

# Sensori

Principi di funzionamento  
Teoria degli errori

# Sensori

- Un sensore è un “oggetto” che permette di convertire il valore di un parametro ambientale in un segnale elettrico
- Un sensore è composto da:
  - Un **elemento attivo** che possiede una qualche proprietà che varia al variare del parametro che si vuole misurare
  - Un circuito elettronico di **condizionamento del segnale** che converte la variazione dell'elemento attivo in un segnale che può essere misurato

# Sensori

## Sensore perfetto

- Reagisce ad un unico parametro (quello che misura)
  - Cioè è immune a qualsiasi variazione di qualsiasi altro parametro (nessuna risposta non-specifica)
- Ha una risposta perfettamente lineare
  - Se il valore del parametro misurato raddoppia, la risposta del sensore raddoppia
- Risponde, sempre e comunque, in maniera istantanea alle variazioni del parametro
- Il suo comportamento è costante ed immutabile nel tempo
- *Costa poco, funziona sempre benissimo, è in pronta consegna e si può attaccare dovunque (tipo plug and pray)*
  - *Eventualmente, è accettabile che non faccia il caffè*

# Sensori

## Sensore reale (nel senso di vero, non di Savoia...)

1. Reagisce a più di un unico parametro (risposte non-specifiche)
  - Anche solo per l'elettronica di condizionamento del segnale che è costituita da semiconduttori, tipicamente sensibili alla temperatura
2. Ha una risposta non lineare
3. Risponde alle variazioni del parametro dopo un certo tempo (tempo di risposta,  $\tau$ , time constant)
  - In alcuni sensori, tra cui le celle di conducibilità, il tempo di risposta non è affatto costante, ma varia ampiamente e continuamente (soprattutto in funzione della velocità del flusso)
4. Il suo comportamento varia nel tempo
  - Ogni tanto è necessaria una ricalibrazione
5. Il suo comportamento e la sua risposta sono influenzate dal mondo reale
  - **The Ocean is NOT a stirred bath, sorry...**

# Sensori Reali

## Problema 1: risposte non-specifiche

- Il problema delle risposte non-specifiche può essere affrontato in alcuni modi:
  - Costruzione del sensore
    - **Es.:** La risposta del termistore di un sensore di temperatura è influenzata dalla pressione, per cui il termistore viene inserito dentro un “ago” che lo isola dalla pressione esterna
  - Progettazione dell’elettronica adeguata e consapevole
    - **Es.:** Il circuito di condizionamento deve contenere elementi che compensino gli effetti della temperatura sul circuito stesso
  - Utilizzo di opportune equazioni di conversione ad unità scientifiche
    - **Es.:** La risposta di un sensore di conducibilità è influenzata anche da temperatura e pressione, per cui l’equazione di calibrazione, per essere appropriata, deve contenere anche termini che dipendono da temperatura e pressione

# Sensori Reali

## Problema 2: risposta non lineare

- Per linearizzare la risposta si calibrano i sensori
  - La risposta non lineare viene descritta utilizzando un'equazione adeguata a rappresentare la curva di risposta del sensore
  - Calibrare vuol dire determinare i coefficienti di questa equazione
  - Il sensore viene calibrato (o almeno dovrebbe esserlo)
    - In numerosi valori del parametro che misura
    - Lungo tutto il range di misura
  - I coefficienti di calibrazione sono adeguati se i residui sono inferiori alla precisione del sensore (riportati nella scheda di calibrazione)
  - Più numerosi sono i punti di calibrazione
    - Più affidabile, accurata e precisa è la calibrazione
    - Ci sono più punti di controllo dei residui per verificarne la precisione

# Sensori Reali

## Problema 2: risposta non lineare

- Le capacità di misura di un sensore vengono valutate durante la calibrazione
- Si paragona la lettura del sensore ad una lettura di riferimento di precisione nota (standard secondario), durante un periodo in cui sia il sensore che il riferimento siano stabili
- Una buona calibrazione deve essere effettuata lungo l'intero range di misura
- Il sensore di riferimento deve essere sempre accuratamente calibrato e la sua "storia" deve essere perfettamente nota per monitorarne l'affidabilità.



