

MATTEO DE VINCENZI, GIANNI FASANO

*Gli strumenti di misura per l'igrometria  
dal XV al XX secolo*

*The measuring instruments for hygrometry  
from 15th to 20th century*

*Sommario*

La storia degli strumenti misuratori della quantità di vapore acqueo presente nell'atmosfera abbraccia un intervallo temporale di circa sei secoli. Le prime realizzazioni strumentali si devono a Niccolò Cusano che, nel 1430 circa, propose di misurare l'umidità dell'aria mediante la variazione di peso di una balla di lana e a Leonardo da Vinci che, nel 1500 circa, costruì un igroscopio a bilancia. Solo nel Seicento, con gli strumenti di misura proposti da F. Folli, da Ferdinando II de' Medici, granduca di Toscana, e dagli studiosi dell'Accademia del Cimento, iniziò la moderna igrometria teorica e sperimentale. La fine del Settecento vide la realizzazione dell'igrometro a capelli di H.B. de Saussure, nel 1780. Nell'Ottocento furono realizzati igrometri a condensazione, come quello ideato da J. F. Daniell, nel 1820, e perfezionato da H.V. Régnault nel 1845. Nel 1825 E. F. August realizzò uno psicrometro, migliorato da R. Assman nel 1887; ciò consentì, mediante l'uso di formule psicrometriche più rappresentative del fenomeno, di misurare e di calcolare con maggiore precisione l'umidità relativa. Alla fine dell'Ottocento gli igrometri, come altri strumenti meteorologici, furono realizzati secondo standard fissati dall'Organizzazione Meteorologica Internazionale. Nel Novecento si ebbe uno sviluppo ulteriore mediante sia l'impiego di sensori di nuova concezione sia, nell'ultimo decennio, l'utilizzo di microprocessori. Usando queste tecnologie furono realizzati strumenti che riuscirono a misurare l'umidità relativa dell'aria con una incertezza di misura compresa fra 0,2 e 1%.

*Abstract*

Water covers, in different states, about 70% of the earth's surface; in the form of water vapor, along with oxygen and nitrogen, it is one of the main components of the atmosphere. The water contained in the atmosphere can be considered the producing element of atmospheric phenomena, due to its properties of absorbing, conserving, and returning large quantities of thermal energy. The hygrometric state of the atmosphere affects, with temperature, the formation of hydrometeors. The history of

instruments, measuring the amount of water vapor present in the atmosphere, is long and complex. The first ones carried out exploited the properties of hygroscopic substances that absorb and release the water present in the air with alterations in their dimensions or weight. The first instruments are due to Nicholas of Cusa who, around 1430, proposed to measure the air humidity by the variation in weight of a wool bale, and to Leonardo da Vinci who built a balance hygroscope (around 1500). Only in the 17<sup>th</sup> century, modern theoretical and experimental hygrometry began with the measuring instruments proposed by F. Folli, the Grand Duke of Tuscany Ferdinando II de' Medici and the scholars of the "Accademia del Cimento". At the end of the 18<sup>th</sup> century H. B. de Saussure carried out the hair hygrometer (1780). In the 19<sup>th</sup> century, condensation hygrometers were created, such as the one designed by J. F. Daniell (1820), improved by H. V. Régnault (1845). In 1825 E. F. August carried out a psychrometer, refined by R. Assman in 1887; this latter allowed the relative humidity to be measured more precisely by psychrometric formulas more representative of the phenomenon. At the end of the 19<sup>th</sup> century, hygrometers, like other meteorological instruments, were made according to internationally established standards. In the 20<sup>th</sup> century there was further development through both the use of newly developed sensors and, in the last decade, the use of microprocessors. The application of these technologies has allowed the design and production of instruments that measure the relative humidity of the air with an error between 0,2 and 1%.

### *Introduzione*

L'acqua ricopre, in forme diverse, circa il 70% della superficie terrestre. Sotto forma di vapore acqueo, insieme a ossigeno e azoto, è uno dei componenti principali dell'atmosfera. L'acqua contenuta nell'atmosfera a causa della sua capacità di assorbire, conservare, e restituire grandi quantità di energia termica, può essere considerata l'elemento che produce i fenomeni atmosferici: lo stato igrometrico dell'atmosfera determina, con la temperatura, il formarsi delle idrometeore.

