

Università degli Studi della Tuscia di Viterbo

DAFNE - Dipartimento di Scienze Agrarie e Forestali



Dottorato di Ricerca in Ingegneria dei Biosistemi – XXXI ciclo

TESI

Sviluppo di una rete di sensori a basso costo per lo studio micrometeorologico e fisiologico delle colture agrarie

Settore scientifico disciplinare: AGR / 09

Dottorando: Massimo Scaglione

Coordinatore del corso di dottorato: prof. Danilo Monarca

Tutor: prof. Andrea Colantoni

Cotutor: Luigi Perini

Con la collaborazione del Consiglio per la ricerca in agricoltura
e l'analisi dell'economia agraria



Tutto allora sospirò, nella penombra argentea dell'alba;
al respiro dell'acqua fra i giunchi rispose il respiro delle foglie.
(Grazia Deledda)

Abbreviazioni

A / D	da analogico a digitale
ADC	analog to digital converter
CMOS	complementary metal-oxide semiconductor
GPIO	general purpose input/output
GIS	geographic information system
GSM	Global System for Mobile Communications
HDMI	High-Definition Multimedia Interface
IDE	integrated development environment
IIC	inter integrated circuit
I ² C	inter integrated circuit
ICSPI	in circuit serial programming
IMU	inertial measurement unit
IoT	internet of things
IR	infrarosso
LED	light emitting diode
NIR	near infrared
NTC	negative temperature coefficient
PC	personal computer
PTC	positive temperature coefficient
RGB	red, green, blue
ROM	read only memory
RTC	real time clock
RTD	resistance temperature detector
SPI	serial peripheral interface
USB	universal serial bus
VGA	video graphic array
PIR	passive infrared sensor

Indice

Abstract

Introduzione

Capitolo 1 - Microcontrollori

1.1. Arduino

1.2. Raspberry Pi

1.3 AVR – Atmel

1.4 Esp8266, moduli LoRa, moduli GSM

Capitolo 2. Sensori di temperatura

2.1. Termistori, termoresistenze, PT100, PT1000

2.2. Termocoppie

2.3. Termopile a infrarossi (IR)

2.4. Sensori piroelettrici

2.5. Sensori termici ottici

2.6. Schermo solare

Capitolo 3 – Sensori dell’umidità dell’aria

Capitolo 4 - Sensori del contenuto idrico del suolo

4.1. Sensori capacitivi del contenuto idrico del suolo

4.2. Sensori resistivi

4.3. Prova sperimentale di un sensore capacitivo e un sensore resistivo

Capitolo 5. Sensori ottici

5.1. Fotodiodi e fototransistor

5.2. CMOS

5.3. Prova sperimentale di due fotocamere con sensore CMOS a basso costo per la gestione della fertilizzazione in un semenzaio di lattuga

5.3.1. Riassunto

- 5.3.2. Introduzione
- 5.3.3. Materiali e metodi
- 5.3.4. Risultati
- 5.3.5. Discussione

Capitolo 6 – Sensori di altre grandezze fisiche

- 6.1. Pluviometri
- 6.2. Sensori di bagnatura fogliare
- 6.3. Sensori del vento
- 6.4. Sensori di peso a basso
- 6.5. Sensori del flusso linfatico
- 6.6. Accelerometri, giroscopi, bussola
- 6.7. Tempo

Capitolo 7. Trasmissione e ricezione dati a basso costo

- 7.1. Moduli operanti nella banda dei 433 Mhz
- 7.2. Moduli operanti nella banda dei 2,4 e 5,4 Ghz
- 7.3. Moduli GSM / GPRS, 3G / 4G
- 7.4. GPS, GLONASS, Beidou, Galileo
- 7.5. Cloud

Capitolo 8. Reti di sensori a basso costo

- 8.1. Prototipo di una rete di sensori a basso costo per il rilevamento dell'umidità del suolo, della temperatura dell'aria e della temperatura del suolo a due profondità in un vigneto in pendenza

Capitolo 9. Discussione e conclusioni

Capitolo 10. Bibliografia

Abstract

Scientific tools are commonly very expensive and often it is very difficult to plan a research based on a large number of sensors. In order to obtain a low cost experimental tools to investigate growth, health and phenological development of plants, low cost sensor disposal in the international market was investigated. Open source software and hardware were found to be very interesting to the aim.

Low cost sensors functionality test and microcontroller programming test were conducted and showed that it is possible to plan a reliable and accurate low cost sensor network to investigate agroecological and environmental dynamics.

A sperimental trial were conducted to test optical CMOS low cost sensor compared to a professional camera designed for remote sensing investigation on plant and cultivation growth; positive results were obtained in a lattuce plant nursery orchard.

A sperimental trial was also started using three different soil moisture sensors and first results seems to be very interesting.

Low cost allows to increase the number of sensor network could be a very useful tool to improve knowledge of ecological parameters and to improve growth mathematic model of plants and pests.

A properly designed low cost network could be also very useful in conventional farm managing.

Introduzione

Le fonti energetiche rinnovabili rappresentano una priorità per le politiche agricole dell'Unione Europea. Le colture destinate alla produzione energetica possono costituire opportunità di reddito per le aziende agricole italiane che intendono sfruttare le peculiarità agro-pedo-climatiche locali mantenendo inalterato o migliorando lo stock naturale delle risorse rinnovabili disponibili.

Diversi sono i gruppi di ricerca impegnati nello studio della compatibilità e della vocazionalità del territorio rispetto a questo tipo di coltivazioni, sia di tipo forestale che prettamente agricole.

Il mantenimento e la conservazione delle risorse ambientali utilizzate per la produzione agricola e forestale è un obiettivo sempre più seguito sia dalla politica europea e internazionale che dagli operatori agricoli che ne traggono reddito.

Per migliorare e rendere più efficienti i processi produttivi e utilizzare le risorse ambientali senza depauperarle è necessario approfondire la conoscenza delle condizioni di campo, delle esigenze colturali e delle dinamiche ecologiche.

Modelli matematici di crescita delle colture e di previsione delle rese energetiche sono necessari per la scelta degli indirizzi produttivi, per la programmazione aziendale, per la progettazione degli impianti di conversione energetica e per la gestione delle risorse umane.

L'elevato costo dei sensori e delle apparecchiature complementari, oltre a limitare il loro uso nelle normali condizioni operative, spesso porta a sopperire alla mancanza di informazioni con stime ottenute tramite interpolazione temporale e spaziale delle misure disponibili. Queste approssimazioni, pur rimanendo valide basi per soluzioni scientifiche, potrebbero, a loro volta, acquisire maggiore precisione se supportate da una rete di sensori a maglia più stretta e con maggior frequenza delle misurazioni.

Con l'attività di indagine svolta si è cercato di indagare sulla disponibilità di strumenti a basso costo utili alle attività e di ricerca, al monitoraggio e alla programmazione delle attività produttive agricole. Approfondire la conoscenza sulle relazioni coltura, ambiente e attività produttive è certamente la base per migliorare lo sfruttamento delle risorse ambientali non oltre il limite della sostenibilità e favorire una crescita imprenditoriale

delle aziende agricole, il cui ruolo, oltre alla produzione, deve comprendere la salvaguardia ed il presidio del territorio.

Lo scopo di questo lavoro è stato quello di verificare, alla luce delle conoscenze attuali e delle apparecchiature disponibili sul mercato, se è possibile utilizzare reti di sensori a basso costo per il monitoraggio e lo studio delle condizioni ambientali; la rete di sensori, inoltre può estendersi da tutti i livelli della coltivazione (suolo, aria, acque di irrigazione, ecc.) includendo il processo di trasformazione fino al prodotto pronto per la commercializzazione.

Tecnologie simili sono state già sviluppate per settori che più rapidamente dell'agricoltura attingono a nuove tecnologie dall'elettronica come l'automazione dell'industria, il monitoraggio di strutture edili e industriali, il monitoraggio sanitario, la prevenzione dei terremoti e incendi, ecc. Attualmente l'ampia diffusione nei settori appena citati ha determinato la disponibilità di sensori e moduli di comunicazioni a costi sempre più accessibili anche per settori come l'agricoltura che solo in pochi casi ha la possibilità di accedere alle tecnologie più recenti e costose. L'obiettivo del basso costo è stato perseguito grazie alla crescente reperibilità nel mercato internazionale di sensori e apparecchiature elettroniche dal costo spesso irrisorio.

Si è perciò ipotizzato che potessero essere abbinate e configurate con microcontrollori, anch'essi a basso costo, per consentire misurazioni accettabili, come precisione ed affidabilità, alle costose apparecchiature commerciali pronte all'uso. Il basso costo, inoltre, è particolarmente vantaggioso quando si ritiene necessario attrezzare una rete di monitoraggio con un elevato numero di sensori e nodi di scambio dati per misurazioni microambientali o rilevamenti estensivi dettagliati che possano essere utilizzati per validare e migliorare modelli di sviluppo delle colture, dei parassiti, delle infestanti, di microrganismi coinvolti nei processi di trasformazione o per avvicinare i processi produttivi alle condizioni ideali che di volta in volta sono richieste.

Il basso costo, inoltre, lascia presupporre una migliore adattabilità alle realtà aziendali più disparate e può aprire la strada all'introduzione rapida delle innovazioni tecnologiche anche nelle aziende agricole che per caratteristiche indotte dal territorio o dalla conduzione non possono vantare fatturati di alto livello, che hanno una scarsa

disponibilità di risorse da finalizzare all'innovazione tecnologica o che hanno adottato nell'avvicendamento colturale colture a basso input energetico come le bioenergie.

Allo stato attuale della tecnologia, sono disponibili sul mercato microcontrollori elettronici che permettono di realizzare prototipi privi di diritti d'autore, in grado di compiere tutte le attività consentite dai moderni sensori elettronici. Tali apparati sono programmabili tramite interfacce grafiche e sono utilizzabili da utenti con livelli di conoscenza informatica non necessariamente elevati. Al riguardo, si evidenzia che la attuale diffusione di tutorial, forum, e pagine web dedicate alla programmazione dei suddetti dispositivi rende possibile costruire apparecchi e strumenti anche con conoscenze di elettronica e informatiche a livello amatoriale.

Sul mercato sono disponibili anche schede già predisposte per rispondere a diverse funzioni e corredate di apposito software. Esse svolgono anche la funzione di datalogger su diversi supporti e possono essere collegate ad apparecchiature per la trasmissione di dati via cavo e via etere con diverse frequenze e protocolli (RF, UHF, WiFi, GPRS, HSPA, ZigBEE).

Inoltre, è possibile corredare i dispositivi con ricevitori satellitari per la geolocalizzazione (GPS, GLONASS); quest'ultima caratteristica rende possibile georeferenziare i dati acquisiti e sviluppare robotica a basso costo a supporto dell'agricoltura di precisione.

Il costo delle apparecchiature costruite con moduli di derivazione open-source è spesso irrisorio rispetto al costo di apparecchi professionali ma garantisce adeguati standard di precisione consoni, sia alle esigenze della ricerca che alla conduzione aziendale.

Capitolo 1. Microcontrollori

Il sensore come trasduttore di grandezze fisiche necessita di un apparato che consenta la lettura e l'interpretazione del dato rilevato per renderlo disponibile all'utente o ad altri apparati a cui è collegato. A questo compito sono delegati i microcontrollori che a loro volta hanno diversi gradi di integrazione con altri componenti che ne valorizzano o sviluppano le capacità.

Di seguito vengono riportati i principali microcontrollori e gli sviluppi derivati che sono stati utilizzati in questo studio. La scelta è stata orientata, nel vastissimo catalogo delle apparecchiature elettroniche disponibili, dall'obiettivo del basso costo e dalle caratteristiche di precisione, affidabilità, adattabilità e facilità d'uso che maggiormente lasciano prospettare una utilizzazione pratica nella realtà agricola.

1.1. Arduino

I segnali che pervengono dai sensori sono acquisiti, registrati o trasmessi ad altri componenti della rete tramite microcontrollori appositamente programmati.

Una svolta certamente decisiva alla diffusione di queste apparecchiature elettroniche è stata data dal progetto Arduino <<https://www.arduino.cc>> derivato dal progetto Wiring <<http://wiring.org.co>> da cui ha tratto parte dell'IDE (integrated development environment) opensource e il linguaggio di programmazione a sua volta derivato dal linguaggio C/C++.

Arduino, che prende il nome da un bar di Ivrea dove un gruppo di studenti si riunivano, è una scheda basata sui microchip AVR Atmel <<https://www.microchip.com>>, assemblata in un hardware open source, con l'intento di creare una piattaforma di prototipazione accessibile anche a chi non ha approfondite conoscenze di elettronica.

La concezione modulare, la grande flessibilità dimostrata e l'effettiva facilità d'uso per chi vuole apprendere le basi della programmazione informatica e le nozioni di base dell'elettronica, hanno fatto sì che si potesse adattare alla stragrande maggioranza dei sensori disponibili sul mercato fino a divenire la base di prototipazione elettronica per automazione. Nel progetto è infatti confluito software sviluppato dagli utilizzatori con librerie di codice per un gran numero di sensori per i settori di interesse più disparati. Il

crescente interesse, inoltre, ha fatto sì che nella piattaforma confluissero anche progetti con hardware non previsto inizialmente dal progetto come Digistump <<http://digistump.com>>, Wemos <<http://www.wemos.cc>>, Nodemcu <<http://www.nodemcu.com>>, nonché di software appositamente sviluppato per l'utilizzo di circuiti integrati privi di componenti di supporto (stand alone) come i microchip della serie AVR ATtiny e lo stesso Atmel328P che costituisce il cuore di Arduino.

