

Politecnico di Milano

Facoltà di Ingegneria dell'Informazione

Dipartimento di Elettronica e Informazione



SISTEMA DI MONITORAGGIO MICROCLIMATICO SENZA FILI E DI RIDOTTE DIMENSIONI

Relatore: Prof. Franco Zappa

Correlatori: Dr. Ing. Gianluca Pizzocolo

Dott.ssa Cinzia Maria Mancuso

Tesi di Laurea Specialistica di:

Vinicio LUPO

Matricola 745638

Ingegneria Elettronica

Anno Accademico 2011-2012

Indice

PREMESSA - ABSTRACT.....	6
1. Il Monitoraggio microclimatico	8
1. Introduzione	8
Il deterioramento delle opere d'arte	10
La scelta dei parametri ambientali	14
2. Le specifiche del sistema di monitoraggio microclimatico	15
3. La Soluzione delle Sensor Area Network.....	17
Strutture delle Wireless Sensor Network.....	19
Impiego delle Wireless Sensor Network	20
Gli obiettivi di una WSN	22
4. Gli obiettivi del progetto	25
5. Il Sistema completo.	31
6. I parametri ambientali a la loro misura.....	34
La temperatura e la sua misura	34
L'umidità e la sua misurazione.	39
2. Il dispositivo di acquisizione dati - MiCe	43
Introduzione	43
1. Principi di progettazione low-power	45
Power-plot.....	47
Sistemi Low-Power a Microcontrollore.....	50
Le fasi di progetto.....	51
Scelta del microcontrollore	52
Scelta delle batteria.....	54

Scelta del sensore	57
2. Blocco di misurazione dell'umidità	59
Dimensionamento	65
Algoritmo implementato	66
Validazione dei dati	69
3. Blocco di misurazione della temperatura	70
Circuito realizzato	70
Dimensionamento del circuito	72
Campionamento e filtraggio.....	79
Gestione della batteria	81
4. Validazione del funzionamento.....	82
5. Calibrazione	86
6. La comunicazione radio.....	91
Il brevetto	91
Implementazione dell'algoritmo	96
7. Il Firmware.....	98
8. Stima della durata della batteria	101
9. Il progetto e realizzazione hardware.....	106
3. Il Gateway - CaT.....	110
1. Le problematiche della rete	110
2. Descrizione del sistema	111
3. Il firmware	112
Gestione dei sensori associati	114
4. Implementazione hardware	114
4. House.....	117

1. Specifiche e Funzioni	117
2. Il Software.....	120
5. Conclusioni	123
6. Bibliografia.....	125

Indice delle tabelle

Tabella 1 Classificazione delle cause e degli effetti degli agenti deterioranti.	14
Tabella 2 Tabella di confronto usata per la scelta della batteria	56
Tabella 3 Caratteristiche del sensore utilizzato HCT01	58
Tabella 4 Tabella riassuntiva del dimensionamento per il circuito realizzato	65
Tabella 5 Relazione tra le resistenze utilizzate per la taratura, la temperatura e i valori letti..	87
Tabella 6 Tabella dei consumi al variare della velocità di trasferimento.....	94
Tabella 7 Tabella di confronto del sistema con i sistemi di trasmissione tradizionali	95
Tabella 8 Tempo di esecuzione delle varie operazioni.....	99
Tabella 9 Dati delle varie operazioni di consumi e periferiche attive.....	103
Tabella 10 Corrente assorbita nelle varie fasi dell'applicazione	104

Indice dei grafici

Grafico 1 Relazione tra la tensione in uscita e la temperatura letta dal sensore	73
Grafico 2 Relazione tra temperatura e valore dell'ADC	75
Grafico 3 Power plot di un intero ciclo dell'applicazione.....	101
Grafico 4 Power plot delle operazioni eseguite	102

Indice delle Figure

Figura 1 Tipologie di strutture delle WSN	19
Figura 2a Sistema ELTEK-Domodry.....	28
Figura 2b Sistema LAMBDA	29
Figura 3 Sistema MUSA	29
Figura 4 Rappresentazione del sistema completo e dei vari elementi	33
Figura 5 Diagramma rappresentativo del sistema e delle sue funzioni	33

Figura 6 Risposta lineare della capacità del sensore al variare dell'umidità relativa	41
Figura 7 Blocchi fondamentali del sistema MiCe	43
Figura 8 Esempio di Power Plot.....	47
Figura 9 Divisione funzionale del firmware.....	47
Figura 10 Differenti tecniche per la misurazione dei consumi.....	49
Figura 11 Tabella di confronto MCU a 8-bit Microchip e Texas Instruments	52
Figura 12 Caratteristica di scarica della batteria CR2032.....	56
Figura 13 Caratteristica della Capacità al variare del carico della batteria CR2032	56
Figura 14 Curve di caratterizzazione del Trasduttore HCT01.....	58
Figura 15 Schema di principio per la tecnica di conversione in frequenza.....	59
Figura 16 Circuito Astabile per la conversione in frequenza.....	60
Figura 17 Rete RC per la conversione nel tempo (SX), Andamento temporale in uscita (DX)...	60
Figura 18 Schema esemplificativo per la misurazione a ponte.....	61
Figura 19 Schema esemplificativo per la misura di carica	62
Figura 20 Circuito utilizzato per la tecnica del Capacimetro a Carica	63
Figura 21 Algoritmo implementato	67
Figura 22 Circuito di Test per la misurazione dell'umidità	69
Figura 23 Catena di misura	70
Figura 24 Circuiti di condizionamento per termoresistenza	70
Figura 25 Circuito di condizionamento realizzato	71
Figura 26 Circuito completo per la conversione temperatura-tensione.....	76
Figura 27 Contributi di rumore nel circuito di misurazione della temperatura.....	77
Figura 28 Andamento temporale della tensione ai capi del trasduttore all'attivazione del transistor	78
Figura 29 Caratteristica tensione durata della batteria al variare della temperatura.....	81
Figura 30 Software per la validazione del funzionamento - campionamento a parametri costanti	84
Figura 31 Software - visualizzazione del variare dei parametri ambientali	85
Figura 32 Particolare dei PAD del sensore del PCB realizzato.....	88
Figura 33 Variabilità dell'umidità relativa rispetto alla temperatura.....	89

Figura 34 Rappresentazione degli impulsi successivi nel tempo	91
Figura 35 Schema a blocchi del sistema di trasmissione brevettato	92
Figura 36 Forme d'onda nei vari punti del circuito trasmettitore.....	93
Figura 37 Impulso di potenza e i parametri che lo caratterizzano.....	93
Figura 38 Schema circuitale del sistema MiCe	107
Figura 39 Primo progetto di layout realizzato per il dispositivo MiCe.....	109
Figura 40 Prototipo di layout per il dispositivo MiCe.....	109
Figura 41 Rappresentazione schematica della rete	110
Figura 42 Schema circuitale del gateway- CaT	115
Figura 43 Layout del circuito stampato del Gateway.....	116
Figura 44 Struttura dati utilizzata per le informazioni del sensore.....	120
Figura 45 Software – visualizzazione della gestione del sistema	121
Figura 46 Software - la visualizzazione dei dati rilevati dai sensori	122

PREMESSA - ABSTRACT

Da sempre l'uomo ha sentito il bisogno di perpetuare la propria memoria attraverso l'arte con sculture, manufatti, dipinti etc. A partire dal XX secolo, la necessità di salvaguardare questo enorme patrimonio che testimonia la storia e la creatività umana è diventata di primaria importanza. Con il passare degli anni e con l'avvento di tecnologie sempre più evolute, nuove tecniche e metodologie si sono usate per prolungare la vita di questo patrimonio culturale. Insieme alle azioni di restauro, sempre più attenzione viene oggi data alle azioni di prevenzione e rallentamento dell'inevitabile degrado, per cui si cerca di creare le condizioni ambientali che meglio rispondano a queste istanze. In quest'ottica, i sistemi di monitoraggio microclimatico rappresentano uno degli strumenti più efficaci per il controllo delle condizioni ottimali alla conservazione delle opere e per la pianificazione delle azioni correttive. Attualmente in commercio esistono diversi sistemi di monitoraggio microclimatico per applicazioni museali, ma nessuno risponde in modo ottimale a tutte le esigenze che conservatori e professionisti del settore indicano: oltre, infatti, alla necessità di avere una misurazione dei parametri ambientali, questi richiedono la possibilità di avere sistemi privi di cablaggio, di dimensioni estremamente compatte, riposizionabili con semplicità e con manutenzione ridotta. Tutti i sistemi attualmente in commercio riescono a rispondere solo parzialmente a queste esigenze, per cui, pur presentando caratteristiche di affidabilità e di trasmissione via etere, mancano di una delle esigenze più sentite che è quella della riduzione delle dimensioni, accompagnata da un'estrema facilità nella configurazione ed espansione del sistema. L'obiettivo di questa tesi è stato l'ideazione, la progettazione e la realizzazione di un sistema di monitoraggio microclimatico museale che supplisse a questa carenza, per cui si è progettato un dispositivo che, oltre all'affidabilità nella registrazione dei parametri, avesse ridotte dimensioni, caratteristiche di versatilità e flessibilità e manutenzione contenuta.

Il lavoro si è articolato in varie fasi: partendo dallo studio delle necessità applicative, delineate in stretto contatto con conservatori e personale tecnico di alcuni musei che presentavano per struttura e problematiche dei casi-simbolo del panorama nazionale, si è poi andati a definire l'architettura generale del progetto, la definizione dei componenti, tenendo in considerazione le prestazioni, ma anche il costo in modo da implementare un dispositivo che anche dal punto

di vista commerciale fosse competitivo. Lo studio di recenti ricerche sulle *Wireless Sensor Network* (W.S.N.) ha aiutato a delineare le caratteristiche che questo sistema e gli elementi che lo compongono dovessero avere. Il sistema è stato strutturato in tre elementi fondamentali: sensori che si occupassero del campionamento dei parametri, elementi di interfaccia dei sensori con una rete di comunicazione, e un centro di raccolta dati e gestione dell'intero sistema. In particolar modo il lavoro si è concentrato sull'elemento più critico del sistema rappresentato dal sensore. Questo elemento, per avere le caratteristiche di flessibilità e versatilità necessarie, richiedeva minor vincoli meccanici possibili. La risposta scontata dell'integrazione di un sistema di trasmissione dati via etere non ha implicato soluzioni progettuali altrettanto scontate. Le più comuni tecniche di comunicazioni wireless, infatti, presuppongono un consumo energetico non trascurabile e quindi un ingombro dovuto alle batterie non adatto a gli obiettivi del progetto. Un'ulteriore conseguenza dell'impossibilità di usare batterie particolarmente ingombranti è stata l'inquadramento dell'intero progetto hardware nell'abito delle applicazioni *low-power*, ovvero la progettazione dei circuiti destinati alla misurazione dei parametri è stata fatta tenendo sempre l'aspetto del risparmio energetico come uno degli obiettivi di primaria importanza.

Il lavoro svolto in questi ultimi dieci mesi presso IPSES ha interessato tutti gli aspetti che possono riguardare la progettazione di un sistema complesso come quello in oggetto. Difatti, si è partiti dallo studio delle necessità del committente e della varie soluzioni progettuali passando per la sperimentazione e la verifica delle scelte compiute per arrivare fino ad affrontare problemi più strettamente legati alla produzione del sistema e messa sul mercato come la calibrazione e il *testing* finale. Seguire direttamente l'intero processo dalla progettazione del circuito fino alla realizzazione su circuito stampato e di un primo prototipo, ha permesso di affrontare problematiche di carattere tecnico non ancora incontrate, con una conseguente crescita professionale. E' risultata, un'esperienza particolarmente stimolante per chi è alla conclusione di un percorso di studi di impronta apparentemente più teorica che ha permesso di affiancare allo studio teorico e applicativo, anche tutti gli aspetti implementativi del lavoro di progettazione elettronica.

1. Il Monitoraggio microclimatico

1. Introduzione

Museo, dal latino *museum*, dal greco *museion*: luogo sacro alle muse, figlie di Zeus e Mnemosine, la madre della memoria del creato.

Il museo: "...un'istituzione permanente, senza scopo di lucro, al servizio della società e del suo sviluppo. E' aperto al pubblico e compie ricerche che riguardano le testimonianze materiali e immateriali dell'umanità e del suo ambiente; le acquisisce, le conserva, le comunica e, soprattutto, le espone a fini di studio, educazione e diletto"

Oggi il museo può essere definito un laboratorio della memoria e uno strumento per la diffusione della conoscenza, ma oltre a questi aspetti di fondo si è verificato un complesso arricchimento nel concetto e nelle finalità dell'istituzione. Il museo, infatti, ha assunto la sua fisionomia attuale sulla scorta del dibattito che, a partire dal secondo dopoguerra ha portato a una profonda revisione del concetto di bene culturale e di patrimonio artistico, a seguito del diffuso uso sociale e didattico di tale patrimonio e dello sviluppo della nozione di redditività del prodotto culturale in termini anche di strategie economiche. Al tradizionale ruolo di raccolta, catalogazione ed esposizione di un insieme di oggetti, si sostituisce una struttura flessibile nella quale la funzione tradizionale si integra con quella di conservazione, di ricerca e didattica consentendo diversificati e selezionati livelli d'accesso alle informazioni ed alla conoscenza e che contribuisce a trasformare il museo da oggetto a soggetto attivo di processi culturali e progetti d'intervento: il museo contemporaneo si configura come momento operativo e di sedimentazione di cultura materiale sul territorio. L'apertura verso attività di conservazione, di ricerca e di studio che ha prodotto tematiche tipologiche polivalenti, è probabilmente l'evento più singolare e innovativo in campo museale.

Queste finalità modificano l'organizzazione spaziale e funzionale e l'ordinamento scientifico del museo, arricchendolo di strutture e attrezzature che oggi ne formano il cuore e il supporto indispensabile.

Una delle problematiche più rilevanti della struttura museo, intesa come luogo di conservazione e di ricerca dei beni in esso contenuti è che molto spesso ospitato in edifici sorti originariamente per uso diverso. Se si considera soltanto la situazione italiana a noi più vicina, molti edifici sede di museo sono anteriori al XII secolo, e tantissimi realizzati tra XII e XVI e tra XVII XIX secolo.

Per di più, spesso il palazzo storico, sede museale è inserito in un più vasto contesto urbano con problematiche specifiche che influiscono sulla struttura stessa del museo e sulla conservazione che questo può garantire. Si pensi, per esempio, emblematicamente, all'impatto del traffico e del conseguente inquinamento, sulle struttura stessa.

Da queste brevi premesse si intuisce che l'allestimento di un museo sia per quanto concerne gli spazi espositivi, sia per quelli destinati al restauro, allo studio e alla gestione del patrimonio deve tenere conto di una doppia serie di problematiche, la prima legata alla struttura che deve essere adattata al nuovo scopo per cui non è stata concepita, la seconda più intimamente legata alle opere conservate nella struttura stessa. Queste problematiche sono tra loro intimamente interconnesse per cui, in base alla situazione ambientale, dovuta sia al luogo-museo, sia al contesto in cui questo è inserito (spazio urbano, agenti inquinanti, temperatura e umidità ambientali) influenzerà la scelta di dove e come esporre le opere o addirittura la scelta di conservare l'opera in spazi non aperti al pubblico. Se infatti consideriamo l'opera quale "testimonianza materiale" del cammino di crescita civile e culturale dell'uomo, la prima e più importante istanza a cui si è chiamati a rispondere è la sua conservazione in condizioni ottimali in modo da rallentare quanto più possibile il suo inarrestabile deterioramento: i metalli si corrodono, i pigmenti si alterano, carta, legno e tessili sono soggetti ad aggressioni di funghi, batteri e insetti. A questo si aggiunge che, le opere d'arte sono, dal punto di vista materiale, estremamente eterogenee per cui, le problematiche di deterioramento dei diversi materiali che le compongono non si sommeranno semplicemente ma, dalla loro interazione, dipendono a catena tutta una serie di degradi.

Come nell'uomo, se un organo è malato, così anche il resto dell'organismo è compromesso, allo stesso modo in un'opera se una parte subisce più di altre gli effetti del decadimento, anche le altre accelerano il proprio disfacimento.

Il luogo in cui le opere devono essere conservate deve tener conto perciò di molteplici fattori al fine di garantire quanto più possibile le condizioni idonee alla loro salvaguardia. In questo processo il monitoraggio dei principali fattori di degrado riveste un ruolo di primaria importanza a cui sempre più le istituzioni preposte rivolgono le loro attenzioni. Se si considera, inoltre, che molto spesso al loro interno i musei ospitano collezioni estremamente eterogenee che necessitano di parametri ambientali diversi, si evince come questo monitoraggio debba essere capillare e flessibile.

Il deterioramento delle opere d'arte

Molteplici sono i fattori che, da soli, ma più spesso in concomitanza, annullano i processi di deterioramento delle opere d'arte. I più comuni sono dati dall'azione antropica, dagli effetti fotochimici della luce, dagli attacchi biologici, dall'azione dei Sali e delle variazioni di temperatura e umidità. In particolare, sbalzi termoigrometrici costituiscono di per sé un importante elemento di degrado; si pensi per esempio ai movimenti di contrazione e dilatazione che possono causare ai materiali igroscopici come legno o carta. Questi fattori giocano un ruolo determinante anche nello stabilizzarsi di altre cause di deterioramento. Se si considera ad esempio l'attacco che funghi, licheni e muffe possono arrecare alle opere, è chiaro che questi possono proliferare solo in determinate condizioni di temperatura e umidità. Così come per le persone, sono stati studiati anche per gli oggetti di interesse storico-artistico le condizioni di benessere, ovvero gli intervalli di valori di temperatura e umidità relativa all'interno dei quali si garantisce loro una corretta conservazione e quindi una vita più lunga. Il raggiungimento e la persistenza di valori di temperatura e umidità relativa diversi da quelli che rientrano nell'intervallo di conservazione per il particolare materiale o per il singolo oggetto producono danni sul lungo periodo. Inoltre, va sottolineato, che brusche variazioni o fluttuazioni termo-igrometriche di breve periodo, dell'ordine di giorni se non di ore, inducono alterazioni spesso irreversibili e che il rischio maggiore per la conservazione deriva proprio dai gradienti spaziali e temporali di tali parametri. Essendo continuo nel tempo lo scambio di

temperatura e quantità d'acqua di qualsiasi oggetto con l'ambiente esterno, è soprattutto l'entità e la velocità di questo scambio ad accentuare processi di deterioramento¹.

Rimandando la scelta dei campi di benessere alle norme ¹ si riassumono brevemente alcuni principi fondamentali di carattere generale che mettono in relazione il degrado con i parametri termo-igrometrici² anche se questi dipenderanno specificatamente dal tipo di materiale:

- Le basse temperature dell'aria di per se stesse non sono dannose per gli oggetti, mentre le alte possono esserlo in quanto favoriscono i processi degenerativi di carattere chimico;
- La fluttuazione nel tempo della temperatura dell'aria a contatto con l'oggetto induce in quest'ultimo uno stress termico, provocando dilatazioni e contrazioni; chiaramente, l'entità del danno dipende dalla natura del materiale e dalla sua eterogeneità;
- L'umidità relativa influenza le variazioni di dimensione e di forma degli oggetti ed i processi chimici e biologici. In particolare:
 - Tutti i materiali organici in grado di assorbire acqua, quali il legno, l'avorio, il cuoio, la carta e i collanti si gonfiano quando l'umidità relativa cresce e si restringono quando essa diminuisce, con conseguenti variazioni di peso, deformazioni, rotture di fibre, crepe e fessurazioni;
 - Valori dell'umidità relativa maggiori del 45% favoriscono diverse reazioni chimiche, tra cui la corrosione dei metalli, lo scolorimento delle tinture su cotone, lino, lana, seta e l'indebolimento delle fibre organiche (tessili e carta), soprattutto se in presenza di luce;
 - Valori di umidità relativa superiori al 65%, con valori di temperatura superiori a 20°C, favoriscono lo svilupparsi di muffe ed accelerano i cicli vitali di numerosi e dannosi insetti.

Dalla tabella 1 (1), nella quale sono riportate alcune categorie di materiali e/o oggetti raggruppate per classi di sensibilità ai parametri termoigrometrici, si evince che il fattore più

¹ Norma UNI, 1999

² (Aghemo et al., 1997)

importante, ai fini del degrado, è l'umidità relativa. In realtà, molto spesso risulta difficile distinguere il degrado dovuto alla temperatura da quello dovuto all'umidità relativa, in quanto tra i due parametri esiste una stretta sinergia nella determinazione del danno; in ogni caso, è da sottolineare che l'entità dei danni indotti da ciascun parametro o dalla combinazione di essi dipende soprattutto dalla natura dei materiali, dalla geometria dell'oggetto, dal tempo di esposizione, dalla magnitudo del fattore di danno (concentrazione del contaminante o scostamento dai valori ottimali per umidità e temperatura) e dal tipo di meccanismi di deterioramento.

E' possibile suddividere i meccanismi di deterioramento in:

- meccanismi di tipo fisico (es. variazioni di dimensioni e forma degli oggetti);
- meccanismi di tipo chimico (es. reazioni chimiche);
- meccanismi di tipo biologico (es. proliferazione di microrganismi).

Minaccia	Sorgente	Danno	Cause frequenti	Azione preventiva
Umidità relativa	umidità relativa troppo alta o troppo bassa	muffe - corrosione - infragilimento	Cambiamento meteorologico e climatica	Effettuare un monitoraggio termoisolometrico
			Presenza infiltrazioni d'acqua	Spostare collezioni in ambienti più idonei, sistemi di controllo passivo e attivo dell'umidità
	Rapide variazioni di umidità relativa	Fessurazione Raggrinzimento Deformazione Formazioni incrostazioni saline	Ventilazione inadeguata, pulizia e umido, tinteggiatura pareti interne	Migliorare la ventilazione
			Umidità proveniente dal suolo presenza condensa superficiali	Intervenire sull'involucro edilizio
Temperatura	temperatura elevata o bassa	Aumento del degrado Infragilimento	Riscaldamento o controllo e regolazione della temperatura inadeguati	Effettuare un monitoraggio microclimatico, migliorare sistemi di regolazione e controllo della temperatura
			Cambiamenti climatici	
	rapide variazioni di temperatura	Fessurazione raggrinzimento	illuminazione	Installazione di un sistema di illuminazione a bassa dissipazione di energia
			Isolamento insufficiente dell'edificio	Migliorare isolamento
Luce	Luce intensa Luce ultravioletto	Fading Decolorazione Infragilimento distruzione	Regolazione insufficiente del riscaldamento	Migliorare il controllo dell'impianto di condizionamento/riscaldamento
			Luce naturale e artificiali non regolata, posizione oggetti errata, mancanza di filtri e tendaggi	Controllo dell'intensità luminosa, installazione filtri e tendaggi, riduzione illuminazione dell'area espositiva, limitare tempo di esposizione
Infestazioni	Uccelli	Imbrattamento oggetti, deterioramento dovuto a deiezioni	Fori e passaggi nell'involucro	Manutenzione dell'involucro
	Roditori	Oggetti rosi o divorati	Materiali attrattivi o sorgenti di cibo	Trappole
	Insetti	Oggetti imbrattati, rosi danneggiati in superficie e nella struttura	Pulizia insufficiente	Isolamento degli oggetti
	Muffe	Danneggiamento superficiale e da infiltrazioni	Umidità relativa elevate	Eliminazione sorgenti di umidità, isolamento dalla luce.
	Funghi	Danneggiamento superficiale		
Inquinanti	Aeriformi, acidi particolati, sporco, polvere	Degrado dei materiali, Formazioni di croste e	Prossimità alle strade	Pulizia adeguata, monitoraggio ambientale
			Mancanza filtraggio aria	Utilizzo di apparecchi di filtraggio aria
			Cattiva manutenzione edificio	Curare manutenzione
			Utilizzo di prodotti chimici per pulizia e disinfestazione non presenti in ambiente	Utilizzo materiali appropriati
	Materiali utilizzati per depositi e gli elementi di esposizione	Corrosione Decolorazione Danneggiamento fisico		Scelta accurata dei materiali
Disastri	Inondazioni	Ruggine Dissolvimento inchiostri Deformazioni/Impregnazione Disintegrazione	Inondazioni esterne, perdite di tubature infiltrazioni dal tetto	Curare la manutenzione
	Incendi	Incenerimento/ Bruciature Deposito chimico	Guasti elettrici, fulmini cause accidentali a non	Impianti antincendio e di sicurezza

	Terremoti	Danni strutturali Vibrazioni Rotture		Interventi antisismici
Personale	Personale intruso	Rotture Abrasioni Furti	Manipolazione non necessarie e non corrette	Monitoraggio microclimatico
Visitatori		Aumento di: temperatura Inquinanti Grado igrometrico Rotture Furti		Gestione e ottimizzazione dell'afflusso degli accessi e percorsi di visita, Monitoraggio microclimatico

Tabella 1 Classificazione delle cause e degli effetti degli agenti deterioranti.

E chiaro che la tabella (1) risulta solo indicativa in quanto non è evidenziato il fatto che ogni opera d'arte subisce danni differenti in base alla tecnica di realizzazione della stessa a ai materiali utilizzati.

La scelta dei parametri ambientali

Avendo riassunte quali sono i parametri che causano il deterioramento analizziamo quali sono le scelte ottimali per la conservazione dal punto di vista ambientali.

L'Ambito VI, "Gestione delle collezioni", del D.M. 10.5.2001 prescrive gli intervalli di valori dei parametri ambientali per la conservazione di diverse categorie di opere esposte, indicando:

- I valori termoigrometrici di riferimento per assicurare le condizioni ottimali di conservazione dei manufatti
- I valori limite raccomandati della concentrazione degli inquinanti aerodisperso
- I valori limite degli inquinanti biologici atmosferici
- I vincoli conservativi relativi all'esposizione a fonti luminose
- I controlli fotometrici raccomandati
- L'uniformità di illuminamento
- L'esposizione energetica nelle componenti di dose di luce annuale e di componente UV e radianza totale
- Gli orientamenti gestionali di natura illuminotecnica – sistemi di esposizione temporizzati
- Il controllo della luce naturale

Dall'esame dei dati emerge una considerazione: da anni molti ricercatori che si occupano del monitoraggio di edifici storici e museali, ma il problema di come analizzare i dati raccolti è da

sempre oggetto di discussioni. La questione più dibattuta è quella della definizione dei cosiddetti “valori ottimali” delle condizioni ambientali che dovrebbero essere garantite negli ambienti dedicati alla conservazione delle opere d’arte. L’utilizzo di analisi scientifiche per lo studio delle opere d’arte sia dal punto di vista della determinazione dei materiali che la compongono, sia dal loro degrado e delle sue cause, si sta diffondendo in maniera capillare solo da pochi decenni. Uno dei problemi che più spesso si incontra nel settore è la mancanza di dialogo, sinergie e cooperazione tra le diverse figure professionali, storici dell’arte e personale tecnico-scientifico che operano nel settore, anche se si tratta di un campo di studi in rapida evoluzione. Le tabelle “classiche” utilizzate spesso nei musei sono perciò perlopiù basate sull’esperienza empirica del curatore, che sebbene preziosa e indispensabile, va necessariamente integrata con dati scientifici relativi all’analisi dell’opera stessa. Deversi sono i centri di eccellenza nel settore dove le analisi scientifiche hanno un ruolo di primaria importanza nella gestione del patrimonio museale. Si pensi per esempio alla National Gallery di Londra, alla National Gallery of Art di Washington, al Louvre o al nostro Istituto Superiore di Conservazione e Restauro, solo per citarne alcuni dei più importanti. Grazie al lavoro di questi centri di eccellenza abbiamo a disposizione dati e risultati di ricerche che ci aiutano a definire meglio gli strumenti necessari a questo scopo.

2. Le specifiche del sistema di monitoraggio microclimatico

Lo sviluppo delle analisi scientifiche sta quindi modificando in maniera sensibili il tipo di approccio alla conservazione e allo studio delle opere d’arte. D’altro canto, la rapida evoluzione delle metodologie scientifiche sta cambiando la comprensione delle diverse dinamiche del degrado e fornisce strumenti sempre più precisi nel settore. Se la necessità del monitoraggio microclimatico è ormai un dato acquisito nell’ottica delle condizioni ideali alla conservazione, spesso gli strumenti che vengono predisposti allo scopo sono stati concepiti per altri impieghi e riadattati all’utilizzo tenendo solo in parte conto dei bisogni del museo, in quanto struttura dinamica e in continua evoluzione. Tuttavia la limitatezza di fondi che da sempre il settore della conservazione artistica subisce riduce la possibilità che vengano avviati studi e ricerche per applicativi concepiti appositamente per questo scopo. Possiamo

riassumere quelle che sono le necessità che lo studio della situazione attuale del monitoraggio microclimatico e l'interazione con enti coinvolti attivamente nel campo ha prodotto:

- Eliminazione o limitazione quanto più possibile dei cablaggi: in presenza di edifici storici che non presentano predisposizioni ad impianto elettrico e che non possono essere modificati strutturalmente o parzialmente adattati al passaggio di cavi di alimentazione o comunicazione.
- Avere una struttura flessibile, cioè che permetta una dislocazione più o meno capillare a seconda delle necessità. Una struttura che permetta l'adattamento a opere che non sono inamovibili. Sempre più spesso infatti nei musei vengono fatte rotazioni delle esposizioni del patrimonio, o ci si ritrova in presenza di mostre tematiche e/o semipermanenti con prestiti o raggruppamenti che variano nel tempo per approfondire tematiche differenti. I dispositivi che effettuano il monitoraggio devono essere spostabili e riconfigurabili in maniera differente.
- Controllo e elaborazione dei dati, al fine di permettere al curatore di avere traccia dell'evoluzione temporale dei dati acquisiti e di impostare per ogni singola opera d'arte soglie di allarme quando i valori superano determinati limiti e le che variazioni siano troppo brusche.
- Una manutenzione ridotta. Al fine di permettere ai responsabili del sistema di non preoccuparsi dell'efficacia del sistema stesso e che questa venga garantita da interventi programmatici a lungo termine.
- La presenza del sistema nell'ambiente espositivo non deve compromettere la fruizione del servizio fornito dalla mostra. Gli elementi che compongono il sistema devono quindi poter essere posizionati in modo da non essere visti dal visitatore o quantomeno devono avere l'impatto visivo più ridotto possibile.

In quest'ottica un sistema di monitoraggio che venga concepito e studiato ex novo e ottimizzato per rispondere alle suddette esigenze trova risposta tecnica nelle comunicazioni via etere e pertanto si va a configurare in quelle applicazioni che nel campo dell'elettronica vengono considerate Sensor Area Network.

3. La Soluzione delle Sensor Area Network

La massiccia diffusione di computer portatili, cellulari, palmari, navigatori, sistemi radio di identificazione e più in generale, di tutti i dispositivi elettronici “intelligenti” ha reso la tecnologia ed i computer parte della quotidianità. Questo sviluppo è stato favorito anche dai prezzi sempre più contenuti e dall’inarrestabile processo di miniaturizzazione dei componenti elettronici. Occorre inoltre aggiungere che lo sviluppo di protocolli e sistemi di telecomunicazione wireless hanno consentito di creare architetture di comunicazione a costi contenuti, raggiungere luoghi impervi e slegare il concetto di terminale da quello di posizione fisica, introducendo così nelle reti la mobilità.

In questa prospettiva le reti wireless di sensori, o Wireless Sensor Network (WSN), possono essere considerate come l’ultima fase del processo di miniaturizzazione e di diffusione pervasiva, quasi integrata con l’ambiente circostante, dei dispositivi elettronici. Una WSN può essere brevemente descritta come una rete costituita da un insieme di sensori distribuiti nell’ambiente e che comunicano tra loro allo scopo di rilevare, condividere ed elaborare i dati acquisiti dall’ambiente fisico. Tipicamente queste reti sono costituite da un certo numero di elementi in grado di comunicare tra loro, detti nodi, aventi dimensioni estremamente ridotte e un costo contenuto. Un nodo di una sensor network funziona solitamente grazie ad una batteria ed è dotato di un numero variabile di sensori e, eventualmente, attuatori. Una rete di questo tipo può contenere dalle decine alle migliaia di nodi che comunicano tra loro senza fili e che sono in grado di auto-organizzarsi e collaborare per elaborare o trasmettere le informazioni da un capo all’altro del sistema. L’obiettivo primario di ogni nodo è comunque quello di inviare i propri dati verso un centro di raccolta interno alla Wireless Sensor Network detto gateway: quest’ultimo ha il compito di fungere da ponte tra la rete di sensori ed il sistema di raccolta ed elaborazione dati, inoltrando tutti i dati pervenuti attraverso un canale di comunicazione differente quali Wi-Fi, GPRS o Ethernet.

