



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI TECNICA E GESTIONE DEI SISTEMI INDUSTRIALI
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA E MECCATRONICA
CURRICULUM MECCATRONICO

Tesi di Laurea:

Il Data Logging di Temperatura con Protocollo
1-Wire

Relatore:
Ch.mo Prof. Alessandro SONA

Laureando:
Marco ADRIANI

Anno accademico 2015/2016

Prefazione

La seguente trattazione nasce con lo scopo di fornire al lettore una panoramica chiara degli attuali metodi di data logging di temperatura, soffermandosi in particolare in quelli che prevedono una comunicazione innovativa qual è la 1-wire. Si evidenzia come si sia fatto abbondante uso di immagini ed esempi ideati appositamente per chiarire bene i concetti che saranno necessari per comprendere man mano gli argomenti trattati.

Per arrivare a ciò verrà fornita una breve illustrazione di come l'uomo, negli anni, abbia trovato soluzione all'esigenza di conoscere la temperatura e di trovarne un valido metodo di rilevazione e misurazione. Questa piccola divagazione storica ha lo scopo di inserire meglio il lettore all'interno dei problemi che riguardano questo, apparentemente semplice, ma invece di grande complessità ambito di misurazione, e appunto delle soluzioni che sono man mano state migliorate per affrontarlo al meglio. Si entrerà quindi nel cuore della trattazione parlando del data logging di temperatura, ovvero il monitoraggio per lunghi periodi di questa grandezza fisica, e dei problemi che vanno affrontati in questi casi, tra cui la necessità di comunicare i dati acquisiti dal data logger a degli elaboratori o a delle unità di visualizzazione. Questo introdurrà l'utilizzo della comunicazione seriale 1-wire, di grande interesse ed uso al momento per via della sua grande affidabilità e scarso ingombro.

Per avere una buona visione d'insieme del tema trattato finora si analizzerà quindi un data logger 1-wire di temperatura, nello specifico ne verranno trattati i parametri essenziali per completare la visione qualitativa dei data logger vista finora, con una analisi quantitativa. La scelta del sensore per questa discussione ricade sul DS1922L della Maxim Integrated, questo dispositivo ha ottime caratteristiche tecniche e di affidabilità, e inoltre ha un costo molto contenuto. Con questo si vuole andare incontro a coloro che si trovassero nel caso di dover scegliere quale data logger impiegare per la propria misurazione, risparmiando la lettura dei datasheet e fornendo già i parametri fondamentali di questo sensore particolarmente performante.

Indice

Prefazione	I
1 Il sensing di temperatura	1
1.1 La misurazione della temperatura	1
1.2 Sensori di Temperatura	2
1.2.1 Termocoppie	2
1.2.2 Termoresistenze	3
1.2.3 Pt100	3
1.2.4 Termistori	3
1.2.5 Sensori IC	4
1.2.6 Pirometri ottici	4
1.3 Scelta di un sensore	5
2 Il data logging	7
2.1 Vantaggi e problematiche del data logging	8
2.2 Sviluppi futuri	11
3 Il protocollo 1-wire	13
3.1 Struttura della linea 1-wire	13
3.2 Esecuzione di un comando	14
3.2.1 Impulso di reset e presenza	15
3.2.2 Sequenza di comando ROM	16
3.2.3 FCC: Funzioni di Comando e Controllo	19
3.3 La trasmissione dati	20
3.3.1 Scrittura 1-logico	20
3.3.2 Scrittura 0-logico	21
3.3.3 Lettura 1-logico	21
3.3.4 Lettura 0-logico	22
4 Un esempio pratico: il sensore DS1922L	23
4.1 Risoluzione dimensionale	25
4.2 Accuratezza	26
4.3 Frequenza di campionamento	27
4.4 RTC: Real Time Clock	29
4.5 La misurazione della temperatura	30
4.5.1 Rappresentazione della temperatura	30
4.5.2 Conversione della temperatura	31
4.5.3 Correzione degli errori	32
4.6 Funzionalità extra	34

Conclusioni	37
Bibliografia	39
Sitografia	41

Capitolo 1

Il sensing di temperatura

Come ben noto la temperatura è un indice dell'energia cinetica media all'equilibrio di tutti gli atomi o molecole del corpo preso in esame. Questa grandezza fisica intensiva¹ ha la particolarità di essere altamente variabile, a causa dei molti fattori che la influenzano e che ne portano una variazione. Tra questi ricordiamo ad esempio le caratteristiche chimiche del materiale di cui stiamo analizzando la temperatura e i tre metodi di trasmissione della temperatura: conduzione, convezione, irraggiamento. A causa soprattutto di questi ultimi tre, la temperatura non è mai perfettamente stabile e questo ne rende difficile la misurazione ad alta risoluzione, a maggior ragione se lavoriamo con corpi piccoli aventi piccole capacità termiche e quindi brevissimi tempi di transizione termica.

1.1 La misurazione della temperatura

La conoscenza della temperatura è un'esigenza che l'uomo ha avuto sin dai tempi antichi. Già nell'antica Grecia infatti i grandi pensatori proponevano le più svariate teorie per giustificare come dei corpi potessero essere al tatto "caldi" mentre altri "freddi". Tuttavia al tempo ancora non si possedeva la conoscenza necessaria per costruire dei veri e propri termometri graduati, si riusciva al massimo a costruire dei primitivi termoscopi in grado di confrontare la temperatura del corpo in esame con un numero finito (in genere inferiore a 4) di temperature campione.

Per arrivare a delle misurazioni graduate di temperatura dobbiamo aspettare gli inizi del 1600, dove gli studi di Galileo introdurranno l'idea della divisione in quanti di temperatura, per portare poi alla costruzione verso il 1650 del primo termometro graduato a dilatazione d'aria. Grazie al trampolino di lancio che fu il termometro ad aria vennero poi introdotti tra il 1650 e il 1700 i termometri a gas e nei primi anni del 1700 quelli a liquido (alcol o mercurio).

Tutti i nuovi tipi di termometro introdotti in questo periodo sfruttavano il fenomeno fisico della dilatazione termica. Nello specifico l'elemento dilatante del termometro (aria, gas, liquido) veniva contenuto in un sottile tubo di vetro all'interno del quale si espandeva o contraeva all'aumentare della temperatura. Graduando il tubo di vetro era quindi possibile, per la prima volta nella storia, quantizzare la temperatura lungo una scala arbitraria e associarle un valore. Questa scala aveva però il difetto, appunto per la sua arbitrarietà, di poter fornire solo misurazioni di variazioni di temperatura, in quanto le scale di più termometri non avevano un punto di riferimento comune con il quale rendere possibile il confronto di misure tra termometri diversi.

Arriviamo quindi al 1714, anno in cui il fisico Gabriel Fahrenheit propose una scala di temperatura che fissava due punti fissi presi come punti di riferimento per rendere confrontabili le misure di temperatura. Questi due punti vennero scelti come il punto di fusione del ghiaccio ($32^{\circ}F$) e quello di evaporazione

¹Una grandezza fisica intensiva viene definita come tale se NON dipende dalle dimensioni geometriche del corpo in esame (nel caso sarebbe estensiva), ma dipende solo dalle condizioni in cui si trova il corpo e dalle caratteristiche morfologiche e chimico-fisiche nelle quali si trova.

dell'acqua ($212\text{ }^{\circ}F$), l'intervallo tra questi due punti venne poi diviso in 180 livelli, dove ciascuno acquisiva il significato di $1\text{ }^{\circ}F$.

Verranno poi introdotte rispettivamente nel 1742 e 1954 le scale Celsius misurata in $[^{\circ}F]$ e quella Kelvin misurata in $[K]$. La prima prenderà gli stessi punti di riferimento della scala Fahrenheit, associando però alla fusione del ghiaccio $0\text{ }^{\circ}C$ e all'evaporazione dell'acqua $100\text{ }^{\circ}C$, e dividendo l'intervallo compreso in 100 divisioni. La seconda invece è tuttora la scala di temperatura assoluta a cui è associata l'unità di misura dell' SI², questa numerazione prevede di fissare un limite inferiore alla scala oltre al quale non è possibile scendere ($0\text{ K} \approx -273.15\text{ }^{\circ}C$) e di usare come intervallo un quanto uguale a quello del grado Celsius, quindi $1\text{ }^{\circ}C = 1\text{ K}$.

Per la trattazione seguente verrà usato il, più comune e di immediata comprensione, anche se meno "scientifico" $[^{\circ}C]$.

1.2 Sensori di Temperatura

I Sensori di temperatura sono gli strumenti che consentono di convertire la grandezza fisica *Temperatura* $[^{\circ}C]$ in una grandezza elettrica, tipicamente *Tensione* $[V]$.

Le modalità con cui può avvenire la conversione *Temperatura* \implies *Tensione* possono essere le più svariate, tra cui ricordiamo le più comuni senza entrare eccessivamente nel dettaglio in quanto non rientra tra gli scopi di questa trattazione (Figura 1.1).

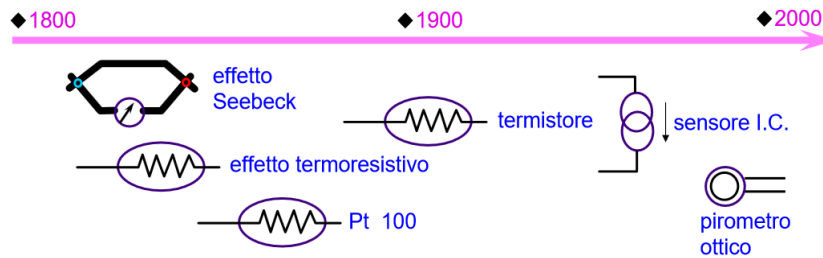


Figura 1.1: Evoluzione delle metodologie per la misurazione della temperatura.

1.2.1 Termocoppie

Sfruttano l'effetto Seebeck³ per generare una tensione NON linearmente collegata alla temperatura, del tipo:

$$V = A \cdot T_x + B \cdot T_x^2 + C \cdot T_x^3 + D \cdot T_x^4 + \dots \quad (1.1)$$

Con A, B, C, D, \dots coefficienti ricavabili sperimentalmente.

Le termocoppie sono vastamente applicate in campo industriale, avendo una elevata robustezza e dimensioni ridotte, a scapito però di una bassa accuratezza causata da una transcaratteristica non lineare. Altro vantaggio interessante di questi sensori è la loro bassa capacità termica (dovuta anche alle dimensioni ridotte) e quindi all'alta velocità di risposta della termocoppia, che trasduce rapidamente variazioni di temperatura in variazioni di tensione

Ultima, ma di fondamentale importanza, caratteristica delle termocoppie è che possono essere realizzate con i più svariati materiali conduttori, per cui possono essere adeguate alle specifiche di ciascun

²Sistema Internazionale di unità di misura.

³L'effetto Seebeck è un effetto termoelettrico per cui, in un circuito costituito da diversi conduttori metallici o semiconduttori, una differenza di temperatura genera tensione.

utilizzatore. Se realizzate in metalli nobili possono, per esempio, misurare temperature fino a $1700\text{ }^{\circ}\text{C}$, e quindi essere applicati per monitoraggi di altiforni o altri macchinari nell'industria siderurgica.

1.2.2 Termoresistenze

Le termoresistenze, altrimenti chiamate RTD (Resistance Thermal Detector), sono trasduttori elettrici passivi che sfruttano la proprietà dei metalli di variare la resistività elettrica con la temperatura secondo la legge approssimata⁴:

$$R(T_x) = R_0(1 + \alpha \cdot T_x) \quad (1.2)$$

Dove T_x è la temperatura incognita attuale, R_0 la resistenza a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, e α il coefficiente termico di resistività del materiale.

Le termoresistenze sono costituite da sottili fili di materiale conduttore (in genere Platino, Nichel o Tungsteno), avvolti attorno a un supporto ceramico cilindrico. Iniettando una corrente nota in questo circuito e misurando la tensione che cade ai suoi capi si può ricavare la resistenza da cui si può dedurre la temperatura assoluta.

Tra i vantaggi si ricordano gli ampi intervalli di misurazione, anche se non si raggiungono temperature elevate come nelle termocoppie, elevate variazioni di tensioni di uscita (quindi facilmente rilevabili), possibili misurazioni ad area (ovvero disponendo il filamento conduttore su un'area è possibile ricavarne la temperatura media, mentre le termocoppie forniscono misure di temperatura puntuali).

Gli svantaggi invece sono la non linearità e le derivate elevate nel caso di filamenti in materiali non nobili.

1.2.3 Pt100

Indicano una Termoresistenza al Platino con $R_0 = 100\ \Omega$, esistono tuttavia anche sensori con valori di resistenza a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ diversi.

Queste termoresistenze nascono con lo scopo di trovare rimedio ai difetti dei loro predecessori, quindi sono molto stabili nel tempo (derivate anche di soli $0.0025\text{ }^{\circ}\text{C}$ per anno) e hanno una trascurata caratteristica più lineare dei normali RTD. A causa di questi grossi vantaggi vengono spesso utilizzati come sensori per strumenti di riferimento e calibrazione nei centri di taratura.

Possono venire realizzati sia con il tradizionale filo avvolto, sia con un film sottile di platino depositato su un substrato ceramico. In quest'ultimo caso aumenta la precisione e cala la capacità termica, facendo calare i tempi di risposta del sensore.

1.2.4 Termistori

I termistori funzionano secondo lo stesso principio delle termoresistenze utilizzando però materiale semiconduttore invece di metalli solidi. Questa scelta comporta una diversa trascurata caratteristica rispetto agli RTD, ricordiamo quella più usata:

$$R(T_x) = R_0 \cdot e^{\left(\frac{B}{T_x} - \frac{B}{T_0}\right)} \quad (1.3)$$

Nella quale si indica con B una temperatura caratteristica ricavabile sperimentalmente, e fortemente dipendente dalla sensibilità.

⁴La dipendenza della resistenza dalla temperatura viene qui indicata come lineare, ma nella realtà essa dipende anche da termini del secondo e terzo ordine. Ad esempio per termoresistenze al platino, tra $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, la relazione diventa cubica: $R(T_x) = R_0(1 + A \cdot T_x + B \cdot T_x^2 + C \cdot (T_x - 100\text{ }^{\circ}\text{C}) \cdot T_x^3)$.

Si comprende quindi come, in questo caso, la resistenza cali all'aumentare della temperatura, al contrario degli RTD dove aumenta. Inoltre è evidente come la relazione suddetta non sia lineare, a tal scopo si abbina sempre al sensore una rete correttiva che ne linearizzi la transcaratteristica. Questo in genere va a scapito della sensibilità, che però in questi sensori è già elevatissima⁵ e quindi tranquillamente declassabile.

Altri vantaggi del loro uso, oltre all'alta sensibilità, sono il basso costo (minore degli RTD) e la loro rilevazione puntuale, possono essere infatti realizzati sensori con bulbi delle dimensioni di uno spillo. Tra gli svantaggi invece si ricordano l'alta fragilità dovuta all'uso di semiconduttori, l'elevato tempo di risposta dovuto all'alta resistenza termica del sensore, e all'elevata perturbazione che esso porta nell'oggetto in misurazione (se di dimensioni piccole), in quanto il sensore funge da dissipatore alterandone la temperatura.

1.2.5 Sensori IC

I sensori di temperatura integrati (IC) sfruttano il fatto che nelle giunzioni a semiconduttore (diodi e transistor) la tensione e la corrente sono fortemente dipendenti dalla temperatura. La dipendenza è peraltro notevolmente lineare. Nel caso di una giunzione PN dalla relazione tra corrente e tensione è possibile ricavare la seguente relazione tra tensione e temperatura:

$$V = \frac{E_g}{q} - \frac{2 \cdot k \cdot T_x}{q} \cdot (\ln(K) - \ln(I)) \quad (1.4)$$

Nella quale si indica con E_g il gap di energia del materiale, q la carica dell'elettrone, K una costante del materiale, k la costante di Boltzman.

