

# LA STORIA DELLA MISURA DEL TEMPO

## INTRODUZIONE

I metodi sviluppati dalle prime civiltà per misurare il tempo si basavano sull'osservazione degli astri; anche se questi metodi erano tutt'altro che stabili e accurati, hanno comunque soddisfatto le esigenze delle popolazioni umane per secoli.

Dopo il Rinascimento, tuttavia, gli avanzamenti in campo commerciale, marittimo e scientifico, fecero sentire la necessità e l'urgenza di misurare il tempo in maniera più accurata.

La prima risposta alle esigenze della società venne con l'uso del pendolo.

Si narra la leggenda che Galileo abbia scoperto l'isocronismo del pendolo durante una messa, nel duomo di Pisa. Il giovane studente, annoiato dalla liturgia, si sarebbe messo a osservare le oscillazioni del lampadario spinto dalla brezza primaverile. Con l'aiuto dei battiti del polso avrebbe misurato il periodo delle oscillazioni e con suo grande stupore si sarebbe accorto che il numero di battiti impiegati dal lampadario per completare un'oscillazione era uguale quando si muoveva appena e quando invece ondeggiava vistosamente. In questo modo Galileo avrebbe scoperto l'isocronismo del pendolo (che oggi noi sappiamo valere solo per piccole oscillazioni) e avrebbe pensato ad un suo impiego per la misurazione del tempo, perfezionato da altri dopo di lui.

Nella ricerca di qualcosa che scandisse il tempo con sempre maggiore precisione vennero poi utilizzati la molla, il quarzo e infine l'atomo. Tutti questi elementi hanno la caratteristica di sfruttare un fenomeno fisico intrinsecamente regolare e periodico, un fenomeno descritto matematicamente, chiamato "oscillatore armonico". Così come l'oscillazione del pendolo è isocrona, in altre parole ha periodi di durata costante, anche la molla, il quarzo e l'atomo hanno i periodi costanti e sempre più brevi, in grado di ottenere una misurazione del tempo sempre più precisa.

La scoperta di Galileo dell'isocronismo del pendolo, e il conseguente uso dell'oscillatore armonico, vanno sorprendentemente al di là della costruzione di un orologio di precisione. Gli oscillatori di questo tipo, come si è poi scoperto, sono, infatti, alla base non solo di ciò che noi percepiamo come suoni e colori, ma anche, grazie alla fisica quantistica, di ciò che secondo noi forma la trama dell'universo. Senza oscillatori non ci sarebbero particelle: non esisterebbe l'aria che respiriamo, i fluidi che alimentano la vita, la materia solida che forma la Terra. Ecco la storia del più semplice, ma anche del più fondamentale sistema esistente in natura, e di come esso legghi il ritmo del tempo alla nostra stessa esistenza materiale.

## IL CALENDARIO

Le prime civiltà avevano tre buoni motivi per scandire il tempo: dovevano misurare la durata di un dato processo, come un viaggio ad esempio; calcolare quanto tempo prima si fossero verificati eventi memorabili; specificare il presente e predire il futuro, per riconoscere la stagione giusta della semina e il momento dell'accumulo di provviste per l'inverno.

Lo sviluppo del calendario e la distinzione delle stagioni furono dovuti a quelle civiltà che per prime si avvicinarono all'agricoltura. Il moto dei corpi celesti appariva come l'unica attività regolare e prevedibile, l'astrologia si mutò dunque in astronomia, e questa divenne l'incubatrice della matematica.

Il solo fenomeno naturale periodico che non richiedesse esperti per essere osservato e utilizzato era l'alternarsi del giorno e della notte, dovuto alla rotazione terrestre. Un'unità naturale più lunga è il ciclo della luna: il tempo che intercorre tra una luna piena e la successiva è di circa trenta giorni. Infine l'anno, col suo ripetersi delle stagioni, divenne la terza unità periodica, corrispondente al tempo necessario alla Terra per percorrere la sua orbita intorno al Sole.



*Alcuni sostengono che Stonehenge rappresenti un "antico osservatorio astronomico", con un significato particolare ai punti di **solstizio** ed **equinozio***

Il periodo della rivoluzione terrestre attorno al Sole non è multiplo intero del periodo di rotazione: la Terra impiega 365,25 giorni, o rotazioni, per completare l'orbita. Tutte le complicazioni legate alla formulazione di un calendario annuale efficiente nascevano dalla necessità di conciliare questi tre periodi: il giorno, il mese e l'anno. Per questo motivo, nel corso della storia dell'umanità, si idearono numerosi calendari che, in maniera diversa, proponevano una soluzione a questo problema. Dopo numerosi tentativi si è arrivati ad adottare il calendario gregoriano, con gli anni bisestili (un giorno in più a febbraio ogni quattro anni). Quest'ultimo sbaglia di ventisei secondi all'anno, un errore che diventerà di un giorno tra 3323 anni.

