativo) che è stata chiamata MiniModbus. Questa libreria offre le stesse potenzialità della libreria FreeModbus, però risulta più performante per le architetture meno potenti (come i microcontrollori e i microprocessori di fascia bassa).

L'architettura target in questo caso è stata il PIC16F77 che, come è stato descritto, ha 2^8 spazi di indirizzamento di memoria. FreeModbus necessita di 2^{16} spazi di indirizzamento di memoria e quindi risulta troppo grande per il PIC. Inoltre questa architettura permette 2^6 byte di locazioni di memoria contigua, mentre Modbus vuole una lunghezza di messaggi uguale a 256 byte, quindi 2^8 byte, quindi la lunghezza del messaggio è stata ridotta a 64 byte.

Per eseguire il porting di questa libreria è necessario modificare il file *modbus_port.c* riscrivendo il contenuto di queste funzioni (sostituendo al posto dei puntini la rispettiva implementazione):

```

1 //implementazione del delay per millisecondi
2 void delay_us(uint32_t delayInMs)
3 {
4     ...
5 }
6
7 //abilitazione del timer
8 void TimersEnable( )
9 {
10    ...
11 }
12
13 //disabilitazione del timer
14 void TimersDisable( )
15 {
16    ...
17 }
18
19 //attiva ricezione seriale
20 void RCV_ON(void)
21 {
22    ...
23 }
24
25 //disabilita ricezione seriale
26 void RCV_OFF(void)
27 {
28    ...
29 }
30
31 //abilita il timeout (per il fine messaggio)

```

```

33 | void modbus_enable_timeout(BOOL enable)
34 | {
35 |     if (enable) {
36 |
37 |         ...
38 |
39 |     }
40 |
41 |     else
42 |         ...
43 |
44 | }
45 |
46 | //scrive un carattere su seriale
47 | void modbus_serial_putc(int8_t c)
48 | {
49 |     Message[indix] = c;
50 |     indix++;
51 |
52 |     ...
53 |
54 | }
55 |
56 | //interrupt generato dalla ricezione di un byte su seriale
57 | void uart_rx_interrupt(void)
58 | {
59 |     char c = ... //ricezione del carattere dal canale seriale
60 |
61 |     //nuovo carattere ricevuto
62 |     modbus_serial_new = TRUE;
63 |
64 |     if(modbus_serial_state == MODBUS_GETADDY)
65 |     {
66 |         modbus_serial_crc.d = 0xFFFF;
67 |         modbus_rx.address = c;
68 |         modbus_serial_state++;
69 |         modbus_rx.len = 0;
70 |         modbus_rx.error=0;
71 |     }
72 |     else if(modbus_serial_state == MODBUS_GETFUNC)
73 |     {
74 |         modbus_rx.func = c;
75 |         modbus_serial_state++;
76 |     }
77 |     else if(modbus_serial_state == MODBUS_GETDATA)
78 |     {
79 |         if (modbus_rx.len>=MODBUS_SERIAL_RX_BUFFER_SIZE)
80 |             modbus_rx.len=MODBUS_SERIAL_RX_BUFFER_SIZE-1;
81 |
82 |         modbus_rx.data[modbus_rx.len]=c;
83 |         modbus_rx.len++;
84 |     }
85 |
86 |     Message[indix++] = c;
87 |
88 |     modbus_enable_timeout(TRUE);
89 |
}

```

È importante sostituire solo dove ci sono i puntini le rispettive implementazioni delle funzioni. Una volta eseguito il porting di queste funzioni, si può prendere il codice presente e utilizzarlo per la propria architettura (file *modbus.h*, *modbus.c*, *port.c*, *port.h*, *modbus_port.h*, *modbus_port.c*, *utils.c*, *utils.h*).

5.3 Funzionamento generale di LPC1768

La progettazione del software di questo processore si è divisa in due fasi: la prima consisteva nel creare le singole parti del progetto, testarle tramite prototipi e assemblare il prodotto finito, secondo lo schema ingegneristico “evoluzionario”, per poi passare alla seconda parte in cui è stato ottimizzato tutto il lavoro.

