

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTÀ DI INGEGNERIA
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA DELLE
TELECOMUNICAZIONI



TESI DI LAUREA

SISTEMA DI CONTROLLO PER UNA
SERRA INTELLIGENTE TRAMITE RETI
DI SENSORI WIRELESS

RELATORE: CH.MO PROF. LUCA SCHENATO

CORRELATORE: CH.MO PROF. ANGELO CENEDESE

LAUREANDO: CORRADO SCARMAGNAN

ANNO ACCADEMICO 2005-2006

ai miei genitori e ad Anita

Indice

Abstract	7
1 Introduzione	9
1.1 Da una serra tradizionale ad una serra “intelligente”	10
1.2 Stato dell’arte e letteratura	11
1.3 Contributo e descrizione dei capitoli	12
2 Wireless Sensor Networks	15
2.1 Caratteristiche delle reti di sensori wireless	17
2.2 Motes	19
2.2.1 Hardware: Telos	19
2.2.2 Software: TinyOS e nesC	21
3 Serra	27
3.1 Modello dinamico	27
3.2 Dimensioni e materiale	28
3.3 Attuatori e loro collocazione	32
3.4 Identificazione	38
3.5 Controllo	40
4 Progettazione del prototipo sperimentale	43
4.1 Configurazione dell’hardware	45
4.1.1 I bus SPI e I2C	47
4.1.2 Modalità di funzionamento degli attuatori	52

4.2	Software dell'applicazione	55
4.2.1	Software dei nodi della WSN	55
4.2.2	Interazione con la rete mediante interfaccia grafica	58
5	Prove sperimentali ed analisi dei risultati	63
5.1	Limitazioni inerenti le prove sperimentali	63
5.2	Comportamento nel caso la temperatura esterna sia inferiore a quella desiderata	65
5.2.1	Analisi ed interpretazione dei risultati	65
5.3	Comportamento nel caso la temperatura esterna sia superiore a quella desiderata	70
5.3.1	Analisi ed interpretazione dei risultati	71
6	Conclusioni e sviluppi futuri	75
A	Porzioni di codice nesC facenti parte dell'applicazione	79
B	Determinazione dei parametri del modello dinamico	83
C	Fotografie ulteriori dell'apparato	87
D	Bonsai presente in serra	93
	Bibliografia	95
	Elenco delle figure	96
	Elenco delle tabelle	101

Abstract

Al monitoraggio delle condizioni ambientali di temperatura, umidità e luminosità presenti in una regione spaziale confinata, interpretabile come una “cella climatica”, il presente lavoro affianca la possibilità del controllo automatico di tali variabili ambientali, nel contesto delle reti di sensori senza fili (WSNs, Wireless Sensor Networks).

L’ambito di applicazione cui si fa riferimento è quello delle colture in serra: una WSN che raccolga i dati provenienti da un insieme di serre, aventi eventualmente caratteristiche differenti, e che inoltri i valori dei parametri ambientali desiderati per ciascuna di esse costituisce la struttura portante di tale contesto.

Il lavoro esposto nelle pagine successive realizza nella forma piú semplice tale funzionalità. Se da un lato la soluzione proposta lascia intravedere concrete possibilità di generalizzazione ed estensione, dall’altro fornisce una applicazione delle WSNs la cui concretezza appare come una caratteristica rilevante.

In ciascuna delle celle climatiche da monitorare e controllare è presente uno dei moduli che nel loro insieme costituiscono la WSN (denominati in letteratura in modo colloquiale “motes”) il quale, in modo automatico e quando necessario, rende attivi dei semplici attuatori che influenzano le variabili ambientali, orientandole verso opportuni valori desiderati. Tali valori di riferimento desiderati sono inviati, attraverso la rete wireless, ai motes in questione per mezzo di un mote di riferimento (basestation), collegato a sua volta ad un elaboratore convenzionale, quale un laptop.

I dati derivanti dall’attività di monitoraggio esercitata dai vari nodi della re-

te sono visualizzati sull'elaboratore sopra citato, al fine di consentire la modifica dei valori di riferimento desiderati in tempo reale; tali dati possono eventualmente essere memorizzati sul medesimo elaboratore, rendendo possibili analisi e valutazioni successive.

E' proposto un modello dinamico della cella climatica che è stata realizzata a fini sperimentali, la cui semplicità è giustificata da alcuni rilievi pratici, che si accompagnano ad un numero di prove sperimentali che testano il sistema nel suo insieme.

I risultati di tali prove sperimentali dimostrano, entro limiti ragionevoli, l'efficacia delle soluzioni presentate in questo lavoro, e ne incoraggiano lo sviluppo ed il perfezionamento. Infatti se da una parte il semplice prototipo sperimentale realizzato consente un controllo marginale dell'umidità relativa, dall'altra mette in evidenza buone capacità di inseguimento di un profilo di temperatura desiderato ed una efficace e pronta gestione della luminosità.

Capitolo 1

Introduzione

Il monitoraggio ambientale è uno tra gli ambiti di applicazione che maggiormente trovano citazione negli articoli che introducono le reti di sensori wireless (Sensornets o WSNs, Wireless Sensor Networks)[4][13]. Nel lavoro presentato in queste pagine, al problema del monitoraggio dei parametri ambientali di temperatura, umidità relativa e luminosità si affianca quello del controllo di tali grandezze, con la conseguente necessità di individuare una “cella climatica” nella quale poter efficacemente imporre tale controllo.

Il problema complessivo è quindi quello della realizzazione di un prototipo sperimentale che per mezzo delle potenzialità della emergente tecnologia delle WSNs imponga un profilo climatico desiderato in una regione spaziale confinata, ed in particolare il contesto applicativo individuato è stato quello floro-vivaistico o dell’ortocoltura in serra.

In tale ambito il ruolo della WSN consiste nel fornire la possibilità di ottenere da parte di un operatore o di un sistema automatico le informazioni rilevanti e di impostare i parametri di controllo da un’unica postazione connessa alla rete wireless per mezzo di una basestation, per una pluralità di serre e/o ambienti, ciascuna eventualmente popolata da una distinta tipologia vegetale o caratterizzata da necessità peculiari.

La rete risulta quindi costituita da un insieme di nodi collocati all’interno

delle serre, da eventuali nodi posti all'esterno al fine di ottenere informazioni di riferimento e da una basestation, avente il compito di raccogliere la totalità dei dati e di inoltrare i parametri di controllo per le varie serre presenti. Ulteriori nodi possono essere presenti per consentire un collegamento multi-hop tra la basestation e serre collocate fuori dalla portata dell'hop singolo, realizzando una topologia di rete a maglie (mesh topology), ad albero (tree topology) o mista.

In un tale scenario applicativo la praticità derivante dalla connettività wireless tra i nodi costituenti la rete (in definitiva tra le serre), l'attrattiva del costo via via decrescente dei nodi stessi e l'integrazione dei sensori richiesti dall'applicazione appaiono come elementi di sicuro interesse per chi debba gestire una realtà produttiva o commerciale nella quale le serre giochino un ruolo significativo.

1.1 Da una serra tradizionale ad una serra “intelligente”

La presenza di una WSN, i cui nodi costituenti sono equipaggiati in modo da mettere a disposizione capacità di calcolo e di memorizzazione oltre che di connettività, consente la realizzazione di una cella climatica nella quale il modulo wireless collocato al suo interno oltre a gestire l'acquisizione dei dati e la loro trasmissione alla basestation regola in modo autonomo un insieme di attuatori in grado di influenzare i parametri ambientali, secondo specifiche provenienti dalla basestation stessa.

L'intento è quello di andare verso la possibilità di limitare l'intervento dell'operatore umano rispetto alle mansioni “di routine”, avendo inoltre la possibilità di tener traccia delle risposte dell’“ambiente serra” ad una varietà di distinti profili climatici imposti, potendo in tal modo verificare ed investigare sul grado di benessere delle specie vegetali presenti in serra e “modulare” di conseguenza le specifiche imposte al sistema, al fine di migliorare la resa della serra stessa.

1.2 Stato dell'arte e letteratura

L'emergente tecnologia delle reti di sensori senza fili è caratterizzata da una rapida evoluzione sia dal punto di vista del software che da quello delle piattaforme hardware che si rendono disponibili.

Nel presente lavoro si è scelto di utilizzare per i moduli wireless la piattaforma hardware Telos, sviluppata dall'Università della California, Berkeley, cui si accompagna il sistema operativo TinyOS, entrambi introdotti in un capitolo successivo.

La documentazione ad essi relativa, nonché il software necessario allo sviluppo di applicazioni in tale contesto, si possono ottenere presso il sito ufficiale di TinyOS all'indirizzo <http://www.tinyos.net>¹.

Sul fronte del controllo climatico in serra è da segnalare l'impiego tecniche diversificate al fine di ottenere un risultato finale comune: un aumento di efficienza sia per la crescita vegetativa che per quella riproduttiva.

Tale controllo si rende necessario infatti, nonostante le serre proteggano dagli agenti atmosferici esterni, senza una adeguata gestione dei parametri ambientali si possono verificare all'interno condizioni altrettanto avverse; ad esempio calore ed umidità estreme possono impedire la crescita, limitare la produzione e favorire la diffusione di malattie.

In particolare, oltre a riscaldatori e circolatori d'aria, trovano applicazione sistemi di raffrescamento evaporativo, costituiti da "pannelli umidificati" e sistemi di umidificazione "a nebbia", ottenuti mediante la posa di tubazioni d'acciaio e pompe ad alta pressione, con i quali è anche possibile introdurre nell'ambiente nutrienti, fungicidi o insetticidi. Da segnalare anche la presenza di soluzioni che prevedono lo spostamento motorizzato di parte della copertura della serra per favorire il ricambio d'aria e l'illuminazione diretta.

¹In bibliografia sono riportati alcuni tra gli articoli di interesse ai fini dell'applicazione sviluppata in questo lavoro, scaricabili da tale sito.

1.3 Contributo e descrizione dei capitoli

Il lavoro presentato nei capitoli successivi consiste nella realizzazione di un prototipo sperimentale che implementi parte delle funzionalità descritte nelle sezioni precedenti in un contesto che preveda la presenza di una serra in scala ridotta, popolata da piantine bonsai.

Tale scelta non preclude la possibilità di ottenere indicazioni sperimentali sull'efficacia della soluzione proposta, in quanto le dimensioni della serra e delle piantine in essa collocate, oltre al numero e alla tipologia degli attuatori impiegati rendono uniforme la scala degli oggetti coinvolti.

Descrizione dei capitoli

Capitolo Secondo. Introduce le reti di sensori wireless, mettendone in evidenza le caratteristiche principali, e la piattaforma hardware Telos[4], impiegata per i nodi costituenti la WSN. Sono nel seguito messi in evidenza i principi cardine di TinyOS[1] e di nesC[2], rispettivamente il sistema operativo ed il linguaggio di programmazione che consentono la realizzazione di applicazioni efficienti nel contesto delle limitate risorse hardware offerte dai singoli nodi.

Capitolo Terzo. Descrive la serra in miniatura, costruita al fine di poter effettuare le prove sperimentali. Ne fornisce un semplice modello dinamico al primo ordine della struttura, discute la scelta, le potenzialità e la disposizione degli attuatori. Infine introduce il sistema di controllo realizzato per la cella climatica.

Capitolo Quarto. E' dedicato alla progettazione del prototipo sperimentale. Sul fronte dell'hardware è introdotto un modulo che consente al mote di azionare gli attuatori presenti in serra, su quello del software è discusso l'algoritmo seguito dal mote per la gestione dell'acquisizione dei parametri ambientali, della comunicazione con la basestation e per il controllo degli attuatori stessi. Infine è presentata una interfaccia grafica, realizzata mediante il linguaggio di programmazione Java, che consente una facile gestione della serre da parte di un

operatore.

Capitolo Quinto. Riporta gli esiti di una coppia di prove sperimentali prolungate, che nel loro insieme forniscono un quadro esaustivo delle potenzialità offerte dalla serra in miniatura realizzata.

Capitolo Sesto. Conclude l'esposizione riassumendo i tratti salienti del lavoro presentato. Fornisce alcuni spunti per la generalizzazione e l'estensione dei risultati ottenuti.

Capitolo 2

Wireless Sensor Networks

Il lavoro presentato in queste pagine può trovare una collocazione nel vasto ambito delle reti di sensori senza fili (sensornets o WSNs, Wireless Sensor Networks), una tecnologia emergente che oltre ad applicazioni riguardanti il monitoraggio ambientale si rivolge verso ambiti residenziali, industriali, militari, medicali ed in generale ovunque siano di interesse “ambienti intelligenti”.

In tali contesti una delle necessità fondamentali consiste nel poter disporre di un adeguato flusso di informazioni provenienti in modo distribuito dal mondo reale.

La struttura generale di una WSN, costituita da un numero tipicamente elevato di nodi distribuiti che si organizzano in una rete wireless, ben si adatta a soddisfare tale requisito. Una proprietà rilevante di tale tipologia di reti è quella di aggregare il contributo fornito da ciascun costituente elementare della WSN in termini di capacità di calcolo, di memorizzazione e di comunicazione per una finalità comune, a seconda dell'intento dell'applicazione; infatti nonostante le potenzialità di ciascuno dei nodi siano limitate, all'aumentare della densità di tali nodi cresce il grado di complessità raggiungibile dall'applicazione stessa.

Tali nodi sono costituiti da moduli (aventi dimensioni via via decrescenti con il susseguirsi delle versioni) equipaggiati con un microcontrollore connesso a sensori interagenti con l'ambiente circostante; tali moduli, cui ci si riferisce

in modo informale con il termine “motes”, comunicano tra loro in modalità wireless per mezzo di un chip radio a bassa potenza.

I motes impiegati in questo progetto, descritti nella sezione 2.2.1, sono stati sviluppati dall’Università della California, Berkeley (USA) e forniti dalla Moteiv Corporation, San Francisco (USA)¹. Essi impiegano un chip radio che aderisce allo standard IEEE 802.15.4 (IEEE 802.15 WPAN Task Group 4), che definisce i due strati inferiori del Modello di Riferimento OSI (Open Systems Interconnection Reference Model, OSI/RM): lo strato fisico (Physical Layer, PHY) ed il sottostrato MAC dello strato data link (Medium Access Control, MAC)².

Le specifiche delle reti cui questo standard si riferisce includono una bassa velocità di trasmissione dei dati, allo scopo di ottenere una elevata autonomia dei dispositivi costituenti (alimentati tipicamente a batteria), una complessità ridotta e presumibilmente un basso costo.

Alla descrizione delle principali caratteristiche e problematiche riguardanti le sensornets è dedicata la sezione successiva.

¹Il nome commerciale del modulo wireless è Tmote Sky, si veda il sito www.moteiv.com.

²Un importante standard che si colloca al di sopra degli strati regolati dal documento IEEE 802.15.4 è ZigBee (www.zigbee.org), che in linea di principio può essere implementato per mezzo di TinyOS, il sistema operativo impiegato dai moduli wireless impiegati in questo lavoro.

2.1 Caratteristiche delle reti di sensori wireless

Il nuovo modo di interagire con il mondo fisico reso possibile dall'affermarsi di tale tipologia di reti è caratterizzato da proprietà e requisiti che si differenziano da quelli propri dei contesti tradizionali. Ad avere un ruolo decisivo sono le ridotte dimensioni fisiche dei singoli dispositivi di base che costituiscono la rete e la necessità di operare in regime di basso consumo di potenza, dato che tali elementi sono tipicamente alimentati a batteria e che le applicazioni tipiche prevedono l'assenza di manutenzione da parte di operatori per periodi prolungati, se non l'inaccessibilità dei nodi stessi.

Tali riduzioni sono ottenute a fronte di capacità di calcolo, di memoria e di interconnessione classificabili come scarse se confrontate con le analoghe potenzialità dei regimi desktop e server. Segue la necessità che il software sia quanto più possibile efficiente.

Il modo di operare tipico dei nodi delle sensornets consiste nel far fluire lungo la rete le informazioni acquisite dai sensori, eventualmente affiancando a tale attività una limitata quantità di processing; per garantire una corretta gestione delle informazioni risulta fondamentale rispettare i requisiti di real time imposti da tali flussi di dati. Tale prerogativa impone che i dispositivi costituenti la rete debbano poter operare in un regime nel quale i singoli flussi di dati e le attività correlate siano gestiti con un alto grado di concorrenza (concurrency-intensive operation).

Alla luce delle dimensioni fisiche contenute e dell'auspicabile basso costo finale, la complessità dei singoli nodi in termini di numero di controllori presenti e di interconnessioni tra i componenti elementari non può che essere limitata; ciò non rende possibile la distribuzione tra più controllori del carico di lavoro, rendendo necessaria una gestione software dei flussi di dati concorrenti.

In riferimento al possibile impiego di tecniche di ridondanza al fine di aumentare la robustezza delle applicazioni è da rilevare che di norma l'hardware dei nodi non è pensato per sfruttare tale modalità, essendo come detto ridotto

all'essenziale. E' inoltre stato messo in evidenza che un approccio che conduca ad una ridondanza "tra dispositivi" invece che "all'interno di un dispositivo", sebbene piú accattivante, conduce peraltro ad un costo proibitivo in termini delle comunicazioni tra i nodi necessarie per implementarla. Segue che l'affidabilità dei singoli dispositivi è un aspetto di fondamentale importanza[8].

Un'altra caratteristica rilevante deriva dal possibile impiego delle WSNs in un gran numero di differenti contesti applicativi, che porta all'opportunità di attrezzare i nodi con l'hardware piú adatto ai fini della particolare applicazione via via presa in esame. Un tale approccio modulare è seguito anche a livello del software, in particolare da TinyOS, il sistema operativo adottato dai dispositivi impiegati nel presente lavoro.

WSNs
dimensioni fisiche ridotte
basso consumo di potenza
costo contenuto
necessità della gestione concorrente dei flussi di dati
parallelismo hardware e numero di controllori limitati
applicazioni appartenenti a contesti diversificati

Tabella 2.1: Principali caratteristiche e problematiche delle WSNs che portano a considerare l'approccio adottato dal sistema operativo TinyOS.

La Tabella 2.1 riassume le peculiarità delle WSNs che hanno motivato lo sviluppo del sistema operativo TinyOS, introdotto nella sezione 2.2.2.

Nella sezione successiva è invece presentata la piattaforma hardware utilizzata nel seguito.

2.2 Motes

Nelle due sottosezioni successive sono introdotti i dispositivi utilizzati quali elementi costitutivi della sensornet; prima dal punto di vista dell'hardware, di seguito da quello del software.

2.2.1 Hardware: Telos

La piattaforma hardware utilizzata in questo lavoro è costituita dal modulo wireless a bassa potenza denominato Telos[4], sviluppato dall'Università della California, Berkeley.

Esso è stato realizzato a partire da componenti “di listino” disponibili sul mercato (detti anche componenti COTS, commercial off-the-shelf components), non specificatamente progettati per tale modulo, valutandone accuratamente le caratteristiche e mettendo a frutto l'esperienza acquisita nel progettare, realizzare e testare i dispositivi analoghi che lo hanno preceduto.

Uno dei principi basilari su cui si basa la progettazione di tale piattaforma consiste nel fatto che nelle applicazioni tipiche delle WSNs l'intervallo di tempo nel quale i nodi risultano attivi è una frazione minima dell'intervallo tra due attivazioni successive; dato che i nodi sono di norma alimentati a batteria si verifica che minore è il duty cycle relativo allo stato di attivazione dei nodi maggiore risulta essere la vita utile del modulo prima che venga meno l'alimentazione.

L'intento dei progettisti è stato quello di rendere più agevoli le attività di ricerca e di sperimentazione sul fronte delle sensornets, rispetto alla situazione che ha accompagnato le precedenti generazioni di “motes”.

