

### 3. GLI STRUMENTI DI MISURA DELL'UMIDITÀ DELL'ARIA

Negli ultimi anni si è assistito ad un crescente interesse verso i sensori di umidità per il monitoraggio ed il controllo dell'umidità dell'aria non solo in settori di interesse tradizionali, quali quello del condizionamento ambientale e meteorologico, ma anche in campo strettamente industriale. Si pensi ai numerosi processi industriali di controllo nei sistemi di essiccazione, di produzione e di stoccaggio, ma anche all'aumentato numero di applicazioni agroalimentari, museali, aeronautiche. A tale scopo differenti tipi di sensori sono stati sviluppati per soddisfare le diverse condizioni di operabilità richieste in ciascun campo di applicazione.

Prima di descrivere i principi di misura dell'umidità ed i relativi sensori è opportuno evidenziare che la misura di umidità è spesso ottenuta tramite uno o più misure di parametri termogrometrici differenti, quali: il titolo  $w$ , l'umidità relativa  $\phi$ , la temperatura di rugiada  $T_R$ , la temperatura di bulbo umido  $T_U$ , etc., situazione, questa, metrologicamente complessa sia dal punto di vista delle prestazioni di misura che delle limitazioni operative del sensore.

E' utile sottolineare che l'umidità, come qualsiasi altra grandezza di misura, può essere misurata in modo "diretto", se il sensore fornisce il parametro di interesse senza dover conoscerne esplicitamente altri, o in modo "indiretto", valutando per calcolo il valore del parametro di interesse misurandone altri ad esso collegati (UNI 4546).

È quindi possibile raggruppare i diversi principi di misura ed i relativi sensori in due categorie:

- igrometri diretti, che presentano una relazione funzionale esistente tra l'umidità e una proprietà fisica (come ad esempio gli igrometri a capello, gli igrometri capacitivi, ecc.)
- igrometri indiretti, che effettuano una trasformazione termodinamica e misurano quindi l'umidità indirettamente sulla base di una relazione termodinamica (come ad esempio gli igrometri a specchio condensante in cui viene effettuata una trasformazione di raffreddamento isobara e isotitolo, gli psicrometri in cui viene effettuata una trasformazione di saturazione quasi adiabatica).

Una classificazione simile può essere effettuata sulla base del parametro termogrometrico misurato. In particolare, è possibile distinguere tra "sensori relativi" e "sensori assoluti" a seconda che questi misurino un parametro termogrometrico relativo o assoluto.

Nell'ipotesi di un assegnato valore della pressione dell'aria umida (generalmente costante e pari alla pressione di 101325 al livello del mare), è sempre possibile risalire indirettamente da una misura di un parametro relativo al valore di un parametro assoluto attraverso l'ulteriore misura della temperatura dell'aria  $T_a$ , (o di un'altra proprietà termodinamica indipendente). In tal caso, la

misura indiretta sarà ovviamente affetta da un'incertezza funzione delle singole incertezze di misura secondo le note leggi della propagazione.

Nel seguito vengono trattate, tra le numerose metodologie di misura, solo quelle normalmente utilizzate nelle applicazioni industriali. Sono stati, inoltre, brevemente esaminati quei sensori ottenuti tramite miglioramenti tecnologici di principi convenzionali che non hanno trovato ancora estese applicazioni industriali. Sono stati, invece, tralasciati quei sensori basati su principi di misura che non hanno ancora avuto diffusione sul mercato, quali, ad esempio, gli igrometri *spettroscopici*, gli igrometri ottici come quelli a *infrarosso*, ad *ultravioletto (Lyman alpha)* e a *fibre ottiche*, gli igrometri acustici come quelli ad *ultrasuoni* e ad *onde superficiali*, gli igrometri ad *effetto corona*. Sono stati volutamente tralasciati i metodi di tipo primario, come quelli gravimetrici, ed i generatori di umidità a due temperature, a due pressioni e a miscelamento, utilizzati esclusivamente in laboratorio per la taratura. Vanno infine menzionati gli igrometri a viraggio di colore, che sebbene stiano riscuotendo un certo interesse dal punto di vista industriale, possono essere considerati più che degli strumenti di misura degli indicatori qualitativi dell'umidità dell'aria.

Per ognuna delle metodologie di misura esaminate sono state riportate, a valle di una descrizione sintetica del principio di misura e delle tecnologie utilizzate, le principali caratteristiche metrologiche in termini di campo di misura, incertezza e tempo di risposta. Sono, inoltre, evidenziate le principali caratteristiche operative e modalità di installazione.

### **3.1. Igrometri diretti**

Gli igrometri diretti sono probabilmente i sensori tecnologicamente e funzionalmente più semplici, pertanto presentano un costo relativamente basso. Negli ultimi anni la ricerca di nuovi materiali ha portato ad un sensibile incremento dell'affidabilità dei sensori igroscopici diretti, in special modo quelli di tipo elettrico, consentendone un'ampia applicazione in ambito industriale e di laboratorio.

Gli igrometri diretti possono essere classificati in modo diverso a seconda del principio di misura (meccanici, elettrici, a risonanza, ecc), delle tecnologie di produzione (a film sottile, a film spesso, a stato solido, ecc.) o ancora dei materiali utilizzati (polimerici, ceramici, ecc.). Nel seguito vengono suddivisi i diversi sensori in funzione del principio di misura in igrometri meccanici ed igrometri elettrici.

#### **3.1.1. Igrometri meccanici**

Il primo e più popolare dispositivo di misura dell'umidità di tipo meccanico sembra essere stato realizzato per la prima volta dal De Sature. Franchman e Regnault misero ulteriormente a punto tale strumento basato sul fenomeno, a tutti ben noto, dell'elongazione di capelli umani in funzione dell'umidità. Successivamente tali dispositivi sono stati realizzati utilizzando materiali diversi quali membrane, sia animali che sintetiche, carta, tessuti. Nei dispositivi ad uscita

elettrica, la variazione dimensionale del materiale igroscopico in funzione del contenuto di vapor d'acqua assorbito viene trasdotta nella variazione di resistenza elettrica di un potenziometro o di un estensimetro (Figura 3-1).

Il campo di misura tipico di tali strumenti va dal 20% al 90%, per temperature comprese tra 0 e 40°C con una incertezza di misura raramente inferiore a  $\pm 5\%$ . Il sensore, infatti, mostra un comportamento non lineare ed una sensibilità ridotta agli estremi del campo di misura (ad esempio per un igrometro a capelli la sensibilità varia da circa 0.5 mm/UR% m al 15%, fino a circa 0.05 mm/UR% m all'85%).

Le scadenti prestazioni metrologiche, associate alla non trascurabile deriva nel tempo, ai fenomeni di isteresi, ai fenomeni di contaminazione superficiale, all'elevato tempo di risposta ed alla elevata sensibilità alle vibrazioni, rendono utilizzabili tali dispositivi più per indicazioni qualitative che per applicazioni strettamente metrologiche. D'altra parte la semplicità costruttiva rende tali strumenti molto economici e comodi per l'assenza di alimentazione elettrica.

Per tali motivi l'uso in ambiente domestico ne costituisce il principale campo applicativo. Un impiego altrettanto frequente è quello di registratore delle condizioni ambientali associato ad un sensore di temperatura ed ad un sistema di registrazione a pennino. In tal caso il sistema prende il nome di termoigrografo.

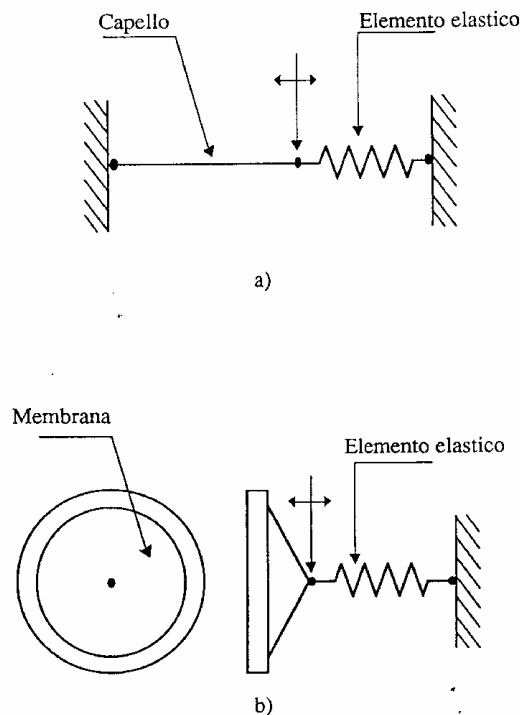


Figura 3-1 - Sensori di umidità igroscopici a rilevazione meccanica: a) a capello  
b) a membrana

### 3.1.2. *Igrometri elettrici*

I sensori di umidità igroscopici elettrici sono basati sulla variazione delle proprietà elettriche dell'elemento sensibile in funzione della quantità di acqua adsorbita o assorbita dall'ambiente di misura. Il principio di funzionamento dipende dal tipo di elemento sensibile che può misurare una variazione di capacità, una variazione di resistenza o più in generale una variazione di impedenza.