Sulla base di questa relazione possono venir realizzati sensori con uscita in corrente o in tensione, a seconda delle specifiche dell'utilizzatore. Ad esempio se si fornisce una corrente costante allora sarà la tensione e darà un indicazione di temperatura, variando con essa.

I vantaggi del loro utilizzo sono sostanzialmente l'alta linearità e l'alta accuratezza, a scapito però di un ridottissimo range di temperatura (da $-55^\circ C$ a $150^\circ C$ circa).

1.2.6 Pirometri ottici

Sono trasduttori elettrici a infrarossi che si fondano sulla trasmissione del calore per irraggiamento elettromagnetico e sulla legge di Planck che la regola. Supponendo che tutte le lunghezze d'onda emesse dall'oggetto radiante raggiungano il sensore, allora la potenza ottica emessa per unità di superficie e che raggiunge il trasduttore vale:

$$P = \varepsilon \cdot k \cdot T_x^4 \quad (1.5)$$

Dove ε è il potere emissivo per tutte le lunghezze d'onda (< 1).

Come si comprende dal suo principio di funzionamento, questo sensore lavora "non a contatto" come avviene negli altri sensori, ciò garantisce la non invasività della misura (non viene estratto calore dal corpo in esame). Oltre a questo grande vantaggio si ricorda l'alta stabilità e la sua possibilità di misurare anche alte temperature senza deteriorarsi. Tra gli svantaggi invece spicca la dipendenza della potenza ricevuta dal sensore dalla quarta potenza della temperatura, e quindi dalla non linearità del trasduttore.

⁵La sensibilità di questi sensori è di 3-6 ordini di grandezza maggiore degli RTD, questo a causa anche della loro resistenza più elevata.

1.3 Scelta di un sensore

La scelta di un sensore di temperatura da utilizzare per una determinata applicazione è una delle fasi più importanti e delicate di un progettista, in quanto esso è il “cuore” di una catena di misura. Si riassumono brevemente i fattori che hanno maggior impatto nella scelta:

1. specifiche della misura, che ricadono quindi su parametri del sensore quali:
 - risoluzione: più piccola variazione della grandezza in ingresso rilevabile dal sensore tramite una sensibile variazione della sua uscita;
 - accuratezza: grado di precisione con cui è conosciuta la transcaratteristica del sensore e eventualmente della sua stabilità nel tempo (dovuta alla deriva);
 - sensibilità: definisce quanto più facilmente viene rilevata una piccola variazione della grandezza fisica in ingresso corrisposta da una grande variazione in uscita;
 - input range in $[^{\circ}C]$: scelta in base al range di temperatura che voglio misurare e che è tipico dell’ambiente di utilizzo in esame;
 - precisione: capacità del sensore di fornire misure vicine tra loro a parità di grandezza di ingresso, può essere anche definita come “ripetibilità”;
 - immunità al rumore termico e/o flicker⁶.
2. tempi di risposta del sensore;
3. capacità termica, dimensioni, e geometria del sistema e del sensore;
4. errori di approssimazione commessi dal sensore nel rilevare/trascurare effetti di conduzione, convezione, e irraggiamento;
5. interazioni del dispositivo con l’ambiente di misura: la misura di una temperatura comporta sempre un trasferimento di calore (energia termica in transito) dal misurando/processo al sensore. In generale l’inserzione del sensore di temperatura nel processo da controllare modifica le condizioni di misura iniziali, questo “effetto di carico” è conseguenza dell’estrazione di una certa quantità di calore dal processo stesso;
6. possibilità di usare la sua uscita per il controllo, la regolazione, e eventuali altre funzioni richieste;
7. costo, reperibilità e integrabilità del sensore.

Nel caso in cui l’utente non sia un progettista, ma un utente poco esperto, sono ovviamente disponibili in commercio i sensori con la catena di misura già realizzata, e ottimizzati per determinati scopi, quindi i fattori da considerare per scegliere questi *strumenti di misura* vengono a ridursi considerevolmente.

Si riporta ora una tabella riassuntiva delle caratteristiche dei vari sensori, che ne facilita la scelta evidenziando le peculiarità di ciascuno, e una che dia per ciascuno i principali utilizzi:

⁶Rumore intrinsecamente introdotto dall’utilizzo di dispositivi a semiconduttore.



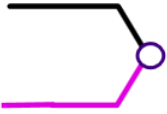
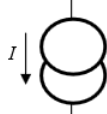

 RTD	 Termistore	 Termocoppia	 S. Integrato	 Pirometro
<ul style="list-style-type: none"> • sensibile • molto stabile • molto accurato • abbastanza lineare 	<ul style="list-style-type: none"> • veloce • molto sensibile • collegamento a 2 fili • economico 	<ul style="list-style-type: none"> • economico • <i>range</i> esteso • ampia scelta • robusto • veloce 	<ul style="list-style-type: none"> • accurato • economico • lineare 	<ul style="list-style-type: none"> • non invasivo • molto stabile • temperature elevate • <i>range</i> esteso
<ul style="list-style-type: none"> • lento • costoso • collegamento a 4 fili 	<ul style="list-style-type: none"> • non lineare • <i>range</i> limitato • fragile 	<ul style="list-style-type: none"> • non lineare • misure relative (2 aiuti) 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>range</i> molto limitato • scelta limitata 	<ul style="list-style-type: none"> • non lineare • costoso

Figura 1.2: Principali caratteristiche dei sensori trattati.

Sensori	Misure tipiche
• RTD	• Processi fotochimici, monitoraggio temperatura sostanze alimentari
• Termistori	• Sistemi di riscaldamento, elettronica industriale e di consumo, telecomunicazioni controllo di temperatura diodi laser
• Termocoppie	• Forni a induzione, forni per uso alimentare, applicazioni industriali
• Sensori Integrati	• Celle frigorifere, compensazione di temperatura in dispositivi di qualità
• Pirometri	• Vetro/quarzo fondente, acciaierie, alte temperature in genere

Figura 1.3: Utilizzi tipici dei sensori trattati.

Capitolo 2

Il data logging

Il Data Logging è il processo di misura, registrazione, e elaborazione (Figura 2.1) di parametri elettrici o fisici in un dato intervallo di tempo. Le misure comuni includono temperatura, deformazione, tensione, corrente, pressione, forza e accelerazione.

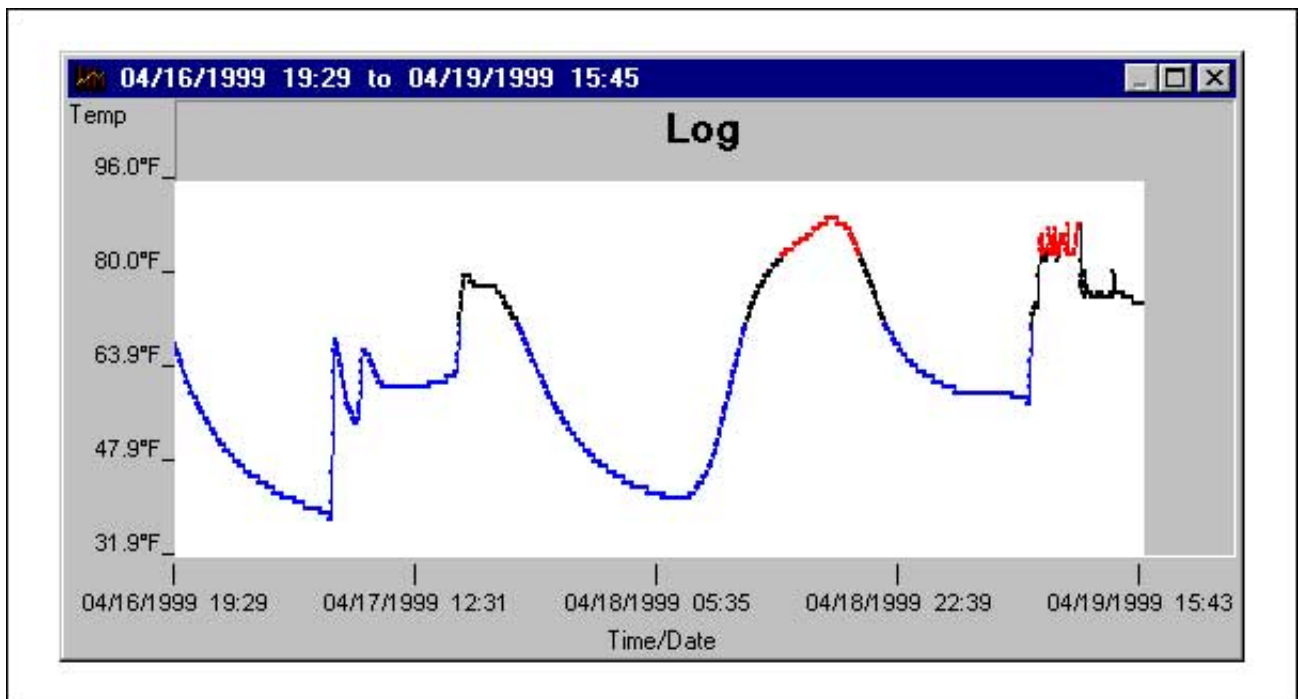


Figura 2.1: Un esempio di data logging di temperatura eseguito con un sensore DS1921G della Maxim Integrated. Il monitoraggio della temperatura è stato in questo caso di tre giorni.

Quando un data logger viene programmato per un certo compito di monitoraggio si dice che gli è stata affidata una missione (o task). Dal momento dell'assegnazione della missione in poi, il sensore procederà ad acquisire la grandezza fisica per la quale è stato costruito per l'intervallo di tempo prestabilito, quindi l'intervento umano non è più richiesto. Questo è uno dei grandi vantaggi dei data loggers, ovvero la completa autonomia che hanno durante una missione, cosa che consente anche di interfacciarsi a un network controllato da una CPU master senza che un operatore controlli quando e come acquisire dati (si tornerà più in dettaglio sull'argomento più avanti, quando si parlerà dei network 1-wire).

La maggior parte dei sensori hanno un proprio software che viene fornito col sensore stesso o scaricabile da internet, altri invece sono controllabili solo tramite Lab View: quest'ultimo si presta perfettamente

alla funzione di monitoraggio di grandezze fisiche tramite grafici e spie, come pure alla gestione di più sensori nello stesso network (tramite seriale).

Lo schema in Figura 2.2 rappresenta un esempio di network molto comune. Nella fattispecie viene eseguito un monitoraggio e una correzione della qualità dell'aria tramite un master FE1011 che riceve informazioni da dei sensori FE1017 di temperatura, pressione e umidità, e contemporaneamente controlla dei regolatori di velocità che a loro volta controllano delle ventole per l'aerazione.

In genere i sensori che operano in modalità data logging lavorano ininterrottamente per lunghi periodi, in funzione della durata del fenomeno fisico da monitorare o dell'arco di tempo scelto per l'analisi. Nello specifico i data loggers di temperatura vengono spesso usati per missioni lunghe mesi, anni o talvolta che durano per l'intera vita del componente sul quale sono applicati; essi trovano quindi applicazione in:

- monitoraggio delle condizioni di un veicolo;
- macchine soggette a variazioni termiche durante il normale funzionamento (macchine frigorifere, forni);
- luoghi che possono raggiungere temperature potenzialmente pericolose per macchine e/o persone;
- monitoraggi ambientali e di flora e fauna¹;
- monitoraggi antincendio;
- singole misure².

2.1 Vantaggi e problematiche del data logging

Mentre in una normale misurazione di temperatura nel luogo di misurazione si trovano solo il sensore e un eventuale circuito di condizionamento, e la parte di conversione analogico-digitale e quella di eventuale elaborazione viene eseguita in sede separata, nel data logging tutti questi processi vengono eseguiti in loco di misura. Questo introduce significative difficoltà, in quanto tutti i componenti utilizzati devono essere in grado di lavorare nel range di temperature del sensore, e ciò spesso non è possibile per componenti quali l'ADC³ che non riescono a lavorare ad alte temperature. Questo diventa molto frequentemente il fattore limitante che riduce il range di temperature di funzionamento, non capita di rado infatti, sfogliando datasheet di data loggers di temperatura, di imbattersi in diciture quali "data loggers per alte temperature" quando misurano al massimo anche soli 150 °C.

Tuttavia, nonostante questo grande svantaggio, i data loggers sono usatissimi nell'industria odierna. Questo a causa dell'alta risoluzione che riescono ad ottenere convertendo la temperatura subito dopo il sensore, invece che dopo una trasmissione che può essere lunga anche parecchie decine di metri come accade nel sensing tradizionale. All'aumentare della lunghezza aumentano infatti sia i problemi di

¹E' attualmente molto in uso la pratica di applicare dei piccoli data logger gps all'interno o all'esterno di animali. Questi apparecchi forniscono quindi dati sia sulle rotte migratorie sia su temperatura, umidità e altri parametri dell'animale monitorato.

²Spesso, anche se il sensore viene predisposto a funzionare in modo continuo, viene richiesto da necessità software o umane di eseguire singole misurazioni. In questo caso il data logger può comunque eseguire la singola misura richiesta, ma per farlo non deve avere nessuna missione attiva.

³ADC: convertitore analogico-digitale.

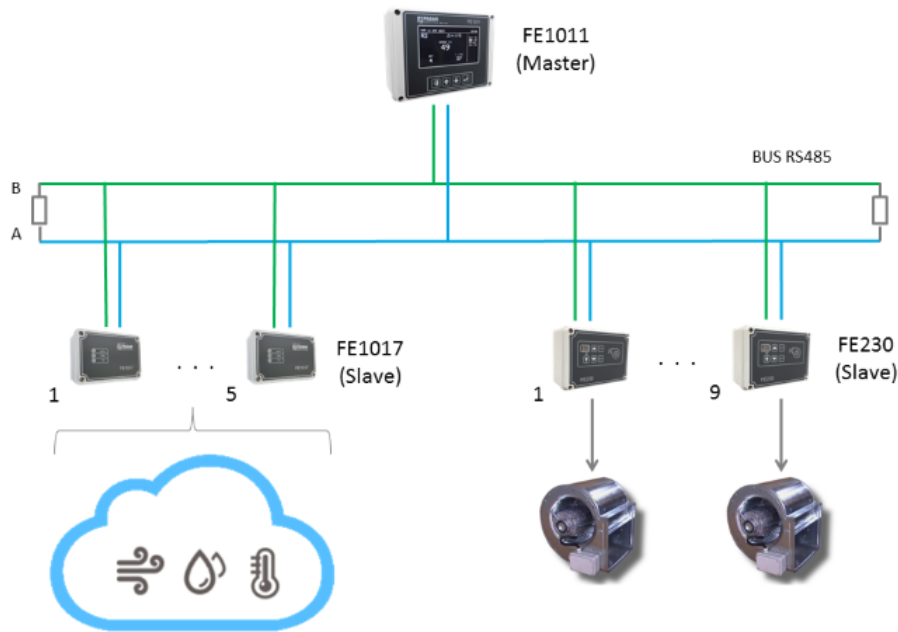


Figura 2.2: Un esempio di Network per il controllo della qualità dell'aria realizzato con comunicazione bus.

riflessione⁴ che i disturbi dovuti al rumore, questi ultimi non completamente filtrabili da un circuito bassa-basso⁵.

