RECERCA I APLICACIONS PRÀCTIQUES

De les colzades als qbits: metrologia i detecció a l'edat antiga, l'edat moderna i l'edat quàntica

Morgan Mitchell



Abstracció d'eines quàntiques de mesurament. Conceptualització: Luisa Quiroga

La detecció i la metrologia quàntiques són un dels quatre pilars canònics de la tecnologia quàntica, al costat de la computació quàntica, la simulació quàntica i la comunicació quàntica. La detecció és el mesurament dels fenòmens fugaços que ens envolten; l'extensió dels nostres sentits naturals amb mitjans tecnològics. La metrologia se sol definir com "la ciència del mesurament", un terme que amaga més del que revela. Com veurem, la metrologia és, alhora, una pràctica antiga implicada en l'ascens i la caiguda de les civilitzacions i una tecnologia a l'avantguarda de la recerca actual. En les últimes dècades, la detecció i la metrologia han utilitzat cada cop més la física quàntica, cosa que ha donat lloc a la detecció i la metrologia quàntiques. En aquest article esbossaré la naturalesa d'aquests temes i el paper únic que té la física quàntica en la detecció i la metrologia.



Materialització de la longitud a l'antic Egipte: patró de colzada reial trobat a la tomba de Maia, tresorer de Tutankamon. Copyright Alain Guilleux – Fotos Egypte (photosegypte.com)

Els mesuraments a la civilització antiga: la colzada

Un fragment d'estela conegut com la pedra de Palerm mostra que una unitat de longitud, la colzada, s'utilitzava a l'antic Egipte, com a mínim des del segle XXVII aC, per mesurar el nivell de l'aigua del Nil. Aquesta data és veritablement antiga, de poc després de la invenció del llenguatge escrit. El nom de *colzada* prové del llatí, però aquesta mateixa mesura, amb diferents noms, es va utilitzar a Mesopotàmia, el Llevant, Egipte i l'antiga Roma. Al món islàmic, la colzada es va fer servir fins ben entrat el període medieval, més de 3.000 anys després del seu primer ús registrat a Egipte. Va sobreviure a la civilització egípcia, les seves ciutats, els seus déus, les seves lleis i la seva llengua.

La colzada és aproximadament la distància que va del colze a la punta del dit del cor. És una mesura còmoda, molt fàcil d'emprar en el comerç senzill: si demanem a un venedor de teixits dues colzades d'una roba, és fàcil comprovar si el que ens dona és realment el que li hem demanat. No costa gaire imaginar una societat pretecnològica que se'n surt bé amb mesures informals com aquesta. Però les civilitzacions de Mesopotàmia, Egipte i el Llevant necessitaven mesures molt millors. Construïen estructures monumentals, comerciaven amb béns a ciutats llunyanes i governaven grans territoris. Per fer-ho, els calien mesures precises i que un gran nombre de persones les apliquessin de manera uniforme.

Klenovsky et al. [1] ofereixen una descripció vívida i succinta de com devia funcionar:

> Uns 3.000 anys aC, es va decretar que la unitat de longitud egípcia, la colzada reial, fos igual a la longitud de l'avantbraç, mesurat des del colze doblegat fins a la punta del dit mitger estirat, més l'amplada del palmell de la mà del faraó. Se'n va tallar un patró en un bloc de granit negre perquè perdurés per sempre. Per difondre aquesta unitat de longitud, als obrers que construïen tombes, temples i piràmides se'ls van subministrar regles de la mida d'una colzada fets de fusta o de granit. L'arquitecte o capatàs reial de cada obra s'encarregava de transferir, i després de mantenir, la unitat de longitud dels regles de colzada dels treballadors, que s'havien de comparar amb el patró mestre de colzada reial cada lluna plena. No fer-ho es castigava amb la mort [2].

Això il·lustra diversos elements clau de la metrologia tal com es practica actualment:

- En primer lloc, hi ha la unitat, en aquest cas la colzada reial. Era una unitat diferent de la colzada comuna utilitzada als mercats. La colzada reial es divideix en set palmells, cadascun dels quals es divideix en quatre dits.