# Sensori Reali

## Problema 2: risposta non lineare

- Il laboratorio di calibrazione deve mantenere almeno due standard primari agli estremi del range di misura per calibrare gli standard secondari
  - Standard di temperatura per il range oceanografico
    - Standard primari
      - Punto triplo dell'acqua 0.00997 °C
      - Punto di fusione del Gallio 29.76458 °C
    - Standard secondario
      - Termometro al platino



# Sensori Reali

## Problema 2: risposta non lineare

- La precisione della calibrazione dipende da:
  - Precisione del sensore di riferimento
    - Il sensore di riferimento deve essere uno standard secondario
    - Deve essere frequentemente calibrato utilizzando gli standard primari
  - Stabilità ed omogeneità del bagno di calibrazione
    - Il bagno deve essere perfettamente isolato
    - Il bagno deve essere provvisto di un adeguato dispositivo di mescolamento per garantire l'uniformità dei parametri dell'acqua al suo interno
  - Precisione con la quale si confrontano i valori del sensore da calibrare e del riferimento di calibrazione

# Sensori Reali

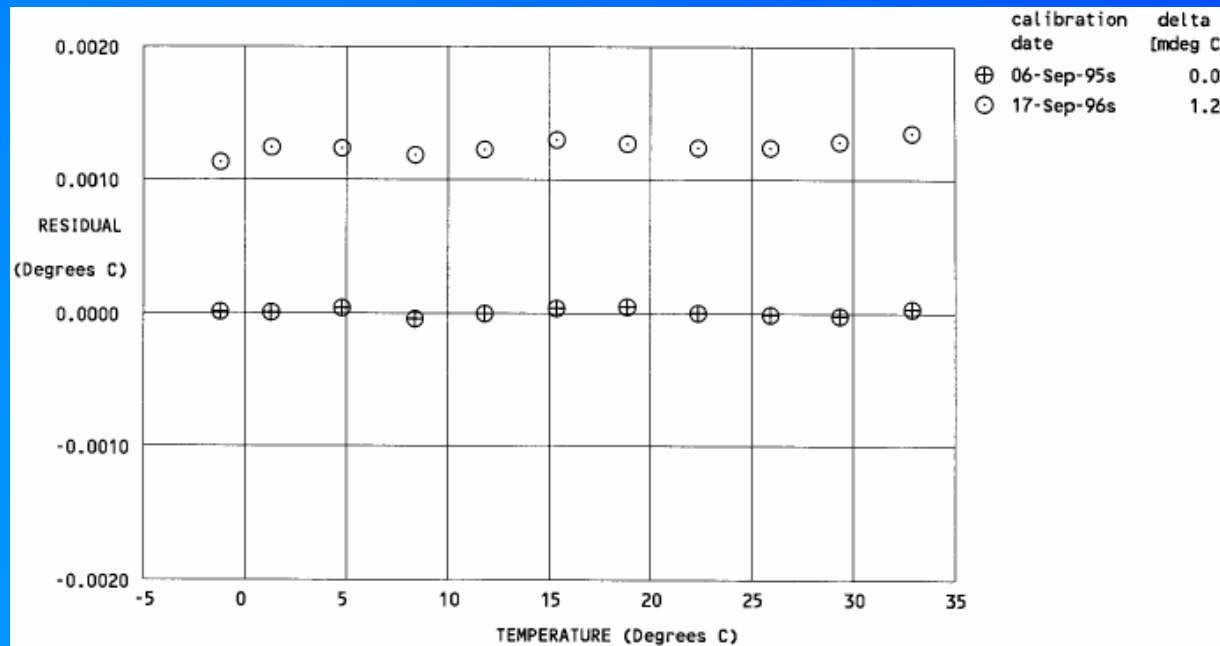
## Problema 2: risposta non lineare

- Bagni di calibrazione
  - Negli USA, i laboratori di calibrazione vengono certificati dal NIST (National Institute of Standards and Technology)
    - La certificazione NIST attesta che un laboratorio di calibrazione raggiunge una precisione in temperatura migliore di  $0.002\text{ }^{\circ}\text{C}$
    - I laboratori di calibrazione Sea-Bird hanno una precisione in temperatura di  $0.0005\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 4 volte superiore allo standard NIST. Questa precisione di calibrazione è confermata dal NIST
  - Nei nuovi laboratori del NIST vengono installati bagni di calibrazione Sea-Bird e si utilizzano le procedure Sea-Bird
  - All'inizio del 2001, il NAVOCEANO (US Naval Oceanographic Office) ha cominciato a ricostruire tutti i propri laboratori di calibrazione installando bagni di calibrazione Sea-Bird ed utilizzando le procedure Sea-Bird

# Sensori Reali

## Problema 2: risposta non lineare

- Esempio di scheda di calibrazione Sea-Bird di un sensore di temperatura
