Sensore capacitivo per il livello dell'acqua

Versione 3.0

Paolo Bonelli

paolobo87@gmail.com

Il presente documento è distribuito con licenza **Creative Commons BY-NC-SA**
This document is distributed with licence Creative Commons BY-NC-SA
http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/

13/08/2021

Figura 1

Sommario

Principio di misura 2
Circuito per la misura della capacità 4
Correzione per la deriva della frequenza 6
Variazione con la temperatura della costante dielettrica 6
Prove sperimentali 8
Prove con frequenze diverse 9
Generatore quarzato 9
Calibrazione del sensore da 130 cm 10

Principio di misura

Misurare l'altezza del livello dell'acqua in un serbatoio, in modo continuo, può essere fatto in diversi modi. Esistono in commercio sensori basati su principi fisici diversi: acustici, ottici, di pressione o a galleggiante. Ciascuno ha i suoi pro e contro, in termini di precisione, affidabilità e prezzo.

In questo progetto affronto il problema della misura del livello dell'acqua con un sensore capacitivo, per un serbatoio alto circa 1,5 m. Le specifiche che si richiedono sono:

- nessuna parte conduttrice a contatto con l'acqua;
- nessuna parte meccanica mobile;
- stabilità di funzionamento nel tempo e in condizioni di temperatura ambiente variabile;
- precisione di un paio di centimetri su una massima altezza del livello di 130 cm (1,5 %);
- uscita in tensione tra 0 e 5 V, misurabile con una scheda Arduino o altro dispositivo dotato di ADC;
- basso costo.

Le foto della fig. 1 si riferiscono alle fasi di costruzione di un prototipo di 23 cm che è stato sperimentato prima di costruirne uno da 130 cm. Sempre nella figura 1 è visibile il sensore completo, all'interno di un tubo di prova (grigio) dove è stata introdotta dell'acqua.

Il principio di funzionamento si basa sulla capacità elettrica tra due lamine di rame aventi come dielettrico quantità variabili di acqua e aria. Nella figura 2 si vede, a sinistra, come il livello dell'acqua salendo fa aumentare la capacità elettrica tra le due lamine, avendo l'acqua una costante dielettrica maggiore dell'aria di circa 80 volte.