- En segon lloc, hi ha la definició de la unitat: la colzada reial és la longitud de l'avantbraç més l'amplada del palmell de la mà del faraó. Un cop definida la unitat, es pot mesurar una cosa en colzades reials, fent servir el faraó com a referència. Això no és gens pràctic, ja que d'aquesta manera el faraó només serveix per a una vegada.

- En tercer lloc, i ha l'estàndard primer, el patró mestre en el bloc de granit negre, tallat de manera que coincideixi amb la longitud de l'avantbraç del faraó més el palmell de la seva mà. Aquest objecte manufacturat és la materialització de la colzada reial i està fet del material més dur, per fer-lo durador i a prova de manipulacions. Aquest patró estàndard és únic i, si es fa malbé o es perd, fallarà tot el sistema.

- En quart lloc, hi ha els patrons secundaris, que són còpies del patró primer. Aquests s'utilitzen per prendre mesures al camp, estan fets de materials menys valuosos i es poden degradar. Això és acceptable, perquè se'n poden fer més copiant el patró primer.

- En cinquè lloc, hi ha un procediment de calibratge dels patrons secundaris respecte del patró mestre. Es descarten els inexactes i es fan nous patrons secundaris segons les necessitats.

- En sisè lloc, hi ha procediments administratius, amb mesures d'execució per incompliment [3].

Així doncs, la metrologia té dimensions matemàtiques, físiques i administratives. També tenia dimensions personals, polítiques i religioses. Al faraó egipci se'l venerava com un déu: el patró mestre l'utilitzava com a referència física i els patrons secundaris es copiaven del primer. Aquesta proximitat al governant diví feia que els patrons fossin objectes venerables, igual que ho és la roba que vesteix un sant.

> La metrologia és, alhora, una pràctica antiga implicada en l'ascens i la caiguda de les civilitzacions i una tecnologia a l'avantguarda de la recerca actual

La grandesa del governant donava més legitimitat als patrons, i la grandesa d'un governant es pot inferir de l'abast de l'estandardització del seu patró. L'emperador Sargon d'Accad va aconseguir estandarditzar la colzada a Mesopotàmia, la qual cosa va ajudar a unir el seu imperi, a facilitar-ne el govern i a enriquir el seu poble mitjançant el comerç. Metrologia i

imperi són aliats i sovint pateixen la mateixa sort: la colzada de Sargon d'Accad va caure en desús com a mesura després de la caiguda de l'Imperi accadi.

Crisi i renaixement: Il·lustració i metrologia revolucionària

Al llarg dels mil·lennis, els imperis i els seus estàndards metrològics van anar i venir, amb pocs canvis respecte de l'antic model egipci. A Europa, l'últim emperador que va imposar un conjunt uniforme de mesures va ser Carlemany, cap al 800 dC. Després de Carlemany, el poder imperial va disminuir i van proliferar regnes més petits. Els governants locals definien patrons de mesures que s'adaptessin als seus objectius, sovint per aconseguir més tributs dels seus súbdits. En vigílies de la Revolució Francesa, es calcula que a França s'utilitzaven unes 800 unitats de mesura diferents, amb un quart de milió de definicions locals diferents [4]. El comerç en aquestes condicions era extremament difícil. En efecte, el sistema polític havia corromput la metrologia per al seu propi benefici.

Els revolucionaris francesos van considerar que l'antic sistema d'unitats, igual que el sistema polític de l'antic règim, era il·legítim, profundament injust per a la gent comuna i que era necessari substituir-lo a gran escala. Després de l'assalt de la Bastilla el 1789, Lluís XVI va convocar els Estats Generals per negociar amb els representants del poble. La majoria de pobles van incloure a la seva llista de demandes l'establiment de mesures uniformes. El 1790, l'Assemblea Nacional Francesa, l'òrgan de govern *de facto* durant la Revolució Francesa, va votar a favor de crear un nou sistema de mesures, que s'havia de convertir en el sistema internacional d'unitats (SI), el sistema mètric que fem servir avui.

