

Come realizzare un sistema per la misura del livello di un liquido

Joseph Shtargot
Strategic Applications engineer

Sohail Mirza
Application manager

Mohammad Qazi
Applications engineer

Maxim Integrated

Mediante sensori di pressione su silicio e un convertitore A/D delta-sigma è possibile realizzare in maniera economica un sistema di acquisizione dati (DAS) per la misura del livello di un liquido caratterizzato da bassi consumi

Nella prima parte di questo articolo, dopo una sintetica descrizione delle differenze tra i moderni sensori di pressione, sono evidenziati i vantaggi dei recenti progressi nel campo dei sensori di pressione su silicio compensati in temperatura di tipo MEMS (Micro Electro Mechanical). Offerti a un prezzo competitivo e disponibili in differenti tipi di package, questi sensori possono essere usati in svariate applicazioni di rilevamento di precisione, compresa la misura del livello di un liquido.

Successivamente si procederà alla descrizione di un sistema di acquisizione dati (DAS - Data Acquisition System) per la misura del livello di un liquido a basso consumo e di costo ridotto, che utilizza un sensore di pressione su silicio compensato e un convertitore A/D di tipo delta-sigma ad alta precisione. La modalità di scelta di questo sensore, gli algoritmi da utilizzare, le problematiche relative al rumore e le tecniche di calibrazione atte a migliorare le prestazioni a fronte di sensibili riduzioni di complessità e costi sono gli altri argomenti trattati nell'articolo.

La misura della pressione, uno sguardo retrospettivo

Le moderne misure di pressione possono essere fatte risalire all'invenzione del barometro a mercurio avvenuta nel 1643 per merito del fisico italiano Evangelista Torricelli¹. Questi riempì un tubo di vetro di lunghezza pari a 1 metro con mercurio, chiuse ermeticamente il tubo a una estremità e lo posizionò in verticale in una bacinella riempita anch'essa di mercurio (con l'estremità aperta

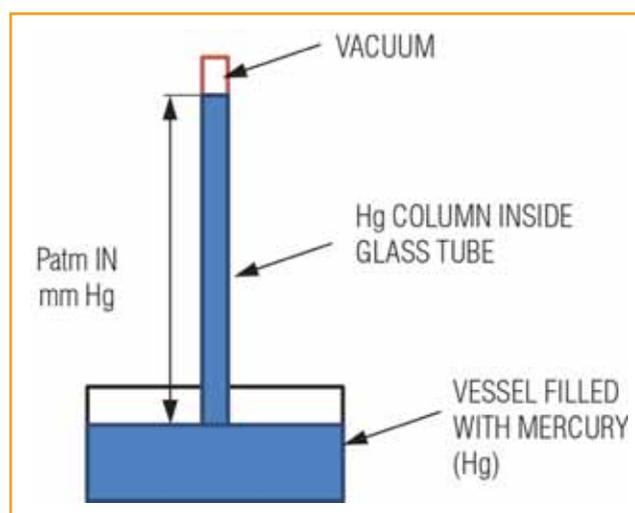


Fig. 1 - Il mercurio (Hg) presente nel barometro si regola in modo tale che il peso della sua colonna bilanci la forza atmosferica. P_{atm} è esercitata sul serbatoio aperto

a contatto con il liquido contenuto nella bacinella). La colonna di mercurio contenuta nel tubo si abbassò fino a raggiungere un'altezza pari a circa 760 mm, lasciando uno spazio vuoto al di sopra di questo livello. Da questo esperimento e dal suo inventore prese il nome l'unità di misura della pressione, il Torr, equivalente a 1 mm di mercurio ($1 \text{ Torr} = 1/760 \text{ atmosfere}$). In numerose parti del mondo la pressione del sangue è misurata in Torr.

Tra le unità di misura della pressione attualmente utilizzate si annovera il Pascal (Pa), definito dal Sistema Internazionale (SI - System International) come unità di misura

di riferimento ($\text{Pa} = \text{N}/\text{m}^2$). Negli Stati Uniti un'unità di misura molto utilizzata è il bar, che è espresso in termini di psi (pound per square inch – libbre per pollice). La conversione nell'unità di misura standard tra le varie unità di misura della pressione è un compito abbastanza "scomodo" per ragioni di natura sia tecnica, sia storica. Nonostante ciò sono reperibili tabelle di conversione (anche online) che rendono più agevole tale compito. Vi sono due principali categorie di sensori di pressione, classificate in base al tipo di misura:

1. sensori di pressione assoluta, che misurano la pressione relativa alla pressione del vuoto perfetto. Un esempio di sensore di pressione assoluta è il barometro di mercurio riportato in figura 1;
2. sensori di pressione differenziale, che misurano la differenza tra due o più pressioni che rappresentano gli ingressi dell'unità di rilevamento. Un esempio è rappresentato dal misuratore di portata a pressione differenziale (Fig. 2) dove la variazione nella velocità del fluido produce una variazione della pressione e quindi una differenza di pressione data da $\pm P = P1 - P2$.