Lunga e complessa è la storia degli strumenti misuratori della quantità di vapore acqueo presente nell'atmosfera.

I primi strumenti realizzati sfruttavano le proprietà di sostanze igroscopiche che assorbono e rilasciano l'acqua presente nell'aria con alterazioni delle loro dimensioni e del loro peso. Furono costruiti molto prima che si avesse una idea chiara sul vapore acqueo, che solo nel Settecento fu accettato come una sostanza distinta. Inoltre, fino alla fine del Settecento gli studiosi parlavano di umidità dell'aria o dell'atmosfera senza distinguere i termini con cui questa viene oggi espressa, ad esempio umidità relativa, umidità assoluta, umidità specifica, rapporto di mescolanza, o a parametri utilizzati in igrometria come, ad esempio, la temperatura di rugiada. Solo nell'Ottocento questa distinzione venne introdotta prima concettualmente e poi operativamente.

Le variazioni della quantità di vapore presente nell'aria possono essere visualizzate da dispositivi che prendono il nome di igroscopi, i quali però non quantificano detta variazione e pertanto non sono strumenti di misura in senso stretto. Lo strumento più comune per la misura diretta dell'umidità dell'aria, ovvero del contenuto di vapore in essa presente, è l'igrometro; ma l'umidità può essere anche misurata indirettamente. In generale, con il termine igrometro vengono chiamati gli strumenti, la cui indicazione è legata direttamente alla quantità d'acqua presente nell'aria sotto forma di vapore. L'umidità viene anche misurata in modo indiretto tramite la misura di due temperature, con lo psicrometro<sup>[1]</sup>, dal greco *psychrós* = freddo e *métron* = misura, strumento formato da due termometri, uno col bulbo asciutto e uno col bulbo bagnato. L'evaporazione dell'acqua da quest'ultimo provoca il raffreddamento del bulbo, tanto maggiore quanto minore è la quantità di vapore presente nell'aria; fenomeno era noto fin dalla prima metà del Settecento. Dalle due temperature è possibile, tramite tabelle o formule, calcolare l'umidità relativa dell'aria (Benincasa *et al.*, 2019).

#### *I primi strumenti dal XV al XVII secolo*

Le prime realizzazioni strumentali si devono a Niccolò Cusano, nel 1430 circa, che propose di misurare l'umidità dell'aria mediante la variazione di peso di una balla di lana (Agnoli e Bartelloni, 2013). Anche Leon Battista Alberti accennò nel X libro del “De re aedificatoria”, manoscritto del 1452, alla necessità di realizzare una bilancia con la quale misurare «quanto sieno gravi, e quanto secchi, i venti, e l'aria» (Alberti, 1565). Leonardo da Vinci, intorno al 1500 circa, sviluppò l'idea di Cusano, costruendo un igroscopio a bilancia che confrontava il peso di un materiale non igroscopico, ad esempio cera, con quello di uno igroscopico, ad esempio bambagia, dello stesso peso in condizione di aria anidra, ma che assumeva un peso diverso in condizioni di aria umida (Benincasa *et al.*, 2019). All'inizio del Seicento, Santorre Santorio propose un igroscopio che era costituito da una corda di materiale igroscopico tesa fra due punti e caricata al centro da un peso che in condizioni di aria anidra indicava sulla scala lo zero; con l'aumento dell'umidità la corda si allungava e il peso, abbassandosi, indicava altri valori di umidità (Santorio, 1625).

Ma solo con gli strumenti proposti dagli studiosi dell'Accademia del Cimento iniziò la moderna igrometria sperimentale e teorica.

Francesco Folli realizzò nel 1664 uno «strumento da conoscere i gradi dell'umido e del secco dell'aria» che chiamò “mostra umidaria”, come ricordò anche Francesco Redi nel suo testo “Esperienze intorno alla generazione degli insetti” (Redi, 1668). Lo strumento, un igroscopio, era costituito da una asta di legno avente alle due estremità due piccoli rulli sui quali si arrotolavano i capi di una fettuccia di carta che costituiva il materiale igroscopico, come mostrato in Figura 1. Un disco d'ottone con scala graduata posto su un supporto era montato al centro dell'asta. Una lancetta, imperniata al centro del quadrante e mossa da un meccanismo, indicava le variazioni