  - Ci sono 11 punti di calibrazione distribuiti uniformemente lungo tutto il range delle temperature oceanografiche
  - I residui della calibrazione sono inferiori ad 1.3 mK



Bertinoro - June 12-14, 2002

# Sensori Reali

## Problema 3: variazione del tempo di risposta

- **Il problema delle variazioni del tempo di risposta si risolve con un'attenta e consapevole progettazione della sonda**
  - In funzione della tecnologia alla base del sensore, il suo tempo di risposta può variare, ampiamente e continuamente, in funzione di alcuni **fattori specifici**
    - Bisogna conoscere **come** ogni fattore specifico influenza il tempo di risposta del sensore
    - Bisogna **quantificare** la relazione tra i valori dei vari fattori e la corrispondente variazione nel tempo di risposta
    - Bisogna **conoscere o misurare con precisione in ogni istante** il valore di ogni fattore che influenza il tempo di risposta
  - La sonda deve avere sotto completo controllo ogni fattore specifico che influenza il tempo di risposta del sensore, per determinare con precisione a quale istante si riferisce ogni lettura

# Sensori Reali

## Problema 4: drift del sensore nel tempo

- Il problema della variazione della curva di risposta del sensore nel tempo si risolve calibrandolo ogni tanto
  - I sensori (tutti) hanno un drift, cioè la loro risposta varia nel tempo
    - Un ottimo, seppur raro, controllo di qualità consiste nel tenere ogni sensore sotto continua osservazione per un lungo periodo (4-6 mesi), durante il quale il sensore viene continuamente ricalibrato per verificarne la stabilità. Solamente così è possibile verificare l'effettiva stabilità nel tempo del comportamento di ogni singolo sensore
    - I costruttori di sensori ad alta precisione, come Sea-Bird, seguono questa pratica, e scartano i sensori che non dimostrano una buona stabilità durante il periodo di valutazione
  - In funzione della tecnologia alla base del sensore e della sua costruzione la variazione può essere casuale o lineare e modellabile
    - Variazioni casuali della risposta del sensore richiedono frequenti calibrazioni per avere misure affidabili
    - Variazioni lineari e modellabili consentono calibrazioni meno frequenti
      - Tra calibrazioni successive si utilizzano termini interpolati