Nell'IDE, inoltre, sono stati incorporati senza remore parallelamente al loro sviluppo anche schede sviluppate da terzi.

La grande flessibilità e la disponibilità di hardware a prezzi irrisori sta destando grande interesse anche in agricoltura fornendo la base hardware e software di progetti di ricerca, di programmi di monitoraggio ambientale, per l'automazione di processi aziendali grazie anche alla concorrenza di costruttori che hanno beneficiato dell'open source immettendo sul mercato cloni e derivati equivalenti in tutte le funzionalità acquistabili a pochi Euro in internet.

Le schede Arduino dispongono di connessioni (PIN) input/output digitali, di 6 PIN dotati di un ADC (analog to digital converter) ad 8 o 10 bit secondo il modello, di uscite di comunicazione seriale, I²C (inter integrated circuit), ICSPI (in circuit serial programming) e di uno stabilizzatore di tensione autonomo; possono essere, infatti, alimentate da un alimentatore esterno o dalla stessa porta USB utilizzata per la comunicazione tra PC (personal computer) e la scheda.

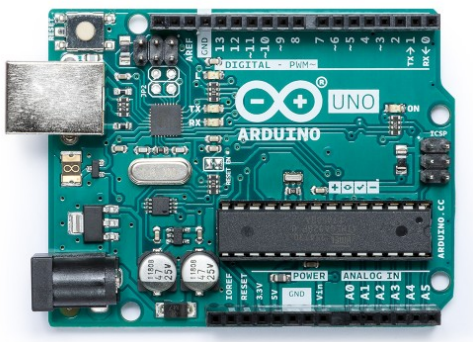


Figura 1.1. Arduino UNO R3

A proposito della risoluzione del convertitore ADC si ricorda che 8 bit, nel caso di Arduino, permettono di comparare una tensione compresa tra 0 e 5 volt con 1024 livelli. Ciò significa, ad esempio, che il valore 943 restituito dal pin analogico corrisponde a un valore di $5 \text{ volt} / 1024 * 943 = 4,6 \text{ volts}$.

Attraverso la legge di Ohm (1) dal voltaggio V (espresso in volt) si può derivare l'intensità di corrente I (espressa in Amper) o la resistenza R (in ohm).

$$I = V / R \quad (1)$$

Il software di controllo è disponibile non solo per i più diffusi sistemi operativi (Windows, Mac OS, Linux) ma anche per dispositivi mobili Android.

Di seguito si riporta un breve esempio di “sketch” (così viene definito lo script in ambito Arduino) dove viene letto il voltaggio (tra 0 e 5V) dal PIN 0 dell'ADC (se maggiore di 5 volt la scheda si può rompere), acceso il led che nella scheda è collegato al PIN 13, e inviato il risultato in volt al monitor seriale o altro dispositivo connesso ai terminali seriali.



Figura 1.2. Arduino Micro

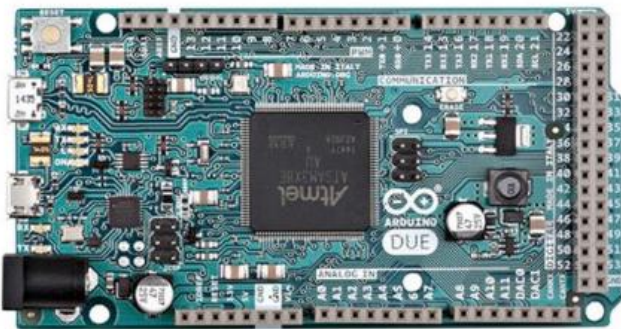


Figura 1.3. Arduino DUE

```

void setup()          {          //routine iniziale avviata all'accensione
    Serial.begin(9600); //inizializza la comunicazione a 9600 bit al secondo
    pinMode(13, OUTPUT); } //inizializza il PIN 13 come uscita

void loop()           {          //questa routine viene ripetuta continuamente
    int sensorValue = analogRead(A0); //effettua la lettura dal pin analogico 0
    float voltage = sensorValue * (5.0 / 1023.0); // Converte la lettura analogica (da 0 a
                                                // 1023) in voltaggio (0 - 5V)

    digitalWrite(13, HIGH); // Il PIN 3 viene portato a 5 V
    Serial.println(voltage); //il risultato è inviato al monitor seriale o
                             //altro dispositivo connesso alla porta seriale

    delay(1000);           // attesa di 1000 millisecondi
    digitalWrite(13, LOW); // Il PIN 3 viene portato a 0 V
    delay(1000);           }

```

1.2. Raspberry Pi

Includere Raspberry Pi <<https://www.raspberrypi.org>> nel paragrafo dei microcontrollori è certamente riduttivo.

Si tratta, infatti, a tutti gli effetti di un vero PC (personal computer) ridotto in una singola scheda (single-board computer) dalle dimensioni di mm 85 x 56 con delle funzionalità integrate che i normali computer laptop o desktop non hanno. Nella scheda Raspberry sono integrati, oltre alle porte ethernet, USB, HDMI, VGA, microSD, connettori audio, WiFi, Bluetooth delle recenti versioni, anche una serie di 26 connessioni GPIO (general purpose input/output) configurabili come ingressi o uscite sia digitali che analogiche; gli script, file contenenti il codice del programma, vengono avviati tramite il linguaggio di programmazione Python.

Pertanto Raspberry può dialogare con un gran numero di sensori, attuatori, trasmettitori, oltre a quelli già integrati, elaborare i dati e scambiarli in un Cloud internet, gestire immagini digitali e applicazioni multimediali.

L'attuale versione B3+ è dotata di processore quad-core a 64-bit che permette di supportare le applicazioni e i calcoli con maggiore fluidità indispensabili alla robotica in cui viene spesso utilizzato.

Il sistema operativo appositamente studiato e adattato alle sue caratteristiche è una distribuzione di Linux Debian; sono disponibili anche sistemi derivati da altre distribuzioni Linux o dal sistema Windows <<https://www.microsoft.com>>.

Come anche Arduino, la lungimiranza di commercializzare la scheda a costo ridotto già dalle prime versioni, ha determinato una rapidissima diffusione e la creazione di una comunità che sviluppa e condivide tramite internet, progetti, librerie software, nuove applicazioni ed utilizzi divenendo un punto di riferimento per il settore e distogliendo l'interesse dalla concorrenza di altri single-board computer.

Il costo attuale della scheda ufficiale 3 model B+ è inferiore ai €38.

Di seguito si riporta un esempio di script in linguaggio Python per far sì che un led collegato al GPIO 0 lampeggi:

```
from gpiozero import LED # importa la libreria gpiozero
from time import sleep   # importa la libreria time
led = LED(17)           # led collegato al GPIO 17
while True:
    led.on()
    sleep(1)
    led.off()
    sleep(1)
```

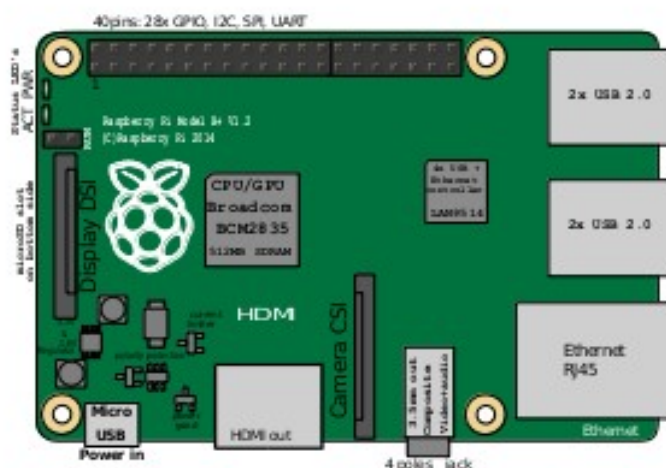


Figura 1.3. Raspberry Pi Model B3+

1.3 AVR – Atmel

Un piccolo accenno meritano i microprocessori della famiglia Atmel AVR <<https://www.microchip.com>>, che per primi hanno utilizzato la memoria flash per memorizzare il software consentendo di evitare di scollegare il microchip dal circuito ogni qualvolta dovesse essere riscritto.

Oltre a costituire il cuore di progetti quali Wiring, Arduino, Digistump, ecc. stanno beneficiando anche di software che ne permette l'uso come stand-alone nella stessa IDE (integrated development environment) di Arduino, ovvero senza altri componenti di supporto che aumentano il consumo energetico del circuito. Beneficiando del clock interno, pur a velocità inferiore rispetto a circuiti dotati di oscillatore al quarzo, sfruttano in questo modo tutta l'efficienza energetica del microchip, consentendo lo sviluppo dei cosiddetti 'smart sensors'; si tratta di sensori integrati con una propria unità di controllo e comunicazione proprio grazie alla succitata tecnologia. Il circuito può, inoltre, essere programmato per assumere la modalità "*sleep*" durante gli intervalli tra le misurazione riducendo il consumo di corrente del circuito nell'ordine di pochi μA . Grazie a queste peculiarità, con una batteria di piccole dimensioni, si possono configurare sensori che inviano misurazioni, ad intervalli di tempo appositamente programmati, con mesi di autonomia energetica.

In merito citiamo i microcontrollori ATtiny e ATmega da cui hanno preso ispirazione produttori concorrenti che hanno ulteriormente ampliato la gamma di scelta.

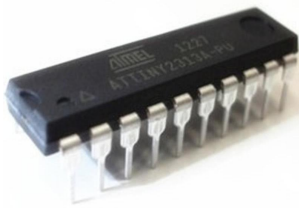


Figura 1.5. Attiny 2313A

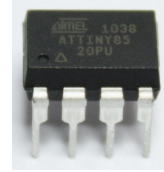


Figura 1.6. Attiny 85

1.4. Esp8266, moduli LoRa, moduli GSM

In questo paragrafo accenniamo soltanto a questi moduli che sono vocati alla trasmissione dati ma possono anche ricevere segnali da sensori in modo autonomo. Verranno considerati in modo più approfondito nel capitolo delle trasmissioni dati.

Capitolo 2. Sensori di temperatura

I sensori elettronici, definiti trasduttori elettronici, sono dei dispositivi che trasformano una grandezza fisica in una grandezza misurabile come tensione, corrente o resistenza permettendone la trasmissione o memorizzazione su un supporto digitale.

Si riporta in questo capitolo, e nei seguenti per altre grandezze fisiche, una breve rassegna di sensori di temperatura scelti cercando un compromesso tra basso costo, funzionalità e compatibilità con gli altri componenti, provati per verificarne l'affidabilità e la precisione con l'intento di impostare una rete a basso costo utilizzabile ai fini della ricerca e della conduzione agricola.

2.1. Termistori, termoresistenze, PT100, PT1000

I termistori sono sensori costruiti con materiali che variano la resistenza elettrica al variare della temperatura. Possono essere di tipo NTC (negative temperature coefficient) se la resistenza decresce con l'aumentare della temperatura, o di tipo PTC (positive temperature coefficient) se la resistenza cresce con l'aumentare della temperatura.

La temperatura si ottiene con formule semplificate tipiche dei termistori che utilizzano coefficienti forniti dal costruttore per ottenere una precisione generalmente compresa tra l'1 e il 2%.

Nella figura seguente è riportato lo schema elettrico di un partitore di tensione dove, essendo nota V_{in} e R_1 , leggendo la tensione in uscita V_{out} tramite l'ADC di un microcontrollore, è possibile desumere la resistenza incognita R_2 tramite l'equazione (2):

$$R_2 = R_1 * 1 / (V_{in} / V_{out} - 1) \quad (2)$$

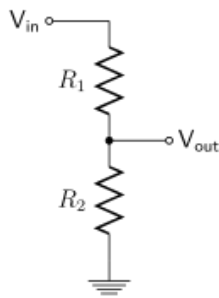


Figura 2.1. Partitore di tensione per la misurazione della resistenza elettrica

Anche le termoresistenze o RTD (resistance temperature detector) variano la resistenza con la temperatura ma sono costituite principalmente da metalli anziché da semiconduttori drogati dei termistori. Molto utilizzati (Sanna et. al., 2013.) (De Franceschi & Zardi, 2008) sono le termoresistenze realizzate in platino come i PT100 e i PT1000 da cui si ricava la temperatura tramite la formula (3), se si considera lineare la relazione tra R e T , o (4) se è richiesta una maggiore precisione; R_0 è la resistenza in ohm a 0°C (100 per i PT100 e 1000 per i PT1000), R è la resistenza misurata, T la temperatura da ricavare in $^\circ\text{C}$, e α è un coefficiente fornito dal costruttore che generalmente è pari a 0,00385.

$$T = (R / R_0 - 1) / \alpha \quad (3)$$

Precisioni maggiori sono ottenibili considerando il riscaldamento della resistenza durante la misurazione, la non linearità della risposta, la lunghezza del cavo per la connessione all'ADC oltre alla precisione dell'ADC stesso.

Una buona approssimazione, può essere ottenuta dalla formula di Callandar-Van Duesen (4) di seguito riportata in formato C dove $a = 3.90830 \times 10^{-3}$, $b = -5.77500 \times 10^{-7}$ e $R_0 = R_0$:

$$T = (-R_0*a + \sqrt{R_0*R_0*a*a - 4*R_0*b*(R_0-R)}) / (2*R_0*b); \quad (4)$$

Sono disponibili anche amplificatori di segnale (es. MAX31865), con connessione di tipo SPI, integrati con un proprio ADC, appositamente concepiti per i sensori PT100 e

PT1000 a prezzi relativamente contenuti per i quali sono disponibili le librerie software per ricavare facilmente la temperatura <<https://learn.adafruit.com/adafruit-max31865-rtd-pt100-amplifier/overview>>.

