

Università degli Studi di Padova

---

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA ELETTRONICA

**Sviluppo del prototipo di un sensore per  
il monitoraggio della qualità dell'acqua  
nella laguna di Venezia**

*Relatore*

DOTT. FILIPPO CAMPAGNARO

*Laureando*

FEDERICO MARIN

*Correlatore*

PROF. ALESSANDRO POZZEBON

---

ANNO ACCADEMICO 2022/2023



# Sommario

I cambiamenti climatici hanno un impatto particolarmente importante sugli ecosistemi costieri e fluviali, come la laguna di Venezia, caratterizzati da grandi variabilità spaziali e temporali. Il loro monitoraggio a lungo termine è dunque essenziale per valutare gli effetti sulla biodiversità di questi ambienti, tuttavia le tecniche di campionamento manuale attualmente in uso non consentono di effettuare un numero sufficiente di misurazioni.

Questa tesi documenta lo sviluppo del prototipo di un sensore wireless a basso costo per il monitoraggio automatico dei principali parametri fisico-chimici dell'acqua, inviando i dati ad un gateway centrale mediante protocollo LoRaWAN. Tratta in modo particolare di un metodo per l'eliminazione dell'interferenza tra i sensori elettrochimici compatibile con alimentazione a batteria. Infine, la funzionalità di questa soluzione viene dimostrata in un ambiente rappresentativo dell'applicazione finale.



# Indice

ELENCO DELLE FIGURE	vi
ELENCO DELLE TABELLE	ix
ELENCO DEGLI ACRONIMI	xi
INTRODUZIONE	1
1 DESCRIZIONE DEL NODO	3
1.1 Microcontrollore	3
1.2 Comunicazione Wireless	4
2 PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO DEI SENSORI	7
2.1 Modello circuitale generale	7
2.2 Sensore di pH	8
2.3 Sensore di Ossigeno Disciolto	10
2.3.1 Sensore di Clark	10
2.3.2 Sensore galvanico	11
2.4 Sensore di Temperatura	12
2.5 Sensore di Conducibilità Elettrica	13
2.6 Sensore di Torbidità	15
3 DESIGN E REALIZZAZIONE DEL NODO	17
3.1 Problematiche osservate	17
3.1.1 Interferenza con il modulo GPS	17
3.1.2 Interferenza tra sensori elettrochimici	19
3.2 Soluzioni per l'isolamento galvanico	20
3.3 Sequenziamento delle letture dei sensori	22
3.3.1 Scelta del tipo di relè	22
3.3.2 Circuito di pilotaggio	24
3.3.3 Scelta del tipo di MOSFET	27
3.4 Schema elettrico completo	28
4 TEST IN AMBIENTE RAPPRESENTATIVO	31
4.1 Descrizione del software	31
4.2 Descrizione del test	32
4.3 Risultati	32
5 CONCLUSIONI	35

A SCHEMA ELETTRICO COMPLETO	37
B PACCHETTI RICEVUTI DA TTN	39
BIBLIOGRAFIA	40

# Elenco delle figure

1.1	Scheda di sviluppo “Arduino MKR WAN 1310” [1]. . . . .	3
1.2	Spettrogramma di un segnale LoRa, $B = 125$ kHz, immagine presa da [2]. . . . .	4
1.3	Architettura tipica di una rete LoRaWAN, immagine presa da [3]. . . . .	6
2.1	Struttura di un generico sensore elettrochimico configurato per una misura voltammetrica [4]. . . . .	7
2.2	Modello equivalente di un interfaccia elettrodo-elettrolita [5]. . . . .	8
2.3	Modello circuitale equivalente dell’elettrodo a vetro . . . . .	9
2.4	Relazione tensione-corrente per un sensore polarografico in funzione della concentrazione di ossigeno, immagine presa da [6]. . . . .	11
2.5	Concentrazione dell’ossigeno disciolto in soluzione satura in funzione di temperatura e salinità dell’acqua (dati presi da [7]). . . . .	12
2.6	Sensore di Ossigeno Disciolto utilizzato per il prototipo [8]. . . . .	12
2.7	Accuratezza del sensore DS18B20 (curva tipica e $\pm 3\sigma$ ) [9]. . . . .	13
2.8	(a) Schema rappresentativo di una cella di conduttività a due terminali, con evidenziati gli strati ionici. (b) Potenziale $\varphi(x)$ della soluzione in funzione della posizione $x$ lungo la cella [10] . . . . .	14
2.9	Modello circuitale equivalente della struttura in Figura 2.8 . . . . .	14
2.10	Sensore di torbidità utilizzato per il prototipo [11]. . . . .	15
3.1	Interazione tra alcune coppie di sensori. . . . .	18
3.2	Schemi di collegamento dell’alimentazione per il modulo GPS. . . . .	18
3.3	Misura dell’interferenza dovuta al modulo GPS (segnale filtrato con filtro a media mobile $N = 8$ ). . . . .	19
3.4	Modello equivalente di due sensori nella stessa soluzione. . . . .	19
3.5	Schema di principio del design TIDA-00349 di Texas Instruments [12]. . . . .	21
3.6	Circuito di principio di un ponte ad H. . . . .	25
3.7	Driver capacitivo a mezzo ponte. . . . .	25
3.8	Configurazione dei MOSFET integrati [13]. . . . .	27
3.9	Caratteristiche statiche tipiche dei MOSFET a canale N [13]. . . . .	27
3.10	Caratteristiche statiche tipiche dei MOSFET a canale P [13]. . . . .	27
3.11	Circuito per la lettura di un sensore elettrochimico e un parametro ausiliario (entrambi i relè sono raffigurati in posizione di reset). . . . .	28
3.12	Sequenza di lettura per il circuito in Figura 3.11. . . . .	29
3.13	Fotografia del prototipo saldato su basetta millefori. . . . .	29
4.1	Flow chart del programma in esecuzione sul microcontrollore. . . . .	32
4.2	Immagini del test condotto nel canale Piovego. . . . .	33
A.1	Schema elettrico completo del prototipo. . . . .	37

B.1	Interfaccia “Live Data” di TTN durante la ricezione di pacchetti. . . . .	39
-----	---	----



# Elenco delle tabelle

1.1	Bitrate nominale per diverse impostazioni di $SF$ ( $B = 125$ kHz, $CR = 1$ ) e sensibilità del modem SX1276 [14][3] . . . . .	5
3.1	Moduli di isolamento commerciali . . . . .	21
3.2	Soluzioni integrate per l'isolamento (i dati sono presi dai datasheet riportati in [15]) . . . . .	21
3.3	Parametri rilevanti del relè utilizzato, ricavati dal datasheet [16] . . . . .	24
4.1	Esempio di una coppia di pacchetti ricevuta durante i test . . . . .	31
4.2	Risultati del test sul campo confrontati con i valori di riferimento . . . . .	33



# Elenco degli Acronimi

<b>ADC</b> .....	Analog to Digital Converter
<b>API</b> .....	Application Programming Interface
<b>ARPA</b> .....	Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale
<b>CE</b> .....	Counter Electrode
<b>CPU</b> .....	Central Processing Unit
<b>CSV</b> .....	Comma-Separated Values
<b>DAC</b> .....	Digital to Analog Converter
<b>DMA</b> .....	Dynamic Memory Access
<b>DO</b> .....	Dissolved Oxygen
<b>EC</b> .....	Electrical Conductivity
<b>ECDH</b> .....	Elliptic Curve Diffie-Hellman
<b>ECDSA</b> .....	Elliptic Curve Digital Signature Algorithm
<b>EDL</b> .....	Electrical Double Layer
<b>FAU</b> .....	Formazin Attenuation Unit
<b>FNU</b> .....	Formazin Nephelometric Unit
<b>GPS</b> .....	Global Positioning System
<b>I<sup>2</sup>C</b> .....	Inter Integrated Circuit
<b>IEC</b> .....	International Electrotechnical Commission
<b>ISM</b> .....	Industrial, Scientific and Medical
<b>JSON</b> .....	JavaScript Object Notation
<b>LED</b> .....	Light Emitting Diode
<b>LPWAN</b> .....	Low Power Wide Area Network
<b>MAC</b> .....	Medium Access Control
<b>MOSFET</b> ....	Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor

<b>NTU</b> .....	Nephelometric Turbidity Unit
<b>ORP</b> .....	Oxidation-Reduction Potential
<b>pH</b> .....	Potential of Hydrogen
<b>PTFE</b> .....	PoliTetraFluoroEtilene
<b>RE</b> .....	Reference Electrode
<b>RF</b> .....	Radio Frequency
<b>RTC</b> .....	Real-Time Clock
<b>SAR</b> .....	Successive Approximation Register
<b>SF</b> .....	Spreading Factor
<b>SHA</b> .....	Secure Hash Algorithm
<b>SPI</b> .....	Serial Peripheral Interface
<b>SRAM</b> .....	Static Random Access Memory
<b>TDS</b> .....	Total Dissolved Solids
<b>TSS</b> .....	Total Suspended Solids
<b>TTN</b> .....	The Things Network
<b>UART</b> .....	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
<b>USB</b> .....	Universal Serial Bus
<b>WE</b> .....	Working Electrode

# Introduzione

Il monitoraggio dei parametri della qualità delle acque in ambienti fluviali e costieri rappresenta una sfida sia per la densità spaziale e temporale di misurazioni richiesta sia dal punto di vista dei costi di implementazione. A differenza di mari ed oceani, i cui parametri caratteristici sono pressoché costanti su vaste aree e si evolvono molto lentamente, gli ecosistemi costieri e lagunari sono estremamente eterogenei e caratterizzati da importanti variabilità anche su scala giornaliera [17]. Un ambiente di questo tipo è rappresentato dalla laguna di Venezia, dove l'intenso ciclo di marea, abbinato alla bassa profondità e alla presenza di numerose barene, fa sì che alcuni parametri dell'acqua subiscano variazioni importanti in meno di cento metri. È quindi chiaro come le tecniche di campionamento manuale attualmente in uso non forniscano una descrizione soddisfacente dello stato del sistema. La soluzione proposta [17] prevede la creazione di una rete di sensori a basso costo ed alimentati a batteria per un monitoraggio continuo dei parametri più variabili, da distribuire secondo la densità richiesta sia in superficie che in profondità. Ogni sensore invia periodicamente i dati ad un gateway posizionato su boe apposite, via radio per i nodi superficiali e mediante modem acustici per quelli in profondità.

Questa tesi si propone di sviluppare un prototipo di un nodo superficiale e di dimostrarne la funzionalità in ambiente rappresentativo. Vengono utilizzati sensori di laboratorio, non adatti per una misurazione continuativa, ma il loro principio di funzionamento è comune ai sensori più professionali. I parametri di interesse sono selezionati con l'aiuto della Stazione Idrobiologica di Chioggia dell'Università di Padova e sono temperatura, pH, conducibilità elettrica (*Electrical Conductivity*, EC), ossigeno disciolto (*Dissolved Oxygen*, DO) e torbidità. In aggiunta ogni nodo è dotato di un ricevitore GPS per la verifica della posizione e di un sensore ottico del livello dell'acqua, per verificare che i sensori siano sommersi anche in caso di bassa marea.

La tesi è strutturata come segue: nel Capitolo 1 viene presentato il microcontrollore impiegato per l'elaborazione dei dati e il protocollo di comunicazione wireless, nel Capitolo 2 vengono esposti i principi di funzionamento dei sensori e i modelli elettrici associati, nel Capitolo 3 si usano questi modelli per spiegare alcune problematiche emerse e si discutono le possibili soluzioni, nel Capitolo 4 si mostra come questo prototipo possa funzionare in ambiente rappresentativo. Vengono infine tratte le conclusioni di questo lavoro nel Capitolo 5.



# Capitolo 1

## Descrizione del nodo

### 1.1 Microcontrollore

Per l’acquisizione, elaborazione e trasmissione dei dati si utilizza una scheda di sviluppo “Arduino MKR WAN 1310” (Figura 1.1 [1]), basata su un microcontrollore SAMD21G18A di Microchip [18]. Al suo interno contiene una CPU ARM Cortex® M0+ a 32 bit con clock massimo di 48 MHz, 256 kB di memoria Flash e 32 kB di SRAM integrati. Tra le periferiche disponibili si segnala un ADC SAR avanzato da 12 bit, 350 kSPS in grado di digitalizzare tensioni analogiche *single-ended* o differenziali, preceduto da un amplificatore a guadagno programmabile da 0.5 a 16. Gli errori di offset e guadagno sono misurati in fabbrica e salvati in opportuni registri non volatili, in modo da aumentare l’accuratezza delle letture senza calibrazione esterna. Inoltre è disponibile un riferimento di tensione interno a 1 V, stabile e compensato in temperatura. Sono presenti inoltre tutte le principali interfacce di comunicazione (SPI, I<sup>2</sup>C a 3.4 MHz, UART, USB full-speed a 12 Mbps), svariati timer tra cui RTC e Watchdog, un sistema DMA a 12 canali e un DAC a 10 bit.

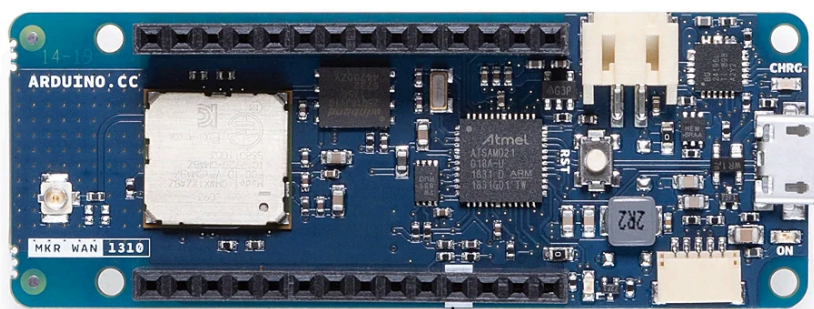


Figura 1.1: Scheda di sviluppo “Arduino MKR WAN 1310” [1].

Sulla scheda è presente un co-processore crittografico ATECC508A, che implementa velocemente in hardware numerosi algoritmi crittografici a chiave pubblica (ECDSA, EC-

DH e SHA con chiavi a 256 bit) assorbendo meno di 150 nA a riposo [19]. Può essere utilizzato per stabilire una connessione autenticata con il gateway, verificare l'integrità dei pacchetti o negoziare chiavi di cifratura per criptare la comunicazione.

É inoltre presente un modulo wireless CMWX1ZZABZ di Murata, che a sua volta integra un modem LoRa™ SX1276 di Semtech. La comunicazione radio avviene nelle bande ISM<sup>1</sup> sub-GHz 863—870 MHz in Europa e 902—928 MHz in Nord America, con modulazione descritta in seguito. Il *frontend* RF è in grado di erogare +20 dBm (100 mW) di potenza in trasmissione ed ha sensibilità fino a -148 dBm in ricezione [14]. I consumi sono fino a 128 mA in trasmissione, 23.6 mA in ricezione e 1.4 µA a riposo.

La scheda è predisposta per l'alimentazione da una batteria esterna di tipo LiPo a 3.7V con controllore di carica BQ24195L e presenta un consumo minimo di corrente di 104 µA [1] quando tutti i componenti sono in *stand-by*, adatta quindi per applicazioni *low power*.

## 1.2 Comunicazione Wireless

Per la trasmissione dei dati si fa uso di **LoRaWAN** (abbreviazione di *Long Range Wide Area Network*), una tecnologia emergente per la realizzazione di LPWAN (*Low Power Wide Area Network*). Al livello fisico dello stack di rete (“LoRa PHY”) fa uso di uno schema di modulazione *M*-aria proprietario a spettro espanso di tipo “Chirp Spread Spectrum”, i cui parametri fondamentali sono la larghezza di banda del segnale  $B$  e lo *spreading factor*  $SF$ . Un simbolo (“chirp”) codifica  $SF$  bit di informazione mediante una portante sinusoidale la cui frequenza aumenta linearmente, partendo da un offset iniziale controllato dal valore del simbolo [2]. Quando la frequenza supera  $+B/2$  viene riportata istantaneamente a  $-B/2$ , mantenendo la banda del segnale costante a  $B$ . Uno spettrogramma del segnale è riportato in Figura 1.2.