Un sensore di pressione relativa (gauge pressure sensor) è un altro tipo di sensore differenziale realizzato per misurare la pressione relativamente alla pressione atmosferica. Tali sensori sono ad esempio utilizzati per misurare la pressione dell'aria in un pneumatico: quando il manometro dello strumento legge lo zero, esso sta leggendo la pressione atmosferica in una data posizione.

L'avvento dei moderni sensori di pressione

Numerose applicazioni nei settori industriale, commerciale e medicale richiedono misure di pressione accurate, caratterizzate da livelli di precisione compresi tra $\pm 1\%$ e $\pm 0.1\%$ (o anche migliore) su un ampio range dinamico:

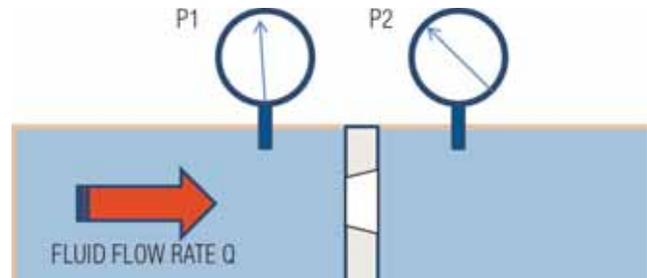


Fig. 2 - Per questo tipo di misuratore di portata la portata volumica, Q , è collegata a ΔP mediante una semplice formula che misura la velocità del flusso e, di conseguenza, determina i consumi

il tutto abbinato a costi contenuti e, possibilmente, bassi consumi. Lo sviluppo dei sensori di pressione su silicio ha rappresentato la risposta a queste esigenze.

L'inizio dell'era dei sensori moderni può essere fatta risalire al 1967 quando Art R. Zias e John Egan depositarono una domanda di brevetto relativa a una membrana di silicio dal margine compresso.³

Sino alla metà degli anni '90 i sensori di pressione basati su silicio di tipo piezoresistivo denominati MEMS sono stati prodotti in alti volumi e a prezzi competitivi, divenendo quindi la categoria di sensori di pressione più diffusi. Un dispositivo MEMS può operare in un intervallo di pressione compreso tra 100mbar e 1500bar nelle tre modalità sopra descritte: assoluta, differenziale e relativa.

I sensori di pressione piezoresistivi basati su silicio sono caratterizzati da livelli di sensibilità più elevati rispetto agli estensimetri standard: essi evidenziano ottime specifiche di linearità a temperatura costante e un'isteresi accettabile fino al limite di distruzione. Gli svantaggi

Tabella 1 - Principali caratteristiche operative e analisi degli errori dei sensori della famiglia MPX2010				
Characteristic	Units	Value	Error (%FS)	Comment
Pressure range, pop	kPa	0 to 10	-	-
Typical supply Voltage, V_{PPT}	V	10	-	-
Supply current, I_{PT}	mA	6	-	-
Fullscale span, V_{FST}	mV	25 ± 1	± 4	Can be compensated by fullscale calibration
Temperature coefficient on fullscale span	%FS	± 1	± 1	-
Offset	mV	± 1	± 4	Can be compensated by offset calibration
Temperature coefficient on offset	mV	± 1	± 4	-
Linearità	%FS	± 1	± 1	-
Pressure hysteresis	-	-	-	-
(0 to 10kPa)		± 0.1	± 0.4	