Qualora i calcoli fossero troppo onerosi per microcontrollori dotati di poca memoria si può considerare di immettere nella rete di sensori il dato grezzo derivato dall'ADC e lasciare complicati calcoli ad un microcontrollore più potente o ad un PC.

Altri trasduttori di temperatura integrati con componenti che ne facilitano l'utilizzo e ne stabilizzano il segnale, facilmente reperibili a basso costo sono LM35 <www.ti.com>, MCP9700 <www.microchip.com> per letture analogiche oppure il MCP8700 e il DS18B20 <www.maximintegrated.com> per letture digitali con apposite librerie software e la precisione fino a $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ come nel caso del DS18B20. Quest'ultimo ha una caratteristica che può risultare utilissima; ciascun sensore, grazie ad una memoria ROM (read only memory) interna si distingue per un codice seriale a 64 bit e grazie alla libreria OneWire, integrabile nell'IDE di Arduino, è possibile collegare ad un singolo PIN digitale una lunga serie di sensori con un consumo di energia che in stand-by non supera i 1000 nA.

Il sensore DS18B20 è già stato utilizzato in una rete di sensori wireless a basso costo per il monitoraggio dei processi enologici (Di Gennaro et al. 2014).

Di seguito si riporta un estratto di codice per l'IDE di Arduino desunto dagli esempio della libreria DallasTemperature.h per la lettura di una serie "i" di sensori collegati al PIN 3:

```
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
OneWire ds18x20[] = { 3, 7 };
const int oneWireCount = sizeof(ds18x20)/sizeof(OneWire);
DallasTemperature sensor[oneWireCount];

void setup()
{
  Serial.begin(9600); //inizializza la porta seriale
  DeviceAddress deviceAddress;
  for (int i = 0; i < oneWireCount; i++) {
    sensor[i].setOneWire(&ds18x20[i]);
    sensor[i].begin();
  }
}
```

```

    if (sensor[i].getAddress(deviceAddress, 0)) sensor[i].setResolution(deviceAddress,
12);
                                }    }

void loop()    {
  for (int i = 0; i < oneWireCount; i++) { //chiama sensors.requestTemperatures()
    sensor[i].requestTemperatures();    } // per leggere la temperatura da tutti i sensori
  delay(1000);
  for (int i = 0; i < oneWireCount; i++)    {
    float temperature = sensor[i].getTempCByIndex(0);
    Serial.println("Temperatura sensore "); Serial.println(i);
    Serial.println(" °C "); Serial.println(temperature); }
  Serial.print();

  for (int i = 0; i < oneWireCount; i++)    {
    float temperature = sensor[i].getTempCByIndex(0);
    Serial.println("Temperatura sensore "); Serial.println(i);
    Serial.println(" °C "); Serial.println(temperature); }
  Serial.print(); }

```

2.2. Termocoppie

Le termocoppie sfruttano il fatto che due conduttori di natura differente generano una differenza di potenziale. Sono relativamente economiche e riescono a misurare anche temperature superiori a 600°C. Tuttavia, per essere letti dai i più comuni microcontrollori necessitano di circuiti che ne amplifichino la differenza di potenziale e difficilmente raggiungono una precisione al di sotto del grado centigrado.

2.3. Termopile a infrarossi (IR)

Le termopile a infrarossi sono costituite da una serie di termocoppie collegate in serie con la parte sensibile abbinata ad un corpo nero che assorbe la radiazione infrarossa. Come le termocoppie hanno bisogno di un circuito dedicato, con il quale vengono venduti già in abbinamento, che permetta la lettura della temperatura generalmente tramite protocollo I2C.

La caratteristica che li distingue e che maggiormente viene considerata al momento della scelta è la lettura a distanza, della temperatura; la temperatura, con questi

strumenti, si misura a distanza senza contatto diretto, purché rientri nel campo visivo del sensore.

Molto usato è il MX90614 <<https://www.melexis.com>>, relativamente economico e, secondo le specifiche del costruttore, dotato $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ di precisione a 25°C ; anche in questo caso, il segnale viene inviato al microcontrollore con protocollo I2C. Sono in commercio sensori di questo tipo con diverso angolo di visuale grazie ad appositi dispositivi ottici.

Un crescente interesse verso questo tipo di sensori ha portato diversi costruttori a mettere in commercio delle termopile a matrice di punti come i sensori della serie AMG88 <<https://industrial.panasonic.com>> con una matrice di punti 8×8 , il D6T-44L <<https://www.omron.com>> con una matrice di punti 4×4 o il MLX90640 <<http://www.melexis.com>> con una matrice di punti 32×24 e una precisione fino a $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$. Tranne le più recenti e meno economiche versioni, non tutti permettono misurazioni di temperatura molto accurate ma consentono maggior precisione dei sensori piroelettrici nel rilevamento del movimento di persone o animali e si presume che in un futuro prossimo ci saranno sviluppi interessanti per questo tipo di sensori.

2.4. Sensori piroelettrici

I sensori piroelettrici o più comunemente PIR (passive infrared sensor) sono costituiti da materiali che generano un potenziale elettrico se esposti al calore. I PIR sono in grado di percepire variazioni di temperatura nel loro campo visivo e vengono spesso utilizzati per percepire il movimento di corpi caldi più come sensori della temperatura vera e propria. Trovano applicazione in sistemi di allarme ma potrebbero avere applicazioni nel settore zootecnico.

2.5. Sensori termici ottici

Sono sensori normalmente utilizzate per la costruzione di termocamere ovvero di strumenti ottici sensibili alla radiazione infrarossa termica che tramite una matrice di punti permettono di costruire delle immagini con un gradiente di colori corrispondente alle temperature rilevate.

A parte i già citati sensori a termopila, per i quali è già disponibile anche il software per microcontrollori a basso costo, i sensori termici con risoluzioni più elevate, hanno ancora un costo piuttosto elevato. Tuttavia il crescente interesse per i rilievi termometrici con sensori ottici portati a mano o aviotrasportati sta stimolando i costruttori a sviluppare sensori sempre più economici che possano conquistare sempre maggiore diffusione.

2.6. Schermo solare

A proposito delle misurazioni della temperatura dell'aria è necessario ricordare che il termometro deve essere provvisto di una appropriata schermatura dalle radiazioni solari dirette e nel contempo deve permettere una appropriata circolazione dell'aria. Alcuni produttori aggiungono una piccola ventola per garantire una circolazione dell'aria appropriata.

Il costo delle schermature solari incide in maniera rilevante sul sensore termometrico ed è difficile trovare in bibliografia dei riferimenti che permettano di standardizzarne la struttura; non è infatti chiaro se influiscano sulle misurazioni in modo rilevante e come si debbano confrontare misurazioni ottenute da sensori con schermatura progettata in modo differente. In questo ambito si ritiene che ci sia ampio spazio per indagini scientifiche.

Capitolo 3. Sensori dell'umidità dell'aria

La maggior parte dei trasduttori elettronici dell'umidità dell'aria sfrutta le caratteristiche di specifici sali che variano le proprie caratteristiche dielettriche in base all'umidità assorbita o ceduta in equilibrio con l'umidità dall'aria. In pratica sono dei condensatori di carica elettrica o resistenze la cui capacità o resistività varia in funzione dell'umidità dell'aria. Questo tipo di funzionamento fa sì che sia molto importante il contenitore in cui vanno posizionati. In genere sono provvisti di una piccola rete di protezione che in condizioni di elevata umidità evita la formazione di condensa e la conseguente rottura.

Dalle specifiche dei costruttori non è sempre chiaro se si tratti di sensori capacitivi o resistivi e sono molto spesso integrati con circuiti che facilitano la lettura delle misurazioni restituendo un segnale già digitalizzato; molto frequente è anche l'abbinamento con un sensore di temperatura, soprattutto perché i calcoli per passare dalla resistenza o dalla capacità all'umidità dell'aria necessitano comunque di una compensazione con la temperatura.

In commercio sono disponibili sensori integrati con sensore di temperatura al costo di pochi EURO con le librerie per i più comuni microcontrollori facilmente reperibili in internet e la precisione che pochi anni fa era caratteristica di solo costosi di strumenti.

Molto comuni sono i sensori della serie AMXX <<http://www.aosong.com>> ed in particolare l'AM2315 che vanta la precisione di $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ e il 2% di umidità relativa (RH); più economici ma con precisione leggermente inferiore è l'AM2321 ($\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, 3% RH) o l'AM2302 ($\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, 2% RH) acquistabili con meno di €4; stando alla frequenza in cui compaiono nei prototipi reperibili in internet vantano un grande successo in molteplici contesti di applicazione

Alcune stazioni meteorologiche sono dotate dei sensori della serie SHTXX come il SHT15 <<https://www.sensirion.com>> con precisione dichiarata dal costruttore di $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ e il 2% RH reperibile sul mercato internazionale a meno di €13 con librerie dedicate per i più comuni ed economici microcontrollori.

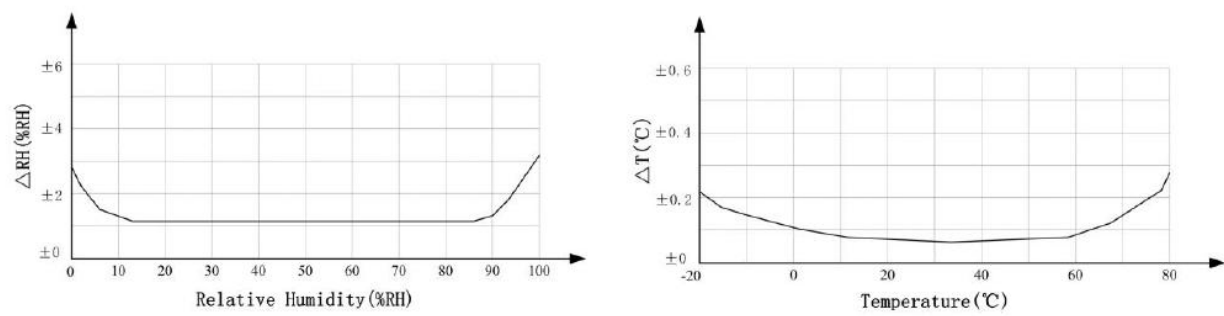


Figura 7. Curve di precisione dell'umidità e della temperatura del sensore AM2315

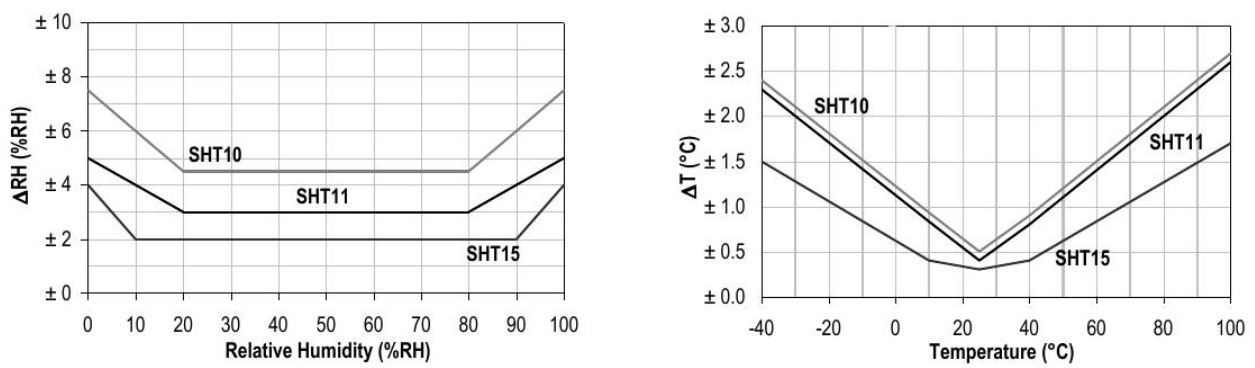


Figura 8. Curve di precisione dell'umidità e della temperatura dei sensori SHT_XX

Capitolo 4. Sensori del contenuto idrico del suolo

4.1. Sensori capacitivi del contenuto idrico del suolo

Si tratta generalmente di sonde che vengono inserite nel suolo alla profondità nella quale si vuole conoscere il contenuto d'acqua.

Le sonde a basso costo, come anche quelle più costose, si basano quasi tutte sulla costante dielettrica del suolo che varia proporzionalmente al variare del contenuto idrico. Nelle sonde a basso costo viene generalmente misurato il tempo necessario a caricare il condensatore costituito dal sensore stesso e dal terreno in cui è immerso, oppure dal potenziale raggiunto dallo stesso condensatore nell'arco del tempo prestabilito (in genere meno di 1000 millisecondi).

Queste misurazioni sono influenzate oltre che dalla matrice costituente il terreno anche dalla salinità della soluzione circolante e dalla temperatura del mezzo in cui sono immersi. Per mitigare questi inconvenienti anziché un semplice impulso di carica viene inviata un'onda quadra con picco di voltaggio prestabilito ed in seguito viene misurata la tensione raggiunta ai terminali del condensatore del sistema suolo/sensore tramite dal microcontrollore della rete di sensori a cui è collegato o dal microcontrollore integrato nel sensore stesso. Le frequenze inviate dai sensori più economici variano da 1 a 8 Mhz per i limiti imposti dei microprocessori (NE555, Attiny, Atmega328, ecc.) anche se frequenze intorno ai 70 Mhz sembrano aver dato i risultati più stabili in diverse condizioni (Buehler et al. 2007). Gli stessi autori hanno anche svolto delle indagini per attenuare l'influenza che ha il variare giornaliero e stagionale della temperatura sulla rispondenza del rilievo rispetto al contenuto idrico.