El nou sistema es basava en propostes dels pensadors de la Il·lustració del segle anterior. Aquests volien ser racionals i universals, reformar les mesures "per a tothom, per sempre", i situar la metrologia sobre una base duradora, a recer de les vicissituds de la política. El poble ja no patiria sota regles inventades per faraons i retorçades per emperadors i aristòcrates. Aquests eren els elements clau:

- Les unitats eren digitals (relacionades per potències de deu) i eren les mínimes possibles, amb el metre com a referència per a altres unitats; per exemple, un litre es defineix com un decímetre cúbic.

- Les unitats es definien per estàndards naturals disponibles universalment. Un quilogram era el pes d'un litre d'aigua pura. El metre era una deu milionèsima part de la distància del pol a l'equador, al llarg del meridià de París.

- Es van definir patrons i calibratges principals i secundaris.

- La governança del sistema mètric seria internacional, per tractat.

Tot i que el sistema mètric té una nomenclatura neutra i secular i va eliminar unitats derivades de monarques divins com ara la colzada o el *pied de roi* (el peu de Carlemany), introdueix d'amagat un element diví a les definicions de les unitats. Molts dels científics de

la Il·lustració que van dissenyar el sistema mètric subscrivien el deisme, una teologia racionalista que postula un creador no intervencionista, l'existència del qual es revela en la seva creació: el món natural. Un metre o un quilogram, referits a la Terra o a l'aigua pura, tornaven a ser mesures vinculades a la divinitat.



Materialització de la longitud després de la Revolució Francesa: patró públic del metre, plaça Vendôme, París.

La realitat desordenada: la metrologia postrevolucionària

Els plans universalistes del sistema revolucionari van resultar difícils d'implantar. El metre era la clau del sistema mètric i es definia en funció de la mida de la Terra. Mesurar el meridià era difícil: l'expedició del 1792 de Delambre i Méchain va acabar amb la mort de Méchain i la producció d'un patró primer, el *mètre des Archives*, a partir de les dades defectuoses de Méchain. Es van produir i distribuir patrons secundaris. Alguns es van instal·lar a les parets dels edificis; espais on podia accedir qualsevol ciutadà. La imatge del metre mostra un patró secundari en una paret a París.

Els treballs de prospecció per mesurar la longitud del meridià van continuar al llarg del segle XIX, inclosa una expedició espectacularment agosarada d'un nord-català de vint anys, Francesc Aragó [5]. També es va avançar en la comprensió de la forma de la Terra. Aquests perfeccionaments van donar lloc a càlculs fluctuants de la llargada del meridià i a debats interminables, com sol passar en ciència. Va quedar clar que el patró de la Terra no duria a la mesura ideal "per a tothom, per sempre" que es van imaginar el 1790. El 1867, el patró de la Terra es va abandonar efectivament quan el metre internacional es va definir com la longitud del *metre des Archives*, conegut per reflectir de manera inexacta la dimensió de la Terra, però, amb tot, un patró primer perfectament funcional que ja s'utilitzava.

A la difusió del sistema mètric hi van ajudar les guerres napoleòniques, que van desestabilitzar la política europea i van oferir oportunitats als reformadors de mentalitat racional. Una vegada més, metrologia i imperi es van aliar. Irònicament, la població civil francesa es va resistir al nou sistema que s'havia creat per alliberar-la, i durant un temps

van tornar a les mesures tradicionals. Finalment, però, el sistema mètric es va estendre a gairebé tots els racons del món. Tanmateix, la promesa més gran dels revolucionaris no es va complir. Ara la base del sistema eren els artefactes conservats a París, patrons primers que no gaudien d'universalitat i que es basaven en tractats —per tant, en política— per a la seva legitimitat i ús.