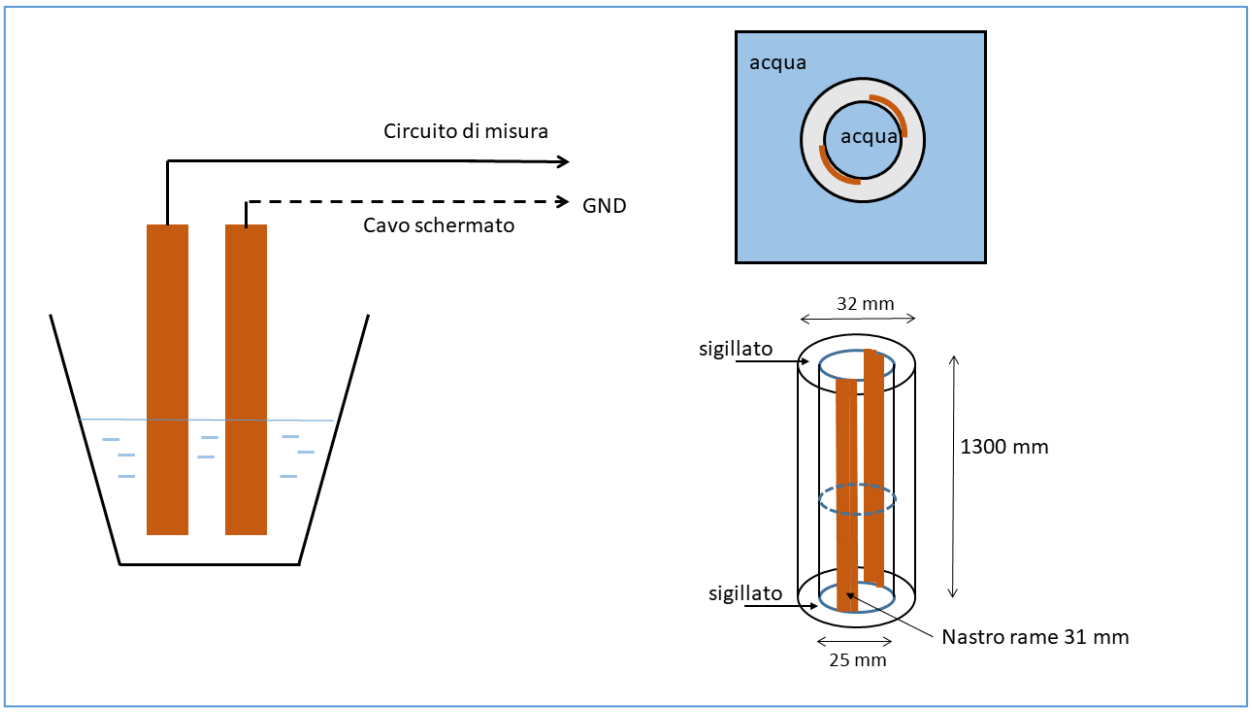

Figura 2

Misurando quindi la capacità si può risalire al livello dell'acqua. L'allestimento è quello mostrato a destra della figura 2. Le due lamine di rame sono costituite da due strisce di nastro adesivo di rame, applicate sulla faccia esterna di un tubo di PVC da 25 mm di diametro. Questo viene infilato in un secondo tubo da 32 mm che viene sigillato alle due estremità, con colla a caldo, in modo che l'acqua non entri nell'intercapedine tra i due tubi, dove sono le strisce di rame, ma entri solo nella parte centrale; la figura 1 mostra la varie fasi del montaggio con gli stessi materiali adottati per il prototipo da 130 cm.

Alle strisce di rame sono saldati due fili, meglio se sono costituiti dallo schermo e il centrale di un cavetto schermato. Il sensore va collegato ad un circuito capace di generare un'onda quadra a frequenza fissa che, applicata ad un partitore RC, formato da una resistenza fissa e dalla capacità variabile del sensore, generi una tensione ridotta in base alla reattanza della capacità. La figura 3 spero che mostri bene questo concetto. La tensione in uscita diminuisce all'aumentare della capacità, cioè del livello dell'acqua.

Nell'ipotesi di un'onda sinusoidale, la reattanza capacitiva del sensore è data da:

$X_c = 1 / 2pfC$

Dove p è la pi greca, f la frequenza, C la capacità mostrata dal sensore.

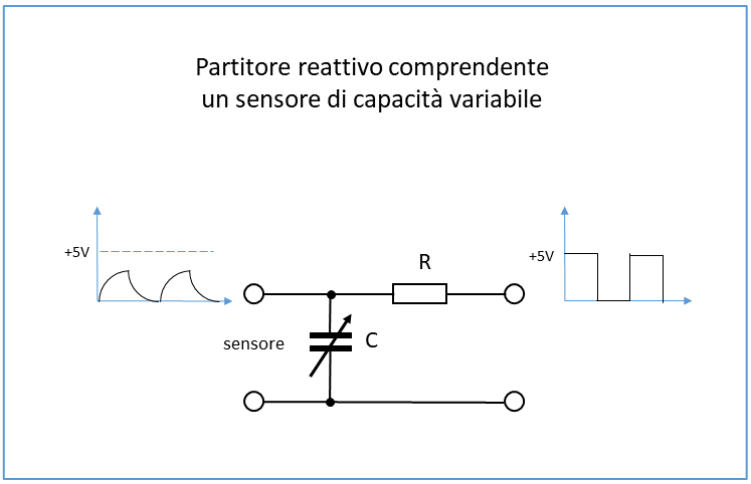

Figura 3

L'ampiezza dell'onda sinusoidale in uscita è data da:

$V = V_0 X_c / (R + X_c) = V_0 / (2pfRC + 1)$

Da qui si vede che V è inversamente proporzionale a C o al livello dell'acqua.