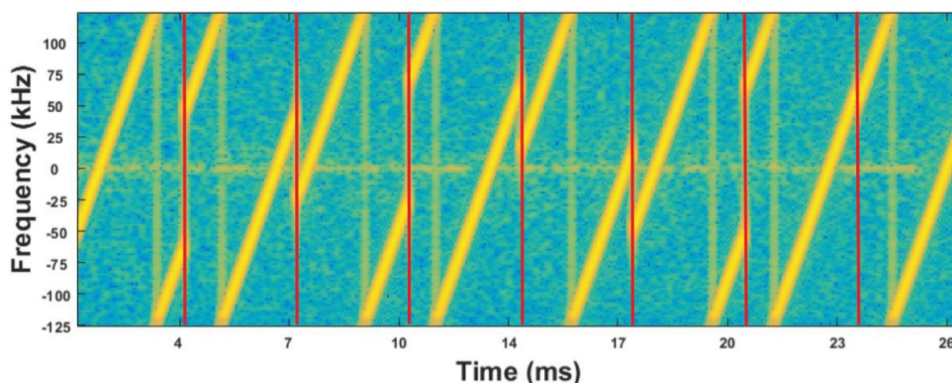


Figura 1.2: Spettrogramma di un segnale LoRa,  $B = 125$  kHz, immagine presa da [2].

<sup>1</sup>*Industrial, Scientific and Medical*, si tratta di bande di frequenze internazionalmente assegnate per comunicazioni non commerciali che possono essere utilizzate senza licenza.



All'aumentare di  $SF$  aumenta però anche il periodo di simbolo  $T_s$  e di conseguenza si riduce il bitrate, come evidenziato in Equazione (1.1) [20] (dove  $CR$  è un parametro legato ai codici per la correzione degli errori). Per il modem utilizzato,  $SF \in [6, 12]$  e  $B$  assume valori da 7.8 kHz a 500 kHz; in Tabella 1.1 sono riportati i valori di  $R_b$  e sensibilità del ricevitore in funzione di  $SF$ [14], evidenziando come la distanza raggiungibile aumenti per valori di  $SF$  più alti, a discapito di una minore velocità di trasferimento.

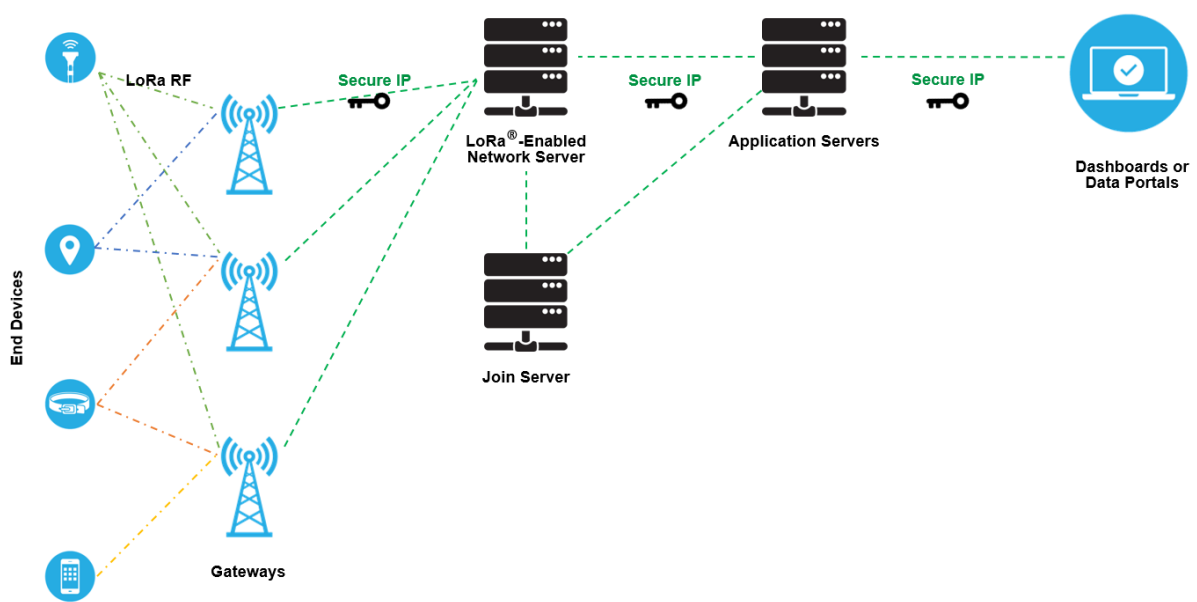
Questa modulazione è adatta a dispositivi *low power* perché l'involuppo è costante, quindi gli amplificatori RF possono lavorare vicino alla saturazione, rendendoli più efficienti a parità di potenza media in trasmissione [20]. È resistente ad interferenza e distorsione *multipath* a causa del lungo periodo di simbolo e il link budget è notevolmente superiore quando comparato ad altre modulazioni per LPWAN, consentendo di stabilire collegamenti fino a 15 km in linea d'aria e 5 km in zone urbane [3].

$$R_b = SF \frac{4}{4 + CR} \frac{B}{2^{SF}} \quad [\text{bit s}^{-1}] , \quad T_s = \frac{2^{SF}}{B} \quad [\text{s}] . \quad (1.1)$$

**Tabella 1.1:** *Bitrate nominale per diverse impostazioni di SF ( $B = 125$  kHz,  $CR = 1$ ) e sensibilità del modem SX1276 [14][3]*

SF	Bit Rate	Distanza indicativa	Time On Air payload 11 byte	Sensibilità
SF10	980 bps	8 km	371 ms	-132 dBm
SF9	1760 bps	6 km	185 ms	-129 dBm
SF8	3125 bps	4 km	103 ms	-126 dBm
SF7	5470 bps	2 km	61 ms	-123 dBm

Con **LoRaWAN**<sup>®</sup> si intende un protocollo a livello MAC introdotto dalla *LoRa Alliance*[3], che definisce classi di dispositivi in base ai consumi e latenza richiesti. Si occupa inoltre di gestire il routing a livello di rete tra i vari componenti (*end device*, *gateway* e *network server*). L'architettura di una rete LoRaWAN è schematizzata in Figura 1.3.



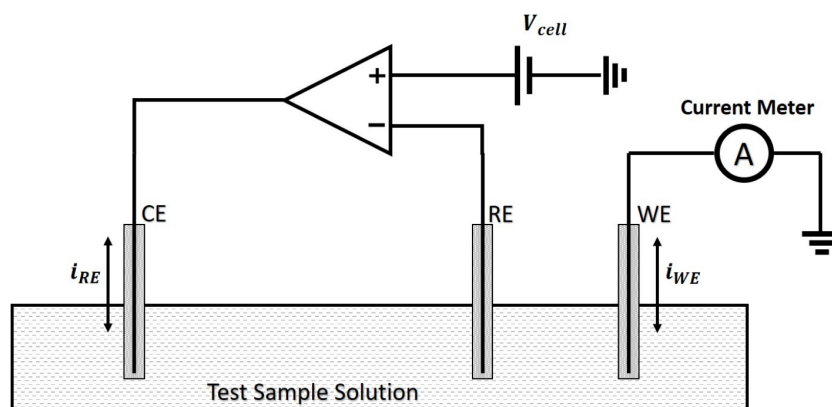
**Figura 1.3:** *Architettura tipica di una rete LoRaWAN, immagine presa da [3].*

# Capitolo 2

## Principio di funzionamento dei sensori

### 2.1 Modello circuitale generale

Un sensore elettrochimico sfrutta una reazione redox [4] che coinvolge la specie ionica da rilevare, in modo da ricavare informazioni sulla sua concentrazione in soluzione mediante misura della differenza di potenziale tra due elettrodi a circuito aperto (tecnica nota come *potenziometria*) oppure della corrente generata dalla reazione (*amperometria*). La struttura generale di un sensore elettrochimico è riportata in Figura 2.1 [4] e si compone di 3 elettrodi: un elettrodo di lavoro (*Working electrode, WE*), uno di riferimento (*Reference electrode, RE*) e un controlettrodo (*Counter electrode, CE*).

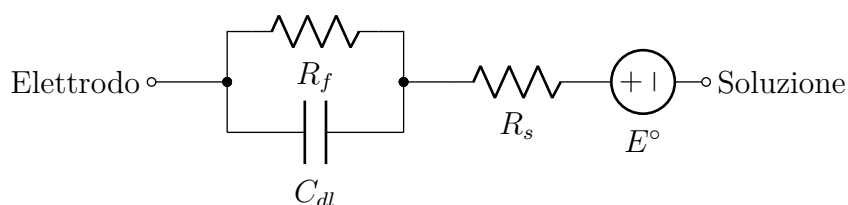


**Figura 2.1:** Struttura di un generico sensore elettrochimico configurato per una misura voltammetrica [4].

Una volta stabilita una differenza di potenziale  $V_{cell}$  tra RE e WE sufficiente per attivare la reazione di interesse inizierà la riduzione/ossidazione della specie sulla superficie del WE, con conseguente generazione di corrente. La reazione complementare avviene sul CE, che chiude il circuito. Il RE non partecipa alla reazione, ma serve a mantenere il potenziale della soluzione ad un valore costante e noto.

Una singola interfaccia elettrodo-elettrolita può essere modellata in prima approssimazione con il circuito in Figura 2.2 [5][4][21], che fungerà da base per la derivazione dei circuiti equivalenti degli altri sensori. Si compone di quattro elementi:

- la resistenza faradica  $R_f$  rappresenta la resistenza dell'interfaccia al passaggio di corrente continua; il suo valore è fortemente dipendente dal metallo e dalla densità di corrente sull'interfaccia [5];
- una capacità  $C_{dl}$  associata al processo di polarizzazione, descritta più in dettaglio nella sezione “Conducibilità Elettrica”;
- la resistenza ohmica dell'elettrolita  $R_s$ ;
- il potenziale di riduzione della semicella  $E^\circ$  [21], che è determinato dalla specifica reazione di ossidoriduzione alla superficie dell'elettrodo e all'attività degli ioni coinvolti.



**Figura 2.2:** Modello equivalente di un'interfaccia elettrodo-elettrolita [5].

## 2.2 Sensore di pH

Il pH di una soluzione ionica è una misura della concentrazione molare di ioni  $H^+$  o  $H_3O^+$  [22] e quindi un'indicazione della sua acidità:

$$pH = -\log_{10}[H^+] . \quad (2.1)$$

Si misura con l'ausilio di un elettrodo a vetro, in cui entrambi il CE e WE sono di tipo “a cloruro di argento”  $Ag|AgCl$  e sono composti di un filo di argento ricoperto da uno strato di cloruro di argento solido, immersi in una soluzione elettrolitica [22]. La reazione di semicella è la seguente:

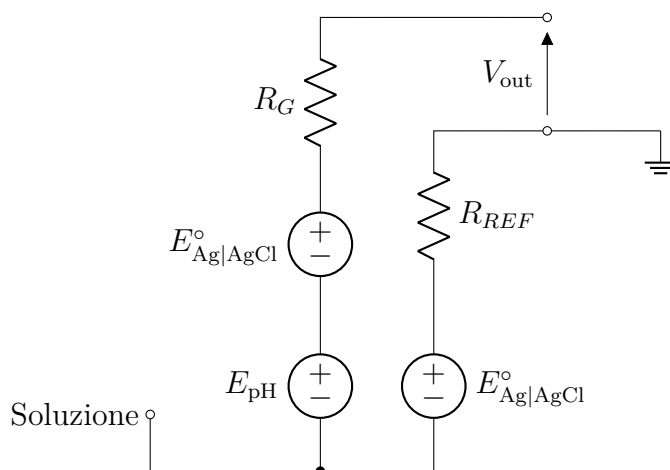


Il sistema di riferimento contiene cloruro di potassio come elettrolita ed è messo a contatto con la soluzione campione tramite una membrana porosa, che permette lo scambio ionico tra le due soluzioni evitando però il miscelamento. In questo modo il suo potenziale standard di ossidoriduzione non è influenzato dalla composizione del misurando e rimane stabile nel tempo. L'elettrodo di misura è racchiuso in un tubo di vetro contenente HCl

a concentrazione nota, che termina in un bulbo dalle pareti molto sottili, a contatto con la soluzione campione. La differenza di concentrazione degli ioni  $H^+$  ai due lati della membrana genera una differenza di potenziale tra i due elettrodi, secondo l'Equazione (2.3), nota come *equazione di Nernst*:

$$E_{pH}(pH, T) = E_0 - \frac{RT \ln 10}{zF} pH \simeq E_0 - (59.159 \text{ mV}) \cdot \frac{T}{298.15 \text{ K}} \cdot pH, \quad (2.3)$$

in cui  $F = 9.648 \times 10^4 \text{ C mol}^{-1}$  è la costante di Faraday,  $R = 8.314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$  la costante dei gas ideali,  $z$  il numero di elettroni coinvolti nella reazione redox (1 in questo caso),  $T$  temperatura assoluta.  $E_0$  è detto *potenziale di asimmetria* e deriva da cadute di tensione su altri componenti del sistema, come la membrana porosa. Il modello circuitale equivalente del sensore è rappresentato in Figura 2.3.



**Figura 2.3:** Modello circuitale equivalente dell'elettrodo a vetro

La resistenza  $R_G$  rappresenta la resistenza equivalente del bulbo di vetro alle basse frequenze; ovviamente lo scambio ionico attraverso questa membrana è estremamente lento, per cui  $R_G$  assume valori molto elevati, di solito nel range  $100 \text{ M}\Omega \div 1 \text{ G}\Omega$ . La membrana porosa della giunzione di riferimento invece permette lo scambio ionico, quindi la sua resistenza equivalente  $R_{REF}$  sarà nettamente minore. Ogni contributo capacitivo è ignorato perché la misura avviene in corrente continua.

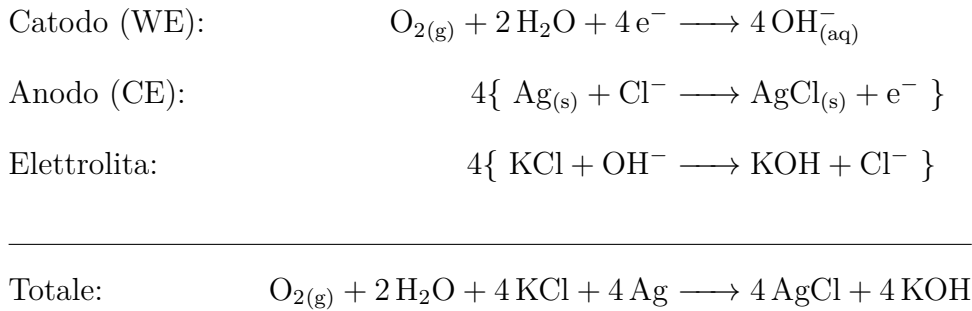
Nel sensore utilizzato [23] il sistema di riferimento contiene elettrolita sotto forma di gel ed è messo a contatto con l'acqua tramite una membrana in PTFE, caratteristiche che lo rendono immune ad inquinanti ed agenti corrosivi ambientali e quindi adatto per l'utilizzo a lungo termine. La resistenza  $R_G$  è specificata come minore di  $200 \text{ M}\Omega$ . Viene fornito un circuito di condizionamento esterno che si occupa di adattare la dinamica di uscita dell'elettrodo a quella di ingresso dell'ADC di  $0 \div 3.3 \text{ V}$ .

## 2.3 Sensore di Ossigeno Disciolto

L'ossigeno disciolto è una misura della concentrazione di ossigeno libero ( $O_2$  in forma gassosa, non legato ad altri elementi) presente nell'acqua, espressa in  $mg L^{-1}$ . Può entrare per diffusione dall'atmosfera oppure essere rilasciato dal processo di fotosintesi da parte della flora acquatica. È un parametro fondamentale in quanto essenziale per la sopravvivenza di tutte le forme di vita acquatiche.