Si ricorda infatti come la risoluzione Δ di un ADC sia data da:

$$\Delta = \frac{R}{2^B} \quad (2.1)$$

Dove R in [V] corrisponde all'input range dell'ADC che assolve alla funzione di quantizzazione nel processo di conversione analogico-digitale, e B al suo numero di *bit*. Questa relazione vale però solo in caso di rumore nullo, in caso contrario la risoluzione dell'ADC peggiora, diventando:

$$\Delta \geq \frac{R}{2^B} \quad (2.2)$$

Oppure, considerando un numero di *bit* effettivi dovuti al rumore:

$$\Delta = \frac{R}{2^{B_e}} \quad (2.3)$$

⁴All'interno di una linea di collegamento, lungo la quale vengono trasmessi segnali, si osserva il fenomeno della riflessione, ovvero quando il segnale raggiunge il carico al termine della linea esso viene riflesso indietro verso l'impedenza d'uscita dell'emettitore la quale lo riflette ancora. Per evitare questo fenomeno si deve uguagliare l'impedenza di uscita dell'emettitore, l'impedenza di ingresso del ricevente, e l'impedenza della linea di collegamento. Si parla in questi casi di linea compensata.

Nel caso in cui non subentrino le condizioni appena dette, le trasmissioni sono comunque trascurabili nel caso in cui la riflessione ritorni in tempi brevi, ovvero quando la linea è corta.

⁵Va ricordato come nelle misure tradizionali il segnale, prima di entrare nell'ADC viene filtrato per eliminare i disturbi ad alta frequenza tramite un circuito R-C, tuttavia esso non è mai completamente eliminabile.

$$B_e = B - \log_2 \left(1 + \frac{V_{r,pp} \cdot 2^B}{R} \right) \quad (2.4)$$

Con $V_{r,pp}$ la tensione picco-picco del rumore, essa in genere aumenta proporzionalmente con la lunghezza del collegamento tra sensore e ADC, quindi è evidente come accorciando questo conduttore, come accade nei data loggers dove è dell'ordine dei *mm*, la risoluzione si porti al caso ideale 4.2. Questo si evidenzia meglio sostituendo la 2.4 in 4.4 e ottenendo:

$$\Delta = \frac{R}{2^B} + V_{r,pp} \quad (2.5)$$

Dove è evidente che se il termine $V_{r,pp}$ è quasi nullo, allora:

$$\Delta \approx \frac{R}{2^B} \quad (2.6)$$

Ovvero ci si avvicina al caso ideale di perfetta risoluzione dell'ADC.

Si ricorda infine come la risoluzione dell'ADC all'interno di un data logger sia di "poca praticità", mentre ha più significato e utilità pratica la conoscenza della risoluzione dell'intero sistema di misura, la quale è data da:

$$\Delta_{sist} = \frac{R}{2^B \cdot K_0 \cdot S_x} \quad (2.7)$$

Dove si indica con K_0 (adimensionale) il guadagno del circuito di condizionamento posto tra sensore e ADC, usato per adattare il campo di grandezze di uscita del sensore con quello di ingresso dell'ADC, mentre con S_x in $[\frac{V}{^\circ C}]$ la sensibilità del sensore⁶.

A questo punto la risoluzione in $[^\circ C]$ ha assunto il significato di minima variazione di temperatura rilevabile dal data logger, di certo più comprensibile della risoluzione dell'ADC vista prima, la quale ha più interesse tecnico che pratico.

Si riporta ora, a titolo di confronto, un tipico collegamento tra sensore e ADC in un data logger e in un sensore tradizionale.

Come evidenzia bene Figura 2.3, nel sensing tradizionale la funzione di adattamento del segnale, compensazione della linea e riduzione del rumore è assolta dai blocchi di condizionamento $C1$ $C2$ e dal filtro passa basso LPF ⁷. Nel data logger invece è sufficiente un unico blocco $C1$ (in quanto le riflessioni sono trascurabili) e un LPF che adattino il segnale, quest'ultimo svolge ovviamente anche la funzione di abbattere il già pressoché nullo rumore esterno, sommato a quello termico e flicker introdotto dai vari componenti.

Un altro fattore sul quale è bene soffermarsi è la memoria interna al data logger. Infatti in questi dall'uscita dell'ADC, previo transito attraverso un bus controllato da una CPU, si arriva subito ad una memoria che immagazzina i dati raccolti, eventualmente dopo la loro elaborazione da parte dell'unità di controllo. Questo ha lo scopo di rendere il sensore completamente autonomo, esso diventa un'unità a sé dalla quale è possibile attingere dati già elaborati con estrema facilità e comodità.

Questo invece non accade nel sensing tradizionale, dove all'uscita dell'ADC ci si collega direttamente a un display di visualizzazione (che non richiede memoria) o a un'unità di controllo, che potrà eventualmente avere una sua memoria integrata. Quindi l'elaborazione viene portata avanti da unità esterna al sensore e la memorizzazione dei dati non sempre è possibile o non viene presa in considerazione.

⁶Si ricorda come la sensibilità sia data dal rapporto tra l'output range e l'input range del sensore. Nel caso di Figura 2.3 ad esempio la sensibilità del sensore vale $S_x = \frac{V'_{MAX} - V'_{MIN}}{T_{MAX} - T_{MIN}}$.

⁷Il circuito passa basso LPF viene compreso nella parte di condizionamento del segnale in quanto non sempre è un blocco avente guadagno unitario, quindi anch'esso contribuisce ad attenuare o amplificare il segnale in transito.

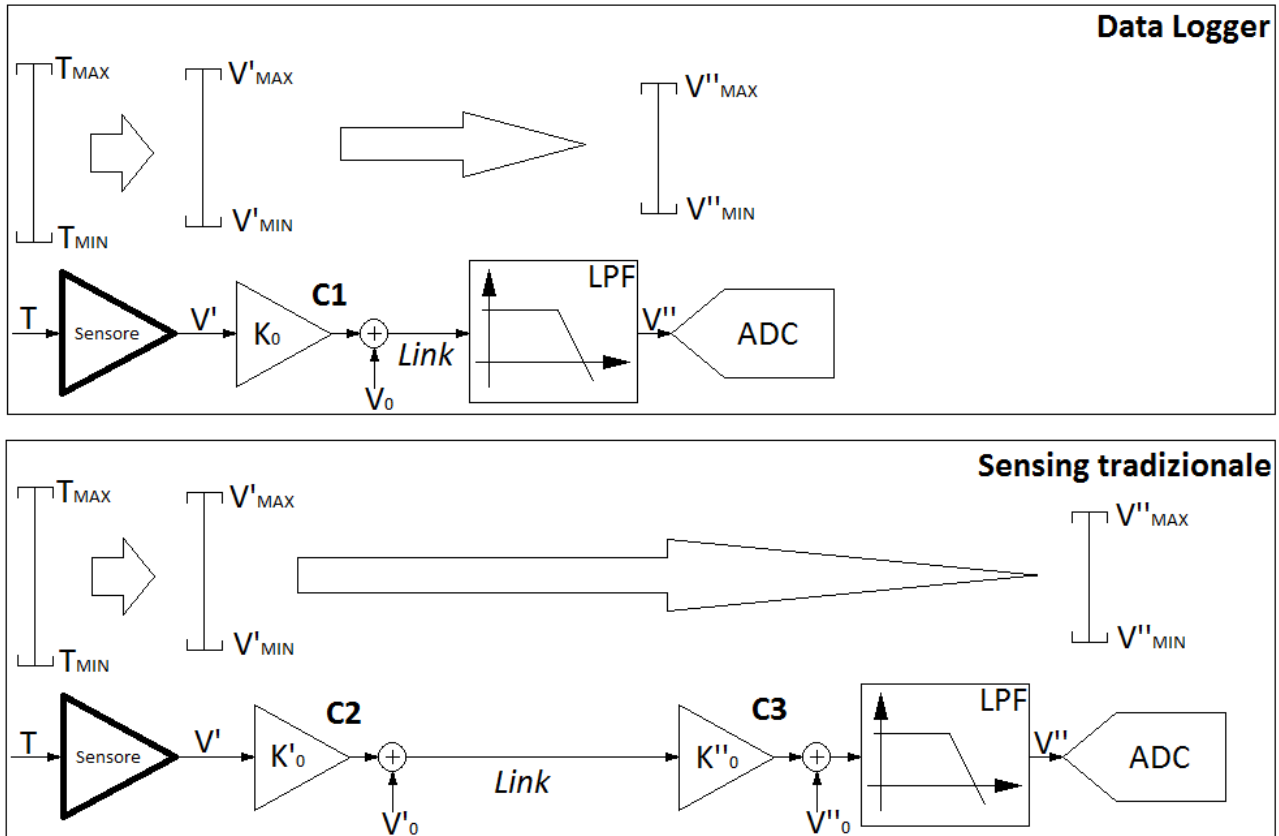


Figura 2.3: Schema a blocchi di un collegamento sensore-ADC in un data logger e in un sensore tradizionale. E' evidente come il collegamento *Link* è notevolmente più lungo nel secondo caso.

2.2 Sviluppi futuri

I primissimi data logger erano dei dispositivi stand-alone che svolgevano unicamente le loro funzioni base (ovvero misura, registrazione e elaborazione). Per accedere ai dati immagazzinati nella memoria bisognava collegarsi manualmente ad essa ed accedere ai dati volta per volta secondo la necessità. Oggi invece questi sono in grado di comunicare all'interno di network anche molto complessi e di scambiare informazioni con ogni apparecchio ivi collegato. Tutto ciò è stato possibile grazie all'introduzione di protocolli di comunicazione quale il 1-wire che definiscono delle regole per ricevere o trasmettere all'interno di un bus dati.

La sfida attuale, per molti versi già superata, sta nella comunicazione wireless e nell'interfacciare alla rete internet i data logger. Molti prodotti di recente sviluppo sono in grado di trasmettere attraverso un dispositivo wireless criptato i propri dati a una centralina di controllo e comando. La difficoltà sta nel comunicare a distanze elevate senza captare disturbi, e contemporaneamente nel garantire un'alta risoluzione alle misure.

Sempre nella comunicazione wireless la prossima frontiera sta nell'integrare in modo funzionale la tecnologia SAW⁸ (Figura 2.4) ai data logger. Questa tecnologia particolarmente innovativa consiste nell'invio di un impulso elettromagnetico via aerea da parte di un master che vuole interrogare uno slave, in quest'ultimo la CPU trasdurrà, tramite una lamina piezometrica, il segnale elettromagnetico in una tensione elettrica che verrà usata per caricare la batteria interna del sensore. Fatto ciò sempre la CPU prenderà il dato richiesto dal master dalla memoria e lo convertirà in uno stimolo meccanico per un'altra lamina piezometrica la quale genererà un impulso elettromagnetico uguale a quello ricevuto

⁸SAW: Surface Acoustic Wave.

dal master ma che varia in ampiezza, fase e frequenza. Il master quindi, ricevendo questo impulso e confrontandolo con quello che aveva inviato sarà in grado di capire quale era il dato nella memoria del data logger. E' evidente come questa tecnologia offra innumerevoli vantaggi, quali la comunicazione senza fili e la maggior durata della batteria; ad oggi viene già impiegata in alcuni campi di misura, ma per i data loggers è ancora in fase di studio.

L'altro obiettivo della ricerca attuale è l'interfaccia al web dei data logger. Alcuni prodotti sono già in grado di comunicare, prendendo come esempio i sensori di temperatura, via e-mail o tramite pagine web le informazioni raccolte o degli allarmi in caso di superamento di treshholds preimpostati. Il più grande problema in tutto ciò sta nel mantenere le dimensioni ridotte del data logger pur integrando una scheda di rete al suo interno, la quale spesso è delle dimensioni del data logger stesso, se non maggiori (il data logger che verrà preso in esame in questa trattazione ad esempio è poco più piccolo di una moneta da un euro).

Riassumendo le grandi frontiere da superare oggi sono la comunicazione wireless e una eventuale alimentazione, sempre wireless, dei dispositivi posti in loco di misura. Contemporaneamente però non si vogliono perdere i grandi vantaggi del loro costo relativamente ridotto e delle ridotte dimensioni dei sensori, i quali possono essere applicati in modo non invasivo nei campi più svariati.



Figura 2.4: Schema semplificato di una comunicazione SAW.

Capitolo 3

Il protocollo 1-wire

In questo capitolo si introdurrà l'utilizzo della comunicazione 1-wire, a tal scopo si inizierà già a fare riferimento al sensore che verrà trattato in questo documento, ovvero al DS1922L. Questo sensore utilizza un protocollo 1-wire per comunicare su un bus dati controllato da un master e al quale sono eventualmente collegati altri sensori. Al fine di collegare il sensore al bus l'utente potrà decidere se frapporre un driver DS2480B o DS2490 che ne faciliterà l'inserimento all'interno della linea dati supportando il sensore nelle fasi di elaborazione prima di una trasmissione e dopo una ricezione. La velocità di comunicazione dei sensori lungo il bus 1-wire può venire impostata dal master tramite specifici comandi che vedremo in seguito, vi sono due modalità di lavoro: Standard Speed (15.4 *Kbps*) oppure Overdrive Speed (125 *Kbps*).

I vantaggi di questo metodo di comunicazione sono:

- unico conduttore attivo lungo il quale vengono trasmessi i dati;
- possibilità di collegare più slaves, anche in un secondo momento;
- ogni slave è univocamente riconoscibile dal master tramite un codice di 56 *bit* che è unicamente destinato a quel sensore;
- bidirezionalità della trasmissione dati tra master e slaves;
- possibilità di alimentare gli slave direttamente dalla rete di pullup del bus.

3.1 Struttura della linea 1-wire

Come si può vedere da Figura 3.1 la linea viene costantemente tenuta a un livello logico alto dalla rete di pullup, in tal modo si ha che nelle reti di ricezione ($R_M R_{S0} R_{SN}$) di master e slaves la porta not rechi in uscita uno zero logico mentre il bus è a riposo.

La funzione della porta not è di aumentare la velocità del bus, senza questa porta ad ogni fronte di variazione della tensione sulla linea stessa il bus avrebbe dovuto caricare o scaricare tutte le capacità fisiche e parassite a valle dell'interfaccia del sensore con il bus. Questo, sommando gli effetti di tutti gli slave affacciati sul bus avrebbe aumentato considerevolmente la costante di tempo della linea. Grazie alla porta not invece, sarà questa a farsi carico delle capacità a valle di essa, mentre il bus dovrà caricare solo la capacità interna alla not.

Sempre in Figura 3.1 si osserva la presenza di un diodo e una capacità. Mentre la capacità (parassita) è intrinsecamente legata allo slave, il diodo viene inserito volutamente in modo che nelle fasi in cui il bus è a 1-logico ¹ la capacità possa caricarsi (il diodo impedisce che essa si scarichi sulla linea) e

¹Il bus si trova nello stato 1-logico in caso sia a riposo o mentre qualcuno sulla linea sta trasmettendo uno 0-logico.

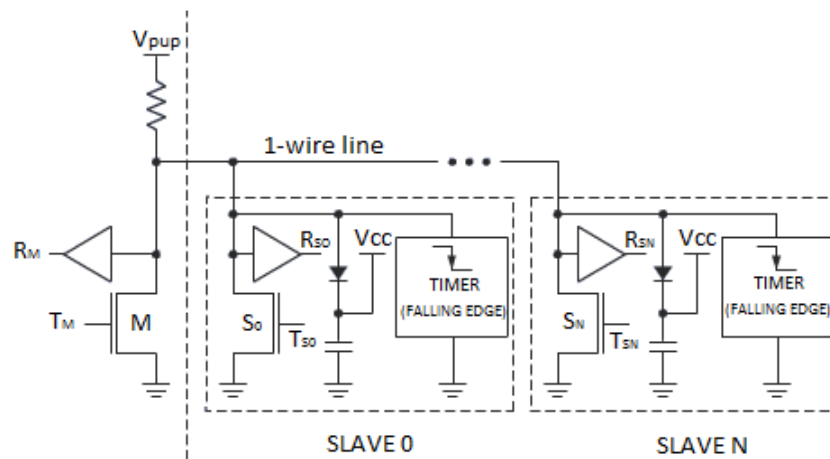


Figura 3.1: Schema circuitale di una linea 1-wire con 1 master e N slaves.

quindi alimentare la parte di slave che gestisce la comunicazione 1-wire.