## I PRIMI OROLOGI

Per unità di tempo più brevi del giorno non ci sono ritmi naturali cui appoggiarsi. Né greci, né romani, né cinesi introdussero alcuna suddivisione del giorno; venne dal Medio Oriente il primo uso delle ore. I babilonesi divisero il giorno e la notte in 6 ore ciascuna, ma è dagli egizi che abbiamo ereditato il giorno di 24 ore (12 diurne e 12 notturne). Ma, mentre alle basse latitudini del Medio Oriente la divisione del periodo di luce e buio in un numero di parti fissato dava luogo a unità non troppo variabili, nelle regioni settentrionali dell'Europa le "ore" così determinate avevano una durata molto diversa a seconda della stagione.

Il più antico modo per determinare la suddivisione del giorno fu l'ombra proiettata dal sole, mediante l'uso delle meridiane.

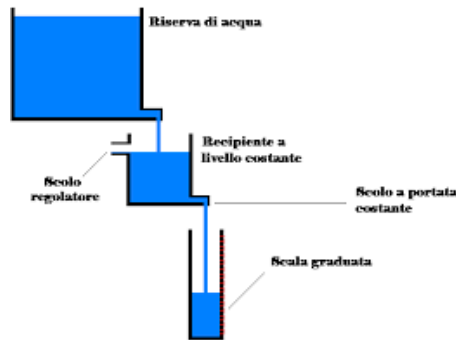


*L'ombra della meridiana indica la posizione del sole, segue le tacche del quadrante corrispondenti alle ore che suddividono la giornata.*

Poiché questo metodo di misura del tempo era inutilizzabile di notte o in giornate nuvolose, si rese necessaria l'ideazione di un altro sistema.



*Orologio ad acqua egiziano*

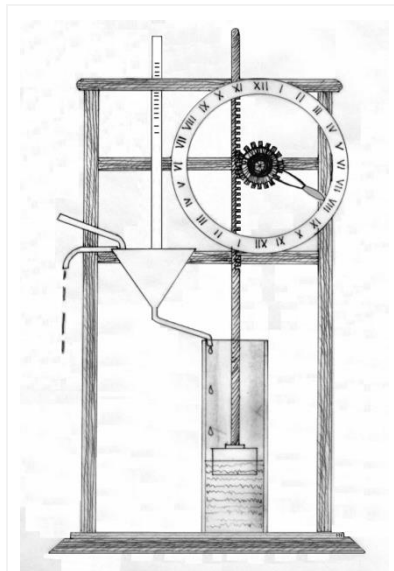


*Evoluzione dell'orologio ad acqua, che prevede il mantenimento del recipiente a livello costante tramite una riserva d'acqua a monte e uno scolo regolatore.*

Gli egiziani usarono l'orologio ad acqua: consisteva in un recipiente munito di forellino, attraverso il quale l'acqua fuoriusciva lentamente; il livello d'acqua rimanente, misurato per mezzo di tacche sulla parete interna del vaso, indicava il tempo trascorso.

Il primo miglioramento apportato all'orologio ad acqua fu un tentativo di correggere il fatto che la velocità di discesa diminuiva al calare del livello del liquido nel recipiente. In una versione successiva l'acqua gocciolava da un serbatoio superiore in un secondo recipiente, il cui livello di riempimento era mantenuto costante da uno scolo regolatore; il recipiente a livello costante riversava il proprio contenuto lentamente in un terzo recipiente più in basso, dove una scala graduata indicava il livello dell'acqua e misurava così il tempo trascorso.

Un secondo miglioramento fu fatto nel 250 a.C. da Archimede, che collegò un galleggiante all'ingranaggio per far muovere un indicatore su ciò che oggi riconosceremmo come il quadrante di un orologio.



*Clessidra ad acqua usata in epoca grecoromana.*

Nel corso dei secoli il sistema a ingranaggi dell'orologio ad acqua fu modificato in modo da includere correzioni automatiche che tenessero conto della diversa durata delle ore nel corso dell'anno (ricordiamo che il periodo notturno e quello diurno erano suddivisi in 12 ore ciascuno, sia in inverno sia in estate). Per aumentare la bellezza dell'orologio furono aggiunte anche figure decorative mobili.