Alcuni autori, comunque, consigliano di calibrare i sensori nei diversi terreni (Chanzy et al. 2017) viste le risposte differenti che questi restituiscono e vista la complessità e diversità di costituzione che caratterizza il terreno agrario.

Durante prove preliminari approntate per saggiare la reale affidabilità di un sensore resistivo autocostruito, era stata riscontrata una corrispondenza interessante delle letture effettuate con un sensore commerciale EC5 <www.decagon.com> utilizzando la scheda Arduino come datalogger; la bibliografia in merito, infatti, riguarda sensori commerciali di costo superiore a €120. Per questo motivo si è pensato, durante questo

dottorato, di impostare una prova con un clone del sensore capacitivo CHIRP <<https://wemakethings.net/chirp>> (l'autore del sensore originale ha diffuso l'hardware e il software come open source) di costo inferiore a €4 insieme a un sensore resistivo, confrontati in vaso con rilievi gravimetrici, per verificare l'affidabilità per scopi scientifici o di conduzione agraria.

Va comunque specificato che si rendono necessarie delle modifiche da effettuare al sensore capacitivo CHIRP per proteggere dall'acqua e dall'umidità i circuiti esposti.

4.2. Sensori resistivi

I sensori dell'umidità del suolo resistivi costituiti da due elettrodi metallici introdotti nel suolo tra i quali viene misurata la resistenza elettrica che aumenta al diminuire del contenuto idrico. A proposito della calibrazione di questi sensori, secondo alcuni autori (Toller et al. 2012) la corrispondenza delle letture ottenute va considerata un importante riferimento (proxy) per discriminare l'umidità del suolo piuttosto che una corrispondenza matematica con il contenuto idrico.

In prove effettuate durante questo corso di dottorato si è riscontrato che è bene limitare il più possibile le misurazioni giornaliere e limitare la durata dell'impulso di tensione (200 millisecondi sono sufficienti); la polarizzazione del terreno circostante agli elettrodi che avviene dopo misurazioni continue rende inutilizzabili le letture. Inoltre si è riscontrata la necessità di inserire un relè che apra il circuito in modalità bipolare qualora si volesse effettuare la misurazione di più coppie di elettrodi; evidentemente la resistenza tra i diversi pin analogici e del terreno stesso, se pur molto elevate influenzano le letture delle altre coppie di elettrodi e rendono la lettura dei dati rilevati difficilmente interpretabile.

In lavori reperiti in bibliografia sensori resistivi di superficie con misure a distanze predefinite (Rossi et al. 2013) abbinati a rilievi GPS, sono stati utilizzati per mappare le caratteristiche del suolo di un vigneto a diverse profondità. Questo tipo di misurazioni è molto interessante se si desidera sviluppare un sistema di mappatura tramite veicoli a guida autonoma; il costo decrescente dei componenti, attualmente rende possibile l'integrazione di questo tipo di strumento in una rete di sensori a basso costo. È infatti possibile equipaggiarlo con diversi tipi di sensori e può essere utilizzato per recuperare

periodicamente i dati di sensori disposti a distanza non raggiungibile dalle postazioni fisse.

4.3 Prova sperimentale di un sensore capacitivo e di un sensore resistivo dell'umidità del suolo

Il contenuto idrico del suolo è un parametro fondamentale non solo nella programmazione e conduzione delle colture agrarie e forestali ma anche nella gestione del territorio laddove è necessario l'intervento dell'uomo per gestire fenomeni quali siccità, dissesto idrogeologico.

Al fine di indagare sulla risposta di sensori a basso costo in diverse situazioni di contenuto idrico e in differenti condizioni tessiturali si è impostata una prova sperimentale in vaso utilizzando un sensore resistivo autocostruito e un clone del sensore capacitivo CHIRP in tre tipi di terreno con diverse tessiture.

Il sensore resistivo è stato ottenuto semplicemente collegando ad un cavo elettrico due porzioni di filo in acciaio inossidabile della lunghezza di 5 cm distanziati di 2,5 cm. Il collegamento elettrico è stato isolato con nastro autosaldante che in precedenti prove aveva dimostrato di rendere stagno il sensore.

Sono stati utilizzati 3 tipi di terreno. Il primo terreno è stato prelevato da un seminativo del Comune di Cori (LT) di cui è stata analizzata la tessitura, il secondo terreno è stato acquistato come sabbia pura calibrata a 0,1 mm, mentre il terzo terreno è stato ottenuto miscelando sabbia pura calibrata a 0,1 mm e argilla pura (Tabella 4.1).

Terreni	Sabbia %	Limo %	Argilla %	Sostanza organica %
Terreno agrario	56	22	22	2,2
Sabbia	100	-	-	-
Sabbia + Argilla	77	-	33	-

Tabella 4.1. Tessitura dei terreni utilizzati

I terreni sono stati inseriti in contenitori cilindrici di materiale plastico con un fondo che permettesse il drenaggio dell'acqua e portati a saturazione.

In seguito si è atteso che l'acqua in eccesso venisse drenata fino alla fine dello sgocciolamento, sono stati inseriti i sensori collegati ad una scheda Arduino Uno R3 e posti in una camera termostata a 20°C. Il sensore CHIRP è stato collegato ai PIN IIC mentre il sensore resistivo è stato collegato all'ADC.

Prima di iniziare i rilievi gravimetrici una porzione di ciascun terreno è stata messa in stufa per la determinazione del peso secco.

Le letture delle misure sono state effettuate a 20°C in modo che, in questo contesto, le eventuali diverse risposte alle fluttuazioni termiche non influenzassero la prova. Unitamente a queste letture si è provveduto a pesare i terreni una volta rimossi i collegamenti, considerando le tare dovute al contenitore, ai cavi e ai sensori.

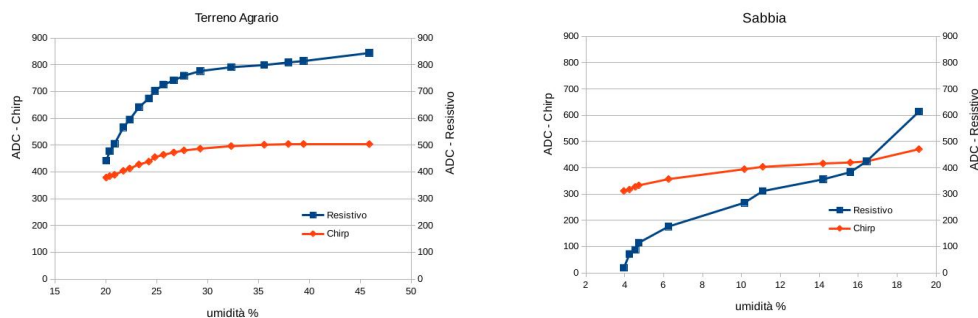


Figura 4.1. Curva dei rilievi effettuati con in funzione dell'umidità (%)

I dati fin ora ottenuti, pur essendo parziali, mostrano come il sensore capacitivo, rispetto a quello resistivo, risulti meno sensibile esprimendo le variazioni di contenuto in un ambito più ristretto rispetto al sensore capacitivo. Ulteriori prove sono sicuramente necessarie ma considerando le incertezze e le variabili non sempre prevedibili che intervengono in situazioni di campo (temperatura variabile nel giorno e nelle stagioni, disomogeneità della tessitura del terreno, ecc.) potrebbe risultare troppo ristretto l'intervallo in cui il sensore CHIRP mostra eccessiva carenza di umidità e capacità di campo.

I risultati promettenti e il ruolo cruciale del contenuto idrico del suolo nell'ecosistema e nella conduzione agricola e forestale, offrono gli spunti per ricerche sullo sviluppo e la

messa a punto di sensori sempre più precisi e adattabili alle diverse condizioni in cui si opera.

Capitolo 5. Sensori ottici

5.1. Fotodiodi e fototransistor

I fotodiodi sono particolari tipi di diodi in grado di trasformare l'assorbimento luminoso in un segnale elettrico. Anche i fototransistor sono sensibili alla luce; il funzionamento è simile a quello di un normale transistor con la differenza che la tensione esercitata sulla base è determinata dalla luce e la corrente in uscita è simile a quella di un fotodiodo moltiplicata per il guadagno tra collettore ed emettitore; il segnale in uscita, pertanto è amplificato rispetto ai fotodiodi.

Il convertitore ADC dei più economici microcontrollori può facilmente effettuare letture di tensione dall'emettitore del fototransistor e il costo di questi componenti è decisamente basso anche se la risposta alle diverse frequenze di luce non è sempre dichiarata dal costruttore.

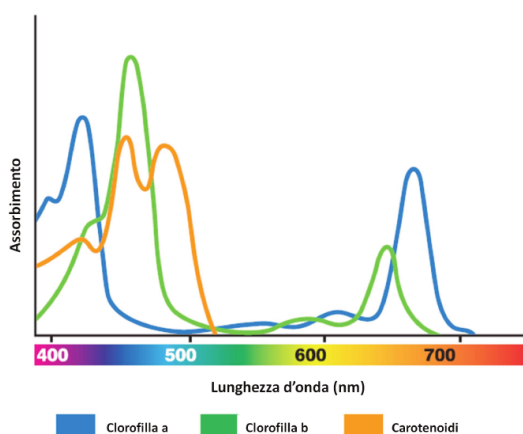


Figura 5.1. Curva di assorbimento della luce dei pigmenti vegetali

Alcuni fototransistor sembrano molto incoraggianti per nuovi sviluppi di prototipi per applicazioni di vario genere. Ad esempio lo spettro di assorbimento del fototransistor TEMT6000 <<http://www.vishay.com>> offre lo spunto per sviluppare sensori portati a mano, in posizione fissa inseriti in una rete wireless per indagini sulla copertura nuvolosa, sulla trasmittanza o fluorescenza della clorofilla (Bussotti et al., 2012), la riflettanza nella banda del verde, dell'infrarosso vicino, l'assorbimento del rosso, il

coefficiente di estinzione della radiazione (Ventura et al., 2018); rilievi direttamente correlabili con parametri di valutazione della necessità di nutrienti, dello stato di salute, della produttività delle piante, ecc.

Oltre a sfruttare la riflessione della luce del sole si possono sviluppare anche sensori attivi utilizzando LED (light emitting diode) con una specifica e, tipico dei led, molto ristretta banda di emissione. Un opportuno filtraggio della luce in ingresso al fototransistor consente di selezionare le bande luminose di interesse, considerando la risposta del sensore alle diverse bande.

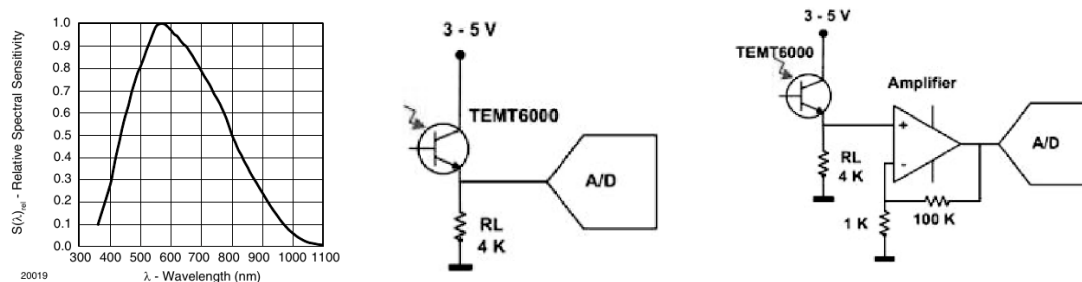


Figura 5.2. Curva di risposta alle bande luminose e indicazioni costruttive del fototransistor TEMT6000

5.2. CMOS

I sensori CMOS (complementary metal-oxide semiconductor) sono costituiti essenzialmente da una matrice di fotodiodi che rilevano contemporaneamente la luce fornendo un'immagine completa di quello che viene inquadrato dall'ottica che li accompagna.

Rappresentano il componente principale delle più comuni fotocamere digitali che, grazie ad una particolare filtrazione della luce percepiscono i livelli di luminosità nelle bande del rosso, del verde e del blu (RGB = red, green, blue). Opportune modifiche al filtraggio consentono di ampliare la banda di assorbimento fino all'infrarosso.

Attraverso opportuni calcoli sulla base dell'intensità dei colori percepiti è possibile calcolare degli indici che sono direttamente connessi con la vitalità e allo sviluppo della vegetazione.

Sono disponibili sul mercato sensori di dimensioni molto piccole e molto leggeri che possono essere utilizzati in postazioni fisse per il monitoraggio della vegetazione in un arco temporale oppure effettuare rilievi da mezzi di terra o aeromobili.

Le immagini possono essere registrate su memorie flash ed essere prelevate periodicamente oppure, con microcontrollori con potenza di calcolo adeguata come Arduino DUE, Raspberry, ecc. possono essere elaborate e registrate in uno dei componenti della rete di sensori.

Di seguito si riporta la descrizione e i risultati ottenuti in una prova sperimentale effettuata utilizzando due microcamere amatoriali basso costo con sensore CMOS, su una delle quali è stato sostituito il filtro ottico, e una fotocamera commerciale per indagini sulla vegetazione.

5.3. Prova sperimentale di due fotocamere con sensore CMOS a basso costo per la gestione della fertilizzazione in un semenzaio di lattuga

5.3.1. Riassunto

Al fine di verificare possibili alternative a basso costo di sensori commerciali per il monitoraggio della crescita, della sanità e dello sviluppo fenologico di colture sperimentali sono state testate due macchine fotografiche digitali a basso costo, di peso e dimensioni ridotte (Microcamera 808 720x480 pixel, SQ8 1024x720 pixel), per monitorare la crescita di piantine di lattuga (*Lactuca sativa* cv Romana) in contenitori alveolati con diverse dosi di fertilizzazione.