Le reti di sensori, a differenza delle più diffuse reti Wi-Fi utilizzate per l’accesso dei terminali ad una rete locale, sono programmate per svolgere un compito preciso e specifico. I fenomeni monitorati da una WSN (2) possono essere di tipo strettamente ambientale, come

l'andamento nel tempo di temperature, umidità o quantità di illuminazione, anche se non è da escludere l'impiego di una rete di sensori con funzioni di controllo su apparecchiature industriali o per la sorveglianza remota. Sebbene i possibili campi di applicazione siano innumerevoli, le Wireless Sensor Network non sono ad oggi ancora molto diffuse. I problemi da affrontare sono infatti molteplici e riguardano la limitata capacità di banda, l'inaffidabilità della comunicazione via radio, la durata limitata delle batterie a bordo dei dispositivi e la necessità di disporre di una rete in grado di tollerare guasti e riorganizzarsi autonomamente. In particolar modo, dal momento che tutti gli aspetti di una rete di sensori sono fortemente dipendenti dalle specifiche esigenze degli utilizzatori e dai parametri ambientali monitorati, non esistono standard e protocolli in grado di funzionare adeguatamente in ogni condizione. Il protocollo oggi più accreditato per divenire lo standard nelle reti wireless di sensori è IEEE 802.15.4 (3) insieme al suo successore 802.15.4a basato sulla tecnologia Ultra Wide Band (UWB) (4). Se però il livello fisico proposto è stato adottato da molti produttori, la ricerca nell'ambito dei meccanismi di accesso al canale MAC (Media Access Control) è invece ancora attiva e sono state proposte numerose soluzioni alternative. Esistono inoltre alcuni protocolli "concorrenti", sviluppati in particolar modo da aziende private o ristretti consorzi, che potrebbero trovare applicazione in particolari nicchie di mercato. Per quanto concerne i livelli superiori, il panorama è decisamente variegato e non ancora consolidato. Da un lato infatti le specifiche dello standard ZigBee, pur offrendo garanzie di interoperabilità tra i diversi costruttori e costi contenuti, possono risultare eccessivamente complesse e difficilmente integrabili in una rete IP esistente. D'altra parte lo standard 6LoWPAN, così come altri protocolli più semplici sviluppati ad hoc, risolve alcuni dei problemi di ZigBee ma ha una diffusione ancora limitata. Lo stesso discorso vale anche dal punto di vista applicativo: TinyOS e Contiki sono i sistemi oggi più diffusi a livello universitario, ma lo sviluppo di software, middleware e ambienti di simulazione dedicati è ad uno stadio embrionale e non sono ancora disponibili prodotti maturi. Per quanto riguarda infine le piattaforme hardware per le WSN oggi disponibili, il panorama è piuttosto variegato anche se, per lo più, si tratta di prototipi sviluppati da centri di ricerca o spin-off universitarie.

Strutture delle Wireless Sensor Network

Una rete di sensori può essere realizzata in tre differenti topologie (5), dove con il termine topologia si indica la modalità in cui i diversi dispositivi della rete vengono disposti e, in particolare, i collegamenti fisici e logici che li interconnettono. Nelle reti wireless esistono tre principali strutture, illustrate in Figura 1 : stella (star), mesh e albero (tree).

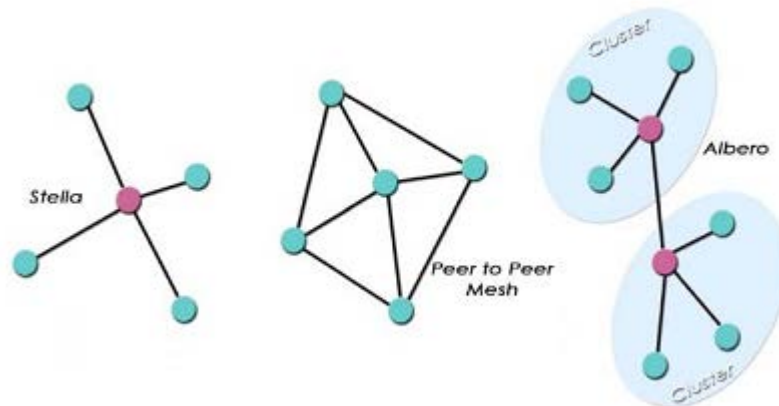


Figura 1 Tipologie di strutture delle WSN

La topologia di rete a stella prevede che un unico nodo si comporti da coordinatore e gli altri nodi sono connessi direttamente al coordinatore tramite uno link di comunicazione uno-ad-uno. La struttura a mesh è formata da nodi sensori interconnessi tra loro attraverso uno o più link. Questa rete può essere chiamata anche a maglia. In questa struttura è necessario definire chiare regole di routing per lo scambio di messaggi tra i vari nodi.

Può esistere anche un coordinatore e trovarsi al di fuori della struttura mesh. In questo caso sarà collegato ad uno solo dei nodi ed avrà funzioni di controllo limitate. Se non esiste un coordinatore tutti i nodi avranno funzioni di coordinamento e raccolta dati in modo paritetico. Infine, la struttura ad albero è una topologia di rete che combina la struttura a stella e quella a mesh. Più nodi, che fanno capo ad un unico nodo, formano un gruppo chiamato cluster. I nodi-coordinatori possono a loro volta far riferimento ad un nodo coordinatore di livello superiore e costruendo, così, vari livelli di gerarchia.

Impiego delle Wireless Sensor Network

Le reti di sensori fanno parte di un'area di studio molto attiva dal punto di vista dell'innovazione tecnologica; grazie alle loro potenzialità riescono ad essere impiegate in molti campi. Per l'analisi delle varie applicazioni, una prima suddivisione può essere fatta in base alla finalità della rete. Di seguito si riportano quattro macro-settori in cui è possibile dividere il mondo delle WSN.

- **Monitoraggio:** questo tipo di rete viene utilizzata per tracciare in maniera continuativa una certa grandezza. La sorgente da monitorare può essere un singolo sensore o una sottorete da cui proviene un aggregato di dati. Una rete di questo genere può richiedere un campionamento solitamente isocrono e fisso con un consumo energetico considerevole come nel caso del monitoraggio strutturale. Oppure non avere richieste stringenti sul campionamento ma piuttosto sul salvaguardare la durata dell'applicazione e quindi i consumi.
- **Riconoscimento di eventi.** Un altro importante scenario applicativo risulta essere l'event detection: la rete deve accorgersi di situazioni di 'allarme', ossia di quando una determinata grandezza esce dai livelli stabiliti. Questo monitoraggio è potenzialmente meno pesante del precedente a livello energetico, in quanto il nodo entra in uno stato attivo solo in casi eccezionali.
- **Classificazione di oggetti.** L'obiettivo di queste reti è il riconoscimento di alcune grandezze tra un insieme di prototipi noti. Questo implica un carico computazionale superiore agli altri tipi di rete.
- **Tracciamento di oggetti** In questo caso la rete funge da sistema di sorveglianza, riconoscendo e stimando la posizione di alcuni oggetti in una determinata area geografica.

Oltre a questa prima suddivisione si possono descrivere i vari scenari in cui le WSN sono presenti. Inizialmente le Sensor Network erano adoperate solo in contesti particolari come la rilevazione di radiazioni, tracciamento di obiettivi e sorveglianza militare, rilevazione di dati biomedici, monitoraggio di un'area e rilevazione di attività sismiche. Più recentemente,

l'attenzione è stata rivolta verso reti di sensori biologici e chimici per applicazioni di sicurezza nazionale, nonché verso lo sviluppo di soluzioni commerciali alla portata di molti.

Viene di seguito presentato un elenco dei settori dove vengono tipicamente impiegate le Wireless Sensor Network.

- **Monitoraggio ambientale** (Environmental and habitat monitoring): in campo ambientale le applicazioni possono essere molteplici: è possibile monitorare movimenti di animali oppure studiare particolari habitat, come il mare, il terreno o l'aria impiegando, ad esempio, sistemi di monitoraggio di agenti inquinanti. Appartengono a questo settore anche lo studio di eventi naturali catastrofici quali incendi, tornado, terremoti ed eruzioni vulcaniche.
- **Monitoraggio di strutture** (Structural Health Monitoring): le reti di sensori posizionate sulle strutture rilevano lo stato di salute di edifici, ponti, case sottoposte a sollecitazioni esterne; in alternativa, potrebbero essere utilizzate anche per misurare difetti strutturali di componenti.
- **Controllo del traffico veicolare** (Traffic control): un sistema di sensori finalizzato al monitoraggio del traffico controlla il passaggio di automobili, analizza la velocità ed l'intensità del traffico ed individuando eventuali blocchi o situazioni anomale.
- **Sorveglianza di edifici** (Infrastructure control): questo tipo di reti può essere utilizzato come ausilio per la sorveglianza di centri commerciali o di luoghi a rischio, come stazioni ferroviarie o aeroporti.
- **Sorveglianza militare** (Military control): le reti di sensori sono state utilizzate in principio per questo scopo. Le loro applicazioni spaziando dal monitoraggio sullo stato o la posizione delle forze sul campo di battaglia alla sorveglianza di luoghi strategici. Possono inoltre essere dispiegate in luoghi ostili al fine di raccogliere informazioni sugli spostamenti del nemico.
- **Monitoraggio di apparecchiature industriali** (Industrial sensing): i sensori wireless possono essere applicati a macchinari industriali per analizzarne il comportamento dei componenti sottoposti a stress meccanico, migliorarne le performance o prevenire rotture e guasti.

- **Monitoraggio Agricolo** (Agriculture sensing): nel settore agricolo le reti WSN vengono utilizzate per il monitoraggio di particolari situazioni ambientali; in particolar modo la cosiddetta “agricoltura di precisione” utilizza le reti di sensori per rilevare in tempo reale il livello di pesticidi nell’acqua o nei terreni agricoli.
- **Applicazioni Personali** (Personal sensing): nel settore della domotica le reti di sensori riescono a fornire servizi all’utente all’interno della propria abitazione, ad esempio informandolo tempestivamente di eventuali guasti. I sensori possono essere introdotti negli apparecchi elettrici e questi, interagendo tra loro e con una rete esterna o Internet stesso, permettono all’utente di comandare facilmente gli elettrodomestici a distanza.
- **Applicazioni Mediche** (Personal Health Care): le reti wireless sono oggi impiegate anche per monitorare pazienti, eseguire valutazioni diagnostiche, amministrare farmaci in ospedale e monitorare a distanza dati fisiologici quali la frequenza cardiaca o la pressione sanguigna.

Gli obbiettivi di una WSN

Non è possibile creare un prototipo di WSN in grado di gestire tutte le applicazioni sopra elencate. Tuttavia, anche se ognuna di esse contempla problematiche particolari, molte saranno condivise. Tali sfide comuni si possono riassumere nelle seguenti caratteristiche:

Type of Service. Le WSN non sono delle reti tradizionali che si limitano a comunicare dei bit, bensì devono fornire informazioni utili o agire ad eventi particolari. Per questo motivo servono nuovi paradigmi, nuove interfacce utente e nuovi modi di pensare ai servizi della rete.

Quality of Service (QoS). I parametri QoS adottati tradizionalmente (come ritardo, banda minima e jitter), non servono se si stanno utilizzando software che tollerano i ritardi e se i nodi scambiano pochi pacchetti alla volta. Quindi, in alcuni casi basta ricevere qualche dato ogni tanto, mentre in altri i dati devono essere ricevuti tutti insieme oppure devono essere

scambiati entro un certo tempo. Cioè risulta critica la quantità e la qualità dei dati ricevuti da un nodo di raccolta di una certa area.

Tolleranza ai guasti. Un nodo potrebbe esaurire la batteria, subire danni fisici o perdere in qualunque altro modo il collegamento wireless con gli altri nodi (presenza di un ostacolo di disturbo non previsto tra i nodi). Una simile situazione non deve però danneggiare il resto della rete e un altro nodo dovrebbe possibilmente prendere il posto del nodo perso.

Lifetime. Nella maggior parte degli scenari, i nodi sono alimentati da batterie che non è possibile o non conviene sostituire. In ogni caso, l'obiettivo di una WSN è quello di rimanere attiva più a lungo possibile o, almeno, per la durata della sua missione. Quindi, il risparmio energetico assume un ruolo fondamentale in una Wireless Sensor Network. Anche nelle applicazioni in cui è previsto l'ausilio di un piccolo pannello solare per ricaricare la batteria dei nodi, il risparmio energetico rimane un fattore critico e in queste situazioni l'obiettivo è quello di mantenere la rete attiva per un tempo indeterminato. Tuttavia, l'implementazione di meccanismi di risparmio energetico richiede dei compromessi con la qualità del servizio: la soluzione è ovviamente quella di trovare un giusto bilanciamento tra le due caratteristiche. La definizione di lifetime non è univoca, nel senso che dipende dall'applicazione che si vuole misurare: a volte infatti si indica con lifetime il tempo entro il quale il primo nodo della rete finisce la propria energia (o comunque non funziona più); altre volte invece corrisponde al momento in cui il 50% dei nodi vengono persi; oppure indica la prima volta in cui una regione sotto controllo non è più monitorata da alcun nodo. Utilizzeremo in seguito il primo dei due concetti ovvero intenderemo per lifetime il tempo che intercorre tra la sostituzione della batteria di un nodo e la fine di funzionamento del nodo stesso.

Scalabilità. Una WSN può contenere fino a migliaia di nodi e la sua architettura deve essere in grado di supportarli tutti.

Densità di nodi non uniforme. In una rete di sensori possono esserci zone molto affollate (con molti nodi) e zone con pochissimi nodi sparsi. La densità dei nodi può variare nello spazio e nel tempo (ad esempio perchè i nodi finiscono la batteria) e la rete deve essere in grado di adattarsi a queste variazioni.

Programmabilità. I nodi devono essere in grado di poter cambiare i propri compiti in qualunque momento, ovvero devono poter essere riprogrammabili. A tal proposito, son molti gli studi relativi a reti che riescono a riprogrammarsi autonomamente senza dover programmare manualmente ogni singolo nodo.

Automantenimento. Dato che sia la WSN sia l'ambiente in cui si trova sono in continuo mutamento, la rete deve essere in grado di adattarsi, monitorando il proprio stato di salute, aggiornando i propri parametri, decidendo tra nuovi compromessi (ad esempio diminuendo la qualità del servizio quando l'energia sta per terminare).

4. Gli obiettivi del progetto

Nei musei sono generalmente previste opportune misure di prevenzione contro il rischio di furti, atti di vandalismo, incendi o eventi sismici. Per quanto riguarda, invece, il rischio di degrado connesso a non adeguate condizioni ambientali, si trovano spesso strumenti non specifici, antiquati o comunque poco adattabili ad una problematica così varia ed articolata.

Per definire in maniera adeguata e precisa quelle che sono le caratteristiche non solo funzionali ma anche tecniche del sistema da progettare si è partiti da quello che è definibile come 'case study' del Castello del Buonconsiglio di Trento. Infatti incontri con i conservatori e l'ufficio tecnico del castello hanno permesso di descrivere quella che è la situazione attuale delle esposizioni presenti e quali le esigenze specifiche per il sistema di monitoraggio microclimatico:

- Le mostre e le attività espositive avvengono su un'area molto vasta la cui pianta ha mostrato zone di visita dislocate in strutture complesse. Essendo il castello stesso un edificio storico non è possibile intervenire su infrastrutture come impianti elettrici apportando modifiche a muri o pareti.
- Le collezioni presenti sono ampie ed eterogenee questo determina la necessità di fissare soglie di allarme differenziate e specifiche per le opere. La presenza di mostre temporanee richiede al sistema una facile e veloce riconfigurabilità del sistema. La presenza di opere in teche e in ambienti aperti come corridoi esige un adattamento del sistema al posizionamento e una funzionalità anche in presenza di ostacoli.
- Uno studio delle risorse economiche del museo ha permesso di prevedere una pianificazione degli investimenti in maniera dilazionata nel tempo e quindi di considerare un sistema più economico inizialmente ma espandibile. Un'integrazione del sistema con i sistemi informatici già presenti e una manutenzione ridotta permette di ridurre i costi.
- La presenza di una gerarchia di personale su più livelli si è concretizzata nella richiesta di livelli di accesso al sistema differenziati. Ad esempio permettendo ai responsabili

delle esposizioni di modificare struttura e configurazione del sistema, mentre limitare la sola visualizzazione dei parametri al personale di sicurezza.

Questa necessità possono essere tramutate in caratteristiche generali che deve avere il sistema:

- **Adattamento all'ambiente:** come si è cercato di sottolineare in precedenza, l'ambiente museale, risulta tutt'altro che prevedibile e standardizzato, se si considera un castello medievale piuttosto che una struttura contemporanea ci si ritroverà davanti ad ambienti completamente diversi ai quali possono essere associati problemi differenti come ad esempio pareti molto spesse o ambienti che per struttura richiedono impianti di condizionamento molto aggressivi. Questo comporta la scelta di una tecnologia che possa integrarsi senza troppe difficoltà di installazione e riesca a superare un certo numero di ostacoli.
- **Riconfigurabilità:** le caratteristiche dinamiche che hanno assunto negli ultimi anni i musei nell'accogliere attività di vario genere e avere zone in rapido cambiamento come possono essere le mostre temporanee, richiedono un sistema che sia in grado di modificarsi e sia facilmente riconfigurabile in modo da seguire il monitoraggio delle opere nei loro movimenti.
- **Integrabilità/Basso impatto:** al fine di non perturbare il fine espositivo del museo e l'atmosfera, il sistema deve avere un impatto visivo più basso possibile, deve quindi avere dimensioni e peso più ridotti possibili.
- **Manutenibilità:** Il sistema per le caratteristiche può risultare molto complesso e delicato, un obiettivo sicuramente da perseguire è la facile manutenzione. Non deve costituire una spesa consistente e costante nel tempo.
- **Low power low cost:** Affinché il sistema prodotto sia concepito come prodotto vendibile sul mercato deve necessariamente realizzato minimizzando i costi in modo che sia il più competitivo e appetibile possibile. Inoltre le attuali tendenze di mercato e le esigenze di risparmio energetico unite a precedente punto di manutenibilità fanno sì che il basso consumo sia una linea guida fondamentale.

Come si evince queste esigenze di massima trovano un'eccellente risposta nella soluzione del "wireless sensor network". In questo lavoro di tesi ci si è preposti di ideare, progettare e realizzare un sistema che sia in grado di effettuare un monitoraggio costante e duraturo nel tempo dei parametri ambientali di ogni singola opera d'arte presente in ambiente museale o di esposizione in generale, dando la possibilità al curatore o all'ente responsabile di avere il controllo dei parametri ambientali dell'oggetto e di minimizzare l'effetto che l'alterazione di questi provoca; al contempo permettendo una gestione facile e dinamica nonché una manutenzione minimale del sistema stesso.

Sistemi attualmente sul mercato.

La situazione del mercato nel settore del monitoraggio microclimatico risulta molto poco delineata. In particolare, la mancanza di fondi comporta che le soluzioni siano poche e spesso riadattamenti di sistemi ideati per altri scopi. Sono, infatti, presenti diverse soluzioni per la sicurezza che talvolta integrano anche sensori di umidità e temperatura che ne permettono l'acquisizione. Di seguito riportiamo quelli che sono i principali sistemi wireless che risultano concorrenziali al prodotto sviluppato.

Sistema di Monitoraggio Microclimatico ELTEK – DOMODRY: E' un sistema monitoraggio microclimatico che si struttura con delle sonde/trasmittitori di dimensioni non proprio ridotte che comunicano i dati raccolti ad un ricevitore logger collegato ad un PC che elabora e visualizza i dati. L'azienda offre una serie di tipologie di sensori con range di misura e sensibilità differenti e strumenti di elaborazione e visualizzazione più o meno complessi. (6)

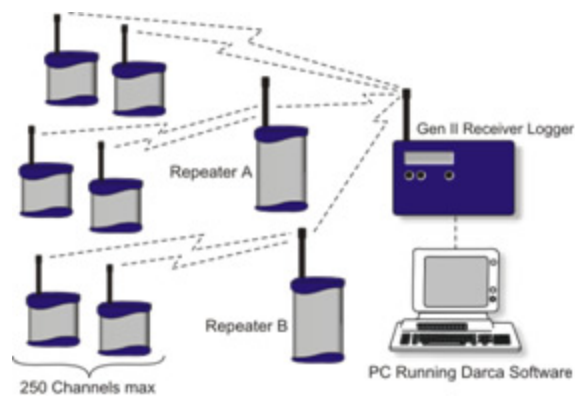


Figura 2a Sistema ELTEK-Domodry

National Instrument WSN solutions: National Instruments mette a disposizione una serie di strumenti di acquisizione e trasmissione dati configurabile in rete composto da nodi di misura gateway e software di elaborazione. Il sistema dispone di nodi di misura wireless con ingressi analogici generici o equipaggiati di termocoppie e termoresistenze, sono alimentati con 4 batterie di tipo AA e hanno una durata fino a tre anni. Le dimensioni dei sensori 42mm x 85mm x 123mm (7)

Microclimate monitoring – LAMBDAspa: L'azienda mette a disposizione due soluzioni differenti. Un sistema di monitoraggio controllabile via web che è costituito da dispositivi di dimensioni 175 x 113 x 30 mm con comunicazione wireless o GSM con sensori di temperatura, umidità relativa e luce. In alternativa fornisce dei dispositivi di logging dei parametri ambientali con lifetime di un anno e campionamento da 1 secondo a 18 ore che memorizzano i dati e sono trasferibili su PC via USB di dimensioni 45 x 60 x 20 mm. (8)



Figura 1b Sistema LAMBDA

Sistema MUSA: (9) Advanced Innovation propone un sistema di sorveglianza e sicurezza wireless costituito da dei sensori di dimensioni ridotte facilmente applicabili su ogni opera d'arte che comunicano con una stazione ricevente gestibile via Interfaccia RS485. Alcuni di questi sensori possono misurare anche umidità e temperatura. Il software che completa il sistema è ovviamente volto alla gestione dei parametri di sicurezza più che dei parametri ambientali.



Figura 2 Sistema MUSA

ELEDIALAB Security system: Il sistema di monitoraggio delle opere d'arte in ambito museale sviluppato da ELEDIALAB per il Museo di arte moderna e contemporanea di Trento e Rovereto è basato su una architettura di tipo Wireless Sensors Network (WSN) e sull'utilizzo di giroscopi mems. (10)

Analizzando i sistemi elencati ci si rende conto che i primi tre nascono come sistemi di monitoraggio e hanno buone prestazioni in termini di misura, sono invece fortemente limitati nelle applicazioni che richiedono dimensioni ridotte, e quindi non sono facilmente adattabili per esempio alla funzione di monitoraggio in teca o a ridosso dell'opera; non hanno peso ridotto, non sono applicabili su cornici e non hanno un impatto visivo trascurabile. Gli ultimi due sistemi invece non nascono come sistemi per il monitoraggio, ma come sistemi di sicurezza che integrano il rilevamento dell'umidità e della temperatura, non integrano il sistema di gestione ed elaborazione dei dati. In generale tutti questi sistemi non contemplano quella struttura riconfigurabile e flessibile e hanno un sistema software che non si integra con quello esistente ma piuttosto si affianca a quest'ultimo.

5. Il Sistema completo.

Definiti quelli che sono gli obiettivi e le funzioni del sistema procediamo ad una descrizione più dettagliata del sistema nel suo complesso, motivando come le varie esigenze e richieste hanno portato a specifiche ben precise. Dal monitoraggio costante nel tempo dei parametri ambientali di ogni singola opera d'arte scaturisce la necessità di associare univocamente un sensore. Viste le richieste di manutenibilità e riconfigurabilità se ne deduce che sensori differenti non possono che essere indipendenti. Da qui la necessità di avere moduli hardware differenti per ogni opera. Il modulo base del sistema deve perciò essere un elemento in grado di monitorare costantemente i parametri ambientali di ogni singola opera d'arte. Seguendo poi le caratteristiche di integrabilità nell'ambiente espositivo su ha che questo modulo deve essere caratterizzato da dimensioni e peso quanto più ridotti possibili, in modo da rendere il dispositivo adattabile alle più svariate esigenze di posizionamento, permettendo così l'occultamento dietro cornici o bordi decorativi. Come si è sottolineato in considerazioni precedenti è fondamentale che il modulo non abbia nessuna connessione cablata con il resto del sistema o con vincoli strutturali sia per quanto riguarda la comunicazione delle informazioni acquisite sia per l'alimentazione. Ne consegue che l'alimentazione del modulo deve essere necessariamente una batteria che abbia le dimensioni più ridotte possibili. Poiché la manutenzione del dispositivo deve richiedere il minor numero di interventi possibili da parte dell'operatore un aspetto che è stato tenuto sempre presente nelle scelte progettuali è il consumo. Ricapitolando quindi le caratteristiche del modulo che nel progetto prende il nome di MiCe:

- Misura di parametri ambientali: Temperatura e Umidità
- Dimensioni e Peso Ridotti
- Low Cost e Low Power
- Trasmissione dati via etere

Le caratteristiche sopra elencate sono una parte di quelle di un nodo di WSN. Il sistema quindi consta di una serie di elementi MiCe (Mote independent Climatic element) che raccolgono le informazioni climatiche di ogni opera che via etere vengono trasmesse al sistema di

elaborazione e gestione delle informazioni. In questo modo si ha una rete di sensori distribuiti su tutta l'area museale: Sensor Area Network. Per poter permettere al sistema di adattarsi alle più svariate esigenze in termini di struttura ospitante come una complessa dislocazione degli spazi espositivi che possono presentare ostacoli di vario genere si è scelto di implementare una struttura della rete di tipo ad albero dove i vari 'Cluster' raggruppano una o più sale del museo e zone differenti sono coperte da cluster differenti. Un 'Cluster' è composto sia di vari sensori che raccolgono i dati nell'area, sia del gateway chiamato 'CaT'(Controller Area Tranceiver). Il CaT ha la funzione di raggruppare e etichettare i dati dell'area e instradarli verso il sistema centrale 'House'. Nella prima fase il sistema 'CaT' sarà alimentato da rete quindi avrà il vincolo di posizione strettamente legato alla disponibilità del ambiente ospitante. Nelle versioni successive si prevede di eliminare questo limite. Inoltre dovrà garantire la ricezione dei dati provenienti da tutti i dispositivi Mice associati a quel gateway e assicurarsi che questi ultimi vengano recapitati al sistema House tramite la rete realizzati dagli altri CaT presenti sull'area o trasmetterli direttamente, se sufficientemente vicino, all'House stesso. Caratteristiche fondamentali del CaT è che i dispositivi associati possono variare in numero dinamicamente e che riconosce automaticamente un nuovo dispositivo associato. Questo permette la riconfigurabilità del sistema senza interventi sullo stesso. L'House, invece, è incaricato di ricevere i dati provenienti dalle varie zone e di organizzarli e visualizzarli in maniera da renderli facilmente fruibili dall'utente finale. Ovviamente per utente finale si intende quella persona o gruppo di persone quale curatore del museo o il personale dell'ufficio tecnico. Si è concepito a questo proposito un interfaccia utente user-friendly che permette al sistema di organizzare l'intera rete sensoriale e associare ad ogni sensore il manufatto ad esso adibito, posizione e stanza in cui è collocato. Quindi l'utente troverà le informazioni riguardanti ogni specifica opera d'arte ed impostare dei limiti di sicurezza per i parametri letti da ogni sensore sia in termini assoluti sia di variazioni temporali. House integra un sistema di allerta nel caso questi limiti vengano superati. Ovviamente man mano che questi dati vengono ricevuti vengono salvati su file e sarà possibile visualizzare lo storico degli andamenti dei parametri. Le varie funzioni del software non saranno accessibili a tutti indistintamente. Si è ideato il sistema a più livelli di accesso in modo da differenziare gruppi di utenti con responsabilità diverse, ad esempio curatori e

responsabili potranno modificare la struttura del sistema, associare nomi differenti ai vari sensori, attivare o modificare le soglie di allarme, mentre personale addetto alla sicurezza potrà unicamente visualizzare le informazioni relative ai parametri;

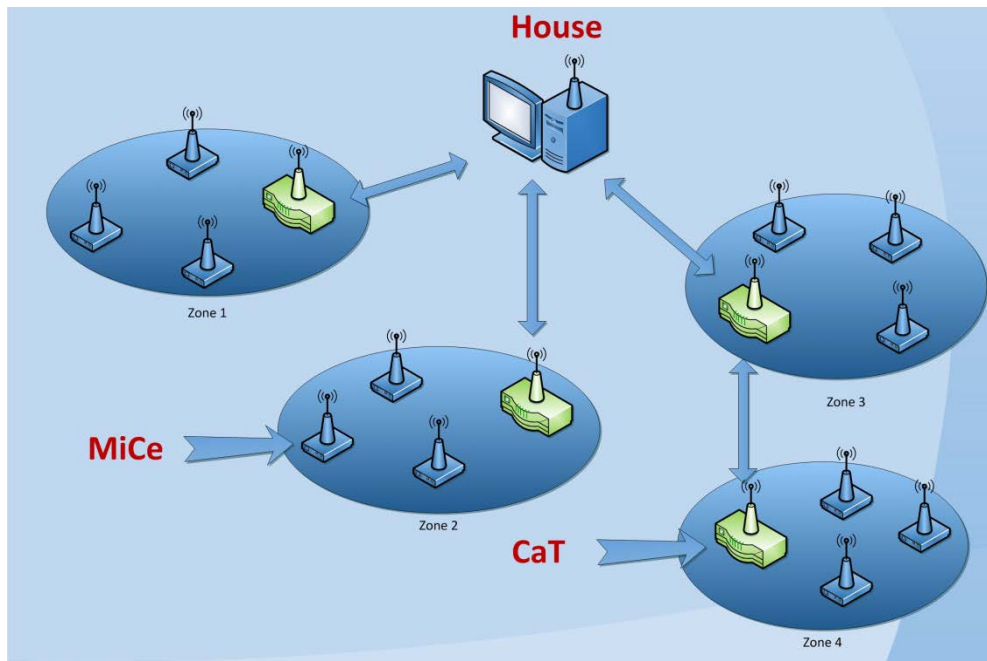


Figura 3 Rappresentazione del sistema completo e dei vari elementi

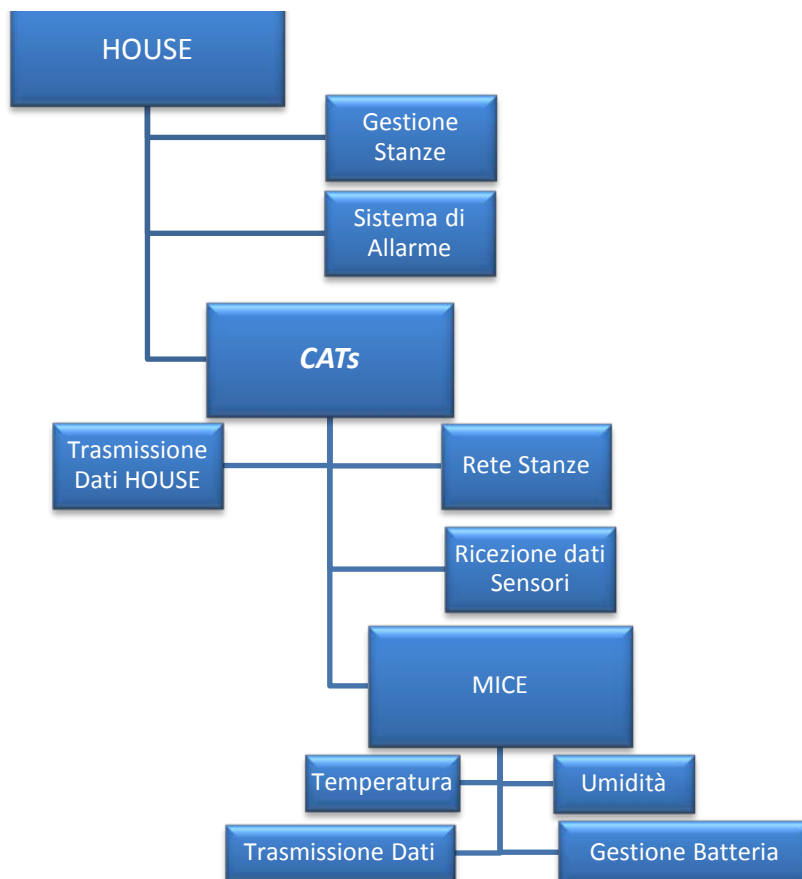


Figura 4 Diagramma rappresentativo del sistema e delle sue funzioni

6. I parametri ambientali a la loro misura

Come si è visto un corretto controllo dei parametri quali temperatura e umidità è uno strumento fondamentale per la valutazione delle condizioni ottimali per la conservazione delle opere artistiche. E pertanto è fondamentale alla progettazione di uno strumento che ne consenta la misurazione conoscere nel dettaglio le grandezze fisiche in gioco e le tecniche per effettuarne la misurazione.

La temperatura e la sua misura

La definizione della temperatura non è univoca e assoluta, ma piuttosto assume sfumature differenti in base al campo di applicazione. In generale la temperatura è la proprietà fisica, che caratterizza lo stato termico di un sistema, indicante il movimento casuale di atomi e molecole che compongono il sistema intorno alla loro posizione di equilibrio. La temperatura è strettamente correlata al calore che rappresenta invece l'energia globale di questa agitazione microscopica. Una differenza temperatura determina il verso del flusso di calore che si instaura fra due sistemi che interagiscono, come trasferimento di energia dal corpo a temperatura più alta verso quello a temperatura più bassa.

Quando due sistemi con temperatura differente vengono posti a contatto termico, la temperatura del sistema più caldo diminuisce, indicando che il calore "lascia" il sistema, mentre il sistema più freddo incamera energia e aumenta la sua temperatura. Quindi il calore "si muove" sempre da una regione a temperatura maggiore verso una a temperatura minore, e questa differenza di temperatura (detto anche gradiente di temperatura) che guida il trasferimento di calore tra i due sistemi.

Le scelte del sistema fisico e della grandezza termoscopica (che cioè varia con la temperatura) da impiegare come riferimento sono arbitrarie.

Si può considerare per esempio come sistema termodinamico di riferimento una certa quantità di gas. La legge di Boyle indica che il prodotto della pressione e del volume ($p \cdot V$) di

un gas è direttamente proporzionale alla temperatura. Questo può essere espresso dalla legge dei gas ideali come:

$$pV = nRT$$

dove T è la temperatura, n è la quantità di gas (numero di moli) e R è la costante dei gas. Si può quindi definire una scala di temperature basata sulle corrispondenti pressioni e volumi del gas. Il termometro a gas presenta una elevata precisione, per cui è utilizzato per calibrare altri strumenti di misura della temperatura.