Il modulo Telos si presenta come in Figura 2.1, nella quale si nota in particolare la presenza del connettore USB: esso consente una estrema facilità d'uso e riduce i tempi di sviluppo e messa a punto delle applicazioni rispetto alle generazioni di mote precedenti, data la grande diffusione di tale standard negli elaboratori attuali. Oltre ad essere utilizzato per la programmazione, il connettore USB fornisce alimentazione al modulo, contribuendo ad aumentare la



Figura 2.1: Il modulo wireless a bassa potenza Telos.

durata delle batterie.

Le generazioni di motes che si sono susseguite sono state accompagnate dall'introduzione di nuovi microcontrollori, le cui caratteristiche piú rilevanti ai fini delle WSNs, tra cui il ridotto consumo di potenza, il numero di periferiche integrate nel chip e la disponibilità di memoria RAM e flash, sono andate via via migliorando. Telos è stato equipaggiato con il microcontrollore TI MSP430 della Texas Instruments, per le sue superiori caratteristiche di basso consumo di potenza sia in active mode che in sleep mode, per il minor tempo di wakeup (esso passa dalla condizione di standby ($1 \mu\text{A}$) all'active mode (8 MHz) in non piú di $6 \mu\text{s}$) e per la presenza di un controllore DMA, che riduce notevolmente il carico cui deve provvedere il microprocessore della MCU. In riferimento alla memoria, l'MSP430 è equipaggiato con 10 kB di RAM e con una program memory di 48 kB.

Sul fronte della comunicazione wireless il modulo Telos è dotato del chip radio Chipcon CC2420³; esso opera nella banda dei 2.4 GHz (16 canali, ciascuno di ampiezza pari a 2 MHz, con una separazione di 5 MHz) ed impiega

³Si consulti il sito www.chipcon.com.

una modulazione O-QPSK (Offset-Quadrature Phase Shift Keying) con DSSS (Direct-Sequence Spread Spectrum) ad una velocità di 250 kbps. Tale chip radio aderisce allo standard IEEE 802.15.4, dando a Telos la possibilità di comunicare con dispositivi che condividano il medesimo strato fisico. Il vantaggio introdotto in termini di flessibilità dall'impiego di una radio standardizzata è peraltro ridimensionato dal fatto che le interfacce radio IEEE 802.15.4 sono orientate al pacchetto, non al byte od al bit; ciò nonostante il chip CC2420 prevede un certo numero di acceleratori hardware ad aumentarne le prestazioni. Tra questi si segnalano quelli riguardanti la crittazione, l'autenticazione, il supporto per la gestione dei pacchetti, l'acknowledgement automatico e la decodifica degli indirizzi; tali acceleratori hardware sono posti all'interno della radio e quindi non possono essere impiegati dalla MCU per funzioni di carattere generale.

Sul modulo wireless trovano alloggio il sensore di temperatura/umidità relativa SHT11, prodotto da Sensirion⁴, ed una coppia di sensori di luminosità, i fotodiodi S1087 e S1087-01, entrambi prodotti da Hamamatsu⁵. In particolare il sensore di temperatura/umidità SHT11 fornisce un'uscita calibrata e digitale; esso infatti è accoppiato ad un ADC a 14 bit.

Tra le numerose altre caratteristiche del modulo Telos, ad essere rilevante ai fini del lavoro qui considerato è la presenza di un connettore di espansione IDC (Insulation Displacement Connector) che in particolare esporta il bus I2C, utilizzato dal mote per la gestione degli attuatori presenti in serra.

2.2.2 Software: TinyOS e nesC

TinyOS

Nella sezione 2.1 si è accennato ai requisiti tipici che caratterizzano le WSNs, in termini di dimensioni fisiche dei nodi e di consumo di potenza.

Al fine di non vanificare gli sforzi fatti sul versante dell'hardware il sistema

⁴Si veda il sito www.sensirion.com

⁵Si consulti il sito www.hamamatsu.com.

operativo ha il compito di valorizzare le risorse disponibili, in termini di efficienza, modularità e robustezza del software, rendendo al contempo possibile un alto grado di concorrenza (accesso concorrente a dati condivisi).

TinyOS⁶ (Tiny Microthreading Operating System) è il sistema operativo aperto che è stato sviluppato[8] per soddisfare tali requisiti, e per risultare scalabile secondo l'evoluzione tecnologica, il cui trend vede il progressivo migrare dei componenti software verso una realizzazione hardware.

Gli intenti sopra riportati sono concretizzati da TinyOS gestendo una struttura a due livelli per l'attività di scheduling. Le computazioni più onerose sono articolate in task, interrompibili da eventi hardware: a questi ultimi è di norma associabile una limitata quantità di processing, portata a termine prima che il task interrotto riprenda l'esecuzione.

Quello seguito da TinyOS è un modello ad eventi che permette di raggiungere un alto livello di concorrenza (concurrency-intensive model), mantenendo contenuta la quantità di memoria richiesta a tal fine. Nei periodi di inattività la CPU è posta in sleep mode, con l'intento di limitare il consumo di potenza, in contrapposizione ad altri approcci nei quali essa rimane in attesa di eventi od esegue attività di polling.

Dal punto di vista dell'implementazione TinyOS può essere interpretato come una collezione di componenti software. Ciascuna applicazione si compone di uno scheduler e di un grafo che connette tra loro alcuni dei componenti disponibili nella distribuzione in uso del sistema operativo.

L'approccio modulare seguito da TinyOS è messo in evidenza anche dal fatto che in ciascun componente è presente la dichiarazione dei "comandi" che esso può invocare e degli "eventi" che può segnalare.

Un'applicazione è di norma costituita da più livelli di componenti. Ciascuno di essi opera inoltrando comandi verso livelli inferiori e segnalando eventi ai livelli superiori, secondo quanto schematizzato nella Figura 2.2. Lo strato più basso costituisce l'hardware dei moduli.

⁶Si veda il sito: www.tinyos.net

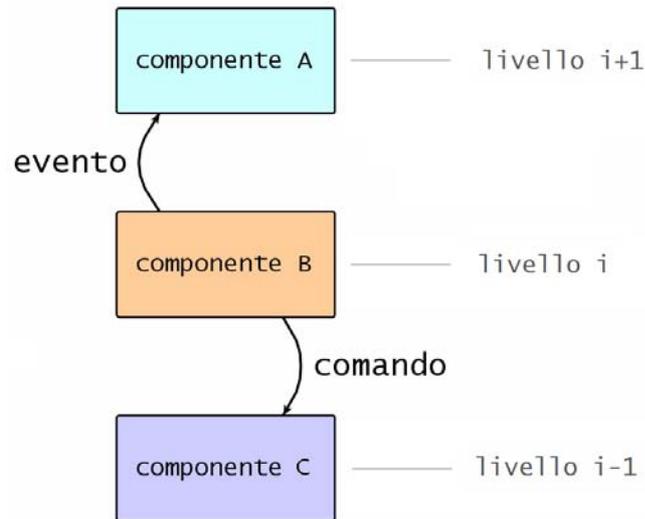


Figura 2.2: Rappresentazione schematica dell'inoltro di comandi e della segnalazione di eventi da parte di un componente software verso componenti appartenenti a livelli adiacenti.

I comandi inoltrati ad un componente sottostante sono richieste non soggette a blocco (non-blocking request): tipicamente il comando fornisce alcuni parametri al componente chiamato e deposita la richiesta di un task nello scheduler, affinché tale componente esegua in modo differito ma appena possibile l'azione ad esso richiesta.

Tale modo di procedere comporta che i comandi non sono accompagnati da una latenza prolungata e possono fornire al componente che li ha invocati un feedback che attesti la loro riuscita o il fatto di non essere andati a buon fine.

Gli eventi sono segnalati in risposta diretta o indiretta ad interrupt hardware, come ad esempio interrupt esterni o eventi riguardanti timer/contatori. Un evento hardware genera tipicamente una catena di attività di processing che procede verso componenti posti a livelli superiori appunto per mezzo della segnalazione di eventi, ma che può tornare a rivolgersi verso il basso a seguito dell'inoltro di comandi.

Un aspetto importante è che sia i comandi che gli eventi sono accompagnati dall'esecuzione di una modesta e fissata attività nel contesto del componente cui si riferiscono. A prendersi carico delle elaborazioni più consistenti sono deputati i task, ciascuno dei quali, una volta avviato, giunge a completamento, senza che altri task lo possano interrompere. Il modo congiunto di operare di task ed eventi rende possibile la simulazione della concorrenza.

Nel modello ad eventi proposto i task consentono l'esecuzione di attività computazionali articolate, mentre comandi ed eventi, assimilabili a transizioni di stato, hanno il compito di soddisfare i requisiti di real time e di parallelismo propri di alcune delle attività caratterizzanti le WSNs, quali l'arrivo di messaggi via radio e l'acquisizione di campioni da parte dei sensori.

Come accennato, lo svuotamento della coda dei task comporta il passaggio alla modalità sleep per la CPU del microcontrollore. Il fatto che le periferiche integrate nel chip della MCU siano mantenute in attività consente il successivo risveglio della CPU in risposta ad eventi hardware.

nesC

Il linguaggio di programmazione con il quale sono realizzate le applicazioni delle WSNs è denominato nesC[2], ed è una variante del linguaggio C (o un "dialetto" derivato dal C). Esso costituisce il linguaggio con il quale è scritto il sistema operativo TinyOS e si adatta in modo naturale a renderne concreto il modello di programmazione che, come accennato in precedenza, pone nella struttura a componenti, nel modello di concorrenza basato sugli eventi e nella gestione delle operazioni in due fasi (split-phase operations) i propri elementi caratterizzanti.

Un contributo rilevante al raggiungimento dei citati obiettivi di efficienza e affidabilità del software imposti dal regime delle sensor networks è fornito dal compilatore nesC, il quale realizza l'analisi unitaria e complessiva del codice, rilevando l'eventuale presenza di accessi non sicuri ai dati condivisi (data-race detection) e ottimizza l'uso delle risorse disponibili a seguito di un marcato ricorso all'inlining delle funzioni.

L'analisi del codice necessaria al raggiungimento di tali funzionalità è resa possibile dalle ridotte dimensioni tipiche del codice stesso, dalla rinuncia alla possibilità dell'allocazione dinamica della memoria e dalla completa definizione al momento della compilazione del grafo delle chiamate a funzione.

Le applicazioni per WSNs scritte in nesC sono costituite da un insieme di componenti, l'interazione tra i quali è regolata per mezzo di interfacce bidirezionali. Ciascun componente software “utilizza” un set di interfacce e ne “fornisce” un altro, in accordo con l'approccio a strati seguito dall'applicazione complessiva. La natura bidirezionale delle interfacce si traduce nella loro composizione in unità classificate come “comandi” o in alternativa come “eventi”; tali unità sono in sostanza delle funzioni che si differenziano per il ruolo che assumono: i comandi sono implementati dai componenti che forniscono l'interfaccia, mentre gli eventi sono realizzati dai componenti che usano l'interfaccia. Un esempio è costituito dalle operazioni che si svolgono in due fasi (split-phase operations): la prima fase è costituita dalla chiamata di un comando, la seconda dalla successiva segnalazione dell'evento corrispondente, ad indicare il completamento dell'attività richiesta.

I componenti appartengono a due categorie: moduli e configurazioni. Nei primi è presente il codice dell'applicazione, le seconde permettono di specificare le associazioni ed i legami tra i componenti utilizzati (“wiring” dei componenti). In particolare a ciascuna applicazione è associato un file di configurazione top-level, che specifica tale wiring tra componenti.

Capitolo 3

Serra

Il presente capitolo introduce le caratteristiche costruttive ed un semplice modello matematico a descrizione della serra usata nelle prove sperimentali.

Tale serra fornisce una realizzazione concreta della “cella climatica” cui si è fatto riferimento nel capitolo introduttivo.

A corredo sono presentate alcune fotografie della struttura, in modo da rendere chiara la “scala” del problema preso in considerazione.

3.1 Modello dinamico

Si discute nel seguito un semplice modello dinamico del primo ordine a tempo continuo (tale semplicità si è dimostrata adeguata per il “processo serra” preso in esame), relativo in particolare alla temperatura interna $T_{int}(t)$, che oltre a costituire la variabile di stato è assunta anche come variabile di uscita. L’intento di tale modello dinamico è quello di fornire una prima collocazione matematica alla struttura considerata, in ipotesi di linearità del sistema nell’intervallo preso in esame per le temperature. L’equazione di stato è assunta essere la seguente:

$$\dot{T}_{int}(t) = a[T_{est}(t) - T_{int}(t)] + u(t, T_{int}(t), T_{des}(t)) \quad (3.1)$$

Nella relazione precedente $T_{est}(t)$ è la temperatura presente all’esterno della

serra: al mote interno se ne accompagna infatti un altro posto esternamente, in modo da poter disporre delle informazioni necessarie per poter fare considerazioni sul sistema “serra + ambiente circostante”. La funzione $u(t, T_{int}(t), T_{des}(t))$ descrive in forma concisa l’ingresso al “processo serra”; in particolare se ne mette in evidenza la dipendenza dal valore desiderato $T_{des}(t)$ e risulta modellabile come:

$$u(t, T_{int}(t), T_{des}) = \begin{cases} b & , \text{ per } T_{int}(t) \leq T_{des} - T_{\alpha} \\ c & , \text{ per } T_{des} - T_{\alpha} < T_{int}(t) \leq T_{des} \\ 0 & , \text{ per } T_{des} < T_{int}(t) \leq T_{des} + T_{\beta} \\ -d[T_{int}(t) - T_{est}(t)] & , \text{ per } T_{int}(t) > T_{des} + T_{\beta}, \end{cases} \quad (3.2)$$

dove il valore desiderato di temperatura $T_{des}(t)$ è stato assunto fissato e quindi non dipendente dal tempo. I parametri T_{α} e T_{β} consentono di individuare opportune soglie attorno al valore di T_{des} , secondo quanto illustrato nella Figura 3.1, che discriminano sullo stato di attivazione/spegnimento degli attuatori inerenti alla temperatura.

Nel modello esposto la modalità di “raffreddamento” è fatto corrispondere in sostanza ad un abbassamento della costante di tempo che caratterizza l’evoluzione libera della variabile di stato nonché variabile di uscita $T_{int}(t)$: a fronte di una temperatura interna ritenuta eccessiva, l’azionamento delle ventole di raffreddamento rende piú rapido il raggiungimento del valore desiderato di temperatura (nell’ipotesi che quella esterna sia minore di quella interna, e che tra queste vi sia il valore desiderato).

3.2 Dimensioni e materiale

La scelta delle dimensioni fisiche della serra è stata il risultato di un compromesso tra differenti necessità e punti di vista tra loro divergenti.

Ad indirizzare verso dimensioni contenute sono state l’esigenza di una facile

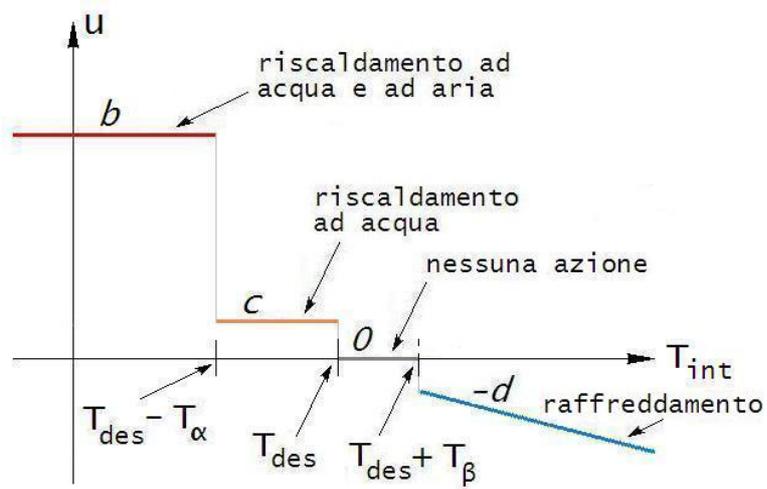


Figura 3.1: Diagramma “a scala” che descrive qualitativamente la variabile di ingresso u del modello dinamico in funzione della temperatura interna T_{int} , della temperatura desiderata T_{des} e dei parametri T_{α} e T_{β} , che individuano opportune soglie. Sono evidenziate anche le condizioni di funzionamento degli attuatori corrispondenti ai vari casi.

gestione “a colpo d’occhio” della struttura nel suo insieme, in vista dei test di laboratorio, nonché l’opportunità di non privarsi della possibilità di eventuali spostamenti anche ripetuti, con un vantaggio rilevante in termini di tempi legati alla logistica, all’allestimento e alla manutenzione.

Verso tale direzione “di sobrietà” spingono anche onnipresenti considerazioni di costo e reperibilità dei materiali entro tempi il più possibile contenuti, se non addirittura limitati ad una visita diretta al più vicino centro del “fai da te”.

In vista di un ingombro ragionevolmente ridotto, si è fatta subito strada l’idea di collocare nella serra un certo numero di bonsai in luogo di piante “a dimensione tradizionale”, sperando di ottenere nel complesso un risultato finale che desse l’idea di un ambiente proposto, nelle sue varie componenti, in una scala il più possibile uniforme.

Sul fronte opposto, a spingere verso un ingombro non eccessivamente ridotto, è stata l’esigenza di poter collocare all’interno della serra un numero minimo di bonsai, in definitiva risultato di 2-3 unità, per non far perdere di vista il contesto applicativo in cui ci si è collocati.

Le effettive dimensioni sono riportate nella Tabella 3.1, mentre la Figura 3.2 fornisce un primo quadro d’insieme.

dimensioni lineari	
altezza	50 cm
larghezza	45 cm
profondità	25 cm

Tabella 3.1: Dimensioni della serra, realizzata in plexiglass trasparente.

Per il materiale da impiegare per le pareti si è optato per il plexiglass, data la sua elevata trasparenza, la facile reperibilità commerciale e la relativa facilità di lavorazione con strumenti di taglio, foratura e assemblaggio non professionali. Al fine di garantire alla struttura una adeguata stabilità, sono state impiegate lastre aventi spessore di 2.5 mm.

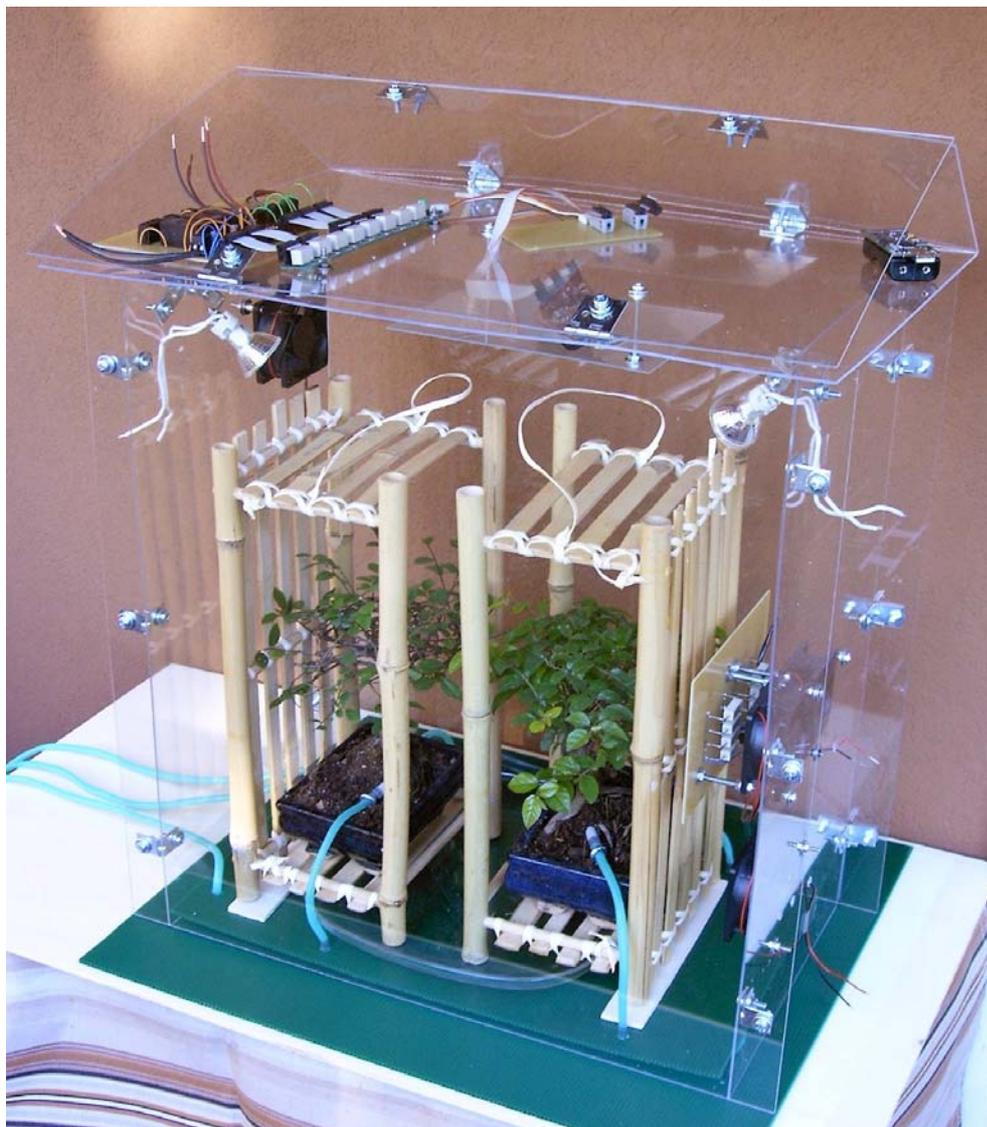


Figura 3.2: Vista d'insieme della serra. Sono assenti i collegamenti necessari al funzionamento degli attuatori.