## OROLOGI MECCANICI



*Famoso orologio  
astronomico della cattedrale  
di Strasburgo*

Gli orologi ad acqua avevano uno svantaggio notevole: smettevano di funzionare quando la temperatura scendeva sotto zero, il punto di congelamento dell'acqua. Era necessario un dispositivo totalmente meccanico soprattutto alle latitudini più alte.

Come il principio fondamentale alla base dell'orologio ad acqua era il flusso costante di liquido causato dalla gravità, così nell'orologio meccanico, che cominciò ad affermarsi verso la fine del XIII secolo, il meccanismo sfruttato era la trazione costante esercitata da un grave, appeso all'estremità di una corda avvolta attorno ad un asse. La rotazione di quest'ultimo era trasmessa tramite un sistema d'ingranaggi a una lancetta su un quadrante. Il punto fondamentale era far muovere l'asse centrale nel modo più uniforme possibile, e a questo scopo fu inventato un astuto dispositivo, lo "scappamento" che sostanzialmente andava a frenare la caduta del grave in modo tale che si muovesse mediamente a velocità costante.

I primi orologi meccanici erano talmente grandi e costosi da costruire e mantenere che all'inizio furono usati solo nelle chiese o in altri edifici pubblici. Quando finalmente divennero abbastanza compatti da poter entrare nelle case, solo i più ricchi poterono permetterseli. Nonostante non fossero particolarmente precisi e avessero un ritardo anche di mezz'ora al giorno, rappresentavano un simbolo di ricchezza e di potere.

Nel corso del '400 e del '500, né una frequente ricarica né grossi pesi con lunga corsa di discesa erano ormai accettabili; era necessario adottare un motore interno al posto dei pesi. Venne adottata una molla motrice costituita da una lunga lamina elastica avvolta a spirale. Le prime soluzioni di questo tipo sono datate all'inizio del '400, ma la loro diffusione si realizzò solo nel secolo successivo quando furono fabbricate molle d'acciaio perfettamente funzionanti e resistenti.

Questo dispositivo permetteva di appoggiare l'orologio sul tavolo o di portarlo con sé.

La misura precisa del tempo, che fino a quel momento non aveva riscosso molto interesse, cominciò a diventare pressante dopo il Rinascimento, con il sorgere della scienza moderna e non fu possibile prima della scoperta, da parte di Galileo, delle proprietà del pendolo.

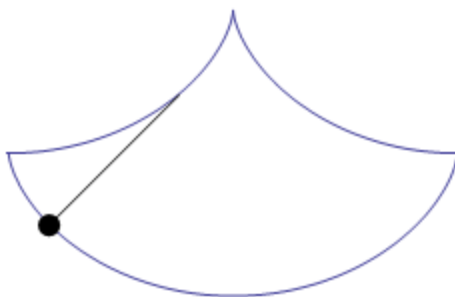
Il pendolo, consistente idealmente in un oggetto pesante sospeso a una corda leggera, ha oscillazioni il cui periodo non dipende dall'ampiezza, a patto che le oscillazioni non siano troppo ampie.



*Il grande orologio a una lancetta della torre di Palazzo Vecchio a Firenze*

La prima applicazione del pendolo come segnatempo fu uno strumento medico, il pulsilogio, che misurava il battito cardiaco dei pazienti: fu forse il pendolo a essere usato per misurare il battito del polso, e non il contrario, come vorrebbe la leggenda. Molti anni più tardi a Galileo venne in mente che il pendolo, accoppiato a un opportuno scappamento, avrebbe potuto costituire un ottimo meccanismo regolatore di un orologio. Solo quattordici anni dopo la sua morte venne realizzato un primo orologio completo basato sul suo progetto, e nel 1667, su ordine del granduca Ferdinando II, un regolatore a pendolo costruito su progetto del grande scienziato venne installato sull'orologio a una lancetta di Palazzo Vecchio a Firenze.

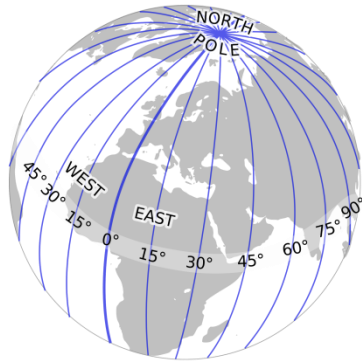
Gli esperimenti condotti dal fisico olandese Huygens, che brevettò l'orologio a pendolo, lo portarono a scoprire che esso è isocrono solo per piccole ampiezze. Dal punto di vista pratico il contributo di Huygens allo sviluppo dell'orologio a pendolo fu un'ingegnosa sospensione cicloidale volta a compensare il fatto che quando l'oscillazione diventa troppo grande il periodo cambia leggermente. Per realizzare ciò costruì due guide a forma di cicloide da applicare al punto di sospensione del pendolo. Si trattava di condizionare la traiettoria del pendolo facendo adagiare il filo di sospensione su due profili anch'essi a forma di arco di cicloide. Con questi accorgimenti Huygens fu il primo a costruire un pendolo perfettamente isocrono e accurato.