L'equazione dei gas ideali indica che per un volume fissato di gas, la pressione aumenta all'aumentare della temperatura. La pressione è una misura della forza applicata dal gas sulle pareti del contenitore ed è correlata all'energia interna del sistema. Quindi a un aumento di temperatura corrisponde un aumento di energia termica del sistema.

Misurare la temperatura significa che avvenga un trasferimento di calore dall'oggetto sistema che vogliamo misurare verso il sensore, e quindi in generale lo strumento perturba sempre l'equilibrio termodinamico del misurando. Per far sì che questo effetto sia il più trascurabile possibile è fondamentale scegliere correttamente il sensore con cui si effettua la misurazione.

In natura il trasferimento del calore può avvenire in tre modi differenti o comunque con una combinazione di questi:

- **Conduzione:** sfrutta il contatto fisico fra i corpi: le particelle nel corpo più caldo (agitate termicamente) si muovono e trasferiscono (raffreddandosi) energia cinetica a quelle del corpo più freddo (riscaldandolo). La potenza termica è proporzionale al salto di temperatura ($T_0 - T$) e alla superficie di contatto A del materiale. Il fattore di proporzionalità è la conducibilità termica σ della superficie che separa i due corpi (e.g. l'oggetto, O , dall'ambiente o dal sensore di temperatura)

$$dQ = \sigma A (T_1 - T) dt$$

- **Convezione:** sfrutta un fluido intermedio (liquido o gas) per trasportare il calore da un corpo più caldo ad un corpo più freddo. La convezione può essere naturale o forzata. La potenza termica dQ/dt è proporzionale al gradiente termico ΔT e all'area A tramite

il coefficiente convettivo α (che è legato al calore specifico, alla viscosità e alla velocità del fluido)

- **Irraggiamento:** è legato alle vibrazioni degli atomi e delle molecole che hanno una energia cinetica media (rappresentata appunto dalla loro temperatura assoluta); questa vibrazione è sorgente di un campo elettromagnetico; la generazione di “luce” è governata dalla legge di Planck; la densità spettrale, per unità di lunghezza d’onda λ , della potenza elettromagnetica irradiata, per unità di superficie è proporzionale alla emissività $\epsilon(\lambda)$ dell’oggetto

Fondamentale per effettuare la misurazione conoscere bene il fenomeni che entrano in gioco nel sistema da misurare e quindi scegliere correttamente il sensore più adatto.

Esistono altri due concetti fondamentali che entrano in gioco nella misurazione della temperatura, che sono:

- **Calore specifico di una sostanza:** per unità di massa m , è il rapporto tra il calore scambiato (dQ) e la corrispondente variazione di temperatura (dT): $c = \frac{1}{m} \left(\frac{dQ}{dT} \right)$
- **Capacità termica:** di un oggetto rappresenta la quantità di calore che esso può immagazzinare sotto forma di energia termica. E’ il prodotto tra la massa m (kg) dell’oggetto e il suo calore specifico c (J/kg·K): $C = m \cdot c$

La capacità termica del sensore in particolare è fondamentale nel processo di misura in quanto determina il tempo in cui il sistema misurando-sensore vanno in equilibrio.

In assenza di dissipazioni verso l’ambiente esterno, si ottiene l’equazione differenziale del primo ordine:

$$\sigma A(T_1 - T)dt = m c dT$$

$$\frac{dT}{T_1 - T} = \frac{dt}{\tau_T}$$

Con soluzione la classica risposta del primo ordine:

$$T(t) = T_1 + \Delta T_0 * e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Il modello matematico risulta sufficientemente accurato nella maggior parte dei casi e la predicibilità della dinamica della temperatura permette di effettuare misurazioni anche senza attendere il raggiungimento del regime.

Panoramica Trasduttori

Per effettuare una misurazione significativa è necessario progettare e realizzare una catena di misura coerente in ogni sua parte dal trasduttore fino alla visualizzazione. Determinante risulta la scelta dell'elemento sensibile alla grandezza fisica da misurare. Nel caso in oggetto esistono una serie di trasduttori di temperatura molto differenti tra loro per principio di funzionamento e tecniche di utilizzo e applicazioni.

- **Lamina bimetallica:** si accostano due materiali metallici con costante di dilatazione termica differente e al variare della temperatura la flessione dell'asta sarà proporzionale alla differenza termica. Risultano poco accurati e soffrono di problemi di isteresi.
- **Termoresistenze o RTD (Resistance Temperature Detector):** Sfruttano la variazione della resistività del materiale con la temperatura, grazie a processi litografici moderni riescono ad essere molto precise. Spesso vengono realizzati con rame o nichel anche se per le sue caratteristiche di linearità e stabilità molto spesso si preferisce il platino anche se risulta più costoso. Sono caratterizzati da lunga durata stabilità e riproducibilità. Su grossa scala il legame tra resistenza e temperatura è:

$$R(T) = R_0 (1 + aT + bT^2 + cT^3(T - 100))$$

Tuttavia visti i valori in gioco delle costanti b e c la relazione per range ridotti tra -50 °C e 300°C con ottima approssimazione la precedente relazione diventa:

$$R(T) = R_0 (1 + aT)$$

- **Termocoppie:** sono ampiamente utilizzate perché economiche, facilmente sostituibili, standardizzate e possono misurare un ampio intervallo di temperature. Il loro

funzionamento è basato sull'effetto Seebeck per il quale la tensione (tra i due fili) al giunto freddo è proporzionale alla differenza di temperatura fra le due giunzioni.

- **Giunzione PN:** Sono trasduttori che utilizzano le proprietà di giunzioni a semiconduttore (diodi e transistor) di avere una tensione o corrente fortemente dipendente dalla temperatura; questa dipendenza è peraltro estremamente lineare. Per loro natura sono molto economici e facilmente integrabili con altri circuiti.
- **Pirometri:** Sono trasduttori elettrici a infrarossi che si fondano sulla trasmissione del calore per irraggiamento elettromagnetico e sulla legge di Planck che la regola. I pirometri ottici producono una risposta approssimativamente proporzionale a T^4 e sono quindi intrinsecamente non lineari. Sono sensori non invasivi, costosi, e molto stabili che permettono di misurare anche temperature elevate; la loro sensibilità è più accentuata alle alte temperature. Sono usati per temperature anche superiori ai 1450 °C dove altri sensori hanno vita breve;

L'umidità e la sua misurazione.

L'umidità è la misura della quantità di vapore acqueo presente nell'atmosfera (o in generale in una massa d'aria). Per comprendere a pieno tutti gli aspetti legati a questa grandezza vanno presi in considerazione alcuni concetti:

- **Umidità assoluta:** è la quantità di vapore acqueo espressa in grammi contenuta in un metro cubo d'aria. L'umidità assoluta aumenta all'aumentare della temperatura, l'umidità di saturazione aumenta più che proporzionalmente quindi l'umidità relativa tende a scendere. Quando un abbassamento di temperatura porta a far coincidere l'umidità assoluta con quella di saturazione si ha una condensazione del vapore acqueo e il valore termico prende il nome di temperatura di rugiada (dew point). In corrispondenza di questo valore se si ha una superficie fredda si ha la rugiada (brina a valori sotto lo zero), se la condensazione riguarda uno strato sopra il suolo si ha la nebbia. È un valore poco apprezzabile e per questo si preferisce l'utilizzo dell'umidità specifica. L'umidità assoluta può essere espressa in termini di peso di acqua per volume di atmosfera o in pressione parziale relativa del vapore rispetto agli altri componenti atmosferici (kg/m^3 o Pa).
- **Umidità specifica:** è il rapporto della massa del vapore acqueo e la massa d'aria umida; in letteratura si può trovare anche un'altra definizione: il rapporto tra la massa del vapore acqueo e la massa d'aria SECCA. In termodinamica si preferisce questa seconda definizione perché, rapportandosi alla massa di aria secca, questa non varierà mai nei normali processi termodinamici (sopra la temperatura di 132 K), al contrario della massa di aria umida (per esempio: con la condensazione del vapore nell'aria umida, il fluido può essere facilmente sottratto).
- **Umidità relativa:** indica il rapporto percentuale tra la quantità di vapore contenuto da una massa d'aria e la quantità massima (cioè a saturazione) che il volume d'aria può contenere nelle stesse condizioni di temperatura e pressione. Alla temperatura di rugiada l'umidità relativa è per definizione del 100%. L'umidità relativa è un parametro dato dal rapporto tra umidità assoluta e l'umidità di saturazione. È svincolato dalla temperatura e dà l'idea del tasso di saturazione del vapore atmosferico, e delle

ripercussioni sui fenomeni evapo-traspirativi delle colture. Il deficit di saturazione è dato dalla differenza tra umidità assoluta e umidità di saturazione.

Esempio: se una massa d'aria ha una temperatura propria, ad esempio, di 15 °C con una quantità di umidità relativa pari al 50%, affinché tale umidità possa raggiungere il 100% (saturazione) a pressione costante, e, magari depositarsi (condensazione) sarà necessario abbassare la temperatura della massa d'aria, ad esempio, di 5 °C, portarla cioè da 15 °C a 10 °C.

Vi sono fondamentalmente due tipi di strumenti che misurano l'umidità

- **Igrometro:** è lo strumento usato nelle stazioni metereologiche che si avvale di un pennino collegato solidalmente a un elemento sensibile all'umidità che si dilata o restringe al variare di quest'ultima in maniera proporzionale permettendo il movimento del suddetto pennino
- **Psicrometro:** È costituito da due termometri affiancati, di cui uno è chiamato bulbo secco e misura la temperatura dell'aria, mentre l'altro, avvolto in una garza di cotone imbevuta d'acqua distillata, è chiamato bulbo umido e misura la temperatura dell'acqua a contatto con l'aria (ovvero la temperatura di bulbo umido): l'evaporazione dell'acqua sottrae calore abbassandone la temperatura in misura inversamente proporzionale all'umidità dell'aria. La lettura dei due termometri permette di conoscere con tabelle o diagrammi l'umidità relativa e assoluta dell'aria.

Sensori di umidità

Le attuali tecnologie classificano i sensori di umidità in base alla tecnica di trasduzione:

- **Sensori Capacitivi** : presentano un elemento capacitivo che varia al variare dell'umidità
- **Sensori Resistivi**: presentano una variazione impedenziale al variare dell'umidità
- **Sensori a Conducibilità termica**: legano la variazione di umidità relativa alla differenza di conducibilità termica tra aria 'secca' e l'aria dell'ambiente.

Sensori capacitivi

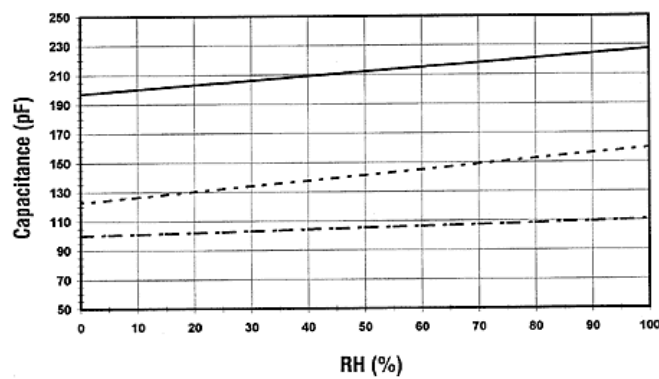


Figura 5 Risposta lineare della capacità del sensore al variare dell'umidità relativa

Consistono di un substrato sul quale è depositato un film sottile polimerico o di un ossido di metallo tra due elementi conduttivi. La superficie sensibile è poi ricoperta da un elettrodo metallico poroso che protegge da contaminanti e dalla condensa mentre il substrato è tipicamente in vetro, ceramica o silicio. Si ottiene così un elemento capacitivo la cui costante dielettrica (del film depositato) è proporzionale all'umidità relativa dell'ambiente circostante. La variazione della capacità è tipicamente di 0.2-0.5pF ogni unità percentuale di umidità relativa con una capacità di base (10% U.R. – 25°C) dell'ordine dei 100pF. Questa tipologia di sensori è solitamente caratterizzata da un basso coefficiente di temperatura che ne permette l'utilizzo a ad altre temperature fino a 200°C, da una buon recupero dalle condizioni di condensa, e da una ragionevole resistenza ai vapori chimici. I tempi di risposta a gradini di variazioni del 63% di U.R. sono dell'ordine della decina di secondi. Inoltre, recenti tecnologie di integrazione su silicio hanno permesso un drift a lungo termine molto contenuto e un isteresi bassissima. Effettuando una calibrazione a due punti si ottengono tipicamente

incertezze di misura di +/-2% tra il 5e il 95% di umidità. Ovviamente la caratteristica capacità molto contenuta limita molto la distanza dal circuito di condizionamento e da una particolare attenzione al progetto di quest'ultimo a fine di non produrre parassitismi.

Sensori resistivi

I sensori resistive misurano il cambiamento dell'impedenza di un mezzo igroscopico conduttivo come un polimero un sale o un substrato drogato. Il cambiamento impedenziale tipicamente ha un andamento esponenziale decrescente con l'umidità relativa. Solitamente il sensore è costituito da elettrodi costituiti da un substrato ricoperto di metalli nobili o da avvolgimenti su cilindri di plastica o vetro. Il substrato assorbe il vapore acqueo incrementando la conducibilità elettrica. Solitamente hanno una risposta tra 10 e 30 secondi e l'impedenza cambia tra 1 kOhm e i 100MOhm.

Sensori a conducibilità termica

Questo tipo di sensori misura l'umidità assoluta valutando la differenza tra la conducibilità termica dell'aria secca e quella dell'aria contenente il vapore acqueo. Quando l'aria o il gas è secco ha una capacità di "trattenere" il calore minore, invece quando è miscelato con l'acqua le variazioni di temperatura sono più lente. I sensori a conducibilità termica sono costituiti da un circuito a ponte dove i due elementi sono due termistori matchati con coefficiente di temperatura negativo NTC, uno ermeticamente incapsulato nell'idrogeno secco e l'altro esposto all'ambiente.

2. Il dispositivo di acquisizione dati -

MiCe

Introduzione

Nel seguente capitolo viene descritto la progettazione e la realizzazione del dispositivo MiCe. Le fasi del lavoro sono sostanzialmente: studio delle problematiche e delle varie soluzioni attuabili, prototipazione del sistema su “scheda millefori”, validazione delle soluzioni adottate, realizzazione su PCB del primo prototipo funzionante. Durante queste quattro fasi si

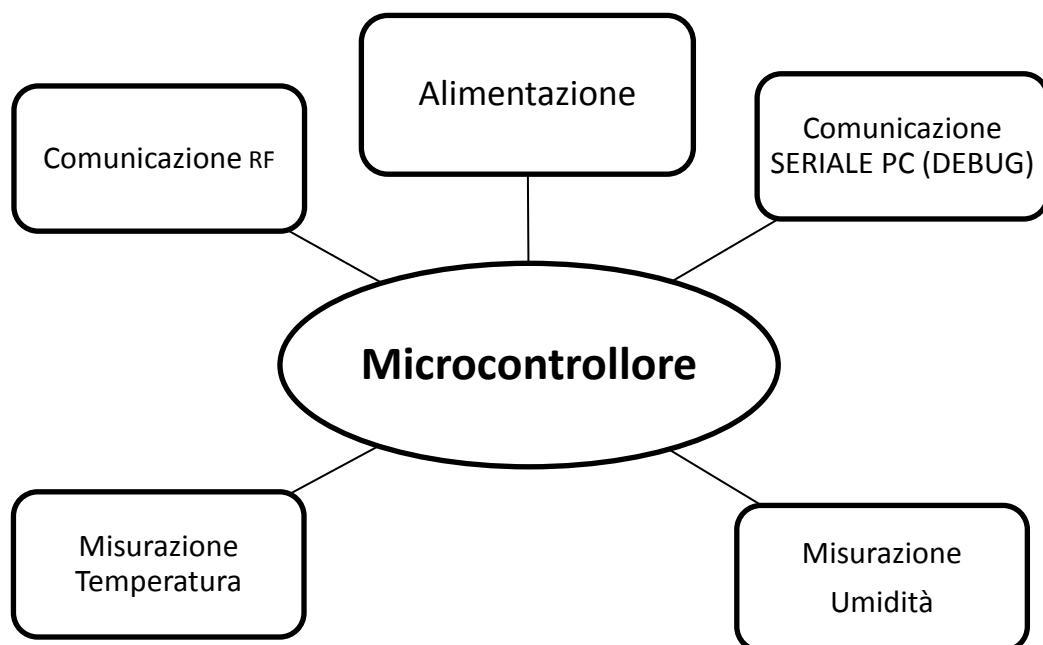


Figura 6 Blocchi fondamentali del sistema MiCe

è mirato a realizzare sia l'hardware del dispositivo sia il firmware tra loro strettamente correlati, nonché il software di validazione e debug lato PC. Il sistema può essere suddiviso in cinque blocchi fondamentali:

- **Alimentazione:** In fase di prototipazione si è scelto di avere un'alimentazione selezionabile tra alimentazione esterna e a batteria l'utilizzando un jumper in una posizione piuttosto che in un'altra.

- **Comunicazione RF:** il blocco si occuperà di trasmettere i dati acquisiti ed elaborati dal microcontrollore al gateway CaT a cui è associato. Nella fase di prototipazione questo blocco non è stato testato, in quanto oggetto di un brevetto già funzionante e validato.
- **Comunicazione SERIALE:** il blocco si occupa della conversione dei dati in uscita dal microcontrollore verso lo standard di comunicazione RS-232, al fine di trasmettere in fase di debug i dati al PC.
- **Misurazione della temperatura:** il blocco è adibito alla generazione e al condizionamento del segnale di misura della temperatura.
- **Misurazione dell'umidità:** il blocco è adibito alla generazione e al condizionamento del segnale di misura dell'umidità. Condivide con il blocco della temperatura il sensore.

1. Principi di progettazione low-power

La progettazione di sistemi embedded e di sistemi elettronici miniaturizzati è sicuramente una tra le applicazioni elettroniche più giovani e ancora in via di sviluppo se poi è accostata a termini attualissimi come quelli di basso consumo e di risparmio energetico, si entra in un campo ancora in sperimentazione e che soprattutto non offre principi e fondamenti consolidati e soprattutto non universalmente riconosciuti dalla comunità scientifica. Ben lontani dal voler stilare regole di progetto generalmente applicabili ai sistemi Low-power, si vuole riassumere delle regole di buon senso che hanno guidato la progettazione del sistema oggetto di questa tesi, tenendo fortemente in considerazione la specifica applicazione che si doveva realizzare.

Definiamo alcuni concetti di partenza per i sistemi digitali a microcontrollore:

Distinguiamo tre tipi di Potenza:

- *Potenza dinamica*: E' la potenza utilizzata quando il sistema è in piena attività alla massima frequenza e con le varie periferiche attive e funzionanti.
- *Potenza statica*: E' la potenza consumata dal sistema nella fasi di inattività quindi quando i core di elaborazione sono in risparmio energetico e le varie periferiche spente.
- *Potenza Media*: E' la media temporale della potenza in un ciclo completo dell'applicazione.

Della potenza dinamica si individuano due fonti fondamentali:

- *Perdite di Switching CMOS*: è noto che la potenza dinamica dei circuiti digitali ha il suo picco durante la transizione di stato.
- *Carica scarica di capacità parassite di carico*: un altro contributo di dissipazione è sicuramente la carica utilizzata per caricare le capacità di carico e quelle parassite ai vari nodi dei circuiti

Volendo riassumere in formule questi contributi possiamo dire che la potenza dinamica può essere calcolata come:

$$P = C * V^2 * f$$

Così si vede i tre termini che entrano in gioco vanno minimizzati. Si possono trarre alcune considerazioni preliminari per ridurre la potenza:

- Le capacità: il design del circuito deve ridurle il più possibile riducendo i circuiti attivi e quindi le varie periferiche collegate
- La tensione di alimentazione: determina nel progetto la scelta dei vari componenti.
- La frequenza: è determinata dal Clock del sistema, dalle specifiche dell'applicazione e determina a sua volta l'efficienza di codice.

Power-plot

Una volta considerati questi aspetti di base il primo passo per il progetto low-power è quello di suddividere l'applicazione in fasi e quindi di creare quello che viene definito "power-plot". In generale un dispositivo interno che sia di monitoraggio, controllo, acquisizione dati, può essere riorganizzato come in figura.

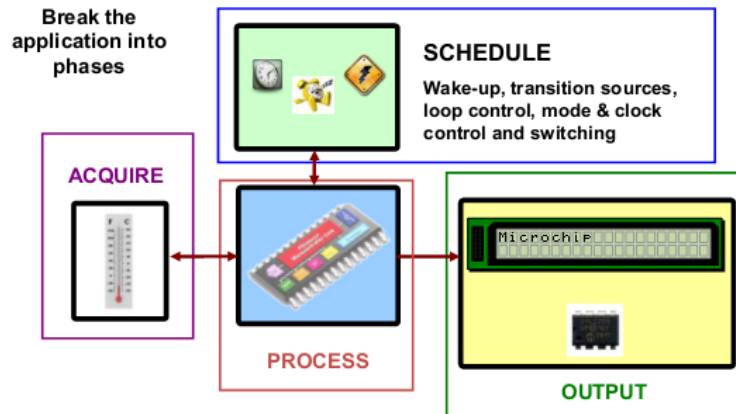


Figura 8 Divisione funzionale del firmware

L'applicazione avrà una sua fase di acquisizione degli ingressi una fase di elaborazione dei dati e una fase di generazione dell'uscite che si ripeterà in maniera più o meno deterministica nel tempo o addirittura in maniera ciclica. Tutte fasi saranno gestite e organizzate, a seconda dell'applicazione, in base a tempistiche di sorgente e uscita dei dati e dalle risorse disponibili di memoria e potenza di calcolo. Quindi si procede individuando, per ogni fase, quali sono le risorse effettivamente necessarie e quali quelle che magari risultano superflue. Ogni risorsa di calcolo, di memorizzazione dei dati, di condizionamento del segnale analogico sarà abilitata all'inizio della fase di utilizzo e disabilitata alla fine della stessa. Pertanto in fase di progetto è fondamentale individuare e definire ogni singola operazione e fase dell'applicazioni in termini

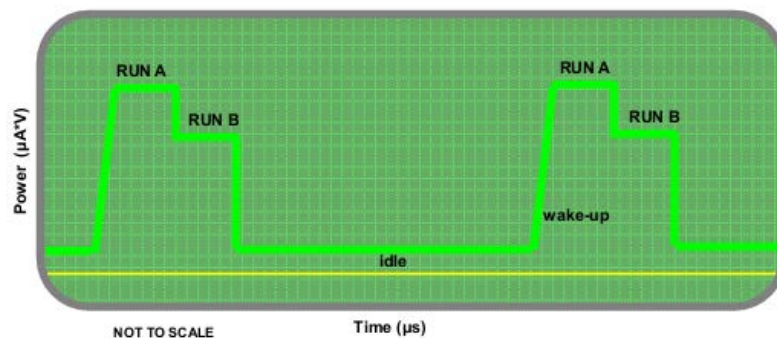


Figura 7 Esempio di Power Plot

di tempo e onere energetico. Generalmente la scelta dell'unità di elaborazione, che sia un microprocessore, microcontrollore o un FPGA viene fatta sovradimensionando il potere di calcolo o comunque in base alle specifiche dell'operazione più complessa, questo comporta che la maggior parte delle operazioni e delle varie funzioni vengono espletate in un tempo molto inferiore di quello che si ha a disposizione, di conseguenza che molto spesso tra le varie fasi è presente una fase di "riposo" definita di "IDLE" in cui il sistema non utilizza la maggior parte delle risorse o addirittura non compie alcuna operazione. Si può costruire così un profilo di consumo variabile nel tempo chiamato 'Power Plot', cioè si diagramma la potenza consumata in funzione del tempo in un intero ciclo dell'applicazione. Il Power Plot, risulta uno strumento molto utile sia in fase di progetto sia in fase di valutazione delle performance attese. Infatti da un lato, risultano molto evidenti i vari contributi dei consumi dove si può lavorare per migliorare le prestazioni per ogni fase e dall'altro permette di valutare, in maniera più o meno precisa, l'energia consumata in un ciclo applicativo e quindi si può stimare la durata della batteria. A tal proposito, si sottolinea che il parametro fondamentale è l'area sottesa alla curva in quanto rappresenta l'energia consumata nel corrispondente lasso di tempo. Diverse possono essere le soluzioni di progetto ad esempio: ridurre i tempi per eseguire una fase mantenendo fissate le risorse utilizzate e quindi la potenza, oppure allungare i tempi di esecuzione riducendo l'onore energetico in quella fase. Ovviamente le risposte a questo tipo di trade-off sono insite delle specifiche circostanze di progetto.

Nonostante una progettazione accurata del sistema è difficile prevedere con esattezza i valori esatti di potenza in gioco nelle varie fasi e quindi ottenere il Power-plot senza misurare i valori direttamente.

Tuttavia non è sempre immediato effettuare queste misurazioni anche con gli strumenti più sofisticati. Si possono utilizzare tre metodi differenti:

- Si applica il multimetro, configurato in lettura di corrente, direttamente tra l'alimentazione e il sistema da misurare, ma si hanno tuttavia due limiti fondamentali: Il multimetro deve essere particolarmente performante in quanto in alcune fasi di funzionamento, in particolari quelle di 'sleep' si devono discriminare decine di nanoAmpere, ed inoltre, cambiamenti molto rapidi di corrente non possono essere

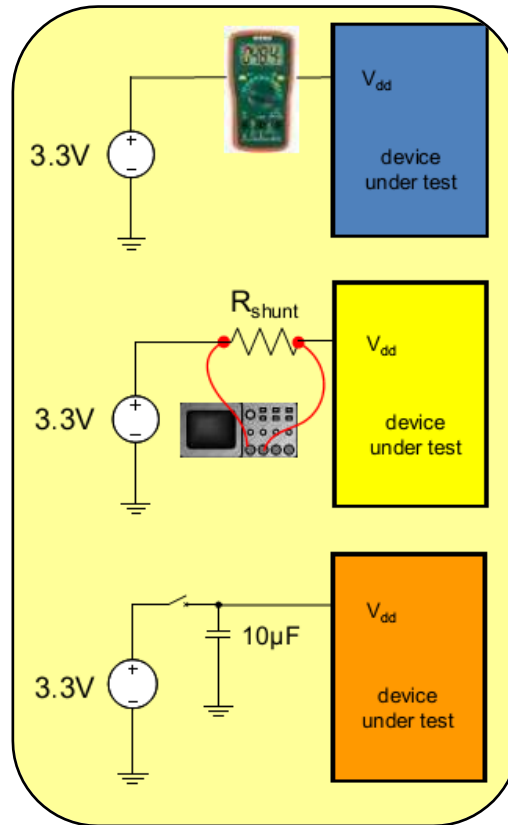


Figura 9 Differenti tecniche per la misurazione dei consumi

misurati in quanto il multimetro effettua una media su tempi dell'ordine del millisecondo.

- Si utilizza in serie all'alimentazione una resistenza di shunt e se ne misura la tensione ai capi con l'oscilloscopio: si ottiene il vantaggio di poter visualizzare l'intera evoluzione nel tempo dei consumi tuttavia il dimensionamento della resistenza non è banale visto che come spesso accade, vi sono diversi ordini di grandezza tra le correnti nelle varie fasi. Si corre il rischio che da un lato si ha una caduta di tensione eccessiva dall'altro di non riuscire a visualizzare la corrente minima per limiti di risoluzioni.
- Si può utilizzare un condensatore in parallelo all'alimentazione che continuerà ad alimentare il sistema quando si scollega la sorgente e misurando il tempo in cui si consuma una determinata variazione di tensione si risale alla corrente assorbita dal sistema: permette di raggiungere livelli di precisione maggiori rispetto ai precedenti metodi, tuttavia risulta di difficile applicazione.

Sistemi Low-Power a Microcontrollore

I sistemi elettronici digitali di acquisizione ed elaborazione sono sempre ideati intorno ad un sistema di gestione principale che può essere in base alle varie esigenze un Processore, un Microcontrollore, un DSP, o un'unità di Logica Programmabile come FPGA o ASIC. Senza perdere di vista gli obiettivi della trattazione non si scenderà nel dettaglio delle motivazioni che conducono verso la scelta di una famiglia di dispositivi piuttosto che l'altra. Ci limitiamo a dire che viste le esigenze di integrazione di diverse periferiche di comunicazione (UART, SPI, I2C) e di condizionamento del segnale (Amplificatori, ADC, etc.) unite alle richieste di dimensioni ridotte, facilità di sviluppo e costi contenuti, la scelta è ricaduta sui Microcontrollori che meglio rispondono a queste specifiche.

I microcontrollori in generale, rispondono alle esigenze di sviluppo a risparmio energetico e per loro costruzione mettono a disposizione una serie di peculiarità:

- Differenti frequenze di funzionamento: è possibile configurare il dispositivo in modo che nelle differenti fasi di lavoro utilizzi sorgenti di clock diverse in modo da ridurre la frequenza riducendo i consumi.
- Alimentazioni differenti per le varie periferiche: è possibile alimentare parti del chip con sorgenti differenti in modo da minimizzare la tensione di alimentazione e quindi i consumi.
- Differenti modalità di funzionamento con consumi differenti: il core di controllo come quello di calcolo può essere spento in alcune fasi dove magari è necessario aspettare un tempo fisso o il campionamento di un segnale arrivando ad utilizzare correnti inferiori della decina di nanoAmpere.
- L'integrazione di differenti periferiche determinano minori esigenze di componenti esterni aggiuntivi.

Le fasi di progetto

Le considerazioni sul risparmio energetico fatte finora iniziano a far parte del progetto fin dalle prime fasi e vanno tenute ben presenti fino alle ultime. Il completo controllo dell'hardware è del software da parte del progettista è fondamentale per perseguire gli obiettivi di ottimizzazione energetica. Tutti i dispositivi che circondano il microcontrollore vanno pensati al fine di ridurre il consumo di energia dell'intero sistema quindi parametri come ad esempio tensione di alimentazione e frequenza di funzionamento sono fattori cruciali del progetto. Fattori che risultano fondamentali anche nell'ottica di progetto del lato software/firmware in quanto ne determineranno l'efficienza. Infatti parametri quali frequenza di operatività del program counter del processore sono strettamente legati da un lato al funzionamento delle periferiche e dall'altro al tempo di elaborazione dei dati nonché al consumo di corrente. La tendenza di sviluppo sotto questo punto di vista va da un lato verso l'integrazione di periferiche dedicate alla gestione dell'energia e del monitoraggio dei consumi real-time, e dall'altra alla modularizzazione del sistema al fine di poter gestire in maniera più efficiente le parti attive (quindi che consumano la maggior quantità di energia) e quelle a riposo.

In linea con questi principi le fasi che si sono seguite durante lo sviluppo di questo dispositivo sono state:

- Analisi del problema e studio delle possibili soluzioni.
- Progetto delle soluzioni scelte.
- Realizzazione delle soluzioni circuitali su scheda di prototipazione.
- Verifica di funzionamento.
- Integrazione delle tecniche e ottimizzazione delle risorse.

Scelta del microcontrollore

Nucleo principale del dispositivo, il microcontrollore determina la maggior parte delle prestazioni ottenibile dall'intero sistema. Ecco perché rappresenta una delle scelte più critiche dell'intero progetto. Innanzi tutto va detto che per applicazioni come quella in oggetto dove non sono richieste grosse elaborazioni di calcolo e invece si predilige una semplicità di sviluppo e un consumo di energia più basso si scartano automaticamente le architetture a più di 16bit. Sicuramente nell'ambito delle applicazioni low-power a 8bit e a 16bit vi sono due aziende produttrici di microprocessori che spiccano sul mercato: Microchip e Texas Instruments. La ricerca si è quindi concentrata tra le famiglie di dispositivi a basso consumo di entrambi i produttori.

Le esigenze principali dell'applicazione da risolvere sono state:

- Avere il minor consumo energetico possibile.
- Avere il minor dispendio di area occupata possibile che è stato tradotto nel ridotto numero di pin.
- Avere una comunicazione seriale verso il PC per debug.
- Integrare un convertitore ADC.
- Integrare un comparatore.