3.3 Attuatori e loro collocazione

La cella climatica è stata equipaggiata con semplici attuatori, descritti nel presente paragrafo, in grado di indirizzare i parametri ambientali interni verso valori di riferimento desiderati.

Attuatori per l'innalzamento della temperatura

La via principale che consente l'aumento della temperatura interna alla serra prevede la presenza di un flusso d'aria prodotto da una ventola in corrispondenza di un certo numero di resistenze ceramiche percorse da corrente, in parte visibili nella Figura 3.3; tale configurazione permette una adeguata redistribuzione dell'aria calda, evitando al contempo un eccessivo riscaldamento delle resistenze stesse. Ai capi di tali resistenze, del valore nominale di 100Ω ed aventi una potenza dissipabile massima di $3W$, è applicata una differenza di potenziale continua di $12V$, utilizzata anche per il funzionamento delle ventole; una decina di tali resistenze consente di riscaldare in modo ragionevole la serra, impiegando meno di $15W$.

Tale scelta è maturata alla luce dell'esigenza di mantenere una sostanziale "equità" relativamente alla scala degli oggetti e delle grandezze fisiche (quali ad esempio le potenze) presenti nel sistema.

A supporto di tale modalità di riscaldamento, introdotta a suggerire una possibile analogia con un corrispondente e plausibile sistema di riscaldamento "ad aria calda" rintracciabile in serre a dimensione ordinaria, è stato realizzato un riscaldamento "a pavimento", costituito in sostanza da un lungo tubo di materiale siliconico, adeguatamente posizionato nella parte inferiore della struttura, come mostrato in Figura 3.4.

Un vaso posto a fianco della serra contiene l'acqua che circola nella serpentina siliconica, mantenuta ad elevata temperatura da un riscaldatore da acquario, e forzata in circolo da una piccola pompa. Tali elementi sono da considerare al di fuori del "budget energetico del sistema serra", secondo quanto accennato



Figura 3.3: Particolare della serra. In alto a destra si intravedono parte delle resistenze ceramiche (bianche) che contribuiscono al riscaldamento; si possono inoltre notare i tubicini colorati di materiale siliconico che, quando richiesto, possono fornire acqua ai bonsai.



Figura 3.4: Al di sotto del “pavimento” della serra è posto un tubicino di materiale siliconico, il quale quando necessario è percorso da acqua calda, in modo da costituire una forma di riscaldamento “di mantenimento”.

nell’Introduzione, infatti traggono alimentazione dalla rete domestica a 220V (Si veda l’Appendice C).

Dal punto di vista funzionale l’intento del riscaldamento ad aria calda è quello di portare il più rapidamente possibile la temperatura in serra verso il valore desiderato, mentre quello del riscaldamento ad acqua è di costituire una fonte di calore “di mantenimento” della temperatura, pensato per funzionare se necessario per lunghi periodi.

Attuatore per l’abbassamento della temperatura

La diminuzione della temperatura interna alla serra è realizzata per mezzo di una coppia di ventole: una posta nella parte bassa della serra (la si può notare nella Figura 3.3, sotto l’analoga ventola del blocco riscaldante a resistenze ceramiche), ed una posta in alto sul lato opposto, come evidenziato in Figura 3.5. La ventola posta in basso forza aria presumibilmente fresca dall’esterno verso l’interno della serra, attraverso una serie di fori praticati nella parete in plexiglass, mentre quella posta in alto, in modo analogo, forza l’aria presente nella parte alta della serra, presumibilmente calda, verso l’esterno.

Questo sistema di raffreddamento è pensato per mitigare l'aumento di temperatura dovuto all'“effetto serra”, particolarmente evidente nelle giornate soleggiate.

Non è evidentemente possibile, in questa semplice configurazione, abbassare la temperatura interna al di sotto di quella esterna.

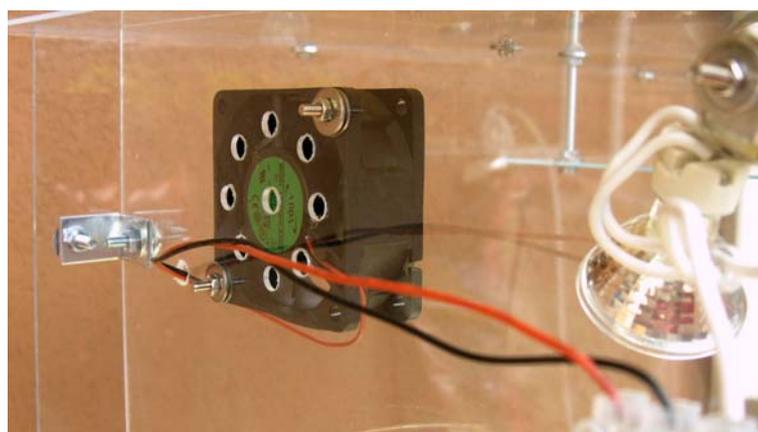


Figura 3.5: Particolare: ventola per la fuoriuscita dell'aria calda presente nella parte superiore della struttura.

Attuatore per l'innalzamento dell'umidità

Il sistema di umidificazione è nella sostanza analogo a quello che realizza il riscaldamento a pavimento, con la differenza che l'acqua pompata rimane in serra, o in un apposito contenitore sottostante i bonsai, o nella forma di una vera e propria innaffiaura della terra delle piantine stesse. L'acqua è prelevata e pompata da un contenitore e da una pompa distinti da quelli impiegati per il riscaldamento a pavimento.

L'eventuale umidità in eccesso è smaltita a seguito di circolazione d'aria o per effetto collaterale del riscaldamento a resistenze ceramiche, a seconda delle condizioni di temperatura richieste.

Il flusso d'acqua, una volta abilitato dal mote, è calibrato in modo da limitare la possibilità di afflussi eccessivi.

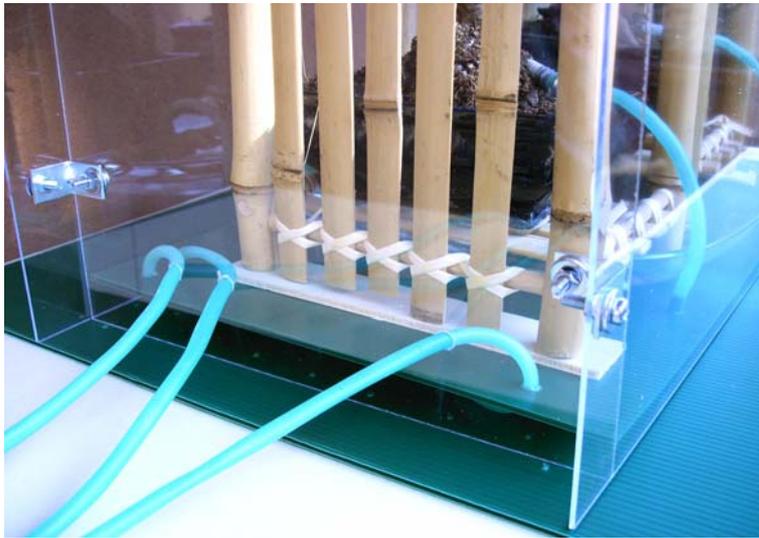


Figura 3.6: Accesso all'interno della serra dei tubicini siliconici del riscaldamento a pavimento e del sistema di umidificazione.

Attuatore per l'illuminazione

A completare la schiera degli attuatori sono state installate due lampade a 12V, adatte all'uso in serra, per una eventuale illuminazione dei bonsai in condizioni di luminosità non adeguate.

Posizionamento del mote all'interno della serra

La Figura 3.7 mette in evidenza il posizionamento del mote all'interno della cella climatica: esso è posto su un apposito ripiano, sottostante la parete superiore. Oltre che per la comodità che ne risulta, tale collocazione è stata scelta in modo che l'eventuale accensione delle lampade non "accechi" il sensore di luminosità, effetto che comprometterebbe la possibilità dello spegnimento automatico delle stesse in condizioni di luminosità sufficiente.



Figura 3.7: Posizionamento del mote all'interno della serra.

Schema riassuntivo degli attuatori

La Tabella 3.2 fornisce un quadro complessivo degli attuatori presenti nella cella climatica.

riepilogo degli attuatori	
temperatura	riscaldamento ad acqua a pavimento riscaldamento ad aria con resistenze ceramiche raffreddamento a ricircolo d'aria dall'esterno
umidità	umidificazione ed innaffiamento a pompa
luminosità	lampade per uso in serra

Tabella 3.2: Attuatori presenti nella cella climatica.

3.4 Identificazione

I parametri che compaiono nelle equazioni (3.1) e (3.2) sono stati stimati per mezzo di semplici riscontri sperimentali, aventi lo scopo di fornirne dei valori indicativi.

Al fine di determinare la costante di tempo $\tau = \frac{1}{a}$ presente nel modello dinamico (Equazione (3.1)) si è posta la serra in un ambiente mantenuto per quanto possibile a temperatura costante ($T_{est}(t) \cong \text{costante}$) e la si è riscaldata quanto più è stato possibile, al fine di ottenere il massimo “gap” tra i valori interno ed esterno.

Tale riscaldamento è stato ottenuto per mezzo del solo contributo ad aria a resistenze ceramiche, dato che quello ad acqua a pavimento, adatto al mantenimento della temperatura in serra, risulta essere lento sia nella fase accensione che in quella di spegnimento.

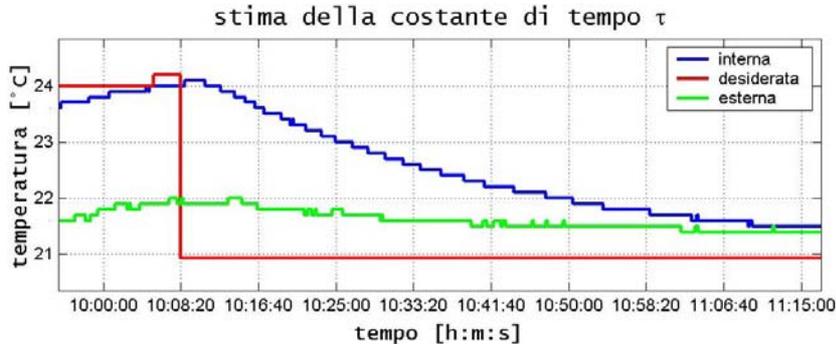


Figura 3.8: Risultati della prova sperimentale fatta per ottenere una stima della costante di tempo caratterizzante l’evoluzione libera del sistema.

Raggiunta la massima temperatura ottenibile si è lasciato evolvere il sistema liberamente, ottenendo gli andamenti riportati in Figura 3.8, che hanno portato alla valutazione di una costante di tempo τ pari a circa 26 minuti (cui corrisponde $a \cong 6.4 \cdot 10^{-4} s^{-1}$, si veda l’Appendice B).

Procedendo in modo concettualmente analogo (sfruttando la conoscenza del parametro a e considerando il comportamento “a regime” del sistema, si veda

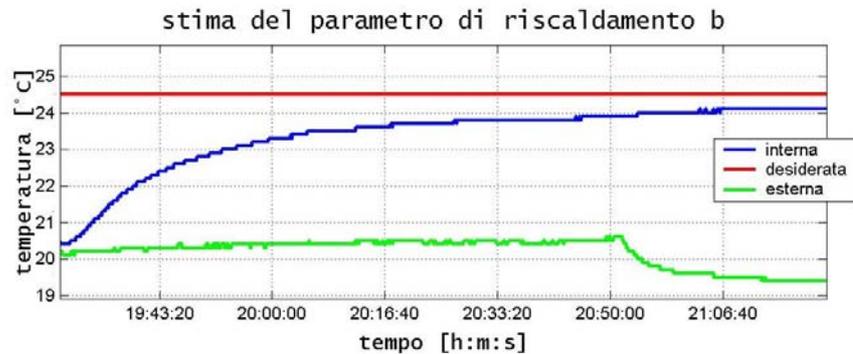


Figura 3.9: Andamento delle grandezze sperimentali riscontrate durante la prova per la stima del parametro b .

l'Appendice B), si è giunti ad una stima per b pari a circa $3.4 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}/\text{s}$. La Figura 3.9 presenta la traccia dei dati raccolti nella prova corrispondente; in essa si può osservare come il mantenere ad un valore costante la temperatura esterna, in assenza di strumenti ad hoc, sia una attività delicata.

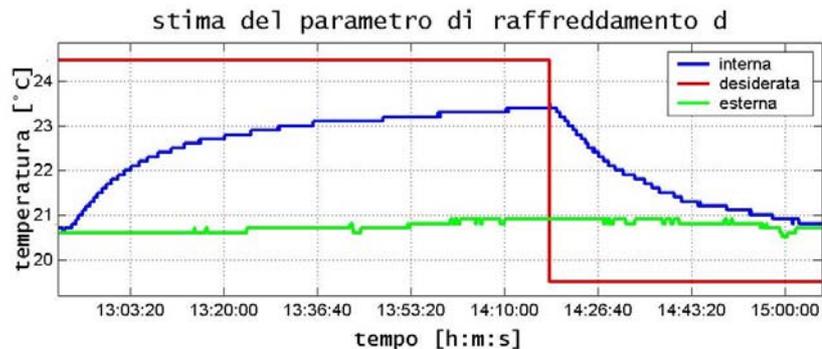


Figura 3.10: Andamento delle grandezze sperimentali registrate durante la prova per la stima del parametro d .

Seguendo la medesima via fatta per la stima del parametro $a = \frac{1}{\tau}$, è stata valutata la nuova costante di tempo associata all'attività di raffreddamento, comprendente anche il contributo riconducibile all'evoluzione libera del sistema (si veda l'Appendice B). Nelle condizioni sperimentali riportate nella Figura

3.10, si è giunti ad un valore per il parametro d pari a circa $2 \cdot 10^{-3} s^{-1}$, e ad una nuova costante di tempo complessiva pari a $\tau_{raf} \cong 380s$, sensibilmente minore di τ .

Nelle figure riportate si può notare come la temperatura esterna, misurata da un mote presente all'esterno della serra, “tenti” di ricalcare l'andamento di quella interna. Ciò per la necessaria prossimità alla serra di tale sensore esterno, e per le perdite di calore della cella climatica stessa.

3.5 Controllo

Il sistema di controllo realizzato per la cella climatica segue le linee generali presentate in Figura 3.11. Tale configurazione ad anello chiuso è caratterizzata dalla presenza di una unità di supervisione, costituita da un elaboratore, tipicamente interagente con un operatore.

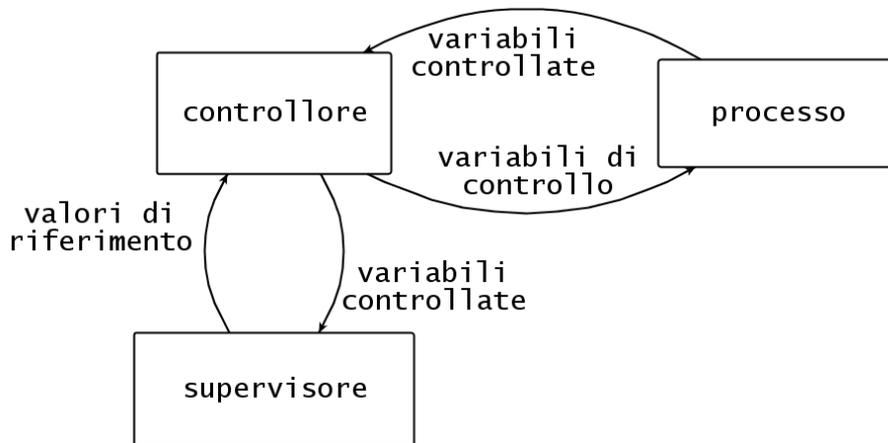


Figura 3.11: Schema generale di controllo della cella climatica.

Nella Figura 3.12 i ruoli del mote, della serra e dell'elaboratore sono raffigurati in modo meno formale.

La basestation, costituita da un mote collegato ad un elaboratore, assume il ruolo dell'unità di supervisione. Per mezzo di un collegamento wireless essa

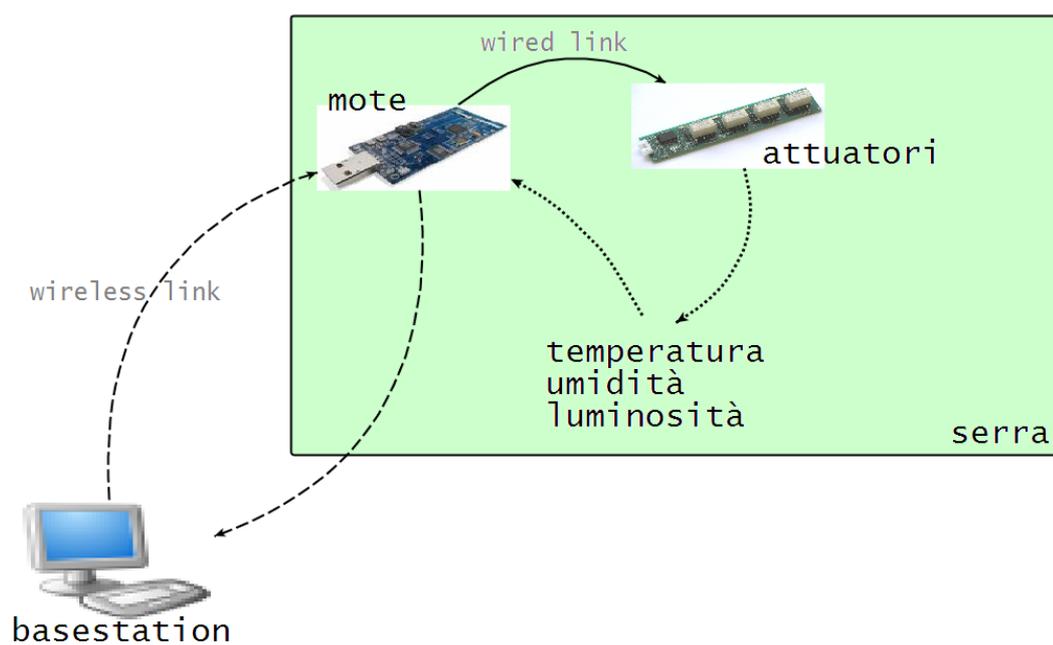


Figura 3.12: Relazione tra i principali componenti del sistema, nel caso sia presente una sola serra.

riceve dal mote i valori attuali delle variabili ambientali presenti in serra; in modo analogo invidia al mote i valori di riferimento desiderati per tali variabili.