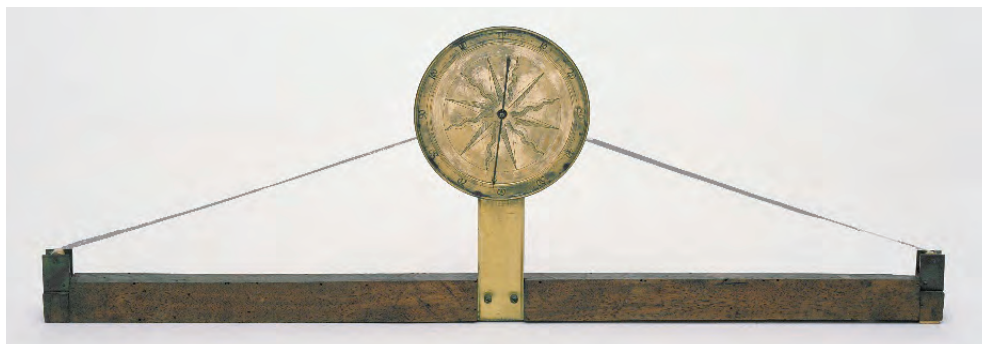


Fig. 1 - Igroscopio di F. Folli conservato al Museo Galileo di Firenze. Riproduzione su concessione del Museo Galileo, Firenze - Archivio Fotografico.

di lunghezza della carta provocate dalle variazioni dell'umidità dell'aria. Nel 1665 lo strumento fu presentato a Firenze al granduca Ferdinando II de' Medici che ne fece alcuni esemplari per inviarli ai vari Principi d'Europa. Successivamente, Vincenzo Viviani realizzò alcune versioni di tale igrometro con piccole variazioni costruttive (Knowles Middleton, 1969).

Negli stessi anni Ferdinando II de' Medici ideò un igroscopio a rugiada che non misurava l'umidità dell'aria in un ambiente ma serviva per «conoscere le differenze dell'umido nell'aria» ovvero era in grado di mostrare se un ambiente era più o meno umido di un altro, entrambi alla stessa temperatura (Accademia del Cimento, 1667).

Dalla seconda metà del Seicento alla prima del Settecento vennero realizzati strumenti con principio di funzionamento simile a quello dell'igrometro di Folli utilizzando i più svariati materiali come elemento igroscopico: dalle pietre di fiume al legno, al budello animale, alle pelli di pecora e così via (Benincasa *et al.*, 2023). Altri ne vennero prodotti ma apparivano più come complementi di arredo o *divertissement* di curiosi signori. Ne è un esempio più tardo l'igroscopio a pupazzo del 1795, che era formato da una statuetta di terracotta raffigurante un turco; la testa del pupazzo era sospesa, mediante un telaio di ferro, e libera di ruotare, ed era unita alla parte inferiore del corpo mediante un budello animale attorcigliato che fungeva da sostanza igroscopica: in base all'umidità dell'aria, il budello si contraeva o si allentava facendo ruotare la testa del pupazzo in un verso o nell'altro (Mantovani, 2010).

### *Settecento-Ottocento: lo sviluppo dell'igrometria sperimentale*

Nella prima metà del Settecento molti studiosi fornirono importanti contributi allo studio dell'igrometria, come Daniel Bernoulli con la formulazione della prima teoria cinetica dei gas, e alla comprensione del fenomeno evaporativo. Con lo sviluppo degli osservatori meteorologici anche l'igrometria divenne un tema di indagine e si

vide un fiorire di nuovi strumenti per la misura di questa grandezza.

La fine del Settecento vide la realizzazione dell'igrometro a capelli di Horace-Bénédict de Saussure del 1783 che fu l'archetipo degli strumenti meccanici ed elettromeccanici, prodotti fino alla seconda metà del Novecento. Lo strumento, in Figura 2, era costituito da un telaio di ottone sul quale era steso un fascio di capelli, bloccato da una ganascia e passante su una puleggia munita di lancetta. Il fascio era tenuto in tensione da un contrappeso collegato alla puleggia. A seconda dello stato igrometrico dell'aria i capelli, che operavano da sostanza igroscopica, variavano in lunghezza. Le variazioni erano lette su una scala situata in corrispondenza della lancetta. Ampia descrizione dell'igrometro, dei metodi di taratura e del suo comportamento in presenza di altri gas quali idrogeno e diossido di carbonio fu data da de Saussure nel saggio "Essais sur l'hygrométrie" (De Saussure, 1783).