Gli ***igrometri resistivi*** misurano la variazione di resistenza dell'elemento sensibile. Si distinguono due modi di conduzione elettrica per questo tipo di sensori: conduzione di superficie e conduzione di massa. Nel modello a conduzione di superficie, i contatti elettrici sono disposti sulla faccia del film igroscopico di cui viene misurata la variazione di resistenza. Nel modello a conduzione di massa, invece, si misura la variazione della conduttività nella massa del materiale igroscopico interposto tra i due elettrodi. E' inoltre possibile distinguere tra sensori che sfruttano la variazione di conducibilità ionica di una opportuna soluzione elettrolitica (ad esempio di LiCl) al variare del contenuto di vapor d'acqua presente nell'ambiente di misura, oppure la variazione di conducibilità elettronica.

Il primo sensore del tipo a *variazione di conducibilità ionica* fu sviluppato da F. W. Dunmore intorno alla fine degli anni '30 si basa sulla natura igroscopica del sale utilizzato. L'adsorbimento del vapor d'acqua contenuto nell'aria causa una variazione di resistenza elettrica, misurata in c.a. per evitare fenomeni di polarizzazione, che risulta proporzionale all'umidità relativa. Il campo di misura caratteristico di tali igrometri è però molto ristretto, pertanto, per coprire campi di misura più estesi (tipicamente 15÷90 %), è necessario disporre di una batteria di sensori aventi diverse percentuali di LiCl.

Attualmente gli igrometri resistivi ionici più diffusi sono quelli polimerici che sfruttano l'incremento della conducibilità ionica di alcuni polimeri organici al variare della quantità di acqua adsorbita. Ciò è dovuto all'incremento della mobilità ionica e/o alla variazione della concentrazione dei portatori di carica. Un sensore di questo tipo molto noto è il cosiddetto "elemento di Pope". Analogamente a quello al LiCl, il sensore è costituito da un tubo o da una superficie piana polimerica su cui sono rispettivamente avvolti a spirale o disposti a greca due fili paralleli a formare due elettrodi (Figura 3-2). L'incremento di acqua adsorbita provoca come detto un aumento della conducibilità superficiale. La resistenza elettrica del film è di circa  $10^7 \Omega$  intorno al 30-40 %U.R. e decresce esponenzialmente con l'aumentare dell'umidità relativa.

La caratteristica del sensore è pertanto di tipo non lineare del tipo:

$$R = \alpha \cdot \exp(-\beta \cdot \phi) \quad (3.1)$$

avendo indicato con R la resistenza del film resistivo e  $\alpha$  e  $\beta$  due coefficienti caratteristici.

Un esempio di substrato utilizzato è il polistirene trattato con acido solforico. A causa della struttura chimica facilmente compatibile è anche possibile

aumentarne la sensibilità attraverso la copolimerizzazione. Spesso il polimero si trova accoppiato come elemento igroscopico insieme ad altri materiali come allumina o silicio. Un problema di non poco conto nell'utilizzare questi materiali come sensori di umidità è la loro facile idrosolubilità e la poca resistenza agli agenti atmosferici, anche se possono comunque avere un impiego a lungo termine dopo essere stati stabilizzati con una copertura costituita da una pellicola di resina. Inoltre il sensore risulta altresì molto sensibile alla temperatura rendendo necessaria una termocompensazione.

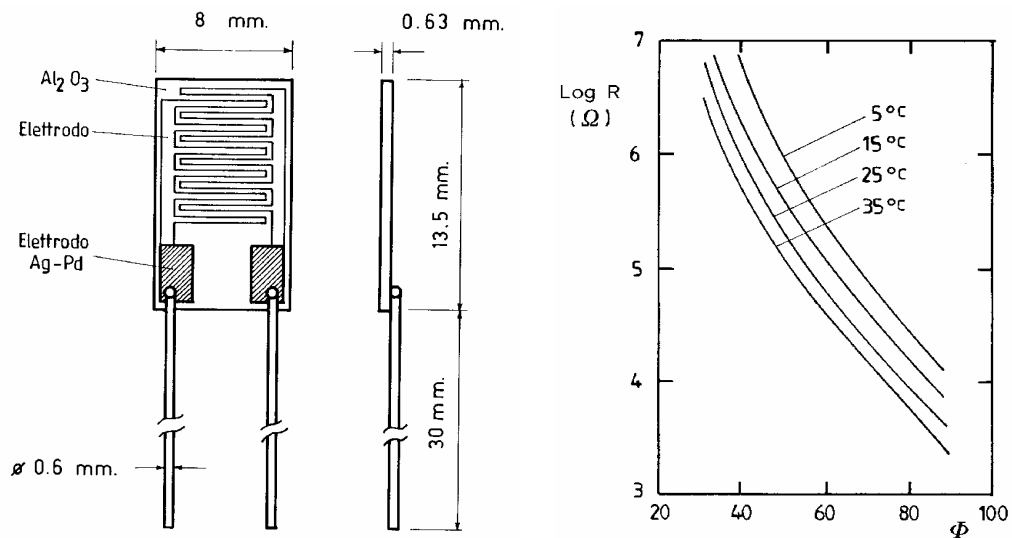


Figura 3-2 - Schema costruttivo e curva caratteristica tipica di sensori resistivi (Norton, 1989)

Per quanto riguarda gli igrometri a variazione di conducibilità elettronica, essi sono costruttivamente simili a quelli ionici, ma risultano ancora poco utilizzati rispetto a questi ultimi. Tra essi i più diffusi sono probabilmente i sensori a film di carbonio. Essi consistono in un film igroscopico resistivo realizzato sia in forma cilindrica che in "wafer". Il film igroscopico è costituito generalmente da un supporto in plastica, sul quale sono depositati i due elettrodi e da un film sottile di cellulosa gelatinosa nel quale sono contenuti polveri di carbonio in sospensione.

La maggior parte dei sensori di tipo resistivo presenta dei campi di utilizzo più limitati rispetto ai sensori di tipo capacitivo. Le temperature di impiego solitamente vanno dai  $-10^{\circ}C$  ai  $60^{\circ}C$  con un range di umidità che varia dal 5% al 95% r.h.. I sensori ceramici resistivi presentano, rispetto ai polimerici resistivi, sia un campo di impiego in temperatura più esteso, che la possibilità di operare in condizioni di saturazione. Sensibilità, stabilità e affidabilità del sensore dipendono naturalmente dalla particolare struttura chimica del materiale adoperato. Mediamente l'incertezza risulta circa pari al 2-5%. I tempi di risposta tipici sono nell'ordine del minuto, ma esistono sensori che presentano tempi di risposta anche

inferiori. Infine, per alti valori di umidità possono presentarsi fenomeni di deriva della caratteristica soprattutto in presenza di gas estranei, quali alcool e ammine, mentre gli idrocarburi aromatici, vapori acidi ed ossidi acidi come SO<sub>2</sub> e NO<sub>2</sub> possono essere addirittura distruttivi.

Gli ***igrometri capacitivi*** presentano un funzionamento simile ad un condensatore in cui il dielettrico è un materiale igroscopico (solitamente polimerico o ceramico). Generalmente uno degli elettrodi è permeabile al vapor d'acqua. L'equilibrio igrometrico che si stabilisce tra l'isolante e l'ambiente, modifica la permittività relativa del dielettrico. Il risultato è una variazione della capacità dell'elemento sensibile che si trasforma in un'informazione rappresentativa dell'umidità relativa dell'aria. Questo tipo di dispositivo è sensibile all'umidità relativa poiché esso è in equilibrio termico con l'ambiente da caratterizzare. Le caratteristiche elettriche del dispositivo rendono trascurabile l'energia scambiata con l'ambiente per autoriscaldamento. Nella maggior parte dei casi la grandezza del sensore è ridotta e quindi direttamente utilizzabile "in situ".