Il valore di volta in volta impostato per i parametri di riferimento desiderati è fissato dall'operatore; egli può in ogni momento interrompere il collegamento con la WSN e ristabilirlo quando ritenga necessario variare i parametri interni delle serre.

In assenza di collegamento ciascuno dei motes provvederà autonomamente al controllo della serra di competenza, mantenendola “agganciata” ai valori impostati in memoria.

Si rimanda al Capitolo 4 inerente alla progettazione del prototipo sperimentale per una descrizione del sistema di controllo utilizzato nella cella climatica.

Capitolo 4

Progettazione del prototipo sperimentale

L'applicazione delle WSNs considerata in questo lavoro può essere schematizzata come in Figura 4.1: la rete è in generale ad hop multiplo ed alcuni dei suoi nodi sono posti all'interno di ambienti confinati, per i quali sono di interesse il monitoraggio ed il controllo dei parametri ambientali.

La configurazione piú generale prevede la comunicazione multi-hop tra i nodi ed una topologia mista. Nell'esempio della Figura 4.1 sono messe schematicamente in evidenza le coperture ad hop singolo di alcuni dei nodi che costituiscono la rete, onde evidenziare la necessità di un approccio multi-hop qualora l'estensione geografica della rete ecceda dimensioni lineari dell'ordine del centinaio di metri, secondo le specifiche inerenti la trasmissione via radio viste nel capitolo precedente.

E' messa in evidenza la basestation, connessa ad un elaboratore convenzionale, che in ricezione raccoglie i dati provenienti dalle varie serre, mentre in trasmissione invia i parametri desiderati relativi a ciascuna di esse.

Il prototipo sperimentale sviluppato nel seguito si riferisce alla porzione delimitata dal tratto rosso in Figura 4.1 e meglio rappresentata nella Figura 4.2, dove il nodo cui fanno riferimento le varie serre assume il ruolo della basestation.

Le sezioni successive illustrano le modalità di interazione tra il mote ed i vari attuatori presenti all'interno della serra, dai punti di vista sia hardware che software.

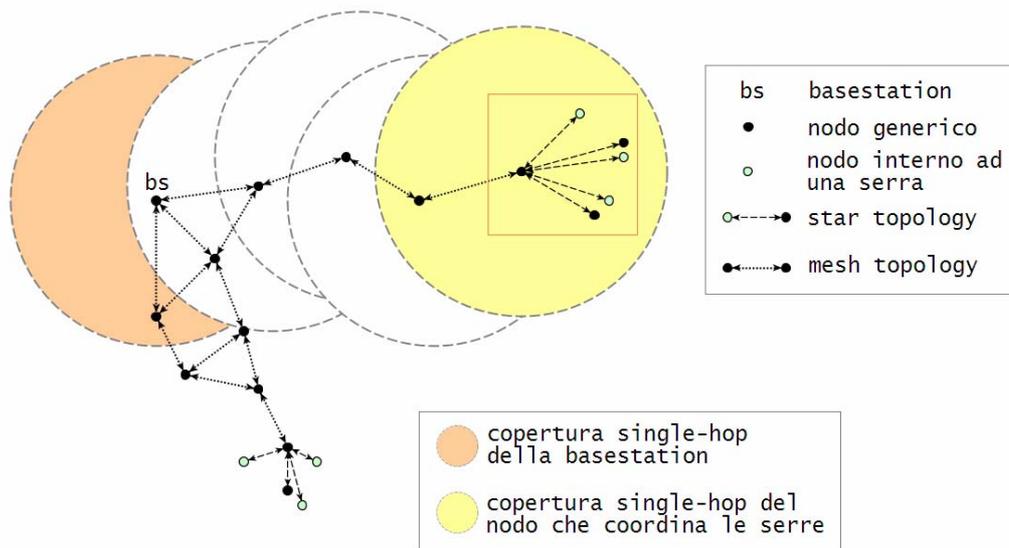


Figura 4.1: Esempio di sensornet ad hop multiplo ed a topologia mista: a maglie (mesh topology) ed a stella (star topology). Sono schematicamente indicate le coperture ad hop singolo di alcuni dei nodi costituenti la rete. Il prototipo sperimentale fa riferimento alla porzione delimitata.

In figura 4.2, oltre ai nodi interni alle serre, sono riportati alcuni nodi posti al di fuori di esse: il loro ruolo è quello di fornire all'operatore la possibilità di meglio calibrare la scelta sui valori desiderati, nonché di avere un quadro completo della situazione.

In particolare si è visto nel Capitolo 2 che il raffreddamento delle serre è in realtà un'azione di contrasto all'eventuale eccessivo riscaldamento della serra dovuto ad insolazione (appunto il tristemente noto "effetto serra"), realizzato semplicemente mediante circolazione forzata di aria proveniente dall'esterno. Il caso in cui ad un "intento di raffreddamento" non corrisponda una effettiva diminuzione di temperatura sarebbe facilmente spigabile da un valore elevato rison-

trato anche per la temperatura esterna; l'assenza di tale informazione potrebbe portare l'operatore ad ipotizzare un falso malfunzionamento dell'apparato¹.

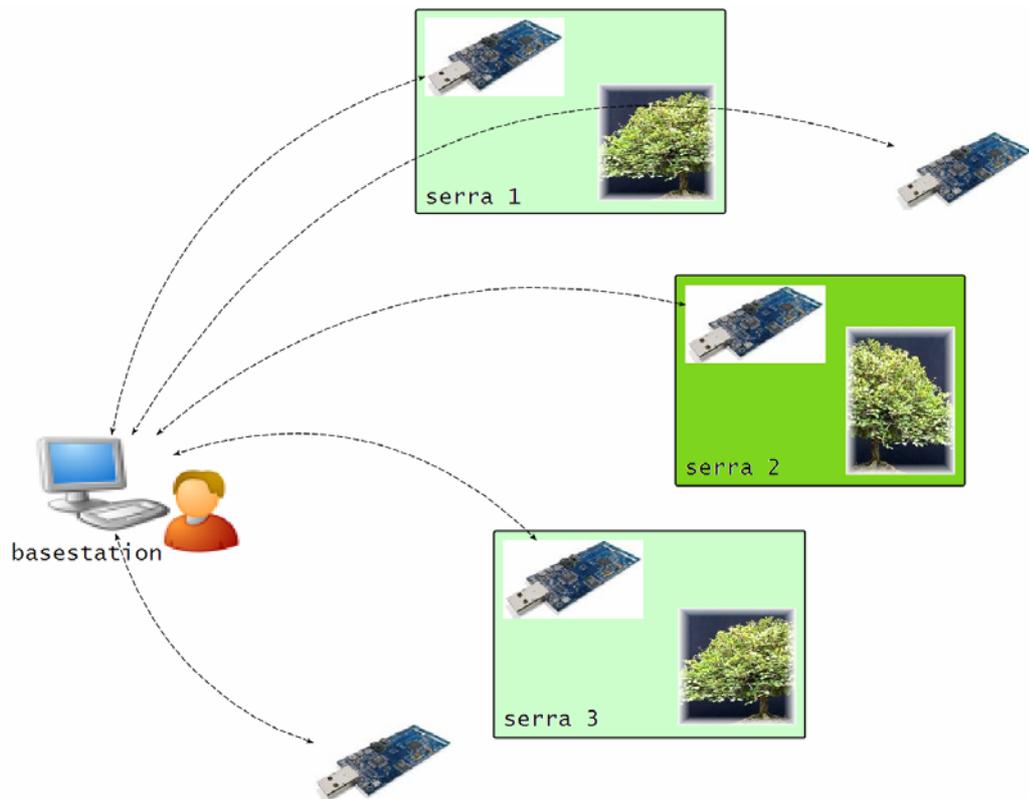


Figura 4.2: Astrazione della disposizione tipica degli elementi che costituiscono il prototipo: una basestation, una o più serre, uno o più motes.

4.1 Configurazione dell'hardware

Oltre al fondamentale supporto fornito dalla WSN, la funzionalità che caratterizza l'applicazione considerata, cioè la possibilità di estendere il numero e

¹in realtà questa è una osservazione solo "di principio", infatti l'effettiva serra in esame è solo un semplice e limitato modello in scala ridotta di una serra reale, e su tale modello non è prudente trarre conclusioni che non siano solo qualitative.

la tipologia degli attuatori collegati al mote, è ottenuta impiegando uno dei connettori presenti sul circuito stampato del modulo Telos, l'IDC (Insulation Displacement Connector) expansion header a 10 pin.

Tale connettore in particolare consente al modulo Telos di esportare il bus di comunicazione I2C; il funzionamento ed il campo di applicazione di tale tipologia di bus è brevemente descritto nel seguito, congiuntamente alle caratteristiche del bus SPI, usato quale supporto nella comunicazione con alcune periferiche (ad esempio il chip radio) da parte del microcontrollore TI MSP430.

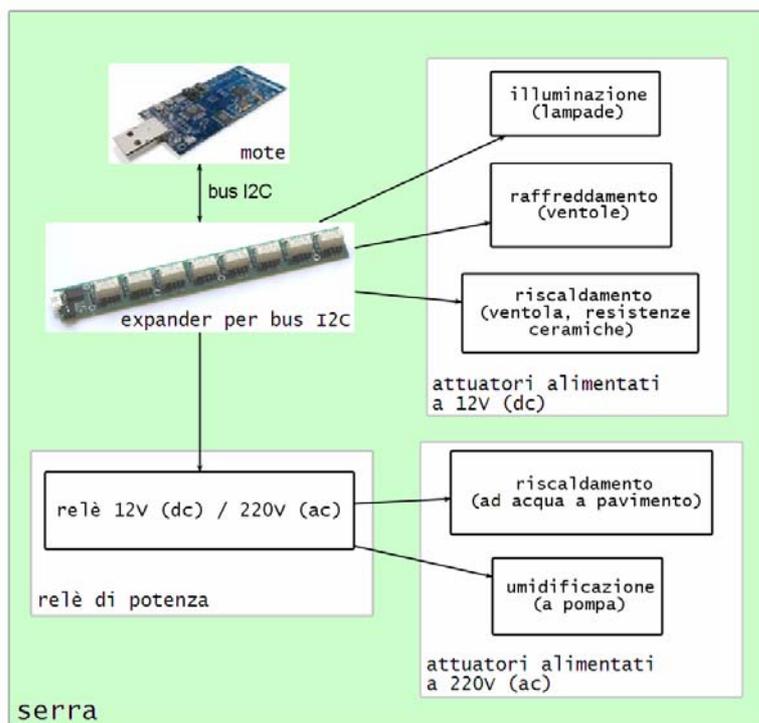


Figura 4.3: Quadro d'insieme degli elementi presenti all'interno della serra: oltre al mote e agli attuatori, compaiono un I/O expander per bus I2C a comandare alcuni relè collocati sul circuito stampato dello stesso e relè di potenza a comandare gli attuatori alimentati tramite rete domestica a 220V.

La Figura 4.3 fornisce il quadro d'insieme della configurazione hardware presente in serra. Il mote è connesso ad un I/O expander per il citato bus

I2C: il circuito integrato PCF8574 della Philips Semiconductors², che consente di pilotare una batteria di 8 relè, i quali azionano in parte direttamente ed in parte per via indiretta i vari attuatori presenti in serra.

Come evidenziato in Figura 4.3 la componente ad acqua del riscaldamento e l'umidificazione della serra sono ottenuti per mezzo di attuatori che traggono alimentazione dalla rete domestica a 220V, pertanto è stato inserito un ulteriore "livello di comando", costituito da relè adatti al funzionamento con tale tensione, tra i relè pilotati dall'expander per bus I2C e tali attuatori.

4.1.1 I bus SPI e I2C

Tra le interfacce di I/O di cui è dotato il microcontrollore TI MSP430 si considerano nel seguito quella a bus seriale SPI (Serial Peripheral Interface), utilizzata per le comunicazioni con il chip radio, e quella a bus seriale I2C (Inter-Integrated Circuit bus), impiegata nell'applicazione presa in esame.

Serial Peripheral Interface (SPI)

Lo standard SPI costituisce una soluzione adeguata per comunicazioni seriali con periferiche a bassa velocità, in cui vi sia la necessità di gestire stream di dati, in contrapposizione a situazioni in cui la modalità di accesso sia costituita da letture e scritture da e su dispositivi slave ciascuno individuato dal proprio indirizzo. I contesti che traggono i maggiori benefici dall'impiego di SPI sono quelli caratterizzati da una comunicazione full duplex in cui siano presenti un unico dispositivo master ed un unico dispositivo slave. Infatti con lo standard SPI è in ogni caso instaurata una comunicazione full duplex e non è presente la gestione degli indirizzi dei dispositivi slave.

Ad esempio lo scambio di dati tra MCU e chip radio soddisfa tali requisiti. Come accennato i dispositivi comunicano in modalità master/slave e, vista l'assenza in SPI di un meccanismo di gestione degli indirizzi, sono necessarie

²si visiti il sito all'indirizzo <http://www.nxp.com/pip/pcf8574p>

componenti hardware aggiuntive nel caso siano presenti sul bus più dispositivi slave; qualora invece la comunicazione sia del tipo punto-punto (singolo master - singolo slave, come in figura 4.x) il bus SPI trae vantaggio in termini di semplicità ed efficienza rispetto ad impostazioni che gestiscono l'indirizzamento (come avviene ad esempio nel bus I2C).



Figura 4.4: Collegamento mediante bus SPI tra un singolo master ed un singolo slave. Sono presenti quattro segnali: SCLK serial clock; MOSI master data output, slave data input; MISO master data input, slave data output e \overline{SS} slave select.

E' il master a gestire la comunicazione, generando un segnale di clock e selezionando lo slave. I dati sono in ogni caso trasferiti in entrambe le direzioni: un dispositivo che operi in sola trasmissione deve scartare il byte ricevuto, mentre nel caso duale di sola ricezione deve generare un "byte spurio" da trasmettere.

Tale tipologia di bus non prevede un meccanismo di acknowledgement, nè di controllo del flusso: essi devono essere eventualmente implementati al di sopra di SPI.

Inter-Integrated Circuit (I2C)

Il bus seriale I2C[7] in sostanza è costituito da una sola coppia di fili (SCL, serial clock e SDA, serial data) e non necessita di logica di arbitraggio, consentendone

una implementazione hardware molto semplice ed economica. Esso è stato originariamente sviluppato da Philips³ per la comunicazione tra dispositivi interni ad un apparecchio televisivo. Il supporto di comunicazione da esso fornito si addice a periferiche a bassa velocità collocate in prossimità del dispositivo che controlla il segnale di clock: il master. Ciascuno dei dispositivi cui il master si riferisce per mezzo di un indirizzo è denominato slave (si veda la Figura 4.5).

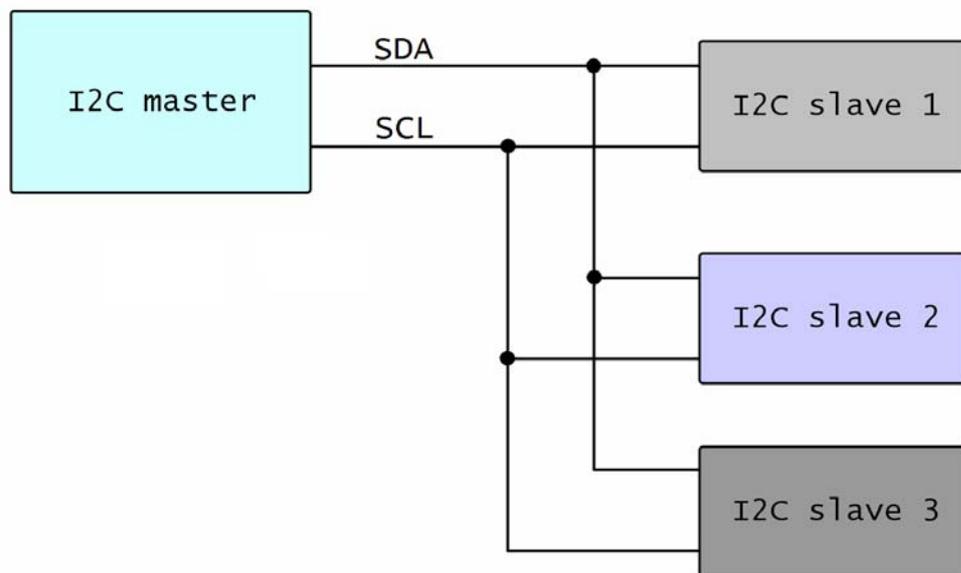


Figura 4.5: Semplice configurazione in cui un dispositivo master è connesso a più dispositivi slave mediante il bus I2C. SDA identifica la linea serial data, mentre SCL il serial clock.

I due segnali SDA e SCL del bus consentono la trasmissione seriale di byte ad 8 bit e di indirizzi a 7 bit, cui vanno aggiunti alcuni bit di controllo.

In situazioni particolari, nelle quali lo slave si trovi in difficoltà durante una transazione, il master può riscontrare il mantenimento forzato dello stato basso per il segnale di clock ad opera dello slave stesso; in conseguenza deve arrestare la trasmissione fintantochè il clock non risulti rilasciato dallo slave.

³sito web di Philips per l'I2C: www-us.semiconductors.philips.com/I2C/

Il protocollo I2C ammette la presenza di piú master e consente sia ai master che agli slave sia la trasmissione che la ricezione di byte di dati.

Ogni tipologia di dispositivo slave è caratterizzata da un proprio indirizzo, i bit meno significativi del quale sono di norma configurabili a livello di PCB (Printed Circuit Board). Segue che il numero di slave identici che è possibile connettere al bus senza che vi siano conflitti è limitato dalle possibili configurazioni di tali bit di indirizzo configurabili dall'utente.

All'inizio di ogni transazione il master trasmette l'indirizzo dello slave con il quale intende comunicare. E' compito degli slave monitorare lo stato del bus e rispondere nell'eventualità siano chiamati in causa.

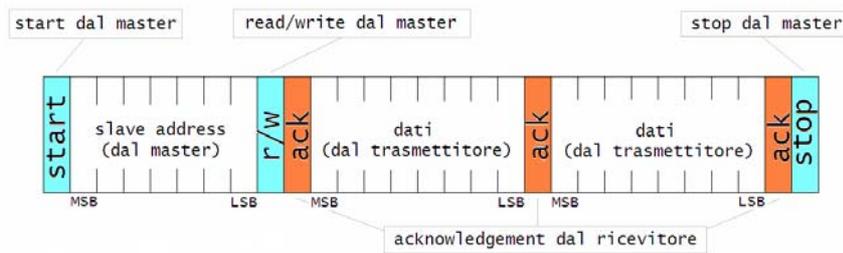


Figura 4.6: Sequenza di bit tipica di una comunicazione su bus I2C.

La comunicazione procede come illustrato in Figura 4.6: il master, dopo aver posto sulla linea SDA la condizione di start, spedisce l'indirizzo a 7 bit del dispositivo slave; il bit piú significativo (MSB, most significant bit) è il primo ad essere trasmesso. L'ottavo bit dopo quello di start (è il bit di read/write) specifica se lo slave dovrà trasmettere (1) o ricevere (0). Il bit successivo è un ack bit fornito dal dispositivo ricevente, che conferma la ricezione del byte precedente.

Segue la trasmissione da parte del trasmettitore (master o slave) del byte di dati, ad iniziare dal MSB. Al termine di tale byte il ricevitore risponde con un ack bit.

Sequenze di 9 bit come quella descritta si ripetono fino a quando il trasmettitore non ha piú byte da inviare.

La fine di una transazione di scrittura (lo slave riceve) è segnalata dalla condizione di stop posta dal master dopo l'ultimo ack bit fornitogli dallo slave, mentre nel caso la transazione sia di lettura (lo slave trasmette) la fine di tale attività è segnalata allo slave dal fatto che il master non risponde con un ack bit all'ultimo byte inviatogli.

A completare il protocollo I2C vi sono la possibilità di una scrittura in broadcast e un indirizzamento a 10 bit invece che a 7 bit. Ogni dispositivo definisce al di sopra di I2C il proprio set di comandi.