Un regal de la física microscòpica: la metrologia quàntica

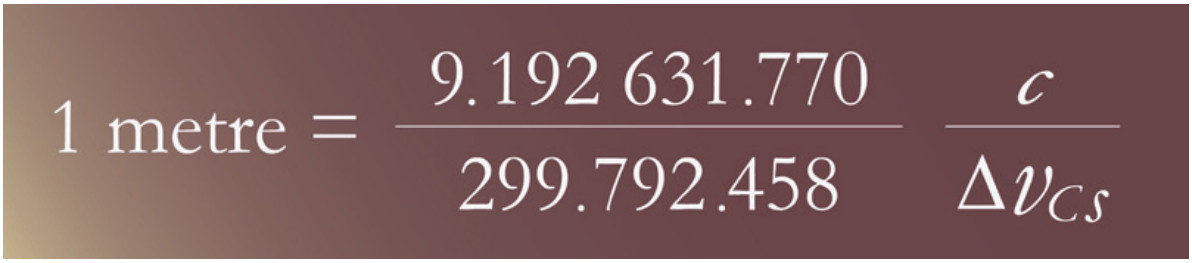
Un problema fonamental per a la metrologia revolucionària és la mutabilitat del món clàssic. El sistema mètric es va definir utilitzant la Terra i l'aigua pura, a causa de la seva immutabilitat percebuda. Però les dimensions de la Terra pateixen alteracions degudes a les marees, l'activitat sísmica, el vulcanisme, etc. A més, la velocitat de rotació de la Terra —utilitzada per definir el segon— no és constant. La precisió de qualsevol metrologia basada en la Terra necessàriament serà limitada.

Un altre problema bàsic és l'accessibilitat. Mentre que l'aigua pura es pot obtenir a qualsevol lloc amb recursos modestos, els mesuraments del meridià de París s'han de fer a França i a Espanya, amb un gran cost i esforç. Tot i que, vist retrospectivament, la Terra pot haver estat una mala elecció com a referència, el fet és que la física clàssica no ofereix cap altra bona opció. La física anterior al 1900, la de Newton, Lagrange i Maxwell, entre d'altres, descriu magnituds contínues que poden adoptar qualsevol valor. Aquesta física manté el silenci sobre si aquests valors poden canviar en el temps o d'un lloc a un altre. Que la densitat de l'aigua era de fet la mateixa a tot arreu era una observació purament empírica; no hi ha res en la física clàssica que digui que ha de ser així.

> El descobriment a partir del 1900 dels àtoms i les partícules subatòmiques va donar noves esperances a la metrologia universal. La promesa de mesurar "per a tothom, per sempre" s'anava fent realitat

El descobriment a partir del 1900 dels àtoms i les partícules subatòmiques, com ara els electrons, els protons i els neutrons, va donar noves esperances a la metrologia universal. Aquests elements microscòpics obeeixen a la física quàntica, no a la física clàssica. El món microscòpic és discret: els nombres enters d'àtoms i les partícules ocupen un nombre comptable d'estats amb energies específiques i ben definides. La física microscòpica també és uniforme: tots els àtoms d'un element i isòtop determinats són idèntics, amb propietats inalterables [6]. Què passaria si la metrologia, en lloc d'utilitzar artefactes com a patrons, utilitzés àtoms? Les línies espectrals atòmiques ja eren conegudes al segle XIX, i l'any 1827 ja es van fer propostes per fer-les servir com a patrons. Els avenços del segle XX en espectroscòpia i en desenvolupament de la teoria quàntica van assentar aquestes propostes sobre una base sòlida.

El 1960, el metre —sistema internacional— es va definir exactament com a 1.650.763,73 longituds d'ona de la llum emesa per l'isòtop ^{86}Kr (criptó-86) a la transició entre $2p_{10}$ i $5d_5$ [7]. Sens dubte, era pràctic mesurar longituds amb llum de transicions atòmiques específiques, i més endavant amb llum de làsers que estan ajustats per ressonar amb transicions atòmiques. Després, el segon es va definir exactament com a 9.192.631.770 oscil·lacions de l'àtom de cesi (Cs) en la seva transició hiperfina d'estat fonamental. Els rellotges atòmics amb cesi —oscil·ladors sintonitzats amb la freqüència de transició de l'àtom de cesi— es van convertir en els millors cronometradors i es van comercialitzar. La promesa de mesurar "per a tothom, per sempre" s'anava fent realitat. Però el quilogram es resistia obstinadament a aquest enfocament, malgrat tots els esforços per comptar el nombre d'àtoms en esferes de silici cristal·lí pur per a una possible definició del quilogram com la massa d'un nombre específic d'àtoms de silici.