### 2.3.1 Sensore di Clark

La misura è effettuata mediante amperometria, secondo lo schema in Figura 2.1, senza un RE dedicato. Un sensore di Clark [24] o *polarografico* è formato da un metallo nobile (come oro o platino) come WE e da un riferimento  $Ag|AgCl$  come CE, entrambi immersi in un elettrolita inerte ma separati dalla soluzione campione da una membrana permeabile all'ossigeno. L'ossigeno viene quindi consumato nel catodo secondo la reazione:



Questa reazione tuttavia non è spontanea: bisogna infatti polarizzare il sensore con una tensione dell'ordine di  $-0.4 \div -1.2 V$  [24] rispetto al CE. In queste condizioni la velocità di reazione diventa limitata dalla velocità di diffusione dell'ossigeno attraverso la membrana, proporzionale al gradiente di pressione parziale secondo l'Equazione (2.4) [25]. La corrente generata dalla reazione<sup>1</sup>, rappresentata in Figura 2.4 in funzione della tensione di polarizzazione, raggiunge quindi un *plateau* e si stabilizza a [24]:

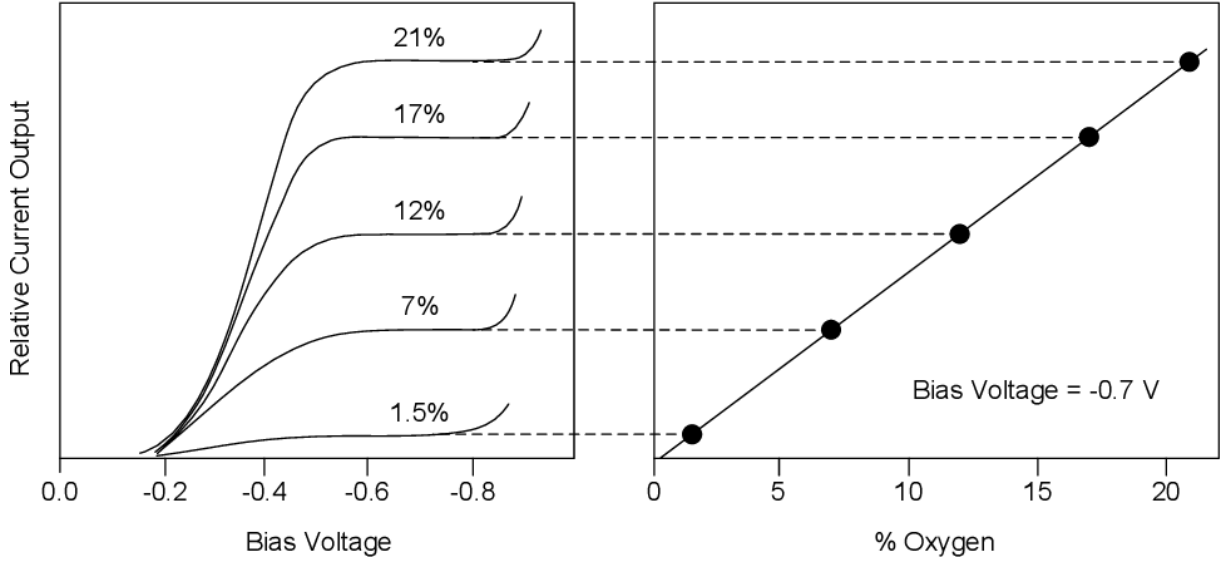
$$J_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{d} \Delta p_{O_2} \simeq \frac{P_{O_2}}{d} p_{O_2, sol} \quad [mol m^{-2} s^{-1}] , \quad (2.4)$$

$$I_D = zFAJ_{O_2} = \frac{4FAP_{O_2}}{d} p_{O_2, sol} \quad [A] , \quad (2.5)$$

con  $J_{O_2}$  flusso molare,  $p_{O_2, sol}$  pressione parziale dell'ossigeno in soluzione e  $P_{O_2}$  permeabilità,  $d$  spessore ed  $A$  area della membrana. Si può affermare anche che in un sensore di questo tipo la corrente è proporzionale alla *percentuale di saturazione* %DO dell'ossigeno

---

<sup>1</sup>Valori di correnti tipici per questo sensore sono circa  $2 \mu A$  [24].



**Figura 2.4:** Relazione tensione-corrente per un sensore polarografico in funzione della concentrazione di ossigeno, immagine presa da [6].

in acqua: il valore di  $p_{O_2}$  è infatti superiormente limitato dalla pressione parziale dell'ossigeno in aria, che vale circa  $0.2095 \cdot p_{\text{atm}}^2$ . Misurando quindi la corrente in condizioni di saturazione  $I_{\text{sat}}^3$ , %DO si ottiene come in Equazione (2.6):

$$\%DO = \frac{i_{O_2}}{I_{\text{sat}}(T, S)} = \frac{c_{O_2}}{C_{\text{sat}}(T, S)} \iff c_{O_2} = \%DO \cdot C_{\text{sat}}(T, S). \quad (2.6)$$

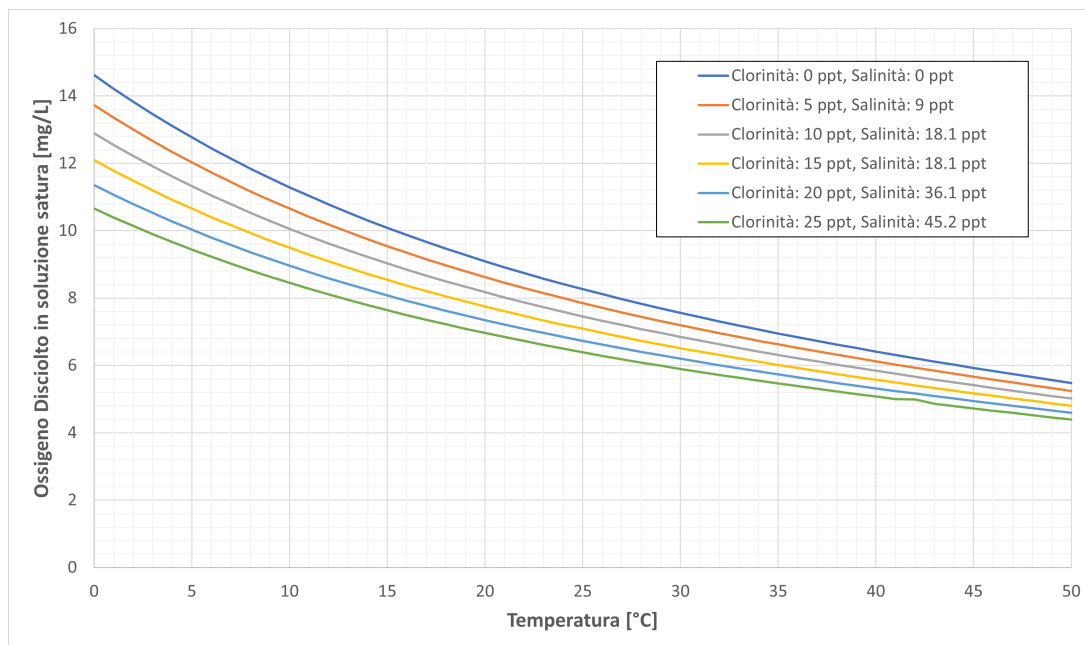
La concentrazione  $c_{O_2}$  in  $\text{mg L}^{-1}$  è proporzionale alla pressione parziale  $p_{O_2}$  secondo la legge di Henry, quindi si ottiene da %DO come in Equazione (2.6), dove  $C_{\text{sat}}$  è la concentrazione di ossigeno in una soluzione satura. Il suo andamento in funzione della temperatura  $T$  e salinità  $S$  è rappresentato nel grafico in Figura 2.5. Infine è importante notare che, poiché la reazione consuma l'ossigeno disciolto nel campione, è importante assicurare un flusso continuo di nuova soluzione verso il sensore. In caso contrario, si potrebbero osservare letture inferiori a quelle reali [24].

### 2.3.2 Sensore galvanico

Per questo prototipo viene impiegato un sensore di tipo *galvanico*, prodotto da DFRobot [8], che funziona secondo lo stesso principio della sonda di Clark ma non necessita della tensione di polarizzazione esterna [24]. L'anodo è infatti costituito da un cilindro di piombo, che ha un potenziale di ossidoriduzione abbastanza differente da quello del catodo da generare autonomamente la tensione di eccitazione quando inserito nell'elettrolita.

<sup>2</sup>La lettura di questo sensore è quindi debolmente influenzata dalla pressione atmosferica e quindi dall'altitudine [7]. In questo caso il sensore opera sempre al livello del mare quindi non è necessario tenere conto di questo effetto.

<sup>3</sup>Questo valore può essere ottenuto esponendo la sonda all'aria oppure con una soluzione fortemente agitata in modo da saturare la concentrazione di ossigeno.



**Figura 2.5:** Concentrazione dell'ossigeno disciolto in soluzione satura in funzione di temperatura e salinità dell'acqua (dati presi da [7]).

Ha quindi lo svantaggio che l'anodo si consuma lentamente *anche quando la sonda non è in uso*, limitandone la vita utile ad un anno circa; tuttavia presenta un tempo di risposta molto più veloce (risposta al 98 % in 90 s a 25 °C). Un circuito di condizionamento esterno si occupa di effettuare la conversione corrente-tensione e adattare la dinamica dell'uscita a  $0 \div 3 \text{ V}$  per concentrazioni di  $0 \div 20 \text{ mg L}^{-1}$ .



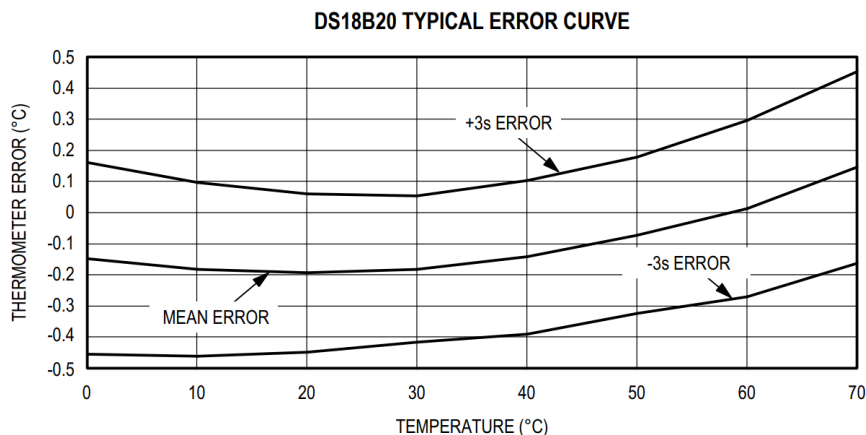
**Figura 2.6:** Sensore di Ossigeno Disciolto utilizzato per il prototipo [8].

## 2.4 Sensore di Temperatura

La misura della temperatura è effettuata tramite una sonda impermeabile prodotta nuovamente da DFRobot, che contiene al suo interno un termometro digitale di tipo DS18B20 [9]



di Maxim Integrated. È in grado di leggere temperature da  $-55^{\circ}\text{C}$  a  $+125^{\circ}\text{C}$  con un'incertezza massima di  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ; l'incertezza si riduce a  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  per temperature nell'intervallo  $0^{\circ}\text{C} \div +70^{\circ}\text{C}$ , valori più compatibili con la temperatura attesa dell'acqua di mare, come evidenziato in Figura 2.7.



**Figura 2.7:** Accuratezza del sensore DS18B20 (curva tipica e  $\pm 3\sigma$ ) [9].

La risoluzione di lettura è selezionabile da 9 a 12 bit, a discapito del tempo di conversione dell'ADC integrata, che aumenta sensibilmente fino ad un massimo di 750 ms per una lettura a 12 bit, con risoluzione di  $62.5\text{ m}^{\circ}\text{C}$  [9]. Il sensore è adatto per un utilizzo in applicazioni *low-power* ed alimentate a batteria in quanto presenta una corrente a riposo massima di  $1\ \mu\text{A}$ , mentre la corrente durante la conversione può arrivare a  $1.5\ \text{mA}$ . Il risultato è riportato in appositi registri interni, leggibili tramite il protocollo proprietario 1-Wire, sviluppato originariamente da Dallas Semiconductors, che consente a più dispositivi di comunicare in modo *half-duplex* utilizzando solo una linea di dati bidirezionale, con una velocità di trasferimento massima di  $16.3\ \text{kbit/s}$ .

## 2.5 Sensore di Conducibilità Elettrica

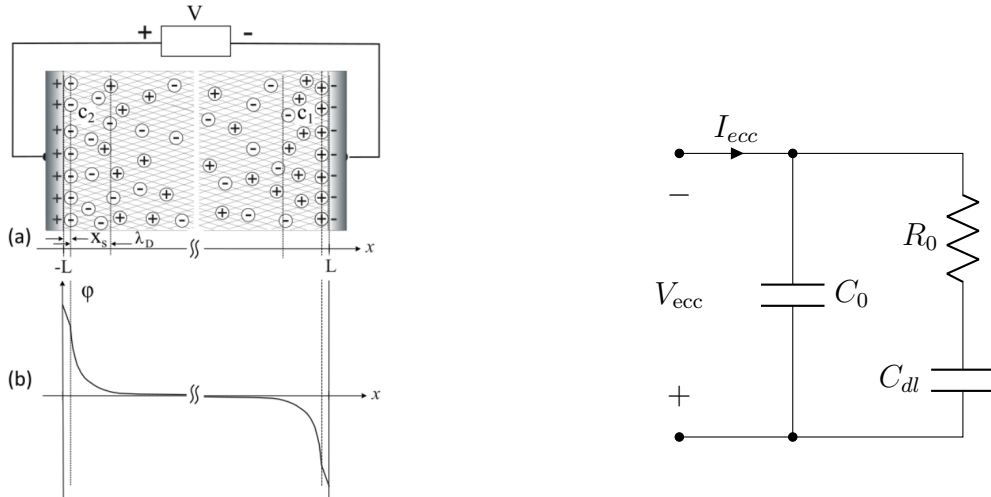
Alle basse frequenze ( $f \ll 10^6\ \text{Hz}$ ) e per bassi valori di campo elettrico, una soluzione ionica presenta un comportamento ohmico in risposta ad una tensione di eccitazione applicata tra due punti della soluzione [10]. Un volume di liquido racchiuso tra due elettrodi uguali di area  $A$  e posti a distanza  $d$  presenta quindi un'ammettenza la cui parte reale è modellabile dalla seconda legge di Ohm (Equazione (2.7)), mentre il contributo immaginario è dato dalla capacità tra i due elettrodi; questa struttura rappresenta la più semplice *cella di conduttività* a due terminali.

$$Y(j\omega) = G_0 + j\omega C_0 \quad \text{con} \quad G_0 = \frac{\kappa}{K}, \quad C_0 = \frac{\varepsilon}{K}, \quad K = \frac{d}{A}. \quad (2.7)$$

L'impedenza misurata dipende però da molti fattori, tra cui le specie ioniche presenti, la loro concentrazione, il tipo di solvente e la sua temperatura, nonché dalla costruzione

fisica dell'apparato di misura e dalla frequenza di eccitazione [10]. La *conducibilità elettrica* specifica  $\kappa$  si può calcolare da una misura a bassa frequenza introducendo un fattore  $K$ , denominato *costante di cella*, che tiene conto delle dimensioni fisiche della cella di misura.

Non si può tuttavia utilizzare una tensione di eccitazione continua a causa del fenomeno della *polarizzazione* dell'elettrodo. A seguito dell'applicazione di una differenza di potenziale, gli ioni in soluzione migrano verso l'elettrodo di carica opposta e, se la tensione è abbastanza bassa da non attivare reazioni chimiche, stazionano sulla sua superficie, formando una regione di liquido carica chiamata *Electrical Double Layer* (EDL) [10]. Il potenziale effettivo  $\varphi(x)$  applicato alla soluzione, rappresentato in Figura 2.8b in funzione della distanza  $x$  dagli elettrodi, si va quindi a ridurre progressivamente fino all'azzeramento della corrente; questo effetto è modellato da una capacità in serie  $C_{dl} \gg C_0$ , dell'ordine di  $10 \div 40 \mu\text{F cm}^{-2}$  [4]. Il modello elettrico completo è rappresentato in Figura 2.9. La tensione di eccitazione deve essere quindi *alternata a media nulla*, di frequenza tale che  $|Z_{C_{dl}}| \ll R_0 \ll |Z_{C_0}|$ .