Come nel caso di altri strumenti, gli igrometri furono inseriti in sistemi multiparametrici di misura, i meteorografi, come quello di Felice Fontana formato da un barometro, due termometri, un igrometro e una bussola dei venti ad ago magnetico (Affronti, 1977), o come il meteorografo di Pietro Moscati (Moscati, 1790), dove era presente un igrometro a capello di de Saussure, o il meteorografo di Antonio Maria Vassalli Eandi, dove era presente inizialmente un igrometro a bilancia in seguito sostituito da un igrometro a capello (Vassalli, 1799; 1816).

È solo con l'Ottocento che gli studiosi iniziano a distinguere i termini con cui l'umidità dell'atmosfera viene attualmente espressa, ad esempio umidità relativa, umidità assoluta, umidità specifica, rapporto di mescolanza, o a parametri utilizzati in igrometria come, ad esempio, la temperatura di rugiada, ecc. (Benincasa *et al.*, 1991; Fasano *et al.*, 1999). Gli studi di questo periodo sulla relazione fra temperatura di rugiada e umidità atmosferica portano alla realizzazione di igrometri a condensazione



*Fig. 2 - Igrometro a capelli di H. B. de Saussure, conservato al Museo Galileo di Firenze. Riproduzione su concessione del Museo Galileo, Firenze - Archivio Fotografico.*

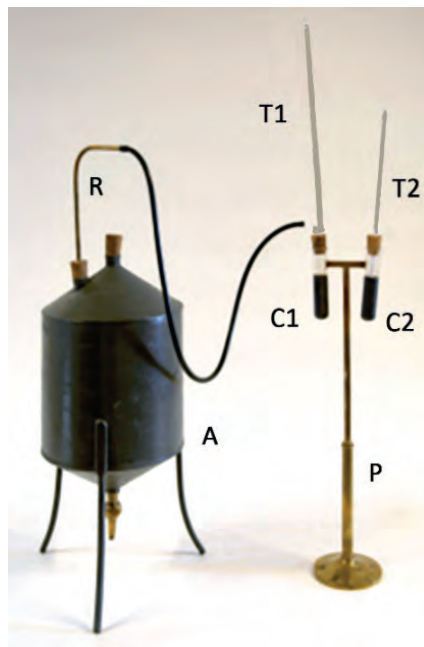


Fig. 3 - Igrometro a condensazione di J.F. Daniell, esemplare di fine '800 conservato al Museo dell'Innovazione e della Tecnica Industriale di Fermo (Foto di C. Profumieri), a sinistra, ed esemplare di igrometro a condensazione o ad appannamento di H.-V Régnault conservato presso il Gabinetto di Fisica del Museo urbinato della Scienza e della Tecnica dell'Università di Urbino (Mantovani, 2010), a destra: A: aspiratore metallico, P: piede di ottone, C1 e C2: provette metalliche, R: tubo di raccordo, T1 e T2: termometri.

come quello ideato da John Frederic Daniell nel 1820, perfezionato da Henri-Victor Régnault nel 1845, in Figura 3, che sfruttavano il fenomeno della condensazione del vapore acqueo che avviene quando l'aria raggiunge la temperatura di rugiada<sup>[2]</sup>.

Nel 1825 lo studioso tedesco Ernst Ferdinand August realizzò uno psicrometro, mostrato in Figura 3, costituito da un termometro a bulbo asciutto e uno a bulbo costantemente inumidito da una garza immersa in un contenitore pieno d'acqua. Dalle due temperature, mediante una formula, si risaliva al valore dell'umidità relativa dell'aria. In generale la precisione con cui veniva calcolata l'umidità relativa dell'aria non era molto elevata sia per i limiti dello strumento sia per l'inadeguatezza della formula utilizzata nel calcolo.