Questa sorta di “batteria parassita” consente al sensore di risparmiare energia che altrimenti avrebbe dovuto assorbire dalla sua batteria interna (non ricaricabile), la parte di sensore alimentata da questa capacità è evidenziata bene in Figura 3.2.

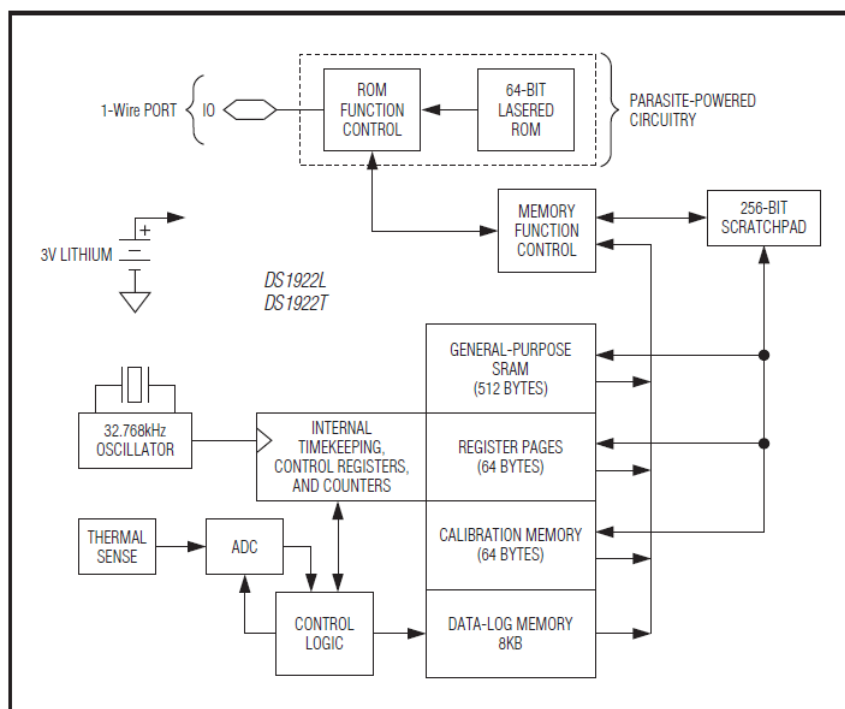


Figura 3.2: Schema a blocchi della struttura interna al sensore DS1922L.

3.2 Esecuzione di un comando

La trasmissione e l'esecuzione di comandi tra master e slaves segue dei rigidi protocolli comuni a tutti i dispositivi affacciati sul bus 1-wire e che consentono la praticamente assoluta garanzia di assenza di errori durante trasmissione e ricezione.

L'inizio di uno scambio dati tra master e slave in una qualsiasi delle due direzioni viene sempre iniziato dal master.

Supponendo il caso in cui il master debba imporre uno specifico comando ad un specifico slave, per raggiungere lo scopo dovranno venir affrontate 4 fasi:

3.2.1 Impulso di reset e presenza

Una volta che il master decide di attivare una comunicazione con uno slave, esso interroga il bus con un impulso di reset che viene captato da tutti gli slaves collegati alla linea. Per convenzione questo impulso di reset consiste nel portare a 0-logico il bus (che normalmente sarebbe sempre a 1-logico grazie alla rete di pullup) per un tempo T_r tale che:

$$480 \mu s < T_r < 640 \mu s \quad (3.1)$$

Per poi entrare nello stato di ricezione e lasciando che la rete di pullup riporti il bus a 1-logico. Il tempo richiesto affinché la capacità del bus e di tutto ciò che vi è collegato venga caricata di nuovo a 1-logico può variare tra:

$$15 \mu s < T_{att} < 60 \mu s \quad (3.2)$$

Tempo trascorso il quale, il master assume la linea sia tornata a 1-logico e tutti gli slave abbiano ricevuto il suo impulso di reset.

A questo punto tutti gli slaves collegati al bus rispondono al master con un impulso di presenza², ovvero portano la linea a 0-logico per un tempo:

$$60 \mu s < T_p < 240 \mu s \quad (3.3)$$

Per poi rilasciare la linea in modo che torni a 1-logico sempre grazie alla rete di pullup. Grazie a questo scambio di impulsi tra master e slave, il master è sicuro che nella linea ci sia almeno uno slave con il quale può comunicare. Infatti in caso non ci fosse stato nessuno slave il master non avrebbe ricevuto l'impulso di presenza e sarebbe tornato in attesa.

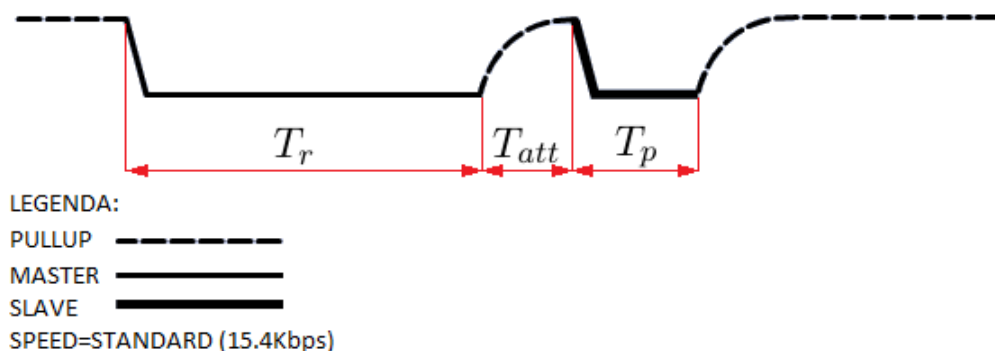


Figura 3.3: Andamento della tensione sul bus durante l'interrogazione degli slave da parte del master e la loro risposta.

²Questo impulso viene generato dal Timer di Figura 3.1, il quale genera un fronte di discesa sulla tensione del bus una volta che ha recepito l'impulso di reset del master, e lo mantiene per il tempo stabilito.

3.2.2 Sequenza di comando ROM

Una volta che il master ha verificato di poter comunicare con almeno uno slave esso inizia la trasmissione di uno degli 8 possibili comandi possibili che definiscono la tipologia di comunicazione che si vuole avere e con chi.

Prima di vedere i possibili comandi eseguibili è bene però parlare della ROM del DS1922L e di tutti gli apparecchi della Maxim Integrated. Come si vede da Figura 3.2 il sensore ha una ROM da 64 *bit* che può quindi essere solo letta. Dentro a questa memoria viene salvata una stringa di 56 *bit* che rappresenta univocamente il sensore e lo rende distinguibile dagli altri slave o master all'interno del bus. Questi 56 *bit* sono composti da:

- 8 *bit* che rappresentano la famiglia del sensore, quindi ad esempio sarà uguale per tutti i DS1922L;
- 48 *bit* che rappresentano il numero seriale.

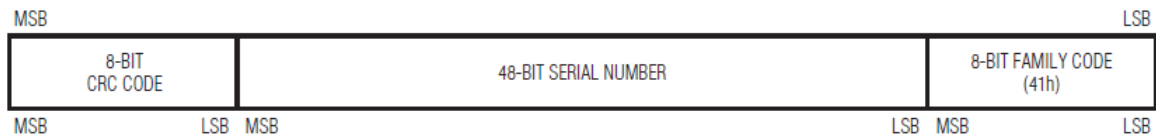


Figura 3.4: Struttura della ROM a 64 *bit*.

Grazie a questo codice i vari componenti collegati al bus riescono a comunicare sapendo esattamente con chi stanno scambiando dati. Al fine di trasmettere questo lungo codice all'interno del bus 1-wire viene aggiunto 1 *byte* (8 *bit*) che corrisponde al CRC dei precedenti 56 *bit* e che va quindi a completare lo spazio rimanente nella ROM del sensore.

Il CRC è un processo che estrapola, tramite un codice noto sia a emettitore che ricevente, una sequenza logica da un codice da trasmettere (la trasmissione avviene sempre a partire dal LSB). Se la sequenza logica generata da un codice e trasmessa assieme ad esso è uguale a quella che il ricevente calcola una volta ricevuto il messaggio, allora la trasmissione non ha subito errori, a meno di una probabilità bassissima.

Il codice che viene utilizzato per estrapolare il CRC è un polinomio³, che per il DS1922L è $x^8 + x^5 + x^4 + 1$, per questo codice viene associata una sequenza binaria che sarà la “chiave” del CRC.

$$x^8 + x^5 + x^4 + 1 = \underline{1} \cdot x^8 + \underline{0} \cdot x^7 + \underline{0} \cdot x^6 + \underline{1} \cdot x^5 + \underline{1} \cdot x^4 + \underline{0} \cdot x^3 + \underline{0} \cdot x^2 + \underline{0} \cdot x^1 + \underline{1} \cdot x^0 \quad (3.4)$$

Quindi la chiave sarà 100110001, per ottenere il CRC si concatenano, a partire dal LSB, del messaggio da trasmettere un numero di *bit* pari al grado del polinomio generatore, in questo caso 8 e si esegue la divisione tra il codice ottenuto dal concatenamento e la chiave, di questa divisione si conserva solo il resto. Una volta fatto ciò si sottrae⁴ alla chiave il resto ottenuto e questo sarà il CRC a 8 *bit* che andrà concatenato al messaggio da 56 *bit* (a partire, questa volta, dal MSB ottenendo una stringa da 64 *bit*).

Una volta inviata questa sequenza di 64 *bit*, e ricevuta dal destinatario, questi può calcolare di nuovo il CRC e confrontarlo con quello ricevuto. La procedura più rapida che viene però eseguita nella realtà (e che dà lo stesso risultato) consiste nel portare il CRC negli 8 *bit* più meno significativi e shiftare il resto per poi dividere il codice così ottenuto da 64 *bit* per la chiave, e verificare che il resto della

³Polinomi di grado più elevati garantiscono maggiore affidabilità ma rendono il sistema più lento e il messaggio da trasmettere sempre più lungo.

⁴La sottrazione viene eseguita tramite una XOR.

divisione sia zero. In quest'ultimo caso la trasmissione è avvenuta senza errori, altrimenti deve essere effettuata di nuovo.

Si presenta un esempio di applicazione pratica del metodo CRC. Si voglia trasmettere il messaggio M da 56^5 bit:

56	55	54	53	52	51	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41	40	39	38	37	36	35
1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0
34	33	32	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13
1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0
12	11	10	09	08	07	06	05	04	03	02	01										
0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0										

Con chiave C :

1	0	0	1	1	0	0	0	1
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Per ottenere il CRC si concatenano 8 zeri⁶ a M ottenendo M' :

64	63	62	61	60	59	58	57	56	55	54	53	52	51	50	49	48	47	46	45	44	43
1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0
42	41	40	39	38	37	36	35	34	33	32	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21
1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0
20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	09	08	07	06	05	04	03	02	01		
0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0		

Si divide ora M' per C ottenendo come resto R :

0	1	1	0	1	0	0	1	0
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Sottraendo quindi a C il resto R eseguendo una XOR, si ottiene il CRC :

0	1	0	1	1	1	1	1
---	---	---	---	---	---	---	---

Che andrà a concatenato a M a partire dal MSB, ottenendo il messaggio pronto da trasmettere G :

64	63	62	61	60	59	58	57	56	55	54	53	52	51	50	49	48	47	46	45	44	43
0	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1
42	41	40	39	38	37	36	35	34	33	32	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21
1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	09	08	07	06	05	04	03	02	01		
0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0		

Un eventuale ricevente, per verificare che il messaggio non abbia subito errori durante la trasmissione e/o ricezione eseguo lo shift a sinistra di 8 bit di G e porta il CRC negli 8 bit LSB rimasti liberi, ottenendo G' :

⁵Come si può vedere da Figura 3.4 il messaggio da 56 bit che si vuole trasmettere occupa i bit meno significativi

⁶8 zeri ovvero pari al grado di C .

64	63	62	61	60	59	58	57	56	55	54	53	52	51	50	49	48	47	46	45	44	43
1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0
42	41	40	39	38	37	36	35	34	33	32	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21
1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0
20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	09	08	07	06	05	04	03	02	01		
0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1		

Se ora si prova a dividere questo codice per C si ottiene

0	0	0	0	0	0	0	0
---	---	---	---	---	---	---	---

Segno che la trasmissione è avvenuta con successo.

La dimostrazione della validità di questo metodo è la seguente:

$$M' = M \cdot 2^8 \quad (3.5)$$

Lo shift a sinistra di 8 zeri corrisponde a una moltiplicazione per 2^8 , quindi quando si esegue la divisione per C si ottiene:

$$\frac{M \cdot 2^8}{C} = X + \frac{R}{C} \quad (3.6)$$

Dove è stato chiamato X il risultato intero della divisione, proseguendo con i passaggi:

$$M \cdot 2^8 = C \cdot X + R \quad (3.7)$$

$$\frac{M \cdot 2^8 - R}{C} = X \quad (3.8)$$

Essendo che gli 8 *bit* meno significativi di M' sono zeri, andare a sostituire a questi 8bit il *CRC* (di 8 *bit* anch'esso) corrisponde al sommare a M' il *CRC*, ottenendo quindi G' . Se ora si divide G' per C , e considerando che:

$$CRC = C - R \quad (3.9)$$

Sostituendo in:

$$\frac{M \cdot 2^8 + CRC}{C} = \frac{M \cdot 2^8 + C - R}{C} = \frac{M \cdot 2^8 - R}{C} + \frac{C}{C} = X + 1 \quad (3.10)$$

Dove nella 3.10 si è fatto uso della 3.8. Il risultato della divisione di G' per C produce un numero $X + 1$ intero, essendo X intero per ipotesi, si avrà quindi che la divisione rende un resto pari a zero.

Si torna ora alle sequenze di comando ROM, esse servono per gestire questi 64 appena trattati, più precisamente vi sono 8 possibili comandi attuabili:

1. READ ROM: il master vuole conoscere il codice di uno slave e quindi procede alla lettura dei 64 *bit* del sensore in questione;
2. SKIP ROM: in caso il master sappia che al bus è collegato un solo slave, allora tramite questo comando può saltare l'identificazione dei 64 *bit* nella ROM dello slave, e passare direttamente alle funzioni di comando e controllo⁷;
3. MATCH ROM: serve a identificare uno specifico slave collegato al bus, di cui si conosce il codice;
4. RESUME ROM: consente di imporre un ulteriore FCC allo slave con il quale si aveva comunicato nell'ultimo comando, viene quindi saltato il controllo dei 64 *bit*;
5. OVERDRIVE SKIP ROM: in caso il master sappia che al bus è collegato un solo slave, allora tramite questo comando può saltare l'identificazione dei 64 *bit* nella ROM dello slave, e impostare il sensore nella modalità di comunicazione overdrive (125 *Kbps*);
6. SEARCH ROM: in caso il master non conosca il numero di slave collegati al bus e il loro codice identificativo, allora attiva una procedura che gli consente di sapere quanti e quali sensori sono collegati alla linea;
7. CONDITIONAL SEARCH ROM: analogo al SEARCH ROM solo che il master fornisce parametri aggiuntivi alla ricerca;
8. OVERDRIVE MATCH ROM: analogo all'OVERDRIVE SKIP ROM solo che invece di eseguire un SKIP ROM esegue un MATCH ROM.