**Figura 2.8:** (a) Schema rappresentativo di una cella di conduttività a due terminali, con evidenziati gli strati ionici. (b) Potenziale  $\varphi(x)$  della soluzione in funzione della posizione  $x$  lungo la cella [10]

**Figura 2.9:** Modello circuitale equivalente della struttura in Figura 2.8

Come per qualsiasi conduttore ohmico, l'impedenza misurata è funzione della temperatura, come evidenziato nell'Equazione (2.8). La costante  $\alpha$  è in generale funzione della concentrazione ionica, ma si assume  $\alpha = +2\% \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  per soluzioni di conduttività media [10].

$$\kappa(T) = \kappa_{25^\circ\text{C}} [1 + \alpha(T - 25^\circ\text{C})] . \quad (2.8)$$

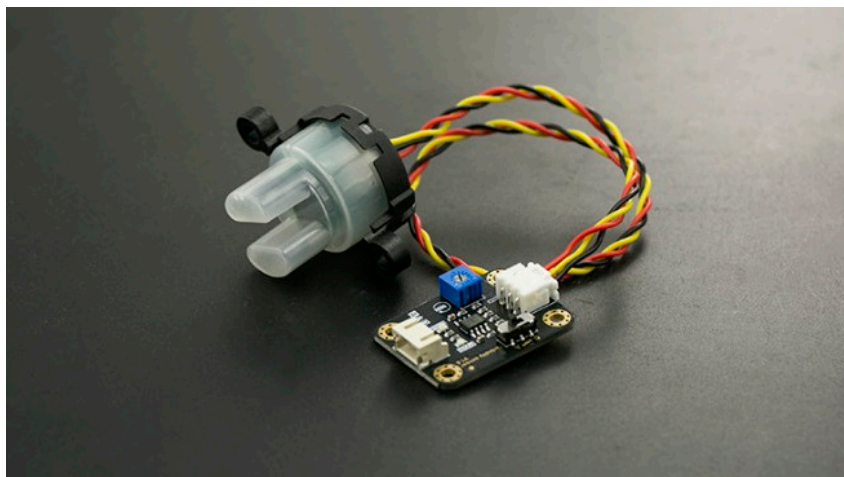
Questa misura può essere correlata con altri parametri, come la concentrazione di solidi disciolti (*Total Dissolved Solids*, TDS) è la salinità dell'acqua. In prima approssimazione vale la relazione  $\text{TDS} [\text{mg L}^{-1}] = k \times \text{EC} [\mu\text{S cm}^{-1}]$  con  $k = 0.65$ , ma il suo valore aumenta all'aumentare della conduttività [26].

La sonda utilizzata [27] eccita la cella con una tensione ad onda quadra bipolare di frequenza 30 kHz, applicata ad uno degli elettrodi, e la corrente viene misurata tramite un amplificatore a transimpedenza dall'altro elettrodo; la tensione risultante è rettificata e amplificata in modo che rientri nella dinamica  $0 \div 3.2 \text{ V}$  per valori di conduttanza di  $10 \div 100 \text{ mS cm}^{-1}$ . La sonda presenta elettrodi al platino e la costante di cella è misurata in fase di produzione a  $K = 9.81$ .

## 2.6 Sensore di Torbidità

Utilizzando i sensori precedenti è possibile determinare una gran varietà di parametri chimici dell'acqua, ma per una descrizione completa è opportuno misurare anche la concentrazione di materiale in sospensione, formato da particelle di tipo minerale o organico le cui dimensioni possono andare dai nanometri ai millimetri. La torbidità è un parametro determinato dalle proprietà *ottiche* della soluzione, che in generale non dà informazioni circa la concentrazione di solidi in sospensione in  $\text{mg L}^{-1}$  [28] (parametro noto come *Total Suspended Solids* o TSS).

La misura standard della torbidità è effettuata mediante *nefelometria* [28], ovvero con un rivelatore posizionato a  $90^\circ$  rispetto ad una sorgente di luce, in modo da misurare la percentuale di luce diffusa dalla soluzione; a questo metodo sono associate le unità di misura NTU (*Nephelometric Turbidity Unit*) e FNU (*Formazin Nephelometric Unit*).



**Figura 2.10:** Sensore di torbidità utilizzato per il prototipo [11].

Il sensore utilizzato [11] misura invece l'attenuazione subita da un fascio di luce monocromatica infrarossa attraverso la soluzione, dovuta ad assorbimento o diffusione da parte delle particelle. L'unità di misura standard è FAU (*Formazin Attenuation Unit*), tuttavia si nota che in generale non è possibile effettuare conversioni tra le unità di misura o correlare le letture con parametri fisici, chimici o biologici, perché dipendono dal fenomeno prevalente (assorbimento, riflessione o diffrazione), nonché dalla dimensione delle particelle, colore della soluzione, spettro della luce incidente, tipo di rivelatore ecc. Queste misure

sono quindi qualitative e vanno contestualizzate all'ambiente specifico, in cui di solito è importante monitorare le *variazioni* di torbidità piuttosto che il valore assoluto.

Il sensore utilizza un fototransistor come rilevatore, la cui corrente di collettore  $I_C$  è proporzionale all'intensità della radiazione incidente sulla sua superficie attiva. All'emettitore è collegata una resistenza  $R_E$  la cui caduta di tensione rappresenta l'uscita del trasduttore, che vale nominalmente  $4.1 \pm 0.3$  V in una soluzione  $\text{NTU} < 0.5$  [11].

# Capitolo 3

## Design e realizzazione del nodo

### 3.1 Problematiche osservate

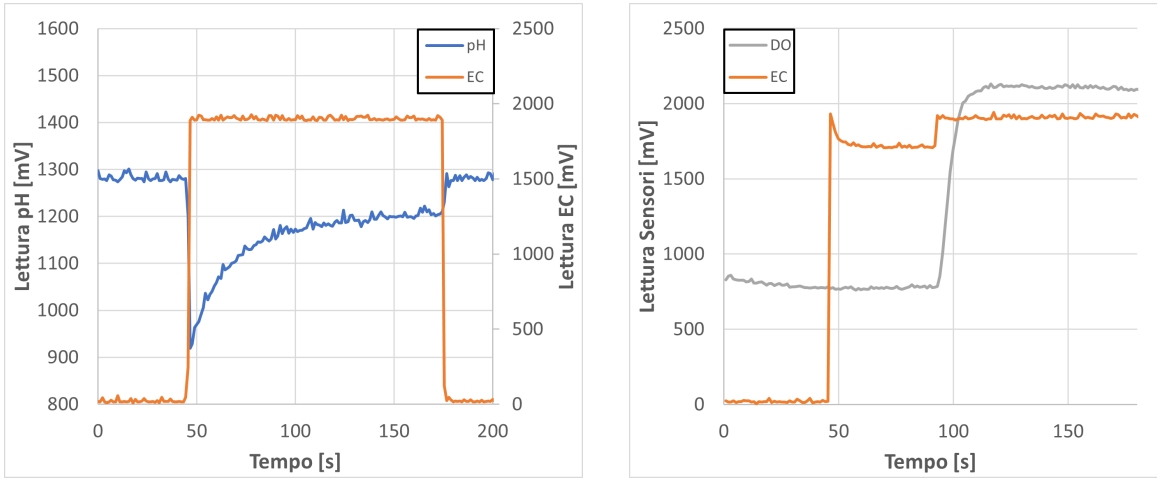
Durante un primo test su breadboard del sistema completo si osservano alcune interferenze sulle letture dei sensori, in particolar modo di quelli elettrochimici. I sensori sono inseriti in una soluzione di salinità comparabile all'acqua di mare e le tensioni in uscita dai circuiti di condizionamento vengono lette ciclicamente e inviate via connessione seriale. Non vengono effettuate ulteriori elaborazioni. L'ADC è impostato per effettuare letture a 12 bit, con guadagno unitario e riferimento di tensione  $V_{REF} = +3.3\text{ V}$ . Si prende come riferimento la lettura del sensore di pH, in quanto risulta il più suscettibile ad interferenze di tipo elettromagnetico ed elettrostatico. Si osservano principalmente due fenomeni:

- quando il modulo GPS è alimentato, si osserva un offset DC pari a circa  $+38\text{ mV}$  (circa  $-0.64$  unità di pH a  $25^\circ\text{C}$ ) all'uscita del circuito di condizionamento del pH, nonché rumore sull'alimentazione;
- quando almeno due dei tre sensori elettrochimici (pH, EC e DO) sono immersi nell'acqua, si osservano deviazioni importanti delle letture rispetto a quando sono inseriti singolarmente. Questi offset risultano stabili in un periodo di osservazione di 5 minuti, e nuovamente il sensore di pH è il più influenzato, arrivando a saturare quando è inserita la sonda DO. A titolo di esempio, nelle Figure 3.1a e 3.1b si riportano le interazioni tra alcuni sensori, osservando come le letture ritornino ai valori originali quando il sensore interferente è rimosso.

#### 3.1.1 Interferenza con il modulo GPS

Il modulo GPS è il singolo maggior consumatore di potenza in tutto il sistema. L'assorbimento di corrente è specificato a  $30\text{ mA}$  a  $5\text{ V}$  [29], ma si misurano  $51\text{ mA}$  a  $3.3\text{ V}$  a causa della presenza di ulteriori componenti esterni (memoria Flash, indicatori a LED).

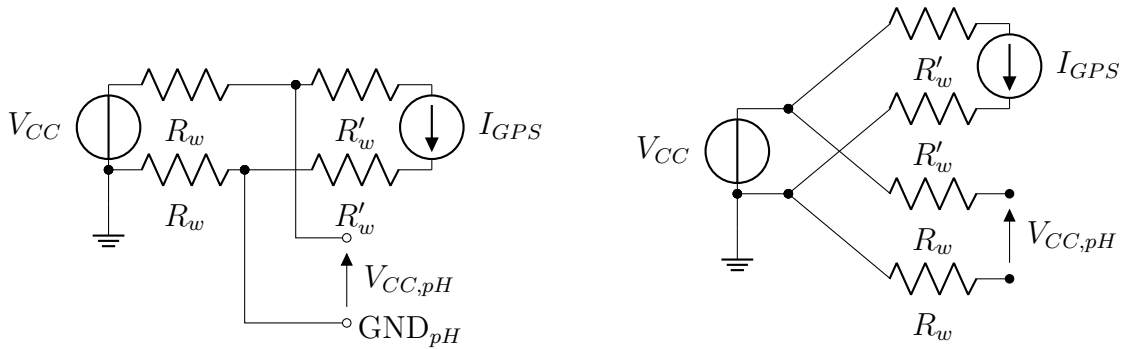
L'interferenza osservata deriva dal collegamento improprio del modulo, esacerbato dai contatti su breadboard poco affidabili. Indicando con  $R_w$  e  $R'_w$  le resistenze dei percorsi



(a) Risposta del sensore di pH (blu) all'inserimento e rimozione della sonda EC (arancio) (b) Inserimento del sensore di EC (arancio) e successiva rimozione della sonda DO (grigio)

**Figura 3.1:** Interazione tra alcune coppie di sensori.

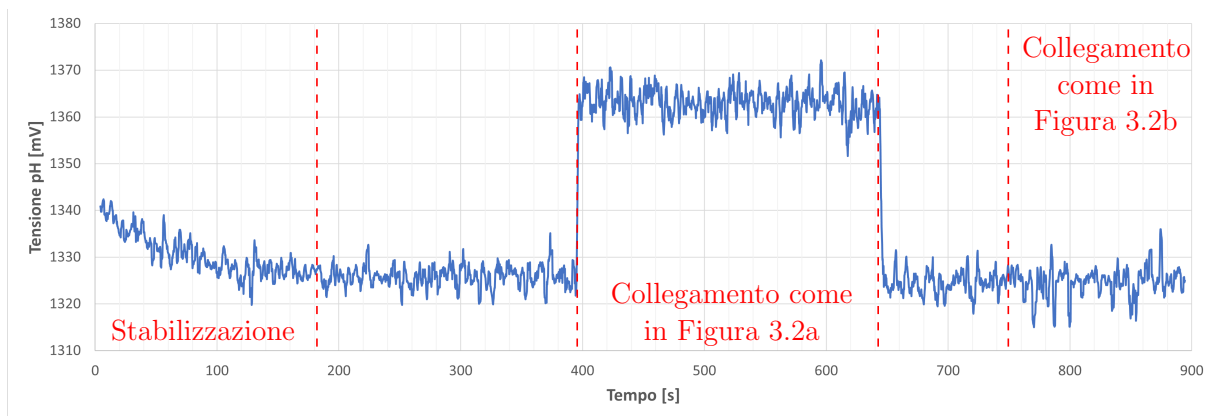
di alimentazione rispettivamente del sensore di pH e modulo GPS, la Figura 3.2a rappresenta la situazione in cui il GPS è collegato *a valle* del sensore, quindi la corrente  $I_{GPS}$  influenza la tensione di alimentazione  $V_{CC,pH} = V_{CC} - 2R_w I_{GPS}$  e il suo potenziale di massa  $V_{GND,pH} = R_w I_{GPS}$ . Il secondo in particolare è anche il valore dell'offset osservato sulle letture dell'ADC, che ha riferimento a  $V_{GND} = 0V$ . Inoltre ogni rumore presente sulla corrente  $I_{GPS}$  verrà riportato sulla lettura del sensore.



(a) Modello del collegamento incorretto. (b) Collegamento dell'alimentazione "a stella".

**Figura 3.2:** Schemi di collegamento dell'alimentazione per il modulo GPS.

Per risolvere il problema si utilizza uno schema di collegamento dell'alimentazione *a stella* come in Figura 3.2b, in cui i cavi di alimentazione sono connessi il più vicino possibile al generatore  $V_{CC}$ , in modo da ridurre al minimo la resistenza del tratto in comune. La Figura 3.3 evidenzia l'efficacia di questo metodo: dopo il tempo necessario alla stabilizzazione del sensore, nella finestra  $[t_1 = 400s, t_2 = 645s]$  viene collegato il modulo GPS secondo la configurazione in Figura 3.2a, con deviazione chiaramente visibile. A  $t_3 = 750s$  viene nuovamente collegato ma secondo la configurazione in Figura 3.2b, con conseguente eliminazione del problema.

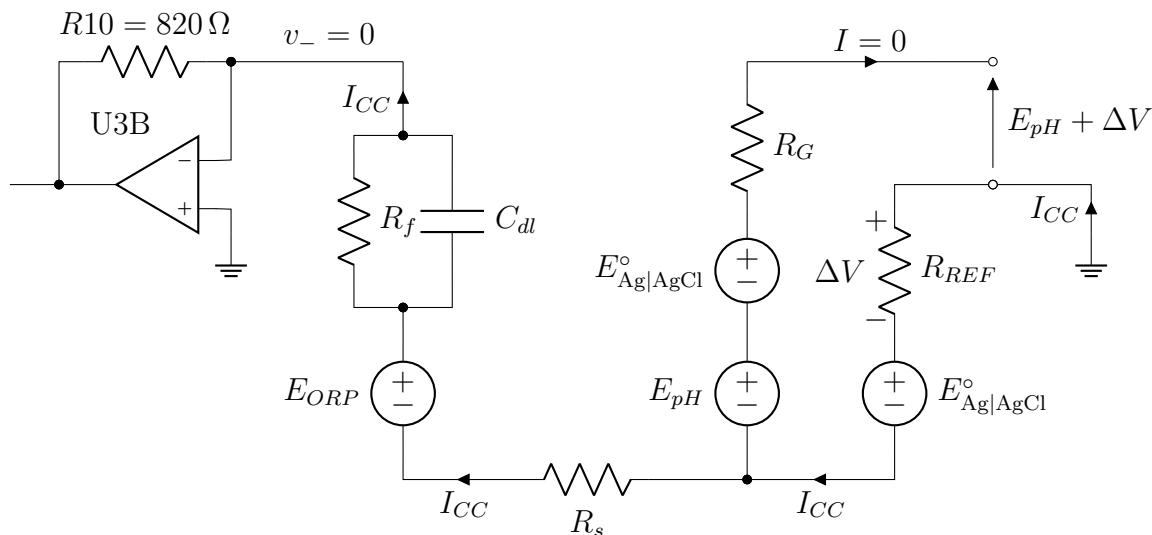


**Figura 3.3:** Misura dell'interferenza dovuta al modulo GPS (segnale filtrato con filtro a media mobile  $N = 8$ ).

### 3.1.2 Interferenza tra sensori elettrochimici

Nonostante la trattazione dettagliata del meccanismo di interferenza non sia lo scopo della tesi, è importante capire almeno l'origine del fenomeno per poter trovare una soluzione.