Desmaterialització de la longitud des del 1983: definició del metre en termes de la velocitat de la llum, *c*, la freqüència
de transició hiperfina del cesi atòmic ΔνCs i una fracció racional.

L'última frontera: metrologia a partir de constants fonamentals

A partir de l'any 1887, els experiments de Michelson i Morley havien demostrat que la velocitat de la llum era una constant, fins i tot per a un observador en moviment. Einstein va construir la molt reeixida teoria de la relativitat especial al voltant d'aquest fet, inclosa la famosa $E = mc^2$, on *c* és la velocitat de la llum. La relativitat i la seva constant *c* es van convertir en una base de la teoria física, i les tècniques per mesurar *c* van créixer en sofisticació i precisió, amb l'ajuda de la invenció del làser. Els metròlegs hi van veure una oportunitat: en lloc de definir el metre amb longituds d'ona atòmica específica, el podrien definir amb la velocitat de la llum i el segon mesurat. El 1983, el metre es va definir d'aquesta manera, tal com s'ha il·lustrat anteriorment. Ara la velocitat de la llum és una quantitat definida: exactament 299.792.458 metres per segon. Totes les "mesures de la velocitat de la llum" actuals són de fet mesures de la longitud del metre.

> Disposar d'un sistema de metrologia a prova de futur és aconseguir que pugui ser utilitzat no només per les civilitzacions humanes existents amb les tecnologies actuals, sinó també per qualsevol

> civilització futura, sigui quina sigui la tecnologia que existeixi aleshores

Si les definicions d'unitats atòmiques van fer que la metrologia estigués disponible "per a tothom" per la fàcil disponibilitat d'àtoms idèntics, la definició amb constants fonamentals contribueix a fer que la metrologia estigui disponible "per sempre". Qualsevol referència atòmica donada, com la longitud d'ona del ^{86}Kr, és probable que sigui substituïda per tècniques metrològiques més precises o més atractives. En referenciar les unitats a les constants fonamentals que apareixen en la descripció de qualsevol mesura atòmica, el sistema mètric esdevé estable enfront del canvi tecnològic. Aquest és el somni d'un sistema de metrologia a prova de futur, que pugui ser utilitzat no només per les civilitzacions humanes existents amb les tecnologies actuals, sinó també per qualsevol civilització futura, sigui quina sigui la tecnologia que existeixi aleshores. El 2018 es va tornar a revisar el sistema internacional, de manera que ara totes les unitats de longitud, temps, massa, elèctriques i tèrmiques es defineixen amb les constants fonamentals c (velocitat de la llum), e (càrrega d'electrons), h (quàntum d'acció), k_B (constant de Boltzmann, que relaciona la temperatura amb l'energia) i $\Delta\nu_{Cs}$, l'única quantitat de referència d'àtoms que queda del sistema.

La detecció quàntica

Paral·lelament a aquests desenvolupaments metrològics, i beneficiant-se'n, han aparegut una infinitat de tecnologies quàntiques per a la detecció. Ara s'utilitza una variant de l'experiment de Michelson i Morley per mesurar la velocitat de la llum per detectar ones gravitatòries (Premi Nobel de Física l'any 2017). La física quàntica que ens permet entendre les línies espectrals atòmiques es fa servir per dissenyar instruments atòmics que facin mesuraments magnètics extremament precisos, amb aplicacions en imatgeria mèdica [8].

La informació quàntica també s'utilitza en la detecció quàntica. Des del 1980, se sap que l'entrellaçament quàntic, un facilitador de la computació quàntica que fa servir qbits (no colzades), també permet mesures més sensibles. Des del 2010, els detectors d'ones gravitacionals han millorat la seva sensibilitat mitjançant estats entrellaçats coneguts com a *llum comprimida*, també possibles amb sensors atòmics [9].