Dal 1887 il meteorologo tedesco Richard Assmann lavorò al perfezionamento dello strumento di August che lo portò a realizzare uno psicrometro, in Figura 4 al centro, avente un piccolo aspiratore meccanico per ventilare i bulbi dei due termometri e per facilitare l'evaporazione, rendendo così più rapida la stabilizzazione delle



Fig. 4 - Psicrometro di E.F. August esposto al Museo Galileo, di Firenze (riproduzione su concessione del Museo Galileo, Firenze, Archivio Fotografico), a sinistra, psicrometro aspirato meccanicamente di R. Assmann (foto di G. Fasano), al centro, e psicrometro a fionda (foto di G. Fasano), a destra.

temperature (Assmann, 1892). Nell'immagine centrale di Figura 4 si osserva che in alto il coperchio è aperto per mostrare gli ingranaggi e la chiavetta per caricare la molla; in basso sono tolti i due cilindri che proteggono i bulbi termometrici, quello di destra, bulbo umido, è coperto da una garza bagnata.

La novità progettuale introdotta, unitamente all'uso di formule psicrometriche più efficaci o delle tavole psicrometriche di William Ferrel realizzate nel 1886, o, in seguito, dell'uso del diagramma psicrometrico di Willis Haviland Carrier del 1911, portò a misure di umidità relativa molto più precise. In alcune versioni più recenti dello psicrometro di Assmann l'aspiratore viene azionato da un motorino elettrico (Benincasa *et al.*, 2019).

Sempre nella seconda metà dell'Ottocento nacquero gli psicrometri a fionda, in Figura 4 a destra, probabilmente basati su una idea dell'astronomo francese Auguste Bravais (Knowles Middleton, 1969), in cui la ventilazione viene effettuata manualmente facendo ruotare lo strumento come se fosse una fionda (Rivosecchi, 1975). Anche per questo strumento, come in quello di Assmann, dalla misura della temperatura dell'aria con un bulbo asciutto e uno umidificato tramite una garza, si quantifica,

per mezzo del diagramma psicrometrico o di formule, le condizioni igrometriche dell'ambiente. Lo strumento è stato usato, fino a pochi decenni fa, dai professionisti della meteorologia per misure estemporanee in campo; adesso è usato solo da qualche appassionato (Benincasa *et al.*, 2019).

Il fisico Giovanni Alessandro Maiocchi propose intorno al 1845 un igrometro a tensione di vapore che permetteva di determinare il deficit di questo parametro per raggiungere il valore della tensione di saturazione. Successivamente, tramite formule empiriche o tabelle, veniva calcolata la tensione di vapore saturo alla temperatura data; quindi, per differenza tra questo valore e il deficit di saturazione fornito dallo strumento si otteneva la pressione parziale del vapore nell'atmosfera esaminata. Il rapporto tra quest'ultima e la pressione di saturazione forniva il valore dell'umidità relativa (Benincasa *et al.*, 2023).

Contemporaneamente agli strumenti realizzati su basi scientifiche valide, anche l'inizio dell'Ottocento vide la proposta di fantasiosi apparati come l'igrometro a membrana d'uovo del naturalista italiano Giovanni Federico Mayer del 1817 (Mayer, 1817) di cui non è noto se furono realizzati alcuni esemplari<sup>[3]</sup>.

Coevo è l'igrometro a vescica di topo, proposto nel 1816 dal fisico inglese Daniel Wilson, in cui una vescica di topo era fermata al fondo di un tubo di vetro, simile a un termometro di calibro medio. La vescica era completamente riempita di mercurio mentre il tubo lo era solo parzialmente. Il tubo era sigillato all'estremo opposto ed era graduato tramite calibrazione fra due punti di umidità estrema: per la massima lo strumento era immerso in acqua a una certa temperatura, per la minima era sospeso in un vaso contenente sul fondo acido solforico concentrato, fortemente igroscopico. L'intervallo fra i due punti estremi era diviso in un numero arbitrario di intervalli uguali. All'aumentare dell'umidità dell'aria la vescica subiva dilatazioni che facevano abbassare il livello del mercurio nel tubo, viceversa al diminuire dell'umidità la vescica si contraeva e il livello del mercurio saliva nel tubo. Secondo l'autore lo strumento aveva una grande sensibilità da poter "misurare" variazioni anche col solo avvicinarsi delle mani. Di questo strumento, a detta di Wilson, ne furono costruiti vari esemplari (Schweigger, 1817, T.4, pp.262-3).