Il risultato dello studio ha fatto propendere per i prodotti Microchip per diversi motivi: in primis perché nel confronto energetico tra le famiglie equivalenti dei due produttori, Microchip risulta più efficiente: basta infatti confrontare l'efficienza di codice come riportato in figura. Si consideri, poi che il portfolio Texas Instruments non dispone di un microcontrollore

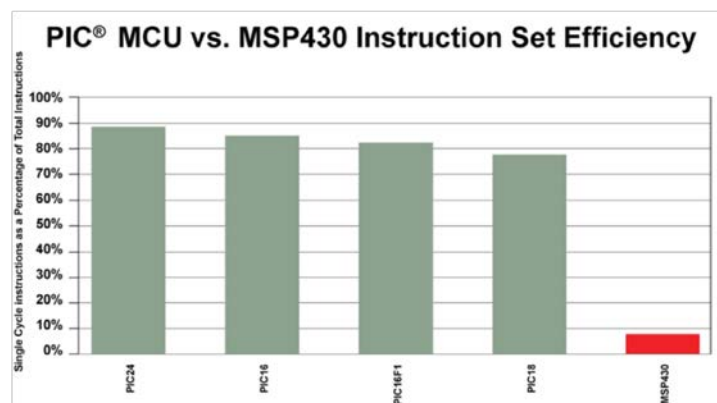


Figura 10 Tabella di confronto MCU a 8-bit Microchip e Texas Instruments

che integri tutte le periferiche necessarie e che quindi queste sarebbero aggiunte al computo di spazio richiesto su scheda. Ed infine c'è da dire che IPSES ha stipulato da diversi anni una partnership con Microchip, e da diversi anni è Authorized Gold Design Partner) e un'esperienza decennale nonché dispone di tutta una serie di kit di sviluppo e di strumenti hardware e software che avrebbero facilitato la progettazione e lo sviluppo. Nella scelta di quale dispositivo ci si è fatti guidare principalmente dalla minimizzazione di spazi, costi e consumi con le seguenti specifiche:

- Tensione di alimentazione 3V
- Frequenza di clock maggiore di 8 MHz
- Riferimento di Tensione fisso
- Presenza di ADC
- Comparatore
- Periferica seriale

Il microcontrollore scelto è il PIC 16LF1829, aventi le seguenti caratteristiche:

- High-Performance RISC CPU: Only 49 Instructions
All single-cycle instructions except branches
- Operating Speed:
 - DC – 32 MHz oscillator/clock input
 - DC – 125 ns instruction cycle
- Up to 16 kbytes Linear Program Memory Addressing
- Up to 1024 bytes Linear Data Memory Addressing
- Direct, Indirect and Relative Addressing modes:
 - Two full 16-bit File Select Registers (FSRs)
 - FSRs can read program and data memory
- Flexible Oscillator Structure:
- Precision 32 MHz Internal Oscillator Block:
 - Factory calibrated to $\pm 1\%$, typical
 - Software selectable frequencies range of 31 kHz to 32 MHz
- 4x Phase Lock Loop (PLL)
- Two-Speed Oscillator Start-Up
- Reference Clock Module:
 - Programmable clock output frequency and duty cycle
- 1.8V-3.6V Operation – PIC16LF1825/1829
- Power-on Reset (POR), Power-up Timer (PWRT) and Oscillator Start-up Timer (OST)
- Programmable Brown-out Reset (BOR)
- Extended Watchdog Timer (WDT)
- Power-Saving Sleep mode
- Extreme Low-Power Management
- PIC16LF1829 with XLP:
 - Sleep mode: 20 nA @ 1.8V, typical
 - Watchdog Timer: 300 nA @ 1.8V, typical
- Timer1 Oscillator: 650 nA @ 32 kHz, 1.8V, typical
- Operating Current: 48 μ A/MHz @ 1.8V, typical
- Analog-to-Digital Converter (ADC) Module:
 - 10-bit resolution, up to 12 channels
 - Auto acquisition capability
 - Conversion available during Sleep
- Analog Comparator Module:
 - Two rail-to-rail analog comparators
 - Power mode control
 - Software controllable hysteresis
- Voltage Reference Module:
 - Fixed Voltage Reference (FVR) with 1.024V, 2.048V and 4.096V output levels
- 5-bit rail-to-rail resistive DAC with positive and negative reference selection
- Peripheral Highlights:
- Up to 17 I/O Pins and 1 Input Only Pin:
 - High current sink/source 25 mA/25 mA
 - Programmable weak pull-ups
 - Programmable interrupt-on-change pins
 - Timer0: 8-Bit Timer/Counter with 8-Bit Prescaler
- Enhanced Timer1:
 - 16-bit timer/counter with prescaler
 - External Gate Input mode
 - Dedicated, low-power 32 kHz oscillator driver
- (MSSP) with SPI and I2C with:
- Enhanced Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter (EUSART) Module

Scelta delle batteria

Tra le prime scelte progettuali nei sistemi low-power mobile che si devono compiere c'è la scelta dell'alimentazione dell'intero sistema: la batteria. Il punto di partenza ovviamente sono le specifiche del sistema e le caratteristiche sia funzionali sia meccaniche.

Le batterie vanno distinte innanzitutto, in primarie e secondarie, ovvero quelle che si esauriscono alla fine della loro vita e quelle (le secondarie) che possono essere ricaricate un certo numero di volte.

Ma la caratteristica che determina il maggior numero di parametri della batteria è sicuramente la reazione che viene utilizzata. Ovvero la particolare reazione chimica grazie alla quale si riesce ad ottenere l'immagazzinamento dell'energia. Tra le tipologie più diffuse per le batterie primarie si annoverano le batterie Zinco-carbone, Ossido d'argento, litio e Alcaline, mentre per le ricaricabili le nichel-cadmio, a Ioni di litio, Nickel Metal Hydride e le più recenti LiFePO₄ (Litio-Ferro Fosfato).

Ogni famiglia di batteria, si distingue per i seguenti parametri.

- *Tensione teorica*: che è il potenziale tra gli elettrodi, determinato dalla reazione chimica.
- *Capacità teorica*: che è la quantità di carica disponibile espressa in Amper-ora (Ah)
- *C-rate*: è la misura della corrente di carica e scarica della batteria relativa alla propria capacità.
- *Self-discharge*: è la capacità della batteria persa durante la conservazione ovvero la capacità persa per la corrente di leakage tra i morsetti quando la batteria non è utilizzata.
- *Resistenza interna*: Resistenza serie al generatore ideale di tensione che limita la corrente massima erogabile

Ogni costruttore di batteria raccomanda particolari condizioni di carica scarica e di conservazione per lo specifico prodotto.

Quindi tra i vari parametri che entrano in gioco nella scelta delle batterie, ci sono innanzitutto le caratteristiche stesse della batteria, Tensione, Capacità, C-rate, etc. che determinano i limiti e i parametri di funzionamento dell'elettronica sia in termini funzionali sia di ciclo temporale dell'applicazione (tra una manutenzione per ricarica o sostituzione della batteria e la successiva). Ci sono poi altre proprietà determinanti nella scelta, quali:

- *Dimensioni*: Risultano fondamentali nell'intero progetto, per spazio occupato, peso e impatto estetico sul prodotto finale. Bisogna tener presente che nell'ottica della miniaturizzazione, viste le riduzioni di dimensioni sempre più spinte dell'elettronica, il limite con cui si scontra immediatamente il progettista del sistema sono le dimensioni meccaniche di alimentazione.
- *Densità energetica in peso/volume*: Sono due parametri fondamentali molto utili di confronto che portano in conto quanto la batteria è efficiente in termini di energia spazio e peso.
- *Costi*: che si vanno a sommare ai costi di produzione dell'intero progetto.
- *Sicurezza*: ogni batteria deve essere conservata e utilizzata rispettando certi parametri di temperatura e umidità affinché non vada in contro a danneggiamento o esplosione che possono compromettere la sicurezza del prodotto finale, parametri che sicuramente non vanno trascurati in base all'applicazione finale.
- *Time-to-Market*: in base a tutte le caratteristiche precedenti che determinano scelte tecniche di progetto, va presa in considerazione anche il tempo di sviluppo e di approvvigionamento per arrivare al prodotto finale.

Nell'applicazione ci si è fatti guidare principalmente dall'esigenza di ridurre al minimo il peso e lo spazio occupato. La scelta è ricaduta infatti sulla categoria di batterie "a bottone" che racchiude pesi e dimensioni compatibili con le specifiche. L'altro parametro determinante è sicuramente la capacità e la corrente massima in continua, che determinano rispettivamente la durata e il carico energetico massimo che può essere alimentato dalla batteria. Riportiamo le varie soluzioni considerate.

Modello	Chimica	Capacità	Corrente continua massima	Dimensioni	Range di temperatura operativa
BR2330	Litio polifloruro di carbonio	255mAh	0.03mA	23 x 3mm	-30 → +80°C
BR3032	Litio polifloruro di carbonio	500mAh	0.03mA	30 x 3.2mm	-30 → +80°C
CR2025	Litio diossido di manganese	165mAh	-	20 x 2.5mm	-30 → +80°C
CR2016	Litio diossido di manganese	90mAh	0.1mA	20 x 1.6mm	-30 → +80°C
<u>CR2032</u>	<u>Litio diossido di manganese</u>	<u>225mAh</u>	<u>0.2mA</u>	<u>20 x 3.2mm</u>	<u>-30 → +80°C</u>
CR2354	Litio diossido di manganese	560mAh	0.2mA	23 x 5.4mm	-30 → +80°C
CR2016	Litio diossido di manganese	90mAh	-	20 x 1.6mm	-30 → +80°C
CR2330	Litio diossido di manganese	265mAh	0.2mA	23 x 3mm	-30 → +80°C
CR3032	Litio diossido di manganese	500mAh	0.2mA	30 x 3.2mm	-30 → +60°C
CR2025	Litio diossido di manganese	165mAh	0.2mA	20 x 2.5mm	-30 → +60°C

Tabella 2 Tabella di confronto usata per la scelta della batteria

Il giusto compromesso tra dimensioni, capacità e corrente in continua è stato trovato nel modello CR2032 di cui riportiamo le caratteristiche di scarica al variare della temperatura.

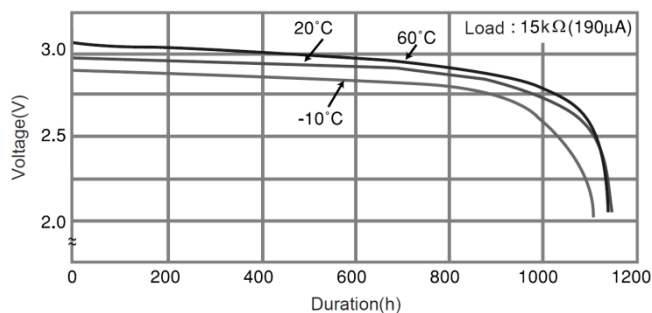


Figura 11 Caratteristica di scarica della batteria CR2032

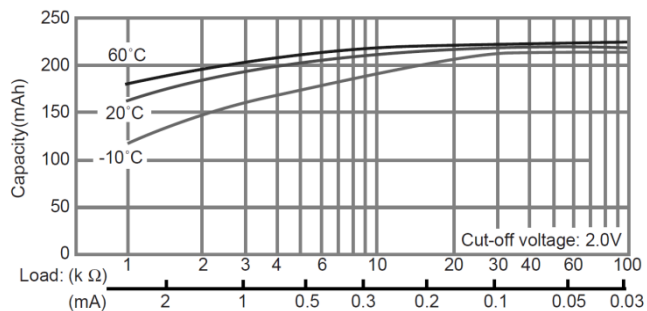


Figura 12 Caratteristica della Capacità al variare del carico della batteria CR2032

Scelta del sensore

A determinare prestazioni e limiti ultimi di misura del prodotto finale oltre al microcontrollore gioca un ruolo fondamentale il sensore di misura della temperatura e dell'umidità. Come è stato spiegato nei capitoli precedenti nel trattare le misurazioni dei suddetti parametri esistono differenti tecniche per effettuare questo tipo di misurazione e differenti tipologie per conoscere temperatura e umidità ambientali, ora ci limiteremo a spiegare le motivazioni che hanno portato a scegliere il trasduttore. Innanzi tutto c'è da dire che in commercio si trovano numerosi sensori di temperatura e altrettanti di umidità con differenti caratteristiche e prestazioni, tuttavia per motivi di spazio, consumo e costo si è preferito optare per una soluzione che integrasse entrambi. Di seguito riportiamo le soluzioni valutate.

SHT21 - Sensiron – E' un sensore che integra in un unico package di 3x3mm la misura di temperatura e di umidità. Controllabile tramite interfaccia I2C restituisce i valori misurati su 10 o 12 bit. Ha un precisione +-2% per la lettura di HR e 0.5°C nella lettura della temperatura. Consumi di 1mW per misurazione e una corrente di alimentazione in 0.4µA in sleep mode (11). Prezzo: 14 €

DHT11- D-Robotics – E' un sensore digitale a basso costo che integra misurazione di temperature e di umidità con interfaccia digitale single wire. Con risoluzione di 5% di umidità e 2°C per la lettura della temperatura. Con consumi di 1,5mW per misura e una corrente di standby di 100µA (12). Prezzo: 8 €

HCT01 – E+E elektronik – e' un sensore che integra in un unico package un trasduttore capacitivo per la misura dell'umidità e una termoresistenza Mo3k. Il dispositivo è passivo quindi i consumi sono legati al circuito di condizionamento utilizzato (13). Prezzo: 7.40 €

La scelta è stata effettuata considerando sia gli aspetti di consumo e di costo, nonchè è stato considerato il fatto che si potessero voler raggiungere limiti di precisione superiori a quelli messi a disposizione delle soluzioni con interfaccia digitale. Si è quindi optato per la soluzione passiva di E+E Elektronik. Il sensore integra in un package di dimensioni 5x5mm una resistenza in Molibdeno di valore nominare di 3000 Ω e un condensatore con dielettrico dipendente dall'umidità relativa di Capacità nominale di 70pF (13).

Trasduttore Umidità	
Caratteristica	$C(RH)=C_0*(1+K*RH)$ <ul style="list-style-type: none"> • $C_0=70pF$ • $K=3420*10^{-6}$
Range operativo	0-100% RH -40°C-140°C
Capacità Nominale	70pF
Accuracy	+/-2%
Sensitivity	0.25pF
Isteresi	1.7% RH
Resistenza serie	<1200 Ohm
Resistenza parallelo	>100 MOhm
Trasduttore Temperatura	
Caratteristica	$R(T)=R_0(1+A*T+B*T^2)$ <ul style="list-style-type: none"> • $R_0=2785.88$ Ohm • $A=0.0030659$ • $B=3.41*10^{-7}$
Resistenza Nominale (25°C)	300 KOhm
Accuracy	$dt=(0.2+0.008*(T-25))K$
Tempo di risposta	<6s
Corrente massima	0,1mA

Tabella 3 Caratteristiche del sensore utilizzato HCT01

Di seguito riportiamo le caratteristiche dell'accuracy del sensore.

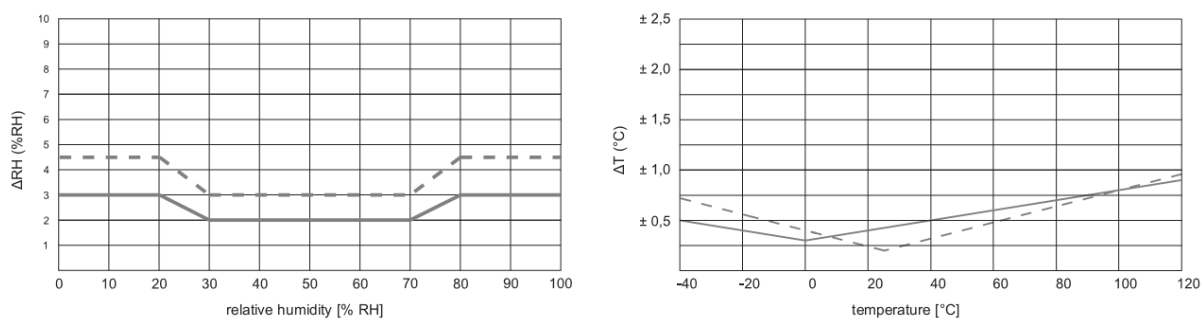


Figura 13 Curve di caratterizzazione del Trasduttore HCT01

2. Blocco di misurazione dell'umidità

Una volta scelto il sensore, progettare il blocco di misurazione dell'umidità significa ideare un apposito circuito per misurare la capacità variabile.

Circuiti per la misura della capacità

Alla luce delle considerazioni fatte, ci si rende subito conto che il primo ostacolo da superare è il sistema di misurazione di una capacità dell'ordine delle centinaia di picoFarad con un risoluzione del pF. Nella letteratura si distinguono fondamentalmente i seguenti approcci (14):

1. La conversione in frequenza.
2. La conversione in tempo.
3. Misurazione a ponte.
4. La misura di carica.

I. Conversione in frequenza

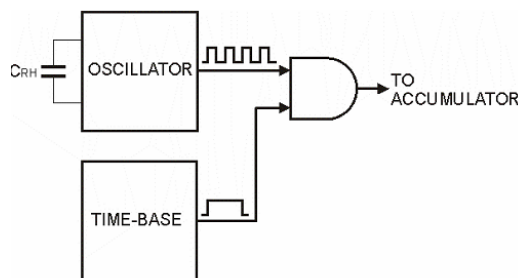


Figura 14 Schema di principio per la tecnica di conversione in frequenza

Il principio di base è quello di usare la capacità del sensore come elemento per la generazione della frequenza di un oscillatore di tipo LC o RC. Del segnale di uscita dell'oscillatore si può misurare in maniera piuttosto agevole la frequenza tramite un microcontrollore e da questa risalire al valore della capacità. Come mostrato in figura il blocco Time-Base attiva l'accumulatore che conta il numero di cicli dell'oscillatore. Il valore finale dell'accumulatore sarà proporzionale alla frequenza e quindi inversamente proporzionale alla capacità da misurare.

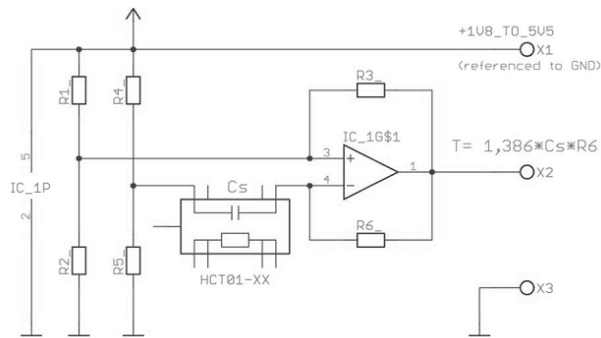


Figura 15 Circuito Astabile per la conversione in frequenza

È stato preso in considerazione questo metodo di misura nel lavoro preliminare del progetto. Il circuito considerato è il classico multivibratore astabile riportato in figura. Il limite maggiore di ha perché al fine di ottenere una risoluzione adeguata è necessario avere un numero di conteggi sufficientemente elevato. Fissando il tempo di misura (ovvero il tempo per cui rimane attivo il blocco Time Base) ad un valore compreso tra i 10 e i 50ms, i risultati ottenuti dalla sperimentazione nelle misure hanno rivelato una corrente media di misura elevata e potenza dissipata dell'ordine della decina di milliWatt. Quindi è risultata una soluzione abbastanza onerosa dal punto di vista energetico. Inoltre risulta una soluzione poco performante anche in termini di area occupata e costo di realizzazione.

I limiti maggiori di questo tipo di approccio sono sicuramente la dissipazione di energia e l'occupazione di area degli elementi aggiuntivi che costituiscono l'oscillatore stesso.

II. Conversione in tempo

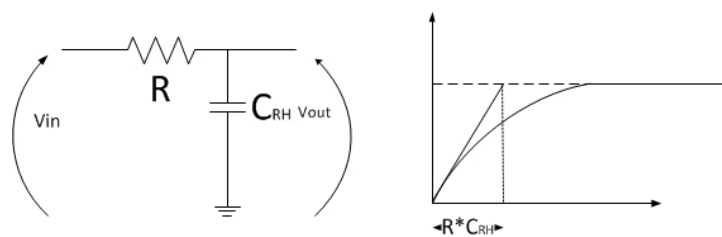


Figura 16 Rete RC per la conversione nel tempo (SX), Andamento temporale in uscita (DX)

Un diverso approccio preso in considerazione è quello di utilizzare la capacità incognita in serie ad una resistenza nota. A valle dell'applicazione di un gradino di tensione valutare l'andamento temporale del segnale di tensione ai capi della capacità. Il segnale di tipo esponenziale in uscita avrà una costante di tempo direttamente proporzionale alla capacità. Tuttavia nonostante la tecnica fosse facilmente integrabile nel sistema e molto performante

in termini di costo e spazio occupato, i valori così bassi di capacità portano a utilizzare valori di resistenza dell'ordine dei MOhm per avere costanti di tempo misurabili con unità di tempo a disposizione del microcontrollore. Si sottolinea a tal proposito che come accade in ogni sistema digitale la potenza dissipata risulta proporzionale alla frequenza di funzionamento e quindi quest'ultima va tenuta la più bassa possibile, ovviamente in un sistema basato su microcontrollore l'unità di misurazione temporale non può che essere un multiplo della frequenza di clock. Ad un valore così elevato di resistenza sono sicuramente collegati fenomeni di rumore. Questa tecnica è usata per capacimetri a basso costo che arrivano a misurare capacità dell'ordine dei nanoFarad, quindi fondamentalmente non adatta al nostro caso.

III. Misurazione a ponte

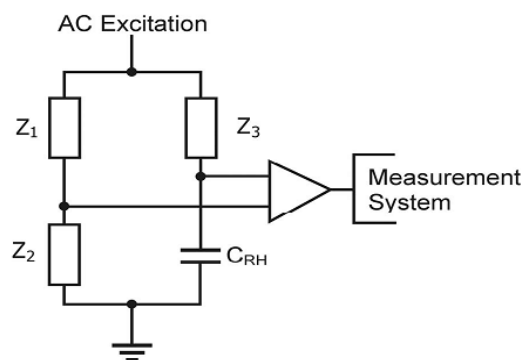


Figura 17 Schema esemplificativo per la misurazione a ponte.

La tecnica di misurazione più efficiente che si ritrova in letteratura è sicuramente quella a Ponte. Con questa tecnica si misura la differenza di tensione tra due partizioni impedenziali alimentate in alternata.

I risultati, teorici, ottenibili da questa tecnica sono sicuramente migliori se messi a confronto con gli altri metodi. Tuttavia questa tecnica necessita della combinazione di diversi circuiti analogici e di precisione con conseguente incremento di occupazione e potenza dissipata. Inoltre, ancora più limitante per lo scopo prefissato è la necessita di un segnale di alimentazione alternato con particolari specifiche, difficilmente ottenibile in un sistema digitale alimentato a batteria.

IV. Misura di Carica

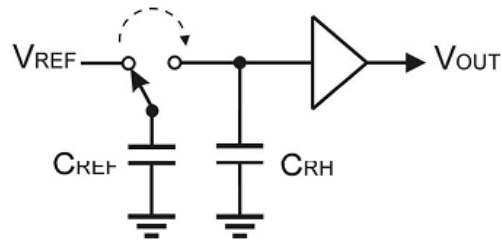


Figura 18 Schema esemplificativo per la misura di carica

L'ultimo metodo descritto si basa sulla misurazione della tensione ai capi della capacità caricata da una prefissata quantità di carica. Si carica una capacità di riferimento con una tensione nota, ottenendo una carica pari a $Q=C_{ref} \cdot V_{ref}$. Si trasferisce, quindi, la carica accumulata sulla capacità incognita. Supponendo idealmente che la carica totale rimanga costante, leggendo la tensione ai capi delle capacità collegate si può risalire al valore incognito tramite $C_{rh} = C_{ref} \cdot (V_{ref}/V_{out} - 1)$. Ovvimente le ipotesi di idealità sono il primo limite con cui si scontra questo approccio. Infatti, la non idealità di interruttori analogici e il conseguente fenomeno del Charge injection sommato ai parassitismi e alle correnti di leakage, limitano la precisione che si riesce ad ottenere. Tuttavia la semplicità del circuito e della misura da effettuare unita alle grandezze in gioco fanno di questo metodo un punto di partenza molto appetibile.

V. Capacimetro a Carica

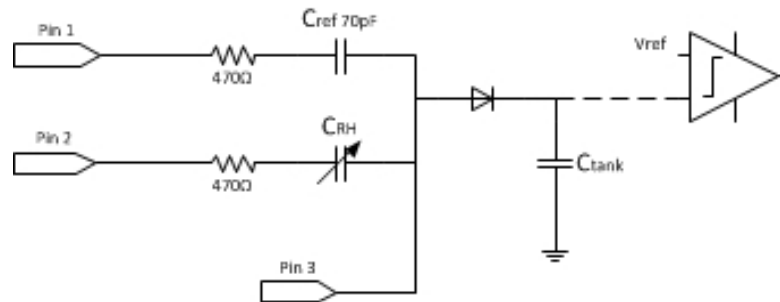


Figura 19 Circuito utilizzato per la tecnica del Capacimetro a Carica

Le specifiche del sistema e le linee guida di progetto hanno portato alla ricerca di un approccio che innanzitutto, utilizzi il minor numero di componenti possibile e che sia facilmente realizzabile su PCB, ed inoltre, abbia il consumo energetico il più contenuto possibile ed infine che la tecnica sia attuabile tramite microcontrollore. Le analisi delle varie tecniche e le suddette specifiche hanno fatto optare per un metodo che risulta essere l'evoluzione della misurazione di carica.

Alla base di questa tecnica c'è l'idea di misurare la carica accumulata sulla capacità incognita C_{RH} confrontandola con la carica accumulata su una capacità nota C_{ref} . In pratica si misura il numero di volte che la carica immagazzinata in C_{ref} deve essere trasferita in una capacità serbatoio affinché la tensione su quest'ultima raggiunga una tensione di riferimento nota. Spiegando in dettaglio i passi da seguire per effettuare la misurazione se ne coglie meglio il principio che ne è alla base, si faccia riferimento alla figura. Si stabilisce una tensione di riferimento V_{ref} ad un valore sufficientemente basso (il significato ingegneristico sarà chiarito in seguito) affinché l'uscita del comparatore sia alta quando il valore sulla Capacità serbatoio (da ora in avanti C_{tank}) supera questo valore di tensione. Si pone il ramo inferiore, quello della capacità da misurare (C_{RH}) ad alta impedenza, in modo da non permettere che scorra corrente in questo ramo. Si ipotizzi di avere come condizione iniziale tensione nulla per tutte le capacità. A questo punto applicando un gradino di tensione al Pin 1 pari a V_{dd} e trascurando la resistenza serie (inserita per limitare la corrente erogata dal pin del microcontrollore), si ottiene una tensione su C_{tank} secondo il partitore capacitivo.

$$V_{C_{tank}} = \frac{C_{ref}}{C_{tank} + C_{ref}} (V_{dd} - V_{diode})$$

Quando si riporta il valore di tensione al Pin 1 a zero il diodo si polarizza in inversa garantendo che la tensione su Ctank non vari. Considerando ora il valore di Ctank diversi ordini di grandezza superiore a Cref la precedente equazione diventa con buona approssimazione:

$$V_{C_{tank}} \approx \frac{C_{ref}}{C_{tank}} (V_{dd} - V_{diode})$$

Il valore di $V_{C_{tank}}$, visti i valori in gioco, risulta sicuramente trascurabile se confrontato con V_{dd} . Quindi si ripete l'applicazione del gradino al pin 1, a questo punto però la tensione già presente V^* su $C_{V_{tank}}$ farà in modo che il partitore capacitivo sarà approssimabile come:

$$V_{C_{tank}} \approx \frac{C_{ref}}{C_{tank}} (V_{dd} - V_{diode} - V^*)$$

Questo valore V^* è del tutto influente ai fini del calcolo finale. Possiamo approssimare che si dovrà eseguire l'operazione di carica e scarica della capacità un numero finito di volte N_{Cref} affinché si raggiunga il valore di V_{ref} ai capi di C_{tank} , pari a:

$$N_{Cref} \approx \frac{V_{ref}}{\frac{C_{ref}}{C_{tank}} * (V_{dd} - V_{diode} - V^*)}$$

Vista la simmetria del circuito è facile ripetere la stessa procedura ma coinvolgendo C_{RH} invece di C_{ref} . Cioè si pone in alta impedenza il ramo relativo alla capacità di riferimento e si impongono una successione di gradini al Pin 2. Si ottiene come conteggio N_{CRH} :

$$N_{CRH} \approx \frac{V_{ref}}{\frac{C_{RH}}{C_{tank}} * (V_{dd} - V_{diode} - V^*)}$$

Quindi considerando il rapporto dei due conteggi:

$$\frac{N_{Cref}}{N_{CRH}} = \frac{\frac{V_{ref}}{\frac{C_{ref}}{C_{tank}} * (V_{dd} - V_{diode} - V^*)}}{\frac{V_{ref}}{\frac{C_{RH}}{C_{tank}} * (V_{dd} - V_{diode} - V^*)}} = \frac{C_{RH}}{C_{ref}} \rightarrow \boxed{C_{RH} = C_{ref} * \frac{N_{Cref}}{N_{CRH}}}$$

Ricapitolando la misura consiste nel conteggio di quante volte bisogna applicare un gradino di tensione in ingresso affinché C_{tank} raggiunga V_{ref} ai suoi capi, prima tramite la capacità di

riferimento e poi tramite la capacità incognita. Si calcola, quindi, il rapporto dei conteggi al fine di risalire al rapporto tra le due capacità. E' chiaro a questo punto il limite fondamentale di questa tecnica: la conoscenza più o meno precisa della capacità di riferimento si riflette in maniera diretta sulla precisione del risultato.

Si sottolinea che l'approssimazione forse più grossolana fatta è quella di considerare la tensione presente su C_{tank} ad ogni passo fosse costante che è chiaramente errato. Tuttavia, anche se questa è funzione del tempo, può essere inglobata nel fattore moltiplicativo che come si vede nel penultimo passaggio matematico non influenza il risultato finale avendo ugual andamento e valori molto vicini sia per la misurazione di N_{Cref} che per N_{Crh} . E risultati sperimentali ne confermano la veridicità.

Dimensionamento

Di seguito riportiamo i valori dei componenti utilizzati, in particolare si sottolinea l'utilizzo del diodo scelto per il tempo di recovery molto basso e l'utilizzo di più condensatori in parallelo per creare la capacità di riferimento il più precisa possibile

R1 = R2 =	470 Ohm
C_{ref} =	33pF con tolleranza 1%
	39pF con tolleranza 1%
	1pF con tolleranza 0.1pF
Diodo =	1SS400T1G
C_{tank} =	1uF

Tabella 4 Tabella riassuntiva del dimensionamento per il circuito realizzato

Algoritmo implementato

Il Firmware realizza l'algoritmo descritto dal diagramma di flusso. Nella procedura si utilizza oltre il comparatore interno al microcontrollore collegato ad un ramo alla capacità C_{tank} e si è configurato l'altro ingresso collegato alla periferica FVR (Fixed Voltage Reference) per garantire un riferimento stabile e indipendente dalla tensione di alimentazione. Questo è indispensabile in quanto la tensione di alimentazione durante tutta la vita della batteria varierà tra 3V e 2,5V compromettendo la ripetibilità della misurazione, se non si utilizzasse l'accorgimento appena citato. Si effettua la seguente procedura una volta per C_x e una volta per C_{ref} :

1. Si inizializza una variabile di conteggio COUNT a zero.
2. Si accende e si configura la periferiche del FVR e si attende che questo raggiunga il valore di regime.
3. Si accende e si configura il comparatore.
4. Si scaricano tutte le capacità.
5. Si configura ad alta impedenza il ramo che non si vuole misurare.
6. Si porta il ramo che si vuole misurare a V_{dd} .
7. Si incrementa la variabile COUNT.
8. Si controlla se il comparatore è scattato
9. In caso affermativo si esce dal ciclo altrimenti si resetta la capacità sotto misura portando il ramo di interesse a massa e si ricomincia dal punto 6.

Al termine della procedura COUNT conterrà di conteggi ottenendo nei due casi N_{Cref} e N_{Cx} .

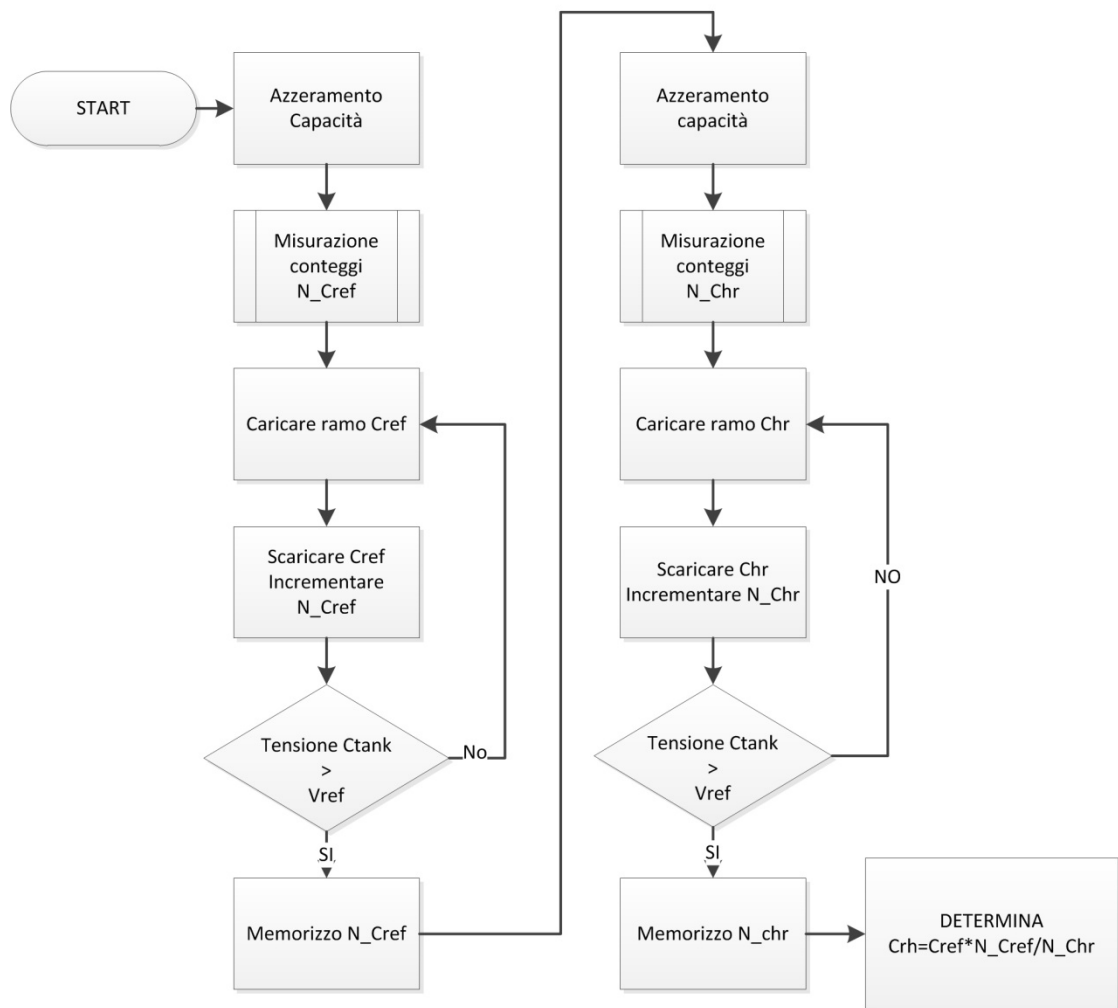


Figura 20 Algoritmo implementato

Come è presumibile i due valori risultanti sono molto vicini tra loro. Al fine di lavorare con numeri interi per motivi di ottimizzazione e occupazione di codice compilato e facilità di manipolazione dei dati. Il calcolo che si effettua è: $N_{Cx} * 1024 / N_{Cref}$. E si memorizza soltanto la parte intera dell'operazione. Questo risultato viene poi memorizzato. Nella prima fase di sviluppo e debug, questo numero è stato trasmesso via seriale al PC e quindi opportunamente convertito in umidità. Nella fase successiva viene effettuata l'interpolazione della tabella di calibrazione come descritto nel paragrafo 5 (Calibrazione) e si ottiene direttamente il valore di umidità corretto.