Anche fotocamere concepite per scopi non scientifici, se pur con caratteristiche inferiori, dispongono di sensori in grado di percepire le bande luminose che consentono indagini a scopo scientifico o per l'assistenza tecnica alle aziende agricole.

La fotocamera SQ8 è stata modificata sostituendo il filtro UV-IR per realizzare un sensore infrarosso a basso costo, mentre alla Microcamera 808 non è stata effettuata nessuna modifica.

I risultati derivati dall'analisi delle immagini sono stati confrontati con quelli ottenuti dalla fotocamera Tetracam Lite.

Anche dopo la modifica del filtro UV-IR, il costo di ciascuna delle fotocamere è stato inferiore a €8.

5.3.2. Introduzione

Il telerilevamento permette di ricavare a distanza informazioni qualitative e quantitative ed è uno strumento non distruttivo ampiamente utilizzato per le indagini sulla vegetazione spontanea, e sulle coltivazioni agrarie e forestali. Lo stato di salute generale della vegetazione, lo sviluppo fenologico, la previsione delle rese, il monitoraggio delle erbe infestanti e delle avversità delle colture, la gestione della fertilizzazione e dell'irrigazione, la valutazione della biomassa vegetale e dell'evapotraspirazione sono alcuni esempi di applicazioni di telerilevamento in agricoltura. Questa tecnologia sfrutta le caratteristiche di riflettanza ottica dei pigmenti della vegetazione ed in particolare della clorofilla (Basso et al., 2004). La clorofilla attiva assorbe la radiazione luminosa della luce rossa e blu mentre riflette il verde (Gitelson e Merzlyak, 1996); il mesofillo della foglia riflette lo spettro del vicino infrarosso (NIR) (Basso et al., 2004).

L'immagine ottenuta dai sensori ottici, attraverso indici di vegetazione calcolati su opportuni rapporti quantitativi dei vari colori percepiti dal sensore, consente la stima delle proprietà della vegetazione. Gli indici di colore, rispetto all'analisi dei singoli colori, sono noti per essere meno sensibili alle interferenze dovute al suolo o all'atmosfera (Meyer e Neto 2008).

Negli ultimi anni sono stati sviluppati sensori più piccoli e leggeri, adatti alla costruzione di strumenti portati a mano o trasportati da velivoli senza pilota (Unmanned Aerial Vehicles - UAV), per ottenere risultati più economici e dettagliati rispetto al telerilevamento satellitare o aereo su scala locale (Li et al. 2010). I sensori ottici CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor), utilizzati anche nelle comuni fotocamere digitali, opportunamente filtrati, sono ampiamente utilizzati per gli scopi indicati in precedenza. Le fotocamere professionali o scientifiche, progettate in modo specifico per il telerilevamento tramite UAV, sono molto costose e possono costituire un fattore limitante per realizzare attività scientifiche qualora il budget disponibile per la sensoristica fosse limitato (Nijland et al., 2017). Il sensore ottico della maggior parte delle comuni fotocamere digitali (fotocamere

digitali RGB) è costituito da un CMOS sensibile alle lunghezze d'onda comprese tra 350 e 1100 nm ma le radiazioni ultraviolette (UV) e infrarosse (IR) vengono filtrate per ottenere immagini realistiche per la visione dell'uomo.

In alcuni modelli è relativamente facile sostituire il filtro UV-IR con un filtro che arresti la lunghezza d'onda più corte di quella rossa (590-700 nm) e lasci attraversare la radiazione NIR (750-950 nm). Questa semplice modifica consente di riprendere immagini dove la banda luminosa NIR è registrata dal canale normalmente dedicato al colore blu e il canale ROSSO può continuare a compiere la sua funzione. Tuttavia, secondo Nijland et al. (2013), le fotocamere convenzionali RGB senza alcuna modifica possono essere utilizzate per indagini sulle condizioni e la fenologia delle piante. In un altro lavoro è stata utilizzata con successo una telecamera di sicurezza modificata per monitorare la fenologia della vegetazione forestale (Petach et al., 2014). Variyar et al. (2016) hanno sviluppato un "Sistema di monitoraggio della salute delle piante a basso costo per l'acquaponica" nel progetto "Infragram" (<https://infragram.org/>) in cui viene dettagliatamente spiegato come modificare una action-cam e come effettuare i calcoli dei colori. Sullo stesso progetto si basa anche un'altra ricerca sulla stima della biomassa della *Spirulina platensis* coltivata (Nijangoran et al., 2017). Al fine di verificare l'efficienza e la funzionalità di strumenti che possano essere utili ad attività di ricerca o di monitoraggio con elevato numero di punti di campionamento oppure per indagini sulla vegetazione tramite UAV con limitato carico utile disponibile, è stata messa a punto una prova sperimentale di efficienza di due fotocamere CMOS a basso costo e di peso contenuto per verificare la loro capacità di distinguere le diverse condizioni di vegetazione. Come termine di paragone è stata utilizzata una fotocamera professionale (Tetracam lite) appositamente concepita per indagini sulla vegetazione.

5.3.3. Materiali e metodi

Tra i diversi modelli di microcamere disponibili sul mercato, sono state scelte la 808 e la SQ8 combinando diversi criteri di valutazione come peso, dimensioni, prezzo e ovviamente, le caratteristiche tecniche di base come la risoluzione dell'immagine posta una soglia di prezzo (€ 8,00).

La microcamera 808 non ha subito nessuna modifica mentre la SQ8 è stata modificata sostituendo il filtro UV-IR dell'obiettivo con una combinazione di un filtro a doppia banda (400/620 nm-850 nm) e un filtro rosso per restringere banda di trasmittanza (rosso 590 nm + infra rosso 850 nm). Le modifiche effettuate sulla microcamera SQ8, hanno permesso di leggere la luce rossa dal canale rosso e la luce IR dal canale blu del sensore CMOS. Il costo totale del filtro modificato è stato inferiore a € 1,00.

Come modello di riferimento è stata utilizzata la fotocamera professionale Tetracam Lite.

Al fine di per confrontare la qualità delle immagini ottenute dai sensori a basso costo con la fotocamera professionale e verificare l'idoneità alle indagini funzionali sulla vegetazione è stata impostata una prova sperimentale di fertilizzazione di piantine di lattuga, coltivate in serra e destinate al trapianto, della cv Romana che, grazie alla rapidità di crescita e all'ampiezza delle foglie che la caratterizza, è in grado di coprire rapidamente con la propria vegetazione il vassoio di coltivazione.

È stato adottato lo schema sperimentale a blocchi randomizzati in cui ogni parcella consisteva in un vassoio di semina da 400x600 millimetri a 120 fori con 50 mm di substrato di semina commerciale.

Ogni tesi, tranne il testimone non trattato, è stata concimata con un fertilizzante solubile N-P-K 20-20-20 (L. Gobbi Dünger 20), in soluzione al 3 ‰ nell'acqua di irrigazione, due settimane dopo la semina. Dopo una settimana sono state trattate due tesi delle quali, dopo ancora una settimana, è stata trattata una sola tesi. In questo modo la prima tesi è stata fertirrigata tre volte, la seconda due volte e la terza una volta soltanto; la quarta tesi (testimone) è stata irrigata senza alcun fertilizzante aggiuntivo, beneficiando soltanto dei nutrienti contenuti nel substrato di coltivazione.

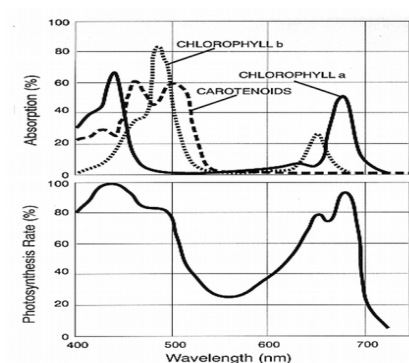


Figura 5.3.1. Curva di assorbimento della clorofilla.



Figura 5.3.2. Microcamere SQ8 e 808.

Due settimane dopo l'ultimo trattamento fertilizzante, quando i vassoi di semina erano completamente coperti dalla vegetazione, sono state riprese le immagini ad un metro di distanza (Tabella 5.3.1).

Camera	Pixel resolution	CMOS mm	Lens (mm)	Final parcel pixel	Parcel pixel surface (mm ²)
Tetracam Lite	2048 x 1536	6.55 x 4.92	8	300 x 190	0.52
808	1280 x 1024	2.40 x 1.80	4	148 x 104	1.94
SQ8	2592 x 1944	2.40 x 1.80	4	500 x 355	0.17

Tabella 5.3.1. Caratteristiche delle fotocamere

Al momento del rilievo le parcelle test erano allo stadio di sviluppo di 6 foglie mentre la tesi maggiormente fertilizzata era allo stadio di 8 foglie; le parcelle fertilizzate una volta e due volte si trovavano ad un livello di crescita intermedia.

Le immagini sono state tagliate in modo che corrispondessero a un rettangolo di semenzale di 150x200 millimetri scelto escludendo un bordo di 50 millimetri. Da queste immagini sono stati estratti i valori a 8 bit (da 0 a 1024) dei tre canali di colore (RGB)

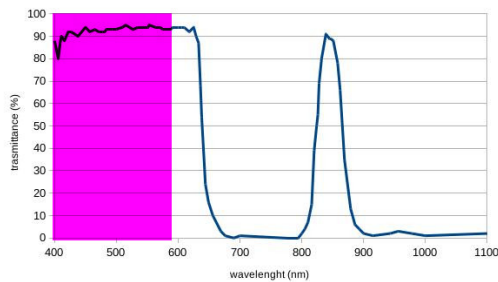


Figura 5.3.3. Curva di trasmittanza del nuovo filtro della SQ8 e lunghezza d'onda filtrata dal filtro rosso

Per distinguere il livello di crescita delle giovani piante di lattuga dalle immagini della microcamera 808 sono stati calcolati gli indici GRVI (Green-Red Vegetation Index) and ExG (Excess Green index), di seguito riportate, dove r, g e b sono i valori ottenuti dalle immagini rispettivamente dai canali rosso, verde e blu.

$$GRVI = \frac{g - r}{g + r} \quad (5.1)$$

$$ExG = 2 * \frac{g}{(g + r + b)} - \frac{r}{(g + r + b)} - \frac{b}{(g + r + b)} \quad (5.2)$$

L'equazione 5.1 (GRVI) è generalmente utilizzato per valutare la copertura vegetale del suolo e si esprime come bilancio tra la riflettanza del verde (lunghezza d'onda tra 500 e 570 nm) e del rosso (lunghezza d'onda tra 620 e 700 nm); valori alti di verde rispetto al rosso sono tipici della vegetazione, valori opposti contraddistinguono il suolo nudo,

mentre acqua e neve mostrano scarse differenze simili tra verde e rosso (Motoka et al., 2010).

L'equazione 5.2 (ExG) è stata scelta per la sua ampia diffusione negli studi sulla caratterizzazione delle coperture vegetali da remote sensing (Chitra et al., 2014).

I dati estratti dalle immagini riprese con la microcamera SQ8 modificata e con la Tetracam Lite sono stati utilizzati per calcolare l'indice NDVI index (Normalized difference vegetation index, Rouse et al. 1974, Lukina et al. 2001) come mostrato nella formula 5.3 dove NIR (near infrared) è il valore estratto dal canale del blu.

$$NDVI = (NIR-r) / (NIR+r) \quad (5.3)$$

L'NDVI, nato dalla ricerca sulle immagini satellitari, è comunemente usato per valutare la densità della vegetazione da remote sensing e si basa sull'assorbimento della luce rossa e riflessione della luce NIR da parte dei pigmenti delle foglie in attività fotosintetica.

Il bilanciamento del colore è stato effettuato in post produzione per standardizzare le immagini tramite una carta al teflon/bario inclusa nelle foto.

Le immagini riprese con la 808 e la SQ8 sono state elaborate con software open sources mentre le immagini della Tetracam Lite sono state elaborate con il software proprietario Pixel Wrench <www.tetracam.com/PWversion.htm>.

Le immagini sono state tagliate con il software Gwenview <<https://userbase.kde.org/Gwenview>>, i colori sono stati elaborati con ImageMagick.

Per la valutazione dei dati sperimentali è stata effettuata una analisi statistica (ANOVA test) utilizzando la libreria "Agricolae" del software R-Cran <<http://www.R-project.org/>>. Le elaborazioni con software open source sono state lanciate in un sistema operativo Linux Debian 9 (www.debian.org/), mentre Pixel Wrench è stato eseguito in un sistema operativo Microsoft Windows.



Figura 5.3.4. Esempi di immagini ottenute dalla 808, SQ8 e Tetracam Lite

5.3.4. Risultati

I risultati ottenuti dal test ANOVA calcolato con due soglie di probabilità ($P=0,05$ e $P=0,01$) sono mostrati nelle tabelle di seguito riportate; i risultati contrassegnati con la stessa lettera (a, b, c, d) non sono statisticamente differenti.

Le tesi 3, 2 e 1 sono state trattate rispettivamente con tre, due e un trattamento di fertirrigazione; la tesi 0 è il test non fertilizzato.

L'indice ExG (Tab. 5.3.2) delle immagini riprese con la 808, ha mostrato differenze significative per $P=0,05$; per $P=0,01$ la tesi 2 non è significativamente diversa dalla 3 e dalla 1 ma 0, 1 e 3 sono significativamente diverse.

Dalle stesse immagini, l'indice GR (Tab. 5.3.3) tra le tesi 2 e 3 non mostra differenze significative che esistono tra le altre tesi per entrambi le soglie di probabilità.