È stato eseguito il porting della libreria FreeModbus modificando le API che si interfacciano con l'hardware (UART e Timer), poi è stato creato il software che si occupa del controllo sensori e infine è stato calato il tutto nel contesto di FreeRTOS per eseguire due task separati, uno di controllo sensori e uno di esecuzione del protocollo.

Eseguendo però due task separati, con entrambi una priorità alta, si è notato che la velocità di risposta della comunicazione era veramente lenta, inoltre non si aveva quasi mai la risposta corretta dal sensore DHT11. Per risolvere questo, è stato deciso di utilizzare un semaforo di tipo Mutex sulla risorsa che era condivisa tra i due task, ossia il processore: anche se può sembrare strano, ci si è resi conto che non era possibile eseguire “contemporaneamente” il task del controllo sensori e quello della comunicazione, perché entrambi volevano massima priorità di utilizzo del processore. Forzando però il sistema operativo ad eseguire prima un task e poi l'altro, l'esecuzione non era più asincrona ma era diventata sequenziale, quindi utilizzare più thread era praticamente inutile, si occupavano risorse per niente.

Alla fine della progettazione quindi, si è deciso di utilizzare la precisione di calcolo (in ambito di tempistiche) di FreeRTOS: dal momento che questo sistema è real-time, ha la proprietà di garantire la fine di un'operazione in un tempo preciso, quindi è stato creato un unico task con massima priorità (quindi massima velocità di esecuzione), in modo da eseguire sequenzialmente prima il controllo sensori e poi la comunicazione, diminuendo il ritardo sia di risposta dei sensori sia della comunicazione seriale.

5.3.1 Main

Nella funzione di partenza, come vuole lo standard di FreeRTOS, è necessario inizializzare l'hardware e le relative variabili nell'apposita funzione di inizializzazione chiamata `static void setupHardware(void)`, poi bisogna creare il task da eseguire tramite l'apposita funzione `xTaskCreate` che prende in input: il nome della funzione da eseguire come task, la stringa che rappresenta il nome della funzione (utile durante il debug), la dimensione dedicata dello stack per questa, i parametri da passare, la priorità del task e lo handler della funzione (variabile in cui memorizzare l'indirizzo corrispondente). In questo caso è stato impostato come funzione da eseguire quella chiamata “MainTask”, identificata dalla stringa `"MainTask"`, impostando uno stack minimo tramite la macro `configMINIMAL_STACK_SIZE`, non inviando alcun valore, impostando la massima priorità di esecuzione e non associando alcun handler (perché l'esecuzione del task non doveva essere controllata dall'esterno).

Per inizializzare il protocollo Modbus, si deve utilizzare la funzione `eMBInit`, i cui parametri indicano, in ordine, il tipo di comunicazione (RTU, ASCII o TCP), l'indirizzo dello Slave, il numero della porta seriale che si vuole utilizzare, il baudrate e il bit di parità. In questo caso si è utilizzato come tipo RTU, l'indirizzo 10, la porta UART0, 38400 di baudrate e nessun bit di parità.

5.3.2 Modello dei dati

Per facilitare la comunicazione e l'utilizzo dei dati interni al sistema, sono state create delle `struct` che hanno il compito di organizzare i dati.

```

2  typedef struct sens{
4      USHORT mic;
5      USHORT vibro;
6      USHORT distance1;
7      USHORT distance2;
8      USHORT lumino;
9  }Sensors;
10
11
12 typedef struct dht{
13     USHORT humidity;
14     USHORT temperature;
15 } dht11;
16

```

La prima struttura dati, chiamata **Sensors**, è stata utilizzata per memorizzare tutti i dati provenienti dai sensori diversi dal DHT11, mentre la seconda struttura dati, chiamata **dht11**, è stata utilizzata per memorizzare i due valori provenienti dal sensore temperatura. La scelta di dividere le due strutture dati i valori elaborati dai sensori è stata fatta per organizzare meglio il trattamento dei dati, visto che il controllo effettuato dal DHT11 avviene in tempi diversi rispetto al controllo degli altri sensori. I valori sono memorizzati in zone di memoria di tipo “unsigned int”, poiché Modbus deve trattare esclusivamente valori di questo tipo.