La capacità di un sensore costruito come descritto sopra, risulta molto bassa dell'ordine di circa 200 pF. La sua misura viene fatta per mezzo della reattanza che il sensore oppone al passaggio di una tensione alternata come in Fig. 3. Per rendere maggiore la sensibilità si è scelta una frequenza di circa un MHz, prodotta da un circuito multivibratore astabile o da un chip quarzato, come descritto di seguito.

Circuito per la misura della capacità

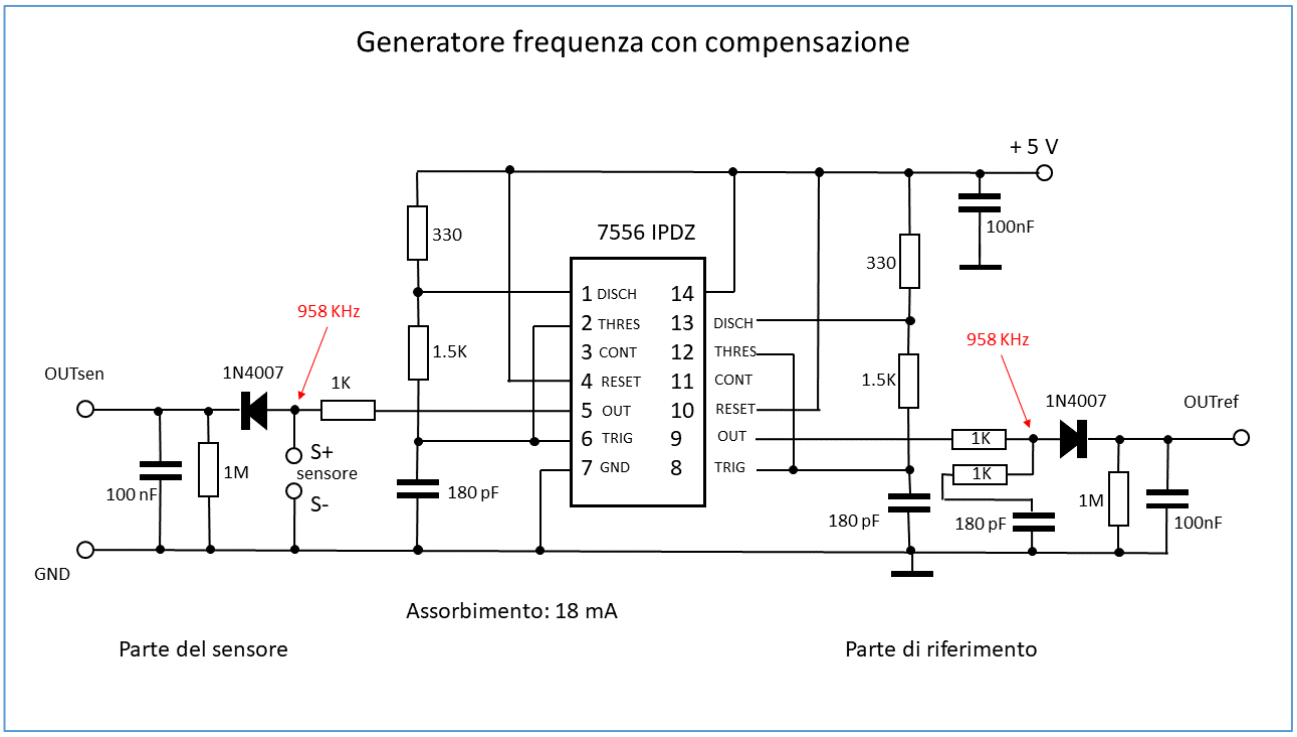

Figura 4

Il chip 7556 IPDZ contiene 2 timer di tipo NE555 che qui vengono usati in configurazione di multivibratore astabile (fig. 5). Il multivibratore genera un'onda quadra con frequenza data dalla formula:

$$f = \frac{1.44}{(Ra + 2Rb)C}$$

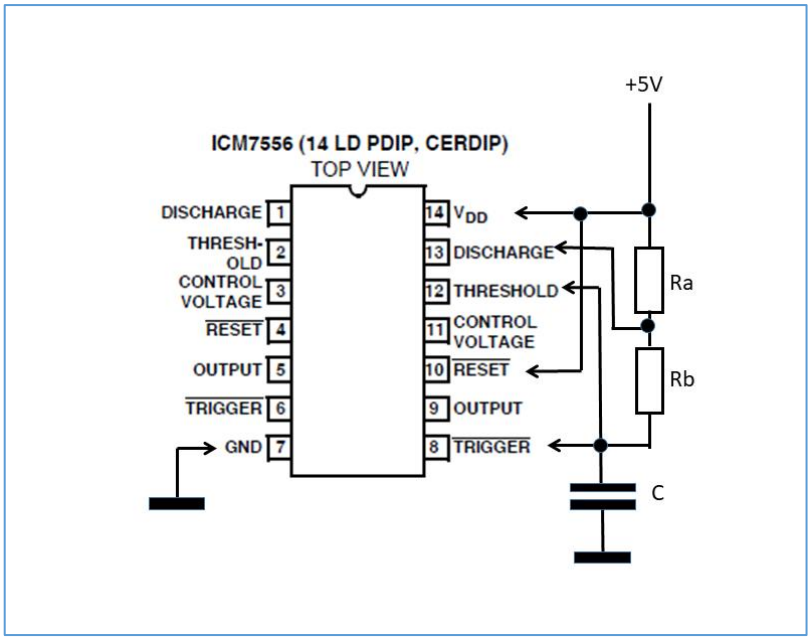

Figura 5

Nel caso del circuito in Figura 4, le frequenze generate dai due mutivibratori risultato essere di 958 KHz. Il calcolo darebbe una frequenza maggiore ma bisogna tener conto delle capacità parassite e del fatto che il chip lavora vicino al suo limite massimo di frequenza.

Le onde quadre generate dai due circuiti sono filtrate da un circuito RC passa basso, costituito a destra nella figura 4, da valori fissi e a sinistra dalla capacità variabile del sensore.

Il punto del circuito tra la resistenza da 1 K e il sensore, sarà ad una tensione che dipende dal partitore tra la resistenza e la reattanza del sensore. Le formule per un onda sinusoidale sono state presentate nel paragrafo precedente, useremo le stesse anche nel caso di un onda quadra, ottenendo risultati simili. Salendo il livello dell'acqua, quindi, aumenta la capacità, diminuisce la reattanza e diminuisce la tensione *V* in uscita dal partitore.

L'onda quadra in uscita viene poi disaccoppiata dal diodo e filtrata dal condensatore da 100 nF, in modo da offrire in output, sul morsetto **OUTsen**, una tensione continua compresa tra 0 e 5 V dipendente dal valore della capacità che in quel momento ha il sensore.

L'altra parte del circuito, l'oscillatore di riferimento a destra, è del tutto uguale alla prima salvo che al posto del sensore c'è un condensatore con valore fisso a 180 pF. In tal modo, se la fequenza è costante, avremo sul piedino **OUTref** una tensione costante.

Correzione per la deriva della frequenza

Qual è lo scopo del circuito di riferimento nello schema della fig. 4 ? I multivibratori come quello in figura 5, se non quarzati, subiscono una variazione della frequenza con la temperatura, quindi il circuito del sensore può generare una variazione nella tensione di uscita anche senza una variazione del livello dell'acqua. Questo è un problema specialmente se il sensore deve essere posto in un serbatoio all'aperto con escursioni giornaliere e stagionali della temperatura. Per questo motivo è stato realizzato il circuito di riferimento.

Misurando continuamente il valore della tensione sul morsetto **OUTref** e confrontandola con quella fissa rilevata durante le fasi di calibrazione del sensore, possiamo ricavare un fattore di correzione da applicare alla tensione sul morsetto **OUTsens**. In questo modo sarà possibile correggere via software **OUTsens** per avere una lettura corretta del livello dell'acqua, come se la frequenza generata non fosse stata modificata da una variazione di temperatura.