Una volta ricevuto il valore dato dal rapporto dei conteggi per ottenere il valore di umidità rilevato è stata applicato il legame $RH_{\%}(C_x)$ dato:

$$C_{RH} = \frac{N_{Cref}}{N_{Crh}} * C_{ref} = C_0(1 + K * RH)$$

$$RH_{\%} = \left(\frac{N_{Cref}}{N_{Crh}} * \frac{C_{ref}}{C_0} - 1 \right) * \frac{1}{K}$$

con

- $C_0 = 70\text{pF}$
- $K = 3420 * 10^{-6}$

Validazione dei dati

Per valutare il principio di funzionamento del circuito calcoliamo fissati i parametri del progetto il valore atteso di conteggi.

Per verificare il corretto funzionamento del circuito sono state effettuate delle misurazioni variando la capacità. Si è predisposta sulla scheda di prototipazione 4 di capacità a bassa tolleranza da collegabili in parallelo tra loro attraverso jumper. Lo schema circuitale è riportato in figura. In questa configurazione la capacità C_{ref} utilizzata è di valore nominale 80pF.

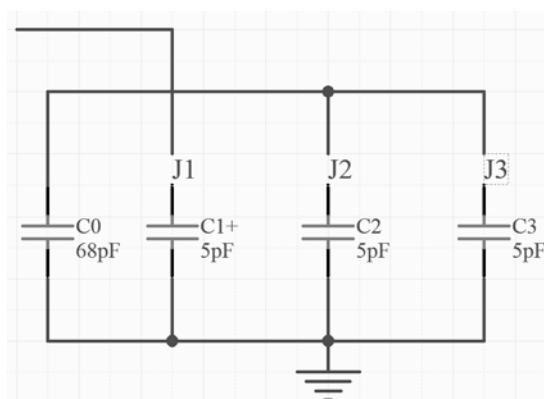


Figura 21 Circuito di Test per la misurazione dell'umidità

Jumper inserito	Conteggio N_{Cref}	Conteggio N_{Cx}	Capacità Calcolata (pF)	Capacità nominale (pF)	Errore (pF)
J1	731	662	70,58678	73	2,41322
J2	731	663	70,69421	73	2,30579
J3	731	664	70,80165	73	2,19835
J2+J3	731	720	76,81818	78	1,18182
J1+J2	731	725	77,35537	78	0,64463
J1+J3	731	725	77,35537	78	0,64463
J1+J2+J3	731	779	83,15702	83	-0,15702

Come si nota dalla tabella l'errore di valutazione della capacità diminuisce avvicinandosi al valore di C_{ref} , così come ci si aspetta teoricamente.

3. Blocco di misurazione della temperatura

Circuito realizzato

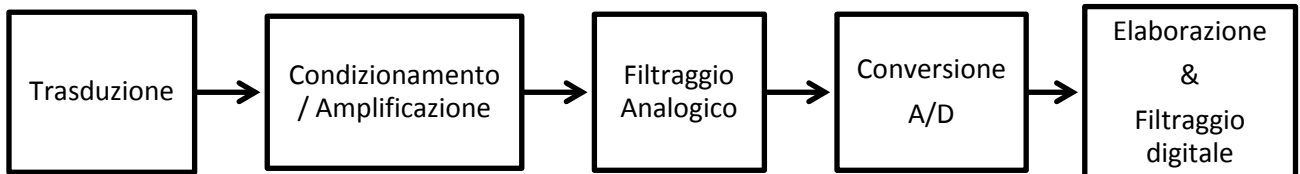


Figura 22 Catena di misura

Per comprendere meglio quale sia stato il lavoro svolto e quali i passaggi logici che hanno portato al risultato finale, riassumiamo quali sono gli elementi della catena di misura. Innanzitutto va scelto il trasduttore, ovvero l'elemento sensibile che reagisca alla grandezza e che dia in uscita una grandezza elettrica (tensione o corrente) univocamente legata alla grandezza da misurare, la grandezza elettrica deve essere convertita in digitale in modo che possa essere elaborata, memorizzata, trasmessa o visualizzata. Ovviamente prima che possa avvenire la conversione il segnale elettrico generato dal trasduttore deve essere processato affinché sia campionabile dal convertitore.

Una volta scelto il trasduttore per i motivi già illustrati, si è dovuto vagliare quale fosse il metodo di condizionamento del segnale più adeguato. In letteratura esistono diverse tecniche per la misurazione della variazione di resistenza che sono state esaminate (15). E' chiaro che

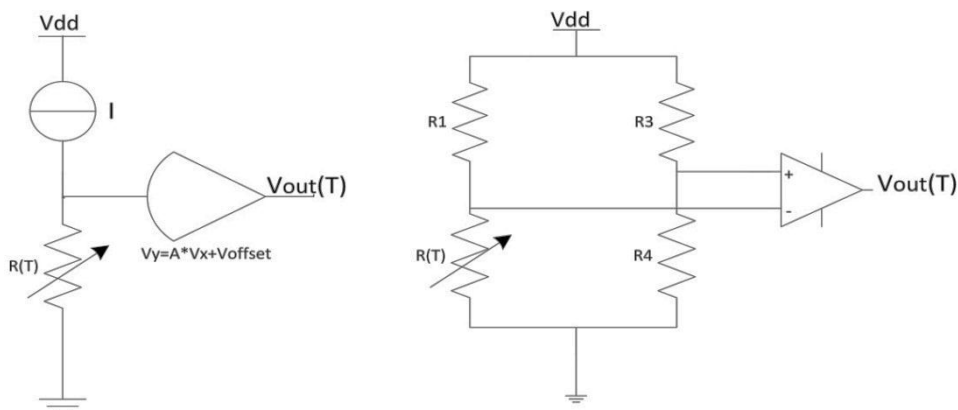


Figura 23 Circuiti di condizionamento per termoresistenza

la tecnica più immediata sia quella di misurare la tensione ai capi della resistenza quando questa è attraversata da una corrente costante e di valore noto. Va quindi amplificata la tensione ed effettuata la conversione in digitale. Tuttavia per raggiungere valori adeguati di risoluzione lo stadio di condizionamento necessita oltre che di un'amplificazione adeguata anche di un offset di tensione tale che il range di valori di tensione in uscita sia coerente con il convertitore analogico-digitale. Questo particolare comporta un aumento di complessità del circuito oltre che un aumento di consumo di energia. Un'alternativa largamente utilizzata che risolve questo tipo di problema e che migliora drasticamente le prestazioni dello stadio di condizionamento è quella riportata sulla destra della figura 2-5 nota come configurazione a "ponte di wheatstone". Si amplifica la differenza di tensione tra due rami del ponte risolvendo il problema dell'offset. La necessità di un blocco di condizionamento INA (Instrumentation Amplifier) comporta in ogni caso una certa dipendenza di spazio occupato e un aumento di costo. Si è cercato di trovare una soluzione che superasse questi problemi e riducendo al minimo il numero di componenti utilizzati minimizzando così costi e spazio occupato su scheda e al contempo permettesse una risoluzione adeguata. Si è quindi deciso di omettere totalmente lo stadio di amplificazione del segnale e adattare invece il range di ingresso del convertitore. Cioè si sono create dei riferimenti per il convertitore AD interno al

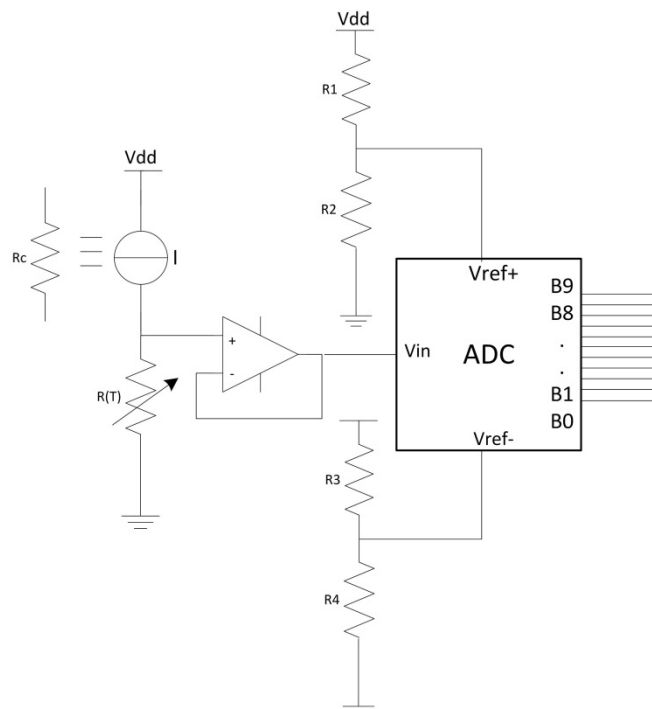


Figura 24 Circuito di condizionamento realizzato

microcontrollore in modo da posizionare il valore massimo e quello minimo di tensione convertibile in corrispondenza del valore di tensione che si ottengono per temperatura minima e massima leggibili dal sistema. Il buffer riportato in figura è del tutto concettuale.

Dimensionamento del circuito

Passiamo ora alle scelte progettuali effettuate nel dimensionamento del suddetto circuito e alle motivazioni che hanno portato a determinati valori di componenti.

La prima specifica presa in considerazione è stato il limite di corrente che può attraversare la termoresistenza specificata dal costruttore senza compromettere il funzionamento:

- Corrente massima in continua: $I_{cont} = 0,1 \text{ mA}$
- Corrente massima: $I_{MAX} = 1 \text{ mA}$

Questo determina il valore del generatore di corrente I realizzato tramite una resistenza di valore elevato.

$$R_c = \frac{V_{dd}}{I_{cont}} = \frac{3V}{0.1mA} = 30K\Omega$$

Al fine di avere un buon margine dalla corrente massima e considerando i valori commerciali si è scelto come valore di $R_c = 39K\Omega$. Ottenendo così valori di correnti di circa $77\mu A$

Con questo valore di resistenza si è passato a valutare valori massimi e minimi di resistenze e quindi di tensioni esibite ai morsetti del sensore

- $R = R_0(1 + A * T + BT^2)$
 - $R_0 = 2785.85 \Omega$
 - $A = 0.0030659$
 - $B = 3.4 * 10^{-7}$

Ovvero la relazione tra temperatura e tensione da campionare V_{in} è data:

$$V_{in} = V_{dd} * \frac{R_0(1 + A * T)}{R_0(1 + A * T) + R_c} \approx V_{dd} \frac{R_0}{R_c} (1 + AT)$$

Che visti i valori di A e di R_c scelti può essere facilmente approssimata come lineare:

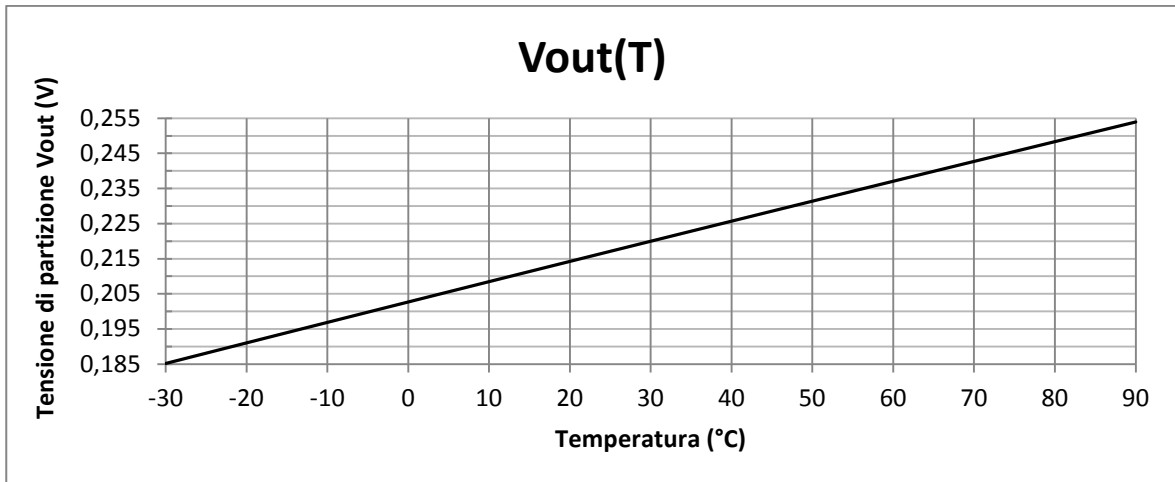


Grafico 1 Relazione tra la tensione in uscita e la temperatura letta dal sensore

Considerando le specifiche $T_{\min} = -30^{\circ}\text{C}$ $T_{\max} = 90^{\circ}\text{C}$ $\Delta T = 120^{\circ}\text{C}$

- $R(T = -30^{\circ}\text{C}) = 2529,643 \text{ Ohm}$
- $R(T = 90^{\circ}\text{C}) = 3554,590 \text{ Ohm}$

E quindi i corrispondenti valori di tensione.

- $V_{out}(T = -30^{\circ}\text{C}) = 0,1852 \text{ V}$
- $V_{out}(T = 90^{\circ}\text{C}) = 0,2539 \text{ V}$

Si è quindi dovuto dimensionare le partizioni resistive per ottenere valori V_{ref+} e V_{ref-} :

$$V_{ref+} = \frac{R_1}{R_2 + R_1} * V_{dd}$$

$$V_{ref-} = \frac{R_3}{R_3 + R_4} * V_{dd}$$

$$\begin{cases} R_1 = 39 \text{ KOhm} \\ R_2 = 2400 \text{ Ohm} \end{cases}$$

$$V_{ref+} = 0,174 \text{ V}$$

$$\begin{cases} R_3 = 39 \text{ KOhm} \\ R_4 = 3600 \text{ Ohm} \end{cases}$$

$$V_{ref-} = 0,254 \text{ V}$$

Si è ottenuto così una risoluzione utilizzando l'ADC a 10bit:

$$LSB = \frac{FSR}{2^n} = \frac{0,254V - 0,174V}{2^n} = 78,12\mu V$$

Che con buona approssimazione corrisponde a

$$\Delta R = \frac{78,12\mu V}{77\mu V} = 0,101450hm \rightarrow \Delta T = 0,118^\circ C$$

Ovviamente questa non sarà la risoluzione di misura reale ma piuttosto il limite teorico sotto il quale non si può scendere solo con tecniche di sovracampionamento e filtraggio tenendo presente che comunque non porta in conto gli effetti di tolleranza non idealità e rumore del circuito.

La conversione in digitale viene effettuata nel range di tensione che va da V_{ref-} a V_{ref+} e pertanto detta V_{in} la tensione in ingresso all'ADC si ha:

$$V_{in} = \frac{(V_{ref+} - V_{ref-})N_{ADC}}{2^n} + V_{ref-}$$

Ma del resto:

$$V_{in} = V_{dd} * \frac{R(T)}{R(T) + R_c} \approx \frac{V_{dd}}{R_c} R_0 * (1 + A * T)$$

$$\frac{V_{dd}}{R_c} R_0 * (1 + A * T) = \frac{(V_{ref+} - V_{ref-})N_{ADC}}{2^n} + V_{ref-}$$

$$N_{adc} = \frac{\frac{V_{dd}}{R_c} R_0 * (1 + A * T) - V_{ref-}}{\frac{(V_{ref+} - V_{ref-})}{2^n}} \rightarrow N_{adc} = m * T + q$$

$$T = \left(\frac{\left[\frac{(V_{ref+} - V_{ref-})N_{ADC}}{2^n} + V_{ref-} \right]}{\frac{V_{dd}}{R_c} R_0} - 1 \right) * \frac{1}{A} \rightarrow T = k * N_{adc} + h$$

Queste ultime due relazioni rappresentano le relazioni esplicite $N_{adc}(T)$ e la sua inversa $T(N_{adc})$.
Riportate nei grafici.

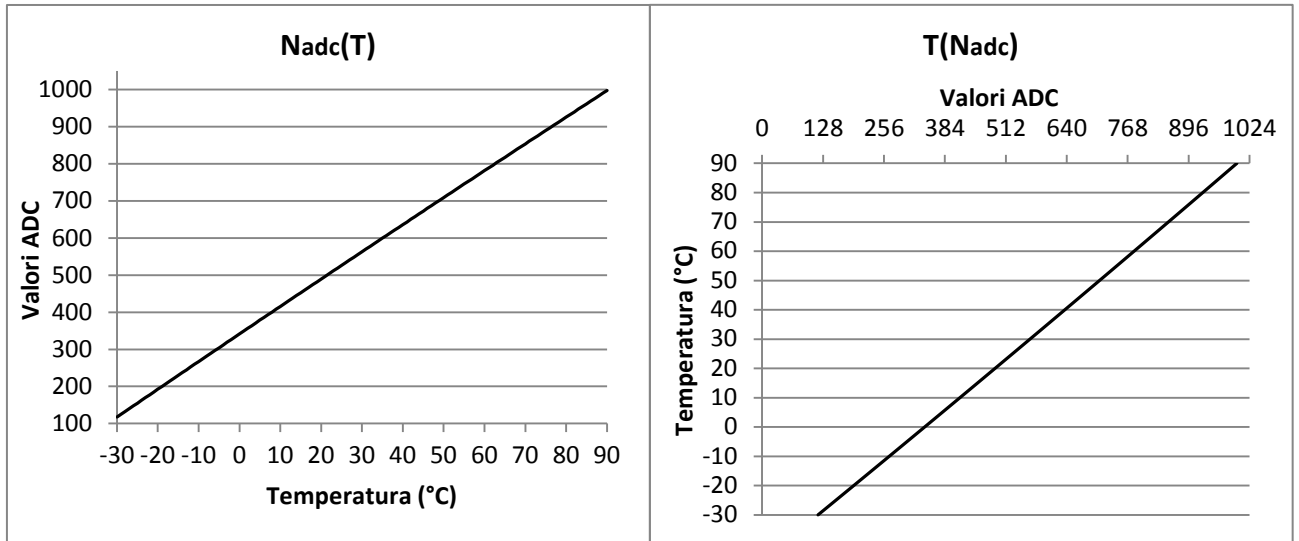


Grafico 2 Relazione tra temperatura e valore dell'ADC

Il legame lineare risulta determinante per la taratura e la complessità del firmware che elaborerà i dati acquisiti.

Uno degli aspetti che è fondamentale nei sistemi alimentati a batteria è la dipendenza della circuiteria dalla tensione di alimentazione visto che tra una sostituzione o ricarica della batteria e la successiva la variazione della tensione erogata può essere considerevole. Dalla relazione precedente sembrerebbe il valore di Vdd entri in gioco tuttavia è sufficiente sostituire i valori di Vref+ e Vref- per rendersi conto che la dipendenza è solo apparente:

$$T = \left(\frac{\left[\left(\frac{R_1}{R_2 + R_1} * \cancel{V_{dd}} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} * \cancel{V_{dd}} \right) \frac{N_{ADC}}{2^n} + \frac{R_3}{R_3 + R_4} * \cancel{V_{dd}} \right]}{\frac{\cancel{V_{dd}} R_0}{R_c}} - 1 \right) \frac{1}{A}$$

$$T = \left(\frac{\left[\left(\frac{R_1}{R_2 + R_1} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) * \frac{N_{ADC}}{2^n} + \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right]}{\frac{R_0}{R_c}} - 1 \right) \frac{1}{A}$$

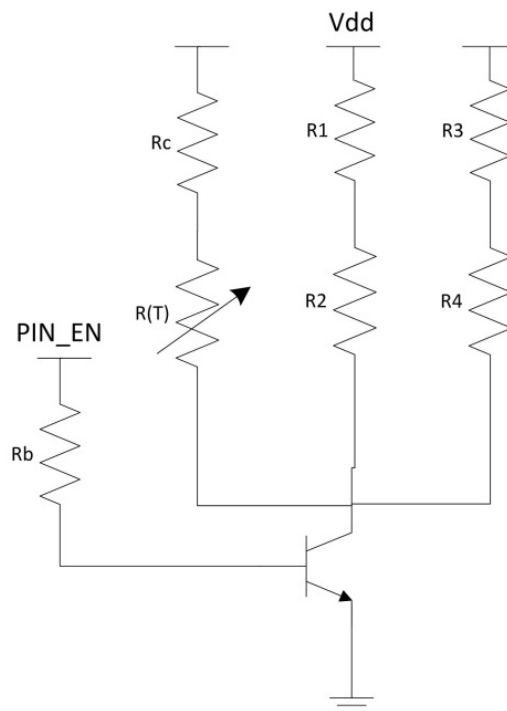


Figura 25 Circuito completo per la conversione temperatura-tensione

Prima di arrivare al circuito definitivo però va ricordato che una delle peculiarità del circuito è il basso consumo e per come stiamo considerando a questo punto il blocco abbiamo tre rami resistivi che dissipano costantemente una certa quantità di corrente che seppur minima impatterebbe drasticamente sul consumo globale e quindi sulla durata della batteria. La soluzione a questo problema è stata individuata inserendo un transistor che funzioni da interruttore verso massa per tutti e tre i rami. Il BJT utilizzato andrà a lavorare in saturazione in quanto sarà acceso e spento cambiando la tensione di un pin del microcontrollore dedicato alla funzione. La corrente di base sarà: $I_b = (V_{dd} - V_{be}) / R_b = 1\text{mA}$ con $V_{dd} = 3\text{V}$ $V_{be} = 0,7\text{V}$ $R_b = 2200\text{Ohm}$. Mentre

$$I_c = \frac{V_{dd}}{R_c + R(T)} + \frac{V_{dd}}{R_1 + R_2} + \frac{V_{dd}}{R_3 + R_4} \approx 230\mu\text{A}$$

Con questi presupposti la tensione Collettore-Emettore sarà inferiore ad 1mV e le misure sul dispositivo realizzato confermano tale previsione. Ovviamente si potrebbe obiettare come l'introduzione del dispositivo alteri i precedenti dimensionamenti, tuttavia lo scostamento dell'ordine del millivolt introdotto è ben al di sotto delle variazioni di tensioni dovute alle tolleranze dei componenti ai parassitismi del circuito reale.

Un ulteriore aspetto che va tenuto in conto nella progettazione dei circuiti sia analogici sia digitali è la presenza inevitabile del rumore. In un sistema di campionamento risulta critica se

il livello del rumore supera la risoluzione del convertitore stesso. Le sorgenti di rumore sono sicuramente rappresentate dalle resistenze che hanno densità spettrale:

- $\overline{V_{Rc_n}^2} = 4kTR_c$
- $\overline{V_{Rt_n}^2} = 4kTR_t$
- $\overline{V_{R1_n}^2} = 4kTR_1$
- $\overline{V_{R2_n}^2} = 4kTR_2$
- $\overline{V_{R3_n}^2} = 4kTR_3$
- $\overline{V_{R4_n}^2} = 4kTR_4$

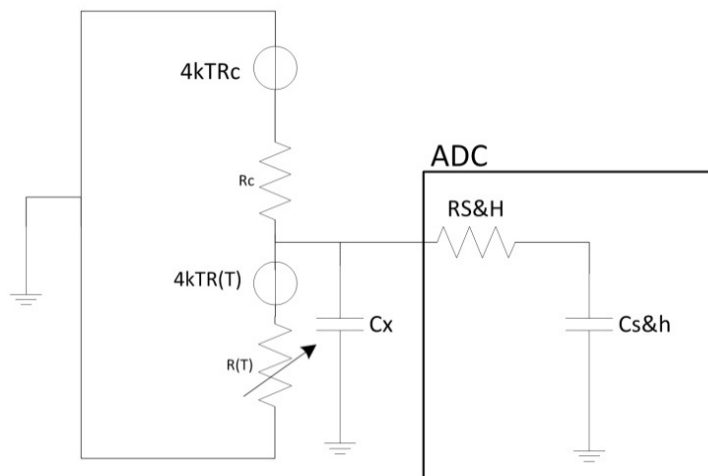


Figura 26 Contributi di rumore nel circuito di misurazione della temperatura

Il ramo rappresentato da R_c e $R(T)$ si ritrova in ingresso e viene filtrato dalla rete R-C del Sample&Hold del ADC.

$$\overline{V_{in_n}^2} = \sqrt{\left[4kTR_t \left(\frac{R_c}{R_c + R_t} \right)^2 + 4kTR_c \left(\frac{R_t}{R_c + R_t} \right)^2 \right] * \frac{1}{2\pi(R_{s\&h} + R_c // R_t)C_{s\&h}}}$$

$$\sqrt{\overline{V_{in_n}^2}} = 26,6\mu V$$

Siccome questo valore risulta troppo elevato è stato inserito un condensatore C_x di filtraggio all'ingresso del ADC.

$$C_x = 10nF$$

Con un notevole miglioramento in termini di rapporto segnale rumore del segnale campionato infatti il rumore raggiunge valori decisamente inferiori calcolabile con buon approssimazione:

$$\overline{V_{in_n}^2} = \sqrt{\left[4kTR_t \left(\frac{R_c}{R_c + R_t}\right)^2 + 4kTR_c \left(\frac{R_t}{R_c + R_t}\right)^2\right] * \frac{1}{2\pi(R_c // R_t)C_x}} = 1,53\mu V$$

Ovviamente appesantendo capacitivamente il nodo viene alterata la dinamica elettrica della lettura. Infatti ora la tensione in ingresso all'ADC seguirà il noto andamento esponenziale con costante di tempo:

$$\tau = R_c // R_t * C_x = 30\mu s$$

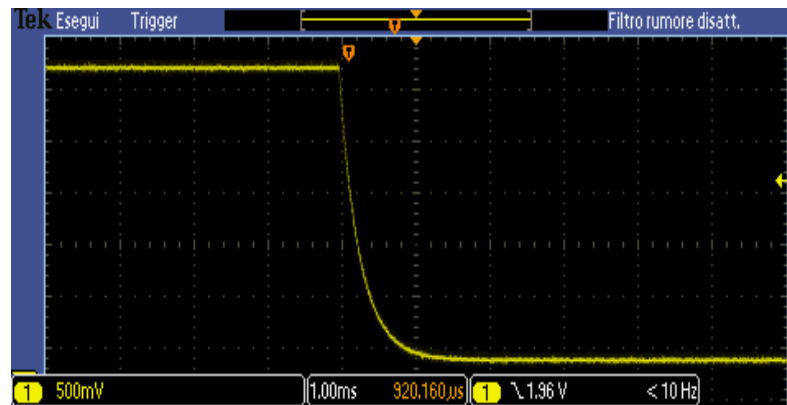


Figura 27 Andamento temporale della tensione ai capi del trasduttore all'attivazione del transistor

Sarà quindi compito del firmware :

- attivare il circuito
- attendere una tempo sufficientemente lungo (>5τ)
- iniziare il campionamento
- quindi disattivare il transistor.

Il tempo che intercorre tra l'attivazione e lo spegnimento del circuito impatta sulle richieste energetiche della misurazione. Questo implica un trade-off tra la precisione richiesta, cioè rapporto segnale rumore e consumi. Infatti riducendo il valore di Cx aumenta la banda di integrazione del rumore peggiorando il rapporto segnale rumore e di conseguenza la sensibilità del sistema ma si riducono i tempi in cui deve restare attivo il circuito e quindi consumi.

In fase sperimentale si è scelto di fissare la risoluzione di lettura della temperatura a 0,5°C. Il motivo di questa scelta risiede nel fatto che problematiche di conservazione delle opere d'arte non necessitano precisione maggiore e su di una scala compresa tra -30°C e 90°C abbiamo in totale 240 valori numerici di codifica facilmente memorizzabili in una semplice variabile intera a 8 bit.

Il tempo che intercorre tra l'attivazione e lo spegnimento del circuito impatta sulle richieste energetiche della misurazione. Questo implica un trade-off tra la precisione richiesta, cioè rapporto segnale rumore e consumi. Infatti riducendo il valore di C_x aumenta la banda di integrazione del rumore peggiorando il rapporto segnale rumore e di conseguenza la sensibilità del sistema ma si riducono i tempi in cui deve restare attivo il circuito e quindi consumi.

In fase sperimentale si è scelto di fissare la risoluzione di lettura della temperatura a 0,5°C. Il motivo di questa scelta risiede nel fatto che problematiche di conservazione delle opere d'arte non necessitano precisione maggiore e su di una scala compresa tra -30°C e 90°C abbiamo in totale 240 valori numerici di codifica facilmente memorizzabili in una semplice variabile intera a 8 bit.

Campionamento e filtraggio.

Il blocco del firmware adibito alla misurazione della temperatura coinvolge l'attivazione e la configurazione del ADC interno al microcontrollore. Il convertitore analogico-digitale integrato nel microcontrollore è di tipo SAR (ad approssimazioni successive) a 10-bit. La periferica permette di stabilire un tempo T_{ADC} utilizzato come tempo base di conversione, una conversione completa necessiterà di 11 T_{ADC} più un tempo di acquisizione T_{acq} per il sampling del segnale. T_{adc} è stato fissato a 1 μ s mentre il T_{acq} è stato calcolato e pari a 5,3 μ s. Quindi ogni conversione necessiterà di $T_{conv}= 16,3\mu$ s. In fase di sperimentazione si è rilevato la presenza di rumore sulla misura ed è stato implementato un filtraggio ai dati acquisiti. Per effettuare questo filtraggio ogni misurazione sono stati acquisiti 256 campioni in modo da poter effettuare un filtraggio passa-basso semplicemente effettuando la media di questi campioni. Il firmware è stato implementato con la seguente procedura:

- Attivazione e configurazione dell'ADC.
- Attivazione del Transistor di alimentazione dei riferimenti.
- Attesa del tempo di assestamento.
- 256 Campionamenti della tensione.
- Spegnimento della periferica.
- Calcolo della media.

Gestione della batteria

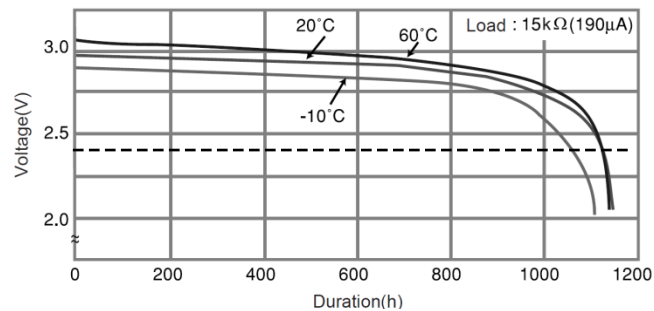


Figura 28 Caratteristica tensione durata della batteria al variare della temperatura

Un ulteriore aspetto che ha richiesto cura e attenzione è stato quello della gestione della batteria e la sua stima della durata. Una stima seppur grossolana per determinare la carica residua della batteria è quella di misurare la tensione ai suoi capi. Infatti considerando le caratteristiche della batteria fornite dal produttore si osserva che la tensione a carico fisso ha una decadimento lineare molto lento fino all'esaurimento (circa il 90% della carica) oltre il quale la curva presenta un ginocchio per poi decadere rapidamente. Quindi misurando semplicemente la tensione presente all'alimentazione riusciamo a fissare un limite oltre il quale consideriamo la batteria esaurita. Per effettuare questa stima nella maniera più semplice e economica possibile si è pensato di utilizzare parzialmente lo stesso circuito della temperatura. Si misura la tensione presente sul ramo resistivo prima utilizzato per generare V_{ref+} il fondo scala dell' ADC:

$$V_{batt} = \frac{R_1}{R_2 + R_1} * V_{dd}$$
$$\begin{cases} R_1 = 39\text{ K}\Omega \\ R_2 = 3600\text{ }\Omega \end{cases}$$
$$V_{batt} = 0,0845 * V_{dd}$$

Nell'utilizzare l'ADC ovviamente indispensabile usare un riferimento in tensione indipendente dall'alimentazione stessa. Si è utilizzato la tensione generata dalla periferica FVR interna al microcontrollore di 1.024V ottenendo un LSB:

$$LSB = \frac{FSR}{2^n} = 1\text{mV}$$

Più che accettabile per lo scopo.