Nella prima struttura sono stati memorizzati questi valori:

- **mic** associato al sensore di rumore;
- **vibro** associato al sensore di vibrazione;
- **distance1** associato al sensore di presenza;
- **distance2** associato al sensore di distanza;
- **lumino** associato al sensore di luminosità.

Nella seconda struttura sono stati memorizzati questi valori:

- **temperature** in cui si memorizza la temperatura;
- **humidity** in cui si memorizza l'umidità.

Lato Modbus invece è stato utilizzato un array di puntatori a variabili di tipo “unsigned int”, dichiarato come segue:

```
2  USHORT *usRegHoldingBuf [REG_HOLDING_NREGS];
```

La define REG_HOLDING_NREGS indica la quantità di registri di tipo Holding che è presente nel sistema. È stato deciso di utilizzare un array di puntatori per definire un binding tra le variabili associate ai sensori e i registri Modbus: in questo modo non è necessario aggiornare in continuazione anche i registri Modbus, ma semplicemente ogni volta che si richiede un registro, si andrà a prendere il valore puntato da quel registro (ottimizzando quindi i tempi). Inoltre questo permette la separazione tra la parte del protocollo e la parte del controllo sensori: il binding si esegue al mo-

mento dell'inizializzazione e dopo la parte dedicata al protocollo non utilizzerà mai esplicitamente le variabili associate alla parte del controllo sensori. L'inizializzazione è stata resa in questo modo:

```

1  *(usRegHoldingBuf      ) = (USHORT *) &sensors.distance1;
2  *(usRegHoldingBuf + 1 ) = (USHORT *) &sensors.distance2;
3  *(usRegHoldingBuf + 2 ) = (USHORT *) &sensors.lumino;
4  *(usRegHoldingBuf + 3 ) = (USHORT *) &sensors.mic;
5  *(usRegHoldingBuf + 4 ) = (USHORT *) &sensors.vibro;
6  *(usRegHoldingBuf + 5 ) = (USHORT *) &actual_DHT11.humidity;
7  *(usRegHoldingBuf + 6 ) = (USHORT *) &actual_DHT11.temperature;

```

5.3.3 MainTask

La funzione principale esegue prima il controllo sui sensori e dopo esegue la funzione associata al protocollo Modbus. Poiché il controllo sensori non deve interferire durante l'esecuzione della comunicazione, si controlla che non stia avvenendo uno scambio di dati; questo è reso tramite la variabile di tipo BOOL *modbus_is_running*, che vale 1 se è in esecuzione uno scambio di dati, altrimenti vale 0. Poiché però nessun interrupt di comunicazione (proveniente dalla seriale) deve interferire sul controllo sensori, è stato deciso di interrompere la ricezione tramite interrupt dei byte provenienti dalla seriale, tramite la funzione **vMBPortSerialEnable**, che come primo parametro riceve un BOOL per consentire l'attivazione dell'interrupt RX della seriale e come secondo parametro un BOOL per l'attivazione dell'interrupt TX.

La funzione **ModbusTask** esegue la funzione **eMBPoll()**, che si occupa di controllare se è stato registrato nello stack di eventi Modbus una ricezione di dati o un invio completato.

Questo task quindi è stato creato in questo modo:

```

1 void MainTask(void *pvParameters){
2
3     while(1){
4
5         if(!modbus_is_running){
6             vMBPortSerialEnable(0,0);
7             SensorsTask(0);
8             vMBPortSerialEnable(1,0);
9         }
10
11         ModbusTask(0);
12     }
13
14 }

