

Molt de química!

DIVERSOS MÈTODES PER DETERMINAR
EXPERIMENTALMENT LA CONSTANT
D'AVOGADRO



TREBALL DE RECERCA DE BATXILLERAT

Curs 2011-2012



Molt de química!

DIVERSOS MÈTODES PER DETERMINAR
EXPERIMENTALMENT LA CONSTANT
D'AVOGADRO

Abstract

The Avogadro constant links the atomic and the macroscopic properties of matter. This essay, which consists on an extensive study of this constant, is divided into two parts: the first one consists on an extensive explanation of the amazing history behind this number, while the second one is made up of five reviews each of which explains a different method to find out it's value. All the analyzed methods can be done at a typical high school's laboratory. Each review includes a statistical analysis based on the results that I obtained by doing this experiments.

TREBALL DE RECERCA DE BATXILLERAT

Curs 2011-2012

Agraïments

Vull dedicar aquest treball de recerca a aquelles persones que, al oferir-me, en un acte totalment irracional e incomprensible, el seu ajut desinteressat, han posat un altre cop en evidència la naturalesa bondadosa de l'ésser humà.

Especialment, a en [REDACTED], qui ha estat la persona que m'ha guiat al llarg d'aquest treball, qui n'ha traçat les línees mestres i a qui he recorregut per resoldre els meus no pocs dubtes. Sense la seva ajuda, aquest treball mai hauria passat de ser un simple esbós improvisat al que és ara.

Tampoc oblidó a aquelles persones que han mostrat un interès desinteressat per ajudar-me, com ara en [REDACTED], company meu de l'institut, qui em va ajudar a soldar uns elèctrodes de grafit, malgrat que després no anar van gaire bé; la conserge de l'institut, qui va voler esperar un divendres a a tarda deu minuts per a que jo podés acabar el meu experiment, i al dependent de la botiga de materials elèctrics, qui va tenir la paciència i la imaginació necessàries per comprendre que era allò que li demanava.

I a algú altre que ja ho sap i no vol sortir aquí.

A tots, gràcies.

Índex

| | Pàgina |
|--|--------|
| 1. Descobrint Avogadro | |
| 1.1 Introducció | 11 |
| 1.2 Presentació i objectius | 13 |
| 1.3 Història de la constant d'Avogadro | 14 |
| 2. Disseny experimental | |
| 2.1 Experiment 1. Determinació experimental de la constant d'Avogadro a partir de l' electròlisi de l'aigua en medi àcid i en medi bàsic | |
| 2.1.1 Raonaments teòrics | 22 |
| 2.1.2 Objectius de la pràctica | 27 |
| 2.1.3 Disseny de l'experiment | |
| 2.1.3.1 Descripció de l'experiment | 28 |
| 2.1.3.2 Utilatge | 30 |
| 2.1.3.3 Procediments | 31 |
| 2.1.4 Resultats obtinguts | 35 |
| 2.1.5 Anàlisi estadístic dels resultats obtinguts | 40 |
| 2.1.6 Conclusions de l'experiment | 42 |
| 2.2 Experiment 2. Determinació experimental de la constant d'Avogadro a partir de l' electrodeposició del coure | |
| 2.2.1 Raonaments teòrics | 43 |
| 2.2.2 Objectius de la pràctica | 45 |
| 2.2.3 Disseny de l'experiment | |
| 2.2.3.1 Descripció de l'experiment | 45 |
| 2.2.3.2 Utilatge | 45 |
| 2.2.3.3 Procediments | 46 |
| 2.2.4 Resultats obtinguts | 49 |
| 2.2.5 Anàlisi estadístic dels resultats obtinguts | 49 |
| 2.2.6 Conclusions de l'experiment | 50 |

| | |
|--|----|
| 2.3 Experiment 3. Determinació experimental de la constant d'Avogadro a partir de l'estudi d'estructures cristal·lines | |
| 2.3.1 Raonaments teòrics | 51 |
| 2.3.2 Objectius de la pràctica | 54 |
| 2.3.3 Disseny de l'experiment | |
| 2.3.3.1 Descripció de l'experiment | 55 |
| 2.3.3.2 Utiltatge | 55 |
| 2.3.3.3 Procediments | 55 |
| 2.3.4 Resultats obtinguts | 58 |
| 2.3.5 Anàlisi estadístic dels resultats obtinguts | 60 |
| 2.3.6 Conclusions de l'experiment | 61 |
| | |
| 2.4 Experiment 4. Determinació experimental de la constant d'Avogadro a partir de l'estudi del moviment brownià | |
| 2.4.1 Raonaments teòrics | 63 |
| 2.4.2 Objectius de la pràctica | 65 |
| 2.4.3 Disseny de l'experiment | |
| 2.4.3.1 Descripció de l'experiment | 66 |
| 2.4.3.2 Utiltatge | 66 |
| 2.4.3.3 Procediments | 66 |
| 2.4.4 Resultats obtinguts | 70 |
| 2.4.5 Anàlisi estadístic dels resultats obtinguts | 70 |
| 2.4.6 Conclusions de l'experiment | 70 |
| | |
| 2.5 Experiment 5. Determinació experimental de la constant d'Avogadro a partir de l'estudi de capes monomoleculares d'àcids grassos | |
| 2.5.1 Raonaments teòrics | 72 |
| 2.5.2 Objectius de la pràctica | 74 |
| 2.5.3 Disseny de l'experiment | |
| 2.5.3.1 Descripció de l'experiment | 75 |
| 2.5.3.2 Utiltatge | 75 |
| 2.5.3.3 Procediments | 75 |
| 2.5.4 Resultats obtinguts | 78 |
| 2.5.5 Conclusions de l'experiment | 78 |
| | |
| 3. Conclusions | |
| 1.1 Valoracions prèvies | 81 |
| 1.2 Avaluació del mètode | 82 |
| 1.3 Conclusions finals | 83 |

| | |
|---|-----|
| 3. Referències documentals | 85 |
| 4. Annexos | |
| Annex 1 – Preparació de dissolucions | 86 |
| Annex 2 – Tractament estadístic de les dades | 89 |
| Annex 3 – El microscopi òptic | 93 |
| Annex 4 – Propietats de l'aigua en funció de la seva temperatura | 96 |
| Annex 5 – Taula de pressió de vapor | 97 |
| Annex 6 – Determinació experimental de la constant d'Avogadro a partir del recompte d'àtoms de ^{28}Si | 98 |
| Annex 7 – Fitxes de seguretat | 103 |

1. Descobrint Avogadro

| | |
|--|----|
| 1.1 Introducció | 11 |
| 1.2 Presentació i objectius | 13 |
| 1.3 Història de la constant d'Avogadro | 14 |

1.1 Introducció

Un dels millors mètodes que existeix per posar a prova els nostres coneixements científics i les capacitats de la nostra tecnologia radica en la nostra habilitat per determinar amb exactitud i precisió els valors de les constants fonamentals. De totes aquestes, hi ha una que té un mèrit especial, doncs relaciona, d'una forma gairebé poètica, les propietats microscòpiques de la matèria amb les macroscòpiques. Es tracta de la constant d'Avogadro.



Figura 1: concepte de la constant d'Avogadro

La constant d'Avogadro, anomenada també número d'Avogadro, acostuma a ser definida com el número d'àtoms de carboni que hi ha en una mostra de 12g de carboni 12 (¹²C). Explicada d'una manera més general, indica la quantitat de partícules que hi ha en un mol de qualsevol substància pura. Així doncs, indica, per exemple, el nombre de molècules d'aigua (H₂O) que hi ha en 18,0152g d'aquesta, que és el que pesa un mol d'aigua. La constant d'Avogadro estableix un pont entre les propietats microscòpiques i macroscòpiques de la matèria, i gràcies a ella, es pot establir, per exemple, una relació entre les energies individuals dels àtoms i de les molècules – les quals poden ser determinades mitjançant tècniques espectroscòpiques– amb les energies termodinàmiques de la matèria macroscòpica –les quals poden ser obtingudes realitzant experiments calorimètrics. L'any 2006, el Comitè d'Informació per a la Ciència i la Tecnologia va establir el valor següent com a número d'Avogadro:

$$N_A = 6,02213199(47) \times 10^{23}$$

Un dels majors encants de la constant d'Avogadro radica en el ordre de magnitud i en el que aquest representa. El seus valors són tan extrems que hem de recórrer a símils per poder fer-nos una petita idea del significat del seu valor, de la mateixa manera que el antics havien de recórrer a la mitologia per explicar-se fets com la sortida i la posta del sol. Així doncs, si una molècula ocupés el mateix volum que un gra de sorra (aproximadament 1mm³), en un mol hi haurien suficients com per cobrir tota la superfície del Regne Unit amb una capa d'uns quants quilòmetres d'espessor. Aquesta immensitat del ordre de la constant d'Avogadro contrasta frontalment amb el que indica. Un àtom és infinitament petit: la relació entre aquest i la llargària d'una línia de un mil·límetre de longitud és la mateixa que la que hi ha entre el gruix d'un full de paper i l'alçada del Empire State de Nova York.