# Sensori Reali

## Problema 5: effetti del mondo reale

- Il problema degli effetti del mondo reale sulla risposta del sensore si risolve con una attenta e consapevole progettazione della sonda
  - Il valore del parametro misurato da un sensore è influenzato da:
    - Valore del parametro in condizioni indisturbate
      - E' l'unico valore che vorremmo misurare
    - Presenza del sensore
      - **Es.:** La massa termica di un sensore modifica la temperatura del campione d'acqua
    - Condizioni dinamiche attorno al sensore
      - **Es.:** La frizione dell'acqua riscalda il sensore, un sensore di temperatura che si muove legge temperature superiori a quelle che leggerebbe da fermo
    - Materiale estraneo all'interno del campo di misura del sensore
      - **Es.:** La presenza di sedimenti, di plancton o di necton all'interno del campo di misura di una cella di conducibilità diminuisce il volume campionato e quindi modifica il valore letto dal sensore

# Sensori Reali

## Problema 5: effetti del mondo reale

- Il mondo reale può avere due effetti sui sensori:
  - Variazione del valore letto dal sensore
  - Variazione del tempo di risposta del sensore
- Per ogni tipo di sensore è necessario analizzare:
  - Quali sono i fattori che causano queste variazioni
  - In quale modo i diversi valori di questi fattori influenzano:
    - Il valore letto dal sensore
    - Il tempo di risposta del sensore
- Per eliminare l'effetto di questi fattori dai dati è necessario:
  - Misurare continuamente (oppure avere sotto controllo) i valori di questi fattori per calcolarne l'effetto sul singolo dato
    - Utilizzare la misura dell'effetto del fattore sui dati per rimuoverlo
    - Utilizzare il tempo di risposta reale di ogni singolo dato per posizionarlo correttamente nel tempo

# Sensori Reali

## Temperatura – Errori

### Tecnologia del sensore: Termistore

- Variazioni del valore letto
  - Presenza del sensore
  - Condizioni dinamiche
    - Riscaldamento viscoso
      - Varia al variare della velocità dell'acqua sul sensore
  - Materiale estraneo nel campo di misura
- Variazioni del tempo di risposta
  - Presenza del sensore
  - Condizioni dinamiche
  - Materiale estraneo nel campo di misura

# Sensori Reali

## Temperatura – Riscaldamento viscoso

- Le variazioni del valore letto dovute al riscaldamento viscoso possono essere rimosse dai dati solo conoscendo in ogni istante la velocità con la quale l'acqua fluisce attorno al sensore
  - Sonde a flusso libero
    - Se il sensore viene installato sulla sonda in modo da essere a diretto contatto con l'acqua circostante, bisogna conoscere con precisione :
      - La velocità effettiva di discesa in ogni istante
        - » La velocità di discesa è estremamente variabile (vedi shed wake)
      - Velocità delle correnti orizzontali e verticali
  - Sonde a flusso controllato
    - Se il sensore viene installato sulla sonda in modo da essere isolato dai movimenti dell'acqua circostante, e l'acqua viene fatta fluire sul sensore a velocità nota, **l'effetto dovuto al riscaldamento viscoso è costante e noto a priori con precisione assoluta**

# Sensori Reali

## Conducibilità – Errori

### Tecnologia del Sensore: Elettrodi o Induzione

- Variazioni del valore letto
  - Presenza del sensore
    - Errore di massa termica
  - Condizioni dinamiche
  - Materiale estraneo nel campo di misura
    - Errore di volume
- Variazioni del tempo di risposta
  - Presenza del sensore
  - Condizioni dinamiche
    - Il tempo di risposta è funzione ESCLUSIVA della velocità del flusso d'acqua all'interno del suo campo di misura
  - Materiale estraneo nel campo di misura