Da rilevare è il fatto che nel caso il master sia la MCU, su di essa non vengono a pesare overhead derivanti dal bus stesso (come potrebbe accadere per bus seriali basati su time-slot), visto che in I2C è il master a gestire le temporizzazioni.

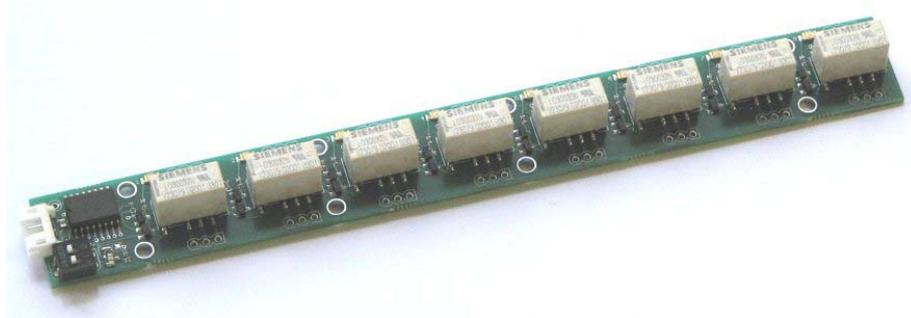


Figura 4.7: I/O expander per bus I2C collegato ad una batteria di 8 relè.

La Figura 4.7 presenta la scheda che monta l'I/O expander PCF8574 per bus I2C e la batteria di 8 relè da esso azionati ed utilizzati per alimentare parte degli attuatori presenti in serra.

4.1.2 Modalità di funzionamento degli attuatori

Nel prototipo di serra sviluppato in questo lavoro la variabile di stato che assume il ruolo piú rilevante è la temperatura; ad essa è dedicato lo sforzo maggiore ai fini del controllo. Come accennato nel capitolo introduttivo, questo non per il fatto che grandezze quali il grado di illuminazione e di umidità presenti in una serra abbiano un ruolo meno rilevante, quanto per considerazioni di semplicità nella realizzazione dell'apparato, secondo quanto visto nel secondo capitolo.

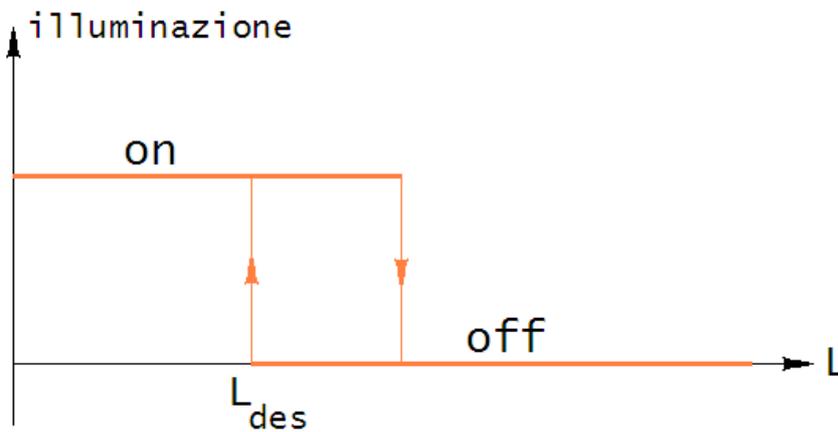


Figura 4.8: Caratteristica con isteresi del relè che aziona le lampade, in termini della luminosità attuale $L(t)$ e di quella desiderata L_{des} .

Le Figure 4.8 e 4.9 illustrano le caratteristiche del controllo a relè realizzato per la luminosità $L(t)$ e per l'umidità interna $U(t)$.

In entrambe è presente una isteresi che definisce due distinte soglie per le transizioni on→off e off→on dei relè che comandano gli attuatori. Le due figure si distinguono per il fatto che in riferimento all'umidificazione si è scelto di disporre le soglie in modo simmetrico rispetto al valore desiderato U_{des} , mentre nel caso dell'illuminazione non appena essa cala al di sotto di L_{des} è prevista l'accensione delle lampade.

La gestione della temperatura è lievemente piú articolata di quanto visto

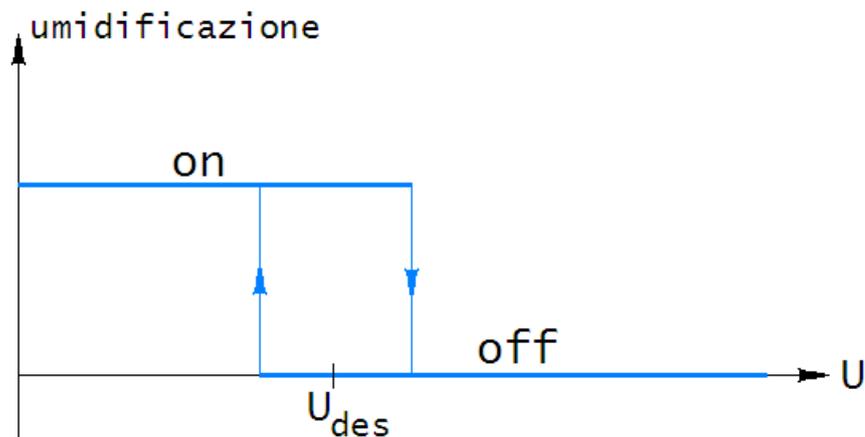


Figura 4.9: Caratteristica con isteresi del relè che aziona l'umidificazione a pompa, in termini dell'umidità attuale $U(t)$ e di quella desiderata U_{des} .

per umidità e illuminazione, secondo quanto riportato qualitativamente nella Figura 4.10.

In essa ad ogni valore della differenza tra la temperatura attuale $T(t)$ e quella desiderata T_{des} è fatta corrispondere una modalità di funzionamento ritenuta appropriata.

Nel caso $T(t)$ sia sufficientemente al di sopra di T_{des} è attivata la modalità di raffreddamento, che per quanto possibile tende ad uniformare la temperatura interna $T(t) \equiv T_{int}(t)$ a quella esterna $T_{est}(t)$. Tale modo di procedere è consistente con la scelta progettuale di non includere nel sistema una effettiva unità di raffreddamento, ma di imitarne gli effetti mediante ventilazione.

Nella situazione in cui $T(t)$ sia significativamente al di sotto di T_{des} sono attivate le due modalità di riscaldamento: quella ad aria calda, che come visto sfrutta il riscaldamento di resistenze ceramiche, e quella ad acqua calda a pavimento, circolante in un tubo di materiale siliconico che si ripiega nella parte inferiore della struttura.

Il caso in cui $T(t)$ si trovi in prossimità⁴ di T_{des} è gestito in modo distinto a

⁴L'effettiva posizione delle soglie attorno a T_{des} è impostabile da programma ed è quindi

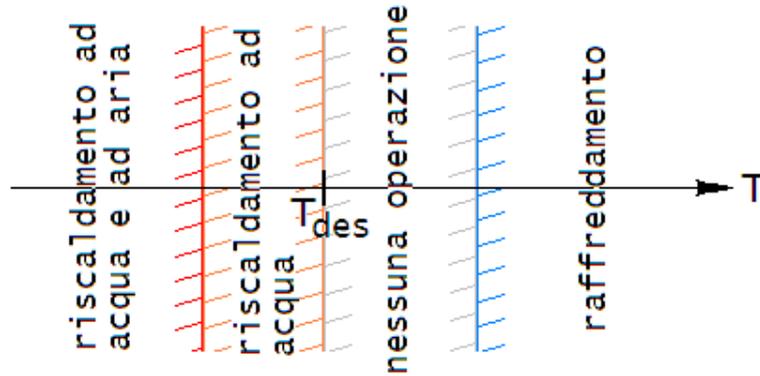


Figura 4.10: Modalità di funzionamento degli attuatori che influenzano la temperatura interna $T(t)$, in funzione dell'errore $T(t) - T_{des}$. Le soglie sono indicate in modo qualitativo.

seconda che l'errore $T(t) - T_{des}$ sia positivo o negativo.

Il primo caso ($T(t) \geq T_{des}$) vede tutti i relè nello stato off, o equivalentemente nessuna azione è esercitata ad influenzare i parametri ambientali presenti in serra, mentre nel secondo ($T(t) < T_{des}$) è azionato il solo riscaldamento ad acqua calda, il cui intento in sede progettuale è stato quello di fornire un supporto al mantenimento della temperatura interna a fronte di una temperatura esterna inferiore a quella desiderata.

al momento variabile solo in sede di compilazione.

4.2 Software dell'applicazione

In riferimento al versante software si è operato in due distinti contesti: la programmazione in nesC⁵ relativa ai motes ed alla rete wireless, e la realizzazione di una GUI (Graphical User Interface) che consenta all'operatore di acquisire, visualizzare ed eventualmente memorizzare i dati provenienti dai vari nodi della rete e di inviare i valori desiderati per i parametri ambientali distintamente alle singole serre presenti. Tale interfaccia grafica è stata realizzata mediante il linguaggio di programmazione Java⁶.

4.2.1 Software dei nodi della WSN

La Figura 4.11 riporta il diagramma a blocchi semplificato della porzione di codice che gestisce il comportamento “di routine” di un mote posto in una serra. Come accennato nel Capitolo 3, la programmazione orientata agli eventi che caratterizza TinyOS consente di massimizzare l'efficienza del software, contrastando le limitate risorse hardware disponibili all'interno del singolo nodo facente parte della rete.

Nel diagramma di Figura 4.11 è riportato il sostanziale comportamento del mote in risposta alla segnalazione operata da un timer relativa al trascorrere di un opportuno intervallo temporale, posto per comodità pari ad un secondo.

In corrispondenza a tale evento è aggiornata un'ora locale interna al mote, per la quale si è scelta una risoluzione pari al secondo che, seppur molto grossolana in senso assoluto, è sembrata ragionevole alla luce dell'ampiezza degli intervalli temporali tipici dell'applicazione in esame. Tale riferimento temporale locale è “agganciato” all'ora locale dell'elaboratore cui si connette la basestation: esso invia un messaggio di risincronizzazione ad un nodo il cui tempo locale, presente nei campi dati dei pacchetti provenienti dai vari nodi,

⁵Si veda il Capitolo 3.

⁶Per facilitare l'intefacciamento tra la GUI e la rete wireless sono stati utilizzati alcuni tools, scritti anch'essi in Java, presenti nella distribuzione di TinyOS.

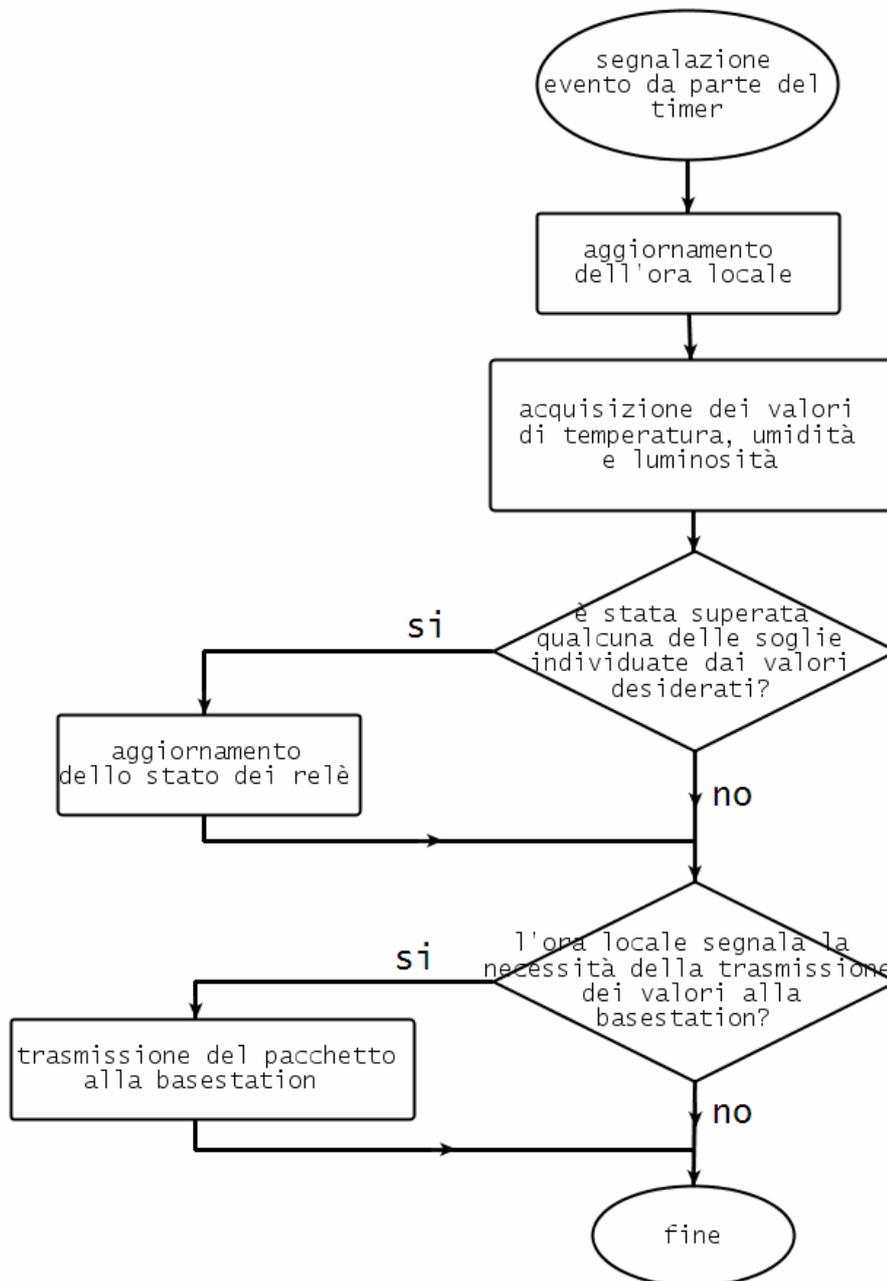


Figura 4.11: Diagramma a blocchi semplificato della porzione del software che gestisce l'interazione del mote con gli attuatori e la trasmissione dei pacchetti di dati alla basestation.

risultati compromesso dalla inevitabile deriva delle caratteristiche degli oscillatori presenti nei mote⁷.

La risincronizzazione è implicitamente prevista anche nel caso in cui vengano inviati ad un nodo nuovi valori desiderati per i parametri ambientali, o un nuovo intervallo tra due trasmissioni successive dei valori misurati alla basestation, come evidenziato nel diagramma a blocchi semplificato riportato in Figura 4.12.

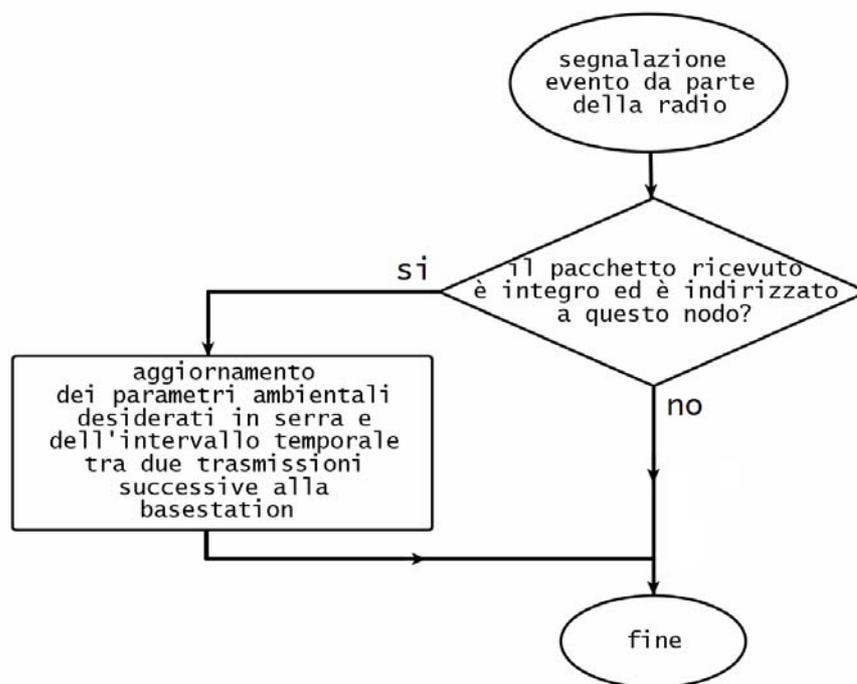


Figura 4.12: Diagramma a blocchi semplificato della porzione del software che gestisce l'arrivo di un pacchetto proveniente dalla basestation.

⁷In sostanza si compensa l'offset ma non lo skew.

4.2.2 Interazione con la rete mediante interfaccia grafica

Sebbene la GUI sia stata realizzata principalmente per consentire e rendere quanto piú possibile agevole l'interazione con la sensornet, al fine di prelevarne ed impostarne i parametri di interesse, si è cercato al contempo di darle un aspetto “user-friendly”, rivolto ad un ipotetico “cliente” interessato alle funzionalità raggiunte dal prototipo sperimentale.

La struttura generale della GUI prevede la presenza di vari “tab”, ciascuno dei quali comporta la visualizzazione di una finestra dedicata all'interazione con uno dei mote presenti nella WSN, come nell'esempio mostrato in Figura 4.13, dove tra quelle disponibili è attiva la finestra relativa al mote numero 71. All'avvio dell'applicazione i tab associati ai vari motes sono aggiunti in modo automatico non appena la basestation riceve i relativi pacchetti di dati. Cliccando sui tab è possibile navigare tra le varie finestre disponibili.

Da ciascuna di esse è possibile ottenere le informazioni rilevanti relative al nodo corrispondente: in forma grafica qualitativa sono riportati gli andamenti degli ultimi campioni dei parametri ambientali, mentre l'ultimo valore ricevuto è presentato in forma numerica.

Nella parte inferiore della finestra sono collocati tre “slider”, che consentono l'impostazione entro un range ragionevole dei valori desiderati dei parametri. L'effettivo invio di tali parametri al mote di competenza è subordinato alla pressione del tasto corrispondente sottostante. Al fine di permettere elaborazioni ed analisi “off-line” dei dati raccolti è possibile la memorizzazione degli stessi su file; tale possibilità ha reso possibili le valutazioni presentate nel successivo Capitolo 5, dedicato ad una breve rassegna di prove sperimentali.

Oltre ai tab riguardanti i singoli mote, a fornire un quadro d'insieme è inserita una finestra che riassume i dati acquisiti dalla totalità dei nodi presenti nella rete; un esempio è fornito dalla Figura 4.14, dove il tab corrispondente è denominato “main window”.