Aquest treball de recerca ha estat elaborat amb la intenció d'esdevenir un estudi força ampli sobre la constant d'Avogadro. És important fer notar que el nostre objectiu no és calcular el valor d'aquesta constant d'una manera especialment precisa i exacta, doncs som conscients de que el caràcter rudimentari dels mitjans dels quals disposem ens ho impediria. El que s'ha fet és, doncs, un recull d'alguns dels mètodes existents per calcular la constant d'Avogadro, s'han elaborat els seus corresponents protocols i aquests han estat realitzats al laboratori del institut.

Finalment, amb les dades dels resultats obtinguts, s'ha fet una petita valoració de cada mètode, tot indicant els avantatges i els desavantatges que cadascun comporta. Aquestes conclusions parcials inclouen, a més, diverses observacions i recomanacions destinades a perfeccionar els mètodes millorant la qualitat dels seus resultats. Un altre dels objectius que ens vam plantejar a l'inici d'aquest treball de recerca era, precisament, perfeccionar tant com ens fos possible els mètodes que proposàvem. Aquest treball està complementat, a més, amb una extensa explicació de la història de la constant d'Avogadro. A continuació trobareu un extens resum de l'estructura d'aquest treball de recerca. Els objectius que ens varem proposar seran explicats de nou d'una manera més extensa i alhora més explícita més endavant.

Aquest treball de recerca està dividit en tres parts: preàmbul, disseny experimental i valoracions finals. El preàmbul inclou, a més d'aquesta introducció i dels objectius del treball, una detallada explicació de la història de la constant d'Avogadro. La història del número de Avogadro es correspon amb els primers cinquanta anys de vida de la química moderna, i per aquesta raó resulta especialment interessant. En aquest apartat hi trobareu fragments textuais d'articles científics escrits per químics tan il·lustres com Antoine Lavoissier, John Dalton i Gay-Lussac, a més d'alguns dels seus resultats experimentals. D'aquesta manera, podreu seguir sense problemes els raonaments i deduccions que es varen fer i que assentaren les bases de la química moderna.

Tota la resta del treball està dedicada a presentar diferents mètodes per calcular experimentalment la constant d'Avogadro i a valorar-los. Aquest treball de recerca proposa, en total, cinc mètodes diferents per calcular la constant d'Avogadro: la determinació experimental de la constant d'Avogadro a partir de l'electròlisi de l'aigua en medi àcid i en medi bàsic, la determinació experimental de la constant d'Avogadro a partir de l'electrodeposició del coure, la determinació experimental de la constant d'Avogadro a partir de l'estudi de monocapes moleculars d'àcids grassos, la determinació experimental de la constant d'Avogadro a partir de l'estudi d'estructures cristal·lines i la determinació experimental de la constant d'Avogadro a partir de l'estudi del moviment brownià. Aquests mètodes són totalment independents els uns dels altres. Així doncs, es pot considerar que la segona part d'aquest treball de recerca està formada per cinc mini-treballs independents. Val a dir que l'estructura que aquests presenten és sempre la mateixa: primerament es presenten els fonaments teòrics del mètode, després ens plantegem l'objectiu de posar a prova aquest mètode al laboratori del nostre institut i, a més, ens preguntem com poden afectar determinats factors als resultats. A continuació es presenta un protocol on s'explica com dur a terme l'experiment amb estris disponibles al laboratori d'un institut secundària i, seguidament, es mostren els resultats que nosaltres varem obtenir. Finalment, se'ls hi aplica un tractament estadístic i es dona resposta a les nostres preguntes inicials.

A la tercera part d'aquest treball, l'anomenada valoració final, trobareu un resum clar i concret dels resultats obtinguts a partir de les proves experimentals i un informe centrat en comparar els diferents mètodes entre ells. També hi trobareu els apartats de la bibliografia i dels agraïments.

Aquest treball de recerca presenta un nombre considerable d'annexes, els més importants dels quals són d'elaboració pròpia, els quals, a més, malgrat no ser absolutament imprescindibles, ajuden a una millor comprensió del treball. En total hi ha vuit annexes: el primer explica, en termes generals, com es prepararen les dissolucions químiques; el segon explica el tractament estadístic que s'ha aplicat a la majoria dels resultats obtinguts; el tercer explica quines són les peces més importants d'un microscopi òptic i com fer-lo anar, el quart i el cinquè annexes són dues taules les quals indiquen, respectivament, les propietats de l'aigua i el valor de la pressió de vapor en funció de la temperatura. El sisè annex és una adaptació d'un article científic de publicació molt recent en el qual s'explica com un grup de tècnics russos va determinar, mitjançant les tècniques més modernes i precises, el valor de la constant d'Avogadro. Val a dir que en aquest annex es parla de conceptes molt complexos. Finalment, adjunt a aquest treball de recerca, s'ha presentat un DVD amb dues gravacions d'un moviment brownià, a més de les dades d'alguns experiments realitzats al laboratori de l'institut.

1.2 Presentació i objectius

L'objectiu principal d'aquest treball de recerca és dur a terme un extens estudi de la constant d'Avogadro. Per fer aquest estudi, primerament, es farà un recull dels diferents mètodes existents per calcular aquest nombre i , a més, s'intentarà perfeccionar-los tant com sigui possible. També es farà una extensa explicació de la seva història, ja que s'ha considerat que, en certa manera, un treball sobre la constant d'Avogadro no podria ser considerat complet si no l'inclogués. Així doncs, aquest treball de recerca consta de dos objectius principals força independents l'un de l'altre. Els objectius principals són els dos següents:

- 1) Fer un recull el màxim extens possible dels diferents mètodes existents per calcular la constant d'Avogadro, explicar-los i valorar els principals avantatges i desavantatges que cadascun comporta.
- 2) Explicar detalladament i donar a conèixer la sorprenent i , en gran part desconeguda, història que hi ha darrere d'aquesta constant.

Resulta necessari enunciar un conjunt de preguntes que hauríem de ser capaços de respondre un cop acabat el treball. D'aquesta manera, s'aconsegueixen dues coses: d'una banda ens assegurem de que aquest treball no perdrà el nord, i, de l'altra, ens facilitarà la síntesi de tota la informació en l'apartat de la valoració final. Així doncs, les respostes que es donaran en el darrer apartat seran força breus i concretes, però alhora més que suficients. En aquest darrer apartat també inclourem una informe centrat en comparar els diferents mètodes entre ells, valorant l'exactitud i la precisió dels seus resultats, el grau de complexitat de la seva base teòrica i el grau de dificultat que comporta la seva posada a la pràctica.

Història de la constant d'Avogadro

- Quan va ser formulada la constant d'Avogadro?
- Quan va ser el seu valor estimat per primer cop? Qui ho va fer?
- Com han evolucionat els mètodes emprats per la comunitat científica per determinar experimentalment el valor de la constant d'Avogadro, des de principis del segle XX fins a l'actualitat?

Recerca de mètodes per calcular el valor de la constant d'Avogadro

- Quins mètodes podem utilitzar per estimar el valor de la constant d'Avogadro amb els mitjans dels quals disposa el laboratori del nostre institut?
- De tots els mètodes que hem provat, quin ofereix els resultats més exactes? I els més precisos? Quins és el mètode més viable?

Cada pràctica inclourà, a més, una sèrie d'objectius secundaris destinats a perfeccionar els diferents mètodes proposats.

1.3 Història de la constant d'Avogadro

La història de la constant d'Avogadro és única en la història de la ciència: és una història lligada a la d'una hipòtesi que ofería una solució a una qüestió on havia encallat la química, que permetria establir un pont entre les propietats dels àtoms individuals i les característiques de la matèria a gran escala i que estava destinada a permetre donar el pas necessari per poder representar bona part dels fenòmens químics amb expressions matemàtiques. Una hipòtesi que va ser rebutjada i oblidada durant molts anys i que, fins i tot quan va ser convertida en llei, encara va ésser capaç d'oferir mals de caps a químics i físics de tot el món durant dècades.

La història de la constant d'Avogadro és la història de la química moderna: una història que comença a l'antiga Grècia amb dos filòsofs i una estranya teoria metafísica anomenada atomisme mecanicista, que continua durant el període de la Il·lustració i fa una visita al laboratori de Lavoissier durant la convulsa època de la Revolució Francesa. És una història amb una protagonista que no apareix fins al període del Resorgimiento italià, que desapareix durant dècades i que ressuscita durant la celebració del Primer Congrés Internacional de Químics. La història de la constant d'Avogadro té fins i tot un final feliç, digne d'una pel·lícula de Hollywood: acaba amb l'entrega d'un Premi Nobel de Física i amb un homenatge per part del guanyador d'aquest a l'home que va formular la hipòtesi, que fins aquell moment havia caigut en un relatiu oblit.

Embarquem-nos, doncs, en aquest apassionant viatge, que ens presentarà alguns dels químics més importants de la història, com ara Lavoissier, Dalton i Gay-Lussac, ens mostrarà alguns dels seus experiments, i ens permetrà llegir els seus articles i treballs tal i com ells els van escriure, tot per esbrinar l'origen de la constant d'Avogadro.