Lo schema costruttivo tipico di tale sensore è mostrato in Figura 3-3; esso consta di un substrato isolante sul quale è depositato mediante attacco chimico l'elettrodo inferiore costituito da due contatti gemelli. Un sottile film polimerico, avente uno spessore di circa 1 µm, ricopre tale strato e fa da supporto all'elettrodo superiore, permeabile al vapor d'acqua, depositato sotto vuoto su tale film. I materiali polimerici utilizzati per sensori commerciali sono per esempio acetato di cellulosa, polistirene, poliammide. Il sensore presenta una caratteristica tale che all'aumentare dell'umidità relativa (e quindi della quantità di acqua assorbita dal polimero) aumenta la costante dielettrica del polimero assorbente.

Sostanzialmente simili a quelli polimerici dal punto di vista costruttivo i sensori ceramici sono costituiti da uno strato di materiale ceramico poroso sulle cui facce sono disposti due elettrodi generalmente costituiti da un materiale a porosità più elevata. I sensori ceramici essendo realizzati con processi di sinterizzazione sono molto stabili sia chimicamente che fisicamente. I materiali tipicamente utilizzati sono ceramiche porose sinterizzate ottenute a partire da ossidi di cromo, magnesio, ferro, stronzio, stagno ed alluminio. Sono in fase di studio anche le caratteristiche di sensori basati su ceramiche realizzate a partire da idrossidi di vari metalli sinterizzati.

La curva caratteristica dei sensori capacitivi può essere descritta con buona approssimazione da una relazione del tipo:

$$C = \left[ \nu \cdot (\epsilon_w^{1/3} - \epsilon_f^{1/3}) + \epsilon_f^{1/3} \right]^3 \cdot \epsilon_o \frac{A}{L} \quad (3.2)$$

avendo indicato con  $\epsilon_f$ ,  $\epsilon_w$  e  $\epsilon_o$  le costanti dielettriche dell'acqua, del film sensibile e nel vuoto,  $\nu$  la frazione volumetrica dell'acqua assorbita dal sensore,  $A$  la superficie degli elettrodi ed  $L$  lo spessore del dielettrico.

Da tale relazione si evince che all'aumentare del rapporto tra la costante dielettrica dell'acqua e quella del film sensibile aumenta la sensibilità del sensore stesso. Inoltre la caratteristica è funzione della frequenza eccitante (Figura 3-3).

Il campo di misura dei sensori capacitivi è molto ampio e varia tra circa il 5 ed il 100%. È opportuno comunque tener presente che come per gli igrometri resistivi molti materiali polimerici non possono essere utilizzati in condizioni di saturazione a causa della solubilità del polimero stesso; ciò ovviamente ne limita il campo di misura in condizioni di saturazione.

L'incertezza di misura risulta talvolta migliore del  $\pm 2\%$  con ottime caratteristiche di linearità almeno fino al 90%. Il tempo di risposta è variabile a seconda del tipo di polimero (o materiale ceramico) e della sua porosità da pochi secondi (per l'acetato di cellulosa) a circa un minuto (per la poliammide). Il campo di impiego in temperatura è generalmente simile a quello dei sensori resistivi e dipende dal tipo di film utilizzato.

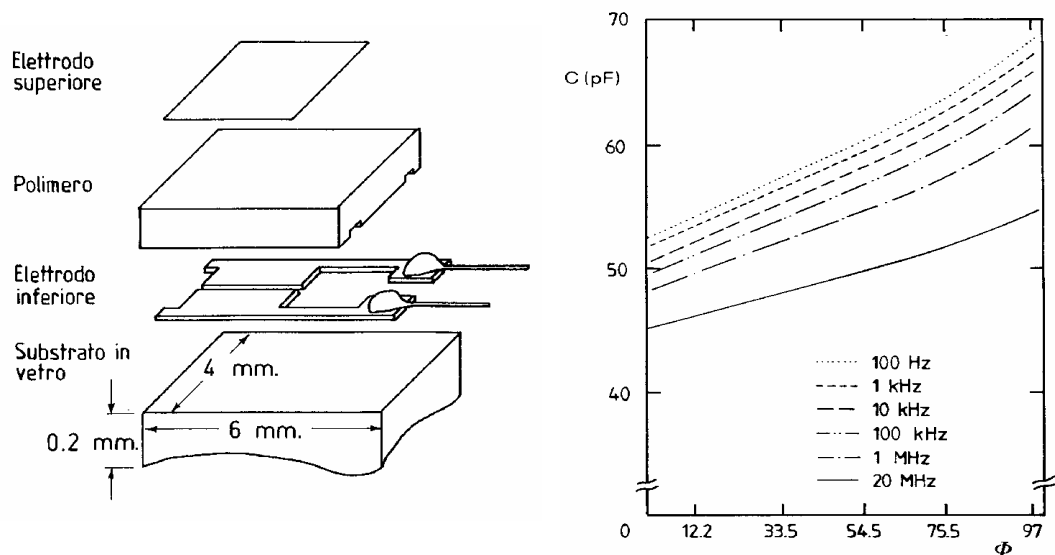


Figura 3-3 - Schema costruttivo e curva caratteristica tipica di un sensore capacitivo

I sensori a variazione di impedenza ad ossido di alluminio, malgrado la loro non eccellente stabilità, sono molto diffusi per uso industriale per i loro ottimi tempi di risposta, anche in corrispondenza di bassi valori di umidità. Essi, inoltre, sono adatti alla misura in presenza di idrocarburi sia gassosi che liquidi e possono soddisfare i requisiti di sicurezza intrinseca.

Il sensore consiste di uno strato sottile di ossido di alluminio depositato su di un metallo stabile che ha la funzione di elettrodo. In particolare, se lo spessore del film di ossido è in film spesso (maggiore di  $1\ \mu\text{m}$ ) il sensore risulta sensibile all'umidità relativa, se invece è in film sottile (minore di  $0.3\ \mu\text{m}$ ) il sensore risulta sensibile all'umidità assoluta. La tecnica attualmente più utilizzata è quella di deposito in film sottile in seguito descritta.

In tali sensori un sottile rivestimento, usualmente in oro, é depositato per evaporazione sotto vuoto sull'ossido per formare il secondo elettrodo. Tale elettrodo é tanto sottile da consentire alle molecole d'acqua il passaggio dall'ambiente di misura verso lo strato poroso e viceversa. Attualmente i sensori possono essere costruiti utilizzando uno strato di silicio che funziona da base.

Il vapor d'acqua che circonda l'elemento viene adsorbito o desorbito dall'ossido di alluminio fino a raggiungere una condizione di equilibrio con l'ambiente circostante. La quantità di acqua adsorbita, direttamente proporzionale alla pressione di vapore ed inversamente proporzionale alla temperatura  $T$ , determina una variazione sia della costante dielettrica che della conducibilità superficiale dell'ossido di alluminio. In figura 4 sono mostrati rispettivamente lo schema costruttivo e la curva caratteristica tipica di un sensore ad ossido di alluminio. Dalla curva caratteristica si evince che essa é approssimativamente esponenziale e ciò implica una minore sensibilità per bassi valori di umidità.

Sensori tecnologicamente avanzati sono stati ottenuti utilizzando la tecnologia a film sottile depositando l'alluminio su una base conduttiva di silicio. In quest'ultima, sono alloggiati un riscaldatore ed un sensore per la misura della temperatura dell'elemento di ossido. Ottimi risultati sono stati ottenuti attraverso un sistema di condizionamento del segnale mediante algoritmi implementati per via software ed hardware in grado di effettuare le dovute compensazioni alle grandezze di influenza tipiche del sensore.

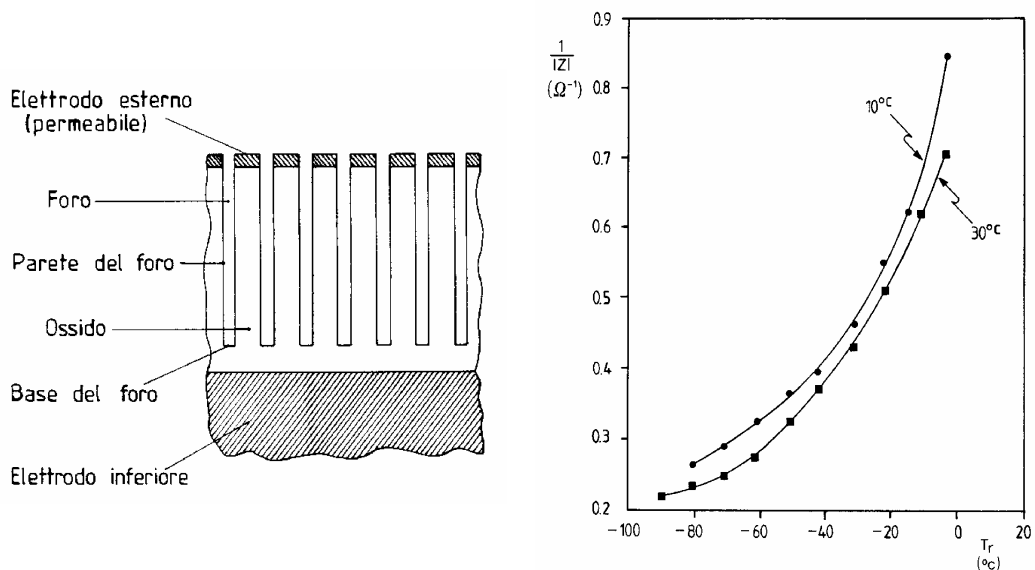


Figura 3-4 - Schema costruttivo e curva caratteristica tipica di un sensore all'ossido di alluminio.