3.2.3 FCC: Funzioni di Comando e Controllo

Una volta che il master ha identificato il sensore con il quale vuole comunicare e ne conosce il codice a 64 *bit*, allora può decidere di effettuare delle operazioni che andranno effettivamente a scambiare dati utili con lo slave. La comunicazione del master può avvenire, come mostrato in Figura 3.2:

- direttamente con le memorie contenenti i dati del sensore (general-purpose SRAM, register pages, calibration memory, data-log memory), quando si ha solo necessità di lettura;
- indirettamente con le memorie contenenti dati del sensore (general-purpose SRAM, register pages, calibration memory), quando si hanno necessità di scrittura o lettura. Questa comunicazione avviene usando la scratchpad memory come intermediario alla scrittura o lettura e utilizzando un CRC di 16-esimo grado per evitare errori.

Le funzioni possibili sono quindi:

1. WRITE SCRATCHPAD: il master invia dei dati allo scratchpad e il DS1922L ne ricava il relativo CRC16 per poi scrivere entrambi nella memoria;
2. READ SCRATCHPAD: il master inizia a leggere i dati salvati nello scratchpad, compreso il loro CRC16 generato dal sensore stesso, sul quale poi potrà eseguire il controllo;
3. READ MEMORY WITH PASSWORD AND CRC: il master invia il comando di lettura della memoria con il relativo CRC seguito da una delle due password⁸. Se sia la verifica del CRC

⁷Queste funzioni verranno analizzate a breve, e sono quelle che consentono di controllare il sensore con il quale si è avviata la comunicazione, d'ora in poi verranno chiamate FCC.

⁸Il sensore può venire, a scelta dell'utente, protetto da due password da 64 *bit*. Una consente solo la lettura, l'altra sia lettura che scrittura.

che quella della password (o se la verifica della password è disattivata) hanno successo, allora il master può leggere i dati voluti a partire dalla posizione in memoria che aveva richiesto. Il master potrà leggere al massimo fino alla fine di una pagina di memoria (grande 32 *byte*), dopodiché, se vorrà continuare la lettura, dovrà inviare di nuovo il comando di lettura della pagina successiva con relativo CRC16;

4. COPY SCRATCHPAD WITH PASSWORD: il master dà ordine allo slave, tramite relativo comando seguito dalla password di lettura e scrittura, di copiare i dati contenuti nello scratchpad in una delle memorie riscrivibili del sensore (tutte a parte la data-log memory);
5. CLEAR MEMORY WITH PASSWORD: serve a preparare il sensore a una nuova missione, perché il comando abbia successo è necessario inviare correttamente la password di lettura e scrittura. I dati contenuti nella data-log memory non vengono cancellati, ma sovrascritti con la missione successiva, quindi sono ancora accessibili finché il counter register della nuova missione non li raggiunge.
6. FORCED CONVERSION: serve a eseguire una misura di temperatura senza cominciare una missione, non può essere attivata se c'è una missione in corso;
7. START MISSION WITH PASSWORD: consente di avviare una nuova missione, previo invio della corretta password di lettura e scrittura. Una nuova missione può cominciare solo se la precedente è già conclusa.
8. STOP MISSION WITH PASSWORD: consente di fermare una missione in corso, previo invio della corretta password di lettura e scrittura.

Una volta eseguito uno di questi comandi il master invia un impulso di reset come quello con cui aveva cominciato, e la comunicazione è conclusa.

3.3 La trasmissione dati

Dopo aver analizzato le procedure e i protocolli attuati dal master e dallo slave per comunicare tra di loro comandi e controlli, si parla ora di come il sensore e il master riescano a trasmettere delle serie di *bit* lungo il bus 1-wire. Risulta evidente come lo slave, ad esempio, non possa semplicemente inviare degli “uni” e “zeri” in fila l'uno all'altro senza alcun criterio, ma sia il master che lo slave devono seguire dei precisi criteri di comunicazioni, facenti parte anch'essi del protocollo 1-wire.

Nello specifico, durante una comunicazione, attraverso il bus transiteranno treni di impulsi alti e bassi di durata variabile. Tuttavia, ai fini della trasmissione dati, non si associa a livelli alti 1-logico e a livelli bassi 0-logico, nel qual caso infatti non si riuscirebbe a distinguere tra scrittura e lettura dati. Vengono quindi adottati dei criteri che associano a diversi treni di impulsi e alla relativa risposta che dà il sistema, i quattro possibili comandi servono all'interno di una comunicazione, ovvero scrittura e lettura di zeri e uno logici.

3.3.1 Scrittura 1-logico

Si prende, in questo caso, come emettitore il master: per scrivere un 1-logico nello slave esso dovrà portare a 0-logico la linea per un tempo inferiore ai 15 μs , per poi rilasciarla in modo che torni a 1-logico a riposo.

Lo slave invece verifica che in un T_S all'interno dell'intervallo che comincia 15 μs dopo il fronte di discesa del master per finire dopo ulteriori 45 μs , la linea sia a 1-logico. In quel caso esso interpreta la cosa come la scrittura di un 1-logico da parte del master.

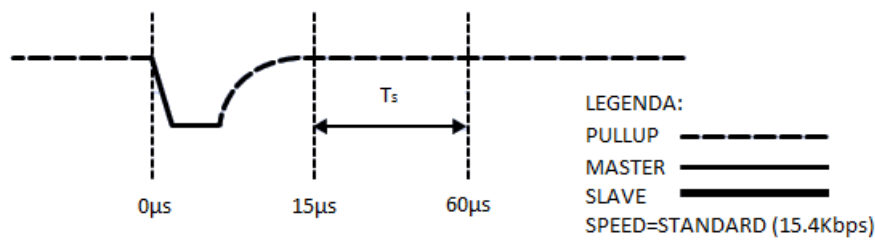


Figura 3.5: Andamento della tensione sul bus durante la scrittura di un 1-logico.

3.3.2 Scrittura 0-logico

Per scrivere uno 0-logico nello slave, il master dovrà portare a 0-logico la linea per un tempo di $60 \mu s$, per poi rilasciarla in modo che torni a 1-logico a riposo.

Lo slave invece verifica che in un T_S all'interno dell'intervallo che comincia $15 \mu s$ dopo il fronte di discesa del master per finire dopo ulteriori $45 \mu s$, la linea sia a 0-logico. In quel caso esso interpreta la cosa come la scrittura di uno 0-logico da parte del master.

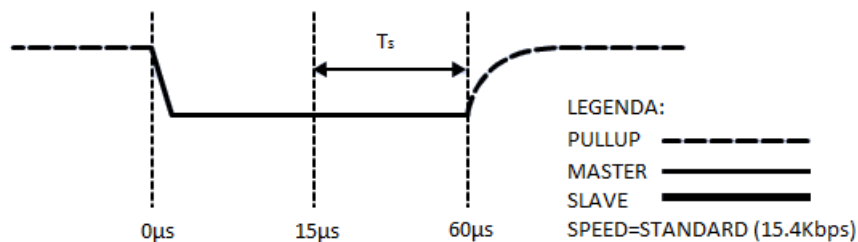


Figura 3.6: Andamento della tensione sul bus durante la scrittura di uno 0-logico.

3.3.3 Lettura 1-logico

Nel caso il master voglia leggere i dati dello slave, allora esso dovrà, come per la scrittura dell'1-logico, portare a 0-logico la linea per un tempo inferiore a $15 \mu s$ per poi rilasciarla.

Lo slave invece in questo caso dove debba inviare al master un 1-logico, allora non farà nulla. Il master quindi, verificando lo stato del bus dopo $15 \mu s$, e leggendo un 1-logico interpreterà ciò come l'invio del medesimo dato da parte dello slave.

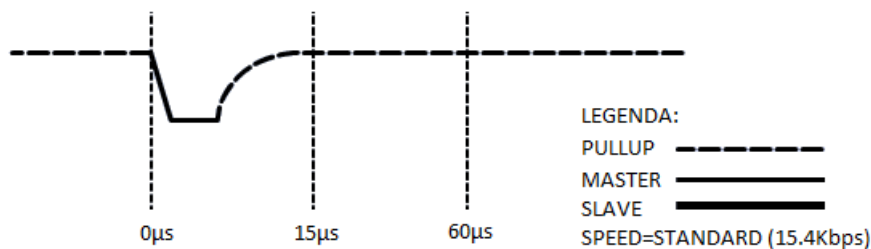


Figura 3.7: Andamento della tensione sul bus durante la lettura di un 1-logico.

3.3.4 Lettura 0-logico

Nel caso invece che lo slave debba inviare uno zero logico allora sarà sufficiente che esso mantenga la linea bassa una volta che vede il fronte di discesa del master, per poi rilasciarla ad un tempo superiore ai $15 \mu s$. Leggendo il bus a $15 \mu s$, in questo caso, il master lo troverà a 0-logico, interpretando quindi questo come l'invio del medesimo dato da parte dello slave.

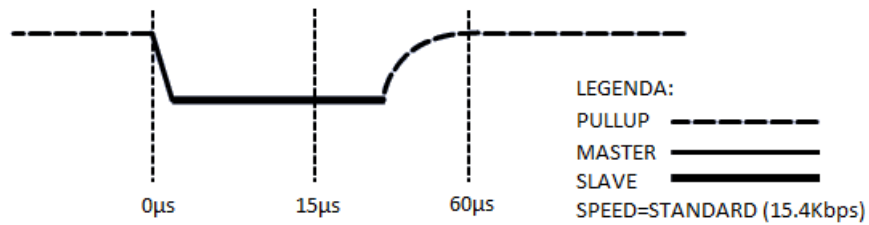


Figura 3.8: Andamento della tensione sul bus durante la lettura di uno 0-logico.

Capitolo 4

Un esempio pratico: il sensore DS1922L

Il sensore che verrà analizzato in questo documento è il DS1922L (Figura 4.1) della Maxim Integrated, conforme alla norma Europea per gli strumenti misuratori di temperatura EN12830. Esso è stato concepito per essere utilizzato come data logger e per essere inserito in un network di sensori e master comunicanti attraverso un bus che utilizzi un protocollo 1-wire¹. Le temperature che è predisposto a misurare vanno dai $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ agli $85\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Inoltre tutti i DS1922L vengono calibrati con degli strumenti di riferimento NIST, quest'ultimo organo ne garantisce la taratura al momento della vendita. E' disponibile online, sul sito della Maxim Integrated, un generatore automatico di certificati di taratura, al quale basta fornire semplicemente l'ID del prodotto per ottenere il documento desiderato.

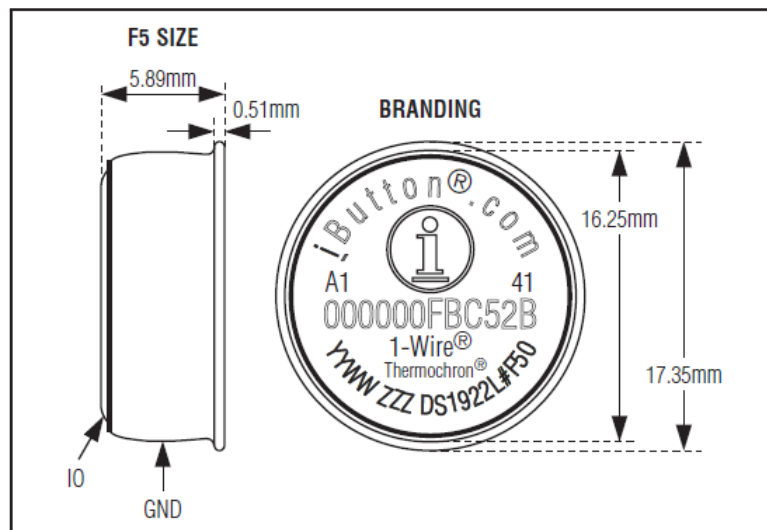


Figura 4.1: Dimensioni di un data logger iButton DS1922L.

Per come è stato costruito, ovvero utilizzando una tecnologia iButton², si presta per essere applicato direttamente al corpo da analizzare, per comunicare poi le informazioni che acquisisce tramite un solo conduttore (filosofia della comunicazione 1-wire), e quindi a ingombro ridotto. Inoltre il rivestimento

¹La comunicazione 1-wire prevede la trasmissione dati tramite un unico conduttore (parte attiva), e un riferimento di massa (parte passiva, GND).

²Un componente costruito come iButton ha dimensioni ridottissime, è robusto verso sollecitazioni meccaniche e resistente a infiltrazioni di polveri e liquidi.

dell'iButton ne garantisce un grado di protezione IP56, quindi una difesa contro l'infiltrazione di polvere e d'acqua a getto potente; si potrà quindi inserire il sensore anche in ambienti dove altri sensori o componenti elettronici non avrebbero potuto normalmente lavorare.

Si presenta ora un esempio di applicazione di alcuni sensori DS1922L per evidenziarne la semplicità e praticità d'uso.

Si consideri una industria alimentare produttrice di surgelati all'interno della quale gli alimenti vengono cotti a $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ all'interno di grandi cisterne in acciaio, per poi venire surgelati all'interno di celle frigorifere a $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$.

A scopo di monitoraggio l'azienda potrà scegliere di applicare sul fondo delle cisterne in acciaio dei DS1922L con il piedino GND a contatto con la superficie metallica della cisterna stessa. Allo stesso modo si potranno applicare gli stessi sensori all'interno delle celle frigorifere per poi collegare tutti i piedini IO dei vari sensori al bus del master scelto come controllore.

Questo esempio evidenzia come l'iButton si presti molto bene per essere applicato su superfici metalliche, nel caso delle cisterne infatti per ottenere il riferimento di massa sarà semplicemente sufficiente collegare elettricamente le cisterne tra loro e infine alla massa del master; per le celle frigorifere invece, se supponiamo non ci siano pareti metalliche all'interno della cella, si dovranno collegare manualmente i GND dei vari sensori per poi collegarli alla massa del master.

Uno schema di principio potrebbe essere:

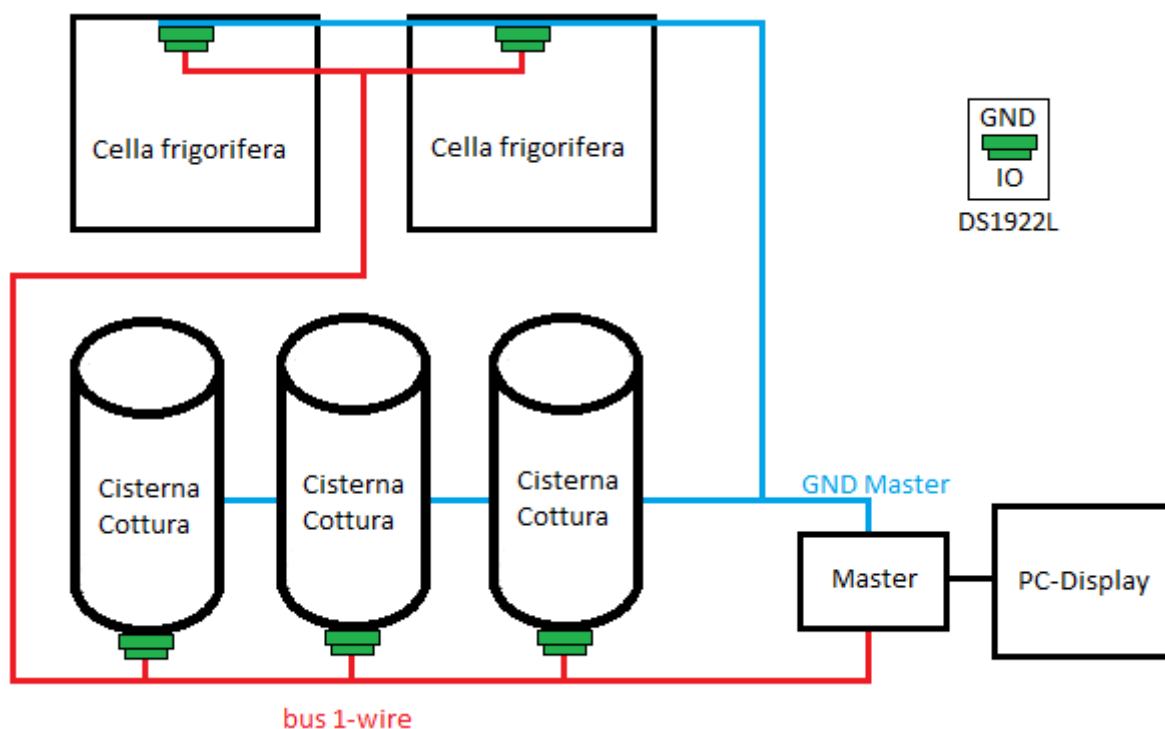


Figura 4.2: Una possibile applicazione del DS1922L all'interno di un network di monitoraggio di una industria alimentare.