*Pendolo cicloidale con due profili ad arco di cicloide nel punto di sospensione del pendolo.*

Il Rinascimento segna l'inizio del commercio e delle esplorazioni che richiedevano traversate transoceaniche; la richiesta di un orologio stabile e affidabile a bordo, che avrebbe permesso al capitano di conoscere la longitudine a cui si trovava la nave ad un dato istante, divenne pressante. Un modo accurato per determinare la longitudine di una nave fu proposto nel 1522 da Jemme Reinersz: l'idea consisteva nel tenere a bordo un orologio stabile che continuasse a indicare in maniera attendibile l'ora del porto di origine e confrontarla con l'ora locale tramite una meridiana. Dalla differenza dei due orari si poteva dedurre di quale frazione di  $360^\circ$  la terra avesse ruotato negli istanti in cui il sole era al suo culmine in ciascuno dei due luoghi, e dunque la differenza tra le loro longitudini.





*Se si trova, ad esempio, che il mezzogiorno a bordo della nave, indicato dalla posizione del sole, è un'ora di ritardo rispetto a mezzogiorno del porto di partenza, significa che in quell'intervallo di tempo ci si è spostati di  $360^\circ/24=15^\circ$  a ovest.*

Un comune pendolo da appartamento, naturalmente, non sarebbe stato molto adatto allo scopo. I movimenti continui e talvolta violenti, uniti alle variazioni estreme delle condizioni di temperatura e umidità a bordo della nave durante il viaggio, ne avrebbero impedito un funzionamento corretto.

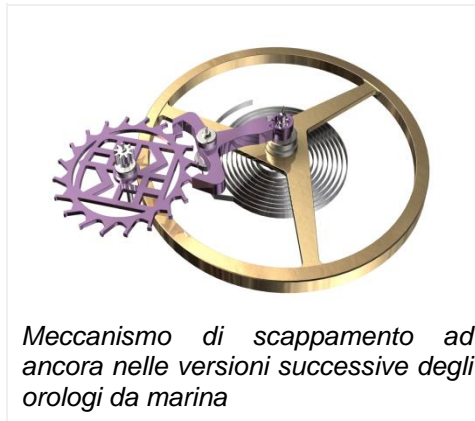
Un sostituto portatile dell'ingombrante pendolo fu inventato e brevettato da Huygens nel 1675: si tratta di un bilanciere a molla. La sua versione moderna consiste in una sottilissima molla a spirale di acciaio il cui alterno avvolgersi e svolgersi fa ruotare avanti e indietro un bilanciere a essa fissato. Nel XVIII secolo, tuttavia, i marinai erano ancora privi di uno strumento affidabile e preciso che permettesse di determinare le coordinate della propria nave, nonostante Filippo III di Spagna avesse promesso un premio di diecimila ducati, l'Olanda di venticinquemila fiorini e Luigi XIV di Francia di centomila fiorini a chiunque avesse risolto il problema della longitudine. Il premio inglese fu vinto da John Harrison con la quarta versione del suo orologio, collaudato nel 1761.



*Quarto prototipo di orologio da marina di Harrison, vincitore del premio*

Aveva un diametro di soli dodici centimetri e pesava un chilo e mezzo. Era pieno di particolari innovativi e volute ornamentali.

Il progetto del moderno cronometro da marina si fondava su versioni successive dell'orologio di Harrison. Per renderlo più robusto e resistente il moderno orologio meccanico contiene un bilanciere fatto di due metalli e un nuovo miglioramento dello scappamento ad ancora.



*Meccanismo di scappamento ad ancora nelle versioni successive degli orologi da marina*

Gli orologi marittimi basati su questi progetti sono rimasti in uso costantemente e in tutto il mondo per due secoli e mezzo. Oggi le coordinate di qualunque punto sulla superficie terrestre si possono determinare istantaneamente con un'incertezza dell'ordine del metro, grazie ai satelliti del sistema globale di posizionamento (GPS).