Il campo di misura di tali sensori é generalmente compreso, in termini di temperatura di rugiada, tra  $-30$  e  $60$  °C, ma esistono realizzazioni che consentono misure tra  $-110$  e  $60$  °C ( $0.01 \div 200000$  ppm<sub>v</sub>). L'incertezza di misura varia tra circa  $\pm 2$  °C, in un campo compreso tra  $-30$  e  $60$  °C, fino ad un massimo di  $\pm 5$  °C



per temperature di rugiada inferiori, mentre il tempo di risposta é di pochi secondi sull'intero campo di misura. Essi, inoltre, possono essere utilizzati sia a bassissime che ad elevate pressioni (da  $6.7 \cdot 10^{-1}$  a  $3.4 \cdot 10^7$  Pa) e con velocità del flusso di misura variabili da 0 a 0.5 m/s (in aria).

I sensori ad ossido di alluminio presentano effetti rilevanti sulla caratteristica umidità-impedenza in funzione della temperatura, dell'invecchiamento e della contaminazione superficiale. Generalmente un aumento della temperatura comporta uno spostamento verso il basso della caratteristica

I campi di applicazione sono molto vari in quanto essi possono essere utilizzati sia per gas che per liquidi; in particolare, vengono utilizzati nell'analisi di idrocarburi, gas criogenici, gas naturale, aria essiccata, olii, liquidi organici, ecc..

### 3.2. Altri sensori diretti

Accanto ai sensori tradizionali su riportati sono stati recentemente introdotti sul mercato alcuni interessanti sensori diretti innovativi tra cui i sensori FET e quelli piezoelettrici.

I ***sensori FET*** sono basati sulle proprietà dei transistor ad effetto di campo. Tale tipologia di sensori viene realizzata integrando il sensore di umidità con un diodo, utilizzato come termoelemento, sullo stesso chip e fabbricato secondo gli standard e le tecnologie dei circuiti integrati. La membrana sensibile all'umidità é costituita ad esempio da acetato di cellulosa ed é posta tra due elettrodi porosi in oro.

I ***sensori piezoelettrici*** misurano la variazione della frequenza di risonanza del sensore costituito da: i) un cristallo di quarzo, che funge da elemento per il controllo della frequenza in un circuito oscillante; ii) un rivestimento igroscopico, generalmente di tipo polimerico che ricopre il cristallo oscillante; iii) un sistema di misura della variazione della frequenza di risonanza. Tali sensori presentano un campo di misura di  $0 \div 20.000$  ppm<sub>v</sub> con un incertezza di misura variabile dell'ordine del 2 % V.L; essi risultano sensibili alla contaminazione superficiale e ad alcuni agenti chimici contaminanti.

### 3.3. Igrometri indiretti

Tutti gli igrometri indiretti effettuano la misura di umidità sulla base di una trasformazione termodinamica e misurano quindi l'umidità relativa indirettamente sulla base di una relazione termodinamica.

In particolare negli igrometri a specchio condensante viene effettuata una trasformazione di raffreddamento isobara e isotitolo fino a raggiungere le condizioni di saturazione; la condizione di saturazione viene raggiunta invece in modo diverso negli psicrometri e nei saturatori adiabatici in cui viene effettuata una trasformazione adiabatica; negli igrometri elettrolitici la trasformazione è invece quella di essiccazione. In ogni caso per ottenere la misura dell'umidità

nelle condizioni iniziali è necessaria la conoscenza delle trasformazioni termodinamiche utilizzate e delle relative relazioni.

Sebbene gli igrometri indiretti siano funzionalmente più complessi di quelli diretti, essi sono generalmente più accurati e vengono per lo più utilizzati in laboratorio come campioni di trasferimento.

### **3.3.1. Igrometri a specchio condensante**

La condensazione del vapore atmosferico su di una superficie fredda è stato da lungo tempo utilizzata come indice del contenuto di vapor d'acqua presente nell'aria. Basti pensare che 200 anni fa la tecnica dello specchio raffreddato, su cui osservare l'incipiente condensazione del vapore, era già utilizzata.

Il principio di misura, comune a tutti gli igrometri a specchio condensante, è basato sulla progressiva diminuzione della temperatura superficiale di un elemento sensibile. La conseguente diminuzione della temperatura dell'aria atmosferica che lo lambisce prosegue fino al raggiungimento della condizione di saturazione con la conseguente formazione di un sottile film liquido (o solido) sull'elemento. La trasformazione termodinamica corrisponde ad un raffreddamento isotitolo a pressione costante fino alla temperatura di rugiada  $T_r$  o di brina  $T_b$ . Infatti in particolari condizioni termoigrometriche il raffreddamento del campione di aria può provocare un passaggio diretto del vapor d'acqua dalla fase vapore a quella solida (temperatura di brina o frost point). L'istante in cui misurare la  $T_r$  (o  $T_b$ ) è fissato dalla rilevazione dell'incipiente condensazione; è, quindi, necessario disporre di un opportuno sistema che fornisca tale informazione.

Esistono svariate metodologie di rilevazione dell'incipiente condensazione del vapor d'acqua tra cui quella i) ottica (a specchio condensante); ii) capacitiva; iii) resistiva; iv) nucleare; v) della frequenza di risonanza; vi) ad iniezione d'acqua. In seguito sarà descritta in dettaglio solo quella ottica poiché è sicuramente quella che trova largo impiego in ambito industriale e scientifico.

Il sistema di misura risulta in generale costituito dai seguenti sottosistemi: un sistema di rilevazione della condensa sullo specchio; un sistema di regolazione e controllo della temperatura dello specchio; un sistema di misura della temperatura. Negli igrometri a specchio condensante la rilevazione delle condizioni di incipiente condensazione avviene attraverso fotosensori ed in particolare mediante la variazione dell'indice di riflessione associato ad un fascio luminoso incidente sulla superficie raffreddata. In tal caso il sistema di rilevazione dell'incipiente condensazione del vapor d'acqua è costituito da uno o due rilevatori ottici sensibili alla variazione della radiazione riflessa dalla superficie raffreddata a causa della formazione di condensa o di ghiaccio. Il sistema di controllo e regolazione mantiene costante lo spessore del film mediante dei cicli di raffreddamento e riscaldamento della superficie. Tale superficie di condensazione viene denominata specchio per la sua particolare finitura superficiale. La misura della temperatura di rugiada viene, infine, effettuata mediante un sensore di temperatura (normalmente una termoresistenza al platino) collocata al di sotto

della superficie dello specchio per minimizzare le inevitabili incertezze dovute ai gradienti superficiali.

Lo strumento di misura é mostrato schematicamente in Figura 3-5. L'elemento refrigerante raffredda lo specchio sulla cui superficie incide una radiazione luminosa. Tale raffreddamento é generalmente realizzato mediante un elemento Peltier che é utilizzabile anche per il successivo riscaldamento una volta effettuata la misura. Il raffreddamento dello specchio é causa dell'incipiente condensazione del vapore, il che provoca una variazione dell'intensità luminosa misurabile da un fotosensore opportunamente disposto. In particolare, disponendo di almeno due fotosensori investiti, uno dal fascio luminoso relativo allo specchio asciutto e l'altro dal fascio riflesso nelle condizioni di incipiente condensazione, è possibile rilevare anche una piccola quantità di condensa presente sullo specchio poiché essa genera una brusca variazione di segnale all'uscita del ponte in cui sono inseriti i fotosensori. Infatti, per aumentare la sensibilità di misura e per compensare eventuali variazioni di intensità luminosa emessa dalla sorgente, si fa generalmente ricorso a strutture a ponte di fotorilevatori. Questi ultimi costituiscono i due rami attivi di un ponte di misura; é ovvio, che la posizione dei due fotosensori é scelta in base a considerazioni statistiche riguardanti la distribuzione spaziale dell'intensità della luce diffusa in condizioni di incipiente condensazione. Per effettuare una misura accurata della temperatura dello specchio é necessario incollare una termoresistenza sotto la superficie dell'elemento riflettente.