```

5.4 Funzionamento generale di PIC16F77

5.5 Funzionamento generale di LPC1788

5.6 Interfaccia grafica

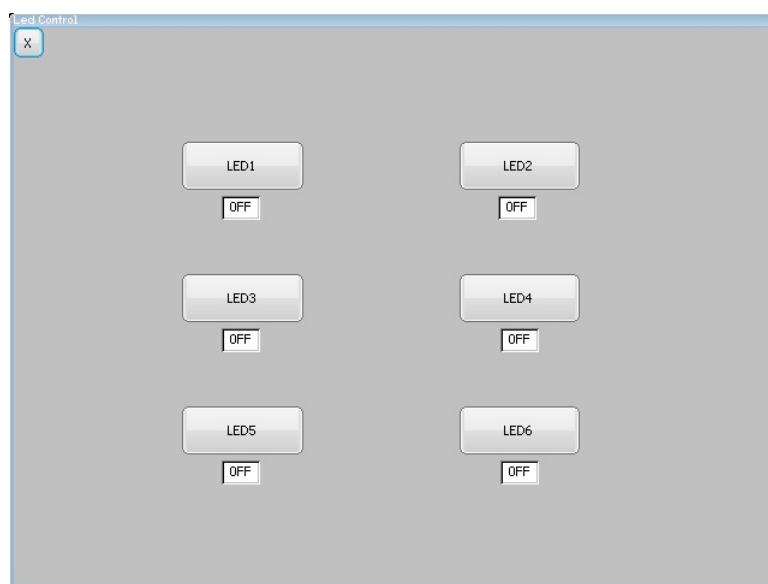
Appena il processo principale viene mandato in esecuzione, viene presentata la schermata iniziale: tramite questa schermata, si può accedere ai vari sottoprogrammi corrispondenti cliccando l'icona

corrispondente. Si può accedere quindi alla schermata di controllo luci, di controllo sensori e di debug; questa ultima ha lo scopo di capire, da parte di un tecnico, l'origine di un guasto, quindi se è un problema legato al protocollo, agli slave o alle varie periferiche pilotate dagli Slave.

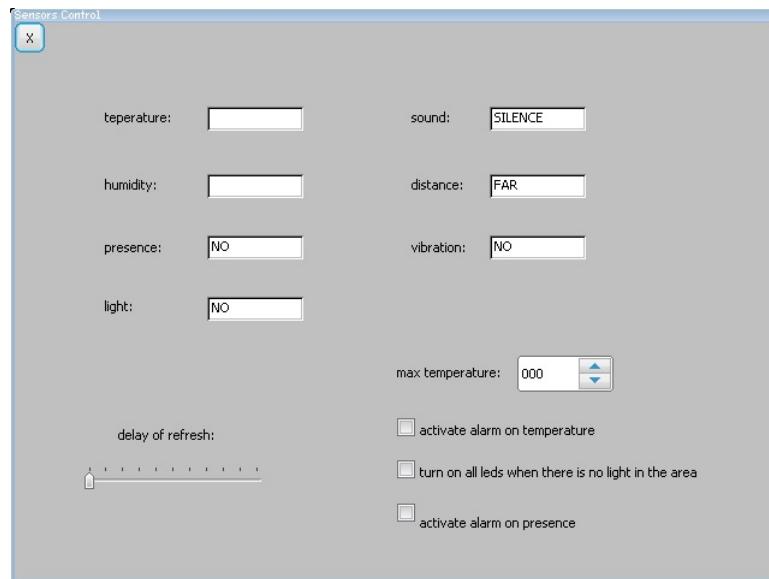
5.6.1 Menù principale



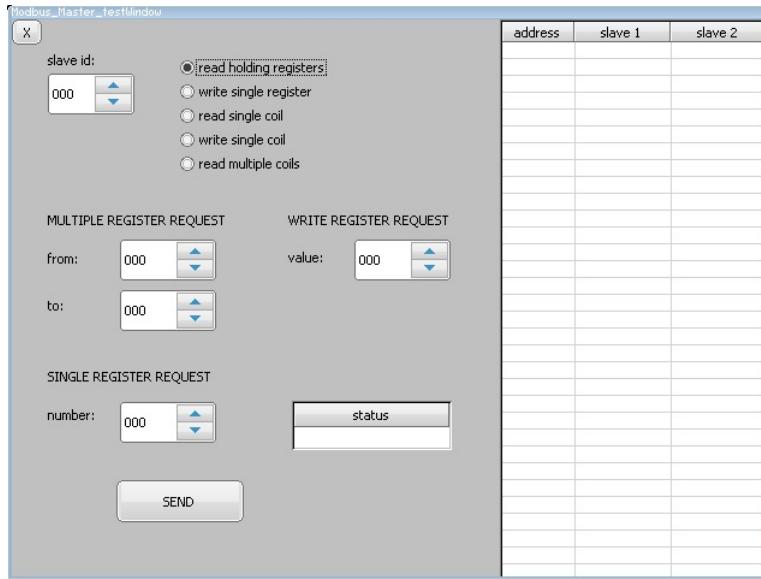
5.6.2 Controllo Luci



5.6.3 Controllo Sensori



5.6.4 Schermata di Debug



5.7 Interazione con i componenti hardware

È stato deciso di dividere la gestione delle componenti hardware come segue.