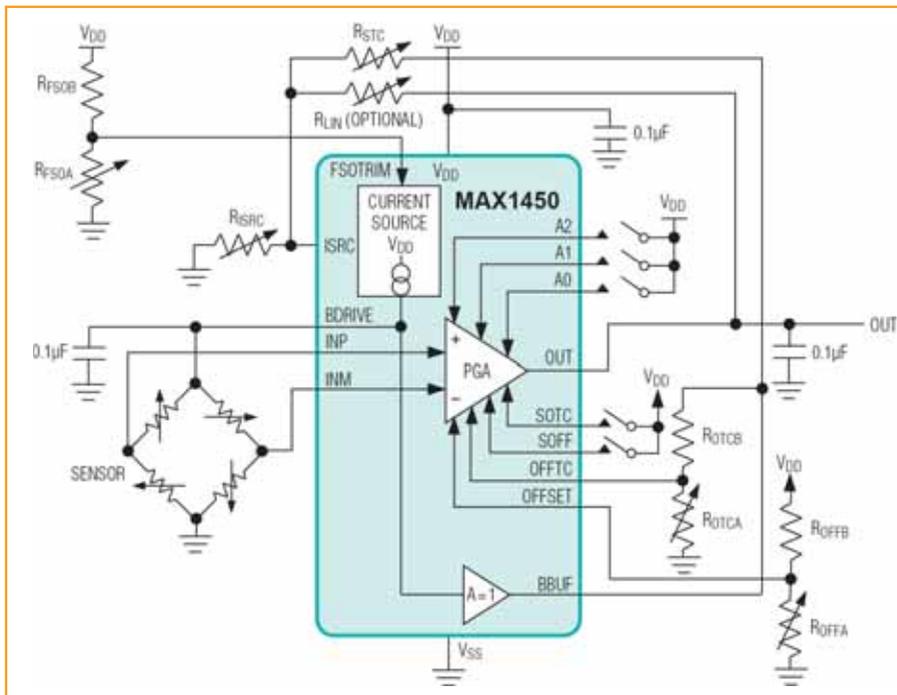


Fig. 3 - La sensibilità iniziale del circuito (FSO) è regolata mediante il pin FSOTRIM. La deriva in temperatura è regolabile retroazionando la tensione di pilotaggio del sensore dal pin BDRIVE al pin ISRC. La compensazione dell'offset e della deriva dell'offset viene effettuata con l'amplificatore a guadagno programmabile (PGA) e disaccoppiata dalla compensazione della sensibilità. La funzione chiave viene eseguita dal generatore di corrente controllato, che implementa un algoritmo sofisticato per compensare la deriva della sensibilità

di questi tipi di sensori sono essenzialmente legati alla loro stessa natura (ovvero dal fatto di essere realizzati in silicio): dipendenza fortemente non lineare del segnale di fondo-scala dalla temperatura, elevato offset iniziale e deriva di notevole entità dell'offset al variare della temperatura.⁴

Parecchie applicazioni nei settori industriale e automotive richiedono misure di pressione nel range di temperatura esteso (da -40 °C a +125 °C). Per ottenere misure di pressione di precisione con un'accuratezza di ±1 % (o anche migliore) in un intervallo di temperatura così ampio è necessario prevedere almeno una compensazione in temperatura del primo ordine, che in termini matematici si può esprimere come:

$$(Eq. 1) V_{DIFF} = VOS + T\alpha VOS + P(S + T\alpha S)$$

Dove:

V_{DIFF} è la tensione differenziale in funzione della pressione (P) e temperatura (T);

αS è il coefficiente di temperatura della sensibilità;

αVOS è il coefficiente di temperatura dell'offset.

Per effettuare il condizionamento del segnale analogico è possibile ricorrere a un dispositivo quale per esempio MAX1450.

Questo integrato per il condizionamento del segnale può essere utilizzato nel campo di temperatura esteso, ovvero compreso tra -40 °C e +125 °C, con sensori non compensati (Fig. 3). Integrati più avanzati per il condizionamento dei segnali provenienti dai sensori (come ad esempio MAX1455) includono caratteristiche quali eccitazione del sensore programmabile, amplificatore a guadagno programmabile (PGA) a 16 passi, 768-byte (6144 bit) di EEPROM interna e quattro convertitori D/A a 16 bit utilizzati per l'FSO, oltre a funzioni per la compensazione dello span (ovvero la differenza tra i valori estremi del campo di misura) e dell'offset.⁵

Sensori di pressione compensati in temperatura: una soluzione versatile ed economica

In molti processi industriali, così come in un gran numero di applicazioni nei settori commerciale e medicale, non è richiesto il funzionamento nell'intervallo di temperatura