1.3.1 De l'antiga Grècia a la Il·lustració

L'idea que la matèria està formada per àtoms té el seu origen en dos filòsofs de la antiga Grècia: Leucip i Demòcrit. A aquest dos filòsofs se'ls atribueix la concepció del anomenat atomisme mecanicista, una teoria metafísica que enuncia que la realitat està formada per dos elements: per unes partícules infinites, indivisibles, de formes variades i que sempre es troben en moviment, anomenades àtoms (del grec, allò que no es pot dividir) i pel buit. Aquesta idea defensa tant l'existència de l'ésser com la del no-ésser, el primer dels quals estaria format per àtoms i el segon pel buit. L'atomisme mecanicista, però, va ser rebutjat per Aristòtil i la comunitat científica no en va tornar a parlar seriosament del tema fins a uns quants segles després.

L'any 1646, Jean Chrysostôme Magnen va publicar l'obra titulada *Democritus Reviviscens*, que es caracteritzà per ser la primera en proposar una alternativa a la ciència d'Aristòtil. En aquest llibre, es descrivia un experiment ideat per observar la difusió del encens a l'interior d'una església. D'aquesta manera, es pretenia estudiar les característiques de les partícules imaginades pel filòsof grec. Aquest mètode podria arribar a ser eficaç, si es sàpigues el nombre de molècules d'encens necessàries per a desprendre una olor. Al final, l'autor arribà a la conclusió que no es pot saber si els àtoms de foc són més grans o més petits que els de terra o els d'aigua.

La teoria de l'atomisme va ser notablement propagada per tota Europa durant les primeres dècades de la Il·lustració, gràcies als treballs de Pierre Gassendi. L'atomisme va rebre el

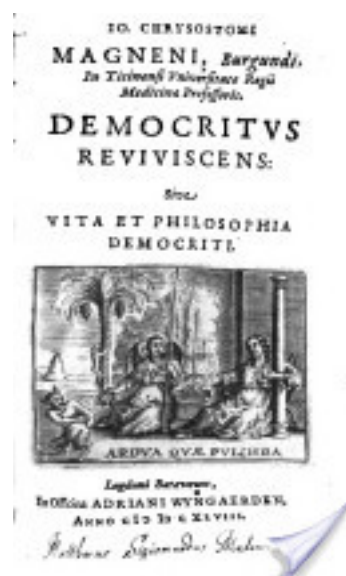


Figura 2: Portada de l'obra *Democritus Reviviscens*, de Jean Chrysostôme Magnen. En aquesta obra es va fer un primer intent per determinar la mida dels àtoms.

suport, a finals del segle XVII, del físic anglès Isaac Newton i de l'irlandès Robert Boyle, qui va desenvolupar a partir d'aquesta idea la teoria metafísica de la filosofia mecànica.

1.3.2 El naixement de la química moderna

L'any 1789, el químic francès Antoine Laurant Lavoisier va publicar un llibre titulat *Tractat Elemental de la Química*. En aquest tractat, l'autor ressaltà la importància de realitzar un control estricte de les quantitats de les espècies que intervenen en reaccions químiques i emfatitzà la validesa del Principi de Conservació de la Matèria, a més de ressuscitar la idea que els elements químics eren substàncies que no es podien reduir a cap altra de tipus més senzill mitjançant mètodes químics. Avui en dia, aquests punts són considerats tres dels principis més fonamentals de la química i per aquesta raó es considera a Lavoisier el pare de la química moderna.

Arran de la publicació d'aquest llibre, ràpidament es va començar a enunciar tot un conjunt de lleis empíriques relacionades amb la química, que acabarien comportant la aparició dels conceptes de Mol i de la constant d'Avogadro. Una de les primeres d'aquestes va ser l'anomenada Llei de les proporcions definides, que enuncia que "Si dos o més elements es combinen per formar un determinat compost, ho fan en una relació de masses invariable". D'aquesta manera finalment es va poder definir quina era la diferència entre composts i mescles: els primers eren el resultat de la combinació de dos o més elements en una determinada proporció, mentre que aquesta proporció no existia en el cas de les segones.

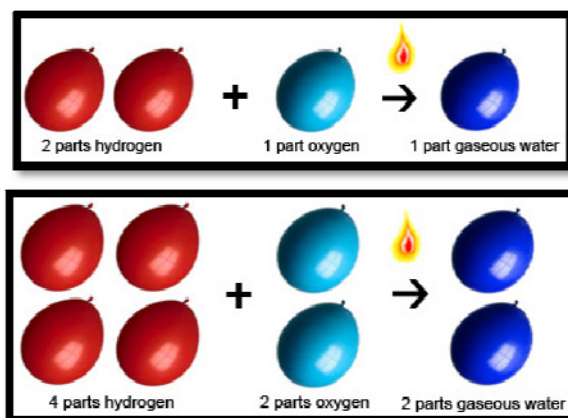


Figura 3: Llei de les proporcions definides: "Si dos o més elements es combinen per formar un compost, ho fan en una relació número senzilla".

La teoria de l'atomisme va rebre l'empenta definitiva durant el segle XIX, en gran mesura gràcies als treballs de John Dalton. Dalton va arribar a la conclusió que els àtoms de diferents substàncies químiques no eren idèntics i va assumir, tal i com havia fet Newton, que els àtoms d'una mateixa substància es repel·lien l'un a l'altre (s'explicaven així les pressions dels gasos) i hi va afegir que els àtoms de diferents espècies no es repel·lien, idea que Newton no va manifestar. A partir d'aquestes conclusions, Dalton va formular l'anomenada Llei de les pressions parcials (1801), segons la qual "la pressió d'una barreja de gasos que no reaccionen químicament els uns amb els altres, és igual a la suma de les pressions parcials que exerciria cadascun d'aquests si només un d'aquests ocupés tot el volum de la barreja sense produir-se cap canvi en la temperatura." Curiosament, aquest va esdevenir un resultat correcte obtingut a partir d'un raonament erroni.

$$P_{total} = \sum_{i=1}^n p_i \quad \text{o bé} \quad P_{total} = p_1 + p_2 + \dots + p_n$$

Llei de Dalton de les pressions parcials (1801).

El 1804, John Dalton va presentar la Llei de les proporcions múltiples, o Llei de Dalton, que diu que "les quantitats variables d'un element que es combinen amb una quantitat fixa d'un altre per formar dos o més compostos diferents es troben en una relació numèrica senzilla".

L'any 1808, va publicar la seva teoria atòmica, la primera de la història. En ella es defensava que els àtoms de diferents elements tenien diferent mida, massa i nombre d'unitats de volum. Va assumir que si només es coneixia una única combinació de dos elements, es podia assegurar que es tractava d'un compost binari, si no hi havia cap evidència que demostrés el contrari. D'aquesta manera, Dalton va poder deduir el pes relatiu d'alguns àtoms, agafant el de l'hidrogen com a unitat i va ordenar la taula periòdica de menor a major pes atòmic.

El següent pas es va donar a França, on un jove químic anomenat Gay-Lussac estava estudiant les propietats físiques dels gasos. Gay-Lussac va realitzar un conjunt d'experiments destinats a examinar la composició de l'aire i com aquesta variava segons la seva posició i l'altitud respecte al nivell del mar. El 1805, mitjançant un mètode ideat pel famós físic italià Alessandro Volta que es basa en realitzar diverses explosions a partir de hidrogen, va descobrir que 100 volums d'oxigen es combinaven amb 199,89 volums d'hidrogen. Gay-Lussac va atribuir la petita desviació de 0,11 volums a la petita quantitat de nitrogen que havia a l'hidrogen.

Al 1808 Gay-Lussac va publicar la Llei de les combinacions dels gasos, que enuncia que "quan dos gasos reaccionen ho fan en una relació de volum constant i senzilla". Aquesta es basava en tot un conjunt de resultats experimentals. A la taula següent s'hi mostren alguns.

| Espècie A | Volums d'espècie A | Espècie B | Volums d'espècie B | Espècie resultant | Volums d'espècie resultant |
|----------------------------|--------------------|-----------|--------------------|---|----------------------------|
| Òxid carbònic (CO) | 100 | Oxigen | 50 | Àcid carbònic (H ₂ CO ₃) | 100 |
| Nitrogen (N ₂) | 100 | Oxigen | 100 | Gas nitrós (NO) | 200 |
| Àcid muriàtic (HCl) | 100 | Hidrogen | 300 | Amoníac (NH ₃) | 200 |
| Nitrogen (N ₂) | 100 | Hidrogen | 300 | Amoníac (NH ₃) | 200 |

Tal i com es pot observar, els noms de les espècies no es corresponen amb els actuals. La nomenclatura de les substàncies químiques no es va poder iniciar fins a la publicació de la hipòtesi d'Avogadro (1811).