Qui di seguito si riportano alcuni passaggi algebrici che sono serviti a dedurre la formula di correzione, nell'ipotesi che l'errore relativo sulle due uscite si equivalga:

Siano quindi V_S e V_R rispettivamente le tensioni in uscita dai due piedini **OUTsens** e **OUTref**, V_R* e V_S* le due tensioni misurate durante la fase di calibrazione del sensore, nell'ipotesi suddetta si ha:

$$\frac{\Delta V_S}{V_S^*} = \frac{\Delta V_R}{V_R^*}$$

Dove: $\Delta V_S = V_S - V_S*$ *e* $\Delta V_R = V_R - V_R*$

Si dimostra che:

$$V_S^* = \frac{V_S}{\left(1 + \frac{\Delta V_R}{V_R^*}\right)}$$

Operativamente si procede misurando V_R* una volta sola durante la fase di calibrazione e si inserisce nel programma come una costante. Ogni volta che il programma ottiene una nuova misura di V_S e di V_R si calcola ΔV_R e tramite la formula si ricava il valore corretto V_S*.

Variazione con la temperatura della costante dielettrica

La costante dielettrica dell'acqua varia con la temperatura.

https://www.chimica-online.it/download/costante-dielettrica-acqua.htm

In figura 6 è mostrato il grafico di questa variazione.

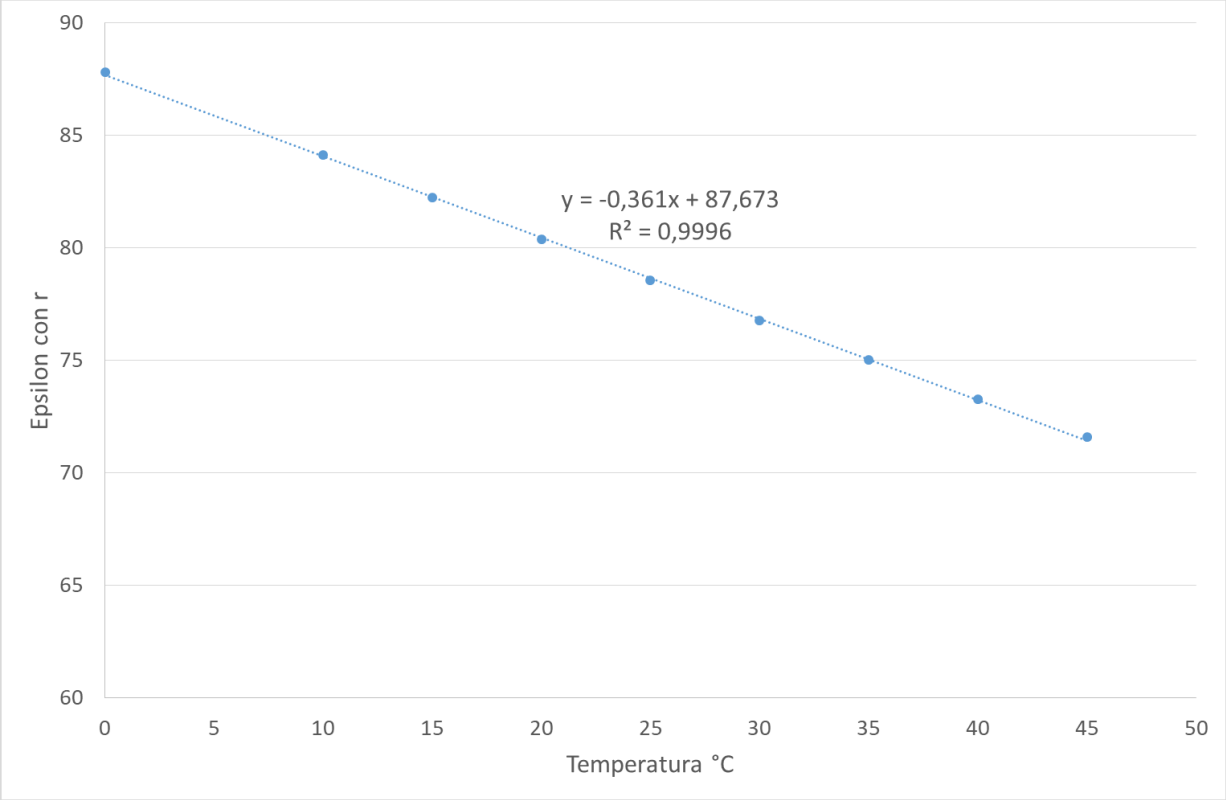

Figura 6

Da altra fonte si ha un grafico simile, come in Fig. 7.
http://www.pellegrinoconte.com/2018/08/17/la-chimica-del-pulito/costante-dielettrica-acqua/