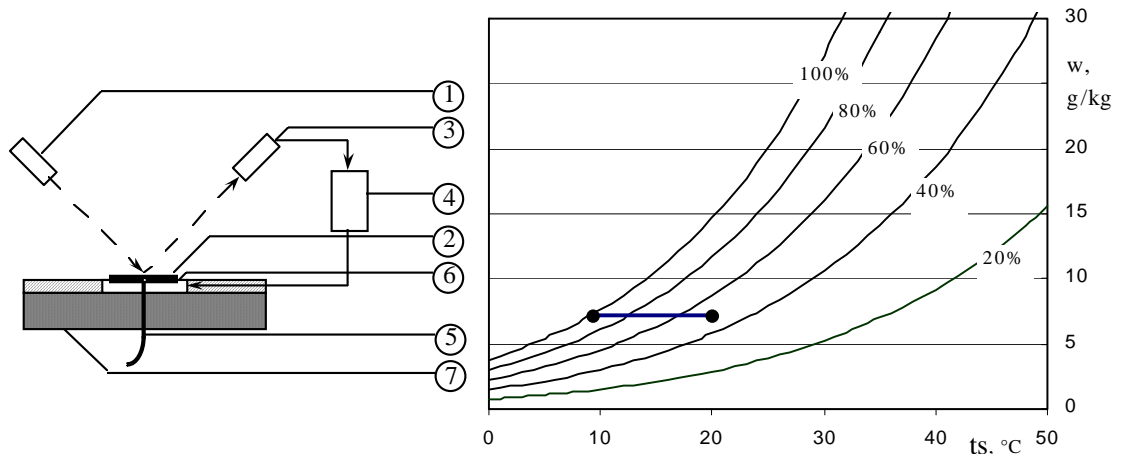


Figura 3-5 – Schema costruttivo e trasformazione termodinamica di un igrometro a condensazione con rilevazione ottica: (1) sorgente di luce; (2) specchio riflettente; (3) rilevatore di condensa; (4) sistema di controllo; (5) sensore di temperatura; (6) sistema di raffreddamento/riscaldamento (generalmente un elemento Peltier); (7) uno scambiatore).

Particolari problemi insorgono in quelle situazioni in cui bisogna effettuare il monitoraggio continuo quando il valore dell'umidità cambia nel tempo (ad

esempio per il controllo di processo). Per ovviare anche a tale problema sono stati messi a punto alcuni sensori a specchio condensante con un sistema di regolazione della temperatura dello specchio che non funziona stabilmente sulla temperatura di rugiada, ma oscilla continuamente tra la temperatura dell'aria e quella di rugiada.

In generale é possibile distinguere due diverse tipologie: "a prelevamento" ed "ad immersione" (anche detta "in situ"). Nel caso di misuratori "in situ" la sonda, come per gli altri sensori di umidità, viene posizionata all'interno della camera di prova evitando in alcune realizzazioni che l'elettronica venga portata a temperature o ad umidità relative esterne al proprio campo di corretto funzionamento. Nel caso, invece, di misuratori "a prelevamento" il sensore andrà posizionato in un circuito parallelo al campione in modo da non influenzare o non essere influenzato da quest'ultimo.

I campi di misura di tali strumenti sono compresi tra  $-100$  e  $100^{\circ}\text{C}$  in termini di temperatura di rugiada; più propriamente il campo di misura dovrebbe essere espresso in termini di massima depressione (differenza tra la temperatura dell'aria e quella di rugiada) non esistendo alcuno strumento che riesce a misurare depressioni pari a  $200^{\circ}\text{C}$ . La depressione, e quindi la temperatura di rugiada misurabile, è funzione della potenza dell'elemento refrigerante che può essere a due, tre, quattro o cinque stadi e può inoltre presentare sistemi di scambio termico ausiliari ad aria a ventilazione forzata, ad acqua o ad evaporazione.

Sicuramente lo svantaggio maggiore, che caratterizza questo tipo di sensore, é la sua complessità; ciò giustifica i costi elevati in paragone agli altri igrometri commerciali. Per quanto riguarda il tempo di risposta, esso é funzione della velocità di riscaldamento/raffreddamento dello specchio; per gli igrometri industriali a specchio raffreddato tipicamente si ha circa  $1^{\circ}\text{C/s}$ .

### 3.3.2. *Psicrometri*

I sensori di umidità psicrometrici, comunemente denominati *psicrometri*, sono stati nel passato i dispositivi maggiormente utilizzati nel campo della meteorologia e della termotecnica. Questa tecnica di misura, che risale ai primi dell'ottocento, si basa sulla misura della differenza di temperatura (depressione) esistente tra due termometri: il primo misura la temperatura di dell'aria (anche denominata temperatura di bulbo asciutto), il secondo la temperatura alla quale si porta un termometro mantenuto costantemente bagnato mediante una garza ed investito dalla corrente d'aria umida (denominata temperatura di bulbo umido).

A rigore la temperatura di bulbo umido non è una proprietà di stato sebbene in molti testi esistano relazioni e diagrammi che correlano tale grandezza ad altre proprietà di stato. La ragione di ciò è che spesso si usa l'approssimazione di considerare la temperatura di bulbo umido coincidente con la temperatura di saturazione adiabatica. E' infatti stato largamente dimostrato sperimentalmente che in particolari condizioni sperimentali (i.e. carico termico radiativo trascurabile e velocità dell'aria maggiore di circa  $2-3$  m/s) le due grandezze possono considerarsi praticamente coincidenti. E' evidente che tale approssimazione comporta comunque un aumento dell'incertezza di misura e che solo una taratura

può garantire misure accurate. A testimonianza della complessità dell'argomento basti pensare che più di 1000 lavori teorici e sperimentali sugli psicrometri sono stati recentemente censiti.

Differenti tipi di psicrometri sono disponibili sul mercato; essi possono essere classificati in due categorie: psicrometri a ventilazione naturale e a ventilazione forzata. Questa distinzione non è però sufficiente a caratterizzare i diversi tipi di psicrometri che si differenziano oltre che per il metodo di ventilazione, per la direzione del flusso (assiale o trasversale), per la schermatura dei termometri (doppia o singola), per il tipo di termometro (a bulbo, a termocoppia, a resistenza), per il tipo di garza (a tessuto, a micropori, ecc.), per l'alimentazione dell'acqua (continua o discontinua).

Tutti questi fattori possono influenzare la caratteristica dello strumento e quindi la costante psicrometrica. Infatti numerosi studi teorici e sperimentali hanno dimostrato che quest'ultima non è una costante ma dipende oltre che dallo stato termodinamico, dal tipo di psicrometro. August, Maxwell e Arnold hanno posto le basi della moderna teoria psicrometrica. Threlkeld, Harrison, Kusuda, Wylie, e Sonntag hanno invece approfondito la teoria dello strumento contribuendo alla messa a punto dell'attuale modello teorico di funzionamento dello strumento. In particolare Wylie, modificando la teoria di Kusuda, ha messo a punto un modello su uno psicrometro standard a flusso trasversale ventilato. La teoria di Wylie però sebbene verificata sperimentalmente su uno psicrometro a flusso assiale non risulta generalizzabile come dimostrano gli studi sperimentali di Sonntag.

Lo psicrometro, sebbene la complessità del suo principio di misura, è particolarmente semplice dal punto di vista costruttivo. Esso è costituito da una coppia di sensori di temperatura, dove il bulbo di uno è mantenuto asciutto mentre l'altro, rivestito di un manicotto, è impregnato di acqua in fase liquida (Figura 3-6). Solitamente tale manicotto è costituito da una garza di cotone, ma esistono come accennato realizzazioni in altri tessuti o materiali ceramici porosi. Ai fini della misura risulta essenziale che il manicotto sia permanentemente impregnato d'acqua; ciò è reso possibile per strumenti discontinui bagnandoli di volta in volta, mentre per psicrometri a funzionamento continuo lo strumento è corredato da un serbatoio di alimentazione. La maggior parte degli psicrometri tradizionali utilizza termometri a riempimento a mercurio o ad alcool, ma le realizzazioni più moderne presentano termometri ad uscita elettrica che consentono una più semplice interfacciabilità ad unità di elaborazione dati con calcolo e visualizzazione diretta dell'umidità relativa. La coppia di termometri è generalmente inserita in uno o due condotti metallici che fungono da schermi radiativi. L'aria umida viene forzata a lambire il termometro da un sistema manuale di rotazione (e.g. sling psicrometer) oppure da una ventolina (e.g. aspirated psicrometer).