Come schematizzato in Figura 4.2 con pochi collegamenti si riesce a monitorare costantemente la temperatura nelle cisterne e nelle celle frigorifere, evidenziandone eventuali anomalie tramite:

- display (verifica visiva);
- la funzione di allarme del DS1922L, che si attiva se vengono superate delle soglie limite impostabili dall'utente;

- eventuale software di monitoraggio installato sul PC.

4.1 Risoluzione dimensionale

Come già detto il sensore lavora a temperature tra i $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ e gli $85\text{ }^{\circ}\text{C}$. Queste letture di temperatura possono essere, a scelta dell'utente, a 8 bit o 11 bit^3 con risoluzione dimensionale rispettivamente di $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $0.0625\text{ }^{\circ}\text{C}$. Questi ultimi due valori vengono forniti dai datasheet e consentono di ricavare l'input range del sensore, secondo l'inversione della definizione di risoluzione dimensionale:

$$\Delta = \frac{IR}{2^B} \quad (4.1)$$

Per cui la 4.1 porge:

$$IR = \Delta_{8\text{ bit}} \cdot 2^8 = 0.5 \cdot 2^8 = 128\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (4.2)$$

$$IR = \Delta_{11\text{ bit}} \cdot 2^{11} = 0.0625 \cdot 2^{11} = 128\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (4.3)$$

Si osserva come il valore ottenuto sia diverso da quello fornito dal costruttore:

$$IR = 85 - (-40) = 125\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (4.4)$$

Questa scelta di ridurre l' IR di $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ è dovuta probabilmente alla non perfetta conoscenza della transcaratteristica del sensore all'interno di questo ristretto intervallo. Non è però possibile dedurre quale sia l'input range originale del sensore e dove si colloca rispetto a quello utilizzato nella pratica. Questa impossibilità è evidenziata in Figura 4.3.

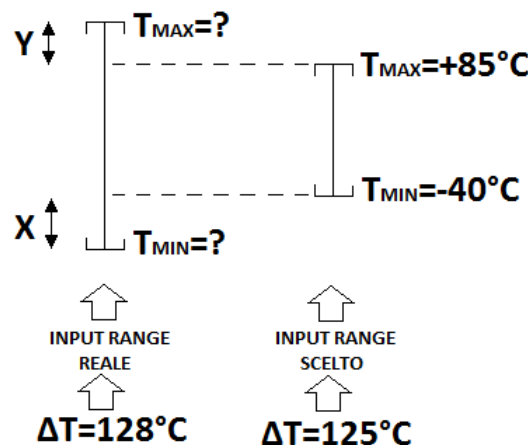


Figura 4.3: Input range reale e scelto dal costruttore, messi a confronto.

Risulta chiaro come non sia possibile determinare rispettivamente il valore di X e Y , si conosce unicamente l'ammontare della loro somma, pari a $X + Y = 3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

³Come si vedrà più avanti il campionamento a 11 bit viene fornito come una lettura a 16 bit con i cinque bit meno significativi a 0.

4.2 Accuratezza

Per quanto riguarda invece l'accuratezza, il sensore possiede un software di correzione degli errori che, confrontando le misure attuali con dei valori di riferimento salvati nella Calibration Memory dell'i-Button riesce a ridurre l'errore massimo che inevitabilmente viene commesso durante la conversione della temperatura (legato alla non perfetta conoscenza della transcaratteristica del sensore). Prendendo in esame solo il caso della conversione con correzione degli errori si evince dalla Figura 4.4 che l'accuratezza è costante e pari a $\pm 0.5^\circ\text{C}$ per valori di temperatura compresi tra i -10°C e i 65°C , e cresce poi fino a un massimo di $\pm 0.85^\circ\text{C}$ per valori esterni al precedente intervallo e compresi dentro il range di funzionamento del sensore.

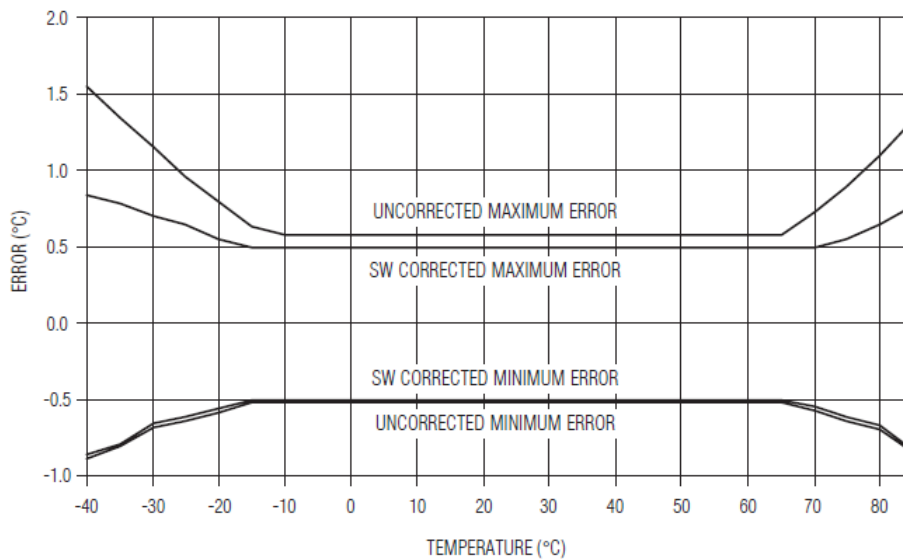


Figura 4.4: Errore legato all'accuratezza del DS1922L con/senza software di correzione degli errori, nella modalità a 11 bit.

Si comprende quindi come il sensore sia ottimizzato per lavorare con temperature all'interno del range centrale dove l'errore commesso a causa della non infinita accuratezza è minimo e costante. Nel caso si lavori a temperature esterne a questo range bisogna tenere conto che l'errore non è più costante ma cresce linearmente con la temperatura man mano che ci si allontana dal range centrale.

Si ricava quindi, per facilitare l'utilizzatore, una tabella⁴ che consenta di ricavare l'accuratezza in funzione della temperatura in esame:

T	e^+	e^-
$(-40 \div -35)^\circ\text{C}$	$+0.29 - 0.014 \cdot T$	$-0.45 + 0.01 \cdot T$
$(-35 \div -30)^\circ\text{C}$	$+0.29 - 0.014 \cdot T$	$+0.25 + 0.03 \cdot T$
$(-30 \div -15)^\circ\text{C}$	$+0.29 - 0.014 \cdot T$	$-0.35 + 0.01 \cdot T$
$(-15 \div +65)^\circ\text{C}$	$+0.5$	-0.5
$(+65 \div +70)^\circ\text{C}$	$+0.5$	$+0.15 - 0.01 \cdot T$
$(+70 \div +80)^\circ\text{C}$	$+T/60 - 2/3$	$+0.15 - 0.01 \cdot T$
$(+80 \div +85)^\circ\text{C}$	$+T/60 - 2/3$	$+3.35 - 0.05 \cdot T$

⁴La tabella viene ricavata tramite interpolazione lineare di Figura 4.4, e quindi vale in caso di uso della correzione degli errori (vale sia per misure a 8 bit che 11 bit, in quanto essi non influiscono sulla conoscenza della transcaratteristica del sensore). A tal scopo vengono considerati perfettamente lineari i tratti $(-40 \div -15)^\circ\text{C}$, $(-15 \div +70)^\circ\text{C}$, $(+70 \div +85)^\circ\text{C}$ per l'errore positivo, e $(-40 \div -35)^\circ\text{C}$, $(-35 \div -30)^\circ\text{C}$, $(-30 \div -15)^\circ\text{C}$, $(-15 \div +65)^\circ\text{C}$, $(+65 \div +80)^\circ\text{C}$, $(+80 \div +85)^\circ\text{C}$ per l'errore negativo.

4.3 Frequenza di campionamento

Considerata la sua modalità di funzionamento come data logger, il DS1922 ha frequenze di campionamento molto variabili che possono raggiungere anche frequenze improponibili per la maggior parte degli altri sensori.

Nello specifico il circuito track and hold a monte dell'ADC può campionare con frequenze che vanno dai $1.018 \mu\text{Samples/s}$ a 1 Sample/s , quindi lavora a frequenze bassissime che corrispondono a tempi che vanno da 1 s/Sample a 273 h/Sample . E' quindi possibile, nel caso estremo far si che il sensore raccolga una misura di temperatura ogni 273 h (poco più di 11 giorni).

Questo dato può dir poco, ma assume significato se confrontato con altri data logger di temperatura disponibili sul mercato, vediamo alcuni di aziende rinomate nel settore:

Nome Data Logger	Azienda produttrice	Temperature	Frequenze di campionamento
EBI 2-TH 6	PCE	$-40 \text{ }^\circ\text{C} \div 75 \text{ }^\circ\text{C}$	$1 \text{ s/Sample} \div 8 \text{ h/Sample}$
OM-CP-PRTEMP1000	Omega	$-40 \text{ }^\circ\text{C} \div 80 \text{ }^\circ\text{C}$	$2 \text{ s/Sample} \div 24 \text{ h/Sample}$
TESTO 176 T1	Testo	$-35 \text{ }^\circ\text{C} \div 70 \text{ }^\circ\text{C}$	$1 \text{ s/Sample} \div 24 \text{ h/Sample}$
DT Micropack III	Mesa Lab	$-20 \text{ }^\circ\text{C} \div 140 \text{ }^\circ\text{C}$	$1 \text{ s/Sample} \div 18 \text{ h/Sample}$
iMiniPlus PDF	Zeta Lab	$-40 \text{ }^\circ\text{C} \div 70 \text{ }^\circ\text{C}$	$5 \text{ s/Sample} \div 18 \text{ h/Sample}$

E' quindi evidente l'enorme divario che il DS1922L ha con sensori della stessa famiglia per quanto riguarda la frequenza di campionamento. Per esso viene infatti indicato, oltre al normale utilizzo dei data logger con tempi di campionamento in genere inferiori alle 24 h , per campionare temperature a diversi giorni di distanza. Questa sua versatilità lo rende particolarmente adatto per monitoraggi ambientali e di celle frigorifere o forni industriali.

Campionare ad alte frequenze non rientra generalmente nelle funzioni di un data logger, infatti sono ottimizzati per basse frequenze e quindi alti tempi tra una acquisizione ed un'altra. L'uso ad alte frequenze porta infatti a un più veloce deterioramento del prodotto e della batteria interna, con conseguente calo della vita utile minima del sensore.

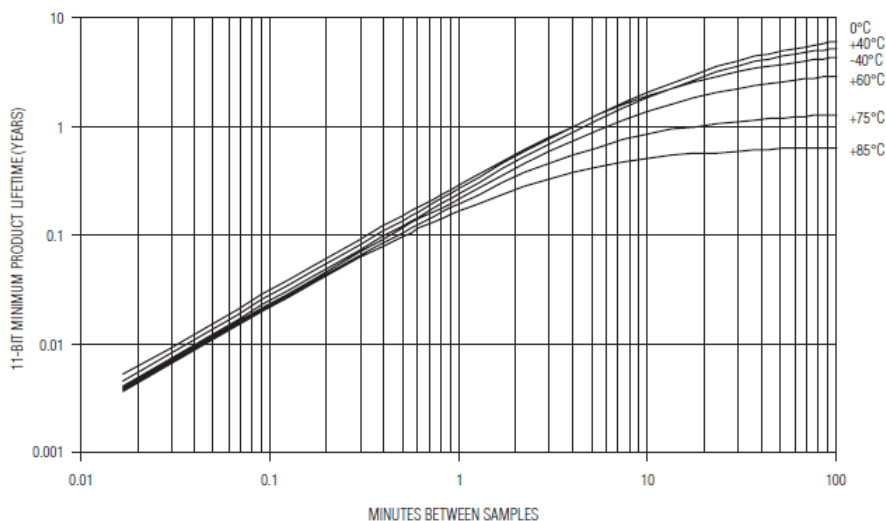


Figura 4.5: Vita utile minima del sensore mentre lavora a 11 bit in funzione del tempo di campionamento.

Dalla Figura 4.5 si evince infatti come lavorando a tempi di campionamento vicini ai 100 min/Sample la vita utile minima si stabilizza tra i 10 mesi e i 98 mesi , mentre lavorando a bassi tempi di

campionamento, vicini quindi a $1 \text{ s}/\text{Sample}$ la durata del sensore crolla drasticamente attestandosi attorno ai 2.3 *giorni*.

Nel caso di campionamento a 8 *bit* il grafico resta uguale con l'unica eccezione che la vita minima per bassi tempi di campionamento è superiore a quella del caso a 11 *bit* come si vede da Figura 4.6.

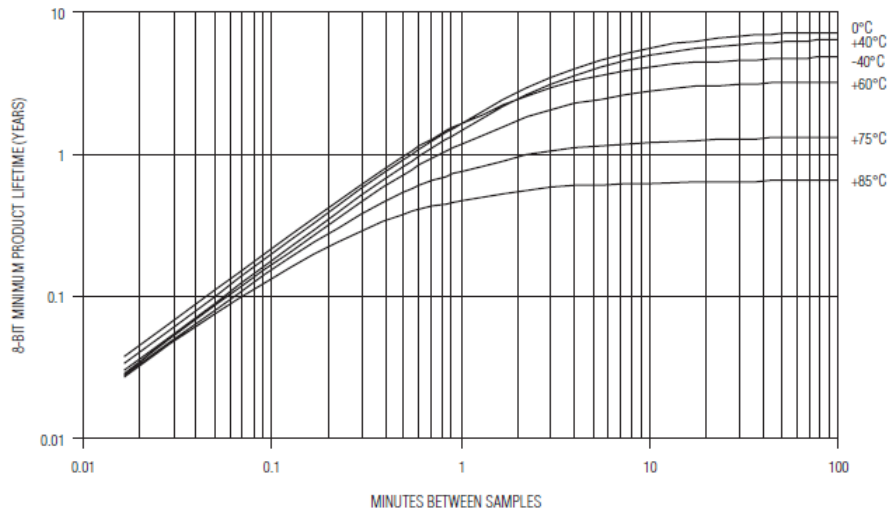


Figura 4.6: Vita utile minima del sensore mentre lavora a 8 *bit* in funzione del tempo di campionamento.