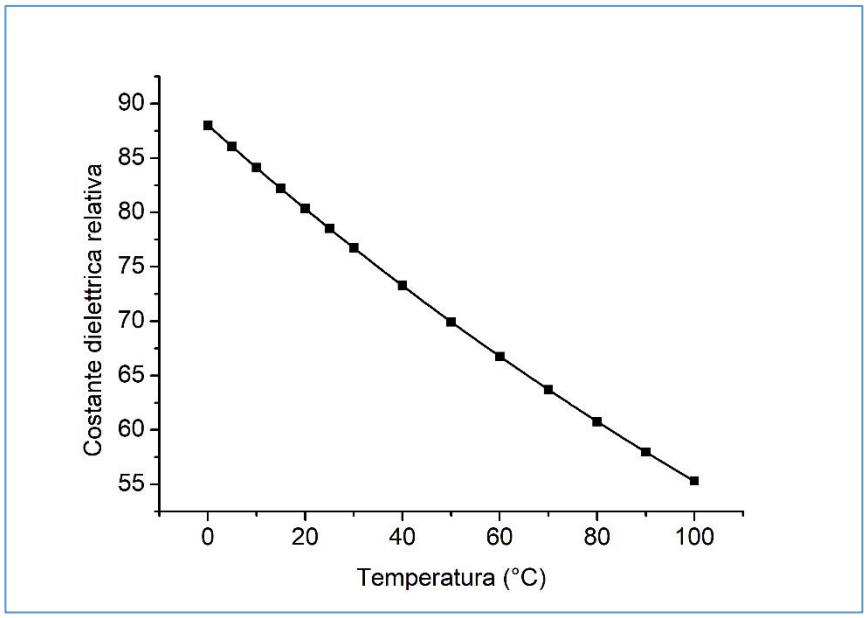

Figura 7

Dato che la capacità del sensore è direttamente proporzionale alla costante dielettrica, la temperatura fa variare la capacità del sensore a parità di livello dell'acqua. La reattanza è inversamente proporzionale alla capacità, quindi la reattanza è inversamente proporzionale alla costante dielettrica. In breve:

$$\frac{C(T^*)}{C(T)} = \frac{\varepsilon^*}{\varepsilon} = \frac{X_s}{X_s^*}$$

Il rapporto tra le reattanze alla temperatura di calibrazione e ad una temperatura diversa è uguale al rapporto inverso delle rispettive costanti dielettriche.

Ora per trovare una procedura di correzione della tensione di uscita V_s ad una temperatura diversa da quella presente quando è stata fatta la calibrazione, bisogna esprimere le reattanze in termini di tensione di uscita.

$$X_s = \frac{\rho R}{1-\rho} \quad ; \quad X_s^* = \frac{\rho^* R}{1-\rho^*}$$

Dove:

$$\rho = \frac{V_s}{V_0} \; ; \qquad \rho^* = \frac{V_s^*}{V_0}$$

Da cui si ricava:

$$V_s^* = \frac{\varepsilon V_s V_0}{V_s(\varepsilon - \varepsilon^*) + \varepsilon^* V_0}$$

Prove sperimentali

Per simulare un serbatoio alto 1,30 m si è usato un tubo più largo della stessa altezza, in cui è stato infilato il sensore e dell'acqua a livelli diversi.

Le due uscite OUTref e OUTsens sono state collegate a due piedini analogici di Arduino con risoluzione 10 bit.