Si prendono in considerazione ad esempio il sensore di pH ed EC inseriti nella stessa soluzione. Il modello elettrico equivalente, ottenuto combinando i rispettivi modelli<sup>1</sup> (si vedano le Figure 2.3 e 2.2), è rappresentato nella Figura 3.4<sup>2</sup>. È importante notare che entrambi i sensori presentano un collegamento a bassa impedenza con la soluzione attraverso i rispettivi elettrodi di riferimento.



**Figura 3.4:** Modello equivalente di due sensori nella stessa soluzione.

Misurando la tensione a circuito aperto tra di essi si legge circa 360 mV: questa situazione è in generale nota come “**ground loop**” poiché, quando entrambi vengono con-

<sup>1</sup>Si modella solo l'elettrodo EC mantenuto al potenziale di massa da U3B.

<sup>2</sup>I componenti R10 e U3B fanno parte del circuito di condizionamento del sensore EC. Lo schema completo è reperibile dal sito del costruttore [27], nella sezione “Product Wiki”.

nessi al potenziale di massa dai rispettivi circuiti di condizionamento, si ha il passaggio di una corrente  $I_{CC}$ . Questa corrente passa necessariamente attraverso la resistenza equivalente  $R_{REF}$  del sistema di riferimento Ag|AgCl, causando una caduta di tensione  $\Delta V = R_{REF} \cdot I_{CC}$ . Tale caduta si somma alla tensione  $E_{pH}$  generata dal sensore, spiegando così la deviazione osservata.

Questo modello spiega anche l'andamento osservato in Figura 3.1a, in cui si vede prima il transitorio di carica di  $C_{dl}$  e poi l'offset  $\Delta V$  rispetto al valore originale, che scompare istantaneamente quando l'elettrodo EC viene rimosso. Si ripete la prova misurando la corrente  $I_{CC}$  con un multimetro; questa raggiunge un massimo di  $37.8 \mu\text{A}$  durante il transitorio, per poi stabilizzarsi a  $1.4 \mu\text{A}$ .

Inoltre il sistema di un elettrodo al platino e un riferimento Ag|AgCl è comunemente usato per la misura di un ulteriore parametro importante della qualità dell'acqua, denominato *Oxidation-Reduction Potential* (ORP) della soluzione [30]. Il platino funge da sito inerte su cui le varie specie chimiche si possono ossidare o ridurre, generando la differenza di potenziale osservata ai capi degli elettrodi. Il valore ORP riflette la capacità dell'acqua di ossidare (se positivo<sup>3</sup>) o ridurre altre sostanze chimiche, ma non è in generale stabile o deducibile da altri parametri, essendo influenzato dalla concentrazione delle diverse specie ioniche (motivo per cui esistono sensori appositi). Ne consegue il fatto che *non è possibile eliminare l'interferenza mediante calibrazione*.

## 3.2 Soluzioni per l'isolamento galvanico

Dall'analisi precedente segue che una possibile soluzione al problema consiste nel leggere i sensori tramite circuiti *elettricamente isolati*, ovvero senza un collegamento elettrico diretto in corrente continua tra i due, in modo da interrompere il *ground loop*. Esistono ovviamente svariate soluzioni commerciali, nella forma di moduli che integrano un convertitore DCDC con uscita isolata e un isolatore digitale o analogico per il segnale dati. Le informazioni principali di alcuni di essi sono riportati in Tabella 3.1.

Esistono inoltre esistono circuiti integrati, principalmente della linea *isoPower* di Analog Devices [15], che offrono una soluzione di isolamento di potenza e segnale in forma interamente integrata, grazie all'accoppiamento magnetico di trasformatori realizzati direttamente *in-chip*. Sono riportati alcuni valori di riferimento in Tabella 3.2, comuni a molti dispositivi della linea.

Queste soluzioni non sono tuttavia accettabili a causa dell'elevato consumo di potenza anche a riposo, incompatibile con un'alimentazione a batteria. Inoltre gli isolatori digitali richiederebbero la presenza di un ADC dedicato al lato sensore, che complica ulteriormente e aumenta il costo del circuito.

---

<sup>3</sup>L'ORP è definito come la tensione della sola semicella dell'elettrodo al platino. Alla lettura del sensore va quindi sottratto il potenziale del riferimento Ag|AgCl, costante a  $222.33 \text{ mV}$  [30].



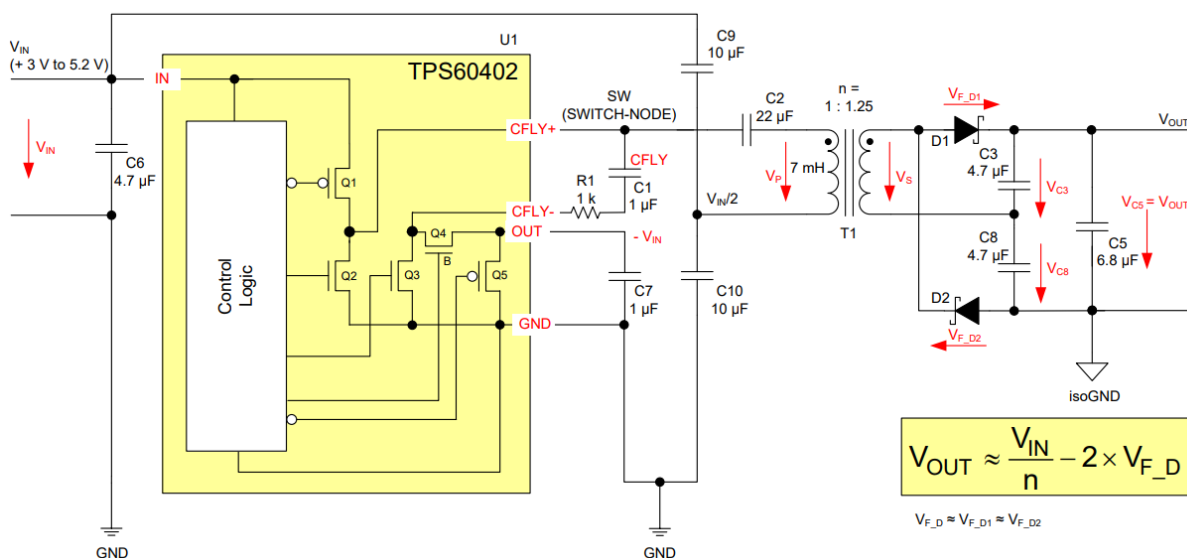
**Tabella 3.1:** Moduli di isolamento commerciali

Modulo	Protocolli	Costo	$I_{CQ}$	$I_{SLEEP}$
Atlas Scientific[31]	UART, I <sup>2</sup> C	\$23.10	15 mA	3.8 mA
Atlas Scientific[32]	Analogico	\$24.05	18.7 mA	—
DFRobot[33]	Analogico	\$17.90	75 mA	—

**Tabella 3.2:** Soluzioni integrate per l'isolamento (i dati sono presi dai datasheet riportati in [15])

Codice	Protocolli	Costo Unitario	$I_{CQ}$ No Load	$I_{SLEEP}$	Efficienza di picco
ADuM5241	Digitale	\$3.63	104 mA	2.7 mA	—
ADuM5401	SPI	\$6.14	14 mA	—	33%
ADuM6401	SPI	\$7.05	8 mA	—	33%
ADuM6423A	SPI	\$6.61	14 mA	—	34%
LTM2886	I <sup>2</sup> C	\$14.42	25 mA	10 $\mu$ A	61%

Per ridurre i consumi si potrebbe pensare di costruire un convertitore DCDC “ad hoc”, progettato per assorbire la minima corrente a riposo possibile, avere almeno due uscite isolate e utilizzare il minimo numero di componenti esterni possibile. A questo scopo si segnala un progetto di riferimento di Texas Instruments [12], che propone una soluzione di isolamento galvanico con un convertitore half-bridge non regolato basato sul circuito integrato TPS60402, il cui schema è riportato in Figura 3.5. Il design raggiunge un'efficienza di picco di 82 % per correnti in uscita fino a 10 mA.



**Figura 3.5:** Schema di principio del design TIDA-00349 di Texas Instruments [12].

Soluzioni di questo tipo, sebbene compatibili con un'alimentazione a batteria, sono però notevolmente più complesse da implementare e testare. Inoltre devono essere associate a circuiti di isolamento del segnale analogico che aggiungono ulteriore costo, complessità e consumo di potenza.

### 3.3 Sequenziamento delle letture dei sensori

Una soluzione alternativa consiste nel sequenziamento delle letture dei sensori mediante l'utilizzo di relè elettromeccanici. Non necessitando di frequenze di campionamento particolarmente elevate o di dover leggere simultaneamente i valori da tutti i sensori, si può leggere un solo parametro alla volta, fisicamente scollegando gli altri sensori e i loro circuiti di conversione in modo da interrompere tutti i possibili *ground loop*. Ovviamente non si possono usare i “normali” relè monostabili, a causa dell'elevato consumo della bobina (attorno ai 200 mW). Esiste tuttavia una classe di relè chiamati *latching* o *bistabili*: una volta energizzata la bobina per qualche millisecondo, sono in grado di mantenere lo stato anche se questa viene diseccitata. Questa soluzione presenta molti vantaggi:

- zero consumo di potenza a riposo: la bobina utilizza una certa *energia* in fase di commutazione, ma una volta concluso il transitorio il collegamento viene mantenuto per via meccanica, per cui questa soluzione consuma la minore quantità di energia in assoluto;
- minimo numero di componenti esterni richiesti: il circuito di controllo (discusso più avanti) può potenzialmente essere composto solamente da due MOSFET e una capacità in serie con l'avvolgimento, riducendo il costo e la complessità di implementazione. Inoltre i contatti si comportano da interruttori ideali: possono quindi gestire sia collegamenti di potenza che di segnale.

Ovviamente esistono aspetti critici, tra cui:

- affidabilità dei contatti: trattandosi di contatti meccanici soggetti a molte commutazioni ( $> 10^5$ ), sono suscettibili ad una serie di fenomeni quali corrosione, ossidazione (specialmente in ambienti umidi), degradazione meccanica, deposito di film isolanti sulla superficie ecc., che possono potenzialmente ridurre la vita del contatto;
- mancanza di *wetting current*: perché un contatto sia autopulente è necessario che sia attraversato da una minima corrente in modo da rimuovere lo strato di ossido e stabilire una connessione robusta [34].

Si nota che per garantire l'interruzione completa di ogni *ground loop* è necessario interrompere ogni collegamento con i sensori non in uso. Ogni circuito espone tre collegamenti:  $V_{CC}$ , massa e il segnale analogico in uscita. Test condotti sul prototipo precedente [17] hanno evidenziato che anche la sola presenza del collegamento del segnale possa rappresentare un percorso per le correnti di *ground loop* verso massa, probabilmente a causa dell'attivazione dei diodi di protezione interni al microcontrollore.

#### 3.3.1 Scelta del tipo di relè

Sono molti gli aspetti da considerare in fase di scelta del relè. I più importanti sono elencati come segue.

**Classe:** il relè deve appartenere alla classe dei “relè di segnale” o “relè telecom”, progettati per operare nella condizione CC0 definita nello standard IEC 61810 [35], ovvero quando tensione e corrente attraverso il contatto sono inferiori rispettivamente a 30 mV e 10 mA.

**Struttura e materiale dei contatti:** è desiderabile una struttura di tipo “*crossbar twin contact*”, che offre la maggiore affidabilità elettrica e meccanica [35]. Per il materiale di base del contatto esistono diverse opzioni:

- Argento Puro: offre la resistenza di contatto minore, tuttavia hanno la tendenza di formare uno strato isolante di  $\text{Ag}_2\text{S}$  anche a bassissime concentrazioni di zolfo in atmosfera [36]; questo film non viene rimosso a causa della bassa potenza elettrica commutata dal contatto, che non consente la formazione di un arco in grado di vaporizzare l’ossido;
- Argento-Palladio (AgPd): resistente alla solforazione e raccomandato per applicazioni di segnale, in presenza di materiale organico in atmosfera il palladio può catalizzare la formazione di un film polimerico isolante sulla superficie [36];
- Palladio-Rutenio (PdRu): offre la maggiore affidabilità nella resistenza di contatto ed è quindi raccomandato per applicazioni di segnale [35].

I contatti vengono inoltre spesso placcati in oro a protezione del materiale di base.

**Tipologia di avvolgimento:** esistono due tipi di relè bistabili: polarizzati, in cui la stessa bobina esegue le operazioni di set e reset in base alla polarità della tensione applicata, e non polarizzati, che utilizzano due bobine separate non polarizzate [37]. Si decide di usare la struttura polarizzata a causa della maggiore resistenza della bobina (e quindi minore corrente attraverso il circuito di pilotaggio).

**Numero di operazioni:** ad ogni lettura dei parametri dell’acqua sono associate due commutazioni per ogni relé. Ipotizzando un campionamento ogni 10 min [17] e una vita prevista del nodo di 1 anno<sup>4</sup> si trova il numero di commutazioni  $N_{OP}$  previste. Il relè deve garantire questo numero di *operazioni elettriche*<sup>5</sup>, con un margine di almeno un ordine di grandezza.

$$N_{OP} \gg 6 \frac{\text{letture}}{\text{h}} \times 2 \frac{\text{operazioni}}{\text{lettura}} \times 8760 \frac{\text{h}}{\text{anno}} \approx 10^5 \frac{\text{operazioni}}{\text{anno}}. \quad (3.1)$$

**Protezione ambientale:** indica quanto facilmente umidità, inquinanti ed agenti corrosivi presenti in atmosfera riescono a penetrare la struttura del relé, degradando quindi l’affidabilità dei contatti. Lo standard IEC 61810 definisce le varie categorie

<sup>4</sup>La durata operativa è dettata dalla vita utile dei sensori, specialmente di ossigeno disciolto.

<sup>5</sup>Nei datasheet vengono specificati due parametri: *mechanical endurance*, che si riferisce solamente all’usura del meccanismo di commutazione, ed *electrical endurance*, che tiene conto anche della degradazione della resistenza di contatto. Il numero di operazioni elettriche è quindi in generale molto minore di quelle meccaniche, e dipende da tensioni, correnti e tipo di carico coinvolti.

di protezione fino alla sigillatura ermetica [35], che ovviamente è la più desiderabile. Inoltre spesso il volume interno dei relè chiusi è riempito di esafluoruro di zolfo ( $\text{SF}_6$ ), a causa delle sue proprietà dielettriche.

**Resistenza a shock e vibrazioni:** infine è desiderabile che sia specificata una certa resistenza a shock e vibrazioni, per evitare commutazioni spurie dei contatti.

Si decide di utilizzare un relè di tipo IM41TS di AXICOM/TE Connectivity. In Tabella 3.3 sono riportati i parametri di rilievo nel datasheet.