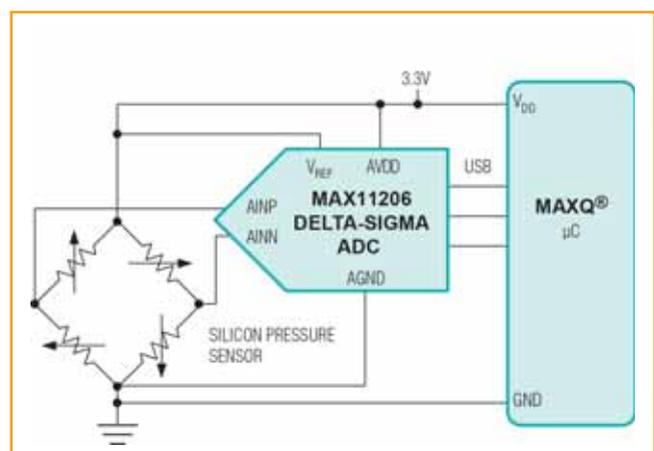


Fig. 4 - Schema a blocchi semplificato di un sistema DAS per la misura della pressione con interfacciamento diretto verso il sensore di pressione in silicio, compensato utilizzando un approccio raziometrico. Questo progetto consente l'uso di un alimentatore analogico come riferimento

esteso. Inoltre molte di queste applicazioni operano in ambienti con aria condizionata, dove quindi il range di temperatura è abbastanza limitato. I sensori di pressione in silicio compensati in temperatura sono particolarmente indicati per queste applicazioni.

I sensori di pressione in silicio compensati in temperatura di Freescale Semiconductor e OMRON sono caratterizzati da ridotte dimensioni e bassi costi (dell'ordine del dollaro), a seconda del tipo di package.

Questi sensori garantiscono, oltre a una sensibile riduzione dei costi, la libertà di posizionare il sensore su qualsiasi tipo di scheda a circuito stampato (PCB). Un esempio è rappresentato dai sensori di pressione piezoresistivi della serie MPX2010 di Freescale Semiconductor, che assicurano la compensazione in temperatura nell'intervallo compreso tra 0 °C e +85 °C.

La tabella 1 riporta, oltre alle principali caratteristiche operative dei componenti della serie MPX2010, gli errori sistematici a temperature ambiente.

Come si può notare osservando la tabella 1, sebbene questi sensori di pressione compensati in temperatura siano caratterizzati da linearità e isteresi pari rispettivamente a $\pm 1\%$ e $\pm 0.4\%$, gli errori di offset e di fondo-scala riducono l'accuratezza al 4% a temperatura costante.

A questo punto per il progetto è necessario prevedere l'uso di un nuovo convertitore A/D delta-sigma di precisione. Mediante l'applicazione della calibrazione del fondo-scala e dell'offset disponibile nel convertitore A/D, la precisione di misura complessiva del sensore può essere migliorata fino a $\pm 1\%$, (o superiore). Questi convertitori A/D delta-sigma, inoltre, grazie a caratteristiche quali elevata NFR (Noise Free Resolution - risoluzione senza rumore), eccellente reiezione di modo comune a 50/60 Hz e disponibilità di buffer integrati, possono essere interfacciati direttamente con sensori di pressione piezoresistivi in silicio senza ricorrere ad amplificatori per strumentazione o generatori di corrente dedicati. Alcune delle principali caratteristiche dei convertitori A/D della famiglia MAX11200 sono riportate nella tabella 2.

Grazie all'interfacciamento diretto con il convertitore A/D delta sigma a basso rumore, il sensore di pressione MPX2010 si propone come un sistema di misura economico ottimizzato per applicazioni di rilevamento di tipo portatile.

Misure di livello di un liquido con un sensore di pressione: un esempio concreto

Con un sensore di pressione e un convertitore A/D delta-sigma è possibile realizzare un sistema in grado di misurare con precisione il livello dell'acqua. Il livello (altezza)

Tabella 2 - Principali caratteristiche dei convertitori A/D della famiglia MAX11200