4. Validazione del funzionamento

Per poter validare il corretto funzionamento del sistema visualizzare la risposta del sensore alle variazioni di temperatura e umidità si è sviluppato un programma in ambiente Labview con funzione di elaborazione e visualizzazione dei dati.

Quindi utilizzando gli algoritmi scritti per le varie funzioni, misura di temperatura, umidità e tensione batteria, si è sviluppato il firmware del microcontrollore che permettesse sia l'interrogazione puntuale delle varie grandezze e che avviasse il logging continuo. Lo scambio dei dati avviene secondo lo standard seriale RS232 impostando una comunicazione a 9600 bit/s ad 8 bit con 1 bit di stop e nessun controllo. Si sono fissate dei caratteri di comando che il PC trasmette al sensore. Il sensore risponde ad ogni comando con l'echo del comando seguita da l'informazione richiesta:

- CARATTERE 'T' HEX 0x54: richiesta temperatura.
- CARATTERE 'U' HEX 0x55: richiesta umidità
- CARATTERE 'V' HEX 0x56: richiesta tensione batteria.
- CARATTERE 'L' HEX 0x4C :richiesta avvio log.
- CARATTERE 'I' HEX 0x6C :richiesta stop log.

I dati acquisiti dal PC sono poi stati decodificati ed elaborati dal software per ottenere i valori delle grandezze di temperatura, umidità e tensione di alimentazione, per poi essere visualizzati a video in grafici temporali.

Anche se in questa fase di progetto il valore dei dati letti non ha un significato metrico perché non è stato effettuato nessun tipo di taratura, è importante valutare il cambiamento delle grandezze in gioco corrisponde correttamente al cambiamento dei valori letti in termini di range di misura e variazioni temporali coerenti. Per avere dei valori coerenti a quelli degli strumenti di confronto presenti in laboratorio si è proceduto come segue:

- Il valore dell'umidità è calcolato in base al rapporto dei conteggi effettuati N_{Cref} e N_{Crh} dal microcontrollore e trasmesso via seriale al PC. Il successivo calcolo per legare il

rapporto all'umidità è effettuato dal PC lasciando il valore di C_0 modificabile. Utilizzando quindi un panno umido si è simulato sul sensore il 100% di umidità e si è corretto il valore di C_0 per far coincidere la lettura con il 100%

Il valore della temperatura è calcolato in base al valore letto dall'ADC che è trasmesso al computer. Il PC effettua i calcoli necessari lasciando modificabili i valori delle resistenze coinvolte. Si sono, quindi, corretti i valori delle resistenze al fine di far coincidere il valore letto dal sistema con quello di un termometro di precisione

Di seguito riportiamo le schermate di del software, dove si è fatto eseguire il log delle grandezze campionate ogni 1,7 secondi. Lasciando inalterate le condizioni ambientali.

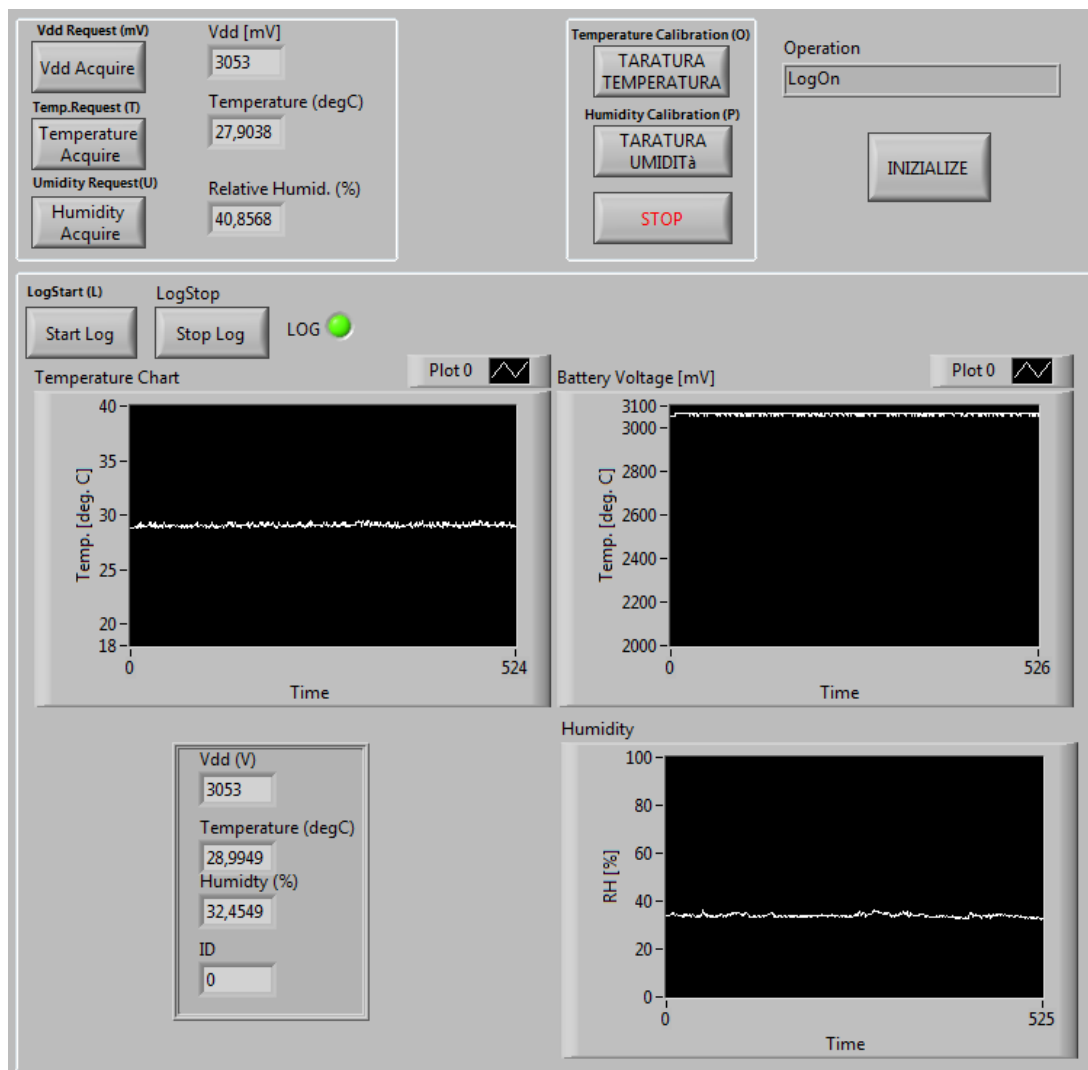


Figura 29 Software per la validazione del funzionamento - campionamento a parametri costanti

Per poter simulare il cambiamento dei parametri temperatura ed umidità si è utilizzato, un spray refrigerante che ha portato il sensore ad una temperatura di circa 0°C e una sorgente di vapore acqueo per modificare l'umidità relativa nelle vicinanze del sensore.

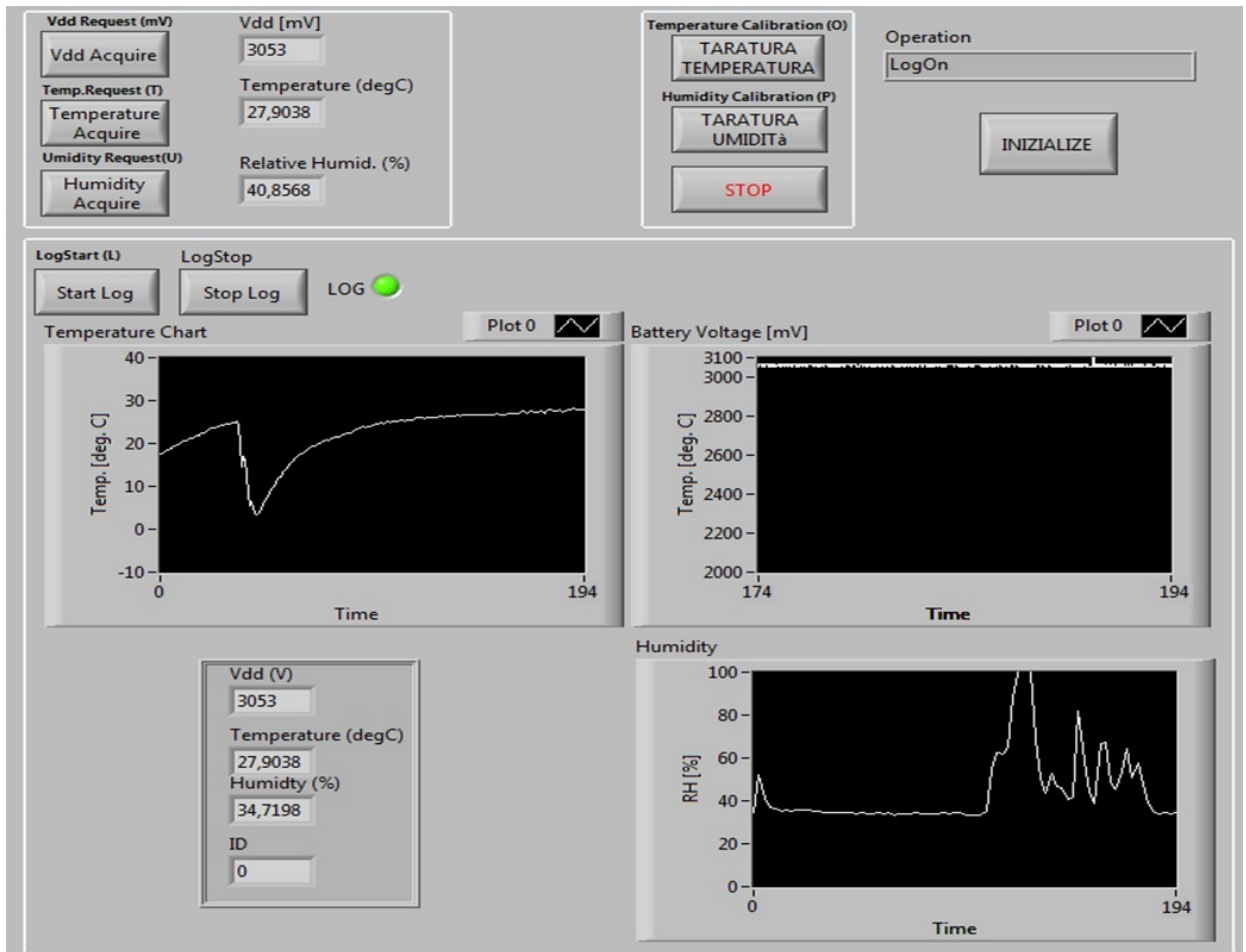


Figura 30 Software - visualizzazione del variare dei parametri ambientali

5. Calibrazione

Sia il circuito di misurazione per l'umidità sia quello della temperatura devono necessariamente essere calibrati. Infatti deviazioni dal modello ideale supposto dei vari componenti che entrano in gioco, tolleranze dei valori nominali e parassitismi di vario genere faranno in modo che i valori letti non solo si discosteranno dal valore teorico atteso ma anche più esemplari dello stesso circuito genereranno differenti risultati. Quindi ogni dispositivo andrà calibrato come ultima fase di produzione.

Benché il sensore scelto venga fornito dal produttore già tarato e corredato dalla propria caratteristica di precisione, è indispensabile correggere e calibrare il circuito di condizionamento nonché quello di conversione e filtraggio. Solitamente, in maniera del tutto generale, si procede nel seguente modo: si deve sottoporre allo strumento da tarare un campione da misurare (che deve avere un'incertezza minore della risoluzione dello strumento stesso) oppure misurare con uno strumento di precisione maggiore lo stesso campione in modo da poter calcolare l'errore di misura. Ovviamente l'errore non sarà costante nell'intero range di misura, a causa di effetti di non linearità o fenomeni di isteresi. Sarà necessario quindi misurare l'errore in punti differenti della caratteristica.

Come tecnica di taratura si è ideato una procedura che facilmente si potesse adattare ad una procedura automatizzata in modo che ogni realizzazione del sistema possa facilmente essere sottoposto a tale fase riducendo i tempi di produzione, massimizzandone la precisione e prevedendo la generazione automatica e la relativa archiviazione della reportistica.

Il sistema verrà ultimato e assemblato con tutti i dispositivi saldati ad eccezione del trasduttore che sarà inserito in un'ultima fase.

Temperatura

La procedura di taratura del sistema di misurazione della temperatura può essere effettuata in maniera abbastanza agevole. Si sottolinea che il legame tra il valore letto dall'ADC e la temperatura $N_{ADC}(T)$ è con ottima approssimazione lineare. Questo permette di memorizzare in EEPROM soltanto coefficiente angolare ed intercetta di tale legame. In fase di misura il

microcontrollore leggendo un determinato valore dell'ADC può calcolare con esattezza il valore di temperatura corrispondente. Come si deduce dalle relazioni trovate a pagina 74 i valori di M e Q che legano misurando e misura sono legati ai valori delle resistenze che compongono il sistema. In fase di taratura è sufficiente collegare al posto del sensore due valori differenti di resistenze a bassa tolleranza e bassa deriva termica per calcolare questi valori. Infatti tramite la relazione da datasheet si risale, dato il valore di resistenza, alla temperatura esatta a cui corrisponde. Quindi effettuando una misura “precisa”(l'errore di misura si ripercuote in maniera diretta sulla taratura) di resistenza che si va a collegare si calcola la temperatura corrispondente

TARATURA	[Ω]		[°C]	Letture
R1	3002	T1	25,30314871	Nadc1
R2	3589	T2	94,0286174	Nadc2

Tabella 5 Relazione tra le resistenze utilizzate per la taratura, la temperatura e i valori letti

Ipotizzando di leggere i valori N_{adc1} e N_{adc2} quando si collegano R1 e R2 rispettivamente è possibile calcolare i due valori come segue:

- $M = (T2 - T1)/(N_{adc2} - N_{adc1})$
- $Q = T1 - N_{adc1} * M$

Anche in questo caso si è preferito lavorare con valori interi ed eseguire la divisione pre-moltiplicando il numeratore per 1024 e quindi salvare soltanto la parte intera del risultato. Memorizzati i valori in EEPROM in esecuzione il microcontrollore potrà calcolare il valore di temperatura dato il valore di ADC letto.

$$T = N_{Adc} * M + Q$$

Umidità

Come è stato spiegato approfonditamente nei paragrafi precedenti la misurazione dell'umidità avviene leggendo la variazione di capacità presentata dal trasduttore. Siccome la

tecnica di misurazione è caratterizzata da non linearità l'espedito adottato è stato quello di utilizzare una *Look-up Table* come curva di caratterizzazione lineare a tratti, ovvero di popolare una tabella contenente misurando e valore letto per diversi punti della caratteristica ideale. Questa tabella viene poi memorizzata in EEPROM e utilizzata in *run-time* dal microcontrollore per ricostruire tramite interpolazione il valore corretto di umidità data la misurazione istantanea. Nell'ingegnerizzazione del processo produttivo si devono tenere sotto controllo i tempi e i costi per la messa su mercato del prodotto finale. Ovviamente il test finale può rappresentare una fase consistente di questo processo. Nel nostro caso questa fase può essere pensata facendo passare il prodotto finale in una camera climatica e con un sistema automatizzato riempire la tabella di taratura. Tuttavia inserire nella catena di produzione una camera climatica risulta un costo ingiustificato soprattutto per un prodotto con un mercato ristretto, senza considerare poi che la camera deve essere automatizzata e quindi realizzata o modificata ad hoc al fine di non allungare troppo i tempi di test. Quindi si è cercata una soluzione alternativa. Il problema è quello di poter simulare una condizione climatica specifica e precisa all'estremo della catena di misurazione al fine di poter associare a quella condizione uno specifico valore di umidità e temperatura. In effetti tutte le non idealità che determinano gli errori sistematici e non nella misura sono distribuiti a monte del

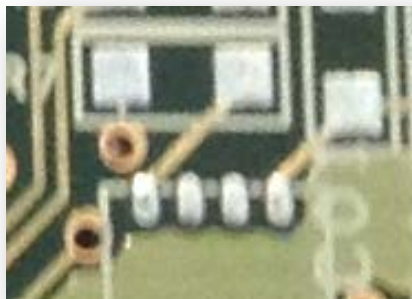


Figura 31 Particolare dei PAD del sensore del PCB realizzato

trasduttore. Risalendo la catena dal sensore verso il valore finale troviamo:

- Le capacità parassite associate ai pad e alle piste della scheda che alterano la capacità misurata
- Le resistenze parassite delle piste
- Variazioni dal valore nominale delle resistenze nei due rami del circuito

- Variazioni dal valore nominare e rumore sovrapposto al riferimento di tensione del comparatore
- Offset e altre non idealità del comparatore

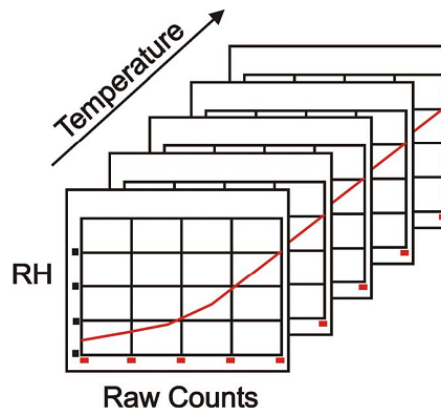


Figura 32 Variabilità dell'umidità relativa rispetto alla temperatura

L'idea è quella di spostarci leggermente sulla catena escludendo il trasduttore visto che quest'ultimo è stato tarato dal produttore, e creare una tabella di taratura che legni la capacità presente ai morsetti e l'umidità corrispondente. A questo punto si sottolinea il fatto che la misura dell'umidità è fortemente dipendente dalla temperatura ecco perché la curva di taratura deve essere ottenuta per diversi punti di temperatura e ulteriormente interpolata in base alla temperatura letta. La procedura ideata è la seguente:

1. Inseriamo un esemplare della scheda completa di sensore in camera climatica, si effettuano misure ripetute nei 5 punti di umidità stabiliti ovvero, 0%, 20%, 40%, 60%, 80% e 100% per tre differenti temperature 0 °C ,30°C e 60°C
2. Si costruiscono tre tabelle di taratura specifiche per quella scheda campione (una per ogni valore di temperatura). Nelle tabelle si associano i valori di umidità impostati in camera climatica con la media dei valori letti del rapporto $N_{Cref}/N_{Cx} * 1024$ con misure ripetute.
3. Utilizzando ora la tabella di taratura si risale all'umidità corrispondente alle capacità nelle sei configurazioni.
4. Ogni esemplare va tarato utilizzando le capacità campione: si effettuano misure ripetute collegando al posto del sensore le capacità campione in maniera sequenziale. Ovvero partendo dalla prima configurazione si collega ai contatti dove andrà saldato il sensore le capacità campione e si memorizzano in EEPROM il valore di umidità corrispondente alla capacità collegata e la media di 256 valori letti.
5. Il microcontrollore, quando sarà saldato il sensore sulla scheda, effettua una misurazione della capacità con un interpolazione lineare calcolando l'umidità effettiva.

Utilizzando il parallelo di condensatori SMD a bassa tolleranza (da 1pF con Tolleranza da 1%) per migliorarne la precisione creiamo 5 punti differenti di calibrazione. Utilizzando ora la scheda tarata potremo sapere, a meno dell'incertezza intrinseca del sensore, l'umidità corrispondente

Configurazione	Capacità Aggiunta	Capacità totale al morsetto	Umidità corrispondente (idealmente)
1	68pF+2x1pF	70pF	0%
2	5x1pF	75pF	20%
3	5x1pF	80pF	40%
4	5x1pF	85pF	60%
5	5x1pF	90pF	80%
6	5x1pF	95pF	100%

6. La comunicazione radio.

Una volta campionati i dati ambientali questi devono essere trasmessi al gateway associato e quindi trasferiti al sistema centrale House. Soprattutto per quanto riguarda l'aspetto energetico la comunicazione radio rappresenta un elemento fondamentale che entra in maniera incisiva sulle prestazioni globali. Ecco perché nel progetto si è scelto di integrare il sistema di comunicazione in radiofrequenza ideato e sviluppato da IPSES e FreeLux che risponde alle esigenze del progetto.

Il brevetto

Il sistema brevettato da FreeLux e IPSES consiste in un sistema di comunicazione a radiofrequenza per scambiare informazione attraverso la generazione di una sequenza di impulsi modulati codificando l'informazione nella spaziatura temporale degli impulsi stessi. Gli impulsi di potenza vengono generati modulando un insieme di segnali portanti. Il metodo di

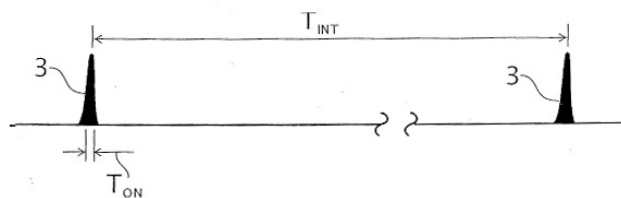


Figura 33 Rappresentazione degli impulsi successivi nel tempo

scambio di informazione risulta molto efficiente per quei dispositivi con risorse energetiche limitate e trova applicazione in condizioni di forte riflessioni o di movimento o in presenza di ostacoli. L'idea che c'è alla base prende spunto dai sistemi UWB (Ultra Wide Band) dove la generazione di impulsi di durata molto ridotta compresa tra decine di picosecondi e qualche nanosecondo fa sì che il sistema risenta pochissimo di interferenze e che permette l'applicazione anche in presenza di altri sistemi avendo un'intensità confrontabile con il rumore di fondo. Il sistema brevettato si distingue da quelli già esistenti in termini di purezza spettrale del segnale trasmesso e consumo ridotto degli apparati ricetrasmittenti utilizzabili. Riportiamo uno schema a blocchi del sistema per spiegarne il funzionamento: La posizione

relativa di un impulso e il successivo, e quindi il tempo che trascorre tra due impulsi può avere N_{LP} valori differenti, quindi ogni impulso può rappresentare un valore codificato su N_{BP} bit dove sussiste il legame $N_{BP} = \log_2(N_{LP})$. La codifica di un pacchetto può essere fatta su singoli impulsi o su gruppi di impulsi al fine di aumentare la ridondanza e l'affidabilità della tecnica. La peculiarità del sistema che lo rende molto efficiente energeticamente è data dal rapporto tra la durata dell'impulso e il tempo di intervallo tra due impulsi. L'architettura del dispositivo di trasmissione è schematizzata nel seguente diagramma:

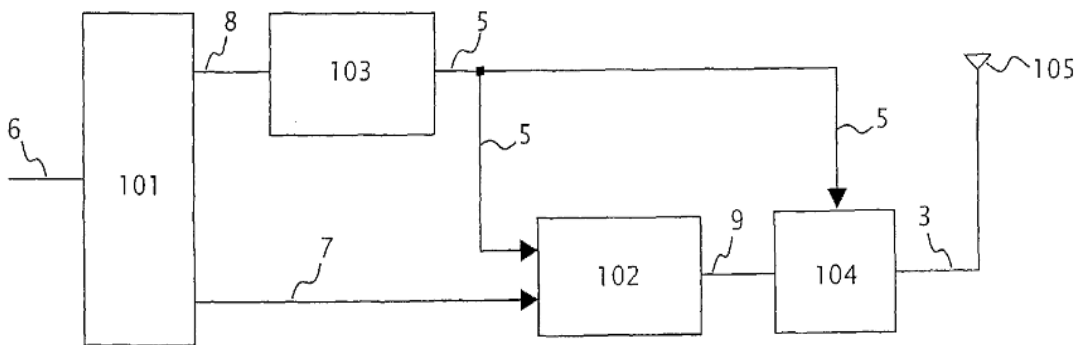


Figura 34 Schema a blocchi del sistema di trasmissione brevettato

Il blocco 101 rappresenta un'unità di controllo temporale, solitamente un microcontrollore o una rete logica dedicata, alla ricezione di un dato (6) da trasmettere viene abilitato l'oscillatore (blocco 102) tramite il segnale (7) e contemporaneamente il segnale (8) di formatura dell'impulso al blocco 103 che genererà la corretta modulazione nel segnale (5) che attiverà l'oscillatore 102 e l'amplificatore di potenza 104. La modulazione dell'amplificatore di potenza deve essere il quanto più lineare possibile. È fondamentale la relazione temporale e la corretta generazione dei segnali nei vari punti del sistema. La figura è rappresentativa dei legami temporali che devono sussistere. Per evitare consumi ingiustificati e quindi ridurre l'efficienza è fondamentale mantenere nulla la corrente assorbita dal sistema nell'intervallo tra due impulsi e il tempo in cui l'oscillatore rimane acceso il più ridotto possibile. Per evitare la formazione di spurie non deve essere presente jitter durante il periodo di trigger dell'oscillatore. Quindi è necessario particolare cura nel progetto del blocco oscillatore. È ad esempio sconsigliato l'utilizzo di un PLL in quanto causerebbe ritardi e quindi generazione di spurie, è invece preferibile adottare un oscillatore di tipo SAW. Il segnale 7 come è mostrato in figura 1 risulta in anticipo rispetto alla generazione dell'impulso in uscita, sarà proprio

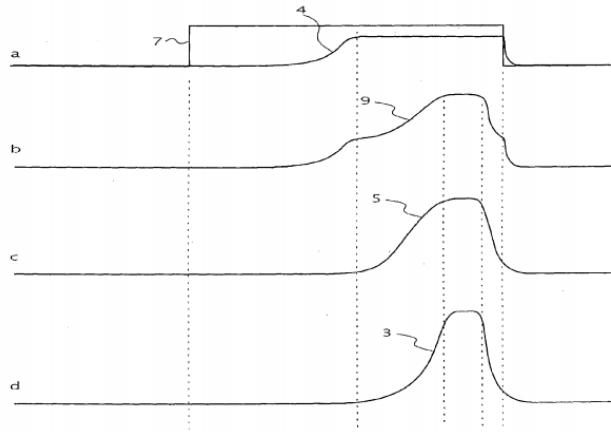


Figura 35 Forme d'onda nei vari punti del circuito trasmettitore

questo tempo di assestamento e il tempo che intercorre fino alla disattivazione del segnale a determinare l'altezza dell'impulso e quindi la potenza in uscita.

Particolare attenzione nel progetto è posta nel fissare il rapporto T_{ON}/T_{IN} in quanto determina

la potenza media in uscita: $P_{MED} = P_{PK} * \frac{T_{on}}{T_{int}}$

Il suddetto rapporto è solitamente fissato in un range tra 10^{-1} e 10^{-5}

Per stimare la velocità di trasferimento dati si deve considerare che:

- Ton deve essere definito in base alla banda che si vuole occupare e alla capacità dei circuiti di trasmettere e ricevere
- La potenza P_{out} che il circuito deve irradiare deve essere definita in base a distanza che si vuole coprire e sensibilità del ricevitore e detta η l'efficienza del circuito comprensivo di antenna $P_{pk} = \frac{P_{out}}{\eta}$
- Dalla formula precedente se ne deduce $T_{int} = T_{on} * \frac{P_{PK}}{P_{med}}$

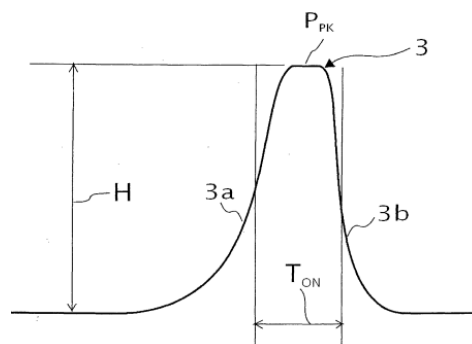


Figura 36 Impulso di potenza e i parametri che lo caratterizzano

La velocità di trasferimento teorica dipende da quanti bit NBP sono codificati nell'impulso:

$$B_r \left(\frac{\text{Bit}}{s} \right) = \frac{N_{BP}}{T_{int}}$$

e quindi è possibile legare la potenza media assorbita e la velocità di trasferimento

$$P_{med} = B_R * \frac{(T_{on} * P_{out})}{(\eta * N_{BP})}$$

Riportiamo la tabella riassuntiva dei consumi del sistema brevettato al variare della velocità di trasferimento.

Velocità di trasferimento dati (kbit/s)	150	80	40	20	10	5	2,5	1,25
Tempo di trasmissione pacchetto da 40 bit (ms)	1,1	2	4,1	8,2	16,5	33	65	130
Consumo di energia per bit trasmesso (nJ)	66	67	72	75	80	82	85	90
Consumo di energia per trasmissione di un pacchetto di 40 bits (uJ)	28	29	31	32	34	35	36	38
Consumo in mAh per anno	1,3651	1,3724	1,4965	1,55636	1,6863	1,6863	1,7082	1,7082
Corrente media durante la trasmissione(mA)	8,5	4,7	2,5	1,3	0,7	0,35	0,18	0,09
Potenza di picco generata (dbm)	+ 23	+ 23	+ 23	+ 23	+ 23	+ 23	+ 23	+ 23
Potenza media generata (dbm)	+ 12	+ 10	+ 7	+ 4	+ 1	- 2	- 5	- 8
Potenza di picco irradiata (dbm)	+ 0	+ 0	+ 0	+ 0	+ 0	+ 0	+ 0	+ 0
Larghezza di banda @ 150 kbit/sec (KHz)	700	670	650	630	620	610	600	600

Tabella 6 Tabella dei consumi al variare della velocità di trasferimento

Di seguito si riporta in tabella il confronto del sistema FreeLux con altre tecniche di trasmissione standard, considerando una tensione di alimentazione di 3Volt e trasmettendo un pacchetto da 40bit ogni 60 secondi. La frequenza di lavoro è di 434MHz e la lunghezza dell'antenna di 10mm pari a 1/68 della lunghezza d'onda.

	FREELUX			ASK (1/3-2/3 coded)			ASK (Manchester coded)			FSK		
	Min.	Max.	Punteggi o	Min.	Max.	Punteggio	Min.	Max.	Punteggio	Min.	Max.	Punteggio
Velocità di trasferimento dati (kbit/s)	0,01	150	7	0,001	100	7	0,001	100	7	0,001	100	7
Tempo di invio preambolo / sincronizzazione (ms)	0,02	0,02	9	5.000,0	0,05	5	5.000,0	0,05	5	5.000,0	0,05	5
Tempo di trasmissione pacchetto da 40 bit (ms)	4.100,0	0,3	9	45.000,0	0,45	7	45.000,0	0,45	7	45.000,0	0,45	7
Potenza di picco generata (dbm)	+ 23)	+ 23	8	- 10	+ 20	7	- 10	+ 20	7	- 10	+ 20	7
Potenza media generata (dbm)	- 6	+ 12	9	- 13	+ 17	5	- 13	+ 17	5	- 10	+ 20	4
Potenza di picco irradiata (dbm) (4) (7)	+ 0	+ 0	9	- 33	- 3	4	- 33	- 3	4	- 33	- 3	4
Consumo di energia per bit trasmesso (uJ) (3) (7)	0,132	0,066	10	39.000,0	7,5	6	39.000,0	7,5	6	60.000,0	12,0	5
Consumo di energia per trasmissione di un pacchetto di 40 bits (mJ)	0,0057	0,0028	10	1.755,0	0,338	5	1.755,0	0,338	5	2.700,0	0,54	4
Consumo in mAh per anno	2,993	0,3723	10	85.410,0	16,42	5	85.410,0	16,425	5	131.400,0	26,28	4
Corrente media durante la trasmissione (mA)	0,005	8,5	10	13	250	5	13	250	5	20	400	4
Larghezza di banda occupata	600	700	4	0,0033	330	7	0,0025	250	8	0,004	400	6
Semplicità circuitale (1-10)	7	7	7	8	4	6	8	4	6	7	3	5
Economicità (1-10)	8	8	8	9	3	6	9	4	6	8	3	5,5
Miniaturizzazione circuito (1-10)	7	7	7	8	2	5	8	2	5	7	1	4
Miniaturizzazione antenna (1-10)	9	9	9	2	8	5	2	8	5	2	8	5
Reiezione all'effetto doppler e riflessioni multiple (1-10)	9	9	9	5	7	6	4	6	5	6	7	6,5
Possibilità di alimentazione da energy scavengers (1-10)	9	7	8	5	1	3	5	1	3	4	1	2,5
Punteggi globali			8,38			5,53			5,53			5,03

Tabella 7 Tabella di confronto del sistema con i sistemi di trasmissione tradizionali

Implementazione dell'algoritmo

Come si è visto il punto forte della tecnica di trasmissione è quella di codificare l'informazione della distanza temporale tra un impulso e il successivo. Questo comporta che l'implementazione della tecnica abbia richieste molto stringenti sui tempi di attuazione. Dal punto di vista implementativo del firmware del microcontrollore si traduce nella necessita di avere il controllo totale sull'esecuzione di ogni singola istruzione che viene eseguita. Questo spiega perché l'implementazione dell'algoritmo di gestione della trasmissione radio è stato implementato in assembler e non in un linguaggio di più alto livello come il "C" utilizzato per le altre routine del sistema. Il Linguaggio "C" viene interpretato e compilato, per poi essere tradotto in linguaggio macchina, in questa fase il progettista perde il controllo sulle tempistiche di esecuzione di ogni istruzione in quanto dovrebbe conoscere le tecniche adottate dal compilatore caso per caso per tradurre ogni istruzione di "alto livello" in linguaggio macchina. L'algoritmo sviluppato per la generazione degli impulsi radio si basa sul conteggio dei tempi di esecuzione di ogni singola istruzione.