Gay-Lussac va observar certa relació entre els seus resultats i "l'enginyosa idea" de Dalton sobre la composició de les molècules. Estranyament, Dalton mai va acceptar els nombres rodons. En una carta que va escriure l'any 1812 a un col·lega seu va escriure: "La doctrina francesa de les combinacions dels gasos és allò que no reconec, només ho entenc en un sentit matemàtic. Al mateix temps, sóc conscient que hi ha alguna cosa meravellosa en la freqüència de l'aproximació". El 1827, va dir "la combinació dels gasos en una relació senzilla és un fet, però es tracta només d'una aproximació i no hem d'acceptar aquestes analogies com certes fins que en descobrim la raó". Naturalment, Dalton tenia raó (partint amb els coneixements actuals) en el fet que els gasos reals no obeeixen les lleis dels gasos ideals, però estava equivocat respecte als coneixements del seu temps.

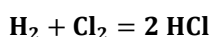


Figura 5: Louis-Joseph Gay-Lussac (1778-1850).

El 1809 Gay-Lussac va idear un altre experiment amb el qual volia estudiar com es combinaven el clor i l'hidrogen. Va crear una barreja de 50% de clor i 50% de hidrogen dins d'un recipient i la va col·locar en un espai ben il·luminat. Després va crear una altra mescla exactament igual a l'anterior, però aquesta la va guardar en un espai fosc. A continuació, es va disposar a esperar uns quants dies. Al cap de 15 minuts, a la mostra que havia estat exposada a llum, el color característic del clor va desaparèixer, però al recipient que havia guardat en un espai fosc no es va produir cap canvi. Aleshores, Gay-Lussac va escriure:

“Després d’haver observat aquests resultats, ja no sóc capaç de dubtar sobre la influència de la llum en la combinació d’aquests dos gasos i, jutjant per la rapidesa amb que aquesta s’ha produït, estic segur de que si la intensitat de la llum hagués estat major, la reacció s’hauria produït encara més ràpidament. Per aquesta raó, vaig decidir crear noves mescules i les vaig exposar al Sol. Uns quants segons després d’haver-ho fet, les mostres es van inflamar i van produir una gran explosió que va trencar els recipients, desprenent un gran nombre de peces de vidre que van arribar a recórrer grans distàncies. Afortunadament, ja havia previst aquest possible desenllaç i havia pres diverses mesures per protegir-me d’aquest accident”.

Aquesta famosa reacció química va portar a la equació que desacreditava la hipòtesi de Dalton que deia que àtoms del mateix tipus no es podien unir.



El 1809, Gay-Lussac va escriure en un article: “Tinc el presentiment que no estem gaire lluny de l’època en la qual serem capaços d’expressar la gran majoria dels fenòmens químics amb signes matemàtics”. Gay-Lussac tenia raó, doncs el pas definitiu es va donar només dos anys després. Aquest pas, però, no el va donar ni un francès ni un anglès, sinó un italià: Amadeo Avogadro.

1.3.3 La hipòtesi d’Avogadro

Amadeo Avogadro va néixer a Torí el 9 d’agost de 1776. Era fill del compte Filippo Avogadro i d’Anna Vercellone. Des de petit va seguir la tradició familiar d’estudiar dret. Als 16 anys va esdevenir batxiller de jurisprudència i només quatre anys després va rebre el doctorat en llei eclesiàstica. Quan tenia 24 anys, va començar els seus estudis de matemàtiques i de física i al 1809 va esdevenir professor de filosofia natural al Col·legi Real de Vercelli. L’any 1820, va rebre la primera càtedra italiana de matemàtiques físiques a la Universitat de Torí.

Participà amb prudent entusiasme en els moviments de la revolució política de 1821 dirigits contra el rei de Piemont-Sardenya, la qual cosa li va comportar la pèrdua del seu càrrec a la universitat de Torí dos anys després. La declaració oficial de la universitat que justifica aquesta postura estipulà: “la universitat és molt feliç de permetre a aquest científic prendre un descans de les seves activitats d’ensenyament per a que pugui dedicar-se plenament a les seves investigacions”. A causa de l’interès dels seus treballs científics, Avogadro recuperà la seva càtedra l’any 1833. El seu aïllament polític disminueix progressivament a mesura que la monarquia piemontesa va assimilant les idees revolucionaries, procés que acabarà amb la promulgació d’una Constitució plenament liberal i moderna l’any 1848 per part del rei Carles Albert.

No es sap gaire de la vida privada d’Amadeo Avogadro: es creu que va ser sòbria i religiosa. Es casà amb Felicita Mazzé i tingué sis fills. La seva vida fou especialment laboriosa, fou un home modest a qui li agradava treballar sol. Aquesta va ser la principal causa de la seva relativa escassa fama, particularment fora d’Itàlia. Amadeo Avogadro va morir el 9 de juliol de l’any 1856 per causes naturals, a l’edat de 80 anys.

Avogadro es va mostrar molt interessat per la llei de les combinacions dels gasos de Gay-Lussac. En un article escrit en francès i publicat l’any 1811, revelà una manera de determinar el pes relatiu de les partícules elementals dels cossos i les proporcions amb les quals formen els compostos. En aquest article, va encunyar la paraula molècula (del llatí, diminutiu de la paraula mole, que significa massa) per descriure la partícula més petita que normalment existeix en estat lliure. La hipòtesis d’Avogadro, exposada en aquest mateix article, suggeria que dos volums iguals de gasos diferents mesurats en les mateixes condicions de



Figura 6: Amadeo Avogadro (1776-1856).

pressió i temperatura havien de tenir el mateix nombre de molècules. Partint d'aquest principi, Avogadro va ser capaç de determinar els pesos moleculars relatius dels gasos gràcies al fet que la densitat d'un gas és proporcional al seu pes molecular relatiu.

D'aquesta manera, Avogadro va ser capaç de conciliar els resultats de Gay-Lussac amb la teoria de Dalton: Dalton afirmava que la relació en la formació de l'aigua havia de ser: 1 volum d'hidrogen + 1 volum d'oxigen = 1 volum d'aigua; mentre que Gay-Lussac havia descobert experimentalment que era: 1 volum + 1 volum d'oxigen = $\frac{1}{2}$ volum d'aigua. Segons Dalton, una molècula d'aigua contenia un àtom d'oxigen i un àtom d'hidrogen. Avogadro va solucionar el problema dient que els elements gasosos (l'hidrogen, l'oxigen i el nitrogen) eren gasos diatòmics i d'aquesta manera va deduir que una molècula d'aigua contenia un àtom d'oxigen i dos àtoms d'hidrogen. També va deduir la fórmula de l'amoniac (NH_3) i d'un alcohol ($\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$), però mai va especular sobre el nombre de partícules que hi havia en un volum de gas ni sobre la mida d'aquestes.

En aquest article, Avogadro també va comentar la teoria atòmica de Dalton i va calcular, per exemple, que el pes molecular del nitrogen era 13'238 vegades més gran que el de l'hidrogen.

1.3.4 La rebutja i l'acceptació posterior

La hipòtesi d'Avogadro no va tenir gaire ressò i va ser oblidada al cap de poc temps. L'any 1814, André-Marie Ampère va proposar de nou la mateixa hipòtesi, a la qual havia arribat de forma independent, en una carta escrita a Claude Louis Berthollet, company de laboratori de Gay-Lussac. El treball d'Ampère va experimentar un ressò una mica més gran que l'article d'Avogadro i la seva hipòtesi va ser anomenada Llei d'Ampère en diverses publicacions. Tot i això la comunitat científica no va acceptar en un primer moment aquesta hipòtesi, malgrat que donava una explicació a la Llei de les combinacions dels gasos. Això va ser degut a que, d'una banda, Jöns Jacob Berzelius no creia en la seva validesa perquè considerava impossible que dos àtoms iguals poguessin unir-se, doncs jutjava que l'enllaç entre dos àtoms només podia ocórrer entre dues forces elèctriques oposades i de l'altra, Dalton encara considerava els resultats de Gay-Lussac aproximacions inexactes.

No va ser fins a l'any 1860, durant el Primer Congrés Internacional de Químics, quan la hipòtesi va ser convertida en llei i la seva autoria va ser reconeguda a Amadeo Avogadro gràcies als treballs d'un compatriota seu, Stanislao Cannizzaro. Cannizzaro va presentar un treball en el qual calculava els pesos atòmics de diferents elements seguint els principis marcats per la hipòtesi d'Avogadro i d'aquesta manera va obtenir una escala correcta.

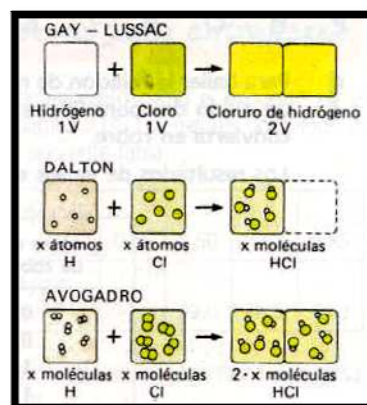


Figura 7: La hipòtesis d'Avogadro concilia els resultats empírics dels experiments de Gay-Lussac amb el model atòmic de Dalton

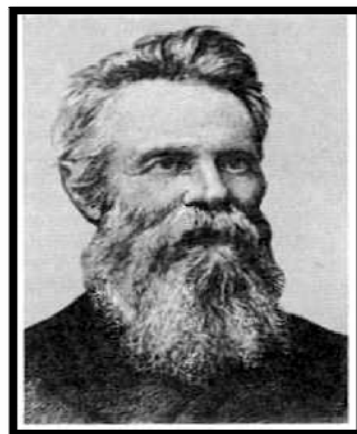


Figura 8: Johann Joseph Loschmidt (1821-1895).