Fertirrigation	ExG	$P=0.05$	$P=0.01$
3 doses	145.3	a	a
2 doses	133.7	b	ab
1 dose	118.7	c	b
Not fertilized	100.0	d	d
LSD		10.4	15.3

Tabella 5.3.2. Indice ExG della Microcamera 808

Fertirrigation	GR	P=0.05	P=0.01
3 doses	155.7	a	a
2 doses	154.7	a	a
1 dose	150.3	b	b
Not fertilized	142.7	c	c
LSD		2.9	4.3

Tabella 5.3.3. Indice GR della Microcamera 808

Doses	NDVI	P=0.05	P=0.01
3	120	a	a
2	121	a	a
1	117	b	b
Not fertilized	109	c	c
	LSD	2.1	3.1

Tabella 5.3.4. Indice NDVI della SQ8

Doses	NDVI	P=0.05	P=0.01
3	213	b	b
2	213	b	b
1	210	b	b
Not fertilized	193	a	a
	LSD	5.7	8.6

Tabella 5.3.5. Indice NDVI della Tetracam Lite

Le tabelle 5.3.4 e 5.3.5 mostrano come le fotocamere Tetracam Lite e SQ8 abbiano ottenuto risultati molto simili in termini di indice NDVI nonostante le differenze di risoluzione dei sensori.

5.3.5. Discussione

Dall'analisi dei risultati risulta evidente come, attraverso indici di vegetazione convenzionali tratti da immagini riprese da microcamere a basso costo non progettate allo scopo, è possibile distinguere diversi livelli di crescita vegetativa dovuti a diversi trattamenti fertilizzanti.

Va inoltre considerato che la Tetracam Lite è utilizzabile solo seguendo le procedure preimpostate dal produttore mentre la combinazione tra fotocamere a basso costo e software open source permette di scegliere o modificare sulla base delle specifiche esigenze i calcoli o gli indici che meglio si adattano alle necessità e ai criteri sperimentali contingenti; infatti dalle stesse immagini sono stati ottenuti risultati differenti con diversi indici di vegetazione.

Inoltre, come in precedenti lavori (Li et al. 2010), gli indici basati sulla riflettanza del verde si sono dimostrati (ExG, GR) strumenti efficienti per la gestione delle fertilizzazioni.

La fotocamera 808 ha potuto distinguere tutte le tesi diversamente fertilizzate ($P=0,05$). I risultati incoraggianti ottenuti, il peso e il costo ridotto lasciano supporre che possano essere utilizzate, con opportuni adattamenti, come sensori aviotrasportati o sensori di postazioni fisse, per il monitoraggio della vegetazione colture agrarie e forestali.

Capitolo 6. Sensori di altre grandezza fisiche

6.1. Altezza di pioggia

I pluviometri a costo più basso disponibili sul mercato sono generalmente derivati da una semplificazione dei pluviometri meccanici a bascula ottenuti diminuendo in parte le dimensioni e utilizzando materiali di basso costo.

I movimenti della bascula sono tradotti in segnale ad 1 bit (ON / OFF) tramite un sensore magnetico di prossimità (hall sensor) oppure con un sensore luminoso che percepisce la luce di un led al muoversi della bascula. Generalmente si evita il contatto elettrico diretto con la bascula per scongiurare problemi causati dall'umidità.

Questo tipo di sensori mantiene comunque un prezzo non propriamente irrisorio se si volesse distribuire un grande numero di sensori in una zona relativamente ampia per indagare, ad esempio, sulla distribuzione delle piogge in un bacino idrografico.

Degni di grande attenzione sono i disdrometri, ovvero dei pluviometri basati sulla tensione generata da particolari materiali sensibili alla pressione (sensori piezoelettrici). Tramite questi componenti sono stati realizzati pluviometri privi di parti meccaniche, molto leggeri e di piccole dimensioni. Sicuramente risulterebbe interessante e poco dispendioso sviluppare un prototipo di disdrometro utilizzando sensori piezoelettrici reperibili a costo irrisorio ed effettuare le tarature del segnale ottenuto in base alla grandezza, alla quantità e alle dimensioni delle gocce cadute (Islam et al. 2012).

6.2. Bagnatura fogliare

I sensori della bagnatura fogliare sono spesso abbinati ai pluviometri digitali per riattivare il microcontrollore dallo stato di sleep alla caduta delle prime gocce di pioggia.

Generalmente consistono in una serie di conduttori ravvicinati, in una piastra per circuiti stampati, vicini quanto basta perché delle goccioline di pioggia portino ad una caduta di resistenza.

Possono essere utili anche per individuare momenti della giornata in cui si deposita condensa, che ugualmente determina una caduta di resistenza elettrica sul sensore, presupponendo che avvenga lo stesso fenomeno sulla superficie delle foglie.

Come anche per i sensori commerciali che corredano le centraline meteorologiche convenzionali, non esiste uno standard costruttivo dei sensori di bagnatura fogliare; pertanto i dati rilevati devono essere riportati insieme alle specifiche costruttive del sensore prima di essere tradotti in indicazioni per scopi fitopatologici o di altro genere.

6.3. Velocità e direzione del vento

La trasduzione sia della velocità che della direzione del vento avviene in modo simile a quella dei pluviometri meccanici, ovvero grazie a sensori magnetici o fotoaccoppiatori tramite i quali è possibile digitalizzare il movimento della banderuola o delle coppe dell'anemometro.

Il segnale inviato dall'anemometro digitale viene letto dal microprocessore come una frequenza proporzionale al numero di giri mentre la direzione del vento viene letta come diversi valori di tensione diversificati in base al quadrante in cui è posizionata la banderuola.

In bibliografia non risultano finora reperibili sensori sonici del vento a basso costo anche se trovano sempre più ampia diffusione le versioni commerciali.

I sensori sonici utilizzano emettitori e trasduttori ultrasonici posti a distanza nota per determinare la velocità del vento. Misurano la distanza fra di loro in base alla velocità del suono (343 m/S); variazioni sulla misurazione attesa vengono ascritte ai movimenti dell'aria. Posizionandoli a diverse angolazioni, inoltre, è possibile, tramite calcoli trigonometrici, desumere anche l'angolazione rispetto al nord.

Esistono sensori della distanza impermeabili e a basso costo come il JSN-SRF04 <<http://www.jsnenterprise.net>> che, opportunamente installati e con le necessarie modifiche del software di controllo, potrebbero essere utili per sviluppare un sensore sonico del vento a basso costo esente dai problemi di funzionamento e manutenzione dovuta alle parti meccaniche in movimento dei sensori tradizionali.

6.4. Sensori di peso

I trasduttori elettronici del peso vengono denominati celle di carico (inglese = load cell).

Il segnale generalmente necessita di un amplificatore per poter essere letto dai microcontrollori di cui abbiamo parlato in precedenza, e sono dispositivi l'HX711 (<<http://www.aviaic.com>>) sono disponibili a basso costo.

Un esempio di utilizzo già sperimentato è la segnalazione del peso di un'arnia tramite modem GSM (Global System for Mobile Communications) per segnalare all'apicoltore che effettua il nomadismo il momento per movimentare i melari o spostare le arnie (Baiyr & Albayrak, 2016).

6.5. Sensori del flusso linfatico

I sensori di flusso linfatico sono sostanzialmente dei termometri posizionati all'interno del tessuto legnoso attivo di specie arboree in prossimità di una resistenza che genera calore. Le variazioni di temperatura vengono rapportate al flusso linfatico che può essere considerato un'indice di attività e vitalità dell'albero (Di Baccio, 2012). Se il termometro è una termoresistenza può esso stesso funzionare da riscaldatore e successivamente misurare la variazione di temperatura.

Un prototipo per colture erbacee è stato sviluppato con successo per essere applicato sul fusto del girasole e sul culmo del mais (Miner et al., 2017).

6.6. Accelerometri, giroscopi, bussola

La combinazione di accelerometro, giroscopio e talvolta bussola costituisce la strumentazione indispensabile (IMU = inertial measurement unit) per veicoli a controllo remoto o a navigazione autonoma, insieme al ricevitore satellitare per la georeferenziazione.

Possono inoltre essere utilizzati singolarmente per valutare movimenti, spostamenti e vibrazioni di attrezzature in movimento statico come pompe, generatori, verricelli o movimento dinamico come macchine agricole, macchine per movimento terra, ecc. Possono essere utili anche nella valutazione del comfort degli operatori che lavorano con i macchinari di vario genere.

Sono compatibili con i più comuni microcontrollori e sono facilmente reperibili a basso costo.

Esistono anche schede e circuiti che integrano questi sensori in schede appositamente studiate per costruire veicoli a navigazione autonoma a scopo ludico o professionale.

Alcuni modelli sono dotati di hardware opensource e sono alla base di progetti con tutti i dettagli per la costruzione e configurazione disponibili in internet <<http://ardupilot.org>> <<https://www.librepilot.org>> <<https://github.com/iNavFlight>> <<https://dronin.org/>>.

In una rete di sensori possono risultare di grande utilità per riprendere immagini dall'alto o da terra periodicamente o per avvicinarsi a postazioni installate in zone difficilmente accessibili ed entrare nel raggio di trasmissione per raccogliere dati.

6.7. Tempo

I rilievi periodici effettuati dai sensori di vario genere perderebbero di senso se non fossero registrati con l'indicazione del momento in cui sono stati ottenuti (anno, mese, giorno, ora, minuti, secondi). La funzione di conteggiare il tempo viene svolta da appositi moduli RTC (dall'inglese *real time clock*). Sono generalmente dotati di batteria propria e inviano su richiesta al microcontrollore.

I moduli a basso costo più utilizzati sono basati sul microchip DS3231 <<https://www.maximintegrated.com>> con trasmissione dati via IIC.

Capitolo 7. Trasmissione e ricezione dati

Lo scambio di dati tra due componenti della rete può essere intrapresa utilizzando i PIN dei microcontrollori appositamente dedicati alla trasmissione seriale che generalmente sono contrassegnati dai simboli Rx per i dati in entrata e Tx per i dati in uscita. I limiti imposti dalla perdita del segnale allungando i cavi per più di 1,5 metri e la necessità di comunicare con più dispositivi che compongono la rete ha portato sempre più a predisporre la comunicazione tramite segnali radio (wireless).

I moduli di trasmissione a basso costo operano nelle frequenze prive di limiti legali di 433 Mhz, 2,4 e 5,4 Ghz.

7.1. Moduli operanti nella banda dei 433 Mhz

Esiste una vastissima gamma di moduli a basso costo che utilizzano la frequenza di 433 Mhz e la richiesta crescente di questo tipo di tecnologia spinge le case costruttrici a sviluppare continuamente prodotti con caratteristiche innovative per potenza, affidabilità, consumo di energia, miniaturizzazione, ecc.

Moduli separati per la trasmissione e ricezione disponibili a prezzo bassissimo del tipo XD-FST/XD-RF o MX-05V/MX-FS-03V utilizzano la banda dei 433 Mhz ed hanno librerie software dedicate utilizzabili anche da microcontrollori dotati di poca memoria come quelli della serie Attiny. La gittata di questi moduli, tuttavia è limitata a poche decine di metri.

Sempre nella banda dei 433 Mhz operano moduli del tipo HC-12 <<http://www.hc01.com>> basati sul microchip SI6643 <<http://www.silabs.com>> che trasmettono via etere il segnale seriale dei microcontrollori, in entrata e in uscita nello stesso modulo (half-duplex), richiedono maggiore energia per la trasmissione ($\leq 100\text{mA}$) ma possono raggiungere anche diverse centinaia di metri di gittata. Tramite appositi comandi possono essere posti in modalità di attesa tra una trasmissione e l'altra con consumo di corrente ridottissimo ($80\text{ }\mu\text{A}$).

Sono nati appositamente per sostituire i cavi dei segnali seriali e sono molto utilizzati nel trasferire dati della strumentazione di bordo di veicoli o aeromobili a controllo

remoto (telemetria). Sono comunque utilizzabili dalla maggioranza dei microcontrollori per trasferire i dati derivati dai sensori e si possono reperire al costo inferiore ai €4.



Figura 7.1. Modulo di trasmissione seriale wireless HC-12

Grande interesse, stanno destando in questo momento, i moduli basati sulla tecnologia LoRa™ <<https://lora-alliance.org>> operanti in Europa nella banda dei 433 Mhz e 868 Mhz e basate sul microchip SX1278 <<https://www.semtech.com>>, per la gittata che, secondo le specifiche del produttore, può arrivare fino a 10 Km in campo aperto. Il moduli LoRa™ integrano alcuni PIN digitali a cui è possibile collegare direttamente dei sensori senza ricorrere a microcontrollori aggiuntivi se pur con memoria ridotta; è stato appositamente concepito per la costruzione di smart sensor (sensori integrati con moduli di trasmissione dati) a lunga gittata e possono risultare utilissimi per impostare reti di sensori in zone rurali quando il *gateway* per l'accesso alla rete internet si trova molto distante. Comunica con i microcontrollori tramite connessione SPI.

In modalità *sleep* hanno un consumo di corrente ridottissimo (80 μ A) consentendo lunga durata anche con batterie di piccole dimensioni. Tuttavia i byte di dati che possono trasferire è limitato e pertanto non sono adatti a trasferire immagini anche se sono allo studio delle soluzioni software per frammentare i file immagine in porzioni di dati trasferibili anche da questi moduli. Quest'ultima opzione offrirebbe l'opportunità di inviare da lunghe distanze immagini, se pur di ridotte dimensioni, per il monitoraggio della vegetazione, per lo sviluppo di trappole digitali per il monitoraggio di parassiti dannosi alle colture e altre applicazioni di monitoraggio ambientale tramite immagini.