5.7.1 Sensori

I sensori vengono pilotati e controllati dal processore LPC1768, in quanto offre un'interfaccia semplice per la gestione di questi componenti, oltreché offre più sicurezza di controllo di questi. Infatti, avendo un sistema operativo, si è in grado di gestire il controllo dei sensori su threads diverse, in modo che non si sprechino risorse e che quindi il processore non riesca a gestire la parte più importante di tutto il sistema, ossia la comunicazione.

Per questo motivo questo slave è in grado di interpretare messaggi sia di lettura/scrittura di registri di holding, sia di registri di coil. I registri di holding verranno utilizzati per memorizzare ed inviare i valori ottenuti dal sensore di temperatura e di umidità, mentre i registri di coil per i sensori di vibrazione, di luce, di distanza e di ostacolo.

5.7.2 Relè e luci

I relè, e quindi anche le luci a led, vengono pilotati tramite il microcontrollore PIC16F77, in quanto non è in grado di eseguire operazioni troppo onerose (controllare in polling dei sensori non darebbe la possibilità di comunicare via Modbus) e offre un'interfaccia semplice di invio segnali digitali ai relè. Quando verrà attivato il segnale da parte del PIC, i relè verranno percorsi da corrente, creando quindi il contatto necessario per far ricevere corrente alle luci.

Per questo, lo slave è in grado di interpretare solo messaggi di lettura/scrittura coil, poiché rappresentano bene il messaggio di on/off dei relè. Nell'architettura di origine di questo protocollo infatti i registri di coil venivano associati direttamente ai relè collegati al PLC.

5.8 Diagramma dei componenti

Di seguito si riporta l'organizzazione di tutto il progetto

5.8.1 Architettura Hardware

DA SCRIVERE

5.8.2 Architettura Software

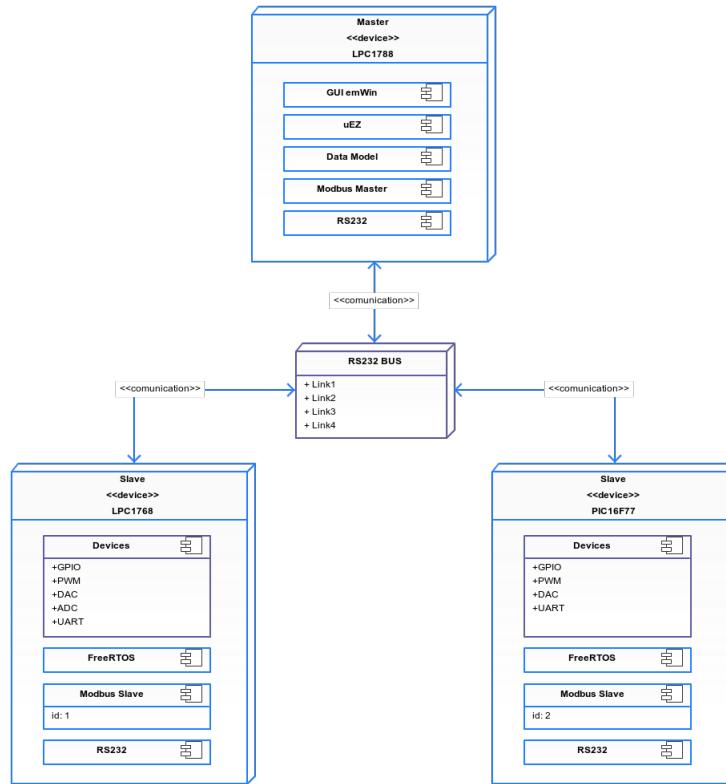


Figura 5.1: architettura del sistema

Capitolo 6

Programmi utilizzati

6.1 LPC1788

6.2 LPC1768

6.3 PIC16F77