Il funzionamento dello psicrometro è descritto dalla relazione di Ferrel semplificata:

$$x = x_{s,t_u} - A \cdot (t_s - t_u) \quad (3.3)$$

da cui è facile ricavare le relazioni di misura dell'umidità relativa e del titolo:

$$\phi = \frac{x_{s,t_u} - A \cdot (t_s - t_u)}{x_{s,t_s}} \tag{3.4}$$

$$w = \frac{M_w}{M_a} \frac{x_{s,t_u} - A \cdot (t_s - t_u)}{1 - x_{s,t_u} + A \cdot (t_s - t_u)}$$

dove  $A$  è la cosiddetta costante psicrometrica;  $t_s$  ( $T_s$ ) e  $t_u$  ( $T_u$ ) sono la temperatura di bulbo asciutto e di bulbo umido rispettivamente in °C (K);  $x_{s,t_s}$  e  $x_{s,t_u}$  sono le frazioni molari nelle condizioni di saturazione alla temperatura  $t_s$  e  $t_u$ ;  $x$  è la frazione molare dell'aria umida;  $\phi$  è l'umidità relativa dell'aria umida;  $w$  il titolo dell'aria umida.

La relazione di Ferrel su riportata è evidentemente una semplificazione dell'equazione di bilancio dell'energia effettuata sul termometro a bulbo umido:

$$\dot{Q}_c + \dot{Q}_r + \dot{Q}_k = \dot{Q}_M - \dot{Q}_v \tag{3.5}$$

dove  $Q_c$  rappresenta il flusso convettivo tra aria e termometro,  $Q_r$  il flusso radiativo tra termometro e schermo radiativo,  $Q_k$  il flusso conduttivo lungo lo stelo del sensore (questo può essere in prima approssimazione trascurato) e  $Q_M$  il flusso di calore associato all'evaporazione dell'acqua dal termometro a bulbo umido ed infine  $Q_v$  il flusso di calore associato al flusso di acqua liquida dal serbatoio.

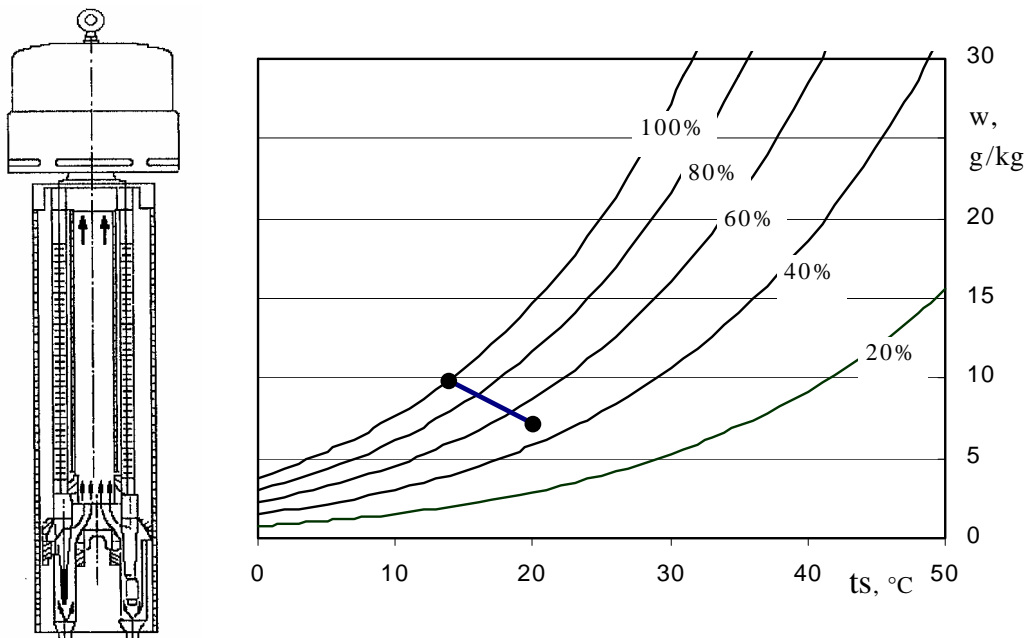


Figura 3-6 - Schema costruttivo e trasformazione termodinamica di uno psicrometro.

Il valore della costante psicrometrica adottato dal WMO nel 1990 per un igrometro Assmann è di  $6.53 \cdot 10^{-4}$  per acqua in fase liquida e di  $5.75 \cdot 10^{-4}$  per acqua in fase solida. Tali valori sono stati calcolati da Sontag sulla base di numerose prove sperimentali di diversi sperimentatori.

Il campo di misura degli psicrometri generalmente varia all'incirca tra il 10% ed il 100% in un campo di temperatura solitamente compreso tra 5 e 60 °C. Esistono tuttavia versioni di psicrometri che possono funzionare anche al di sotto dello 0°C su film di ghiaccio e a valori di umidità ridotti. Il tempo di risposta è funzione della velocità dell'aria e tipicamente dell'ordine di qualche minuto per velocità dell'aria di circa 3 m/s.

L'incertezza di misura è generalmente compresa tra il  $\pm 3-5\%$  UR, anche se per applicazioni di laboratorio esistono realizzazioni più precise ( $\pm 1-2\%$  UR). Anche in un sistema di misura correttamente progettato, è necessario tenere in conto fattori come la contaminazione del manicotto impregnato d'acqua, o una velocità dell'aria diversa da quella progettuale. Per tale motivo è indispensabile quindi pulire periodicamente lo psicrometro (ed in particolare la garza e lo schermo radiativo), utilizzare acqua distillata (ed attendere un tempo sufficiente all'equilibrio termico di questa con l'ambiente), effettuare la misura minimizzando i carichi radiativi e le variazioni della velocità da quella nominale, tenere in debito conto delle variazioni della costante psicrometrica con la temperatura e soprattutto delle variazioni dell'umidità relativa con la pressione.

### 3.3.3. *Igrometri a sali saturi*

Il sensore di umidità a sali saturi in questione, "saturated salt dew point sensor", è molto simile all'elemento del Dunmore descritto in precedenza, pur sfruttando un principio di misura alquanto diverso. Il funzionamento del sensore è basato sul principio che la pressione di vapore di una soluzione salina è inferiore a quella dell'acqua. In particolare, essa aumenta al crescere della temperatura e diminuisce all'aumentare della concentrazione del sale disciolto. Quando il vapore d'acqua presente in un campione di aria umida condensa su di un sale igroscopico forma, sulla superficie di quest'ultimo, un sottile strato di soluzione satura. Per quanto detto, la pressione di vapore di questo strato è inferiore a quella del vapore dell'acqua contenuta nell'aria circostante. Se la soluzione salina viene riscaldata, la pressione di vapore della soluzione aumenta fino ad eguagliare quella del vapore d'acqua ed i fenomeni di condensazione ed evaporazione raggiungono una condizione di equilibrio. La temperatura della soluzione corrispondente a tale condizione è direttamente correlata alla temperatura di rugiada dell'aria.

Dal punto di vista costruttivo, l'igrometro è costituito da un tubo su cui è alloggiato un manicotto assorbente impregnato da una soluzione salina di LiCl al 5% e ricoperto da due elettrodi (Figura 3-7). Alimentando il circuito elettrico in c.a., in modo da evitare la polarizzazione degli elettrodi, l'avvolgimento si riscalda per effetto Joule.

Il campo di misura in termini di temperatura di rugiada è compreso tra -40 °C e 60°C in un ampio campo di impiego in temperatura dell'aria.