1.3.5 A la captura de la constant

El concepte de constant d'Avogadro no va ser encunyat, però, fins a principis del segle XX. Fins aleshores, els científics es referien al nombre de molècules presents en un mol de qualsevol substància com a Nombre N. El primer estudi centrat en determinar la mida de les molècules fou realitzat pel químic txec Johann Josef Loschmidt a l'any 1865. En aquest estudi, a més, va determinar el nombre de molècules que hi havia en 1cm^3 (constant de Loschmidt), dada a partir de la qual es podia obtenir un valor per al nombre N. Va estimar que el seu valor era $4 \cdot 10^{22}$, un resultat força notable tenint en compte les limitacions del mètode. Per aquesta raó, Loschmidt està considerat com el primer científic que va intentar determinar el valor de la constant d'Avogadro.

Jean Baptiste Perrin fou un químic i experimentalista francès força valorat per la comunitat científica. Va idear un nombre considerable de mètodes força variats i independents per determinar el nombre N. Va ser precisament ell qui va proposar al 1909 anomenar constant d'Avogadro al nombre N en un intent d'atorgar al científic italià el reconeixement del qual no va poder gaudir en vida. Perrin va rebre el Premi Nobel de Física l'any 1926 "pel seu treball sobre l'estructura discontinua de la matèria i, especialment, pel seu descobriment sobre l'equilibri de sedimentació".

Un dels mètodes que us proposarem més endavant consisteix, precisament, en reproduir l'experiment de Perrin.

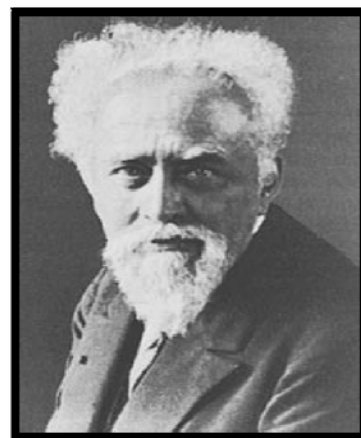


Figura 9: Jean Baptiste Perrin (1870-1942).

1.3.6 Evolució i millora dels mètodes fins a l'actualitat

A partir de principis de segle XX, l'aparició de nous mètodes per determinar el valor de la constant d'Avogadro va esdevenir un fet usual. Fins al 1924, la majoria d'aquests estaven basats bàsicament en estudis dels moviments atòmics i moleculars sobre medis gasosos i líquids. Entre 1924 i 1951, la forma més habitual de determinar experimentalment el valor de la constant d'Avogadro era mitjançant l'estudi de les longituds d'ones de raigs X. Des del 1951 fins a l'actualitat, els mètodes per excel·lència han estat aquells basats en l'estudi de les estructures cristal·lines dels àtoms a partir d'observacions realitzades amb microscopi de raigs X. Actualment es coneixen més de vuitanta mètodes diferents.

La gràfica següent mostra l'evolució de les estimacions del valor de la constant d'Avogadro al llarg de la història. La gràfica presenta dos eix d'ordenades i un eix d'abscisses. A l'eix d'abscisses (eix X) s'indica l'any en el qual es va realitzar cada experiment. A l'eix d'ordenades (eix Y) de l'esquerra es mostra el valor numèric de la constant obtingut i al de la dreta l'error relatiu.

A la gràfica es pot apreciar que la majoria dels resultats giraven entorn a valors pròxims a $6 \times 10^{23} \text{ mols}^{-1}$. Val a dir que tots aquests mètodes són diferents i independents els uns dels altres. També s'hi pot apreciar clarament que els resultats són més precisos i que, consegüentment, els marges d'errors relatius es redueixen més segons avança el temps. Això significa que, tal i com és natural, els mètodes més eficaços i precisos són els moderns. El seu grau de complexitat també ha augmentat significativament. A l'apartat d'annexes, trobareu la traducció d'un article actual on es descriu un experiment per calcular la constant d'Avogadro realitzat per científics professionals.

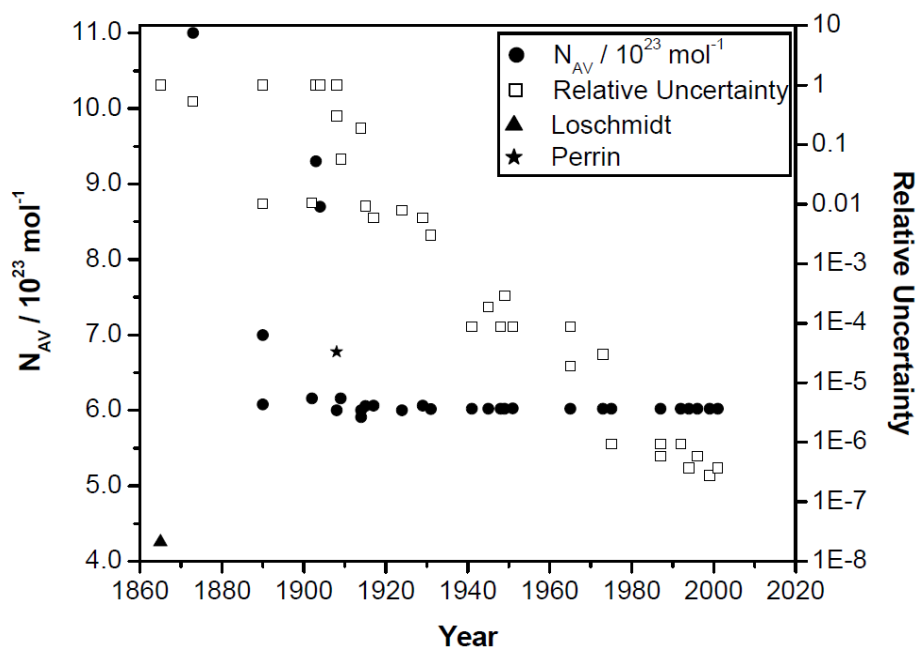


Figura 10: Gràfica de l'evolució de les estimacions del valor de la constant d'Avogadro. Els resultats tendeixen a ser més precisos i exactes a mesura que avança el temps. Figura extreta de:

https://www.sussex.ac.uk/webteam/gateway/file.php?name=the_constant_of_avogadro.pdf&site=7

2. Disseny experimental

| | |
|--|----|
| 2.1 Experiment 1. Determinació experimental de la constant d'Avogadro a partir de l' electròlisi de l'aigua en medi àcid i en medi bàsic | 22 |
| 2.2 Experiment 2. Determinació experimental de la constant d'Avogadro a partir de l' electrodeposició del coure | 43 |
| 2.3 Experiment 3. Determinació experimental de la constant d'Avogadro a partir de l' estudi d'estructures cristal·lines | 51 |
| 2.4 Experiment 4. Determinació experimental de la constant d'Avogadro a partir de l' estudi del moviment brownià | 63 |
| 2.5 Experiment 5. Determinació experimental de la constant d'Avogadro a partir de l' estudi de capes monomoleculars d'àcids grassos | 72 |

EXPERIMENT 1

2.1 Determinació experimental de la constant d'Avogadro, a partir de l'electròlisi de l'aigua en medi àcid i en medi bàsic

2.1.1 Raonaments teòrics

Aquest mètode per calcular experimentalment la Constant d'Avogadro està basat l'estudi d'una de les reaccions químiques més conegudes i importants de la història de la ciència: l'electròlisi de l'aigua. Antigament es considerava que tots els materials estaven formats per la combinació de quatre substàncies (foc, terra, aigua i aire) en diferents proporcions. Aquesta teoria, originada a l'antiga Grècia al segle VI aC, es va mantindre pràcticament inalterable fins a finals del segle XVIII, quant Antoine Laurant Lavoissier va realitzar un experiment que la va desbaratar completament. Aquest experiment consistia en aplicar un corrent elèctric sobre un recipient amb aigua. Lavoissier va observar aleshores com aquesta es descomponia en dues substàncies gasoses. D'aquesta manera, Lavoissier va poder definir correctament els conceptes d'element i compost i va assentar les bases de la química moderna.

La reacció que Lavoissier va observar rep el nom d'electròlisi de l'aigua. Tot i que aquest fenomen va ser observat diverses vegades durant el darrers anys del segle XVIII i els primers del segle XIX, les formules empíriques que el regeixen no va ser enunciades fins al 1836, any en el qual Michael Faraday va fer públics els resultats de les investigacions que havia estat realitzant durant tres anys.