I dati ricavati sono i seguenti:

Sensore vuoto V_s = 3.80 V sigma = 0.003 V (scarto quadratico medio)

Sensore pieno V_s = 2.517 sigma = 0.002 V

Se ne deduce che 130 cm di dislivello di acqua corrispondono ad un range di tensione di circa 1,3 V, vale a dire circa 10 mV a cm. Essenso la risoluzione del ADC di Arduino di circa 5 mV, possiamo concludere che la sensibilità del nostro sensore è più che sufficiente per gli scopi prefissati.

Prove con frequenze diverse

Con un sensore di altezza limitata a 23 cm sono state condotte prove usando frequenze diverse. I risultati si possono vedere nella tabella seguente.

Frequenza kHz	Tutto immerso V	Tutto fuori V	Diff V	mV/cm
937	3.60	4.04	0.44	19.0
845	3.70	4.10	0.40	17.4
430	4.19	4.27	0.08	3.50

Sketch: `CapacitiveSensorDataLog_V3.ino`

Generatore quarzato

Esistono in commercio dei chip che contengono un oscillatore quarzato ad onda quadra a frequenze diverse. Per il nostro sensore è stato usato quello con la sigla: ECS 2100X da 1 MHz, visibile in figura 7. Le sue caratteristiche sono:

- Alimentazione +5 V;
- Output onda quadra a 4.5 V,
- Corrente massima di output 16 mA
- Carico 50 pF

Essendo l'oscillatore quarzato non è necessaria la compensazione di frequenza descritta precedentemente.