MAX11200		Comments
Sample rate (sps)	10 to 120	The MAX11200's variable oversampling rate can be optimized for low noise and for -150dB line-noise rejection at 50Hz or 60Hz
Channels	1	GPIOs allow external multiplexer control for multichannel measurements
INL (max, ppm)	±10	Provides very good measurement linearity
Offset error (µV)	±1	Provides almost zero offset measurements
Noise-free resolution (bits)	19.0 at 120sps; 19.5 at 60sps; 21.0 at 10sps	Very high dynamic range with low power
V _{DD} (V)	AVDD (2.7 to 3.6) DVDD (1.7 to 3.6)	AVDD and DVDD ranges cover the industry's popular power-supply ranges
I _{CC} (max, µA)	300	Highest resolution-per-unit power in the industry; ideal for portable applications
GPIOs	✓	Allows external device control, including local multiplexer control
Input range	0 to V _{REP} ±V _{REF}	Wide input ranges
Package	16-pin QSOP, 10-pin µMAX (15mm ²)	10-pin mMAX offers very small size for space-constrained designs

del liquido sarà determinato sulla base della pressione prodotta da una colonna idrostatica del liquido stesso sul fondo del contenitore e misurata all'estremità del tubo di misura. Il sensore di pressione sarà soggetto da un lato alla pressione atmosferica e all'aria compressa (per mezzo del liquido) dall'altro lato (Fig. 6). Il sensore MPXM2010GS è utilizzato per la misura differenziale della pressione. Nell'ipotesi di densità costante del liquido e di una variazione trascurabile dell'accelerazione gravitazionale della Terra, la pressione idrostatica può essere derivata dalla seguente formula:

$$(Eq. 2) P = D \times G \times H$$

Dove:

- P è la pressione idrostatica (Pa);
- G è l'accelerazione gravitazionale (9,8066 m/s²);
- DH è l'altezza della colonna di liquido (m).

Ricavando H dall'equazione 2 si ottiene:

$$(Eq. 3) H = P / (D \times G)$$

In generale, la densità del liquido varia al variare della temperatura. Per esempio, la densità dell'acqua aumenta tra il suo punto di fusione a 0 °C e +4 °C, raggiungendo un valore standard di 999,972 (praticamente 1000) kg/

m³ a +4 °C. A temperatura ambiente, +22 °C, la densità dell'acqua è pari a 997,774 kg/m³. Tutte le misure riportate in questo articolo sono state effettuate a temperature ambiente - circa +22°C, ±3°C - dove la variazione della densità dell'acqua è pari a circa ±0.1%. Si tenga presente che questo dato è inferiore rispetto alla precisione prevista per il sistema DAS a cui si fa riferimento in questo articolo. Per l'intervallo di fondo-scala tipico di MPX2010 di 10kPa, l'altezza dell'acqua equivalente è di 1,022m.

Per la calibrazione del fondo-scala del sistema si è adottato un valore dell'altezza della colonna d'acqua standardizzato pari a 1 m (1000mm). Nella figura 4 è riportato uno schema a blocchi semplificato del sistema di acquisizione dati per la misura della pressione.

L'altezza del liquido può essere ottenuta dalla seguente formula:

$$(Eq. 4) H_{OUT} = H_{FS} \times (A_{ADCOUT} / A_{ADCFS})$$

Dove:

- H_{OUT} è l'altezza misurata della colonna di liquido (m);
- H_{FS} è l'altezza misurata del fondo-scala (1m per l'acqua) della colonna di liquido (m);
- A_{ADCOUT} è il codice di uscita del convertitore A/D misurato;
- A_{ADCFS} è il codice di uscita misurato del fondo-scala del convertitore A/D.

Osservando la figura 4 si può notare che l'elemento di misura del sensore di pressione in silicio rappresenta un ponte resistivo, che consente l'uso di un approccio di tipo raziometrico⁷ per valutare lo span della tensione di fondo-scala in presenza di una tensione di alimentazione ridotta a 3,3V.

$$(Eq. 5) V_{FS} = V_{FST} \times (V_{DD}/V_{PST})$$

Dove:

V_{FS} è il range di tensione del sistema a fondo-scala (Fig. 4) alla massima pressione, $P_{FS} = 10$ kPa;

V_{DD} è la tensione di eccitazione, mentre V_{PST} è un valore di eccitazione tipico.