L'electròlisi de l'aigua consisteix, doncs, en la descomposició química de l'aigua en hidrogen i oxigen a causa de l'acció d'un camp elèctric. Perquè la reacció es desenvolupi correctament cal, però, afegir-hi una substància química que, en entrar en contacte amb l'aigua, es dissociï en ions i augmenti així la conductivitat elèctrica. Existeixen dos tipus d'electròlisi: l'electròlisi en medi àcid i l'electròlisi en medi bàsic, diferenciant-se l'una de l'altra, tal i com el seu nom indica, pel nivell del pH del medi en el qual es realitza la reacció. Tot i que totes dues reaccions comporten el mateix resultat, les reaccions químiques que s'hi desenvolupen són lleugerament diferents (vegeu les figures següents):

| Electròlisi en medi bàsic | Electròlisi en medi àcid |
|---|--|
| (-) Càtode: $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$ | (-) Càtode: $2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \longrightarrow \text{O}_2 + 2\text{H}^+$ |
| (+) Ànode: $4\text{OH}^- + 4\text{e}^- \longrightarrow \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ | (+) Ànode: $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{H}_2$ |
| $2\text{H}_2\text{O} \longrightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$ | $2\text{H}_2\text{O} \longrightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$ |

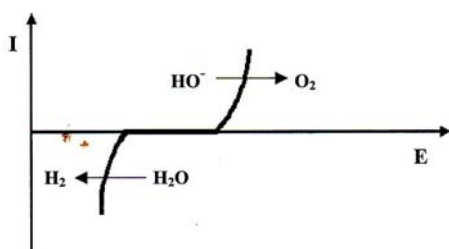


Figura 11: Corba intensitat-potencial de l'electròlisi de l'aigua en un medi bàsic.

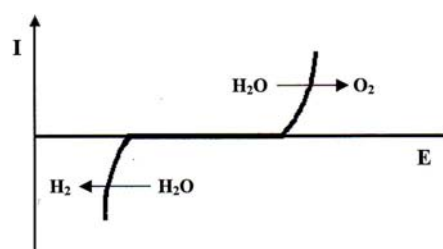


Figura 12: Corba intensitat-potencial de l'electròlisi de l'aigua en un medi neutre.

Tal i com ja s'ha dit diverses vegades al llarg d'aquest treball, la constatació d'Avogadro expressa el nombre de partícules que hi ha en un mol:

$$N_A = \frac{\text{nombre de partícules}}{\text{nombre de mols}}$$

L'objectiu d'aquest mètode, doncs, és estudiar una reacció d'electròlisi per tal d'obtenir experimentalment aquestes dues dades. La forma més senzilla i pràctica de fer-ho és mesurar el nombre de mols a partir de la Llei Universal dels Gasos Ideals, i el nombre de partícules a partir del recompte d'electrons que han circulat. Vegeu les pàgines següents. Alhora de realitzar, els càlculs només s'ha de tenir en compte una de les dues substàncies despreses (hidrogen i oxigen). Resulta totalment indiferent quina, ja que en un mol de qualsevol substància sempre hi ha el mateix nombre de partícules. És més recomanable, però, prendre l'hidrogen, ja que el volum d'aquest és el doble que el d'oxigen i, en conseqüència, l'error relatiu de la seva mesura és menor que el de l'oxigen.

Per calcular el nombre de mols d'hidrogen produïts durant la reacció, es recomana utilitzar l'anomenada Llei Universal dels Gasos Ideals que va ser formulada per primer cop l'any 1834 pel físic francès Émile Clapeyron. Aquesta llei és el resultat de la combinació de la llei de Boyle i de la llei Charles i Gay-Lussac.

La llei de Boyle va ser publicada l'any 1662. En ella, es relaciona el volum i la pressió d'una determinada quantitat de gas mantinguda a una temperatura constant. La llei afirma que el volum és inversament proporcional a la pressió. Per tant, quant la pressió augmenta el volum disminueix, mentre que quant aquest augmenta, la pressió disminueix. La mateixa llei es pot formular de dues formes diferents:

| | | |
|---|---|---|
| $PV = k$ | $P_1V_1 = P_2V_2$ | |
| P= pressió (atm) V= volum (L) k= constant | P1= pressió inicial (atm) V1= volum inicial(L) | P2= pressió final (atm) V2= volum final(L) |

La llei de Gay-Lussac va ser enunciada l'any 1800 per Gay-Lussac. Aquesta llei diu que si un volum d'una certa quantitat de gas es sotmet a una pressió constant, el coeficient entre la pressió i la temperatura és manté constant. D'igual forma que la llei de Boyle, també pot ser expressada de dues formes diferents:

| | | |
|--|---|---|
| $\frac{P}{T} = k$ | $\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}$ | |
| P= pressió (atm) T= temperatura (°K) k= constant | P1= pressió inicial (atm) T1= temperatura (°K) | P2= pressió final (atm) T2= temperatura (°K) |

Émile Clapeyron va combinar aquestes dues lleis de la manera següent (les magnituds són les corresponents al Sistema Internacional):

| | |
|------------|---|
| $PV = nRT$ | <p>P= pressió (atm) V= volum (L) n= quantitat de substància (mols) R= constant universal dels gasos ideals ($0,082 \frac{\text{atm} \times \text{L}}{\text{mols} \times ^\circ\text{K}}$) T= temperatura ($^\circ\text{K}$)</p> |
|------------|---|

Aïllant n, obtindrem el nombre de mols d'hidrogen:

$$n = \frac{P \cdot V}{RT}$$

*Aquesta pressió es refereix a aquella que exerceix l'hidrogen contra les parets del recipient: és a dir, a la que hi ha a l'interior de l'aparell, que no és ni molt menys igual a la pressió atmosfèrica. A la pàgina següent s'explica el perquè d'aquest fet i com calcular aquesta dada.

Tal i com hem indicat abans, la pressió exercida per l'hidrogen no és igual a pressió atmosfèrica, ja que n'hi actuen d'altres a l'interior de l'aparell. La pressió de l'hidrogen és aquella que exerceixen les molècules d'aquest contra les parets del recipient que l'emmagatzema. Partint del principi que la pressió atmosfèrica ha de ser igual a la suma dels valors que actuen al seu interior, es pot calcular el valor d'aquesta dada sabent a quina temperatura es troba el gas i l'alçada de la columna d'aigua. Les pressions més rellevants que actuen a l'interior del recipient són la pressió de l'hidrogen, la pressió hidrostàtica i la pressió de vapor.

$$P_{\text{atm}} = P_{\text{H}_2} + P_{\text{H}_2\text{O}} + P_{\text{vapor}}$$

La pressió de vapor es l'exercida pel vapor de l'aigua evaporada. El seu valor depèn de la temperatura de l'ambient i es pot esbrinar fàcilment consultant una taula de pressió de vapor (aquest treball, en presenta una d'annexa).

La pressió hidrostàtica l'exerceix l'aigua sobre les parets del recipient que el conté. Aquesta força és perpendicular a les parets del recipient. Aquesta pressió depèn de la densitat del líquid i de l'alçada a la qual està submergida l'objecte. És calcula mitjançant la següent fórmula matemàtica:

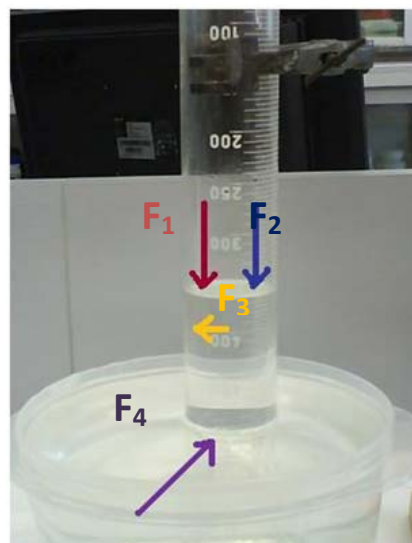


Figura 13: Pressions que actuen sobre el muntatge.