Ci sono moduli di questo tipo reperibili a meno di €5.

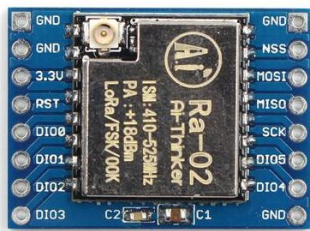


Figura 7.2. Modulo di trasmissione LoRa™

7.2. Moduli operanti nella banda dei 2,4 e 5,4 Ghz

Le bande dei 2,4 Ghz e 5,4 Ghz vengono spesso preferite per la ridotta suscettibilità alle interferenze rispetto ai 433 Mhz. I moduli a 5,4 Ghz, derivati da una tecnologia più recente sono ancora difficilmente reperibili a basso costo.

Nella banda dei 2,4 Ghz operano i moduli del tipo ZigBee <<https://www.zigbee.org>> e nRF24L01 <<http://www.nordicsemi.com>> che hanno avuto un certo successo fino ad un passato recente dopo il quale sono stati in parte soppiantati dai nuovi moduli di trasmissione.

Anche i moduli Bluetooth operano nella stessa banda e pur mantenendo largo uso per la comunicazione tra computer, smartphone e dispositivi mobili personali, nelle reti di sensori attualmente subiscono anche loro la concorrenza dei moduli con raggio di azione più ampio.

Anche le trasmissioni WiFi operano nella banda dei 2,4 Ghz e nuovi moduli che rapidamente hanno riscontrato successo, sono i circuiti ESP32 e il più recente ESP8266 <<http://www.espressif.com>>. Sono molto economici, dispongono di un PIN digitale e di un PIN ADC a 10 bit e possono costituire il cuore di smart sensor o fungere da modem di trasmissione dati per i microcontrollori a cui vengono collegati. Grazie alla trasmissione WiFi si collegano alla rete internet tramite un router WiFi.

Nodemcu <<http://www.nodemcu.com>> è una scheda open source basata sul modulo ESP8266 (come anche le proprietaria Wemos <<http://www.wemos.cc>> e SparkFun ESP8266 Thing <<http://www.sparkfun.com>>) disponibili anche in versioni clonate al costo inferiore a €4.

Va ricordato che la trasmissione WiFi è più esosa di energia rispetto ad altri metodi di trasmissione ma i moduli ESP8266 in modalità *deep sleep*, negli intervalli in cui non

devono trasmettere o misurare, secondo le specifiche del produttore, riducono il consumo a circa 20 μ A assicurando una lunga durata delle batterie.

In prove effettuate con un amperometro, la scheda Nodemcu ha mostrato un consumo di circa 1 mA. Nel computo dei consumi, infatti si devono considerare anche i circuiti di supporto come il regolatore di tensione e l'interfaccia USB che anche se non utilizzati mantengono il loro consumo di corrente.



Figura 7.3. Nodemcu

7.3. Moduli GSM / GPRS, 3G / 4G

Qualora non sia disponibile una connessione di rete via cavo, condizione che rappresenta quasi sempre la normalità nelle condizioni di campo, per la connessione periodica alla rete internet è possibile utilizzare la rete di telefonia mobile GSM / GPRS o 3G/4G qualora la copertura di rete sia disponibile.

Moduli a basso costo che permettono sia la comunicazione GSM che il collegamento a indirizzi di client http sono i moduli SIM800 e il più recente SIM900 <<http://www.sim.com>>. Comunicano con la maggior parte dei microcontrollori attraverso la porta seriale (PIN Rx, Tx) a cui il microcontrollore invia comandi di tipo AT, un codice studiato negli anni '70 per i modem telefonici.

Il consumo di energia durante la connessione mobile non è irrisorio e richiede un alimentatore con corrente di picco di 2 Ampere ma anche in questi moduli è possibile attivare la modalità *sleep*; la scheda SIM900 in questo modalità consuma 1 mA.

Anche la scheda A6 <<https://www.ai-thinker.com>> è molto facile da utilizzare e utilizza i comandi AT trasferiti in modalità seriale ed è anche più economica della SIM900 ma non consente la connessione a client http.

Schede dotate dei moduli SIM900 pronti per la connessione sono reperibili attualmente a €8 a cui va aggiunto il costo della *sim card* e della connessione al gestore telefonico.

Un'altra opportunità per inserire nelle reti di sensori un gateway di rete telefonica è data da i modem 3G/4G indipendenti. Questi piccoli apparecchi non necessitano di connessione diretta ad un computer o al cavo di rete ethernet; si connettono automaticamente alla rete telefonica mobile e consentono il collegamento WiFi tramite ssid (il nome che identifica la rete WiFi) e una password preimpostati. Alcuni sono dotati di una batteria ricaricabile propria. Attualmente con meno di €30 è possibile acquistare un modem indipendente per la connessione alla rete telefonica 3G.



Figura 7. 4. Modulo SIM900A

7.4. Moduli GPS, GLONASS, Beidou, Galileo

Se si ritiene di dover trasferire su una mappa i dati forniti dalla rete di sensori per successive elaborazioni GIS (geographic information system) è necessario georeferenziare i sensori dopo l'installazione in campo.

La georeferenziazione consiste nell'attribuire ad una informazione la relativa posizione geografica in un sistema geodetico di riferimento.

I moduli adibiti a questo scopo vengono captano i segnali radio inviati dalle costellazioni dei satelliti GPS (USA), GLONASS (Russia) e Beidou (Cina); entro pochi mesi dovrebbe divenire operativa anche la costellazione di satelliti europea Galileo che già si trova in orbita. Ciascun satellite è dotato di un orologi atomico sincronizzato con gli altri satelliti e la posizione viene calcolata basandosi sulla differenza di millisecondi che intercorre tra la ricezione a terra dei segnali dei diversi satelliti.

Sono ora parte integrante di dispositivi mobili come strumenti per la navigazione, *smartphone*, antifurti satellitari, droni e veicoli a controllo remoto, e molti altri ma

esistono anche moduli interlacciabili ai microcontrollori di cui si è accennato in questo studio.

Con meno di €20 si può acquistare un modulo dotato del circuito NEO-M8 <<https://www.u-blox.com>>, predisposto anche per i satelliti Galileo che si ritiene debbano restringere l'errore a pochi centimetri.

7.5. Cloud

La tecnologia *cloud* (= nuvola in inglese) è un sistema di salvataggio e scambio dati in tempo reale tra un server internet e dispositivi informatici come PC, smartphone, fotocamere digitali, ecc. Recentemente, dedicati ai sensori installati nei contesti più disparati, si stanno sviluppando appositi servizi che in tempo reale mostrano agli utenti o al pubblico statistiche, report e grafici secondo le configurazioni preimpostate.

Questo tipo di servizio, definito IoT (acronimo dell'inglese internet of things) viene offerto anche in modo gratuito, seppur con alcune limitazioni, con i relativi codici di configurazione che non sempre sono facilmente fruibili al primo approccio. La veloce evoluzione del settore e la concorrenza tra i vari operatori sicuramente porterà, nel prossimo futuro, innovazioni importanti riguardo facilità d'uso e l'adattabilità a processori dalle risorse limitate.

Diverso è il discorso per Raspberry Pi o simili single board computer che possono salvare i dati in una cartella della propria memoria, sincronizzarla con uno dei cloud già da tempo affermati per la offerta gratuita, a scopo personale o di ricerca, di memoria nel cloud come Dropbox <<https://www.dropbox.com>>, Google drive <<https://www.google.com/drive>>, Mega <<https://www.mega.nz>>, ecc.

Questa tecnologia è relativamente recente ma nonostante stia riscuotendo un grande successo si ritiene che la sua diffusione non sia ancora proporzionale alle possibilità che offre.

Le prove che sono state svolte durante questa indagine sui servizi più versatili per una rete di sensori in campo agricolo sono confluite sul servizio offerto da ThingSpeak <<https://thingspeak.com>> che con pochi passaggi ha consentito di stoccare dati e visualizzare grafici inviati da un modulo Nodemcu.

Capitolo 8. Prototipo di una rete di sensori a basso costo per il rilevamento dell'umidità del suolo, della temperatura dell'aria e della temperatura del suolo a due profondità in un vigneto in pendenza

Una rete di sensori è costituita da sensori elettronici spazialmente distribuiti corredati con dispositivi in grado di parametrizzare e digitalizzare condizioni ambientali (nodi della rete), utilizzare il dato a livello locale o trasferirlo ad altro nodo. Tra i nodi della rete possono esserci nodi che elaborano le informazioni, che applicano disposizioni desunte a seguito dell'elaborazione (attuatori), nodi che accumulano dati per successive elaborazioni o applicazioni, nodi che trasferiscono dati ad altre reti o internet (gateway). La struttura appena definita è soltanto indicativa, in quanto le funzionalità dei nodi spesso si integrano tra loro in modo molto variabile seguendo le esigenze delle tecnologie che offrono continuamente funzionalità e capacità inaspettate poco tempo prima. Solo per fare un esempio, una delle novità neanche tanto recente, è l'utilizzo di nodi di accumulo, scambio dati o gateway posizionati su dispositivi mobili dotati di guida autonoma via terra o aviotrasportati che periodicamente si posizionano nei vari punti di scambio dati.

Lo scambio dei segnali tra i nodi può avvenire via cavo o via etere (wireless) tramite svariati protocolli di trasmissione adatti alle attrezzature utilizzate.

Al fine di approfondire le conoscenze riguardanti le dinamiche dei movimenti dell'aria e le relazioni tra temperatura dell'aria e del suolo a diverse profondità in condizioni di giacitura non ideale, si è ritenuto opportuno impostare un prototipo di rete sensori da installare in un vigneto allevato con forma di allevamento a cordone libero GDC dal sesto di impianto di metri 4x1,2 in un terreno con pendenza del 10%.

Lo scopo principale del prototipo di rete è quello di portare alla luce i punti critici ai vari livelli del flusso di dati, valutarne in campo e l'opportunità di espansione e la possibilità di applicare i risultati a modelli di sviluppo della coltura e delle avversità:

- verifica delle necessità per garantire veloce e duratura installazione compatibilmente alle condizioni di campo e alle caratteristiche dei sensori;
- corretto funzionamento dei sensori come affidabilità, durata, precisione;
- salvataggio dei dati in supporti di memoria flash;

- trasmissione dei dati al gateway;
- salvataggio dei dati nel cloud predisposto;
- procedure di validazione dei dati ottenuti;
- procedure di elaborazione dei dati e gli algoritmi di calcolo automatizzati;
- restituzione automatizzata di report, grafici e strumenti di controllo speditivo dei dati;
- restituzione automatizzata di informazioni derivate dall'applicazione dei dati a modelli di sviluppo fenologico, fitopatologico, bilancio idrico e altre informazioni utili alla conduzione del vigneto.

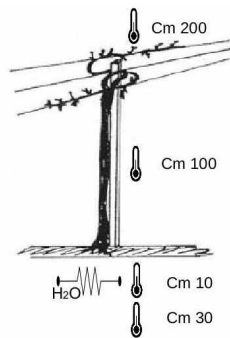


Figura 8.1. Schema di posizionamento dei sensori

La rete è costituita, come da figura 15.1 dai seguenti elementi:

- nove nodi di sensori disposti in file di tre lungo la linea di pendenza a distanza di 20 metri composte da tre nodi posti a distanza di 10 metri lungo la linea di livello.
- un nodo di ripresa immagini costituito da Raspberry Pi B3+ con Pi Camera V2 con sensore RGB da 8 Megapixel, batteria e pannello solare da 20 Watt;
- modem 3G con SIM dati alimentato da una batteria tampone e un pannello solare da 10 Watt;
- Cloud ThingSpeak per il salvataggio dati;
- Personal computer per verifica ed elaborazione dati, invio elaborati.
- scatola elettrica stagna, sostegni, ecc.

Il singolo nodo di sensori è costituito da:

- microcontrollore e trasmettitore WiFi Nodemcu;
- due sensori a tenuta stagna DS18B20 per la misurazione della temperatura inseriti nel terreno alla profondità di 10 e 30 cm;
- due sensori a tenuta stagna DS18B20 con schermatura solare per la misurazione della temperatura dell'aria ad un metro e due metri di altezza;
- sensore resistivo autocostruito dell'umidità del suolo;
- batteria al litio;
- scatola elettrica stagna, sostegni, ecc.

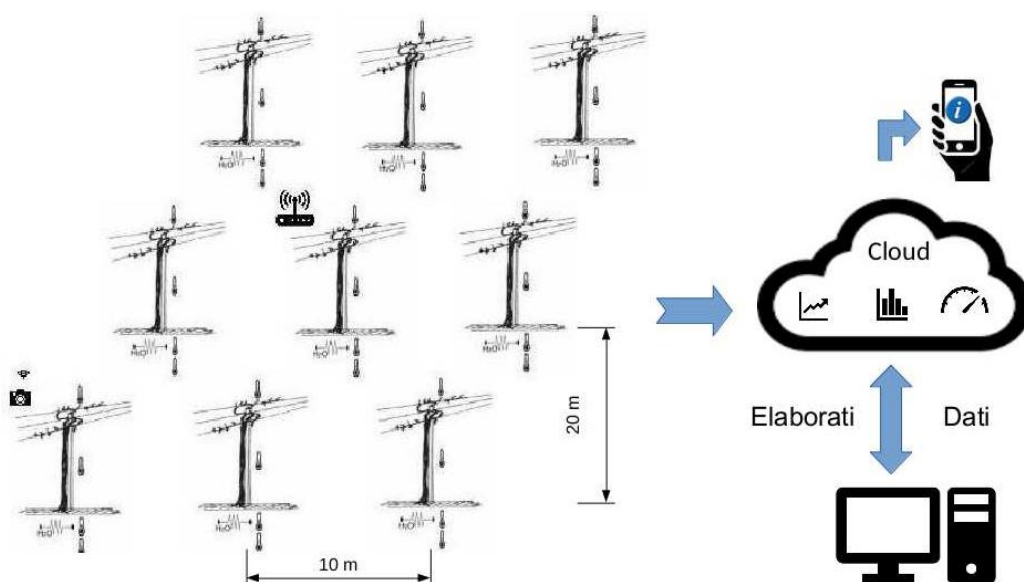


Figura 8.2. Schema dei nodi e flusso dati della rete di sensori

I nodi di misurazione, per risparmiare energia della batteria, passerà alla modalità sleep tra le diverse misurazioni che avverranno indicativamente a 10 minuti di distanza e inviate immediatamente al cloud.