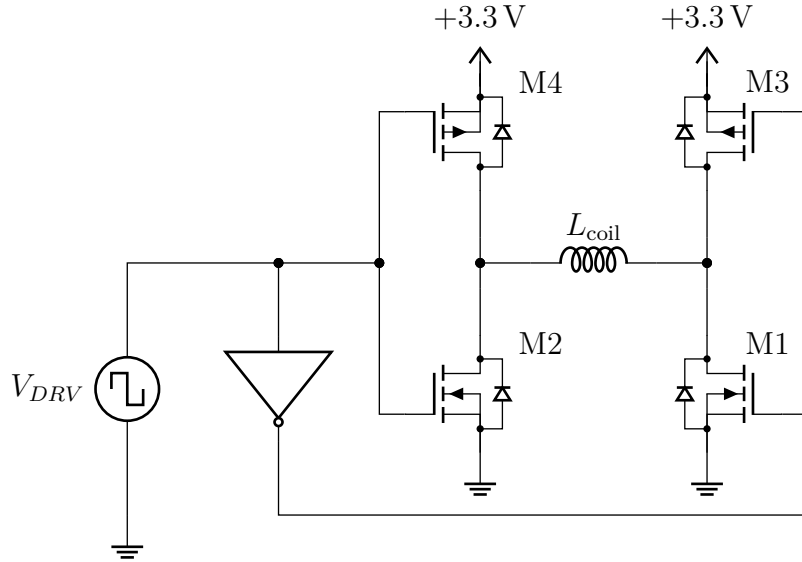
**Tabella 3.3:** Parametri rilevanti del relè utilizzato, ricavati dal datasheet [16]

Parametro	Valore
Max. switching voltage	220 VDC, 250 VAC
Rated current	2 A
Switching power	60 W, 62.5 VA
Contact material	PdRu + Au covered twin contact
Minimum switching voltage	100 $\mu\text{V}$
Initial contact resistance	< 50 m $\Omega$ at 10 mA, 30 mV
Thermoelectric potential	< 10 $\mu\text{V}$
Operate time	typ. 1 ms, max. 3 ms
Electrical endurance	> $2.5 \times 10^6$ operations at $\leq 30$ mV, $\leq 10$ mA
Mechanical endurance	> $10^8$ operations
Coil set voltage	2.25 VDC
Coil reset voltage	-2.25 VDC
Coil resistance	90 $\Omega \pm 10\%$
Ambient temperature	-40 $^\circ\text{C}$ to +85 $^\circ\text{C}$
Environmental protection	IEC 61810: RT V – hermetically sealed
Vibration resistance (functional)	20g, 10 to 500 Hz
Shock resistance (functional)	50g, half-sinus 11 ms

### 3.3.2 Circuito di pilotaggio

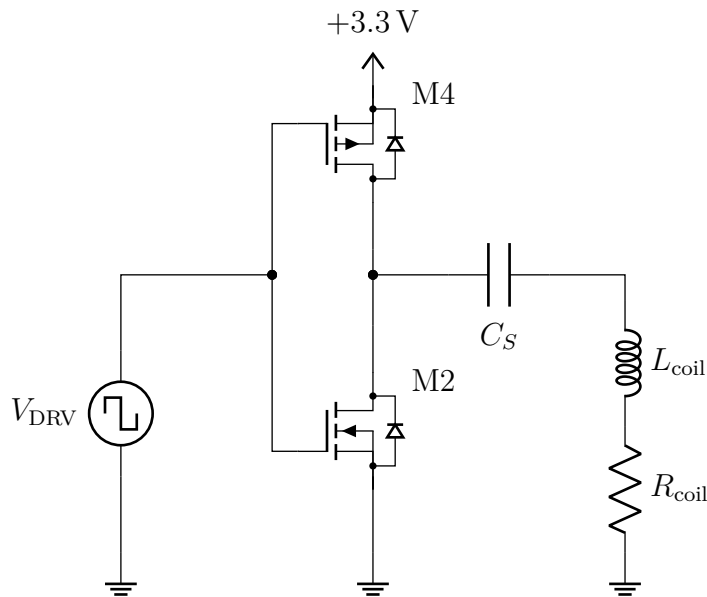
Lo svantaggio principale dei relè polarizzati è la necessità di applicare una tensione di eccitazione della bobina in entrambe le polarità. Una prima soluzione consiste nell'utilizzare una struttura di pilotaggio a punte ad H (Figura 3.6), integrata o realizzata discretamente, che risulta però relativamente dispendiosa in termini di transistor utilizzati o di potenza se implementata in forma integrata (ad esempio il circuito integrato L293D, che contiene 4 mezzi ponti, assorbe nominalmente 2 mA a riposo e 16 mA quando attivo).

Una nota applicativa del produttore [37] suggerisce invece una soluzione migliore: dato che è sufficiente un impulso molto breve di corrente attraverso l'avvolgimento per avere lo scatto del meccanismo bistabile, è possibile utilizzare l'energia immagazzinata in un condensatore  $C_S$ , in serie con la bobina. Il circuito RLC serie risultante visto ai capi dei



**Figura 3.6:** Circuito di principio di un ponte ad H.

transistor, in Figura 3.7 (in cui  $R_{coil}$  e  $L_{coil}$  sono rispettivamente resistenza e induttanza dell'avvolgimento), ha un comportamento di tipo passa-alto (evidenziato dal polo nell'origine della funzione di trasferimento in Equazione (3.2)) quando sottoposto a gradini di tensione da parte del mezzo ponte M2-M4.



**Figura 3.7:** Driver capacitivo a mezzo ponte.

$$Z_{RLC}(s) = \frac{L}{s} (s^2 + \omega_n Q^{-1} s + \omega_n^2) \quad \text{con} \quad Q = \frac{1}{R_{coil}} \sqrt{\frac{L_{coil}}{C_S}}, \quad \omega_n^2 = \frac{1}{L_{coil} C_S} . \quad (3.2)$$

Il valore di  $C_S$  deve essere tale da non causare transitori oscillatori della corrente, o in altre parole il circuito risonante deve essere ampiamente sovrasmorzato. Il primo limite

inferiore del valore di  $C_S$  si ricava quindi con l'Equazione (3.3), imponendo  $Q < 0.5$ .

$$Q < \frac{1}{2} \quad \Longleftrightarrow \quad C_S > \frac{4 L_{\text{coil}}}{R_{\text{coil}}^2} . \quad (3.3)$$

L'induttanza  $L_{\text{coil}}$  non è fornita nel datasheet, quindi viene determinata tramite un misuratore di impedenza, alla frequenza di 1 kHz e mediando su 10 campioni. I valori sono leggermente diversi in base allo stato dei contatti e risultano  $L_{\text{set}} = 8.18 \text{ mH}$  e  $L_{\text{reset}} = 6.93 \text{ mH}$ ; la tolleranza attesa è del  $\pm 10\%$ , pari alla tolleranza della resistenza dell'avvolgimento.

Un'altra condizione che si può imporre è che la tensione ai capi dell'avvolgimento debba rimanere superiore alla tensione di set o reset (in modulo) per una durata pari ad almeno il tempo tipico di commutazione, in modo da garantire la commutazione effettiva del relè. Entrambi i valori sono riportati sul datasheet [16] e in Tabella 3.3. Il valore di  $C_S$  può essere stimato assumendo che i poli della funzione di trasferimento, reali e distinti a causa della condizione in Equazione (3.3), siano sufficientemente separati. La tensione sul carico è quindi approssimabile con il solo transitorio capacitivo e vale:

$$v_{\text{coil}}(t) \simeq V_{CC} \exp\left(-\frac{t}{R_{\text{coil}}C_S}\right) > V_{\text{SET}} \quad \text{per } 0 \leq t \leq t_{\text{TYP}} , \quad (3.4)$$

$$C_S > \frac{t_{\text{TYP}}}{R_{\text{coil}} \ln\left(\frac{V_{CC}}{V_{\text{SET}}}\right)} . \quad (3.5)$$

Utilizzando i valori nel caso peggiore di  $L_{\text{coil}} = L_{\text{set}} + 10\% \simeq 9 \text{ mH}$  e  $R_{\text{coil}} = 90 \Omega - 10\% \simeq 81 \Omega$  si può determinare il valore di  $C_S$ :

$$C_S > 5.5 \mu\text{F} \quad \text{dall'eq. (3.3)} \quad C_S > 32.2 \mu\text{F} \quad \text{dall'eq. (3.5)}$$

Si sceglie quindi  $C_S = 47 \mu\text{F}$ , in modo che i limiti siano rispettati anche tenendo conto della tolleranza tipica di  $\pm 20\%$  per un condensatore elettrolitico. La bontà dell'approssimazione dei poli distinti si può verificare calcolando la costanti di tempo induttiva  $\tau_L = L_{\text{coil}}/R_{\text{coil}} \simeq 110 \mu\text{s}$  e capacitiva  $\tau_C = R_{\text{coil}}C_S \simeq 3.81 \text{ ms}$ , che sono separate da più di un ordine di grandezza.

Questa soluzione presenta un ulteriore vantaggio: non sono necessari i diodi di flyback per assorbire la sovratensione induttiva, in quanto uno dei due transistor è sempre in conduzione, evitando bruschi transitori di corrente nell'induttore. Anche se si dovesse introdurre un tempo morto (ritardo tra lo spegnimento di un MOSFET e l'accensione dell'altro) in cui gli interruttori sono entrambi aperti, i *body diode* potranno eventualmente entrare in conduzione per dissipare l'energia residua.

### 3.3.3 Scelta del tipo di MOSFET

Per realizzare il mezzo ponte in Figura 3.7 si utilizza il circuito integrato ZXMHC3F381N8 [13], che contiene due coppie nMOS – pMOS in configurazione ponte ad H con i segnali di controllo esposti (Figura 3.8).

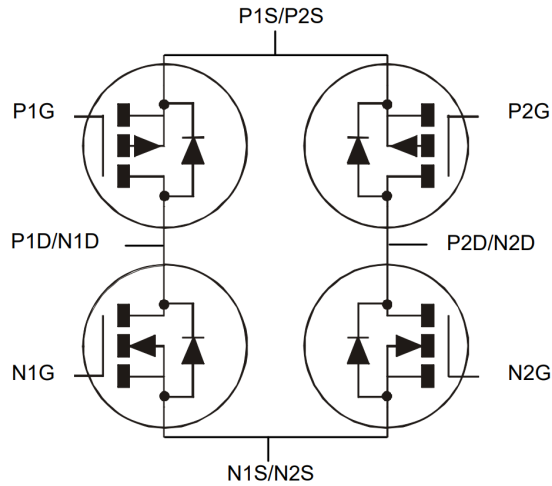


Figura 3.8: Configurazione dei MOSFET integrati [13].

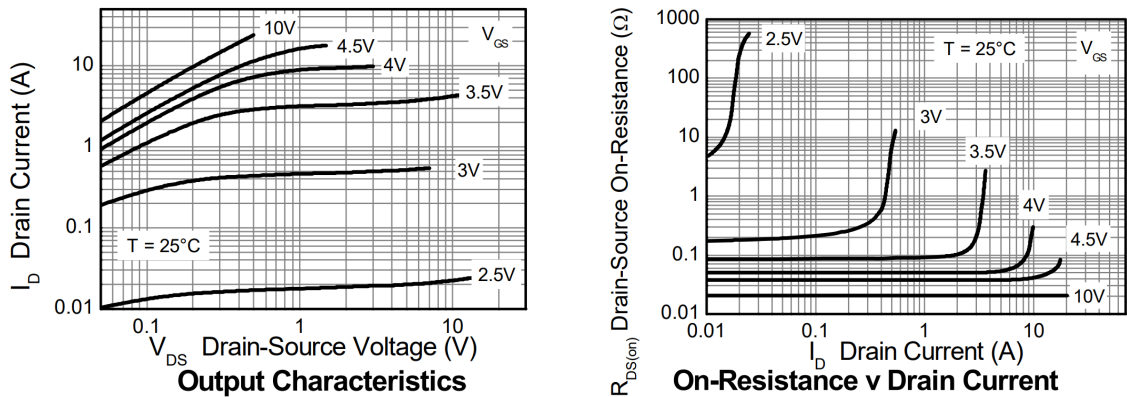


Figura 3.9: Caratteristiche statiche tipiche dei MOSFET a canale N [13].

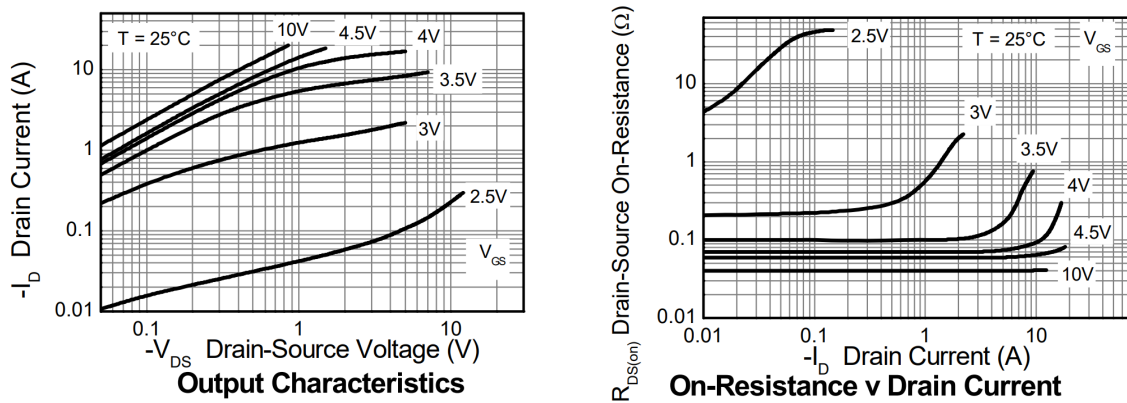


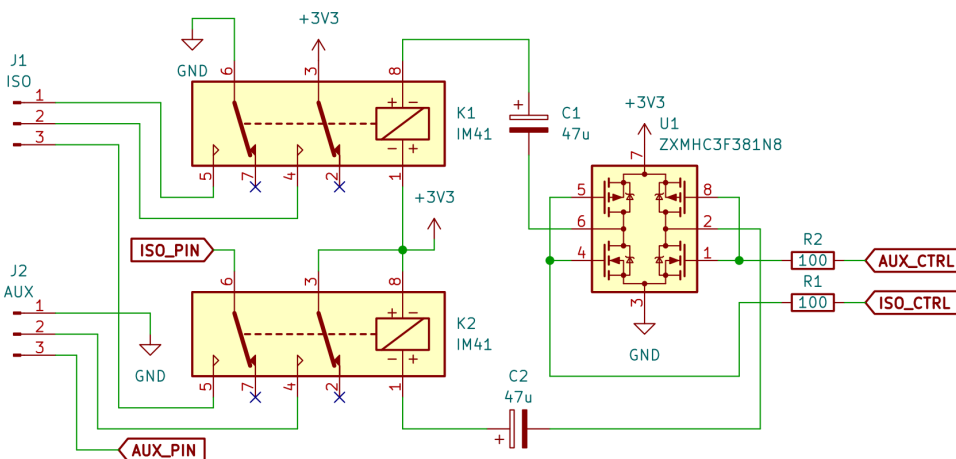
Figura 3.10: Caratteristiche statiche tipiche dei MOSFET a canale P [13].

Le caratteristiche statiche dei dispositivi sono riportate nelle Figure 3.9 e 3.10, con attenzione particolare alla relazione tra  $R_{DS,on}$  e  $V_{GS}$ . Come si può vedere, quando pilotati ad una tensione  $|V_{GS}| = 3.3\text{ V}$ , la resistenza di canale di entrambi i dispositivi è compresa nell'intervallo  $100 \div 200\text{ m}\Omega$ , abbastanza bassa da non influenzare l'operazione del relè. Le tensioni di soglia sono però abbastanza alte da consentire il collegamento dei gate in comune (senza introduzione di tempo morto), riducendo la complessità del circuito. In base ai grafici di  $R_{DS,on}$  si può supporre che quando  $|V_{GS}| = V_{DD}/2 = 1.65\text{ V}$ ,  $R_{DS}$  sia abbastanza elevata da mantenere la corrente di *shoot through* a valori accettabili, che comunque scorre solamente per qualche decina di nanosecondi durante la commutazione.

Per confermare questa possibilità è sufficiente misurare la corrente assorbita dal terminale P1S/P2S (con alimentazione di  $V_{CC} = 3.3\text{ V}$  tra P1S/P2S e N1S/N2S) al variare della tensione  $V_{PxG} = V_{NxG} = V_{IN}$ , che non supera  $I_{CC} = 602.5\text{ }\mu\text{A}$  per  $0 \leq V_{IN} \leq V_{CC}$ .

### 3.4 Schema elettrico completo

Per interrompere tutti e 3 i collegamenti di un sensore elettrochimico sono necessari due relè, ognuno dei quali è pilotato dal circuito in Figura 3.7, utilizzando tre dei quattro contatti disponibili. Al fine di sfruttare i contatti non utilizzati e per esigenze di layout si implementa tre volte la struttura rappresentata in Figura 3.11. Al connettore J1 (di seguito indicato come “porta isolata”) viene collegato un sensore elettrochimico, mentre a J2 (la “porta ausiliaria”) viene collegato uno degli altri sensori che non richiede isolamento galvanico, ma devono comunque essere disattivati quando non sono in uso per ridurre al minimo il consumo di energia.