# Sensori Reali

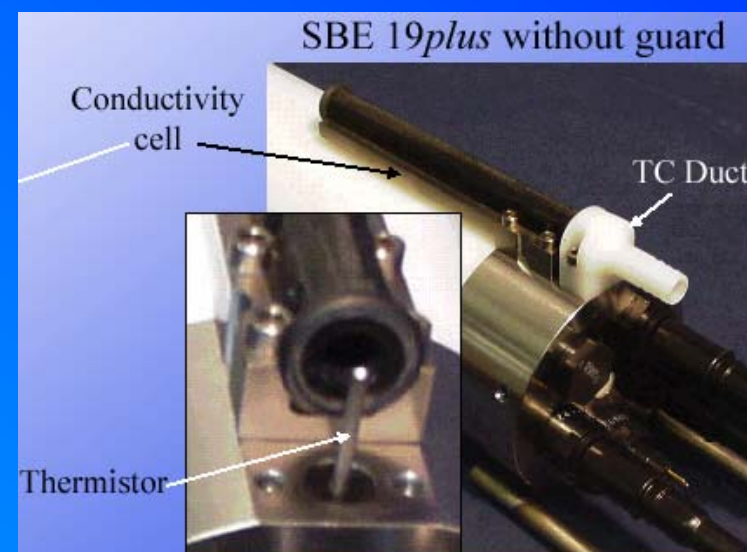
## Conducibilità – Errore di massa termica

- La salinità viene calcolata indirettamente dalle misure di conducibilità, temperatura e pressione
  - Il termine di **conducibilità** contribuisce per il 60 - 90% al calcolo della salinità, e può causare un errore di tale entità
  - Il termine di **temperatura** contribuisce per il 10 - 30% al calcolo della salinità, e può causare un errore di tale entità
  - Il termine di **pressione** contribuisce per il 0 - 10% al calcolo della salinità, e può causare un errore di tale entità
- Per calibrare una cella di conducibilità si varia la temperatura di un bagno a salinità costante
  - Variando da 1 a 32°C la temperatura di un bagno a salinità costante di 35 PSU, la conducibilità varia da 3 a 6 S/m
  - Quindi, un errore di temperatura di 1 mK (0.001°C) causa un errore di conducibilità pari a 0.000097 S/m, 2.4 volte superiore alla risoluzione del sensore che è di 0.00004 S/m

# Sensori Reali

## Conducibilità – Errore di massa termica

- Tutte le celle di conducibilità hanno una massa, e quindi immagazzinano calore
  - Quando una cella di conducibilità passa da acque più calde ad acque più fredde (*i.e.* durante una calata), il calore immagazzinato dalla cella riscalda l'acqua circostante e ne aumenta la conducibilità
  - Se il sensore di temperatura non è posizionato all'interno della cella di conducibilità, legge una temperatura inferiore a quella dell'acqua di cui misuriamo la conducibilità
    - Ne risulta un errore nel calcolo della salinità
  - Nelle SBE-19*plus* il sensore di temperatura è all'ingresso della cella di conducibilità



# Sensori Reali

## Conducibilità – Errore di volume

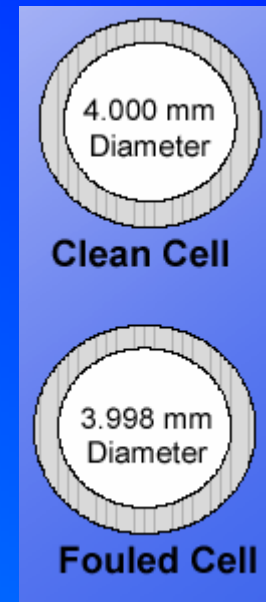
- **Errore di volume**
  - Dovuto alla presenza di materiale estraneo all'interno del campo di misura
- **Celle ad induzione**
  - Il campo di misura delle celle ad induzione (FSI, Aanderaa, etc.), è per definizione, in gran parte esterno alla cella
  - Qualsiasi oggetto nelle vicinanze della cella (altri sensori, l'housing della sonda) ne modifica la lettura
  - Non è possibile proteggere la cella dal biofouling senza alterarne la lettura. Le vernici antifouling rilasciano sostanze tossiche consumandosi, e quindi variano continuamente il volume misurato, introducendo errori
- **Celle ad elettrodi**
  - Il campo di misura delle celle ad elettrodi (SeaBird) è per definizione, totalmente interno alla cella, per cui qualsiasi oggetto esterno alla cella, per quanto vicino, non modifica affatto la lettura
  - Per proteggere la cella dal biofouling senza alterarne la lettura è sufficiente apporre dei cilindri anti-fouling alle estremità della cella