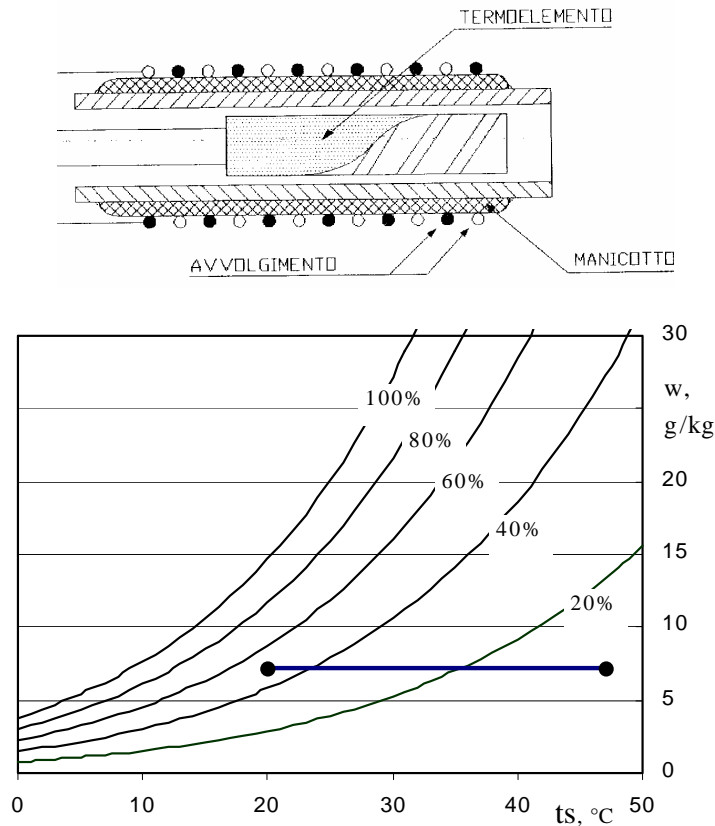


Figura 3-7 - Schema costruttivo e trasformazione termodinamica di un igrometro a sali saturi.

L'incertezza di misura é compresa tra  $\pm 0.5$  e  $\pm 1.5$  °C, mentre, il tempo di risposta é compreso tra i 10 e i 180 s ad una velocità dell'aria incidente di circa  $0.5 \div 2$  m/s .

Il principale vantaggio dei sensori a sali saturi, rispetto a tutti gli altri a condensazione, é dovuto al fatto di poter misurare la temperatura di rugiada riscaldando piuttosto che raffreddando l'elemento sensibile. Un ulteriore vantaggio rispetto agli altri sensori elettrici é la scarsa dipendenza dalla contaminazione superficiale rinnovando periodicamente il LiCl. Inoltre in termini di rapporto costo/prestazioni i sensori a sali saturi si presentano più vantaggiosi rispetto agli igrometri a condensazione e ad elettrolisi.

La principale limitazione di questo tipo di sensore é dovuta all'impossibilità di utilizzo quando la pressione parziale del vapore dell'aria umida é inferiore alla pressione di vapore della soluzione di LiCl. Ciò evidentemente limita verso il basso il campo di misura dello strumento ( $UR\% > 11\%$ ). Nell'utilizzo dei sensori a sali saturi bisogna prestare particolare attenzione alla velocità dell'aria ed alla presenza di impurità superficiali. Infatti, una velocità maggiore di quella consigliata dal costruttore comporta generalmente un aumento dello scambio termico convettivo ed un aumento dell'evaporazione; ciò determina un valore



della temperatura misurata più bassa di quella teorica. Al contrario la presenza di impurità comporta, generalmente, un ritardo nell'evaporazione del vapore assorbito e quindi una temperatura misurata maggiore di quella teorica.

**3.3.4. Igrometri elettrolitici**

Gli igrometri elettrolitici, talvolta anche denominati igrometri coulombmetrici, sono specificamente utilizzati per misure di aria umida con bassi contenuti di vapor d'acqua.

Una portata di aria umida, opportunamente controllata, viene inviata alla cella sensibile essiccante che assorbe completamente il contenuto di acqua del campione. Applicando ai capi dei due elettrodi una differenza di potenziale si osserva l'elettrolisi dell'acqua adsorbita dal film di  $P_2O_5$  in ossigeno ed idrogeno. La misura della corrente richiesta é direttamente proporzionale al numero di molecole d'acqua dissociate, nella misura di due elettroni per ogni molecola d'acqua. Un'ulteriore misura della portata dell'aria e della temperatura permette di realizzare una misura indiretta dell'umidità.

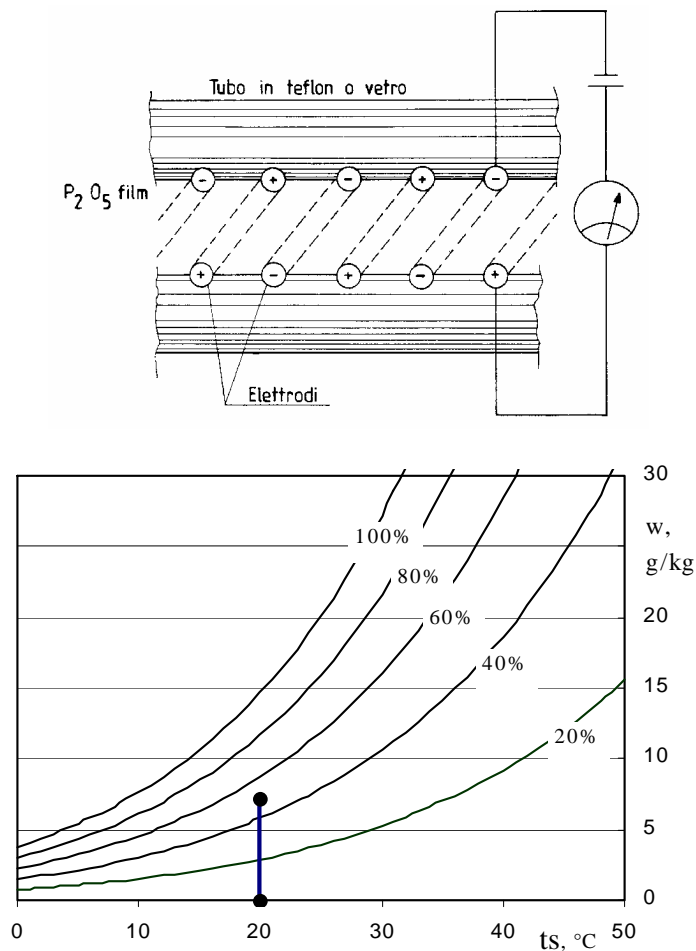


Figura 3-8 - Schema costruttivo di un sensore di umidità al pentossido di fosforo.

Il sensore (Figura 3-8) é costituito da un avvolgimento bifilare di elettrodi inerti (generalmente in platino) posto sulla superficie interna di un capillare di vetro o teflon rivestito da un film igroscopico costituito da pentossido di fosforo,  $P_2O_5$ , parzialmente idrato.

Il sensore presenta un campo di misura compreso tra 0.1 e 1000 ppm<sub>v</sub>, con un ristretto campo di impiego in temperatura  $0 \div 40$  °C, una incertezza di misura superiore a  $\pm 5\%$  V.L. ed un tempo di risposta di circa 1 min. L'incertezza sulla misura dell'umidità é evidentemente influenzata dalla incertezza della misura della portata di aria.

Tali sensori sono utilizzabili per la maggior parte dei gas inerti, organici ed inorganici, ma temono la presenza di sostanze che possono reagire con il  $P_2O_5$  (ammina, ammoniaca, alcool, ecc.) o che siano comunque corrosive (cloro, ecc.). Deve inoltre essere evitato l'uso in presenza di idrocarburi insaturi che possono occludere la cella formando polimeri.

Il principale vincolo dei sensori elettrolitici é costituito dall'elevata sensibilità al contenuto di idrogeno e di ossigeno nel campione. Infatti, un errore tipico di tali strumenti é dovuto alla ricombinazione di idrogeno ed ossigeno in acqua ed il successivo riassorbimento di questa. Per limitare questi effetti sono stati apportati nel tempo alcuni accorgimenti, quali ad esempio, la soluzione di avvolgere i due elettrodi all'esterno del capillare invece che all'interno, evitando così i suddetti fenomeni di occlusione. In questo caso il gas lambisce esternamente il capillare in uno spazio anulare.

### 3.3.5. Altri sensori indiretti

Come per i sensori diretti esistono numerosi altri sensori indiretti che, pur non trovando ancora una larga diffusione, sono stati utilizzati anche in campo industriale o di laboratorio. Si pensi ad esempio agli igrometri condensazione diversi da quelli a rilevazione ottica come quelli a rilevazione capacitiva, resistiva in frequenza, gli igrometri a condensazione con variazione di pressione, gli igrometri a condensazione ad iniezione d'acqua.

Gli igrometri a condensazione a *rilevazione capacitiva* o a *rilevazione resistiva* sono, in linea di principio, analoghi a quelli a specchio condensante, ma presentano un sistema di rilevazione della condensa di tipo capacitivo o resistivo. La condensazione del vapor d'acqua sulla superficie sensibile causa infatti sia una variazione della capacità sia un aumento del valore della conducibilità elettrica superficiale. Con tali sensori é possibile misurare temperature di rugiada in campi molto ampi e con un'incertezza di misura variabile tra  $\pm 0.5$  e  $\pm 1.0$  °C. Il costo del sensore risulta inoltre notevolmente ridotto.