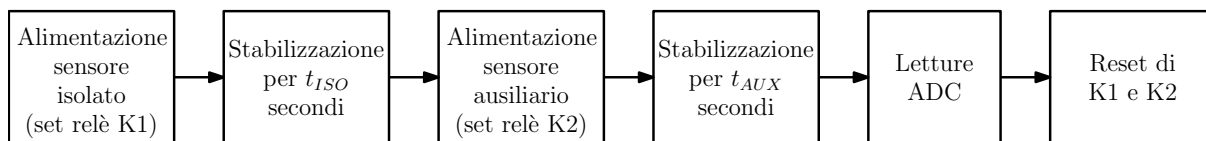


**Figura 3.11:** Circuito per la lettura di un sensore elettrochimico e un parametro ausiliario (entrambi i relè sono raffigurati in posizione di reset).

Questa struttura consente di ridurre il consumo di energia dei sensori ausiliari mantenendoli spenti durante il periodo di stabilizzazione di quelli elettrochimici. La sequenza di lettura è schematizzata in Figura 3.12, in cui  $t_{ISO}$  e  $t_{AUX}$  sono i tempi di stabilizzazione rispettivamente del sensore isolato e ausiliario. Azionando il relè K1 infatti è possibile

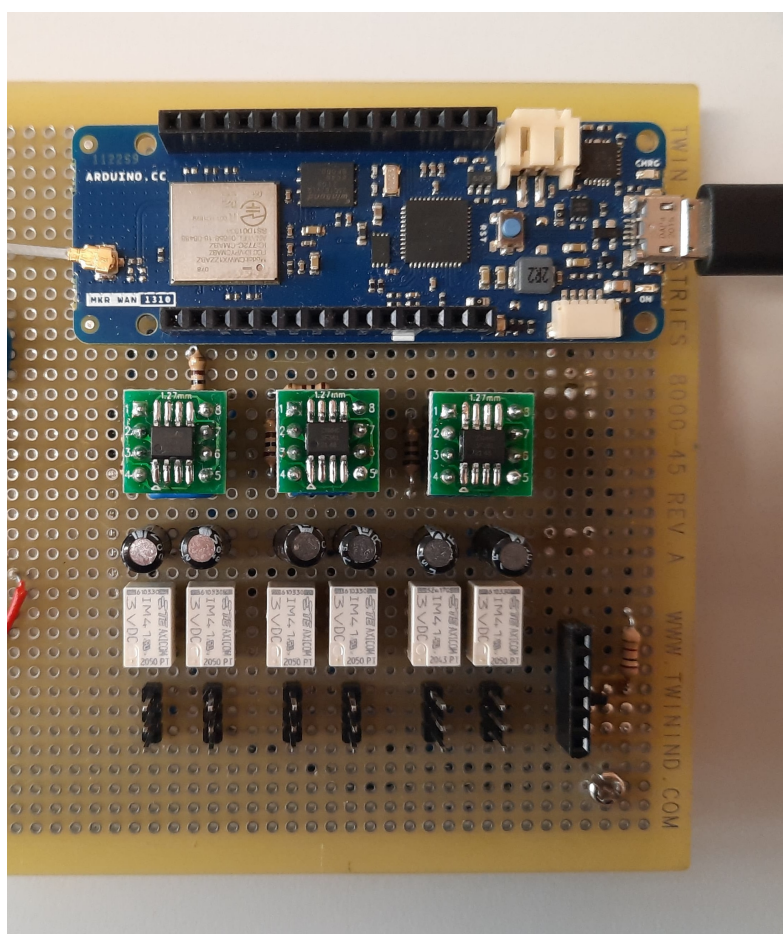


alimentare la porta isolata ma non quella ausiliaria, la cui alimentazione passa attraverso il contatto inutilizzato di K2. Il segnale in ingresso dalla porta isolata può rimanere scollegato durante il periodo di stabilizzazione.



**Figura 3.12:** Sequenza di lettura per il circuito in Figura 3.11.

Il sensore di temperatura è lasciato collegato permanentemente grazie al suo ridotto consumo a riposo, mentre il modulo GPS è controllato separatamente mediante un MOSFET a canale N, dato che deve essere attivato solamente una volta al giorno.



**Figura 3.13:** Fotografia del prototipo saldato su basetta millefori.

I segnali analogici in ingresso ISO\_PIN e AUX\_PIN vengono collegati agli ingressi analogici della scheda Arduino, mentre i segnali di controllo ISO\_CTRL e AUX\_CTRL alle uscite digitali<sup>6</sup>. Le resistenze R1 e R2 sono consigliate per smorzare gli eventuali transitori oscil-

<sup>6</sup>Durante i primi test è emerso che nella scheda MKR WAN 1310 non è possibile utilizzare i pin 6, poiché impiegato in fase di programmazione, e 11, che è parte del bus I<sup>2</sup>C.

latori del circuito risonante formato dalla capacità di gate in serie con l'induttanza dei collegamenti.

Il circuito completo del prototipo è riportato in Appendice A. Tutti i componenti vengono saldati su basetta millefori per una maggiore stabilità dei collegamenti. Il risultato finale è raffigurato in Figura 3.13.

# Capitolo 4

## Test in ambiente rappresentativo

### 4.1 Descrizione del software

La scheda Arduino è programmata in modo da implementare il ciclo in Figura 4.1 per leggere i valori di tutti i parametri. Dato che in generale lo stato dei relè all'avvio è sconosciuto, viene eseguita una sequenza di reset (che commuta ogni relè due volte in ordine) per portarli ad uno stato noto. L'acquisizione è innescata da un interrupt generato dal modulo RTC, consentendo di campionare ad intervalli temporali precisi. I dati sono poi inseriti in due pacchetti separati, a causa delle limitazioni sulla dimensione dei *payload* LoRa, inviati a circa due minuti di distanza. Sono formattati secondo lo standard JSON (si veda un esempio in Tabella 4.1), in cui il campo "PK" indica il tipo di pacchetto, "TB" la lettura del sensore di torbidità in mV, "TP" la temperatura in °C e "LV" il valore booleano del sensore di livello. Una volta concluso l'invio del primo il microcontrollore entra nello stato di *standby*, in cui tutte le sorgenti di clock vengono disabilitate, riducendo il consumo di potenza al minimo [18].

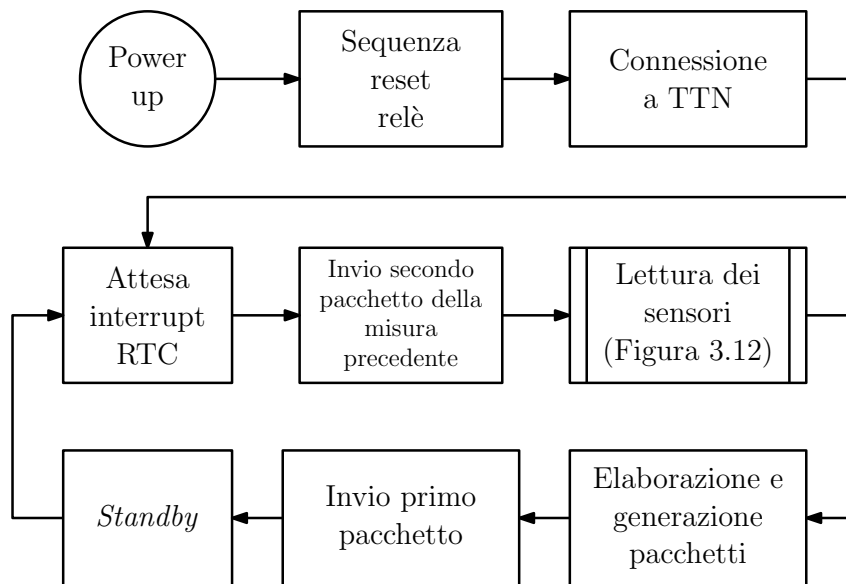
**Tabella 4.1:** Esempio di una coppia di pacchetti ricevuta durante i test

---

Primo pacchetto:	<code>{"PK": "1", "PH": "7.496", "EC": "0.612", "DO": "10206.229"}</code>
Secondo pacchetto:	<code>{"PK": "2", "TP": "16.250", "TB": "2367", "LV": "1"}</code>

---

I dati vengono ricevuti da un gateway LoRa posizionato in laboratorio, che si occupa di instradare i pacchetti a **The Things Network** (TTN). TTN è un infrastruttura open source che promuove lo sviluppo di reti, dispositivi e soluzioni che utilizzano la tecnologia LoRaWAN, mettendo a disposizione gratuitamente *network server* e *application server* per l'aggregazione, decodifica e memorizzazione dei pacchetti [38]. I dispositivi sono facilmente gestiti mediante un interfaccia utente in browser (Appendice B), che consente di registrare *end nodes*, modificare i parametri del collegamento e visualizzare lo scambio di pacchetti in tempo reale. Espone inoltre un API che permette di accedere ai pacchetti



**Figura 4.1:** Flow chart del programma in esecuzione sul microcontrollore.

ricevuti da ogni dispositivo con relativi metadati. Uno script si occupa infine di estrarre i *payload* e salvare i dati in un file CSV.

## 4.2 Descrizione del test

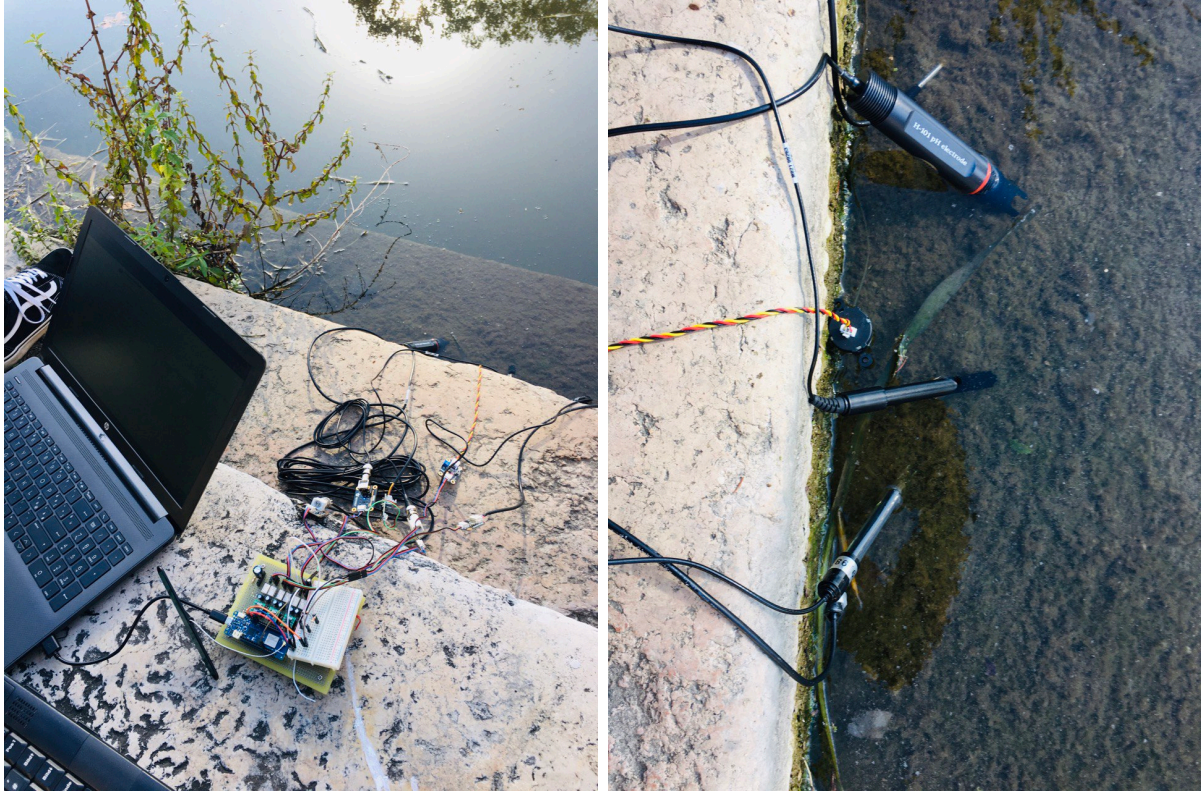
Per dimostrare la funzionalità del prototipo in un ambiente rappresentativo dell'applicazione finale si sceglie di immergere i sensori nelle acque del canale Piovego. Il sito è facilmente accessibile da scalinate situate a circa 200 m dall'edificio in cui è posizionato il gateway LoRaWAN, consentendo di verificare anche la funzionalità del trasmettitore LoRa. I sensori vengono adagiati su una superficie di marmo, sommersi per circa 5 cm dall'acqua del canale, come raffigurato in Figura 4.2b. Il sistema raccoglie dati autonomamente<sup>1</sup> con cadenza di 4 min, e rimane in funzione per un totale di 4 misurazioni. Il tempo di stabilizzazione per i sensori di pH e DO è impostato a 90 s, mentre per i rimanenti 10 s.

## 4.3 Risultati

Le letture dei sensori vengono estratte dai pacchetti raccolti da TTN e sono riportate in Tabella 4.2. I valori di riferimento sono misurati inserendo un sensore alla volta in acqua, evidenziando come non siano osservabili interferenze tra i sensori nella stessa soluzione. A titolo di confronto vengono riportati i campionamenti effettuati da ARPA Veneto [39] nell'anno 2022, che forniscono un'indicazione dei valori attesi di ogni parametro.

<sup>1</sup>Il computer visibile in Figura 4.2a è utilizzato unicamente come fonte di alimentazione





(a) Ambiente di misura.

(b) Posizionamento dei sensori in acqua.

**Figura 4.2:** Immagini del test condotto nel canale Piovego.

**Tabella 4.2:** Risultati del test sul campo confrontati con i valori di riferimento

	Data/Ora	pH	EC [mS cm <sup>-1</sup> ]	DO <sup>1</sup> [mg L <sup>-1</sup> ]	[%]	Torb. [mV]	Temp. [°C]
Riferimento	—	7.65	11.914 <sup>2</sup>	5.08	51.4	2358	16.38
Campionamenti ARPAV 2022 [39]	20/01/2022	8.1	0.453	9.8	82.4	—	7.4
	27/04/2022	7.9	0.430	4.6	47.1	—	16.4
	28/07/2022	8.1	0.409	5.8	76.0	—	29.2
	06/10/2022	8.0	0.389	4.8	52.0	—	18.7
Misurazioni effettuate dal prototipo (06/11/2023)	11:03:34.46	7.50	0.612	4.36	44.1	2367	16.38
	11:07:34.33	7.43	0.613	4.08	41.3	2368	16.25
	11:11:34.34	7.43	0.615	4.16	42.1	2368	16.13
	11:15:34.22	7.52	0.580	4.44	45.0	2376	15.94

<sup>2</sup>Il valore EC di riferimento non è stato acquisito a causa di un problema di comunicazione. Si riporta la lettura del sensore inserito nella soluzione di calibrazione, che ha conducibilità nota di 12.21 mS cm<sup>-1</sup>.

<sup>1</sup>I valori sono stati corretti rispetto a quanto riportato in Tabella 4.1 e Appendice B a causa di un errore nella calibrazione del sensore.



# Capitolo 5

## Conclusioni

L'obiettivo di questa tesi era di sviluppare un prototipo di un nodo wireless per il campionamento dei parametri di qualità dell'acqua che possa essere implementato a basso costo e abbia consumi ridotti, in modo da poter essere alimentato a batteria, pur essendo in grado di soddisfare l'accuratezza richiesta.

La soluzione presentata è in grado di soddisfare queste specifiche utilizzando un solo microcontrollore e meno di 4 componenti esterni per parametro acquisito, riducendo sensibilmente i costi di implementazione rispetto ad altre soluzioni commerciali. Inoltre può vantare un consumo di potenza a riposo nullo, prolungando la vita del nodo.

I test effettuati in laboratorio e sul campo mostrano come le letture raccolte autonomamente dal prototipo siano compatibili con i valori attesi in un ambiente fluviale. Le deviazioni osservate rispetto ai campionamenti ufficiali sono da attribuirsi alla calibrazione imperfetta dei sensori, alla vegetazione presente nella zona dei test e a deviazioni statistiche dei parametri.

Numerosi sono comunque i miglioramenti necessari per un *deployment* su larga scala. Tra di questi si segnala la scelta di sensori in grado di resistere ad un utilizzo continuativo in ambiente marino, eventualmente modificandone i circuiti di condizionamento per rimuovere i componenti inutili (ad esempio gli indicatori a LED). Sarà inoltre necessario implementare una gestione ottimale degli stati di attività e riposo di ogni componente in modo da minimizzare i consumi.