Inoltre, in questi decenni vengono realizzati igrometri registratori aventi come sensore varie sostanze igroscopiche. Nel 1871 il fisico-chimico olandese Eduard Heinrich von Baumhauer realizzò un igrometro a pesata con una pietra pomice imbevuta di acido solforico, fortemente igroscopico. Nel 1884 l'azienda di strumenti scientifici Richard Frères costruì un igrometro che usava come sostanza igroscopica una sottile membrana ricavata dall'intestino tenue disseccato di bue e di montone; successivamente usò come parte igroscopica filamenti di corno di mucca e infine utilizzò un fascio di capelli. La stessa azienda nel 1885 produsse, con scarso successo per la sua non elevata precisione, uno psicrometro registratore che utilizzava due tubi Bourdon uno dei quali era avvolto da un tessuto bagnato (Knowles Middleton, 1969).



Alla fine dell'Ottocento gli igrometri, come altri strumenti e sistemi di misura meteorologici, iniziarono a essere realizzati secondo standard fissati internazionalmente dall'Organizzazione Meteorologica Internazionale, nel 1879.

### *L'evoluzione nel XX secolo*

Nel Novecento, pur rimanendo molto diffusi sia gli igrometri, in Figura 5, sia gli igrografi a capelli, nelle capannine meteorologiche spesso abbinati con un termometro a lamina bimetallica, il termoigrografo<sup>[4]</sup>, si ebbe un ulteriore sviluppo delle tecniche costruttive mediante l'impiego di sensori di nuova concezione, basati su nuovi principi di funzionamento.

Gli strumenti moderni rilevano l'umidità nelle sue varie forme tramite sensori che sfruttano le capacità di alcuni materiali di variare le loro caratteristiche elettriche:

- i sensori igrometrici dielettrici, basati sulla caratteristica di alcuni polimeri di cambiare la loro permittività dielettrica al cambiare della pressione parziale del vapore d'acqua contenuto nel gas in cui sono immersi. È stato possibile, pertanto, realizzare condensatori di area di superficie inferiore a un centimetro quadrato aventi fra le armature questo dielettrico, ottenendo così sensori di umidità di tipo capacitivo (Fasano *et al.*, 1999; WMO, 2018);
- gli igrometri con trasduttore dielettrico-resistivo, costituiti da due elettrodi separati da uno strato conduttivo in ossido di alluminio, o di tantalio. In questo caso si possono misurare le variazioni della sua resistenza elettrica e della sua permittività dielettrica, prodotte dal variare della pressione parziale del vapore d'acqua;
- i trasduttori a ossido di alluminio: pur offrendo migliori caratteristiche di quelli dielettrici in termini, ad esempio, di resistenza agli agenti atmosferici, maggiore stabilità, quasi assenza di isteresi e risposta rapida alle variazioni di umidità ambientale, richiedono circuiti più complessi relativamente all'alimentazione in corrente alternata e alle reti di linearizzazione e inoltre hanno un campo di impiego più limitato (Fasano *et al.*, 1999; WMO, 2018).

Nell'ultimo decennio del XX secolo, utilizzando sensori miniaturizzati e nuove tecniche costruttive, sono stati realizzati psicrometri più efficienti, affidabili e di maggior precisione, sia pur come evoluzione di quello di Assmann, in cui i termometri a mercurio sono sostituiti da termoresistenze al platino o da termistori linearizzati e l'aspiratore è costituito da un motorino elettrico, consentendo così una registrazione in continuo della misura di umidità.



*Fig. 5 - Igrometro a capelli della seconda metà del Novecento. In questo strumento la sostanza igroscopica è un fascio di fibre sintetiche (foto di G. Fasano)*

Nella seconda metà del XX secolo sono stati realizzati sensori a temperatura di rugiada per la misura dell'umidità. Per determinare la temperatura di rugiada in un dato ambiente si misura la temperatura di una superficie fredda esposta a quell'ambiente nel momento in cui su di essa, per effetto dell'abbassamento della temperatura, si forma una goccia d'acqua; l'elemento refrigerante può essere ad esempio una cella Peltier<sup>[5]</sup>. Mediante un sistema fotoelettrico si rileva il momento in cui sulla superficie speculare fredda si forma la prima goccia; in quell'istante la luce, emessa da un led, viene diffusa e va a colpire una cella fotosensibile che produce il segnale elettrico. Questi sensori per la misura della temperatura di rugiada,  $t_r$ , sono privi di isteresi e l'incertezza sulla misura di  $t_r$  può essere ridotta a 0,1 °C, che tradotto in termini di umidità relativa, UR, per temperature intorno a 20 °C dà errori compresi fra 0,2%, per UR = 10%, e 1%, per UR = 90% (Fasano *et al.*, 1999).