In tale finestra sono presentati in forma grafica gli andamenti dei tre pa-

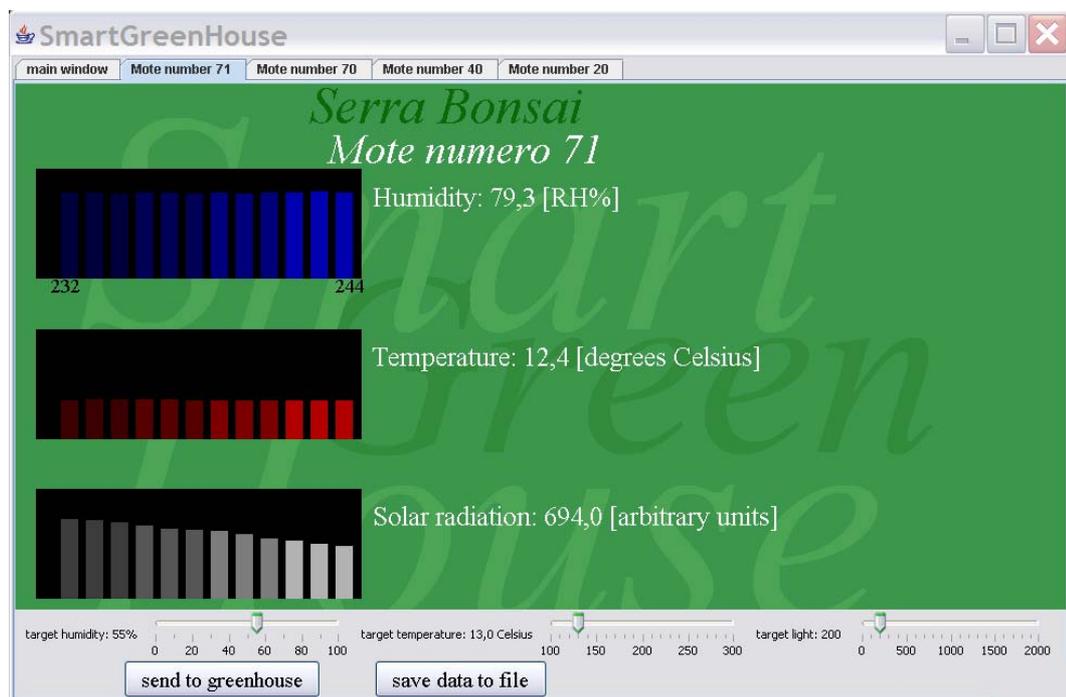


Figura 4.13: Ad ogni nodo presente nella rete è associata una finestra distinta della GUI, selezionabile cliccando sul “tab” corrispondente. Tale finestra fornisce informazioni sulle variabili ambientali misurate dal nodo e consente la modifica dei valori desiderati per tali variabili. E’ prevista la possibilità di memorizzare su file i dati acquisiti, per elaborazioni ed analisi differite.

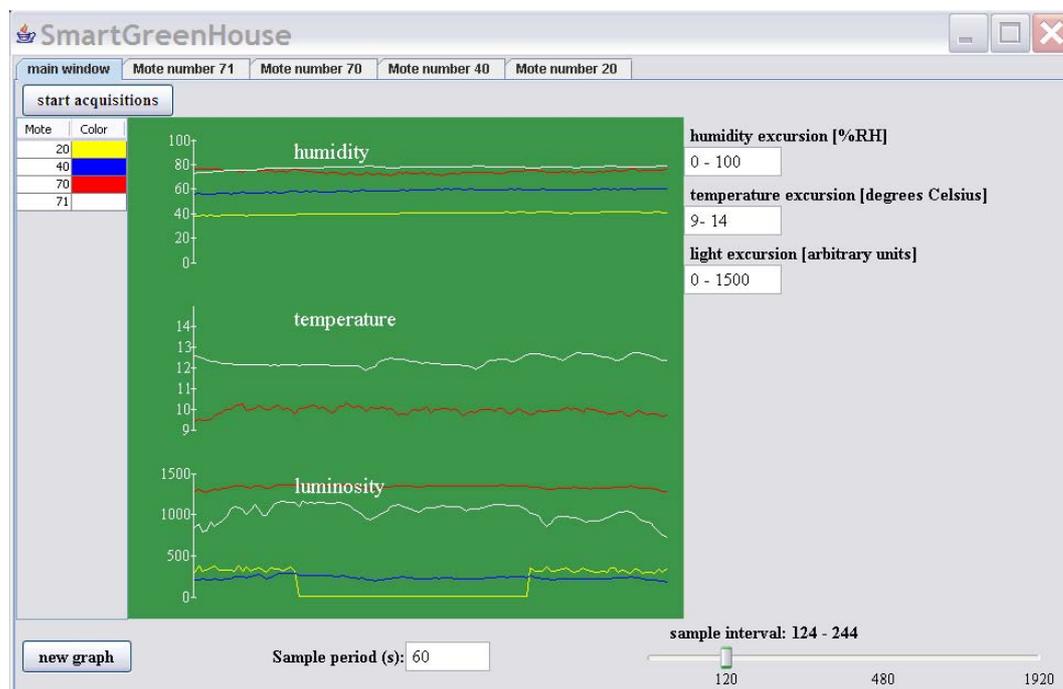


Figura 4.14: Finestra principale della GUI. Essa fornisce un quadro d'insieme delle grandezze misurate dal complesso dei nodi costituenti la rete. La tabella sulla sinistra associa un colore distinto ad ogni nodo, consentendo una piú chiara lettura dei dati riportati in forma grafica.

rametri ambientali misurati dai nodi della rete, a ciascuno dei quali è associato un colore secondo quanto disposto dalla tabella posta sulla sinistra. Un importante parametro impostabile dalla finestra principale è l'intervallo di tempo tra due invii successivi alla basestation dei dati rilevati dai motes; tale valore è impostato in modo uniforme per tutti i nodi costituenti la rete.

Capitolo 5

Prove sperimentali ed analisi dei risultati

Al fine di poter valutare l'efficacia della soluzione proposta per il problema descritto nel capitolo introduttivo, sono nel seguito presentati gli esiti di due prove sperimentali, selezionate in modo da fornire nel loro insieme un quadro complessivo delle potenzialità dell'apparato.

I grafici riportati nelle sezioni successive si riferiscono ai parametri ambientali misurati internamente ed esternamente alla serra, nonché ai valori desiderati per i parametri interni, impostati dall'operatore. Preliminarmente sono riportate alcune limitazioni che traggono origine dai numerosi trade-off cui si è dovuto far fronte nel corso della progettazione.

5.1 Limitazioni inerenti le prove sperimentali

Appare utile ricordare che una soluzione “in scala naturale” per il problema generale del monitoraggio e del controllo delle variabili ambientali in un contesto di colture in serra, a partire dal quale è stato ritagliato quello effettivamente affrontato, richiederebbe attrezzature, mezzi e sforzi proporzionati alle dimensioni degli oggetti coinvolti; l'intento del lavoro esposto in queste pagine è pe-

raltro di carattere intrinsecamente qualitativo, dato che l'ambiente monitorato e controllato è costituito da una serra in miniatura, popolata da bonsai.

Se da una parte tale considerazione appare come una severa limitazione rispetto all'ambito cui si riferisce il problema generale, dall'altra consente una pronta gestione in laboratorio dei vari aspetti del problema, lasciando il dovuto spazio a quello che appare maggiormente rilevante: la possibilità di esplorare modalità alternative in tempi ridotti e con l'ausilio di attrezzature economiche. In definitiva quella presentata è da considerare principalmente come una applicazione delle WSNs nella quale sono presenti alcune serre, piuttosto che una applicazione della coltura in serra nella quale siano impiegate alcune delle potenzialità delle WSNs.

Una conseguenza delle scelte effettuate in sede di progetto è che il valore dell'umidità relativa è risultato soggetto ad un controllo marginale, nel senso che nonostante sia previsto l'apporto di acqua in serra per mezzo di una pompa, l'effetto di tale apporto non è facilmente individuabile nei grafici riportati, e risulta fortemente dipendente dalle condizioni presenti all'esterno della serra stessa.

La motivazione è da ricercare nella semplicità della soluzione proposta, che prevedendo l'accumulo dell'acqua in una bacinella piana ed una forma di irrigazione del terreno dei bonsai non consente una vaporizzazione efficace e repentina dell'acqua accumulata, e nel fatto che la temperatura e l'umidità risultano accoppiate. Ad avere una influenza sull'umidità è anche il valore assegnato per la temperatura desiderata, che può comportare la presenza o l'assenza di ventilazione.

Secondo quanto esposto nel terzo capitolo, la serra è equipaggiata con una coppia di lampade, al fine di aumentare quando richiesto il grado di illuminazione interno. Tale funzionalità è stata testata nelle prove preliminari ed è risultata soddisfacente (si veda l'Appendice C); peraltro la valutazione dei benefici raggiungibili in termini di migliorata crescita dei bonsai non è prevista in questa sede.

5.2 Comportamento nel caso la temperatura esterna sia inferiore a quella desiderata

La Figura 5.1 mostra il complesso degli andamenti registrati nel corso di una prova sperimentale tenutasi in una piovosa giornata primaverile, nella quale la temperatura pomeridiana si è mantenuta nell'intorno dei 10°C.

In tale occasione la serra è stata posta in funzione a partire dal primo pomeriggio fino al raggiungimento in serata di una “condizione di stazionarietà” per la temperatura, secondo quanto specificato nel seguito. In riferimento al grafico superiore relativo all'umidità e a quello inferiore relativo alla luminosità sono riportati i soli andamenti interno ed esterno, per le motivazioni evidenziate nella sezione precedente. Il grafico centrale, riferito alla temperatura, mette in evidenza una buona correlazione tra il profilo climatico imposto dall'operatore ed corrispondente andamento misurato in serra.

La Figura 5.2 riprende il grafico centrale di Figura 5.1, evidenziandone due porzioni, discusse nella sezione successiva.

5.2.1 Analisi ed interpretazione dei risultati

La Figura 5.3 riporta l'evoluzione pomeridiana delle temperature misurate. Si nota come la scelta di fissare una temperatura desiderata variabile tra gli 11 ed i 13 gradi centigradi, a fronte di una temperatura esterna variabile tra i 9 ed i 10 gradi, comporti l'attivazione continua del riscaldamento ad acqua a pavimento e l'attivazione pulsata di quello ad aria calda. Al fine di testare in modo più completo il comportamento del sistema, nella parte finale della porzione di grafico evidenziata si è variato in modo maggiormente significativo il valore desiderato, riducendolo fino al valore di 11°C; si può notare l'adeguamento alla nuova situazione operato dagli attuatori.

La Figura 5.4 si riferisce al tratto serale della prova sperimentale, ed è riportato in quanto mette in evidenza una sorta di regolarità nell'andamento della

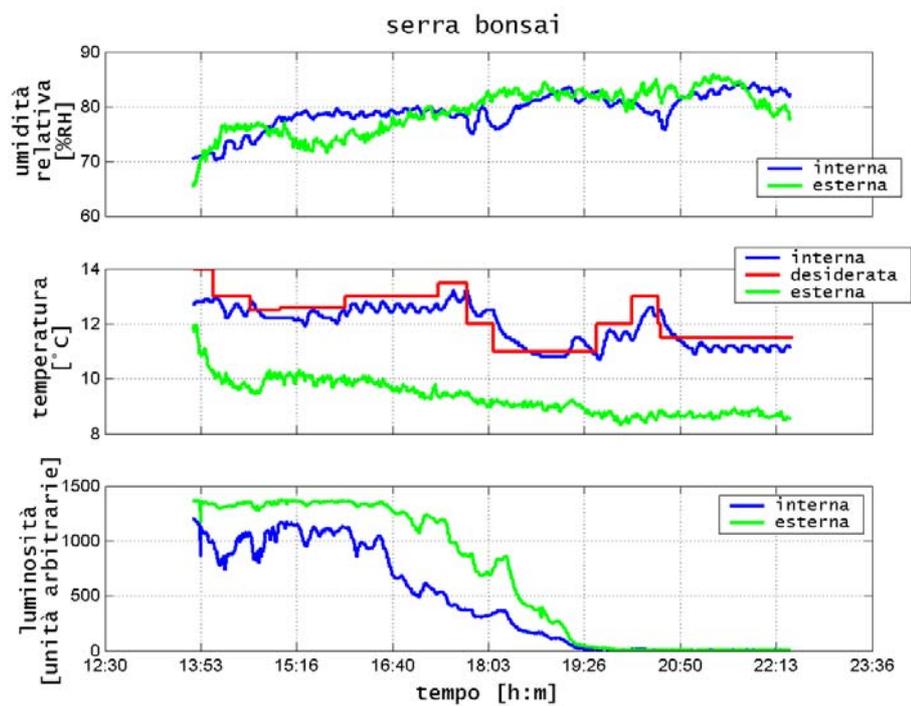


Figura 5.1: Andamenti temporali dei parametri ambientali interni ed esterni alla serra relativi ad una prova sperimentale pomeridiana/serale tenutasi in una piovosa giornata primaverile.

variabile controllata, in conseguenza dell'attivazione e dello spegnimento del riscaldamento ad aria calda in corrispondenza dell'attraversamento di una soglia posta al di sotto della temperatura desiderata.

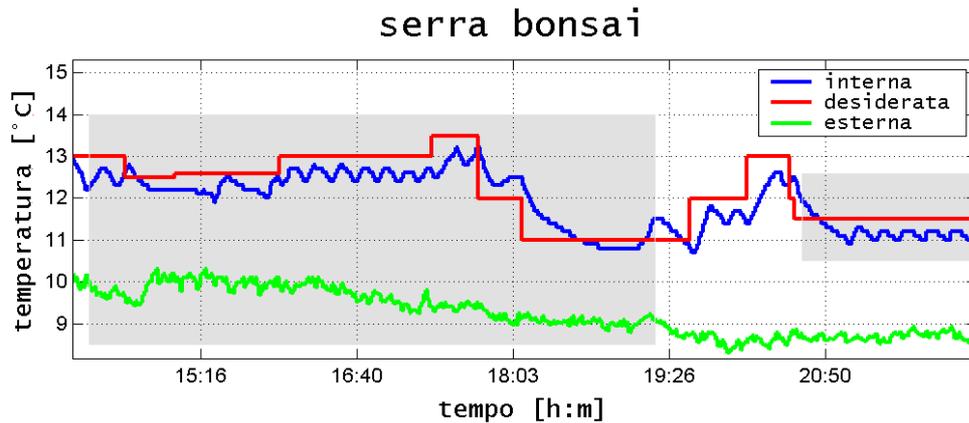


Figura 5.2: Andamento delle temperature registrate nel corso della prima prova. Le due porzioni evidenziate sono discusse nel seguito.

La regolazione della temperatura è infatti ottenuta per mezzo di azioni distinte a seconda dell'appartenenza del valore attuale misurato ad una tra quattro regioni, evidenziate con colorazioni differenti in Figura 5.4, e determinate dal valore desiderato e da due soglie ad esso riferite, impostabili in fase di compilazione del programma.

E' da puntualizzare che, per come sono state organizzati i test sperimentali, i tratti iniziali dei grafici riportati non sono da considerare attendibili; essi infatti riportano valori per i parametri ambientali che risentono in parte delle condizioni e della collocazione antecedenti il posizionamento dei motes nel setup sperimentale. Tale osservazione trova ad esempio riscontro negli andamenti di Figura 5.1.

Un altro aspetto da tenere in considerazione nell'osservare i dati sperimentali è la possibile influenza sulle grandezze misurate di fattori "esterni", quali ad esempio una improvvisa raffica di vento, od il fatto che parte della ser-

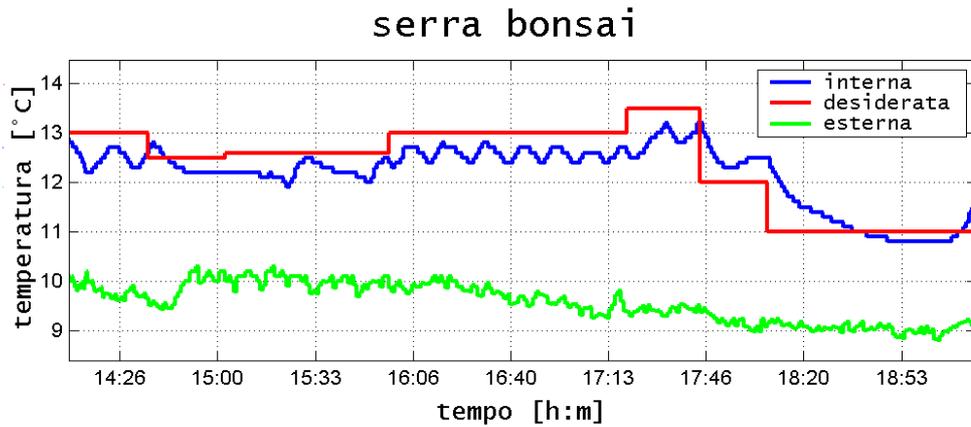


Figura 5.3: Evoluzione pomeridiana delle temperature nel corso della prima prova.

ra possa essere illuminata dal sole, con conseguente riscaldamento, mentre il sensore di luminosità possa trovarsi in zona ombreggiata, circostanza che non comporterebbe un aumento della luminosità.

Un esempio di una situazione di tal genere si può osservare in Figura 5.1, dove nel grafico della temperatura, in prossimità della linea che individua le ore 19:26 si ha un picco del valore misurato al di sopra del valore desiderato, non spiegabile vista la luminosità decrescente ed il tramonto del sole in corso.

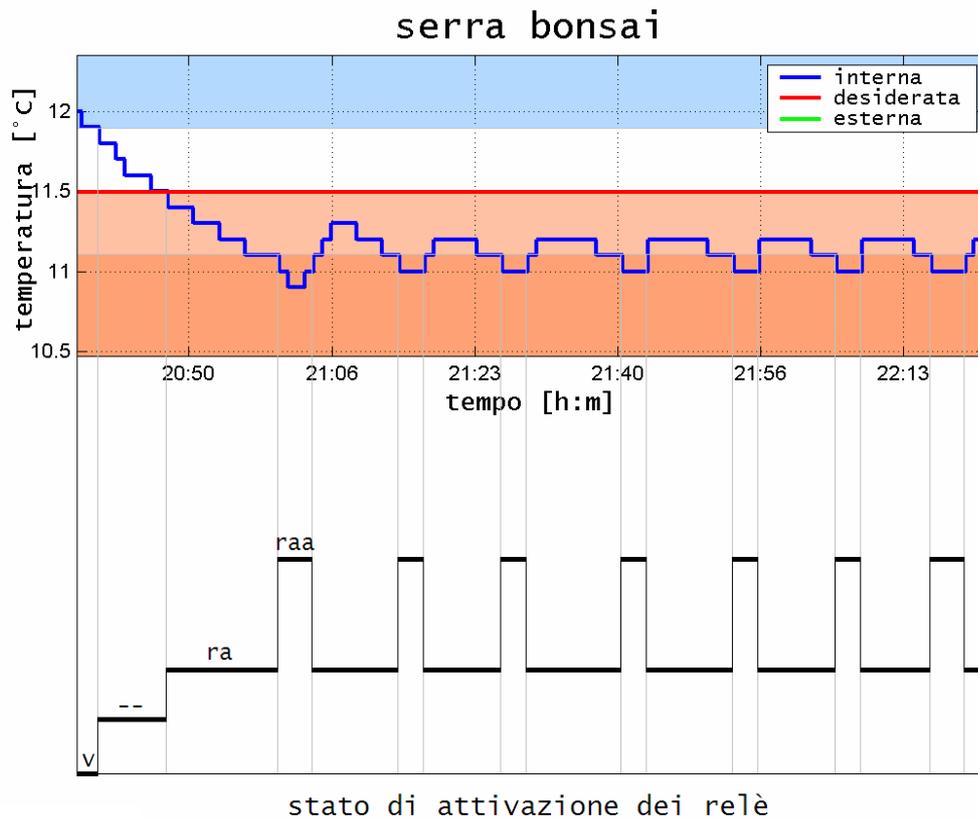


Figura 5.4: Evoluzione serale delle temperature misurata e desiderata all'interno della serra. E' riportata in modo schematico l'evoluzione dello stato di attivazione dei relè corrispondente; in particolare la notazione “v” sta per ventilazione, “- -” per nessuna operazione, “ra” per riscaldamento ad acqua e “raa” per riscaldamento ad aria e ad acqua.

5.3 Comportamento nel caso la temperatura esterna sia superiore a quella desiderata

Gli esiti della seconda prova sperimentale, tenutasi in una giornata primaverile soleggiata ed in parte della notte successiva, sono riportati in Figura 5.5. In essa si può riconoscere l'andamento tipico cui sono soggette temperatura ed umidità relativa in giornate prive di precipitazioni.