Il nodo di ripresa delle immagini verrà programmato per scattare giornalmente 3 fotografie al vigneto a distanza di 20 minuti intorno al mezzogiorno. La cartella

contenuta nella memoria SD della scheda Raspberry, configurata per archiviare le immagini, verrà sincronizzata con la cartella omologa per il salvataggio dati nel cloud ThingSpeak.

Si riporta di seguito lo sketch che verrà caricato nella scheda Nodemcu del nodo di misurazione per il rilievo dei dati e la memorizzazione nel cloud e una tabella riepilogativa dei costi dei singoli nodi (Tab. 5.1):

```
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
OneWire ds18x20[] = { 3, 7 };
const int oneWireCount = sizeof(ds18x20)/sizeof(OneWire);
DallasTemperature sensor[oneWireCount];
float temperature;

#include <ESP8266WiFi.h>
String apiKey = "APIkey fornito dal server"; // inserisci API key
//const char *ssid = "wifi id"; // inserire wifi ssid
//const char *pass = "chiave wpa Wifi"; // inserire chiave wpa
const char* server = "api.thingspeak.com";
WiFiClient client;
int resistenza=0; //per lettura con A0

void setup() {
  Serial.begin(115200); delay(10);
  Serial.println("Connecting to "); Serial.println(ssid);
  WiFi.begin(ssid, pass);
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    delay(500); Serial.print(".");
  }
  Serial.println(""); Serial.println("WiFi connected");
  DeviceAddress deviceAddress; //indirizzi ds18b20
  for (int i = 0; i < oneWireCount; i++) {
```

```

    sensor[i].setOneWire(&ds18x20[i]);
    sensor[i].begin();
    if (sensor[i].getAddress(deviceAddress, 0)) sensor[i].setResolution(deviceAddress, 12);
        } //fine loop for
    } //fine void setup
void loop() {
    Serial.print("Requesting temperatures...");
    for (int i = 0; i < oneWireCount; i++) { //4 sensori i da 0 a 3
        sensor[i].requestTemperatures();    }
    if (client.connect(server,80)) // "184.106.153.149" or api.thingspeak.com
        {String postStr = apiKey;
            temperature = sensor[0].getTempCByIndex(0);
            postStr += "&field1="; postStr += String(temperature);
            temperature = sensor[1].getTempCByIndex(0);
            postStr += "&field2="; postStr += String(temperature);
            temperature = sensor[2].getTempCByIndex(0);
            postStr += "&field3="; postStr += String(temperature);
            temperature = sensor[3].getTempCByIndex(0);
            postStr += "&field4="; postStr += String(temperature);
            postStr += "\r\n\r\n";
            client.print("POST /update HTTP/1.1\n");
            client.print("Host: api.thingspeak.com\n");
            client.print("Connection: close\n");
            client.print("X-THINGSPEAKAPIKEY: "+apiKey+"\n");
            client.print("Content-Type: application/x-www-form-urlencoded\n");
            client.print("Content-Length: ");
            client.print(postStr.length());
            client.print("\n\n");
            client.print(postStr);
            Serial.print("analog: ");Serial.print(resistenza);
            Serial.println(" Send to Thingspeak.");
        }
}

```



```

    } // fine if
    client.stop();
    Serial.println("Waiting...");
    // thingspeak needs minimum 15 sec delay between updates, i've set it to 30 seconds
    } // fine void loop

```

Nodo di misurazione	€	Nodo di ripresa immagini	€	Nodo 3G	€
Nodemcu	4,00	Raspberry pi 3 B+	36,00	modem	30
DS18B20 x 4	6,00	Pi Camera V 2	24,00	batteria	10
schermo solare x 2	45,00	batteria 12V/7Ah	20,00	sim dati (costo annuo)	60
sensore resistivo	5,00	pannello solare 20W	25,00	pannello solare 10W	10
scatola stagna	5,00	regolatore di carica	15,00	scatola stagna	10
batteria al Litio 3 Ah	7,00	scatola stagna	10,00	sostegni	10
materiale di consumo	5,00	sostegni	20,00		
		materiale di consumo	5,00		
Totale	77,00	Totale	155,00	Totale	130,00

Tabella 8.1. Schema riepilogativi dei costi dei diversi nodi della rete

Capitolo 9. Conclusioni

L'opportunità del basso costo è stata innescata da tecnologie relativamente recenti iniziate con lo sviluppo di microcontrollori economici e versatili unitamente alle piattaforme web per la condivisione delle conoscenze e lo scambio di dati. Le informazioni hanno rapidamente avuto una grande diffusione e si sono prospettate ampie possibilità di utilizzo nei settori più svariati.

Le prove di funzionamento e affidabilità dei sensori a basso costo e le prove di programmazione e collegamento tra sensori, microcontrollori e cloud internet sono risultati molto incoraggianti e lasciano prospettare interessanti applicazioni. Queste tecnologie, applicabili a diversi aspetti della conduzione agraria, forestale e ambientale, possono fornire preziosi strumenti per la gestione sostenibile delle risorse ambientali, anche per aziende con limitate risorse destinate all'innovazione tecnologica.

Nell'ambito della ricerca, il basso costo delle apparecchiature, permette una moltiplicazione dei sensori anche in progetti di ricerca con budget limitati, amplia le possibilità di indagine sui parametri chiave dell'agroecosistema e lascia prospettare la possibilità di indagini approfondite sul miglioramento della modellizzazione degli stessi parametri.

Tuttavia, per applicazioni professionali è necessaria una sperimentazione che definisca chiaramente i limiti e le possibilità applicative dei vari componenti nelle diverse situazioni.

In particolare nel settore agricolo la bibliografia è spesso solo a livello amatoriale e non ha le connotazioni scientifiche per un immediato trasferimento alla realtà agricola professionale con le diverse esigenze adattabilità che le varie situazioni ambientali e colturali implicano.

Le prove effettuate con microcamere a basso costo, hanno dimostrato che è possibile il monitoraggio della crescita e dello sviluppo della vegetazione in una coltivazione di lattuga con risultati paragonabili a costose apparecchiature commerciali. Prospettive di ricerca interessanti si aprono per strumenti di questo tipo in altri ambiti agrari o forestali.

Anche le prove in corso con sensori dell'umidità del suolo a basso costo stanno dando risultati incoraggianti.

10. Bibliografia

- Allen R. G., Pereira L. S., Raes D., Smith M., 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 1998.
- Baiyr R., Albayrak A., 2016. The monitoring of nectar flow period of honey bees using wireless sensor networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2016, 12, 11, 1-8.
- Basso B, Cammarano D., De Vita P., 2004. Remotely sensed vegetation indexes: theory and applications for crop management. *Rivista Italiana di Agrometeorologia*, 2004, 1: 36-53.
- Buehler G., Cobos D. S., Campbell C. S., Campbell G. S., 2007. Using an RC Circuit Model to Determine Soil/Water Content. *AGU Fall Meeting Abstracts*, 2007.
- Bussotti F., Kalaji M. H., Desotgiu R., Pollastrini M., Łoboda T., Bosa K., 2012. Misurare la vitalità delle piante per mezzo della fluorescenza della clorofilla. University Press Firenze 2012.
- Chanzy A., Gaudu J., Marloie O., 2017. Correcting the Temperature Influence on Soil Capacitance Sensors Using Diurnal Temperature and Water Content Cycles. *Sensors* 2012, 12, 9773-9790.
- De Franceschi M., Zardi D., 2008. The physics of frost phenomena in a mountain environment. Results from experimental campaign of the gepri project. *Italian Journal of Agrometeorology* 45 - 51 (3) 2008.
- Di Baccio D., Minnocci A., Sebastiani L., Carraro V., Grani F., Anfodillo T., Tognetti R., 2012. Sap flow measurements for the evaluation of poplar clone performance in remediation of soil polluted with olive mill wastewater. *VIII International symposium on sap flow*, 2012.
- Di Gennaro S. F., Matese A., Mancin M., Primicerio J., Palliotti., 2014. An open-source and low-cost monitoring for precision enology. *Sensors*, 2014, 14, 23388-23397.

- Islam T., Rico-Ramirez M. A., Han D., Srivastava P. K., 2012. A Joss – Waldvogel disdrometer derived rainfall estimation study by collocated tipping bucket and rapid response rain gauges. *Atmospheric science letters*, 2012, 13, 139-150.
- Jinru X., Baofeng S., 2017. Significant Remote Sensing Vegetation Indices: A Review of Developments and Applications. *Journal of sensors*, may 2017: 1-17.
- Lewis A., Peltier W.R., von Schneidemesser E., 2018. Low-cost sensors for the measurement of atmospheric composition: overview of topic and future applications. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization (WMO), 2018.
- Li Y., Chen D., Walker C.N., Angus J.F., 2010. Estimating the nitrogen status of crops using a digital camera. *Field Crops Research* 2010, 118:221-227.
- Lukina E. V., Freeman K. W., Wynn K. J., Thomaso W. E., Mullen R. W., Stone M. L., Solie J. B., Klatt A. R., Johnson G. V., Elliott R. L., Raun W. R., 2001. Nitrogen fertilization optimization algorithm based in-season estimates of yield and plant nitrogen uptake. *Journal of plant nutrition*, 2001, 24, 6: 885-898.
- Miner G. L., Ham J. M., Kluitenberg G. J., 2017. A heat-pulse method for measuring sap flow in corn and sunflower using 3D-printed sensor bodies and low-cost electronics. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 246, 86-97.
- Muraoka H., Noda H. M., Nagai S., Motohka T., Saitoh T. M., Nasahara K. N., Nobuko Saigusa N., 2013. Spectral vegetation indices as the indicator of canopy photosynthetic productivity in a deciduous broadleaf forest. *Journal of Plant Ecology* 2013, 6, 5: 393-407.
- Motohka T, Nasahara KN, Oguma H, Tsuchida S., 2010. Applicability of green-red vegetation index for remote sensing of vegetation phenology. *Remote Sensing*, 2010, 2: 2369–2387.
- Niangoran N. U., Buso D., Canale L., Cissé T. H., Tian F., Zissis G., 2017. *Spirulina platensis* biomass estimation using reflectance signal and infragram technology. *Journal of Algal Biomass Utilization*, 2017, 8 4: 69-76.
- Nijland W., de Jong R., de Jong S.M., Wulder M.A., Bater C.W., Coops N.C., 2014. Monitoring plant condition and phenology using infrared sensitive consumer grade digital cameras. *Agricultural and Forest Meteorology*, 184: 98-106.

- Petach A. R., Toomey M., Aubrecht D. M., Richardson A. D. 2014. Monitoring vegetation phenology using an infrared-enabled security camera. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, 195–196: 143 – 51.
- Ponti M. P., 2013. Segmentation of low-cost remote sensing images combining vegetation indices and mean-shift. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013 10 (1): 67-70.
- Rossi R., Pollice A., Diago M., Oliveira M., Millan B., Bitella G., Amato M., Tardaguila J, 2013. Using an Automatic Resistivity Profiler Soil Sensor On-The-Go in Precision Viticulture. *Sensors*, 2013, 13, 1121-1136.
- Rouse, J.W.J., Haas, R.H., Deering, D.W., Schell, J.A., Harlan, J.C., 1974. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. NASA/GSFC Type III Final Report. NASA/GSFC, Greenbelt, MD, USA, p. 371.
- Sajith Variyar V.V., Haridas N., Aswathy C., Soman K.P. (2016) Pi Doctor: A Low Cost Aquaponics Plant Health Monitoring System Using Infragram Technology and Raspberry Pi. In: Suresh L., Panigrahi B. (eds) *Proceedings of the International Conference on Soft Computing Systems. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 397. Springer, New Delhi.
- Sanna F., Roggero G., Deboli R., Merlone A. 2013. Metrology for meteorology in agriculture sites. *Atti XVI convegno AIAM, Firenze 4-6 giugno 2013* pp. 31-32.
- Toller G., Biasi A., Corradini S., 2012. Uso della piattaforma Arduino per il monitoraggio dello stato idrico delle colture. *Atti del XVII convegno AIAM, Palermo, 2012*, 47-48.
- Vega F. A., Ramirez F. C., Saiz M. P., Rośua F. O., 2015. Multi-temporal imaging using an unmanned aerial vehicle for monitoring a sunflower crop. *Biosystems Engineering*, 2015, 132: 19–27.
- Whitmarsh J., Govindjee 1999. Concepts in Photobiology: Photosynthesis and Photomorphogenesis", Edited by GS Singhal, G Renger, SK Sopory, K-D Irrgang and Govindjee, Narosa Publishers/New Delhi; and Kluwer Academic/Dordrecht, pp. 11-51.