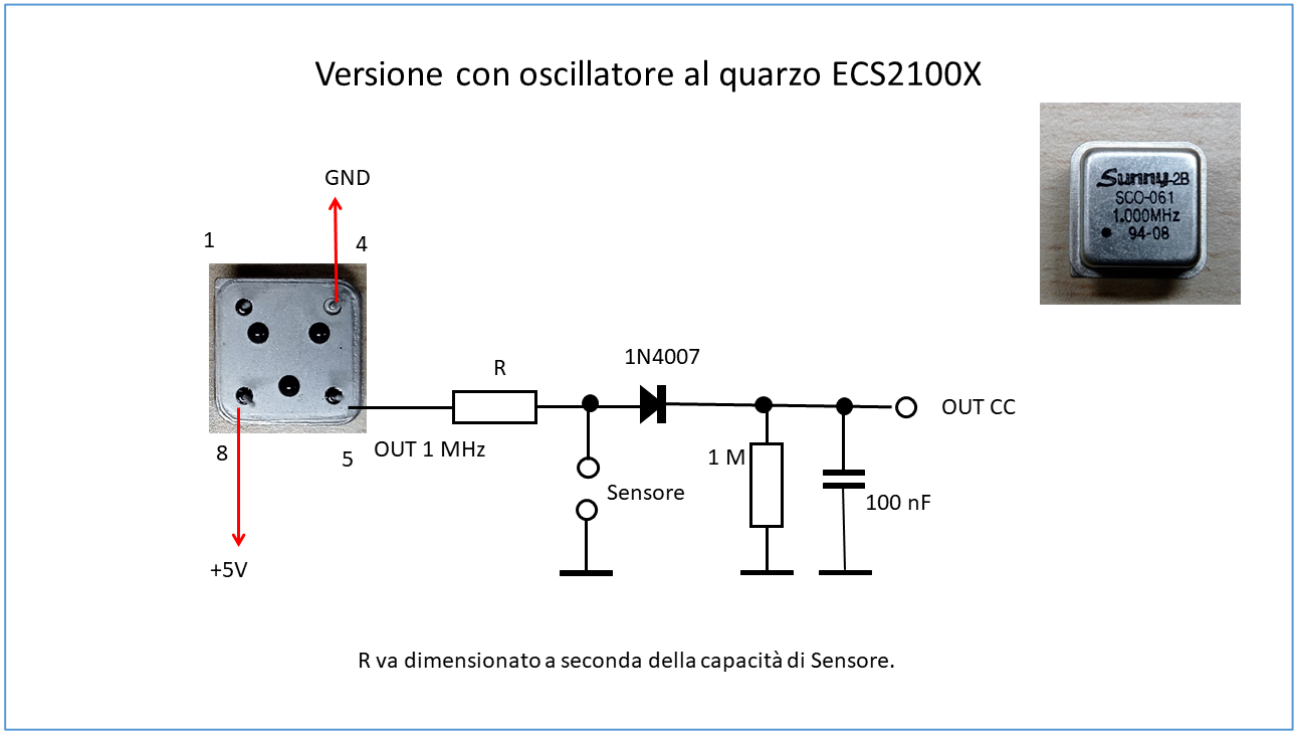

Figura 8

Calibrazione del sensore da 130 cm

Nonostante le relazioni matematiche che si possono ottenere dalla teoria di funzionamento del sensore, è opportuno eseguire una calibrazione del sensore installato nella sua posizione definitiva. Con un metro si può misurare direttamente il livello dell'acqua che verrà messo in relazione con l'uscita in mV dei circuiti mostrati in precedenza. La figura 8 mostra su un grafico i punti di misura ottenuti per un sensore da 130 cm, dotato di oscillatore quarzato come quello in figura 7, assieme a due curve interpolatrici ottenute con Excel: una polinomiale di secondo grado e una di potenza. Ambedue presentano un R^2 molto simile.

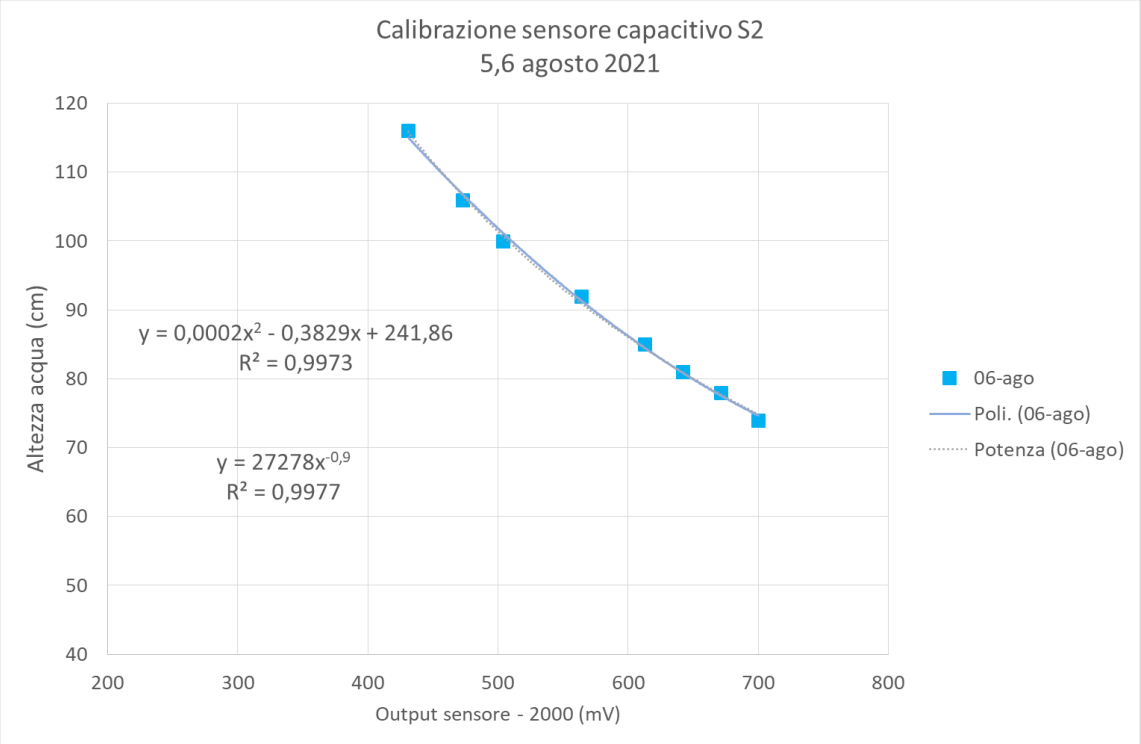

Figura 9

Riferimenti:

https://www.connectendress.it/sensore-di-livello-capacitivo