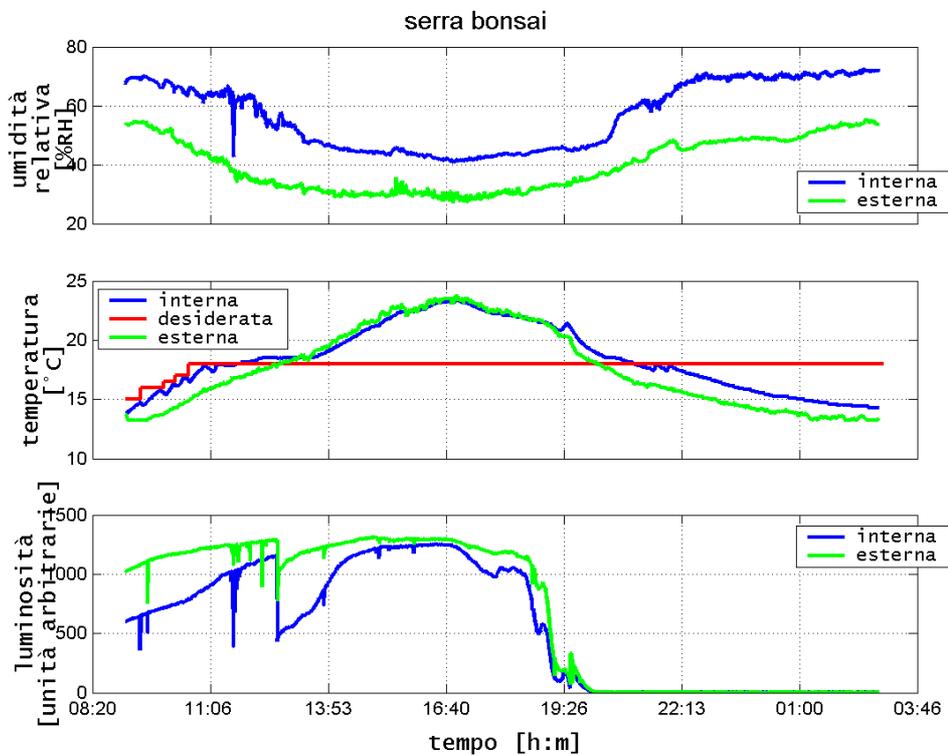


Figura 5.5: Andamenti temporali dei parametri ambientali interni ed esterni alla serra relativi ad una prova sperimentale nella quale la temperatura nelle ore centrali della giornata supera il valore desiderato. In particolare dopo le ore 22:00 gli attuatori sono posti in stand-by.

I picchi che si notano nei grafici di umidità e luminosità sono indice dell'attività di un operatore in corrispondenza della serra. Ad esempio il picco negativo chiaramente visibile nel grafico superiore, relativo all'umidità, è conseguenza di

un intervento di manutenzione, necessario per risolvere un malfunzionamento dell'innaffiatura a pompa dei bonsai.

In riferimento alla discontinuità presente nel grafico di luminosità, si segnala che essa è dovuta ad un riposizionamento della serra al fine di evitarne una esposizione diretta al sole, che avrebbe comportato un eccessivo riscaldamento della stessa, viste le ridotte potenzialità di raffreddamento disponibili.

5.3.1 Analisi ed interpretazione dei risultati

Il tratto di maggiore interesse del grafico delle temperature è riportato in Figura 5.6; in grigio è messa in evidenza una porzione degli andamenti che risulta analoga a quanto visto nella prova precedente, invece la zona a sfondo rosso evidenzia il comportamento del sistema nel caso in cui la temperatura esterna superi quella desiderata.

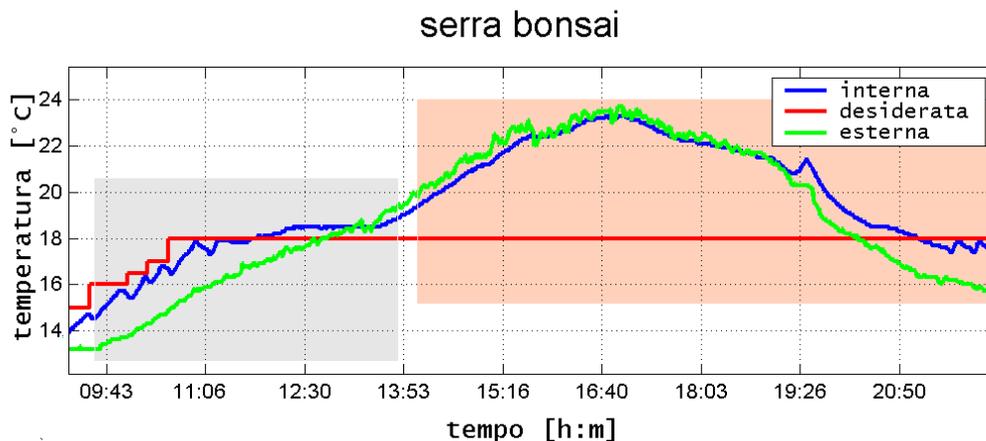


Figura 5.6: Grafici delle temperature registrate nella seconda prova. Sono messi in evidenza due regimi di funzionamento: in grigio la situazione che vede la temperatura esterna sostanzialmente inferiore a quella desiderata, in rosso il caso in cui la serra deve provvedere per quanto possibile al raffreddamento.

In tale situazione sono attivate le ventole di raffreddamento, posizionate se-

condo quanto visto nel Capitolo 3, che instaurano una circolazione forzata di aria proveniente dall'esterno, al fine di limitare il cosiddetto "effetto serra" che, se non contrastato, porterebbe ad un incremento notevole della temperatura interna.

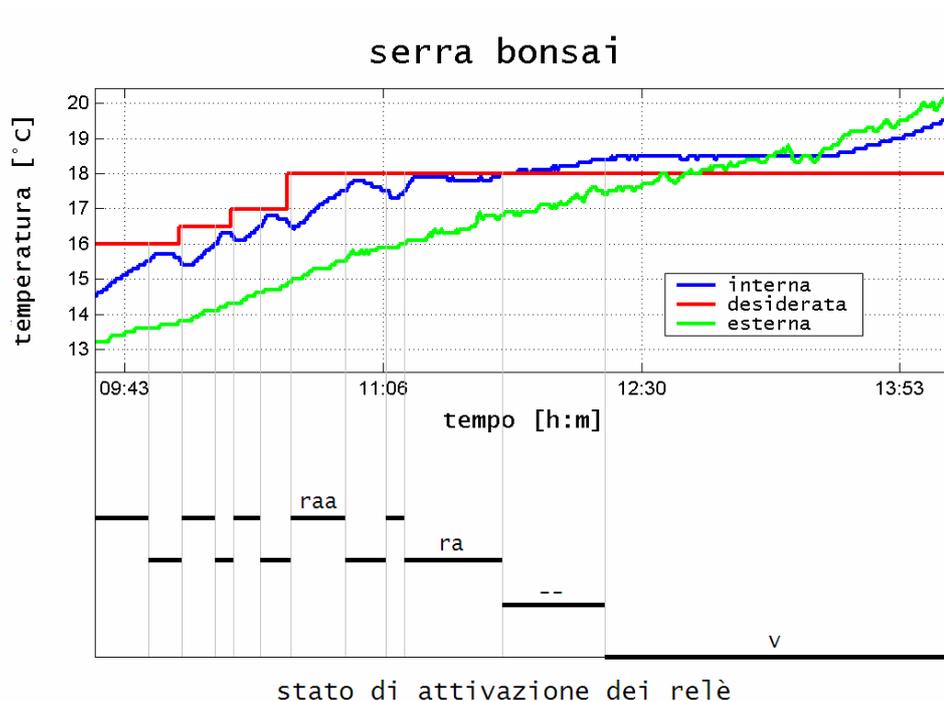


Figura 5.7: Evoluzione mattutina delle temperature. E' riportata in modo schematico l'evoluzione dello stato di attivazione dei relè corrispondente; in particolare la notazione "v" sta per ventilazione, "--" per nessuna operazione, "ra" per riscaldamento ad acqua e "raa" per riscaldamento ad aria e ad acqua.

Le Figure 5.7 e 5.8 ripropongono in maggior dettaglio le porzioni evidenziate nella Figura 5.6. Nella prima è inoltre riportato lo stato di attivazione dei relè; nella seconda si può notare come il circolo forzato d'aria operato dal sistema di raffrescamento raggiunga il massimo ottenibile per la configurazione realizzata: una sostanziale uguaglianza tra la temperatura esterna e quella interna.

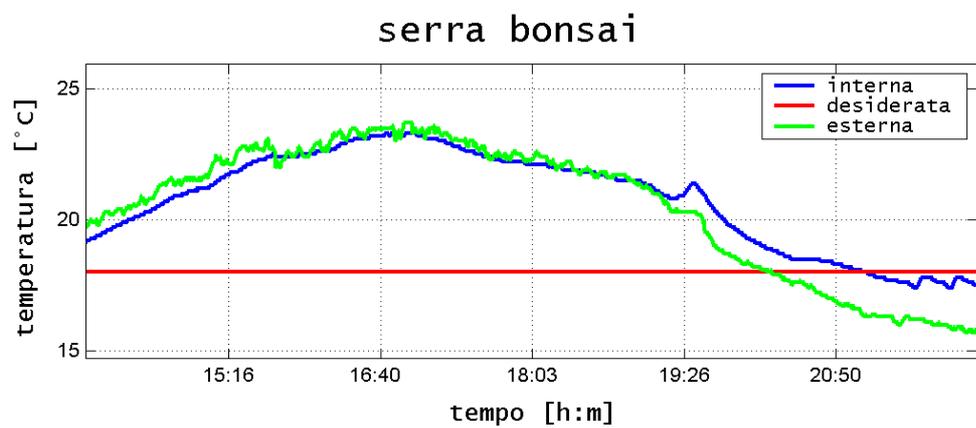


Figura 5.8: Evoluzione delle temperature nelle ore centrali di una giornata soleggiata. La ventilazione contrasta l’“effetto serra”, mantenendo la temperatura interna uguale a quella esterna.

Capitolo 6

Conclusioni e sviluppi futuri

Il problema affrontato nel presente lavoro di tesi è stato quello della realizzazione di un prototipo sperimentale che rendesse possibile il monitoraggio ed il controllo automatico dei parametri ambientali (temperatura, umidità relativa e luminosità) presenti in una regione spaziale confinata (interpretabile come una cella climatica o in modo piú concreto come una serra), introducendo nella soluzione proposta i benefici derivanti dall'impiego dell'emergente tecnologia delle reti di sensori senza fili (WSNs, Wireless Sensor Networks).

In via preliminare sono state valutate e selezionate le caratteristiche delle WSNs rilevanti al fine dell'applicazione considerata; in modo particolare, oltre alla naturale praticità dei collegamenti wireless tra i nodi costituenti la rete (secondo consuetudine denominati "motes"), l'integrazione dei sensori all'interno dei nodi stessi e la possibilità di estendere il numero e la tipologia degli attuatori gestibili.

Tali valutazioni sono state accompagnate dalla progettazione e realizzazione di una cella climatica (nella sostanza una serra in miniatura, avente dimensioni sufficienti a contenere 2-3 bonsai), corredata di un insieme di attuatori aventi il compito di indirizzare i parametri ambientali secondo un andamento desiderato, o equivalentemente facendo loro inseguire un assegnato profilo climatico.

Condizioni di praticità e di facile realizzabilità hanno portato alla scelta di

mantenere contenute le dimensioni della serra; l'accostamento di piantine bonsai (in particolare di Olmo Cinese, Zelkova Nire) ha peraltro reso uniforme la scala dimensionale riscontrabile tra gli oggetti coinvolti, rispetto ad una possibile realizzazione in un contesto reale di coltura in serra.

Sono stati realizzati gli elementi necessari alla gestione di sessioni di prova per l'apparato complessivo, quali un'interfaccia grafica che ha consentito ad un operatore di interagire con la rete wireless, sia in termini di acquisizione e memorizzazione dei dati provenienti da motes collocati internamente ed esternamente alla serra, sia in termini di impostazione dinamica dei valori di riferimento desiderati per i parametri ambientali interni.

I risultati delle prove hanno dimostrato l'efficacia, entro limiti ragionevoli, del controllo di temperatura, l'immediatezza del controllo della luminosità ed un'efficacia minore per il controllo dell'umidità relativa, conseguenza della scelta di non appesantire la realizzazione con apparati sofisticati e costosi, scelta peraltro seguita anche in riferimento alla gestione di temperatura e luminosità.

A caratterizzare il lavoro svolto è una linea di continuità che parte dalla formulazione del problema e conduce alla verifica sperimentale della soluzione proposta, attraverso le fasi di progettazione, realizzazione ed assemblaggio delle varie parti costituenti.

Tra i miglioramenti auspicabili per la soluzione proposta sono senz'altro da includere una modalità di comunicazione tra i nodi che preveda l'impiego di algoritmi di routing multi-hop oltre che ad hop singolo ed una gestione della potenza disponibile per i motes e per i dispositivi di comando degli attuatori (relè). In particolare, essendo dispositivi di potenza, gli attuatori richiedono una alimentazione separata. La realizzazione di una serra avente dimensioni maggiori di quella presentata in questo lavoro consentirebbe il posizionamento di più motes al suo interno, ampliando le possibilità di controllo degli attuatori e di gestione delle informazioni acquisite dai sensori.

Se da un lato si segnala che ciascun aspetto della soluzione proposta è suscettibile di varianti e miglioramenti, dall'altro si è fornito un primo "attacco"

al problema generale e tuttora attuale del controllo climatico in serra, alla luce delle nuove potenzialità fornite dalle WSNs.

Appendice A

Porzioni di codice nesC facenti parte dell'applicazione

Si riportano i contenuti di un file di intestazione, che oltre ad alcune costanti definisce la struttura del data payload del pacchetto single-hop, e del file di configurazione di alto livello che caratterizza ogni applicazione.

```
// SmartHouse.h (file di intestazione)

#ifndef SMARHOUSE_H
#define SMARHOUSE_H

enum {
    DEFAULT_INTERVAL = 10, // in secondi
    AM_SMARHOUSE = 0x93 };

typedef nx_struct smarthouse {
    nx_uint16_t version; // Time interval between adjacent readings
    nx_uint16_t interval;
    nx_uint8_t newActuation;
};
```

```

    nx_uint16_t id; // Mote id of sending mote
    nx_uint16_t count;
    nx_uint8_t hour;
    nx_uint8_t minute;
    nx_uint8_t second;
    nx_uint16_t humidityReading;
    nx_uint16_t temperatureReading;
    nx_uint16_t solarRadiationReading;
} smarthouse_t;

enum {
    RELAY_1 = 0xFE,
    RELAY_2 = 0xFD,
    LUCE = 0xFB,
    FREDDO = 0xF7,
    CALDORES = 0xEF,
    RELAY_6 = 0xDF,
    ACQUA = 0xBF,
    CALDOPAV = 0x7F,
};

#endif

```

Nel seguito è riportato il codice presente nel file di configurazione ad alto livello: esso specifica il “wiring” tra i componenti utilizzati nell’applicazione, individuato dalla coppia di caratteri “- >”. Ad esempio nella riga

```
SmartHouseC.AMSend -> AMSenderC;
```

SmartHouseC è un componente che utilizza l'interfaccia AMSend; a fornire tale interfaccia (sott'intesa alla destra della "freccia") è il componente AMSenderC.

```
// SmartHouseAppC.nc

#include <I2C.h>

configuration SmartHouseAppC { }
implementation
{
    components SmartHouseC, MainC, ActiveMessageC, LedsC,
        new TimerMilliC() as WallClockTimerC,
        new TimerMilliC() as HumidityTimerC,
        new MySensorC() as Sensor,
        new AMSenderC(AM_SMARTHOUSE), new AMReceiverC(AM_SMARTHOUSE);

    components new Msp430I2CC(), Hp1Msp430I2COP;

    SmartHouseC.Boot -> MainC;
    SmartHouseC.RadioControl -> ActiveMessageC;
    SmartHouseC.AMSend -> AMSenderC;
    SmartHouseC.Receive -> AMReceiverC;
    SmartHouseC.WallClockTimer -> WallClockTimerC;
    SmartHouseC.HumidityTimer -> HumidityTimerC;
    SmartHouseC.ReadHumidity -> Sensor.ReadHumidity;
    SmartHouseC.ReadTemperature -> Sensor.ReadTemperature;
    SmartHouseC.ReadSolarRadiation -> Sensor.ReadSolarRadiation;
    SmartHouseC.Leds -> LedsC;

    SmartHouseC.I2CBasicAddr -> Msp430I2CC;
```

```
SmartHouseC.Resource -> Msp430I2CC;  
SmartHouseC.HplMsp430I2C -> HplMsp430I2COP.HplI2C;
```

```
}
```

Appendice B

Determinazione dei parametri del modello dinamico

Questa appendice riporta la via seguita nel ricavare i principali parametri presenti nel semplice modello dinamico relativo alla temperatura interna alla serra. Ripresa l'equazione di stato

$$\dot{T}_{int}(t) = a[T_{est}(t) - T_{int}(t)] + u(t, T_{int}(t), T_{des}(t)), \quad (\text{B.1})$$

si consideri la differenza

$$\Delta T(t) \triangleq T_{est}(t) - T_{int}(t). \quad (\text{B.2})$$

Nell'ipotesi che la temperatura esterna si possa ritenere costante rispetto a quella interna, cioè nel caso si abbia $|\dot{T}_{est}(t)| \ll |\dot{T}_{int}(t)|$, è lecito considerare

$$\dot{\Delta T}(t) \cong -\dot{T}_{int}(t). \quad (\text{B.3})$$

Segue che l'equazione di stato è riscrivibile nella forma

$$\dot{\Delta T}(t) \cong -a\Delta T(t) + u. \quad (\text{B.4})$$

Al fine di determinare il parametro a si consideri l'evoluzione libera del sistema, imponendo $u \equiv 0$. Detti α e β i valori assunti nell'istante $t = t_0$ rispettivamente da T_{int} e da T_{est} , ed osservando che le ipotesi considerate portano alla condizione $T_{est}(t \rightarrow \infty) = T_{int}(t \rightarrow \infty)$, si ottiene che deve essere:

$$\begin{cases} \dot{\Delta T}(t) = -a\Delta T(t) \\ T_{int}(t_0) = \alpha \\ T_{est}(t_0) = \beta \\ T_{est}(t \rightarrow \infty) = T_{int}(t \rightarrow \infty). \end{cases} \quad (\text{B.5})$$

La soluzione generale per $\Delta T(t)$ risulta essere

$$\Delta T(t) = Ae^{-at} + B, \quad (\text{B.6})$$

alla quale si accompagnano le condizioni $\Delta T(t_0) = \beta - \alpha$ e $\Delta T(t \rightarrow \infty) = 0$.

Considerando per comodità $t_0 = 0$, la soluzione del sistema B.5 risulta in definitiva

$$\Delta T(t) = \Delta T(t=0) \cdot e^{-at} = (\beta - \alpha)e^{-at} \quad (\text{B.7})$$

che, riscritta per $T_{int}(t)$ diviene

$$T_{int}(t) = T_{est}(t) - \Delta T(t=0) \cdot e^{-at}, \quad (\text{B.8})$$

nella citata ipotesi che la T_{est} sia lentamente variabile.

La memorizzazione dell'andamento sperimentale ottenuto per la temperatura interna $T_{int}(t)$ permette di ricavare una stima del parametro a .

La stima del parametro b presente nella relazione 3.2, di seguito riproposta per comodità

$$u(t, T_{int}(t), T_{des}) = \begin{cases} b & , \text{ per } T(t) \leq T_{des} - T_{\alpha} \\ c & , \text{ per } T_{des} - T_{\alpha} < T_{int}(t) \leq T_{des} \\ 0 & , \text{ per } T_{des} < T_{int}(t) \leq T_{des} + T_{\beta} \\ -d[T_{int}(t) - T_{est}(t)] & , \text{ per } T_{int}(t) > T_{des} + T_{\beta}, \end{cases} \quad (\text{B.9})$$

è ricavabile imponendo che la temperatura desiderata sia maggiore della massima temperatura ragionevolmente raggiungibile all'interno della serra, cioè imponendo $T_{des} > T_{max}$.