## OROLOGI MODERNI

La disponibilità di orologi accurati e attendibili (precisi al minuto) sia pubblici che personali divenne indispensabile nel XIX secolo in seguito allo sviluppo della ferrovia in Europa e in America, con l'interdipendenza degli orari dei treni. Il livello di precisione adatto al funzionamento della rete ferroviaria si rivelò tuttavia superiore: era necessario un ulteriore sviluppo. Il cambiamento più importante negli orologi moderni da polso e fissi fu l'uso dell'elettromagnetismo, in varie forme. La prima innovazione fu l'aggiunta di un motore elettrico per la ricarica. Un uso più significativo dell'elettricità arrivò quando gli orologiai cominciarono a sfruttare le vibrazioni del diapason dotato di una propria frequenza caratteristica, estremamente più alta di quella dei pendoli (intorno ai 400 Hz o cicli al secondo). Attraverso un meccanismo analogo allo scappamento del pendolo, queste vibrazioni si possono trasferire meccanicamente a una ruota e di qui alla rotazione delle lancette su un quadrante, mentre il diapason è sollecitato continuamente da stimoli elettromagnetici.

Risultati ancora migliori si sono ottenuti con cristalli di quarzo. La natura del cristallo fa sì che mantenga la sua forma grazie a forze di richiamo, simili a quelle che agiscono all'estremità di una molla, o sui rebbi di un diapason; perciò anche un cristallo ha una frequenza propria indipendente dall'ampiezza dell'oscillazione, a parte il fatto che il numero di vibrazioni al secondo è molto più elevato anche di quello di un diapason (32768 Hz). Rispetto al pendolo meccanico l'oscillatore al quarzo ha diversi, cospicui vantaggi: ha una grande mobilità e può avere dimensioni molto ridotte, ha bisogno di poca energia per essere alimentato ed è molto accurato.

Le vibrazioni naturali di un cristallo piezoelettrico sono un modo accurato e relativamente stabile per misurare il tempo, ma non sono totalmente affidabili nel lungo periodo. Col passare del tempo il periodo di oscillazione del cristallo decresce, facendo rimanere l'orologio indietro. Inoltre, per specifici esperimenti scientifici, è necessaria una misurazione del tempo ancora più accurata di quella fornita dal quarzo. Le caratteristiche fisiche dell'atomo hanno potuto dare risposta a queste nuove esigenze. L'atomo può infatti assumere un certo numero di stati eccitati, che sono caratteristici dell'elemento al quale appartiene. Quando passa ad un livello inferiore cede energia mentre ne assorbe quando passa ad un livello superiore. Il cambiamento di livello provoca emissione o assorbimento di radiazione elettromagnetica, la cui frequenza è determinabile con grandissima precisione. Molto adatti a essere utilizzati come "oscillatori" sono gli atomi di cesio. La definizione di unità di tempo si basa proprio su una transizione naturale del cesio: "Il secondo è l'intervallo di tempo che contiene 9.192.631.770 periodi della radiazione corrispondente alla transizione tra i due livelli iperfini dello stato fondamentale dell'atomo di cesio 133".

Il primo esemplare di oscillatore atomico a fascio di cesio fu realizzato in Gran Bretagna presso il National Physical Laboratory da L. Essen e J.V.L. Parry e messo in funzione nel 1955. Intorno al 1960 comparvero in commercio le prime realizzazioni di orologi atomici a fascio di cesio che si diffusero rapidamente nei laboratori che operavano nel settore della metrologia del tempo.

L'ultima generazione di campioni al cesio da laboratorio, del tipo a fontana atomica, anziché fasci di atomi impiegano atomi di cesio raffreddati con tecniche di "laser cooling". Per avere un'idea

circa l'accuratezza di un orologio di questo tipo, si può affermare che accumulerebbe un ritardo di un secondo in 30 milioni di anni. Uno dei cinque esemplari attualmente operanti al mondo di campione atomico a fontana di cesio, è regolarmente funzionante da alcuni anni anche presso l'I.N.R.I.M (Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica)

## LINK di approfondimento

Libro introduttivo sul tempo: "il pendolo di Galileo"

[https://books.google.it/books?id=00G6PAAACAAJ&dq=il+pendolo+di+galileo&hl=it&sa=X&redir\\_esc=y](https://books.google.it/books?id=00G6PAAACAAJ&dq=il+pendolo+di+galileo&hl=it&sa=X&redir_esc=y)

Scappamento schema

<http://www.arass-brera.org/it/indice-analitico/46-inventario/misura/tempo/151-scappamento-ad-ancora>

Orologio al quarzo

<https://youtu.be/Vft2fKVLVY>