## 3.4. Criteri di scelta degli strumenti di misura

La classificazione sopra riportata, unita alla conoscenza specifica delle diverse metodologie di misura, può essere di grande aiuto nella scelta del sensore. Infatti, a seconda dell'applicazione, é generalmente necessario determinare o un

parametro assoluto (processi di essiccazione, pesatura, distillazione, ecc.) o uno relativo (benessere termoigrometrico, industria cartaria, agroalimentare, ecc).

Una oculata scelta del dispositivo di misura più idoneo non può prescindere da fattori metrologici ed impiantistici, quali l'incertezza, il campo d'impiego in temperatura, il tempo di risposta e la modalità di installazione.

A tale scopo in Tabella 3-1 sono riportate sinteticamente le caratteristiche metrologiche di funzionamento e di installazione relative ai singoli principi di misura discussi in dettaglio nei precedenti paragrafi. Un'analisi semplicistica della tabella può però condurre a scelte erranee essendo ad esempio l'incertezza generalmente funzione sia del tenore d'umidità, che della temperatura di impiego; é, quindi, sempre necessario tenere in debito conto di tutte le caratteristiche del sensore.

Per ciò che concerne l'incertezza di misura non sempre il confronto tra le diverse tecniche di misura è immediato, specie tra strumenti diretti ed indiretti. Infatti nella stima dell'incertezza, è sempre necessario tener conto di tutte le incertezze che concorrono alla misurazione (e quindi nel caso di una misura indiretta sempre l'incertezza nella misura della temperatura e talvolta l'incertezza nella misura di pressione) e, ovviamente, della sensibilità a ciascun parametro di misura (si noti che la sensibilità in generale può cambiare al variare delle condizioni di misura e ciò rende ancor più complessa la valutazione).

In generale, anche alla luce della propagazione delle incertezze nelle misure indirette, é consigliabile una misura diretta del parametro termoigrometrico di interesse. Tuttavia, una misura diretta di un parametro relativo (tipicamente l'umidità relativa), spesso é di difficile realizzazione con incertezze accettabili, specie agli estremi del campo di misura (valori inferiori al 5÷10%UR o superiori al 95%UR) a causa delle limitazioni tecnologiche connesse ai sensori relativi. In particolare, per bassi valori dell'umidità relativa, é preferibile utilizzare sensori a condensazione o elettrolitici che in tale campo di misura sono in grado di apprezzare concentrazioni di vapor d'acqua anche di poche ppm. Per valori prossimi alla saturazione, invece, è consigliabile l'uso di sensori a condensazione o di psicrometri.

Considerazioni impiantistiche quali la modalità di installazione, il rapporto costi/prestazioni, possono, per contro, suggerire l'utilizzo di sensori relativi tipicamente meno complessi e costosi di quelli assoluti, anche dove sarebbe necessaria la misura di un parametro assoluto. Inoltre per la maggior parte dei sensori sussistono particolari limitazioni, quali: la contaminazione superficiale, l'incompatibilità fisica in ambienti severi o l'incompatibilità chimica con alcuni composti, il controllo del flusso, la sensibilità a particolari grandezze d'influenza. E' necessario dunque verificare caso per caso l'applicabilità del metodo di misura.

Particolare importanza riveste infine il tipo di montaggio caratteristico della metodologia utilizzata. Le misure di umidità, infatti, possono effettuarsi, a seconda dei casi, sia direttamente nell'ambiente di misura, sia immergendo la sola parte sensibile, sia prelevando dall'ambiente di misura un campione d'aria umida. Nel caso di misura in "ambiente" il sensore viene collocato direttamente nell'ambiente di misura; nel caso di misura ad "immersione" solo la parte

sensibile del sensore viene collocata all'interno dell'ambiente di misura, posizionando così l'elettronica (nella maggior parte dei casi il trasmettitore) in un ambiente meno severo; nel caso infine di misura con "prelevamento" viene prelevato dall'ambiente di misura un opportuno campione d'aria umida e trasportato mediante un condotto al sensore. E' bene considerare che in quest'ultima situazione devono essere considerate le possibili variazioni dello stato termodinamico dell'aria umida durante il passaggio nei condotti di prelievo, causate, ad esempio, da fenomeni di condensazione o di assorbimento delle pareti. In tale evenienza il campione prelevato é caratterizzato da un tasso d'umidità profondamente diverso da quello originario.

Dal punto di vista delle prestazioni bisogna, infine, sottolineare la scarsa idoneità dei sensori fortemente intrusivi alle misure in ambienti di dimensioni ridotte, dove forti scambi di massa e di energia termica non possono essere tollerati, senza la conseguente alterazione delle condizioni di misura.

Il tempo di risposta dei sensori di umidità infine può assumere un ruolo chiave nella scelta del sensore in tutte quelle condizioni in cui il processo da monitorare risulta non stazionario. In tal caso è necessario scegliere un sensore che presenta un tempo di risposta inferiore al tempo caratteristico di evoluzione del processo misurato. Nel caso specifico il tempo di risposta può variare da pochi secondi a diversi minuti in funzione sia delle caratteristiche del sensore che del moto relativo aria-sensore.

Tabella 3-1 - - Caratteristiche metrologiche tipiche dei sensori di umidità dell'aria industriali.

Sensore	Parametro di misura	Campo di misura	Campo di temperatura	Incertezza di misura	Tempo di risposta	Montaggio	Tipo di Misura	Vantaggi /svantaggi
Igrometro Meccanico	$\phi$	20÷90% UR	20°C (0÷40°C)	5÷15% UR	2-5 min	in ambiente immersione	diretta (relativa)	<i>vantaggi</i> - basso costo - semplicità costruttiva <i>svantaggi</i> - frequente calibrazione - isteresi - sensibilità alle vibrazioni
Igrometro resistivo	$\phi$	5÷95% UR (fino a 100%)	-10÷60°C (-40÷200)	2÷5% UR	10÷100 s	in ambiente immersione	diretta (relativa)	<i>vantaggi</i> - dimensioni ridotte - elevata sensibilità <i>svantaggi</i> - frequente calibrazione - contaminazione superfic. - sensibilità alla temperat. - sensibilità alle vibrazioni
Igrometro Capacitivo	$\phi$	5÷99% UR (fino a 100%)	-10÷60°C (-40÷200)	2÷3% UR	10÷100 s	in ambiente immersione	diretta (relativa)	<i>Vantaggi</i> - dimensioni ridotte <i>svantaggi</i> - contaminazione superf. - sensibilità alla temp.
Igrometro a rilevazione di impedenza (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	ppm <sub>v</sub> (T <sub>r</sub> )	0.01÷200.000 (-110÷60°C)	-30÷60°C	2÷3% V.L. (2÷5°C)	10÷20 s	immersione.	diretta (assoluta)	<i>vantaggi</i> - utilizzabile per liquidi - bassi tempi di risposta <i>svantaggi</i> - contaminazione superf. - sensibilità alla temp.
Igrometro elettrolitico (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	ppm <sub>v</sub> (T <sub>r</sub> )	0.1÷1.000 (-90÷-20°C)	20°C (0÷40°C)	5÷10% V. L.	2-3 min	prelevamento	indiretta (assoluta)	<i>vantaggi</i> - utilizz. per gas secchi <i>svantaggi</i> - contaminazione - sensibilità alla temperat. - controllo portata di aria
Igrometro a condensazione con rilevazione ottica	T <sub>r</sub>	-100÷100°C	-20÷60°C	0.1÷0.5°C	1°C/s	prelevamento immersione	indiretta (assoluta)	<i>Vantaggi</i> - ottima precisione - misura a prelevamento <i>svantaggi</i> - complessità costruttiva - contaminazione specchio - elevato costo - elevati tempi di risposta
Igrometro a condensazione con sali saturi (LiCl)	T <sub>r</sub>	-40÷60°C	-20÷60°C	0.5÷1.5°C	1-2 min	immersione	indiretta (assoluta)	<i>Vantaggi</i> - bassa contaminazione - basso costo <i>svantaggi</i> - frequenza taratura - bassa affidabilità
Psicrometro	$\phi(T_s, T_w)$	10÷100% UR	5÷60°C	1÷5% UR (0.2÷1.0°C)	1-2 min	in ambiente	indiretta (relativa)	<i>vantaggi</i> - semplicità costruttiva - misura termodinamica <i>svantaggi</i> - fortemente intrusivo - non adatto basse temper. - non adatto basse umidità - contaminazione garza