Un instrument metrològic prou avançat també pot esdevenir, de fet, un sensor. Segons la teoria general de la relativitat d'Einstein, la velocitat d'un rellotge es veu afectada per la gravetat. Els rellotges atòmics actuals són tan precisos que comparar-ne dos ens pot permetre mesurar diferències de profunditat a escala de centímetre dins del potencial gravitatori de la Terra i, per tant, canvis minúsculs en la forma de la Terra.

NOTES I REFERÈNCIES

1 — Klenovsky, P.; Wouters, M.; De Waal, W. (2022). “The metrology behind trade”. *Nature Physics*, núm. 18, p. 842.
2 — Aquesta citació s’ha extret d’un comentari escrit per tres metròlegs (que jo sàpiga, cap d’ells egiptòleg). El comentari no proporciona referències, però sembla que prové d’un article d’opinió de De Bièvre, també metròleg: De Bièvre, P. (2005). “Learning lessons from Ancient Egypt”. *Accreditation and Quality Assurance*, núm. 10, p. 325-326. Per a una discussió arqueològica sobre la mateixa qüestió, vegeu: Monnier, F.; Petit, J.-P.; Tardy, C. (2016). “The use of the ‘ceremonial’ cubit rod as a measuring tool. An explanation”. *Journal of Ancient Egyptian Architecture*, núm. 1, p. 1-9.
3 — La pena de mort no és una característica habitual dels sistemes metrològics moderns, però la metrologia comercial —per exemple el mesurament d’energia elèctrica, de combustible, etc.— sovint té conseqüències legals per incompliment.
4 — Palaiseau, Jean-François-Gaspard (1816). *Métrologie universelle, ancienne et moderne : ou Rapport des poids et mesures des empires, royaumes, duchés et principautés des quatre parties du mond*. Bordeaux: Lavigne jeune.
5 — L’autobiografia de Francesc Aragó es pot trobar en línia.
6 — Encara que la física quàntica té en compte el fet que les propietats atòmiques com ara la massa de l’electró canviïn amb el temps, aquest canvi es manifestaria no solament en un element, sinó en tots, ja que una única teoria quàntica descriu tots els àtoms. A més, els efectes serien observables; per exemple, comparant l’espectre d’un àtom de molts electrons amb l’espectre de l’àtom d’hidrogen d’un sol electró. Aquestes comparacions s’han fet amb una gran precisió i no s’ha observat cap canvi en les propietats atòmiques.
7 — Baird, K. M.; Howlett, L. E. (1963). “The International Length Standard”. *Applied Optic*s, núm. 2, p. 455-463.
8 — Boto, E. *et al.* (2017). “A new generation of magnetoencephalography: Room temperature measurements using optically-pumped magnetometers”. *NeuroImage*, núm. 149, p. 404-414.
9 — Troullinou, C. *et al.* (2021). “Squeezed-Light Enhancement and Backaction Evasion in a High Sensitivity Optically Pumped Magnetometer”. *Physical Review Letters*, núm. 127, 193601.



Morgan Mitchell

Morgan Mitchell és professor ICREA a l'Institut de Ciències Fotòniques (ICFO). Es va llicenciar en Física amb menció en Filosofia a l'Swarthmore College i es va doctorar en Física a la Universitat de Califòrnia, a Berkeley. Ha fet estades postdoctorals amb el grup de Serge Haroche (Premi Nobel de Física de l'any 2012) al Laboratoire Kastler-Brossel de París, i amb el grup d'Aefhraim Steinberg a la Universitat de Toronto. Ha fet contribucions fonamentals en l'àmbit de la detecció quàntica, entre les quals destaquen els primers usos de llum comprimida i spins atòmics comprimits en magnetometria, i el primer sensor magnètic que demostra una resolució d'energia per amplada de banda més enllà del quàntum d'acció $\hbar$. Algunes de les seves contribucions a la metrologia quàntica són el primer ús d'estats entrellaçats multifotons per a un mesurament de superresolució, així com protocols que permeten que els rellotges atòmics òptics funcionin més enllà del límit del soroll de descàrrega.