- F1= Força exercida per la pressió l'hidrogen
- F2 = Força exercida pel vapor d'aigua
- F3 = Força exercida per la pressió hidrostàtica
- F4 = Força exercida per la pressió atmosfèrica

$$P = dgh \left\{ \begin{array}{l} P = \text{pressió hidrostàtica (expressada en Pascals)} \\ d = \text{densitat del líquid} \\ g = \text{acceleració de la gravetat} \\ h = \text{altura del fluid (expressada en metres)} \end{array} \right.$$

Un cop s'hagin calculat els valors de la pressió hidrostàtica, del vapor d'aigua i es conegui la pressió atmosfèrica, només cal substituir els valors de la primera fórmula i resoldre l'equació per obtenir el valor de la pressió exercida per l'hidrogen.

$$P_{H_2} = P_{atm} - dgh - P_{vapor}$$

La forma més fàcil d'esbrinar el nombre de partícules d'hidrogen alliberades durant la reacció és mesurant la càrrega elèctrica que circula pel circuit elèctric. Sabent que la càrrega elèctrica d'un electró és igual a $1,60 \times 10^{-19}$ coulombs, es pot esbrinar fàcilment el nombre d'electrons que s'han alliberat durant l'experiment. Mancarà llavors saber quants electrons s'han de capturar per cada molècula d'hidrogen. Observeu les reaccions electroquímiques dels dos tipus d'electròlisi:

| Electròlisi en medi bàsic | Electròlisi en medi àcid |
|--|---|
| (-) Càtode: $2H_2O + 2e^- \longrightarrow H_2 + 2OH^-$ | (-) Càtode: $2H_2O + 4e^- \longrightarrow O_2 + 2H^+$ |
| (+) Ànode: $4OH^- + 4e^- \longrightarrow O_2 + 2H_2O$ | (+) Ànode: $2H^+ + 2e^- \longrightarrow H_2$ |
| $2H_2O \longrightarrow 2H_2 + O_2$ | $2H_2O \longrightarrow 2H_2 + O_2$ |

Tal i com s'hi pot observar, malgrat que les dues reaccions són lleugerament diferents l'una de l'altra, el producte final i el nombre d'electrons captats és el mateix. Durant l'electròlisi de l'aigua en medi bàsic dues molècules d'aigua, en el càtode es combinen una molècula d'aigua amb dos electrons per formar una molècula d'hidrogen i alliberar dos ions hidroxil, i en el ànode quatre ions hidroxil es combinen amb quatre electrons per alliberar una molècula d'oxigen i dues d'aigua. Durant l'electròlisi en medi àcid, per contra, en el ànode dos protons es combinen amb dos electrons per formar una molècula d'hidrogen i en el càtode amb quatre electrons per formar una molècula d'oxigen i alliberar dos protons.

En resum: independentment del grau d'acidesa del medi on es desenvolupi la reacció, el nombre de molècules d'hidrogen alliberades durant la reacció s'obté dividint els electrons obtinguts entre dos, i el nombre de molècules d'oxigen, dividint la mateixa dada entre quatre.

$$\text{Nombre de partícules d'hidrogen} = \text{Càrrega elèctrica}(C) \times \frac{1e^-}{1,602 \times 10^{-19}C} \times \frac{1 \text{ molec } H_2}{2e^-}$$

$$\text{Nombre de partícules d'oxigen} = \text{Càrrega elèctrica}(C) \times \frac{1e^-}{1,602 \times 10^{-19}C} \times \frac{1 \text{ molec } O_2}{4e^-}$$

El valor de la càrrega que ha circulat pel circuit s'obté multiplicant la intensitat del corrent pel temps que ha durat l'experiment. Malauradament, és previsible que la intensitat del corrent variï

lleugerament. Per determinar la càrrega, doncs, hauríem de conèixer la intensitat del corrent mitjana, però aquesta dada ens és desconeguda. Així doncs, el que es farà serà enregistrar les dades intensitat-temps mitjançant un sensor que mesurarà el corrent i , posteriorment, utilitzant el software Multilab, representar les dades en un gràfic intensitat-temps com el següent:

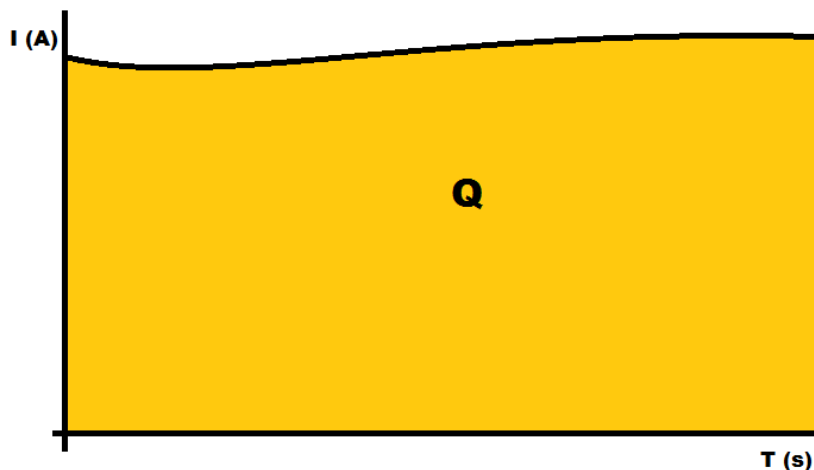


Figura 14: Gràfic intensitat-temps. L'àrea d'aquest es correspon amb el valor total de la càrrega que ha circulat pel circuit.

L'àrea en color és equivalent a la càrrega que ha circulat. Aquesta àrea serà mesurada a partir de la funció integrada que duu incorporat el software Multilab.

$$\text{Àrea} = \text{Càrrega} = \int_{t=0}^{t=t} I \times dt$$

Les dades que s'han de mesurar durant la realització de l'experiment, són, doncs, les següents:

| Intensitat del corrent (C) | Temps (s) | Volum d'hidrogen (mL) | Alçada de la columna d'aigua (mm) | Temperatura ambiental (°K) | Pressió atmosfèrica (KPa) |
|----------------------------|-----------|-----------------------|-----------------------------------|----------------------------|---------------------------|
| | | | | | |

El valor de la constant d'Avogadro es pot determinar, doncs, substituint aquestes dades per valors obtinguts experimentalment en les fórmules següents:

Electròlisi en medi àcid o bàsic estudiant les molècules d'hidrogen:

$$N_A = \frac{\text{número de partícules}}{\text{número de mols}} = \frac{\text{Càrrega elèctrica(C)} \times \frac{1e^-}{1,602 \times 10^{-19}C} \times \frac{1 \text{ molec H}_2}{2e^-}}{\frac{V(P_{\text{atm}} - P_{\text{H}_2\text{O}} - P_{\text{vapor}})}{RT}}$$

Electròlisi en medi àcid o bàsic estudiant les molècules d'oxigen:

$$N_A = \frac{\text{número de partícules}}{\text{número de mols}} = \frac{\text{Càrrega elèctrica(C)} \times \frac{1e^-}{1,602 \times 10^{-19}C} \times \frac{1 \text{ molec O}_2}{4e^-}}{\frac{V(P_{\text{atm}} - P_{\text{H}_2\text{O}} - P_{\text{vapor}})}{RT}}$$

Anotacions:

- I. Els diferents colors solsament serveixen per facilitar la comprensió dels factors de conversió.
- II. Observeu com la fórmula matemàtica és la mateixa per a tots dos mètodes, malgrat tractar-se de reaccions químiques diferents.

2.1.2 Objectius de la pràctica

Ara que ja s'ha presentat la part més elemental i essencial del mètode –la part teòrica– us presentem un disseny experimental amb el qual podreu posar aquest mètode en pràctica i podreu estimar el valor de la constant d'Avogadro. Així doncs, en les pàgines següents trobareu un protocol de laboratori que inclou els diversos estris que necessitareu i els procediments que haureu de seguir, així com diversos esquemes i fotografies que us ajudaran a entre millor el disseny experiment.

L'objectiu principal d'aquest disseny experimental és posar a prova l'eficàcia d'aquest mètode per calcular la constant d'Avogadro. Així doncs, la intenció inicial és obtenir una sèrie de dades estadístiques amb les quals es podria comparar d'una manera rigorosa aquest mètode amb la resta dels proposats en aquest treball de recerca.

Tal i com ja s'ha indicat abans, la reacció d'electròlisi es pot realitzar tant en medi àcid com en medi bàsic i, malgrat que en teoria són mètodes diferents perquè no s'hi desenvolupen les mateixes reaccions químiques, els procediments pràctics a seguir són iguals. Per aquesta raó, es presenten tot dos dissenys experimentals com un únic disseny experimental. La base teòrica d'aquest mètode indica que ni el tipus de dissolvent ni la seva concentració influeixen directament en els resultats de l'experiment. No es deixa clar, emperò, si aquests factors influeixen indirectament de manera significativa. Aclarir aquest dubte i determinar quin producte i en quina concentració és el més adient per realitzar aquest mètode són també un dels nostres objectius.

En resum, doncs, els nostres objectius, expressats en forma de pregunta, són els tres següents:

- Quins són els límits de l'interval que recull els valors estimats de la constant d'Avogadro amb un grau de confiança del 95% per a cada concentració de dissolvent empleada? I els errors relatius?
- Els resultats obtinguts demostren que, tal i com ja indicava la part teòrica del mètode, el grau d'acidesa del medi on es desenvolupa la reacció d'electròlisi no afecta als valors estimats de la constant d'Avogadro?
- Quina és el medi més adient per a desenvolupar l'electròlisi de l'aigua per calcular la constant d'Avogadro?

2.1.3 Disseny de l'experiment

2.1.3.1 Descripció de l'experiment

En aquest apartat es farà una descripció del muntatge que cal fer i s'explicaran els passos que cal seguir per poder dur a terme aquest mètode. Per tal de fer l'explicació més entenedora, considerarem que el muntatge està compost per dues parts: el circuit elèctric i l'estructura.