Ultimamente sono stati sviluppati strumenti che possono misurare la concentrazione molecolare di vapore acqueo in atmosfera sfruttando la proprietà di assorbimento delle molecole di vapore della radiazione elettromagnetica in determinate bande di lunghezze d'onda. Le regioni dello spettro elettromagnetico più utili a questo scopo sono nelle bande dell'ultravioletto e dell'infrarosso. Il metodo consiste nel misurare l'attenuazione delle radiazioni emesse da una sorgente, in una specifica banda, lungo il percorso tra la sorgente di radiazione e il dispositivo di ricezione. L'applicazione più diffusa dell'igrometro ad assorbimento elettromagnetico è il monitoraggio di variazioni di umidità ad altissime velocità, poiché il tempo di risposta di un igrometro di questo tipo è solitamente di pochi millisecondi. L'impiego di questo tipo di igrometri rimane però confinato nell'ambito della ricerca di laboratorio (WMO, 2018).

### Conclusioni

L'umidità dell'aria è fra i parametri meteorologici quello più difficilmente misurabile, ma è estremamente importante, in particolare modo nel settore agro-forestale e in quello naturalistico, per i sistemi biologici; infatti, questi evitano il “surriscaldamento” facendo evaporare dell'acqua in modo che il calore latente di vaporizzazione<sup>[6]</sup> da questa sottratto per passare allo stato gassoso, tende ad abbassare la temperatura della superficie da cui sta evaporando. È evidente che la quantità d'acqua che può evaporare è legata all'umidità relativa presente in atmosfera e pertanto è importante conoscere il suo valore (Benincasa *et al.*, 1991). Nei decenni sono state sviluppate molte tipologie di strumenti, dai più semplici ai più sofisticati; di tutti vanno evidenziate le difficoltà che si incontrano nell'effettuare la taratura. Il *World Meteorological Organization*-WMO, suggerisce di utilizzare come riferimenti secondari<sup>[7]</sup> per strumenti misuratori, che operano in campo, un igrometro a punto di rugiada o uno psicrometro di Assmann precedentemente calibrati in riferimento a strumenti classificati come “standard secondari”; i confronti devono essere eseguiti almeno

una volta ogni dodici mesi in ambiente controllato. Inoltre, possono essere usate determinate soluzioni saline sature di sali contenute in campioni di piccolo volume di aria con percentuali di umidità relativa noti. Questa metodologia però necessita di una stabilità di temperatura difficilmente raggiungibile per eseguire calibrazioni in campo, inoltre la soluzione salina non è certificata come standard primario.