Da Figura 4.5 e Figura 4.6 si può osservare anche che la temperatura di funzionamento incide pesantemente sulla vita minima del prodotto. Come per altri parametri di questo sensore già discussi infatti, man mano che ci si avvicina agli estremi del range di funzionamento del DS1922L abbiamo un peggioramento delle prestazioni del sensore stesso, della vita utile in questo caso. Il peggioramento è però più marcato per le alte temperature piuttosto che per le basse, la causa può essere imputata alla maggior dissipazione di energia dovuta alla maggior resistenza dei conduttori ad alta temperatura e alla minor diffusione⁵ a bassa temperatura.

Di seguito si riporta una tabella ricavata da Figura 4.6 che da un'idea percentuale del declassamento⁶ in termini di vita minima subita dal sensore in funzione della temperatura a cui sta mediamente funzionando:

	1 <i>s/Sample</i>	12 <i>s/Sample</i>	60 <i>s/Sample</i>	10 <i>min/Sample</i>	100 <i>min/Sample</i>
-40 °C	0 %	0 %	0 %	-25 %	-33 %
0 °C	-9 %	8 %	0 %	0 %	0 %
+40 °C	-26 %	-18 %	-9 %	-9 %	-9 %
+60 °C	-22 %	-26 %	-26 %	-50 %	-55 %
+75 °C	-24 %	-33 %	-55 %	-79 %	-82 %
+85 °C	-32 %	-48 %	-73 %	-89 %	-91 %

⁵La diffusione atomica aumenta esponenzialmente con la temperatura, ed è uno dei fenomeni che da luogo alla deriva nei componenti elettronici.

⁶La percentuale viene calcolata rispetto alla massima vita ottenibile per ciascun tempo di campionamento in Figura 4.6.

4.4 RTC: Real Time Clock

Il sensore DS1922L prevede al suo interno un oscillatore al cristallo con frequenza 32.768 kHz , questi è attivo anche mentre il sensore è spento e assorbe energia dalla batteria interna al sensore⁷. Tramite lettura dell'RTC la CPU interna al sensore potrà quindi conoscere gli istanti in cui acquisire campioni e tenere traccia del tempo e della data, in modo da associare ad ogni lettura di temperatura la rispettiva data e ora per poi creare eventualmente una traccia temporale⁸.

Inevitabilmente la non idealità dell'oscillatore porta a delle derive che man mano fanno accumulare un errore della data registrata nel sensore e quella reale. Viene quindi riportato il grafico dato dal costruttore che lega l'errore di deriva in minuti al mese (guadagnati se > 0 , persi se < 0) alla temperatura media a cui il sensore sta lavorando.

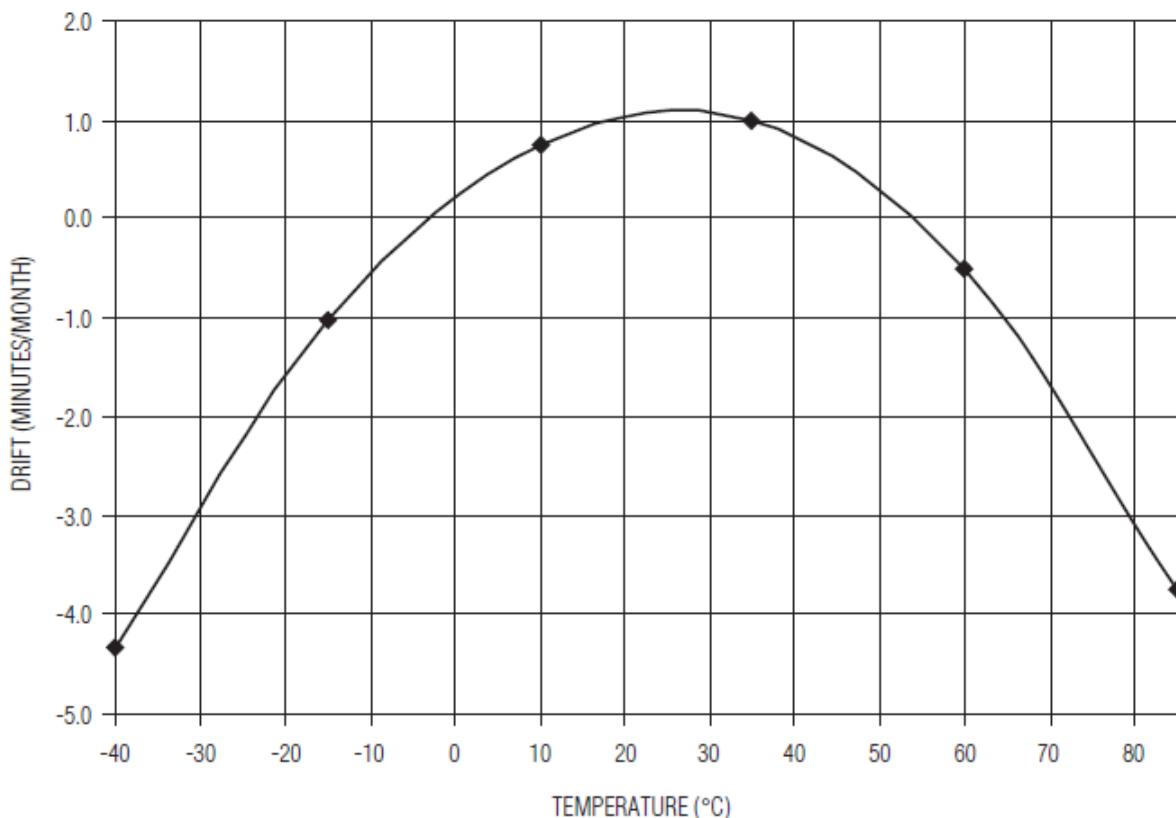


Figura 4.7: Errore di deriva dichiarato dal costruttore per l'RTC.

Si comprende quindi, come si era visto per l'accuratezza nella sezione precedente, come sia meglio lavorare il più possibile lontano dagli estremi del range di funzionamento del sensore $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ e gli $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ per evitare, in questo caso, derive elevate (quindi errori nel tempo piuttosto che nella temperatura come era per l'accuratezza).

⁷L'RTC è l'unica parte del sensore che è sempre attiva, le restanti parti del sensore si attivano solo quando deve venir effettuata una misura per poi spegnersi di nuovo (al limite resta accesa la ROM per scambiare informazioni lungo il bus). Viene tuttavia consigliato di spegnere tramite software l'RTC quando il sensore non è in uso, per non consumare inutilmente la batteria.

⁸Per far ciò il sensore memorizza data e ora di partenza della missione. Nel caso venga richiesto di sapere quando è stato raccolto l'n-esimo dato allora la CPU somma alla data e l'ora di partenza della missione il risultato della divisione tra n e la frequenza di campionamento.

4.5 La misurazione della temperatura

La misurazione della temperatura nel DS1922L si articola nelle consuete fasi di un sistema di misura, con l'unica aggiunta della memorizzazione post-acquisizione. Nello specifico, come mostra Figura 3.2, il thermal sense converte continuamente la grandezza temperatura in una tensione elettrica, questa tensione viene transita attraverso un circuito track and hold che campiona e mantiene il segnale con frequenza pari a quella scelta per il campionamento per poi farla arrivare all'ADC che ne effettua la quantizzazione in codifica binaria. Tutto questo processo viene controllato da un microprocessore che scandisce, tramite l'RTC, il tempo di campionamento del circuito track and hold e elabora i dati in uscita dell'ADC prima di memorizzarli nella data-log memory.

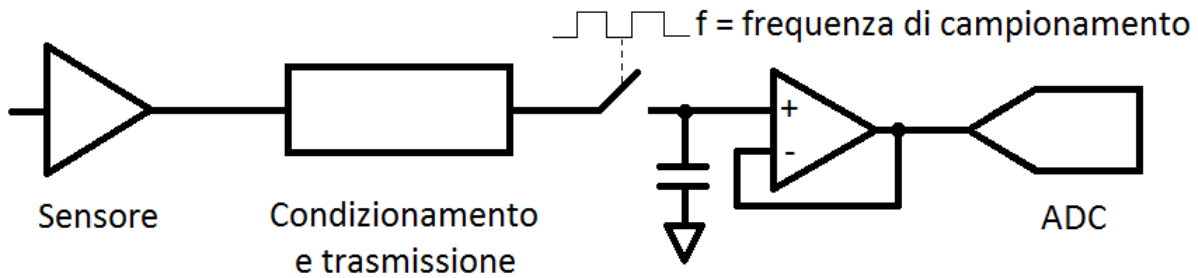


Figura 4.8: Schema semplificato del campionamento e della quantizzazione in un circuito di misura.

4.5.1 Rappresentazione della temperatura

L'ADC interno al sensore fornisce, a seconda del numero di *bit* con il quale lavora, uno o due *byte* che rappresentano la temperatura quantizzata. Nel caso di campionamento a 11 *bit* la temperatura viene rappresentata da due *byte* (16 *bit*) che vengono chiamati TRH (*byte* più significativo) e TRL (*byte* meno significativo). In quest'ultimo *byte*, i 5 *bit* meno significativi sono sempre zero, da cui avremo solo 11 *bit* totali "utili". Nel caso di campionamento a 8 *bit*, invece, solo il *byte* TRH contiene la temperatura quantizzata, mentre TRL non viene generato.

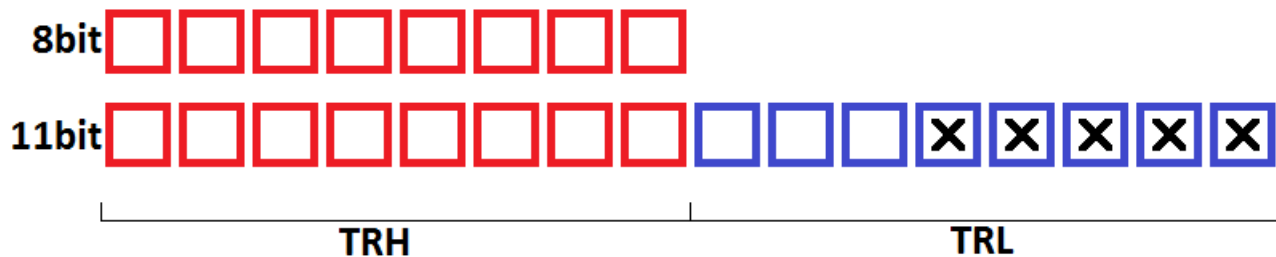


Figura 4.9: I due *byte* TRH e TRL rappresentano la temperatura nelle letture a 8 *bit* e 11 *bit*.

Nel datasheet del sensore non viene indicato dove cade la virgola nella parola di 11 *bit* e 8 *bit* che rappresenta la temperatura, ma la sua posizione può essere ricavata da semplici considerazioni sulla risoluzione. Sapendo infatti che il *bit* meno significativo dopo la virgola è quello che dà la minima variazione apprezzabile, vale quindi a dire la risoluzione, allora:

- nel caso di 8 *bit* per avere risoluzione di $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ il *bit* meno significativo dovrà avere peso:
 $n = \log_2(0.5) = -1$;
- nel caso di 11 *bit* per avere risoluzione di $0.0625\text{ }^{\circ}\text{C}$ il *bit* meno significativo dovrà avere peso:
 $n = \log_2(0.0625) = -4$.

Per cui il peso di ogni *bit* viene ad essere:

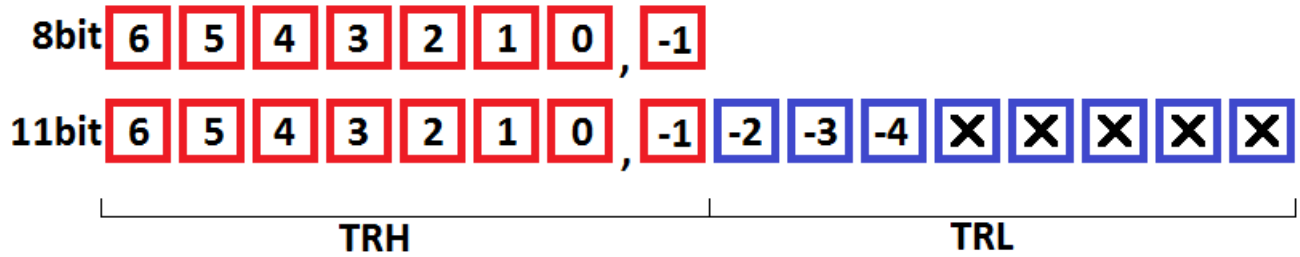


Figura 4.10: Peso di ciascun *bit* nelle due rappresentazioni binarie.

4.5.2 Conversione della temperatura

Per convertire i due *byte* TRH e TRL nella temperatura che essi rappresentano il costruttore sceglie, anziché di effettuare direttamente la conversione in decimale della parola formata dai due *byte*, di spezzare in due la conversione. Per far ciò vengono convertiti da binario a digitale i due singoli *byte* (uno solo nel caso di 8 *bit*) e poi vengono combinati per ottenere la temperatura. Questo ha lo scopo di accumulare il calcolo del *byte* TRH in decimale tra le conversioni a 8 *bit* e 11 *bit*, e risparmiando in questo modo potenza di calcolo.

Si ricava ora la funzione che lega il valore decimale di TRH e TRL a quello della parola ottenuta concatenando i due *byte*. A tal scopo ci si riferisce al datasheet dove viene specificato che l'ADC fornisce il valore della temperatura sopravvalutato di 41 °C.

Nel caso di 8 *bit* confrontando i pesi che vengono attribuiti ai singoli *bit* nel caso della conversione di TRH e in quello della conversione reale, si avrà:

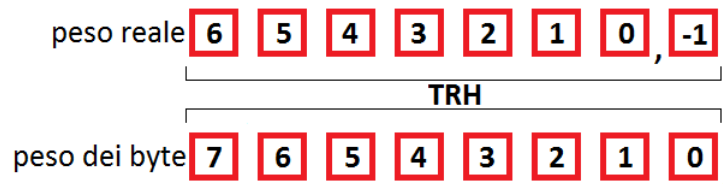


Figura 4.11: Peso di ciascun *bit* nelle due rappresentazioni binarie.

Da cui si evince che per ottenere la conversione reale bisognerà moltiplicare per 2^{-1} il *byte* TRH, ricordando poi che l'ADC ha uno shift di temperatura si ottiene:

$$\vartheta(^{\circ}C)_{8\ bit} = TRH_{10}/2 - 41 \tag{4.5}$$

Nel caso di 11 *bit* invece dal confronto si ottiene:

Dalla quale si comprende come la situazione di TRH sia uguale a quella nel caso a 8 *bit*, mentre per ottenere il peso corretto di TRL bisognerà moltiplicare per 2^{-9} il suo valore decimale.

$$\vartheta(^{\circ}C)_{11\ bit} = TRH_{10}/2 + TRL_{10}/512 - 41 \tag{4.6}$$

Le operazioni di 4.5 e 4.6 vengono eseguite all'interno della CPU per ricavare la temperatura. La memorizzazione dei dati però avviene sempre come scrittura dei due *byte* (sempre uno nel caso di 8 *bit*).

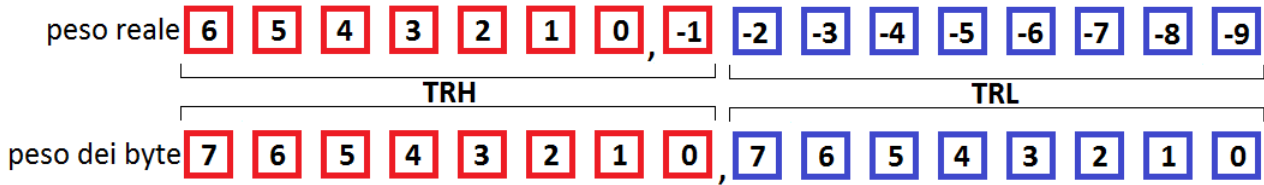


Figura 4.12: Peso di ciascun *bit* nelle due rappresentazioni binarie.