Si riporta il cuore dell'algoritmo utilizzato. Consideriamo il valore trasmesso memorizzato nel registro "symb_value" e che la chiamata alle routine "_7_us" e "_12_us" mettono in IDLE il processore rispettivamente per 7µs e 12µs.

loop_tx_symb

```
call    _7_us
goto    $+1
decfsz  symb_value,f
goto    loop_tx_symb      ; us = 20us + (valore * 8us)
call    _12_us
goto    Pulse
```

come si vede l'algoritmo non fa altro che attendere un volare fisso di 12us nel caso il dato da trasmettere sia nullo e aggiunge un ritardo proporzionale al valore del simbolo da trasmettere per poi generare l'impulso.

Il controllo dei tempi di esecuzione porta anche un altro vantaggio il fatto cioè di legare la durata della trasmissione al dato trasmesso. Infatti come è facilmente intuibile la trasmissione di un intero pacchetto di dati cambia con il valore che assumono i dati.

Il pacchetto creato per la trasmissione dei dati è il seguente:

ID (8-bit)	Umidità (8-bit)	Temperatura(8-bit)	Vdd(8-bit)	CRC(8-bit)
------------	-----------------	--------------------	------------	------------

Quindi un totale di 40 bit, se consideriamo il caso peggiore, anche se poco probabile, avremo una stima del tempo massimo di occupazione del canale di trasmissione.

$$T_{TXMAX} = 20\mu s + (255 * 8\mu s) * 5 = 10.3 ms$$

Se consideriamo che ogni sensore trasmetterà un pacchetto ogni 128 secondi avremo una percentuale di occupazione del canale per ogni pacchetto di:

$$Occupazione\% = \frac{10.3ms}{128000ms} = 80.47 * 10^{-6}$$

Questo risultato risulta fondamentale in quanto permette di utilizzare un numero elevato di sensori non sincronizzati tra loro avendo una probabilità di collisione (sovrapposizione temporale delle trasmissioni) estremamente bassa. Infatti ipotizzando la presenza di 100 trasmettitori collegati allo stesso gateway la probabilità che avvenga una collisione è calcolabile come probabilità condiziona di eventi indipendenti ovvero in quanto ogni nuova trasmissione vedrà le n precedenti trasmissioni occupare n slot temporali:

$$\begin{aligned}
 P_{funzionamento} &= 1 * (1 - Occup\%) * (1 - 2xOccup\%) * (1 - 3xOccup\%) \\
 &* \dots * (1 - 100xOccup\%) = 66.7\%
 \end{aligned}$$

Questa probabilità di corretto funzionamento può essere aumentata inserendo un ritardo si valore pseudo casuale prima di trasmettere.

7. Il Firmware.

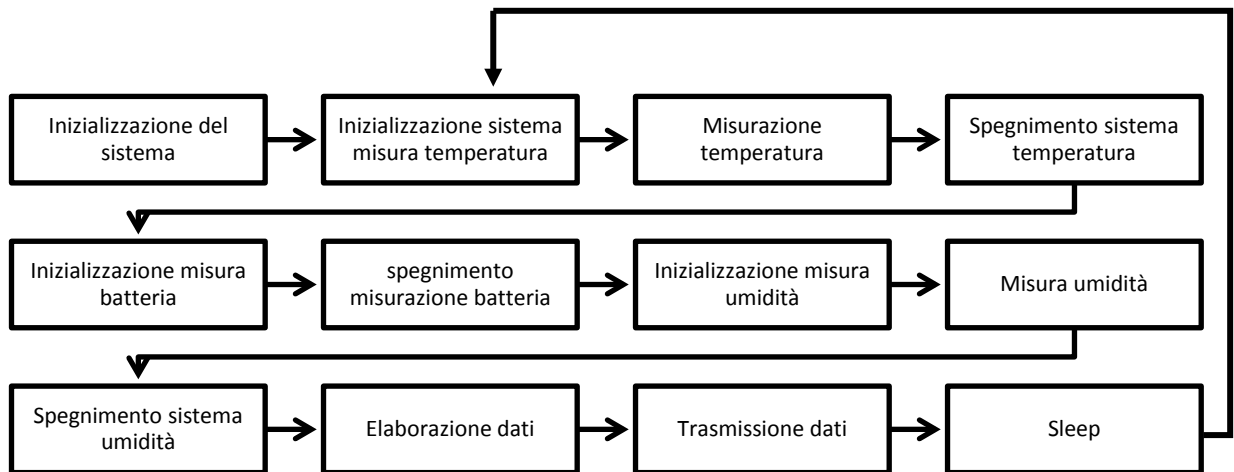
La funzione principale del Firmware è quello di coordinare le varie operazioni da eseguire con tempistiche ben precise. Sarà infatti l'organizzazione del firmware a essere determinante sia per il corretto funzionamento dell'intero dispositivo che per i consumi e quindi le prestazioni energetiche. Le operazioni quattro operazioni fondamentali da eseguire sono:

- Misurazione della temperatura.
- Misurazione della tensione della batteria.
- Misurazione dell'umidità.
- Trasmissione radio.

Fondamentale per i consumi è che le risorse utilizzate sia utilizzate in maniera efficiente e che durante la fase di IDLE si consumi la minor quantità di energia.

Siccome il campionamento dei parametri ambientali viene effettuato ogni 2 minuti circa il microcontrollore eseguirà le suddette operazioni per poi entrare in modalità "Sleep". Ovviamente è necessario che qualche evento esterno risvegli il microcontrollore. Ma visto che il sistema non prevede la ricezioni di dati via radio è necessario che questo evento sia generato internamente al micro. Si è deciso di utilizzare la periferica di Watch Dog Timer (WDT) a tale scopo. Il WDT è più frequentemente utilizzato come controllo di esecuzione per applicazioni critiche dove c'è il rischio l'esecuzione dell'intero programma si blocchi su una singola istruzione o in una routine. La periferica controlla che il tempo trascorso dall'ultimo reset non superi un valore predeterminato e in tal caso resetta l'esecuzione del programma. L'utilizzo nell'applicazione è leggermente diverso si attiva il WDT solo prima di andare in sleep. Lasciandolo attivo, quando si va modalità di risparmio energetico si ottiene che quando raggiunge il valore stabilito l'esecuzione riprende dall'istruzione successiva, garantendo di non dover inizializzare nuovamente tutta l'architettura.

Per l'applicazione finale si è implementata la seguente routine:



Ovviamente al risveglio l’algoritmo riprende ciclicamente dalla misurazione della temperatura.

Ci sono alcuni concetti da sottolineare.

- Come si vede le tre misure sono costituite da accensione delle periferiche, esecuzione della misura e spegnimento delle periferiche interessate. Questa accortezza è determinante per il raggiungimento degli obiettivi di durata della batteria.
- Le tempistiche di esecuzione delle varie parti del codice devono essere fissate per far sì che l’intero ciclo di esecuzione possa avere durata costante. Questo risulta fondamentale per la trasmissione radio. Non essendoci un meccanismo di Acknowledgement affinché le trasmissioni provenienti da dispositivi diversi non si sovrappongano è fondamentale che la trasmissione e quella successiva siano separate da un intervallo costante nel tempo.

Si è effettuata una stima su i tempi di esecuzione delle varie funzioni e si è misurato con l’oscilloscopio il cambiamento di stato di un pin all’inizio e alla fine di ogni operazione al fine di avere una misurazione realistica dei tempi.

Operazione	Tempo misurato	Tempo fissato per il Timer
Misurazione Temperatura	4.2ms	5ms
Misurazione Batteria	1.2ms	1.5ms
Misurazione Umidità	19.2ms	21ms
Elaborazione Dati	500µs	500µs
Trasmissione Radio	10.3ms	11ms

Tabella 8 Tempo di esecuzione delle varie operazioni

Come si vede i tempi fissati per il timer sono stati scelti come un sovradimensionamento dei tempi misurati nel caso peggiore di una quantità variabile tra il 10 e il 20 percento.

Considerato che il valore di conteggio del WDT può essere scelto tra un numero finito di valori, si è fissato a 128 secondi quindi il tempo di un ciclo è calcolabile come:

$$T_{cycl} = T_{temp} + T_{rh} + T_{batt} + T_{elab} + T_{radio} + T_{sleep} + \bar{T}_{rnd} = 129,039 s$$

In effetti questo risultato rappresenta un valore medio. Infatti come si è detto a fine di aumentare la probabilità che non avvengano sovrapposizioni di funzionamento si è inserito un ritardo T_{RND} con valor medio di 1 secondo e varia tra 0 e 2 secondi.

8. Stima della durata della batteria

Come si è detto il punto forte dell'applicazione che la distingue dalle altre realizzazioni nello stesso campo di utilizzo è la durata della batteria. Prima di passare alla stima della durata della batteria si riporta il risultato del lavoro effettuato in fase di progettazione valutando tramite il power-plot dell'applicazione dove si evidenziano i contributi di consumo.

Considerando che il microprocessore resta attivo per un periodo di 40 millisecondi circa su un intero ciclo dell'applicazione di 128 secondi e che le correnti in gioco nella fase attiva e quella di riposo differiscono di alcuni ordini di grandezza quello che si ottiene osservando un periodo poco superiore all'intero ciclo è:

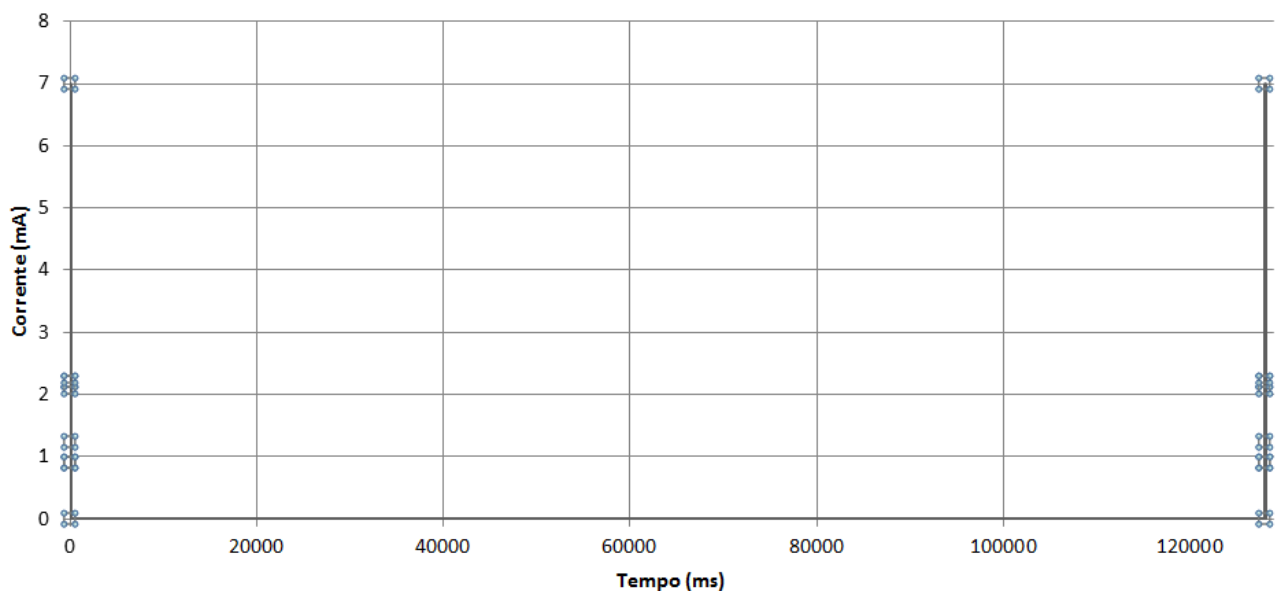


Grafico 3 Power plot di un intero ciclo dell'applicazione

chiaramente il grafico risulta poco significativo se non del fatto che rende evidente il rapporto tra i tempi e le correnti in gioco. Considerando soltanto i primi 40 millisecondi del ciclo si ottiene il grafico seguente:

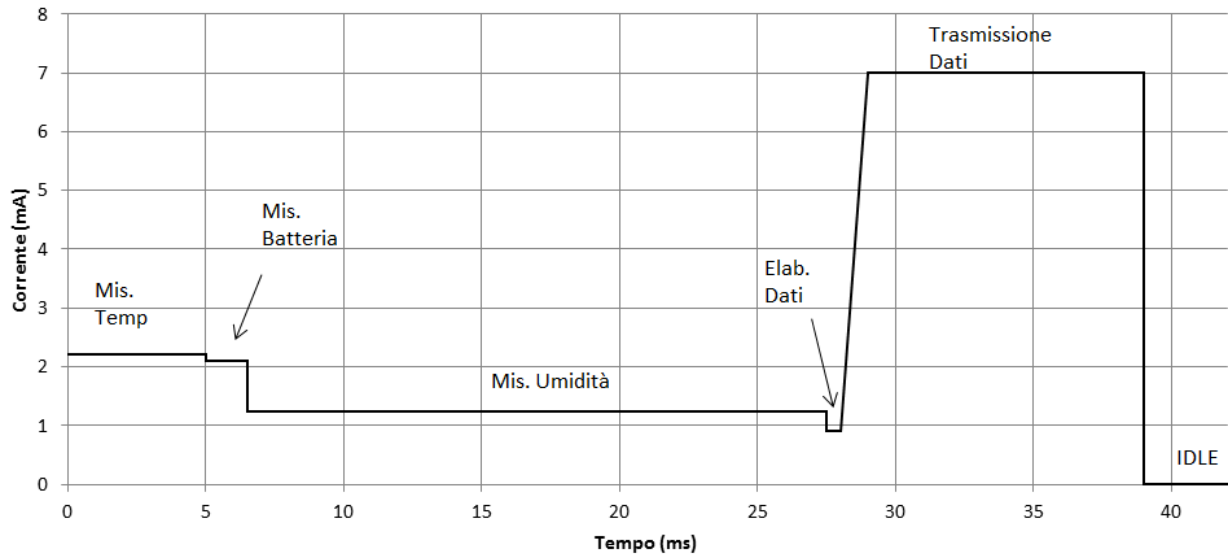


Grafico 4 Power plot delle operazioni eseguite

Dove si può sottolineare come il contributo maggiore di consumo dia determinato dalla trasmissione radio e che la misurazione dell'umidità nonostante le basse correnti in gioco richieda un tempo considerevole per l'esecuzione. La corrente di misurazione dell'umidità come, come si può notare è poco più alta della corrente utilizzata durante l'elaborazione dei dati, periodo dove tutte le periferiche del microcontrollore sono spente ad eccetto del core di calcolo, questa considerazione sottolinea come la tecnica scelta per la misurazione è perfettamente in linea con i criteri di progettazione low power.

Per poter stimare la durata si ci è affidati in prima battuta al software di simulazione Microchip BLE Battery Life Extimator. Il software calcola una stima della durata della batteria in base a:

- Dati della Batteria
- Struttura del Firmware
- Correnti esterne al microcontrollore

I dati utilizzati della batteria:

- Device : LiMnO2 (CR2032)
- Voltage : 3.0V
- Temperature : 25C

Description	Capacity	Self-discharge	Nominal V	Max cont. Current	Max pulse Current
Data	225 mAh	0.08 %/mo(0.25 uA)	3.0 V	1.8 mA	12 mA

Per la struttura del firmware rispecchia quello che è stato descritto nel capitolo precedente mentre i valori delle correnti che entrano in gioco nelle varie fasi dell'applicazione.

Label	Mode	Frequency	Time	Current	Charge	Peripherals
Misura Temperatura	RUN	8 MHZ	5 mS/<1%	1.664 mA	2.311 nAh	WDT,FVR,T1OSC, ADC(conversion)
Misura Batteria	RUN	8 MHZ	2 mS/<1%	1.414 mA	0.786 nAh	FVR,T1OSC ADC(no conversion)
Misura umidità	RUN	8 MHZ	10 mS/<1%	0.972 mA	2.701 nAh	T1OSC, Comparator(Low Power)
Elaborazione dati	RUN	8 MHZ	0.5 mS/<1%	0.901 mA	0.125 nAh	T1OSC
Trasmissione Radio	RUN	8 MHZ	11 mS/<1%	5.901 mA	18.032 nAh	T1OSC
SLEEP	SLEEP	*	128 S/99%	0.5 uA	8.333 nAh	WDT

Tabella 9 Dati delle varie operazioni di consumi e periferiche attive.

Si sono ottenuti i seguenti risultati

RESULT	Temperatura 25°C
Battery Life :	11 years 272 days 23 hours
Average Current :	1.176 uA
Peak Current	5.901 mA

Come si nota questi sono dati teorici mantenendo la temperature costante a 25°C. L'impatto delle variazioni della temperatura è particolarmente critico e difficile da valutare.

Onde validare i risultati ottenuti dal simulatore sono state effettuate delle misurazioni sulla scheda realizzata per differenti motivi:

- Validare i dati di consumo del microcontrollore.
- Nel software sono stati inseriti valori delle correnti teorici per i vari circuiti che sono attivati di volta in volta.
- Il software non considera le correnti di leakage e dei parassitismi.

Si sono effettuate delle misure inserendo l'Amperometro Agilent Technologies – U3401A con risoluzione fino a 10nA. Ovviamente per effettuare le misure di ogni singola fase si è modificato il firmware in modo che il microcontrollore eseguisse continuamente la stessa operazione, in quanto la misura dello strumento avviene mediando la corrente su tempi dell'ordine delle decine di millisecondi.

Fase	Corrente misurata (mA)
Temperatura	2.2
Batteria	2.1
Umidità	1.24
Elaborazione	0,9
Trasmissione	7
Sleep	0,0006

Tabella 10 Corrente assorbita nelle varie fasi dell'applicazione

Per stimare la durata della batteria si è usata la seguente formula di massima:

$$Life (hours) = \frac{Capacity (mAh)}{System Current + Battery Self_Discharge Current (mA)}$$

Dove la "System Current" I_{sys} è calcolabile come:

$$I_{sys} = \frac{1}{T_{cycl}} * (T_{temp} * I_{Temp} + T_{Batt} * I_{Batt} + T_{HR} * I_{HR} + T_{Elab} * I_{Elab} + T_{TX} * I_{TX} + T_{Idle} * I_{Idle})$$

- Dove T_{cycle} è il tempo di un intero ciclo di lavoro dell'applicazione calcolato nel paragrafo precedente: $T_{cycle} = 128039 ms$

$$I_{sys} = 0,0013468 mA = 1,51 \mu A$$

Considerando la corrente così calcolata la stima della durata è di

Durata 9 anni e 285 giorni

Tuttavia questi risultati non tengono conto della temperatura che impatta in maniera decisiva sia sulle correnti in gioco nel circuito che sulla corrente di Self discharge della batteria. Se si considera il caso peggiore di lavorare intorno a temperature estreme ovvero sotto lo zero e

sopra i 40°C si notano variazioni di oltre il 50% delle correnti in gioco e che la capacità della batteria si riduce del 10-20% si può stimare in maniera conservativa una vita reale intorno ai 2-3 anni. In ogni caso gli obiettivi del progetto erano quelli di superare l'anno di vita in modo da non richiedere da parte del curatore museale un intervento troppo frequente. Le richieste sono state ampiamente soddisfatte.

9. Il progetto e realizzazione hardware

Una volta verificato e testato il funzionamento delle singole parti del sistema su scheda 'millefori', si è passati al progetto e alla realizzazione della scheda. Di seguito riportiamo lo schema del circuito realizzato.

Si distinguono le seguenti parti:

1. **Seriale:** costituita dal Transceiver MAX232 che si occupa di traslare i livelli da -12V - +12V dello standard seriale RS232 al livelli logici CMOS 0V-5V
2. **Alimentazione:** Costituita dal regolatore di tensione LM7803 che si occupa di regolare la tensione di uscita a 3V
3. **Radio** è costituita dal blocco che genera la frequenza portante, la modulazione ad impulsi di questa e l'amplificazione e l'adattamento all'antenna.
4. **Circuito Temperatura:** è costituita dalla rete resistiva per la generazione dei riferimenti in tensione del DAC , l'alimentazione del ramo resistivo del trasduttore HCT01 e dal transistor BC817 per attivare il circuito
5. **Circuito Umidità:** dai componenti passivi e dal ramo capacitivo del trasduttore HCT01 come descritto nel paragrafo riguardante la misurazione dell'umidità

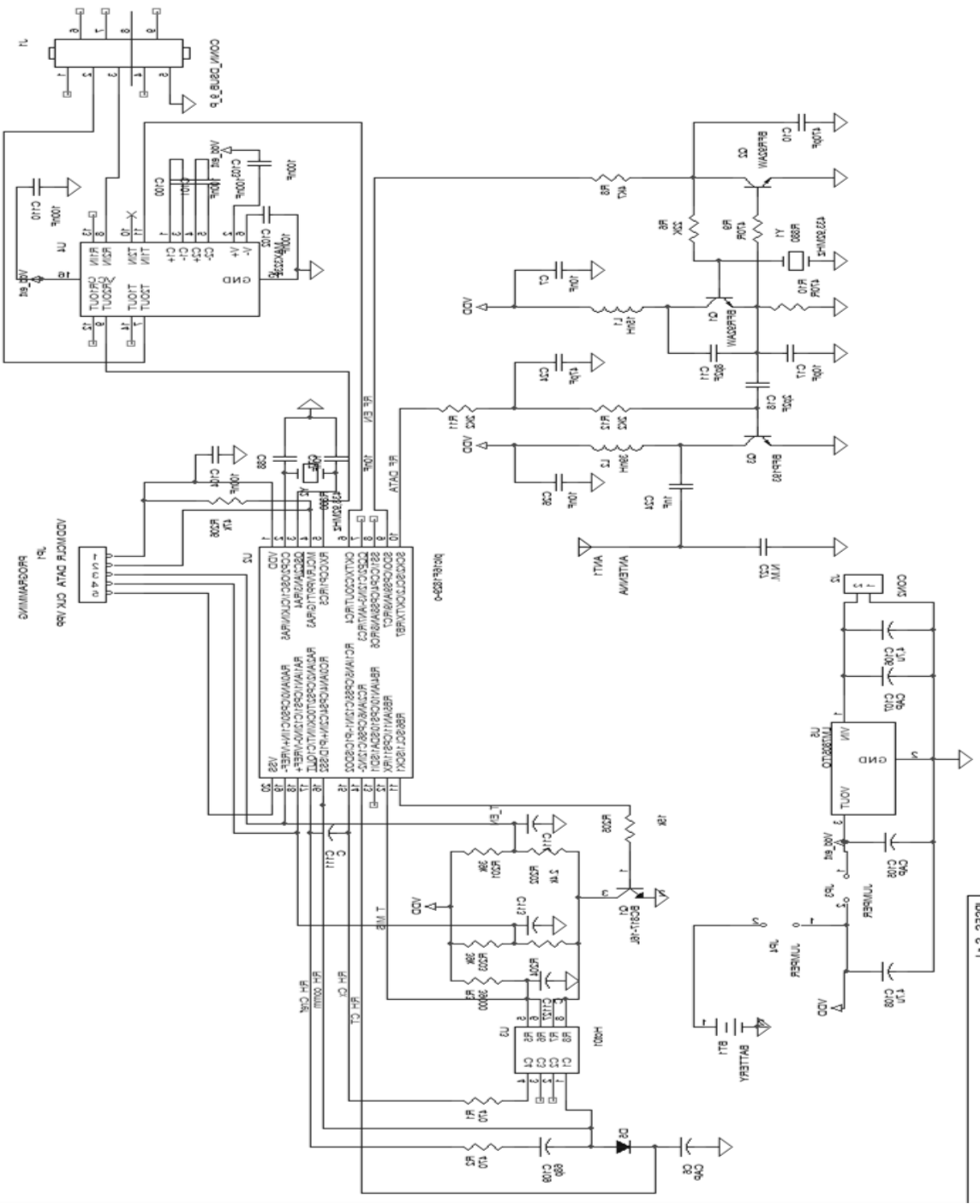


Figura 37 Schema circuitale del sistema MiCe

La fase successiva della progettazione è la validazione del sistema in termini di funzionalità e prestazioni. Per poter verificare il funzionamento e verificare l'effettiva realizzabilità, è stato realizzato il sistema su circuito stampato.

Nella progettazione dei layer del circuito stampato si è perseguito gli obiettivi di:

- **Minimizzazione degli spazi occupati:** Uno degli obiettivi principali del progetto è stato quello di realizzare un sistema che avesse le dimensioni più ridotte possibili
- **Minimizzazione dei parassitismi:** resistenze, capacità ed induttanze: il circuito della misurazione dell'umidità come il sistema di trasmissione radio risentono fortemente delle non idealità e pertanto andava verificato che questi non compromettessero il funzionamento.

Il progetto del layout è stato realizzato con il tool OrCad Layout. Sono stati realizzati i due layer: Top e Bottom. Sono state prodotte due versioni differenti del layout. La prima di prototipazione è stata creata con lo scopo di testare il corretto funzionamento del sistema cercando di avere dimensioni totali più ridotte possibili e allo stesso tempo lasciare lo spazio ad eventuali correzioni. In questa versione è presente anche la parte di comunicazione radio. L'idea di partenza era quella di creare una scheda allungata con l'antenna di trasmissione ad un estremo. A limitare le dimensioni del lato più lungo sono state le dimensioni del porta-batterie scelto. E si è scelto di posizionare ad un estremo della scheda la parte di comunicazione seriale e l'alimentazione secondaria (via rete) in tal modo le versioni successive non considerano questa zona del circuito. Un altro limite nella distribuzione dei componenti è stato la presenza del comparatore interno al microcontrollore solo su alcuni pin e le tensioni di riferimento del ADC erano collegabili solo a pin ben precisi. Dati queste limitazioni, al fine di minimizzare i parassitismi in particolar modo per le capacità parassite delle piste che collegano il micro al sistema di misura dell'umidità.

Per quanto riguarda il package dei componenti passivi si è utilizzato lo standard 1206 per poter effettuare modifiche ai valori dei componenti utilizzando quelli presenti in laboratorio.

Si è ottenuta una scheda di dimensione 167mm x 31,34 mm

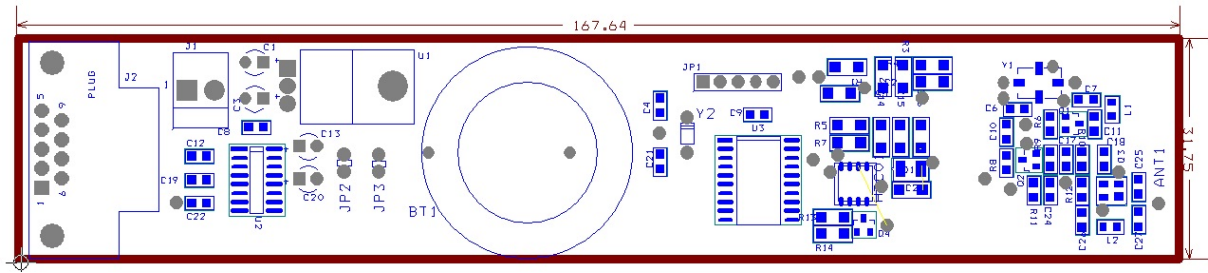


Figura 38 Primo progetto di layout realizzato per il dispositivo MiCe

La versione successiva è stata realizzata a fine di valutare le effettive dimensioni del prodotto finale. Si è utilizzato package più piccoli per i componenti passivi 0603 e si sono eliminati gli spazi della scheda non utilizzati. Si è eliminata inoltre anche la parte di comunicazione seriale e di alimentazione secondaria.

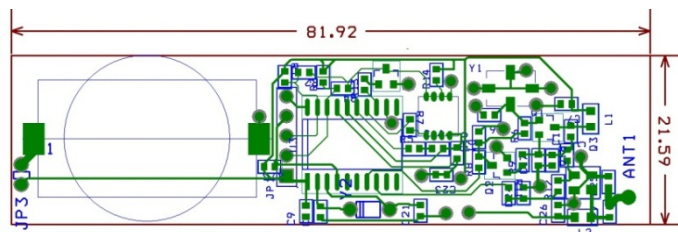


Figura 39 Prototipo di layout per il dispositivo MiCe

Si è ottenuta una scheda di dimensioni: 81,92mm x 21,91 mm riducendo di circa 3 volte l'area occupata

3. Il Gateway - CaT

La funzione del gateway è quello di ricevere le informazioni provenienti da più sensori e ritrasmetterli sulla rete verso il sistema centrale di raccolta dati House.

1. Le problematiche della rete

Affrontare la progettazione di una rete di comunicazione è un problema complesso e molto articolato. Si consideri le differenti tipologie di problemi che vanno affrontati: definizione del canale di comunicazione, l'organizzazione dei dati in pacchetti, l'indirizzamento di ogni dispositivo collegato, la sincronizzazione delle trasmissioni e delle ricezioni, il controllo degli errori e le politiche di correzione. La progettazione della rete e le soluzioni ai suddetti problemi non sono oggetto di questo lavoro di tesi. Tuttavia nell'affrontare la progettazione dell'intero sistema sono state individuate diverse strategie per l'ottimizzazione della comunicazione. Innanzi tutto si consideri la struttura di massima riportata in figura:

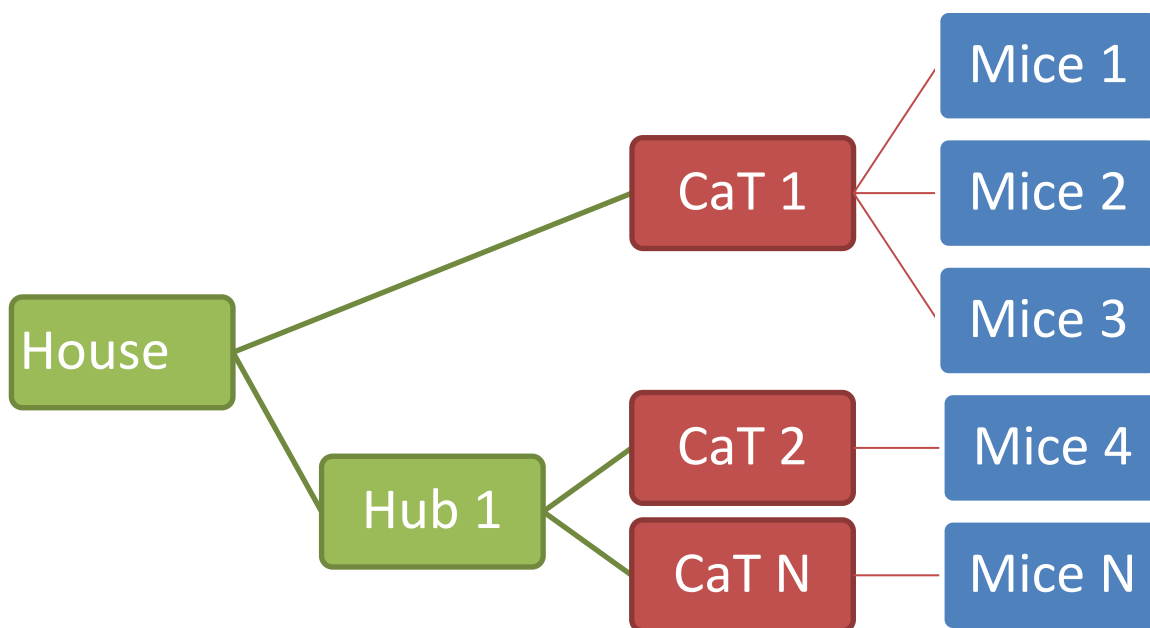


Figura 40 Rappresentazione schematica della rete

Come si nota la rete può essere divisa in diversi livelli (colori) di profondità che hanno funzionalità e logiche di controllo differenti. Il livello più profondo (blu) è costituito dai sensori che comunicano come si è ampiamente descritto nel capitolo precedente verso i gateway CaT che rappresenta il livello superiore (rosso) con il collegamento radio. Il gateway dovrà raggruppare le informazioni ricevute dal livello inferiore, riorganizzarle e trasmetterle verso il livello superiore, che può essere direttamente il destinatario (l'House) oppure un altro nodo della rete rappresentante un livello intermedio. Il discorso può ripetersi teoricamente all'infinito rendendo sempre più complessa la rete. La necessità di aumentare i nodi e i livelli della rete scaturisce da esigenze di estensione di area coperta e ostacoli da superare. Sicuramente più livelli si inseriscono più aumentano le informazioni che il generico livello deve trasmettere verso l'alto, in quanto aumentano le informazioni in basso. L'implementazione della comunicazione tra il Gateway e l'House, racchiude una serie di problematiche che saranno oggetto quindi di ricerca e lavoro futuro. Le soluzioni individuate consistono nell'utilizzare canali di comunicazioni differenti, come ad esempio Ethernet, Wi-Fi, o seriale in base alle differenti esigenze di spazio ostacoli e costi. Per proseguire il lavoro di progettazione si è scelto di implementare il collegamento diretto tra un Gateway e il sistema House con comunicazione SERIALE al fine di realizzare un sistema completo e funzionante.

Quindi il progetto realizzato di questo elemento del sistema rappresenta solo il primo step di un cammino progettuale più lungo.

2. Descrizione del sistema

Innanzitutto la concezione di questo dispositivo si distingue da quello del sistema MiCe per due caratteristiche fondamentali: essendo pensato con alimentazione da rete non ha richieste stringenti sul consumo e in secondo luogo lo spazio occupato non risulta un problema critico.

Il sistema di comunicazione low-power implementato, descritto ampiamente nel capitolo precedente prevede che il ricevitore sia sempre in ascolto in quanto la trasmissione può avvenire in un qualunque istante non essendoci nessun meccanismo di sincronizzazione.

Questo fa in modo che nella gestione firmware dei dati la ricezione ha sempre una priorità più alta rispetto alla ritrasmissione in rete.

Questo ha richiesto che da un punto di vista sia hardware sia firmware il sistema può essere diviso in due blocchi: l'ingresso rappresentato dalla ricezione radio dei dati dai vari Mice e l'uscita che è preposto alla ritrasmissione dei dati opportunamente elaborati verso il canale di trasmissione per il livello superiore.