Si riconosce tuttavia come il design di questo sistema di acquisizione dati abbia la potenzialità di migliorare le prestazioni del nodo, aumentandone l'affidabilità e la vita operativa.





# Appendice A

## Schema elettrico completo

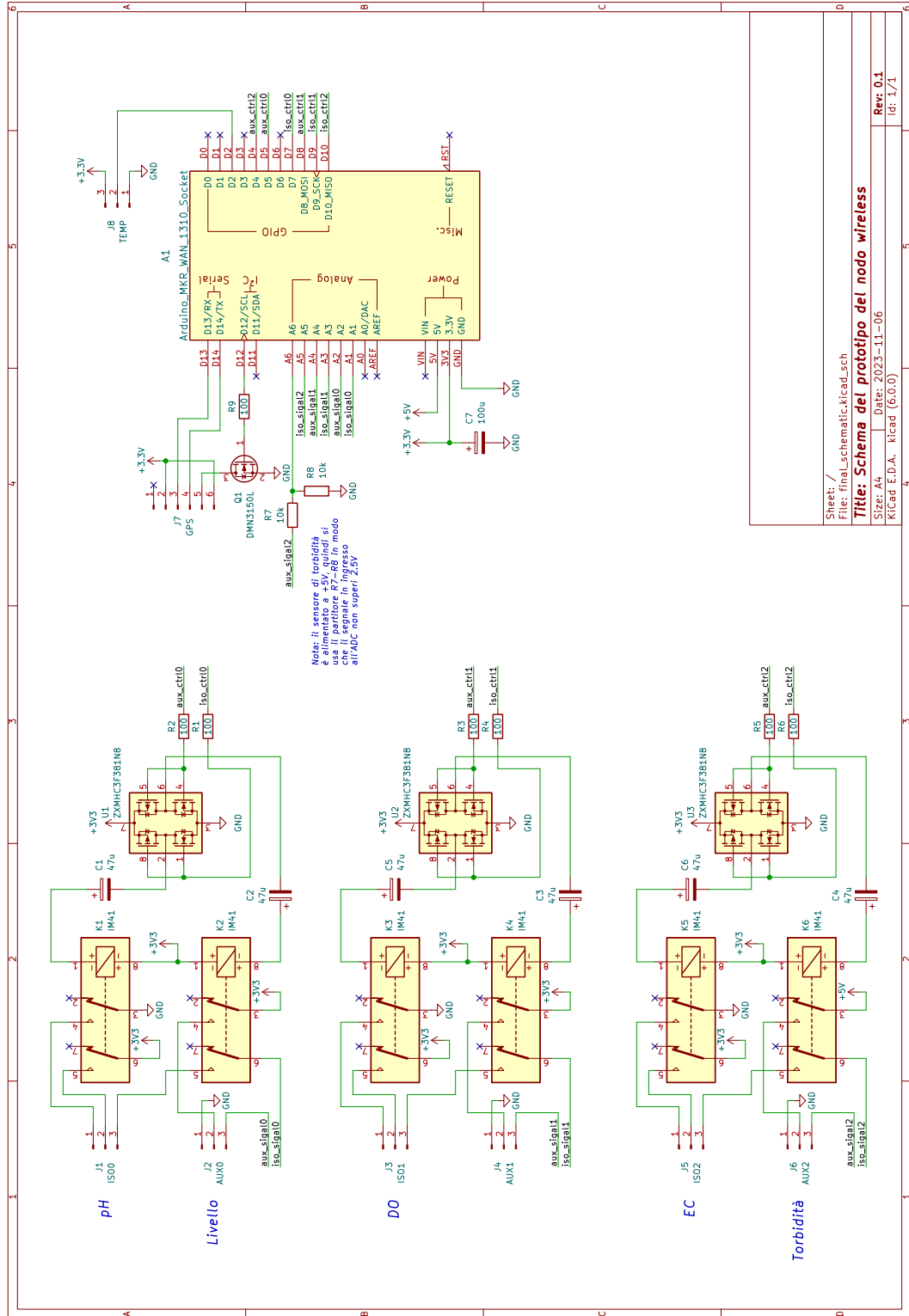


Figura A.1: Schema elettrico completo del prototipo.



# Appendice B

## Pacchetti ricevuti da TTN

Applications > PiSupply node test > End devices > eui-a8610a3530308a09 > Live data

**eui-a8610a3530308a09**  
ID: eui-a8610a3530308a09  
7 6 Last activity 59 seconds ago

Overview Live data Messaging Location Payload formatters General settings

Time	Type	Data preview
11:12:10	Schedule data downlink for transmission	DevAddr: 26 0E 23 FB <> Rx1 Delay: 5 Request: Lookup loxa.mydevices.com on 10.100.0.2:53: no such host
11:12:10	Fail to send webhook	
11:12:10	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0E 23 FB <> Payload: {"PK":{"2":{"TP":{"16.000"},"TB":{"2368"},"LV":{"1"},"1"},"1"},"1"},"1"/>
11:12:10	Successfully processed data message	DevAddr: 26 0E 23 FB <>
11:11:34	Schedule data downlink for transmission	DevAddr: 26 0E 23 FB <> Rx1 Delay: 5 Request: Lookup loxa.mydevices.com on 10.100.0.2:53: no such host
11:11:34	Fail to send webhook	
11:11:34	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0E 23 FB <> Payload: {"PK":{"1":{"PH":{"7.426"},"EC":{"0.615"},"DO":{"979.672"},"1"},"1"},"1"/>
11:11:34	Successfully processed data message	DevAddr: 26 0E 23 FB <>
11:08:10	Schedule data downlink for transmission	DevAddr: 26 0E 23 FB <> Rx1 Delay: 5 Request: Lookup loxa.mydevices.com on 10.100.0.2:53: no such host
11:08:10	Fail to send webhook	
11:08:10	Forward uplink data message	DevAddr: 26 0E 23 FB <> Payload: {"PK":{"2":{"TP":{"16.125"},"TB":{"2368"},"LV":{"1"},"1"},"1"},"1"/>
11:08:10	Successfully processed data message	DevAddr: 26 0E 23 FB <>
11:07:34	Schedule data downlink for transmission	DevAddr: 26 0E 23 FB <> Rx1 Delay: 5 Request: Lookup loxa.mydevices.com on 10.100.0.2:53: no such host
11:07:34	Fail to send webhook	

Figura B.1: Interfaccia “Live Data” di TTN durante la ricezione di pacchetti.



# Bibliografia

- [1] Arduino, “Arduino MKR WAN 1310.” [Online]. Available: <https://docs.arduino.cc/hardware/mkr-wan-1310>
- [2] Tapparel Joachim, “Complete Reverse Engineering of LoRa PHY.” [Online]. Available: [https://www.epfl.ch/labs/tcl/wp-content/uploads/2020/02/Reverse\\_Eng\\_Report.pdf](https://www.epfl.ch/labs/tcl/wp-content/uploads/2020/02/Reverse_Eng_Report.pdf)
- [3] SEMTECH, “LoRa and LoRaWAN: Technical Overview.” [Online]. Available: <https://lora-developers.semtech.com/documentation/tech-papers-and-guides/lora-and-lorawan/>
- [4] Wang, Zhongzheng and Murphy, Aidan and O’Riordan, Alan and O’Connell, Ivan, “Equivalent Impedance Models for Electrochemical Nanosensor-Based Integrated System Design,” *Sensors*, vol. 21, p. 3259, 05 2021.
- [5] Mayer, S., Geddes, L.A., Bourland, J.D. et al., “Faradic resistance of the electrode/electrolyte interface,” *Medical and Biological Engineering and Computing*, vol. 30, pp. 538–542, 1992.
- [6] Samuel T. Jones and Theodore J. Heindel, “A Review of Dissolved Oxygen Concentration Measurement Methods for Biological Fermentations,” 2007. [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:93164399>
- [7] YSI Inc., “The Dissolved Oxygen Handbook,” Sept. 2009. [Online]. Available: [https://www.fondriest.com/pdf/ysi\\_do\\_handbook.pdf](https://www.fondriest.com/pdf/ysi_do_handbook.pdf)
- [8] DFRobot, “Gravity: Analog Dissolved Oxygen Sensor / Meter Kit for Arduino.” [Online]. Available: <https://www.dfrobot.com/product-1628.html>
- [9] Maxim Integrated, “Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer,” 7 2019, Rev. 6. [Online]. Available: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ds18b20.pdf>
- [10] Thirstrup, Carsten and Deleebeeck, Lisa, “Review on Electrolytic Conductivity Sensors,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 70, pp. 1–22, 2021.
- [11] DFRobot, “Gravity: Analog Turbidity Sensor for Arduino.” [Online]. Available: <https://www.dfrobot.com/product-1394.html>
- [12] Texas Instruments, “Uniquely Efficient Isolated DC/DC Converter for Ultra-Low Power and Low-Power Applications,” Dec. 2016. [Online]. Available: <https://www.ti.com/lit/ug/tidu813b/tidu813b.pdf>
- [13] Diodes Incorporated, “30V SO8 Complementary enhancement mode MOSFET H-Bridge,” Mar. 2009. [Online]. Available: <https://www.diodes.com/assets/Datasheets/ZXMHC3F381N8.pdf>

- [14] SEMTECH, “SX1276/77/78/79 - 137 MHz to 1020 MHz Low Power Long Range Transceiver,” Aug. 2016, Rev. 5. [Online]. Available: <https://www.mouser.com/datasheet/2/761/sx1276-1278113.pdf>
- [15] Analog Devices Inc., “isoPower.” [Online]. Available: <https://www.analog.com/en/product-category/isopower.html>
- [16] TE Connectivity, “AXICOM Signal Relays - IM Relay,” Jan. 2016, Rev. 0116. [Online]. Available: [https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=srchtrvr&DocNm=1-1773734-7\\_IM\\_Relay\\_I\\_Type&DocType=DS&DocLang=English&DocFilename=ENG\\_DS\\_1-1773734-7\\_IM\\_Relay\\_I\\_Type\\_0116.pdf](https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=srchtrvr&DocNm=1-1773734-7_IM_Relay_I_Type&DocType=DS&DocLang=English&DocFilename=ENG_DS_1-1773734-7_IM_Relay_I_Type_0116.pdf)
- [17] Martin Ghalkhani, Filippo Campagnaro, Alessandro Pozzebon, Davide De Battisti, Mauro Biagi, Michele Zorzi, “A LoRaWAN Network for the Real-Time Monitoring of the Venice Lagoon: Preliminary Tests,” *IEEE MetroSea*, Oct. 2023, Malta.
- [18] Microchip, “Low-Power, 32-bit Cortex-M0+ MCU with Advanced Analog and PWM,” 2018, Rev. D. [Online]. Available: [https://www.mouser.it/datasheet/2/268/SAMD21\\_Family\\_DataSheet\\_DS40001882D-1660038.pdf](https://www.mouser.it/datasheet/2/268/SAMD21_Family_DataSheet_DS40001882D-1660038.pdf)
- [19] Microchip Technology Inc., “ATECC508A.” [Online]. Available: <https://www.microchip.com/en-us/product/atecc508a>
- [20] SEMTECH, “LoRa Modulation Basics,” Mar. 2009. [Online]. Available: <https://semtech.my.salesforce.com/sfc/p/#E0000000JelG/a/2R0000001OJk/yDEcfAkD9qEz6oG3PJryoHKas3UMsMDa3TFqz1UQOkM>
- [21] Martin Bazant, “Lecture 1: Basic Physics of Galvanic Cells,” Note del corso “Electrochemical Energy Systems”. [Online]. Available: [https://ocw.mit.edu/courses/10-626-electrochemical-energy-systems-spring-2014/resources/mit10\\_626s14\\_s11lec01/](https://ocw.mit.edu/courses/10-626-electrochemical-energy-systems-spring-2014/resources/mit10_626s14_s11lec01/)
- [22] R. H. Petrucci, F. G. Herring, C. Bissonnette, J. D. Madura, R. H. Petrucci, R. H. Petrucci, F. G. Herring, C. Bissonnette, and J. D. Madura, *Chimica generale: principi ed applicazioni moderne / Ralph H. Petrucci ... [et al.]*, 4th ed. Padova: Piccin, 2018.
- [23] DFRobot, “Gravity: Analog Industrial pH Sensor / Meter Pro Kit V2.” [Online]. Available: <https://www.dfrobot.com/product-2069.html>
- [24] Fondriest Environmental, Inc., “Measuring Dissolved Oxygen,” *Fundamentals of Environmental Measurements*, Jan. 2014. [Online]. Available: <https://www.fondriest.com/environmental-measurements/measurements/measuring-water-quality/dissolved-oxygen-sensors-and-methods>
- [25] Wikipedia, “Membrane gas separation.” [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Membrane\\_gas\\_separation](https://en.wikipedia.org/wiki/Membrane_gas_separation)
- [26] Rusydi, Anna, “Correlation between conductivity and total dissolved solid in various type of water: A review,” *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 118, p. 012019, 02 2018.
- [27] DFRobot, “Gravity: Analog Electrical Conductivity Sensor / Meter (K=10).” [Online]. Available: <https://www.dfrobot.com/product-1797.html>

- [28] Fondriest Environmental, Inc., “Turbidity, Total Suspended Solids and Water Clarity.” *Fundamentals of Environmental Measurements*, Jun. 2014. [Online]. Available: <https://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/water-quality/turbidity-total-suspended-solids-water-clarity/>
- [29] DFRobot, “GPS Module with Enclosure.” [Online]. Available: <https://www.dfrobot.com/product-1302.html>
- [30] Hamilton Company, “ORP Basics.” [Online]. Available: <https://www.hamiltoncompany.com/process-analytics/ph-and-orp-knowledge/orp-basics>
- [31] Atlas Scientific, “Basic EZO™ Inline Voltage Isolator.” [Online]. Available: <https://atlas-scientific.com/ezo-accessories/basic-ezo-inline-voltage-isolator/>
- [32] —, “Gravity™ Analog Isolator.” [Online]. Available: <https://atlas-scientific.com/carrier-boards/gravity-analog-isolator/>
- [33] DFRobot, “Gravity: Analog Signal Isolator.” [Online]. Available: <https://www.dfrobot.com/product-1621.html>
- [34] Horowitz, Paul and Hill, Winfield and Horowitz, Paul, *The art of electronics : the X-chapters / Paul Horowitz, Winfield Hill*, 3. printing with corrections and additions ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [35] TE Connectivity, “Automotive, General Purpose and Signal Relays: Definitions,” May 2018, Rev. 0518. [Online]. Available: [https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=showdoc&DocId=Specification+Or+Standard%7FDefinitions\\_Relays%7F2%7Fpdf%7FEnglish%7FENG\\_SS\\_Definitions\\_Relays\\_2.pdf%7F3-1462040-2](https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=showdoc&DocId=Specification+Or+Standard%7FDefinitions_Relays%7F2%7Fpdf%7FEnglish%7FENG_SS_Definitions_Relays_2.pdf%7F3-1462040-2)
- [36] Panasonic Industry Co., “General Application Guidelines,” 2022. [Online]. Available: [https://mediap.industry.panasonic.eu/assets/imported/industrial.panasonic.com/ac/cdn/e/control/relay/unconfirm/catalog/mech\\_eng\\_cau.pdf](https://mediap.industry.panasonic.eu/assets/imported/industrial.panasonic.com/ac/cdn/e/control/relay/unconfirm/catalog/mech_eng_cau.pdf)
- [37] TE Connectivity, “APPLICATION NOTE #5 : Latching Relays.” [Online]. Available: [https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=showdoc&DocId=Data+Sheet%7F1-1773931-5%7F0717%7Fpdf%7FEnglish%7FENG\\_DS\\_1-1773931-5\\_0717.pdf%7F1-1773931-5](https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=showdoc&DocId=Data+Sheet%7F1-1773931-5%7F0717%7Fpdf%7FEnglish%7FENG_DS_1-1773931-5_0717.pdf%7F1-1773931-5)
- [38] The Things Network. [Online]. Available: <https://www.thethingsnetwork.org/>
- [39] ARPA Veneto, “Fiumi - Concentrazione dei parametri di base,” 2022. [Online]. Available: <https://www.arpa.veneto.it/dati-ambientali/open-data/idrosfera/corsi-dacqua/fiumi-concentrazione-dei-parametri-di-base>