### *Bibliografia*

- Accademia del Cimento. 1667. *Saggi di naturali esperienze fatte nell'Accademia del Cimento*. Firenze: G. Cocchini per l'Insegna della Stella.
- Affronti F. 1977. *Atmosfera e Meteorologia*. Modena: S.T.E.M. Mucchi.
- Agnoli F., Bartelloni A. 2013. *Scienziati in tonaca: da Copernico, padre dell'eliocentrismo, a Lemaître, padre del Big Bang*. Torino: La Fontana di Siloe.
- Alberti L.B. 1565. *L'Architettura (De re aedificatoria)*, tradotta in lingua fiorentina da C. Bartoli. Venezia: appresso F. Franceschi.
- Assmann R. 1892. Aspirationspsychrometer. *Zeitschrift für Instrumentenkunde*, 12, 1-12.
- Benincasa F., De Vincenzi M., Fasano G. 2019. *Storia della strumentazione meteorologica, nella cultura occidentale*. Roma: CNR-Edizioni.
- Benincasa F., De Vincenzi M., Fasano G. 2023. *I paralipomeni della meteorologia ovvero le parole dimenticate della meteorologia*. Roma: CNR-Edizioni.
- Benincasa F., Maracchi G., Rossi P. 1991. *Agrometeorologia*. Bologna: Patron Editore.
- de Saussure H. B. 1783. *Essais sur l'hygrométrie*, Neuchâtel: S. Fauche père et fils, imprimeur, Libraires du Roi.
- Fasano G., Materassi A., Zara P. 1999. *Sensori e strumenti elettronici per la meteorologia*. Quaderno n. 8 Collana tecnico-scientifica. Firenze: CNR-INAPA.
- Knowles Middleton W.E. 1969. *Invention of Meteorological Instruments*. Baltimore: The Johns Hopkins Press.
- Mantovani R. 2010. L'Osservatorio meteorologico di Urbino: origini e antica strumentazione scientifica. In: *Università degli Studi di Urbino. L'Osservatorio "Alessandro Serpieri" 160 anni al servizio della meteorologia*, 12-37. Sant'Angelo in Vado: Grafica Vadese.
- Mayer G.F. 1817. Igrometro a membrana d'uovo. *Biblioteca italiana ossia Giornale di Letteratura, Scienze ed Arti*, VIII, 510.
- Moscato P. 1790. Descrizione dell'osservatorio meteorologico eretto al fine dell'anno 1780. In: *Memorie di Matematica e Fisica della Società Italiana*, V, 356-381. Verona: stampato per Dionigi Ramanzini.
- Pistoiesi I. 1845. *Indice Metodico della monografia degli strumenti meteorologici*. Pisa: R. Vannucchi.
- Redi F. 1668. *Esperienze intorno alla generazione degl'insetti*. Firenze: All'Insegna della Stella.
- Rivosecchi I. 1975. *Osservazioni e strumenti di meteorologia*. I, IFA DP n.5. Roma: CNR-IFA.
- Santorio S. 1625. *Commentaria in primam Fen primi libri Canonis Avicennae*. Venetiis: apud Iacobum Sarcinam.
- Schweigger J. 1817. Description du nouvel Hygromètre de Wilson, tirée d'une lettre du Prof. Schweigger. *Geneve: Bibliothèque Universelle des Sciences, Belles-Lettres et Arts*, 4, 262-263

- Vassalli Eandi A.M. 1799. Sopra alcuni strumenti meteorologici, che segnano per se stessi le variazioni atmosferiche per 24 ore, o più. In: *Memorie di Matematica e Fisica della Società Italiana*, VIII(II), 516-520, Modena: stampato presso la Società Tipografica.
- Vassalli Eandi A.M. 1816. Saggio di un trattato di meteorologia. Biblioteca italiana ossia giornale di letteratura scienze ed arti compilato da una società di letterati, III, 230-255. Milano: presso A. F. Stella.
- WMO. 2018. *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*. WMO, 8. Geneva: WMO.

### Note

- [1] Il nome deriva da *psictere*, una particolare brocca per raffreddare l'acqua o il vino.
- [2] Temperatura cui deve essere portata, a pressione costante, una massa d'aria umida perché avvenga la condensazione del vapore d'acqua in essa contenuta.
- [3] Un elenco poderoso degli igrometri realizzati fino a circa la metà dell'Ottocento è raccolto in (PISTOLESI, 1845), in cui, accanto a strumenti realizzati in modo scientificamente e tecnologicamente valido, si trovano apparati stravaganti, talvolta neanche realizzati, dal nome altisonante quale l'igrometro a budelli di bachi da seta.
- [4] I termoigrografi sono tutt'ora usati nell'ambito del monitoraggio del microclima degli ambienti destinati alla conservazione museale.
- [5] Effetto Peltier: se in una termocoppia viene fatta circolare una corrente continua, una saldatura si scalda mentre l'altra si raffredda; invertendo il verso della corrente si inverte il riscaldamento-raffreddamento delle saldature.
- [6] Per l'acqua alla temperatura di 100 °C il calore latente vale 2.257 kJ/kg
- [7] Sono assoluti, o primari, gli strumenti in cui la costante, o coefficiente, strumentale è determinata in base a considerazioni fisiche intrinseche ovvero che legano il misurando, tramite relazioni analitiche note, ad altre grandezze fisiche misurabili. Sono relativi, o secondari, gli strumenti per i quali la costante strumentale non è determinabile per mezzo di considerazioni intrinseche ma va determinata tramite taratura, ad esempio per confronto con uno strumento primario.