Nel caso di $V_{PST} = 10V$, l'oscillazione della tensione del sensore è $V_{FST} = 25$ mV. Poiché l'eccitazione applicata è uguale a 3,3V, si ottiene:

$$(Eq. 6) V_{FS} = 25mV \times (3.3/10) = 8.25mV$$

(span del fondo-scala a 3.3V)

Tabella 3 - Calibrazione del sistema per il DAS basato sul convertitore A/D

Calibrator Water Level (H, mm)	MAX11206 Output Code (LSB)	Measured Water Level per Eq. 4 (mm)	Absolute Error (mm)	FS Error (%)
0	0	0	0	0
100	114	98.5	1.5	0.1
200	225	194.5	5.5	0.6
300	343	296.5	3.5	0.4
400	459	396.7	3.3	0.3
500	576	497.8	2.2	0.2
600	693	599.0	1.0	0.1
700	809	699.2	0.8	0.1
800	924	798.6	1.4	0.1
900	1042	900.6	-0.6	-0.1
1000	1157	1000.0	0.0	0.0

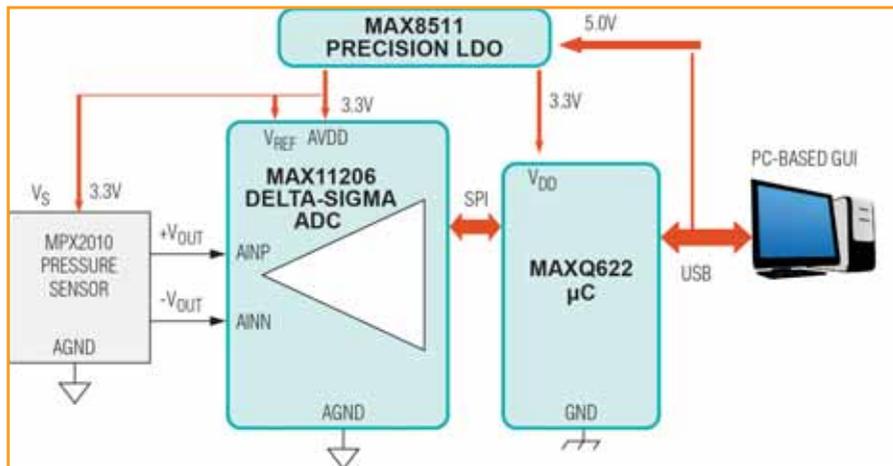


Fig. 5 - I sensori di pressione in silicio compensati si interfacciano direttamente con il convertitore A/D MAX11206, mentre l'LDO di precisione MAX8511 fornisce l'alimentazione a 3,3V e le tensioni di riferimento. Il microcontrollore MAXQ622 effettua la raccolta dei dati provenienti dal convertitore A/D e fornisce l'interfaccia USB verso un PC. Il sistema DAS preso in considerazione integra una GUI generata dal PC

Uno schema semplificato del sistema DAS di precisione utilizzato per il sistema di misura del livello del liquido è riportato in figura 5. Il dispositivo MAX11206 utilizzato per questo articolo è un convertitore A/D delta-sigma a 20 bit adatto per applicazioni a basso consumo che richiedono un ampio range dinamico. Esso è caratterizzato da un valore quadratico medio (RMS) del rumore riferito all'ingresso particolarmente basso, pari a 570 nV a 10 sps. La risoluzione libera da rumore (NFR – Noise Free Resolution) è pari a circa $6,6 \times$ il valore quadratico medio del rumore e risulta pari a $2,86 \mu\text{V}$. (questo parametro viene definito codice flicker-free). I calcoli riportati di seguito forniscono una stima della risoluzione relativa a un'altezza del fondo-scala di $H_{FS} = 1022 \text{ mm}$.

$$\text{Noise-free codes} = \frac{V_{fs}}{\text{Input referred NFRnoise}}$$

$$\text{Noise-free codes} = \frac{8.25 \text{ mV}}{2.86 \mu\text{V}(P-P)}$$

$$\text{Noise-free codes} = 2880 \text{ codes}$$

$$H_{fs}(\text{res}) = \frac{1022}{2880} = 0.35\text{mm} = 0.035\%$$

La risoluzione stimata del fondo-scala di $\pm 0.035\%$ è più che sufficiente per raggiungere il livello di precisione previsto per il sistema DAS che era pari a $\pm 1\%$. Ciò dimostra che il convertitore A/D può interfacciarsi direttamente con il sensore di pressione in silicio compensato senza dover ricorrere a un amplificatore per strumentazione aggiuntivo.

Nella figura 6 è riportata l'implementazione del sistema schematizzato in figura 5. Esso prevede un "calibratore" del sistema per la misura del livello dell'acqua formato da un tubo riempito d'acqua di lunghezza pari a 1m, posto in verticale ed equipaggiato con un nastro di misura con risoluzione di 1mm.

Il tubo di misura è posizionato all'interno del tubo d'acqua del calibratore: esso si collega direttamente con la porta della pressione positiva del sensore, mentre la porta della pressione di riferimento è soggetta alla pressione atmosferica.