Segue che in ipotesi ragionevoli sul parametro T_{α} si ha in corrispondenza

$$T_{int}(t) < T_{des} - T_{\alpha}. \quad (\text{B.10})$$

L'equazione di stato assume la forma

$$\dot{T}_{int}(t) = a[T_{est}(t) - T_{int}(t)] + b. \quad (\text{B.11})$$

Si osserva che per $t \rightarrow \infty$ si ha $T_{int}(t) \rightarrow T_{fin} \equiv T_{max}$ e $\dot{T}_{int}(t) \rightarrow 0$, pertanto sostituendo in B.11 si ottiene

$$0 = a[T_{est}(t \rightarrow \infty) - T_{fin}] + b, \quad (\text{B.12})$$

da cui si ottiene la stima per il parametro b .

Appendice C

Fotografie ulteriori dell'apparato

In questa appendice sono riportate alcune fotografie che, sebbene non abbiano trovato collocazione nel corpo principale della tesi, forniscono informazioni ulteriori sull'apparato sperimentale.

In particolare la Figura C.3 mostra il contenitore utilizzato per il riscaldamento ad acqua a pavimento. In esso sono presenti un riscaldatore da acquario, della potenza di 70 W, ed una pompa per la messa in circolo dell'acqua calda in un tubo flessibile di materiale siliconico, lungo una serpentina posizionata nella parte inferiore della serra. Il contributo all'innalzamento della temperatura in serra fornito da tale modalità di riscaldamento è condizionato al preventivo raggiungimento di una adeguata temperatura da parte della totalità dell'acqua presente nel contenitore. Segue che il riscaldamento a pavimento è caratterizzato da un transitorio in fase di accensione ed è adatto ad un ruolo di mantenimento della temperatura interna moderatamente al di sopra di quella esterna.

Nella Figura C.4 è presentata una visione notturna della serra, illuminata dalla coppia di faretti presenti al suo interno. La loro accensione è prontamente realizzabile per mezzo dell'interfaccia grafica a discrezione dell'operatore, e può essere controllata in modo automatico dal mote in risposta ad un valore di riferimento impostato per la luminosità.



Figura C.1: Particolare raffigurante uno dei bonsai presenti in serra.



Figura C.2: Particolare raffigurante uno dei bonsai presenti in serra.



Figura C.3: Contenitore per l'acqua impiegata nel riscaldamento a pavimento; si possono notare il riscaldatore e la pompa da acquario posti al suo interno, ed il tubo flessibile in materiale siliconico di cui è costituita la serpentina posta nella parte inferiore della serra.

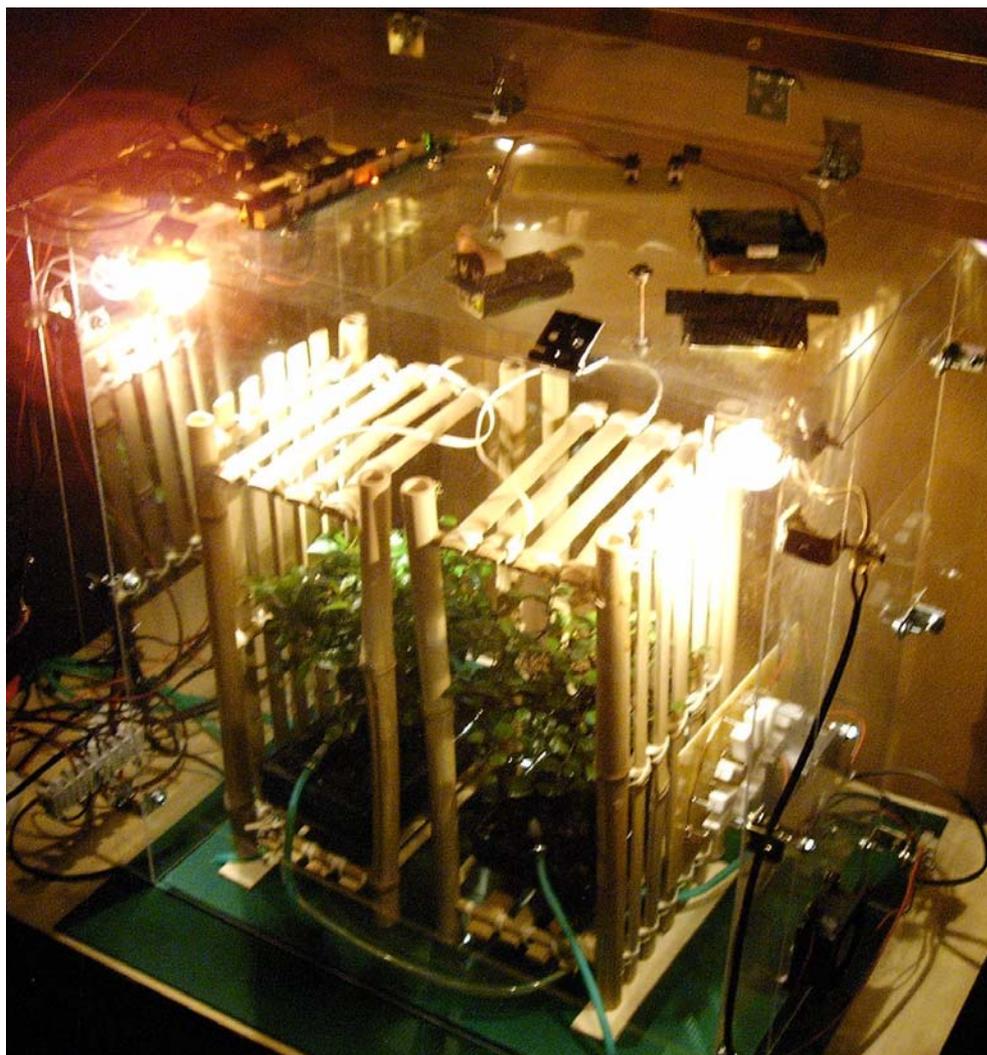


Figura C.4: Visione “in notturna” della serra.

Appendice D

Bonsai presente in serra

Al fine di rendere gradevole il prototipo sperimentale si è provveduto ad inserirvi a seconda delle circostanze due o tre piantine di *Zelkova nire*, od *Olmo cinese*, per la loro facile reperibilità e la grande resistenza, necessaria non tanto per superare le prove sperimentali, ma per sopperire all'inesperienza dello sperimentatore.

Nella Figura D.1 è riportata una fotografia delle piantine utilizzate, indulgentemente qualificate come bonsai.

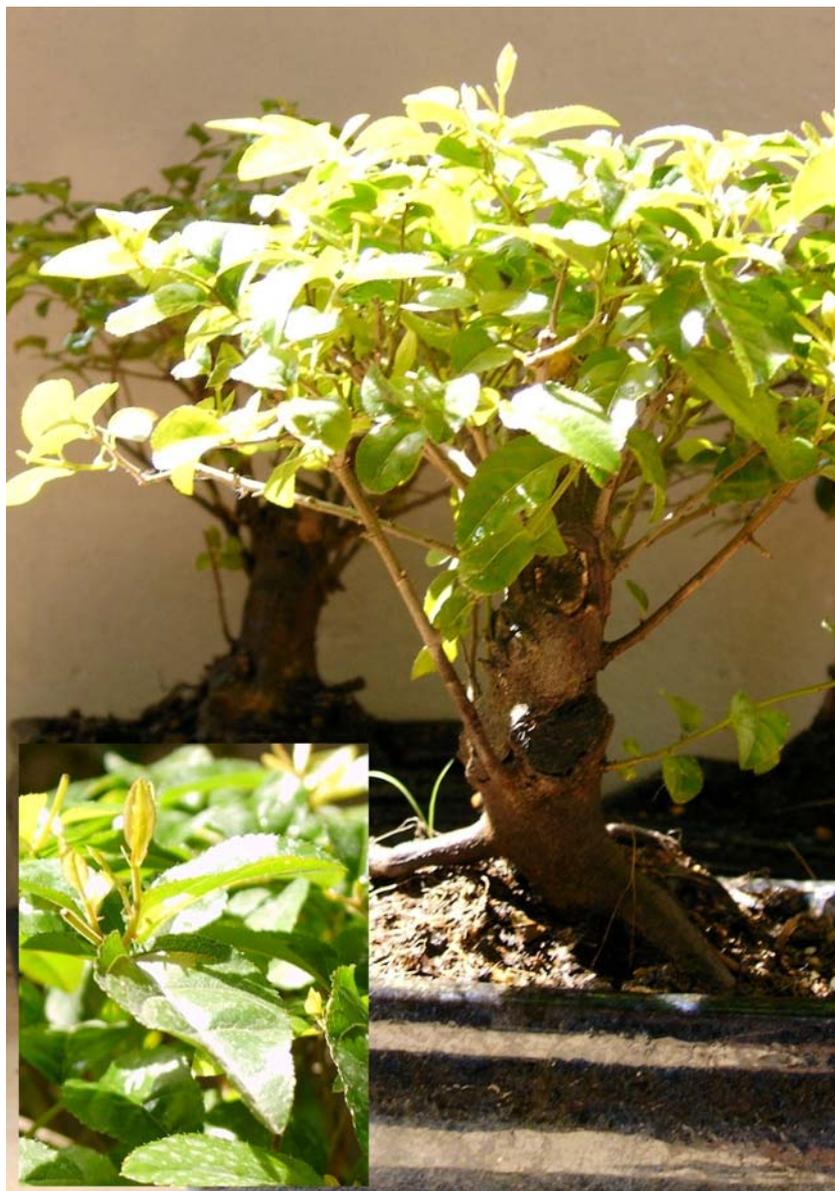


Figura D.1: *Zelkova nire* (*Olmo cinese*), il tipo di pianta presente in serra.

Bibliografia

- [1] P. Levis. *TinyOS Programming Manual*. (disponibile all'indirizzo <http://www.tinyos.net/tinyos-2.x/doc/>)
- [2] D. Gay, P. Levis, R. von Behren, M. Welsh, E. Brewer and D. Culler. *The nesC Language: A Holistic Approach to Networked Embedded Systems*. Proceedings of Programming Language Design and Implementation (PLDI). San Diego, June 2003.
- [3] P. Levis, D. Gay and D. Culler. *Active Sensor Networks*. Proceedings of the Second USENIX/ACM Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI 2005). Boston, May 2005.
- [4] J. Polastre, R. Szewczyk, D. Culler. *Telos: Enabling Ultra-Low Power Wireless Research*. The Forth International Conference on Information Processing in Sensor Networks: Special track on Platform Tools and Design Methods for Network Embedded Sensors (IPSN/SPOTS). Los Angeles, April 2005.
- [5] *Tmote Sky*. Datasheet, Moteiv Corp.
- [6] *PCF8574 Remote 8-bit I/O expander for I2C-bus*. Datasheet. Philips Semiconductors. April 1997.
- [7] *The I2C-bus specification, version 2.1*. Philips Semiconductors. January 2000.
- [8] J. Hill. *A Software Architecture Supporting Networked Sensors*. Master's thesis. U.C. Berkeley Dept. of Electrical Enge-

- neering of Computer Sciences, 2000. (disponibile all'indirizzo: http://www.cs.berkeley.edu/~kwright/nest_papers/TinyOS_Masters.pdf)
- [9] J. Polastre, J. Hui, P. Levis, J. Zhao, D. Culler, S. Shenker and I. Stoica. *A Unifying Link Abstraction for Wireless Sensor Networks*. 3rd ACM Conference of Embedded Networked Sensor Systems (SensyS), 2005. (disponibile all'indirizzo: <http://www.polastre.com/papers/sensys05-sp.pdf>)
- [10] A. S. Tanenbaum. *Reti di calcolatori*. Pearson Education Italia Srl. Quarta edizione, 2003.
- [11] A. Mainwaring, J. Polastre, R. Szewczyk, D. Culler, J. Anderson. *Wireless Sensor Networks for Habitat Monitoring*. 2002 ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications. Atlanta, September 2002.
- [12] J. Hill, P. Buonadonna, D. Culler. *Active Message Communication for Tiny Network Sensors*. UC Berkeley Technical Report. Berkeley, December 2000.
- [13] X. Jiang, J. Polastre, D. Culler. *Perpetual Environmentally Powered Sensor Networks*. The Forth International Conference on Information Processing in Sensor Networks: Special track on Platform Tools and Design Methods for Network Embedded Sensors (IPSN/SPOTS). Los Angeles, April 2005.
- [14] P. Levis, S. Madden, D. Gay, J. Polastre, R. Szewczyk, A. Woo, E. Brewer and D. Culler. *The Emergence of Networking Abstractions and Techniques in TinyOS*. Proceedings of the First USENIX/ACM Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI 2004). San Francisco, March 2004.
- [15] *TinyOS Extension Proposals (TEPs)*. (disponibile all'indirizzo <http://www.tinyos.net/>)

Elenco delle figure

2.1	Il modulo wireless a bassa potenza Telos.	20
2.2	Rappresentazione schematica dell'inoltro di comandi e della segnalazione di eventi da parte di un componente software verso componenti appartenenti a livelli adiacenti.	23
3.1	Diagramma "a scala" che descrive qualitativamente la variabile di ingresso u del modello dinamico in funzione della temperatura interna T_{int} , della temperatura desiderata T_{des} e dei parametri T_α e T_β , che individuano opportune soglie. Sono evidenziate anche le condizioni di funzionamento degli attuatori corrispondenti ai vari casi.	29
3.2	Vista d'insieme della serra. Sono assenti i collegamenti necessari al funzionamento degli attuatori.	31
3.3	Particolare della serra. In alto a destra si intravedono parte delle resistenze ceramiche (bianche) che contribuiscono al riscaldamento; si possono inoltre notare i tubicini colorati di materiale siliconico che, quando richiesto, possono fornire acqua ai bonsai.	33
3.4	Al di sotto del "pavimento" della serra è posto un tubicino di materiale siliconico, il quale quando necessario è percorso da acqua calda, in modo da costituire una forma di riscaldamento "di mantenimento".	34
3.5	Particolare: ventola per la fuoriuscita dell'aria calda presente nella parte superiore della struttura.	35

3.6	Accesso all'interno della serra dei tubicini siliconici del riscaldamento a pavimento e del sistema di umidificazione.	36
3.7	Posizionamento del mote all'interno della serra.	37
3.8	Risultati della prova sperimentale fatta per ottenere una stima della costante di tempo caratterizzante l'evoluzione libera del sistema.	38
3.9	Andamento delle grandezze sperimentali riscontrate durante la prova per la stima del parametro b.	39
3.10	Andamento delle grandezze sperimentali registrate durante la prova per la stima del parametro d.	39
3.11	Schema generale di controllo della cella climatica.	40
3.12	Relazione tra i principali componenti del sistema, nel caso sia presente una sola serra.	41
4.1	Esempio di sensornet ad hop multiplo ed a topologia mista: a maglie (mesh topology) ed a stella (star topology). Sono schematicamente indicate le coperture ad hop singolo di alcuni dei nodi costituenti la rete. Il prototipo sperimentale fa riferimento alla porzione delimitata.	44
4.2	Astrazione della disposizione tipica degli elementi che costituiscono il prototipo: una basestation, una o piú serre, uno o piú motes.	45
4.3	Quadro d'insieme degli elementi presenti all'interno della serra: oltre al mote e agli attuatori, compaiono un I/O expander per bus I2C a comandare alcuni relè collocati sul circuito stampato dello stesso e relè di potenza a comandare gli attuatori alimentati tramite rete domestica a 220V.	46

4.4	Collegamento mediante bus SPI tra un singolo master ed un singolo slave. Sono presenti quattro segnali: SCLK serial clock; MOSI master data output, slave data input; MISO master data input, slave data output e SS slave select.	48
4.5	Semplice configurazione in cui un dispositivo master è connesso a piú dispositivi slave mediante il bus I2C. SDA identifica la linea serial data, mentre SCL il serial clock.	49
4.6	Sequenza di bit tipica di una comunicazione su bus I2C.	50
4.7	I/O expander per bus I2C collegato ad una batteria di 8 relè.	51
4.8	Caratteristica con isteresi del relè che aziona le lampade, in termini della luminosità attuale $L(t)$ e di quella desiderata L_{des}	52
4.9	Caratteristica con isteresi del relè che aziona l'umidificazione a pompa, in termini dell'umidità attuale $U(t)$ e di quella desiderata U_{des}	53
4.10	Modalità di funzionamento degli attuatori che influenzano la temperatura interna $T(t)$, in funzione dell'errore $T(t) - T_{des}$. Le soglie sono indicate in modo qualitativo.	54
4.11	Diagramma a blocchi semplificato della porzione del software che gestisce l'interazione del mote con gli attuatori e la trasmissione dei pacchetti di dati alla basestation.	56
4.12	Diagramma a blocchi semplificato della porzione del software che gestisce l'arrivo di un pacchetto proveniente dalla basestation.	57
4.13	Ad ogni nodo presente nella rete è associata una finestra distinta della GUI, selezionabile cliccando sul "tab" corrispondente. Tale finestra fornisce informazioni sulle variabili ambientali misurate dal nodo e consente la modifica dei valori desiderati per tali variabili. E' prevista la possibilità di memorizzare su file i dati acquisiti, per elaborazioni ed analisi differite.	59

4.14	Finestra principale della GUI. Essa fornisce un quadro d'insieme delle grandezze misurate dal complesso dei nodi costituenti la rete. La tabella sulla sinistra associa un colore distinto ad ogni nodo, consentendo una piú chiara lettura dei dati riportati in forma grafica.	60
5.1	Andamenti temporali dei parametri ambientali interni ed esterni alla serra relativi ad una prova sperimentale pomeridiana/serale tenutasi in una piovosa giornata primaverile.	66
5.2	Andamento delle temperature registrate nel corso della prima prova. Le due porzioni evidenziate sono discusse nel seguito. . .	67
5.3	Evoluzione pomeridiana delle temperature nel corso della prima prova.	68
5.4	Evoluzione serale delle temperature misurata e desiderata all'interno della serra. E' riportata in modo schematico l'evoluzione dello stato di attivazione dei relè corrispondente; in particolare la notazione "v" sta per ventilazione, "- -" per nessuna operazione, "ra" per riscaldamento ad acqua e "raa" per riscaldamento ad aria e ad acqua.	69
5.5	Andamenti temporali dei parametri ambientali interni ed esterni alla serra relativi ad una prova sperimentale nella quale la temperatura nelle ore centrali della giornata supera il valore desiderato. In particolare dopo le ore 22:00 gli attuatori sono posti in stand-by.	70
5.6	Grafici delle temperature registrate nella seconda prova. Sono messi in evidenza due regimi di funzionamento: in grigio la situazione che vede la temperatura esterna sostanzialmente inferiore a quella desiderata, in rosso il caso in cui la serra deve provvedere per quanto possibile al raffrescamento.	71

5.7	Evoluzione mattutina delle temperature. E' riportata in modo schematico l'evoluzione dello stato di attivazione dei relè corrispondente; in particolare la notazione "v" sta per ventilazione, "-_" per nessuna operazione, "ra" per riscaldamento ad acqua e "raa" per riscaldamento ad aria e ad acqua.	72
5.8	Evoluzione delle temperature nelle ore centrali di una giornata soleggiata. La ventilazione contrasta l'"effetto serra", mantenendo la temperatura interna uguale a quella esterna.	73
C.1	Particolare raffigurante uno dei bonsai presenti in serra.	88
C.2	Particolare raffigurante uno dei bonsai presenti in serra.	89
C.3	Contenitore per l'acqua impiegata nel riscaldamento a pavimento; si possono notare il riscaldatore e la pompa da acquario posti al suo interno, ed il tubo flessibile in materiale siliconico di cui è costituita la serpentina posta nella parte inferiore della serra. . .	90
C.4	Visione "in notturna" della serra.	91
D.1	<i>Zelkova nire</i> (<i>Olmo cinese</i>), il tipo di pianta presente in serra. .	94

Elenco delle tabelle

2.1	Principali caratteristiche e problematiche delle WSNs che portano a considerare l'approccio adottato dal sistema operativo TinyOS.	18
3.1	Dimensioni della serra, realizzata in plexiglass trasparente. . . .	30
3.2	Attuatori presenti nella cella climatica.	37