Si preferisce non dilungarsi sulle soluzioni hardware e realizzative visto che non hanno impatto determinante sull'intero sistema e su gli obiettivi perseguiti, ma piuttosto risulta fondamentale la gestione logica delle informazioni.

3. Il firmware

Il firmware sviluppato per il gateway rispecchia sostanzialmente la sua funzione duale di ricetrasmittitore e vede due gruppi di funzioni quelle di ricezione e quelle di trasmissione opportunamente interconnesse dalla condivisione di un area di memori che fa da buffer. Le funzioni di ricezione sono state sviluppare in assembler in virtù del fatto che richiedono tempistiche di esecuzione precise e ben determinate e sono implementate come funzioni di interrupt. La priorità massima, infatti, è data alla ricezione grazie al meccanismo di interrupt che blocca l'esecuzione delle altre operazioni quando l'interruzione viene generata dal circuito di ricezione dei dati radio. All'arrivo dei dati, quindi, vengono decodificate le informazione presenti nel pacchetto e inserite in una FIFO (First In First Out) in attesa di essere trasmesse. Le operazioni di trasmissione vengono eseguite, invece, nel ciclo principale del programma fintantoché il buffer dati (FIFO) non è vuoto. Prima della trasmissione è stato inserito un step di elaborazione dei dati per inserire l'informazione sul livello di profondità dell'albero da cui provengono le informazioni messe in rete e dei caratteri di controllo per rilevare la presenza di errori o trasmettere comandi tra i vari nodi della rete. In particolare verrà costruito un pacchetto di questo tipo:

SOF CHAR 1-byte	Level Information (1-byte)	DATA (5-Byte)				CheckSum (1-byte)	EOF CHAR (1-byte)
		ID	HR	Temp.	Vdd		

Dove:

- **SOF - Start Of Frame:** rappresenta il carattere di inizio frame
- **EOF – End Of Frame:** rappresenta il carattere di fine frame
- **Level information:** valore da 0-255 ed indica il livello di profondità del nodo nella rete
- **DATA:** sono i dati ricevuti dal sensore costituiti da: ID del dispositivo trasmittente, umidità, temperatura e tensione batteria.
- **CHECKSUM:** è calcolato come la XOR tra i byte che compongono il messaggio in modo da avere un byte che porta in contro l'informazione globale e poter verificare in fase di ricezione la presenza di errori.

I caratteri di SOF e EOF sono inseriti per permettere al ricevitore quando è stato ricevuto un pacchetto completo. Tuttavia per non dare adito ad errore nel caso i dati siano costituiti proprio da valori corrispondenti al codice ASCII dei suddetti caratteri è stato inserito un meccanismo di correzione. Lo **Special Char** è un carattere che indica la presenza di uno dei byte di controllo all'interno dei dati è utilizzato per indicare che il dato successivo **CHANGED CHAR** non rappresenta il dato reale ma che è stato modificato (aggiungendo un valore fisso) per non essere confuso e che quindi va effettuata l'operazione inversa in fase di decodifica(sottraendo lo stesso valore).

I nodi superiori avranno la possibilità di decodificare i dati così costruiti e sapere se provengono da un nodo inferiore controllare la presenza di errore e decidere se scartarli o accodarli ai propri e ritrasmetterli al nodo superiore.

Gestione dei sensori associati

La connessione tra sensori e gateway è consistita nella trasmissione in istanti casuali dei dati catturati dal sensore preceduti dall'ID univoco del sensore. Questo meccanismo si adatta all'inserimento dei nuovi sensori nella rete. Infatti, a patto che non si presentano due sensori con lo stesso ID il gateway riceverà i dati del nuovo sensore trattandoli come quelli dei sensori già presenti e li ritrasmette al livello superiore.

4. Implementazione hardware

Da un punto di vista di implementazione hardware il dispositivo realizzato è costituito oltre che dalla parte di alimentazione, dal microcontrollore che gestirà il sistema e le informazioni transmittenti, il blocco di ricezione radio per la demodulazione del segnale e il blocco di comunicazione seriale per la ritrasmissione in rete dei dati. In fase sperimentale si è integrato nel sistema il modulo di trasmissione radio per implementare la stessa comunicazione dei sensori per poter testare la comunicazione tra i vari moduli.

- **Alimentazione:** Costituita dal regolatore di tensione LM7805 che si occupa di regolare la tensione di uscita a 5V
- **Microprocessore:** si è utilizzato il PIC16F1829 dotato di 1024byte di RAM e 14kB di program memory con una frequenza di clock di 32MHz.
- **Comunicazione seriale:** rappresenta il modulo che cambierà a seconda delle esigenze della rete, in questo primo prototipo si è scelto di implementare la comunicazione SERIALE verso PC. Il blocco è costituito dal dispositivo MAX232 che si occupa della conversione dei livelli di tensione da standard RS232 a livelli logici 0V-5V
- **Blocco di ricezione RF:** è costituito dal modulo TDA5200 di Infineon, che funziona a 5V
- **Blocco di trasmissione RF:** è costituita dal blocco che genera la frequenza portante, la modulazione ad impulsi di questa, l'amplificazione e l'adattamento all'antenna.

Di seguito riportiamo lo schematico ottenuto.

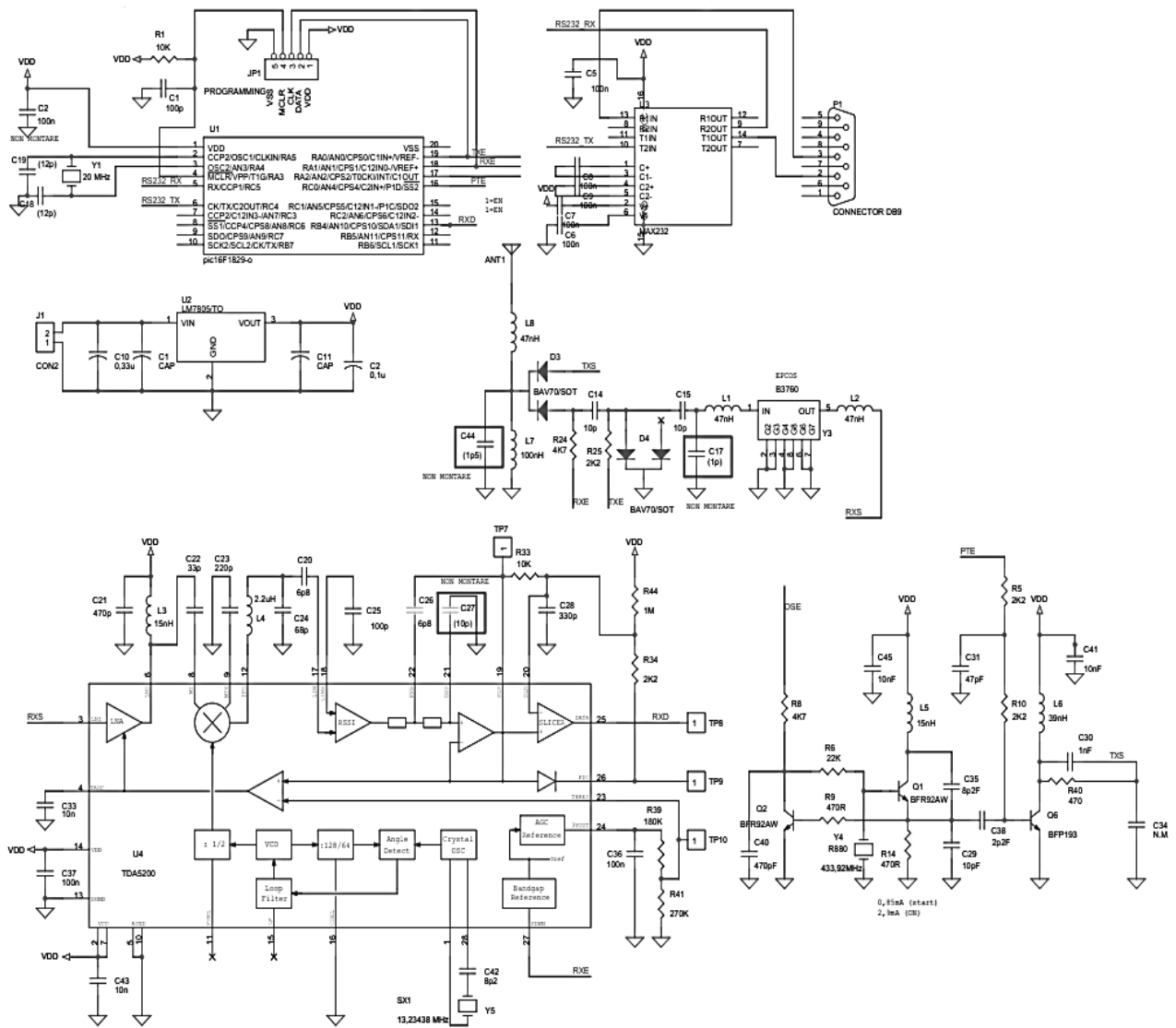


Figura 41 Schema circuitale del gateway- CaT

Per poter verificare il funzionamento e verificare l'effettiva realizzabilità, è stato realizzato il sistema su circuito stampato.

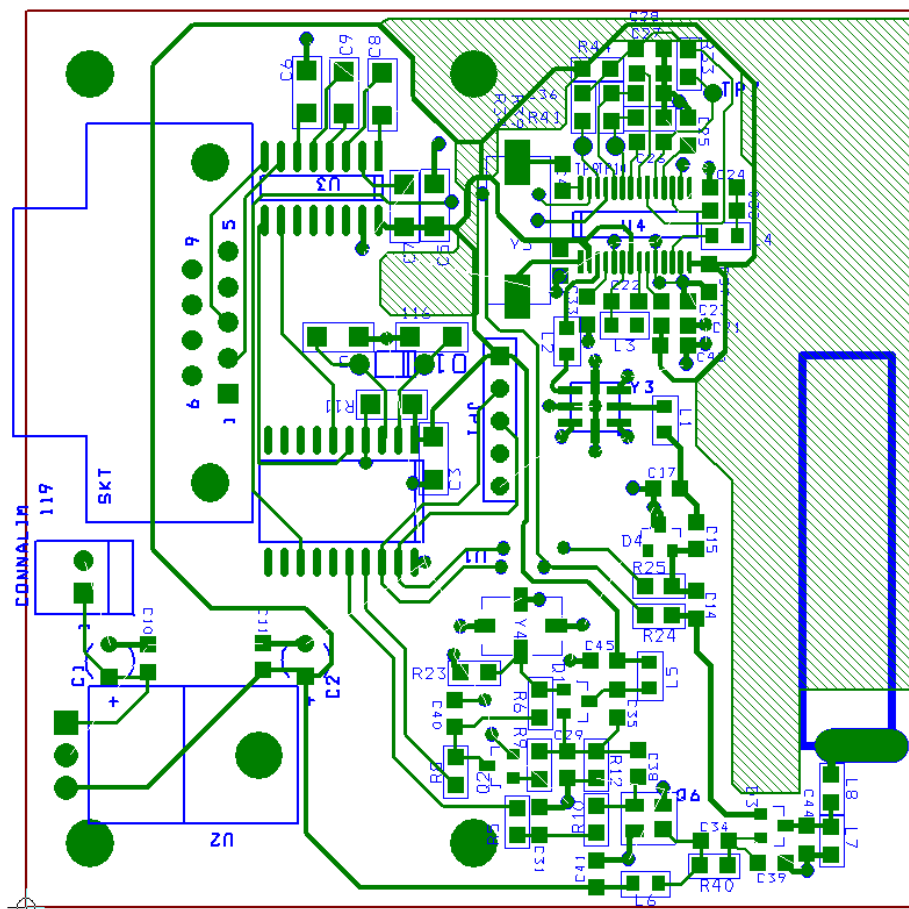


Figura 42 Layout del circuito stampato del Gateway

4. House

L'ultimo elemento che costituisce la struttura portante dell'intero sistema è rappresentato dal *software* di gestione del sistema stesso. In contemporanea al progetto *hardware* e *firmware* dei sensori e del *gateway* è stato concepito il *software* che, seppure ancora in fase prototipale, permette sia di valutare le presentazioni del sistema, visualizzando tutte le principali funzioni, sia di comprendere meglio tutte le problematiche legate all'integrazione, alla messa in opera della rete di sensori e all'eventuale correlazione con altri dati (gestione dei report in formati esportabili e compatibili con comuni *software* di analisi).

Il *software* è stato sviluppato utilizzando LabVIEW 2010 della National Instruments la cui interfaccia grafica consente una rapida ridefinizione anche durante l'esecuzione del programma e, pertanto, si presta ad essere facilmente personalizzato alle esigenze del cliente, sia per quello che riguarda le modalità di visualizzazione, sia per ciò che concerne gli aspetti più strettamente funzionali.

1. Specifiche e Funzioni

La principale funzione del *software* è quella di raccogliere e visualizzare i dati provenienti dalla rete, costituiti dai parametri ambientali delle opere d'arte presenti nel museo, ed organizzarli e gestirli in modo che si possano:

- Mostrare i valori e gli andamenti delle grandezze misurate.
- Impostare le soglie di allarme nel caso i valori di umidità e temperatura superino i limiti di sicurezza prefissati
- Gestire l'impostazione dei parametri del sistema, aggiungendo nuovi sensori o ricollocando i sensori esistenti.

Queste tre esigenze sono implementate in modo sia da creare livelli di accesso differenti, in modo da impedire modifiche delle impostazioni da parte di personale non autorizzato. Inoltre l'interfaccia è stata sviluppata in modo che fosse intuitiva, così da consentire l'utilizzo anche da parte di personale che non abbia specifiche competenze informatiche.

Le diverse funzioni, il sistema di visualizzazione e i parametri personalizzabili sono stati inseriti lavorando a stretto contatto con conservatori, in modo da ottenere un sistema mirato.

Le principali funzioni del *software* sono:

- Ricezioni dei dati
- Organizzazione e memorizzazione dei dati in maniera razionale e coerente
- Gestione del sistema: configurazione delle stanze: modifica e salvataggio su file della configurazione (numero dei sensori, posizione e associazione con una particolare opera).
- Impostazione e modifica dei limiti di ogni sensore
 - *Range* di sicurezza dei valori di umidità e temperatura
 - Limite della tensione batteria oltre il quale è necessario provvedere alla sua sostituzione
 - *Timeout* per la ricezione dei dati
- Impostazione delle modalità di allarme (attualmente l'allarme è grafico, ma nella versione definitiva potranno essere gestiti allarmi via mail o telefonici)
- Visualizzazione dei dati ricevuti
 - Andamento temporale delle grandezze misurate
 - Valore puntuale di temperatura e umidità
- Salvataggio su file dei dati ricevuti
- Esportazione del file dei dati ricevuti in formati compatibili con i più comuni *software* di analisi

Così come per la progettazione dell'hardware e del firmware, anche il lavoro eseguito per la realizzazione del software è stato complesso e articolato. Lo scopo è stato quello di produrre un programma funzionante e anche quello creare gli elementi base da riutilizzare per lo

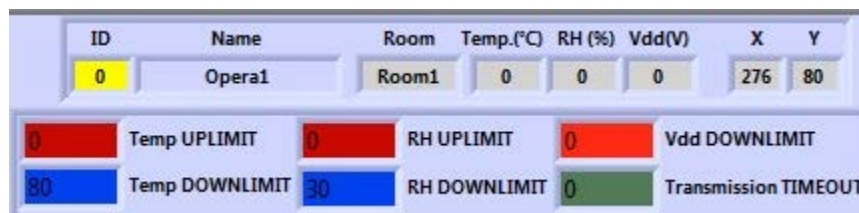
sviluppo successivo di un'applicazione più complessa. Si sono sviluppate le varie parti in maniera modulare, in modo che avessero sempre caratteristiche di "Coerenza" e "Coesione" (16), ovvero si è prestato particolarmente attenzione che ogni blocco di funzioni fosse indipendente l'uno dall'altro e che seguano allo stesso tempo un approccio coerente ai dati. Questo accorgimento, unito ad una strutturazione gerarchica delle varie parti, garantisce la possibilità di riutilizzare gli stessi elementi anche nella versione definitiva del software e che questo sia facilmente espandibile con l'implementazione di nuove funzioni.

2. Il Software

Il *software* realizzato è strutturato in due macro-aree: la prima permette di gestire il sistema, i sensori presenti e di definire le caratteristiche dell'opera a cui è associato un sensore (sala, posizione e limiti), l'altra di visualizzare i dati ricevuti e l'eventuale superamento dei limiti di sicurezza parametri (*range* di umidità e temperatura, livello minimo di tensione della batteria e *timeout* di ricezione)

È stata creata una struttura dati che contiene le informazioni riguardanti il sensore, in particolare:

- ID
- Nome Opera.
- Posizione
- Stanza
- Limiti
 - Limite superiore ed inferiore di Temperatura
 - Limite superiore ed inferiore di Umidità
 - Limite inferiore della tensione di alimentazione.
 - *Timeout* di ricezione dati.



ID	Name	Room	Temp.(°C)	RH(%)	Vdd(V)	X	Y
0	Opera1	Room1	0	0	0	276	80

0	Temp UPLIMIT	0	RH UPLIMIT	0	Vdd DOWNLIMIT
80	Temp DOWNLIMIT	30	RH DOWNLIMIT	0	Transmission TIMEOUT

Figura 43 Struttura dati utilizzata per le informazioni del sensore

Ovviamente i parametri di ogni sensore sono indipendenti da quelli degli altri sensori anche se associati allo stesso *gateway*.

Il *software* gestisce queste informazioni salvando la configurazione dei sensori a cui sono associate le informazioni precedenti. L'interfaccia è studiata per semplificare le operazioni di inserimento e modifica delle informazioni, ad esempio permettendo di posizionare sulla mappa del museo ogni sensore e visualizzare e modificare le informazioni ad esso associate.

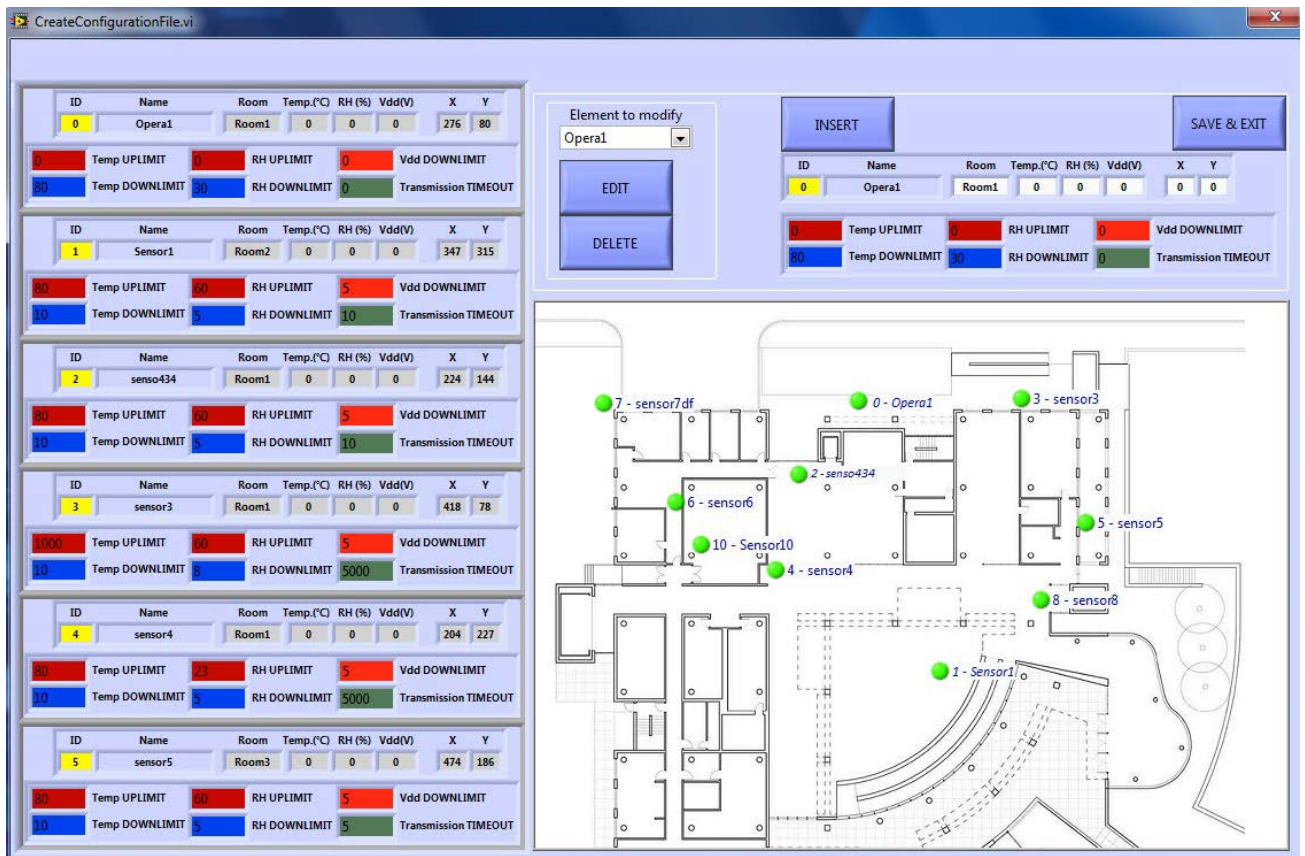


Figura 44 Software – visualizzazione della gestione del sistema

Il secondo modulo invece permette visualizzare gli andamenti dei parametri dei vari sensori, tramite un interfaccia semplificata, avverte in caso di superamento dei limiti impostati e di salvare su file i dati campionati.

L'utente del *software*, posizionando il *mouse* sul sensore corrispondente, ha accesso agli andamenti di temperature e umidità del sensore e visualizzare lo status della trasmissione e il valore puntuale (ultimi dati campionati) dei dati ambientali e i limiti stabiliti. L'elemento grafico che rappresenta il sensore, anche se non è selezionato, cambia il colore in base al suo status:

- Verde se i limiti sono rispettati
- Lampeggiante giallo rosso nel caso che uno dei due limiti venga superato
- Oscurato se il timeout di ricezione viene superato.

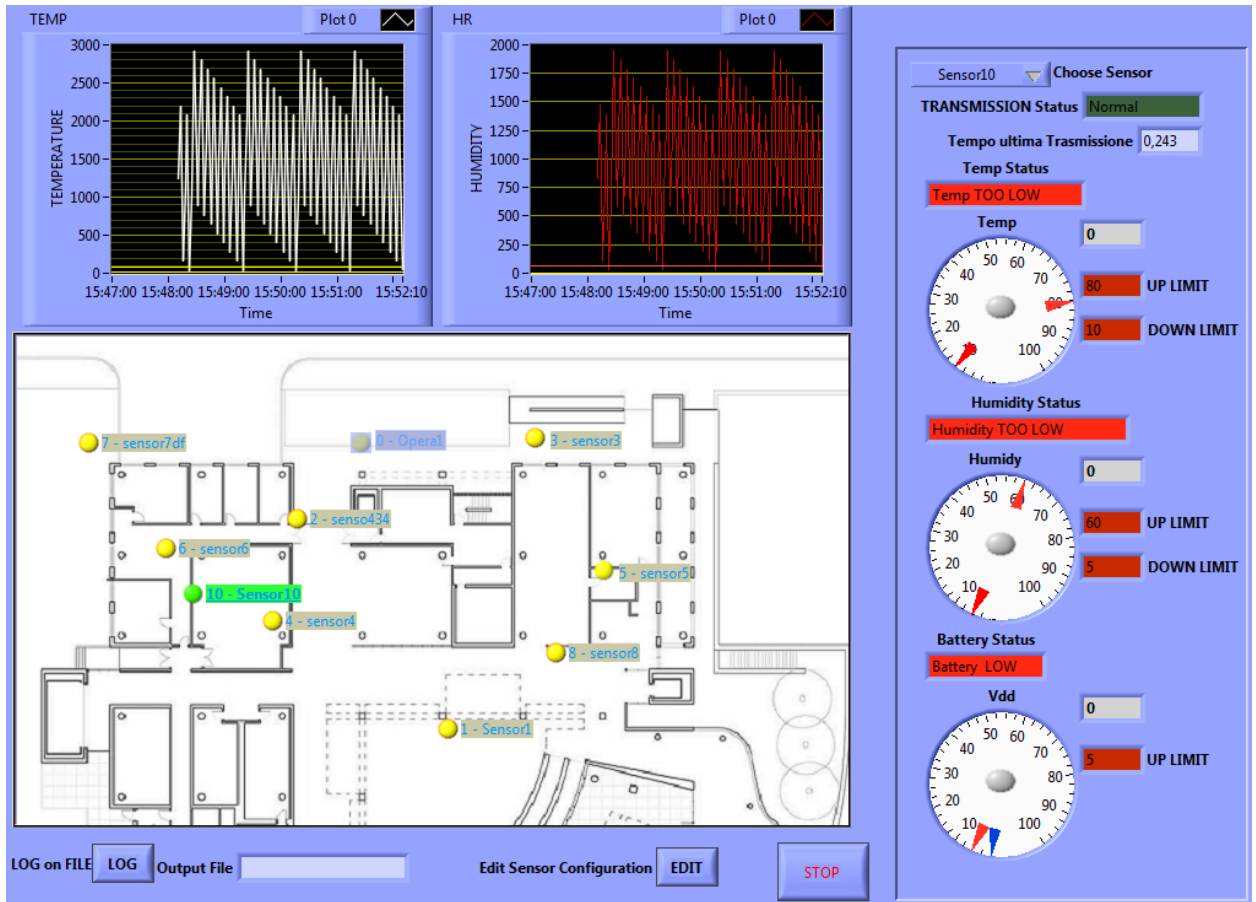


Figura 45 Software - la visualizzazione dei dati rilevati dai sensori

5. Conclusioni

Gli obiettivi di questo lavoro di tesi sono stati l'ideazione, la progettazione e la realizzazione di un sistema di monitoraggio microclimatico museale di ridotte dimensioni, versatile, affidabile e facilmente configurabile. Il panorama del mercato del settore non presenta prodotti che rispondano allo scopo con caratteristiche di peso e dimensioni ridotte e che, al contempo, permettano una gestione flessibile ed espandibile, tali da rispondere in maniera ottimale alle principali esigenze applicative in ambito museale.

Il lavoro si è concentrato principalmente sullo sviluppo del modulo sensore che rappresenta il punto più critico del sistema in quanto non solo deve essere affidabile e preciso, ma, essendo l'elemento che viene posto nelle dirette vicinanze dell'opera, deve presentare caratteristiche tali da essere il più ridotto possibile dal punto di vista delle dimensioni, comunicare i dati in modo da non avere cablaggi, permettere un semplice riposizionamento in caso di necessità e avere una manutenzione ridotta.

Allo stato attuale eliminare il collegamento fisico e mantenere le dimensioni ridotte in applicazioni di lunga durata rappresenta una sfida tutt'altro che banale: infatti, i sistemi convenzionali di comunicazione wireless in uso, pur avendo caratteristiche di versatilità e affidabilità, hanno tutt'ora il grosso limite del consumo che richiede dunque un pacco batterie di dimensioni e peso non trascurabili. Per poter eliminare l'inconveniente si è integrato nel dispositivo un sistema radio brevettato che ha consentito la sensibile riduzione di ingombro e consumi. Infatti le misurazioni dei consumi effettuate durante la trasmissione e i tempi ridotti necessari a trasmettere le informazioni fanno sì che il consumo energetico rientri nel del bilancio energetico del dispositivo, consentendo, con una comune batteria a bottone di arrivare ad una vita del dispositivo di 2-3 anni.

Durante lo sviluppo del progetto, oltre allo studio per ottenere il modulo del sensore compatto, ottimizzando PCB, scegliendo adeguatamente tecniche di misurazione e componenti, si è affrontata la problematica associata ai parassitismi e alla taratura del sensore stesso. La scelta dei componenti e della loro implementazione è stata fatta esaminando attentamente le effettive esigenze di monitoraggio all'interno del museo che non

richiedono una trasmissione dei dati frequente e una precisione del sensore spinta, mentre necessitano di sistemi che siano il più ridotti possibile con consumi estremamente bassi: con il personale tecnico-scientifico del settore sono state determinate le caratteristiche in termini di tempo di campionamento e di accuratezza nella misurazione dei parametri. Le richieste di frequenza di campionamento dei dati sono di un campionamento ogni 10 minuti circa, mentre la precisione di misurazione della temperatura è di 1°C e di rilevamento dell'umidità relativa attorno al 5%. Questi dati sono stati sfruttati per bilanciare le risorse energetiche e di calcolo, in modo da raggiungere tutti gli obiettivi del sistema, sia in termini di prestazioni, sia per quello che concerne i punti critici di dimensioni e durata della batteria. La scelta del sensore e delle tecniche di utilizzo, i circuiti progettati e le soluzioni di implementazione hanno perseguito dunque tutti questi obiettivi. In particolar modo le soluzioni adottate per la misurazione dell'umidità e della temperatura possono risultare poco adatte al raggiungimento di precisioni elevate, ma rispondono in maniera ottimale alle esigenze e risultano vincenti in termini di consumo e ingombro. La risoluzione ottenuta di 0.5°C per la temperatura e del 4% per l'umidità relativa, se confrontate con altri sistemi possono risultare inferiori, ma sicuramente rispondo a pieno alle esigenze e hanno permesso di raggiungere gli obiettivi energetici e di occupazione ridotta: infatti il sistema non è, come spesso accade, concepito come sistema generico per applicazioni di monitoraggio in diversi settori, ma specifico per l'impiego in ambito museale.

Per quello che riguarda lo sviluppo del modulo di ricezione dei dati, questo per ora è stato sviluppato solo in parte per consentire il completamento della prima parte del progetto: all'interfaccia seriale impiegata attualmente si sostituirà nelle versioni finali del prodotto quella ethernet o Wi-Fi, in modo da potersi interfacciarsi alle reti già presenti, in modo da non gravare sulle risorse dell'utilizzatore con richieste di creazione di infrastrutture ex novo. Tuttavia questa parte, non avendo le problematiche di dimensioni e consumo dei moduli sensori, non presenterà particolari ostacoli nello sviluppo di cui si prevede il completamento in poco tempo.

6. Bibliografia

1. **D'Agostino, Vanessa.** *Tesi "Condizioni Microclimatiche e di qualità negli ambienti museali"*. 2005.
2. **Mahalik., Nitaigour P.** *Sensor Networks and Configuration: Fundamentals, Standards, Platforms, and Applications*. s.l. : Springer, 2006.
3. **E. Callaway, P. Gorday, L. Hester, J.A. Gutierrez, M. Naeve, B. Heile, and V. Bahl.** Home networking with iee 802.15.4: a developing standard for low-rate wireless personal area networks. *Communications Magazine, IEEE*. Agosto 2002, p. 70-77.
4. *Ultra-wide band radio: introducing a new technology.* **Siwiak, K.** 2001. Vehicular Technology Conference. p. 1088–1093 vol.2.
5. **Mahalik., Nitaigour P.** *Sensor Networks and Configuration: Fundamentals, Standards, Platforms, and Applications*. s.l. : Springer, 2006.
6. Sistema ELTEK. [Online] http://www.edilportale.com/prodotti/domodry/strumento-di-misura-controllo-termografia-infrarosso/sistema-di-monitoraggio-microclimatico-eltek_12996.html.
7. NI-Wireless Sensor Network. [Online] <http://www.ni.com/wsn/i>.
8. Sistemi LAMBDA. [Online] <http://www.lambdaspa.com/en/p-33.microclimate.html>.
9. Sistema MUSA. [Online] http://www.ad-in.it/prodotti.php?lingua=ita&id_cat=00001&id_sub_cat=00025&cat=Il%20sistema%20Musa&action=elenco.
10. Sistema ELEDIALAB. [Online] <http://eledia.science.unitn.it/index.php/trasferimento-tecnologico/demos/120-trasferimento-tecnologico/demos/demo-article/61-security-systems>.
11. Datasheet SHT21. s.l. : Sensiron.
12. Datasheet DHT11. *DHT11 Humidity & Temperature*. s.l. : D-Robotics UK.

13. Datasheet HCT11. *HCT11 Humidity/Temperature Sensor*. s.l. : E+E Elektronik.
14. *METHODS OF ACCURATELY MEASURING CAPACITIVE RH SENSORS*. **Kevin Bull**. Rio de Janeiro - Brasil : Veriteq Instruments Inc., 2006. 5th-International Symposium on Humidity and Moisture.
15. **Prof.S.Cova**. *Appunti per il corso "SENSORI SEGNALE E RUMORE"*. Milano : Dispense CLUP.
16. **Pressman, Roger S**. *Principi di Ingegneria del software* . s.l. : McGraw-Hill.

RINGRAZIAMENTI

Vorrei ringraziare, innanzitutto, la Dott.ssa Mancuso e l'ing.Pizzocolo per avermene dato la possibilità e per avermi supportato (e sopportato) durante quest'esperienza di tesi, non solo dal punto di vista tecnico ma anche umano.

Questi anni lontano da casa, mi hanno fatto capire come il supporto psicologico possa essere anche più indispensabile di quello materiale, e non posso non ringraziare Mamma, Papà e Francesca per non avermi fatto mai mancare nessuno dei due.

Se sono arrivato alla fine di questo percorso di studi lo devo anche a Mico, Giorgio, Peppe e Giovanni che anche nei momenti più difficili sono sempre riusciti a farmi sorridere.

E dulcis in fundo devo ringraziare Francesco per una lista di cose troppo lunga ma che lui conosce bene.