Nella tabella 3 sono riportate misure e i calcoli effettuati utilizzando l'equazione 4 per un range di misura di 1m. Come si può dedurre dalla tabella 3, mediante la calibrazione del sistema e l'uso dell'equazione 4, un sistema DAS basato su MAX11206 garantisce una precisione migliore di $\pm 1\%$ relativamente al livello dell'altezza dell'acqua sul fondo-scala di 1m (1000 mm).

In definitiva, si può affermare che la diminuzione dei costi

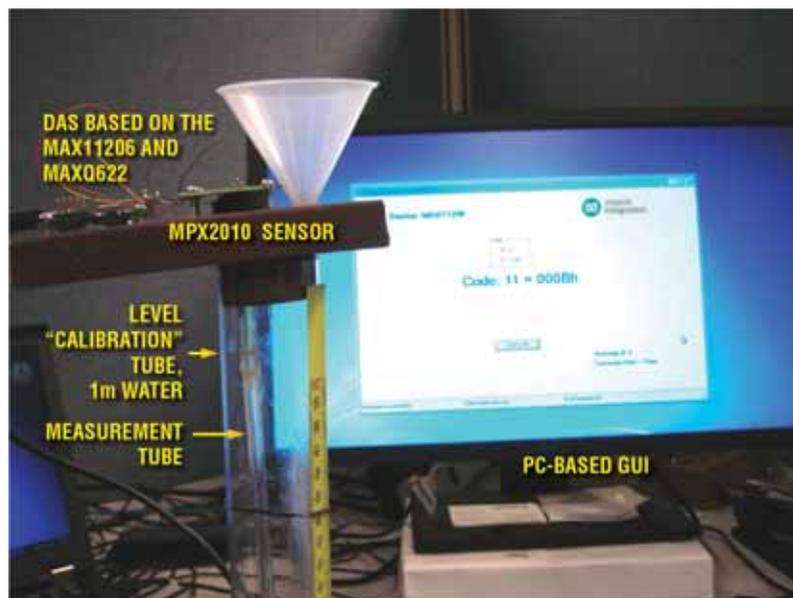


Fig. 6 - Realizzazione pratica del sistema schematizzato in figura 5. La pressione idrostatica prodotta sul fondo del calibratore dalla colonna d'acqua produce la medesima pressione sul sensore attraverso l'aria intrappolata nel tubo di misura. In uscita, il sensore MPX2010 produce una tensione equivalente alla pressione che viene misurata e digitalizzata dal convertitore A/D MAX11206, elaborata dal microcontrollore MAXQ622 e inviata al PC mediante un cavo USB

e delle dimensioni dei nuovi sensori di pressione in silicio compensati in temperatura di tipo MEMS ne favorisce l'adozione in un'ampia gamma di applicazioni di rilevamento di precisione, come ad esempio la misura del livello di un liquido o la misurazione del flusso. Applicazioni di questo tipo richiedono l'uso di un convertitore A/D delta-sigma a basso rumore come ad esempio MAX11206 per consentire l'interfacciamento diretto sono i sensori di pressione in silicio montati a bordo della scheda PCB. Grazie all'adozione di semplici schemi di compensa-

zione, questo approccio consente di aumentare l'accuratezza assoluta di questi sensori di pressione. I sensori di pressione su silicio unitamente al convertitore A/D permettono di realizzare un sistema di misura semplice e ad alte prestazioni, ideale per l'uso in applicazioni di rilevamento portatili. ■

Riferimenti

¹ http://en.wikipedia.org/wiki/Evangelista_Torricelli

² Per maggiori informazioni: http://en.wikipedia.org/wiki/Blood_pressure

³ Per maggiori informazioni: www.kelleramerica.com/history-of-pressure-measurement/

⁴ Maxim Integrated application note 871, "Demystifying Piezoresistive Pressure Sensors," at www.maximintegrated.com/AN871

⁵ Maxim Integrated application note 840, "MAX1455 Diagnostic Clip Boost Circuit," at www.maximintegrated.com/AN840

⁶ 10 kPa On-Chip Temperature Compensated and Calibrated Silicon Pressure Sensors, at http://www.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MPX2010.pdf

⁷ Maxim Integrated application note 3775, "Design Considerations for a Low-Cost Sensor and A/D Interface," at www.maximintegrated.com/AN3775