4.5.3 Correzione degli errori

Al fine di migliorare l'accuratezza del sensore nelle misurazioni a 11 *bit*, la CPU può effettuare una correzione dell'errore basandosi su dati raccolti nella memoria di calibrazione. Grazie a questi dati possono venir calcolati dei fattori correttivi specifici per il sensore in esame, e potranno essere applicati a fronte di una esigua potenza di calcolo, ad ogni misurazione di temperatura di quel sensore.

I dati richiesti per effettuare la correzione dell'errore sono:

- $Tr1$: temperatura di riferimento “calda”;
- $Tr2$: temperatura di riferimento “fredda”;
- $Tr3$: temperatura di riferimento intermedia;
- $Tc2$: temperatura misurata dal sensore quando sollecitato da $Tr2$;
- $Tc3$: temperatura misurata dal sensore quando sollecitato da $Tr3$;
- $Offset$: offset di temperatura dell'ADC ($-41\text{ }^{\circ}\text{C}$ nel caso del DS1922L).

Inoltre queste temperature vengono scelte in modo che l'errore nelle misurazioni delle temperature $Tr1$ e $Tr2$ siano uguali, dove per errore di misurazione viene intesa la differenza tra un generico Tc e il relativo Tr .

Va inoltre ricordato come tutte le temperature sopra citate, essendo salvate nella memoria di calibrazione, sono memorizzate come due *byte* ciascuna, per cui prima di iniziare l'elaborazione vanno convertite nel formato decimale tramite la relazione 4.6.

L'algoritmo per la correzione degli errori getta le sue basi sul legame parabolico⁹ che sussiste tra ciascuna temperatura Tr e l'errore commesso dal sensore nella sua misurazione $Tc - Tr$. Questo tipo di legame è evidenziato in Figura 4.13.

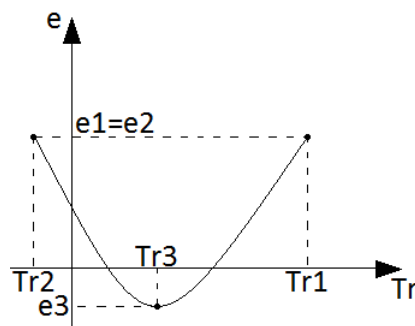


Figura 4.13: Legame tra la temperatura reale Tr e l'errore commesso nella misurazione $Tc - Tr$.

⁹Nei datasheet non viene specificato da dove sorga questo tipo di legame, ma presumibilmente si può pensare che abbia valenza sperimentale.

Si trovi ora la funzione legame, per far ciò vengono sostituite le coordinate dei tre punti noti della parabola nella sua generica equazione $e = A \cdot Tr^2 + B \cdot Tr + C$, ottenendo:

$$\begin{cases} e1 = Tc2 - Tr2 = A \cdot Tr1^2 + B \cdot Tr1 + C \\ e2 = Tc2 - Tr2 = A \cdot Tr2^2 + B \cdot Tr2 + C \\ e3 = Tc3 - Tr3 = A \cdot Tr3^2 + B \cdot Tr3 + C \end{cases} \quad (4.7)$$

Risolvendo la quale si ottiene:

$$\begin{cases} B = (Tr2^2 - Tr1^2) \cdot (e3 - e1) / [(Tr2^2 - Tr1^2) \cdot (Tr3 - Tr1) + (Tr3^2 - Tr1^2) \cdot (Tr1 - Tr2)] \\ A = B \cdot (Tr1 - Tr2) / (Tr2^2 - Tr1^2) \\ C = e1 - A \cdot Tr1^2 - B \cdot Tr1 \end{cases} \quad (4.8)$$

Grazie alla conoscenza di questa funzione sarà possibile ricavare l'errore commesso nella misurazione di ogni temperatura, e quindi risalire al valore di temperatura reale tramite inversione della relazione $e = Tc - Tr$.

L'implementazione dell'algoritmo si articola quindi in queste fasi:

$$\begin{aligned} Tr2 &= Tr2H/2 + Tr2L/512 - Offset \\ Tr3 &= Tr3H/2 + Tr3L/512 - Offset \\ Tc2 &= Tc2H/2 + Tc2L/512 - Offset \\ Tc3 &= Tc3H/2 + Tc3L/512 - Offset \\ e2 &= Tc2 - Tr2 \\ e3 &= Tc3 - Tr3 \\ e1 &= e2 \\ B &= (Tr2^2 - Tr1^2) \cdot (e3 - e1) / [(Tr2^2 - Tr1^2) \cdot (Tr3 - Tr1) + (Tr3^2 - Tr1^2) \cdot (Tr1 - Tr2)] \\ A &= B \cdot (Tr1 - Tr2) / (Tr2^2 - Tr1^2) \\ C &= e1 - A \cdot Tr1^2 - B \cdot Tr1 \end{aligned}$$

Dove queste fasi vengono eseguite una sola volta per ricavare i coefficienti A, B, C da utilizzare per ogni correzione futura, che si esegue tramite:

$$\begin{aligned} T_C &= TcH/2 + TcL/512 - Offset \\ T_{CORR} &= T_C - e = T_C - (A \cdot T_c^2 - B \cdot T_c + C) \end{aligned}$$

Dove sono stati indicati rispettivamente con T_C e T_{CORR} la temperatura risultato di una misurazione e la sua relativa temperatura dopo la correzione.

Si riporta ora un esempio di calcolo di coefficienti A, B, C e di loro uso in una correzione. Si comincia con i dati presenti nella memoria di calibrazione:

$$\begin{aligned} Tr1 &= 60 \text{ }^\circ C \\ Tr2 &= -10.1297 \text{ }^\circ C \\ Tc2 &= -10.0625 \text{ }^\circ C \\ Tr3 &= 24.6483 \text{ }^\circ C \\ Tc3 &= 24.5 \text{ }^\circ C \end{aligned}$$

Quindi si calcolano gli errori e i coefficienti di correzione:

$$\begin{aligned} e2 &= 0.0672 \text{ }^\circ\text{C} \\ e3 &= -0.1483 \text{ }^\circ\text{C} \\ e1 &= 0.0672 \text{ }^\circ\text{C} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B &= -0.008741 \\ A &= 0.000175 \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \\ C &= -0.039332 \text{ }^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Volendo ora correggere una misura di temperatura sar  sufficiente applicare i coefficienti appena ricavati nel modo descritto poco fa. Nel caso, ad esempio, si voglia correggere una temperatura misurata di $T_C = 22.500 \text{ }^\circ\text{C}$, allora:

$$T_{CORR} = T_C - (A \cdot T_c^2 - B \cdot T_c + C) = 22.647 \text{ }^\circ\text{C} \quad (4.9)$$

Risulter  essere la temperatura dopo la correzione, garantita con un grado di accuratezza riportato in Figura 4.4 sotto la dicitura ‘‘CORRECTED MAXIMUM-MINIMUM ERROR’’. Sempre nella stessa figura si nota come la differenza tra misura con o senza correzione degli errori sia consistente, ragion per cui   sempre consigliabile attivarla.

4.6 Funzionalit  extra

Il sensore prevede una serie di funzionalit  extra che ne consentono un uso piuttosto elastico definibile dall’utente. Tali funzionalit  prevedono ad esempio:

- l’impostazione di una soglia di allarme superiore e/o inferiore, superate le quali generano un allarme. Questo allarme si concretizza nell’impostazione di un *bit* particolare nella memoria del sensore a 1-logico, il master quindi leggendo questo *bit* pu  rendersi conto se la temperatura durante la missione ha superato il livello impostato o meno;
- avvio della missione dopo un delay definibile dall’utente fino a un massimo di 16772215 minuti ($\approx 31 \text{ anni}$), o dopo il superamento di una certa soglia di temperatura, sempre impostabile dall’utente;
- scelta dell’intervallo tra due campionamenti (come visto nel capitolo precedente);
- attivazione o spegnimento dell’RTC, in caso non venga utilizzato per lunghi periodi;
- scelta se campionare la temperatura a 8 *bit* o 11 *bit*. Rispettivamente nei due casi la memoria sar  quindi in grado di contenere¹⁰:

$$N_{8 \text{ bit}} = \frac{8 \text{ Kbyte}}{8 \text{ bit}} = \frac{8 \cdot 2^{10} \text{ byte}}{1 \text{ byte}} = 8192 \text{ letture} \quad (4.10)$$

$$N_{11 \text{ bit}} = \frac{8 \text{ Kbyte}}{16 \text{ bit}} = \frac{8 \cdot 2^{10} \text{ byte}}{2 \text{ byte}} = 4096 \text{ letture} \quad (4.11)$$

¹⁰Ricordando che le letture a 11 *bit* vengono memorizzate come letture a 16 *bit*.

- impostazione della memoria come lineare o circolare, in particolare in quest'ultima quando la data-log memory è piena i primi dati salvati su di essa vengono riscritti, in quella lineare invece la missione si ferma una volta che la memoria è completa;
- protezione della lettura/scrittura della memoria del sensore tramite password a 64 *bit*;
- verifica, a scopo di monitoraggio, istante per istante dello stato del sensore (missione attiva o meno, stato di allarme, memoria piena, data attuale).

Conclusioni

Nella presente trattazione si sono discussi molteplici ambiti, spesso non legati tra di loro. Lo scopo prefissato voleva essere l'approfondimento di ciascuno dei suddetti argomenti, per poi riuscire a conferire al lettore una visione d'insieme che legasse tutte le nozioni apprese o approfondite. Lo scopo, non banale, ha visto il susseguirsi di argomenti di grande interesse attuale e soggetti tuttora a continua ricerca, e che in pochi casi trovano un punto di unione in dispositivi quale il sensore analizzato. Il sensore DS1922L è appunto l'oggetto di studio che offre al lettore la possibilità di vedere come è effettivamente costruito, come lavora e che parametri possiede un *"Data Logger di Temperatura che utilizzi un protocollo di comunicazione 1-Wire"*.

Nel caso in cui un utilizzatore si trovasse di fronte al dover scegliere che tipo di misurazione di temperatura effettuare è bene che conosca come lavorano i data loggers. Nel presente documento quindi vengono analizzate le peculiarità di questa metodologia di misurazione della temperatura che può poi essere estesa anche ad altri tipi di misurazione quali pressione, accelerazione, umidità, ecc.. Volendo riassumere queste caratteristiche si ricordano maggiormente: lunghi periodi di monitoraggio (anche mesi o anni), catena di misura in loco di misura, alta immunità al rumore esterno, memorizzazione dei dati raccolti all'interno del sensore, possibilità di programmazione e riprogrammazione, completa autonomia del sensore a missione affidata. Nello specifico del sensore in questione inoltre si vanno ad aggiungere la generazione di riferimenti temporali da parte sensore stesso, la possibilità di correzione automatica degli errori, l'alta risoluzione e l'utilizzo del protocollo 1-wire per la comunicazione.

Quest'ultimo è uno degli argomenti fondamentali del presente testo. Esso consente la comunicazione di uno o più master con uno o più sensori all'interno di un bus, utilizzando quindi un unico conduttore attivo più un riferimento di massa. Inoltre questo protocollo possiede rigorosi criteri di trasmissione, che consentono una comunicazione sicura e ad alta affidabilità, si vedano ad esempio l'utilizzo del CRC (Cyclic Redundancy Check) e le modalità di lettura-scrittura.

E' nell'unione del *"Data Logging"*, del *"Sensing di temperatura"* e del *"Protocollo 1-Wire"* che nasce il Sensore DS1922L della Maxim Integrated. A posteriori dall'analisi effettuata, ne viene consigliato l'uso quando si vuole costruire un Network via cavo di sensori (purché utilizzanti tutti lo stesso protocollo 1-wire), e se ne prevede una possibile futura espansione. Avendo un costo relativamente contenuto (≈ 62 EUR) può risultare conveniente la sua applicazione anche in bus con pochi sensori (< 4), tuttavia a meno che non si richieda un altissima affidabilità di comunicazione, in questi casi viene consigliato l'utilizzo di Data Loggers wireless.

Nel caso in cui fosse invece un progettista e dover scegliere come costruire il suo data logger di temperatura, la presente trattazione fornisce i parametri chiave per questa scelta. Nello specifico vengono designati dei criteri sulla base dei quali si può scegliere che tipo di sensing utilizzare (termocoppie, termistori, ecc..) a seconda dell'applicazione ragionevolmente prevedibile e dei parametri che si vogliono ottenere.

Una volta effettuata questa scelta è possibile scegliere la risoluzione tramite scelta dell'ADC e della frequenza di campionamento tramite il circuito Track and Hold, per poi dimensionare la catena di misura che legghi il sensore alla parte di conversione. Da qui in poi lo schema base delle memorie e dell'interfaccia 1-Wire è la stessa analizzata in questo documento; la libertà del progettista sta nella programmazione della CPU del sensore per ottenere particolari performance o alcune determinate funzioni. Per la programmazione del Data Logger si rimanda alla letteratura disponibile, come indicato nel datasheet del DS1922L, sul sito della Maxim Integrated <https://www.maximintegrated.com/en/products/comms/ibutton.html>.

Bibliografia

- [1] M.Bertocco, A.Sona, *Introduzione alle misure elettroniche*. Ed. Lulu Press. Inc, 2nd ed, 2010.
- [2] W.W. Peterson, D.T. Brown, *Cyclic Codes for Error Detection in Proceedings of IRE*. Ed IEEE, 2007.
- [3] T. Photopoulou, M. A. Fedak, J. Matthiopoulos, *The generalized data management and collection protocol for Conductivity-Temperature-Depth Satellite Relay Data Loggers*. BioMed Central, 2015.
- [4] A. Pote, D. Rotake, *Access and authentication for multitasking system using 1-wire technology*. IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering, pp 31-37, 2014.
- [5] Maxim Integrated, *DS1922L/DS1922T Datasheet, iButton Temperature Loggers with 8KB Datalog Memory*. Maxim Integrated Products Inc, 2015.

Sitografia

- [6] Materiale Unime, *I sensori di temperatura*.
<http://ww2.unime.it/ingegneria/new/materiale/sensori8.pdf>
- [7] Maxim Integrated, *iButtons Products Standard*.
<http://web.archive.org/web/20090127003835/http://www.maxim-ic.com/products/ibutton/ibuttons/standard.pdf>
- [8] Maxim Integrated, *Temperature Sensing*.
<https://www.maximintegrated.com/en/solutions/industrial/sensors-field-instruments/temperature-sensing.html>
- [9] Maxim Integrated, *iButton Data-Logger Calibration and NIST Certificate FAQs*.
<https://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/4629>
- [10] Maxim Integrated, *1-Wire tutorial Presentation*.
<https://www.maximintegrated.com/en/products/1-wire/flash/overview/>
- [11] Maxim Integrated, *What Is an iButton Device?*
<https://www.maximintegrated.com/en/products/ibutton/ibuttons/index.cfml>
- [12] Maxim Integrated, *Real-Time Clocks*.
<https://www.maximintegrated.com/en/products/digital/real-time-clocks.html>
- [13] Politecnico di Milano, *Sensori di Temperatura*.
http://home.deib.polimi.it/svelto/didattica/materiale_didattico/materiale_didattico_MA/SensoridiTemperatura.pdf
- [14] Sensor all sense, *SAW Technology, how it works*.
<http://www.sensor.com/saw-sensors-how-it-works.html>
- [15] Wikipedia, *Registratore di dati*.
https://it.wikipedia.org/wiki/Registratore_di_dati