# Sensori Reali

## Conducibilità – Errore di volume

- In una cella con diametro interno di 4.000 mm applichiamo uno strato di vernice antifouling di spessore 1  $\mu\text{m}$ 
  - Il diametro interno della cella diventa 3.998 mm
  - L'errore di salinità che ne deriva è pari a 0.035 PSU
  - L'errore varia nel tempo perché lo strato di vernice si assottiglia rilasciando le tossine

$$\begin{aligned} \text{Salinity Error} &= 35 \left( 1 - \frac{\text{fouled diameter}^2}{\text{clean diameter}^2} \right) \\ &= 35 ( 1 - ( 3.998 )^2 / ( 4.000 )^2 ) = 0.035 \text{ PSU} \end{aligned}$$



# Sensori Reali

## Conducibilità – Variazione del tempo di risposta

- E' qui che casca l'asino!
  - Per tutte le celle, ad induzione o ad elettrodi, il tempo di risposta è funzione ESCLUSIVA della velocità del flusso d'acqua nel suo campo di misura
- Celle ad induzione
  - A causa del campo di misura esterno alla cella, non è possibile inserire queste celle in un flusso controllato perché il tubing altererebbe la lettura, e comunque il flusso nel campo esterno sarebbe comunque fuori controllo
  - Non essendo possibile controllare il flusso d'acqua nella cella non è neanche possibile conoscere il tempo di risposta della cella, che varia ampiamente senza alcuna possibilità di controllo
- Celle ad elettrodi
  - Essendo il campo di misura totalmente interno alla cella, è possibile inserire queste celle in un flusso controllato perché il tubing non altera la lettura
  - Controllando la velocità del flusso all'interno della cella, il tempo di risposta è definibile a priori ed è costante

# Quindi

## Sonde a flusso libero

- Si calcolano i parametri derivati utilizzando dati asincroni affetti da errori non eliminabili
  - Temperatura
    - Errore di riscaldamento viscoso **non eliminabile**
  - Conducibilità
    - Errore di massa termica **non eliminabile**
      - La conducibilità viene determinata considerando una temperatura inferiore a quella effettiva dell'acqua dove è stata misurata la conducibilità
    - Errore per corpi estranei nel campo di misura **non evidenziabile**
    - Il tempo di risposta varia continuamente e **non può essere noto**
- Quale salinità?
  - I valori di temperatura e conducibilità sono affetti da errori e non si riferiscono allo stesso campione d'acqua
  - L'errore di temperatura causa un errore nella conducibilità che poi viene utilizzata nel calcolo della salinità...

# Quindi

## Sonde a flusso controllato (con pompa)

- Si calcolano i parametri derivati utilizzando dati **sincroni corretti**
  - Temperatura
    - Errore di riscaldamento viscoso **eliminato conoscendo la velocità del flusso**
  - Conducibilità
    - Errore di massa termica **eliminato conoscendo la velocità del flusso**
      - La conducibilità viene determinata utilizzando la temperatura effettiva dell'acqua dove è stata misurata la conducibilità
    - Errore per corpi estranei nel campo di misura **evidenziato da picchi che durano il tempo che impiega il campione l'acqua a transitare**
    - Il tempo di risposta è costante e **noto a priori**
- La salinità effettiva!
  - I valori di temperatura e conducibilità sono sincroni

# Conclusioni

In tutto il mondo, senza eccezioni, quando vengono valutate la precisione, l'affidabilità e la qualità di uno strumento, l'utente consapevole utilizza esclusivamente sonde multiparametriche Sea-Bird

**O vorrebbe averlo fatto...**

# Domande?