El circuit elèctric està format per una font d'alimentació connectada a una consola Multilab amb sensors de temperatura, de pressió i de corrent elèctric, i a l'estructura. En cas que no es disposi d'una consola Multilab, aquesta pot ser substituïda per un amperímetre, cosa no gaire recomanable ja que la gran majoria d'aquests aparells no són prou precisos. Si es decideix fer aquest canvi, s'hauria d'afegir un reòstat al circuit elèctric per tals d'intentar que la intensitat del corrent es mantingui tant estable com sigui possible. La font d'alimentació també pot ser substituïda per una pila de petaca. Si es decideix fer aquest canvi, s'hauria d'afegir un reòstat al circuit elèctric per tals d'intentar que la intensitat del corrent es mantingui tant estable com sigui possible.

L'estructura és on es desenvolupa l'electròlisi. Existeix un aparell especial per a dur a terme aquesta reacció, anomenat Voltàmetre de Hoffman. Aquest aparell consta de tres cilindres, generalment de vidre, units entre ells. El cilindre central disposa d'una obertura a la part superior per on s'aboca l'aigua que es vol descompondre. Els altres dos cilindres presenten,

cadascun, un elèctrode de platí, situat a la seva part inferior, als quals es connecten els cables del circuit elèctric.

Si no es disposa d'un d'aquests aparells, és possible construir-ne un de casolà, d'una forma força senzilla: es requereixen dues buretes graduades i un vas de precipitats de qualsevol capacitat, a més de dos elèctrodes de grafit (aquesta és la peça més difícil d'obtenir, i per aquesta raó s'explicarà més endavant com es poden aconseguir) i d'altres eines de suport, com ara nous, pinces i suports per aquestes. Les dues buretes s'han de col·locar al revés tocant la base del vas de precipitats, amb els elèctrodes de grafit al seu interior. La dissolució s'ha d'abocar a l'interior del vas i amb l'ajut d'un succionador s'emplenaran les buretes.



Figura 15: Voltàmetre de Hoffman



Figura 16: Voltàmetre de Hoffman casolà

Nosaltres hem utilitzat la segona opció, un voltàmetre de Hoffman casolà. Val a dir, que en principi, tot dos aparells són igual d'eficaços i que l'única diferència notable entre ells es que amb el voltàmetre de Hoffman s'aconsegueix aproximadament el doble d'hidrogen que d'oxigen. Això és degut a que als elèctrodes de platí no es desenvolupa cap reacció d'oxidació, cosa que si succeeix amb els elèctrodes de grafit. De tota manera, aquest fet no afecta als resultats sobre la constant d'Avogadro, si els elèctrodes de grafit són mostres pures. Per aquesta raó és recomanable adquirir-los en un ferreteria. Una altra opció és obtenir els elèctrodes a partir de piles gastades. Aquesta altra opció, però, és poc recomanable, ja que aquest tipus d'elèctrodes acostuma a presentar en la seva composició algunes substàncies, com ara, òxid de magnesi (IV) i clorur d'amoni, que propicien que les puntes metàl·liques del cables s'oxidin i, a més, l'estalvi econòmic és molt baix. L'apartat següent descriu les modificacions que cal fer a les peces cilíndriques del grafit per poder realitzar l'experiment.

La imatge següent es correspon amb el que va ser el primer esbós que vam realitzar del circuit elèctric. Val a dir, però, que aquest no va ser el definitiu i s'hi van aplicar algunes modificacions importants. Primerament, es va substituir la pila de petaca per una font d'alimentació de l'aula de tecnologia. L'amperímetre es va substituir per la consola Multilab, la qual cosa va fer innecessària la presència del reòstat. Tret d'aquestes diferències, el circuit elèctric és exactament el mateix al que es va utilitzar i és igualment vàlid.

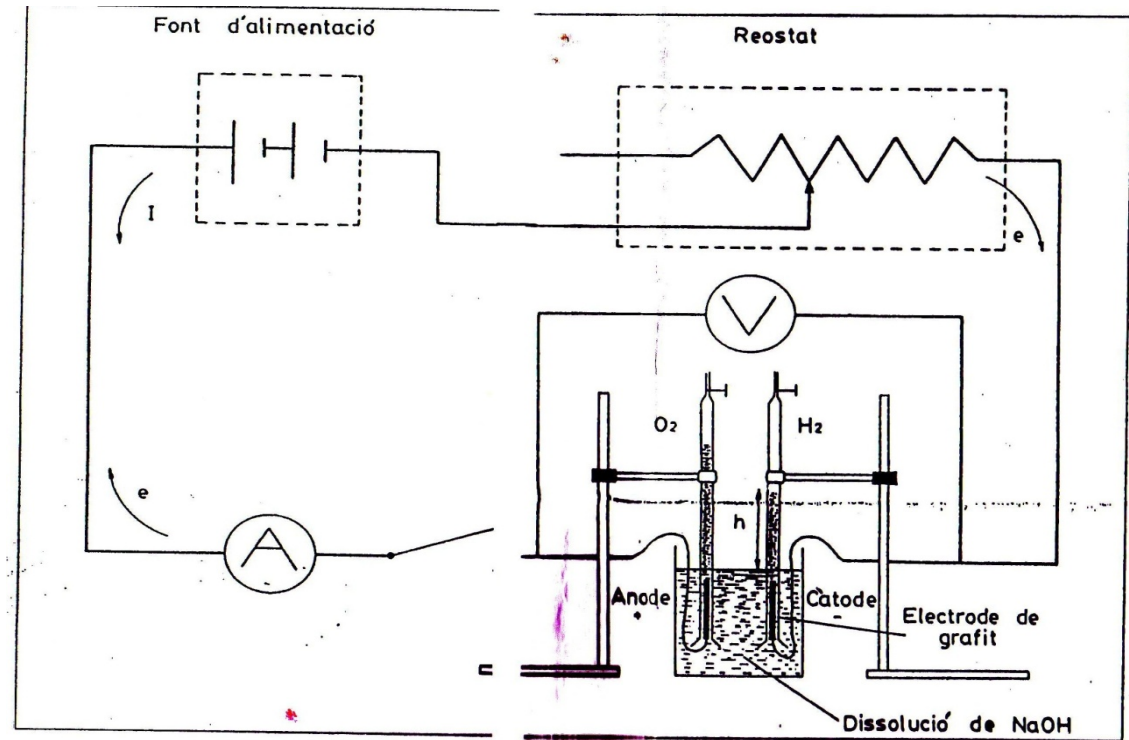


Figura 17: Dibuix esquemàtic del circuit elèctric

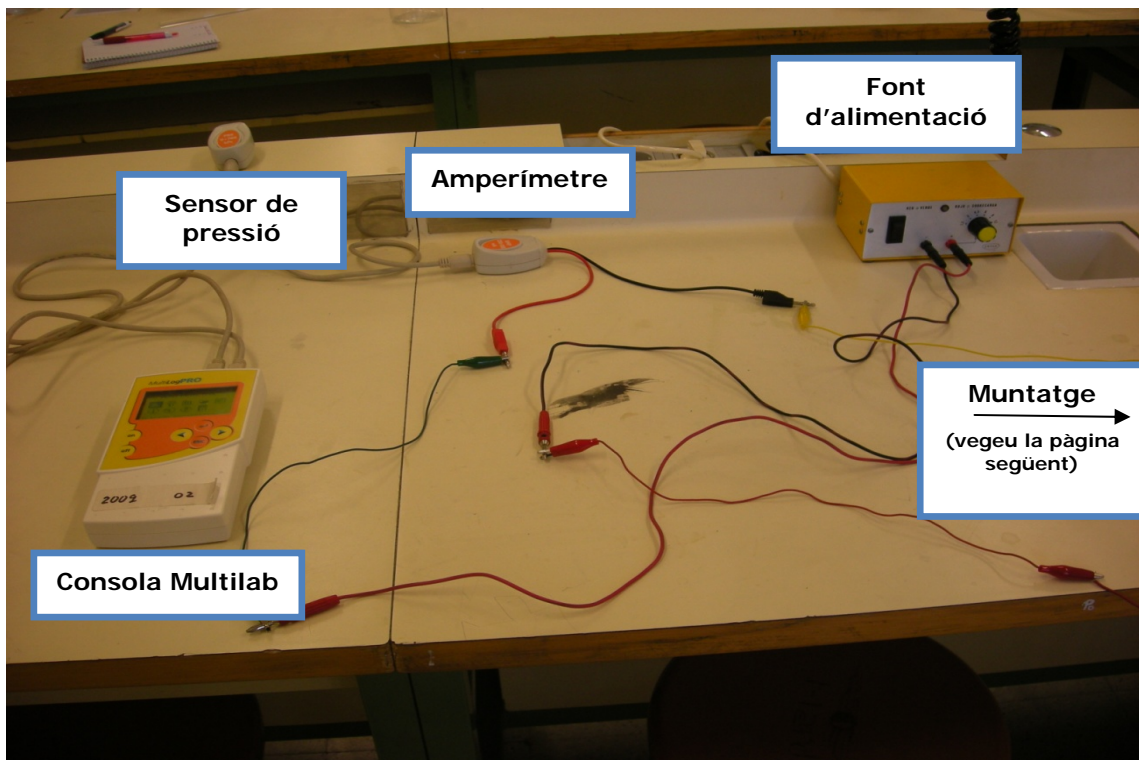


Figura 18: Fotografia del circuit elèctric.

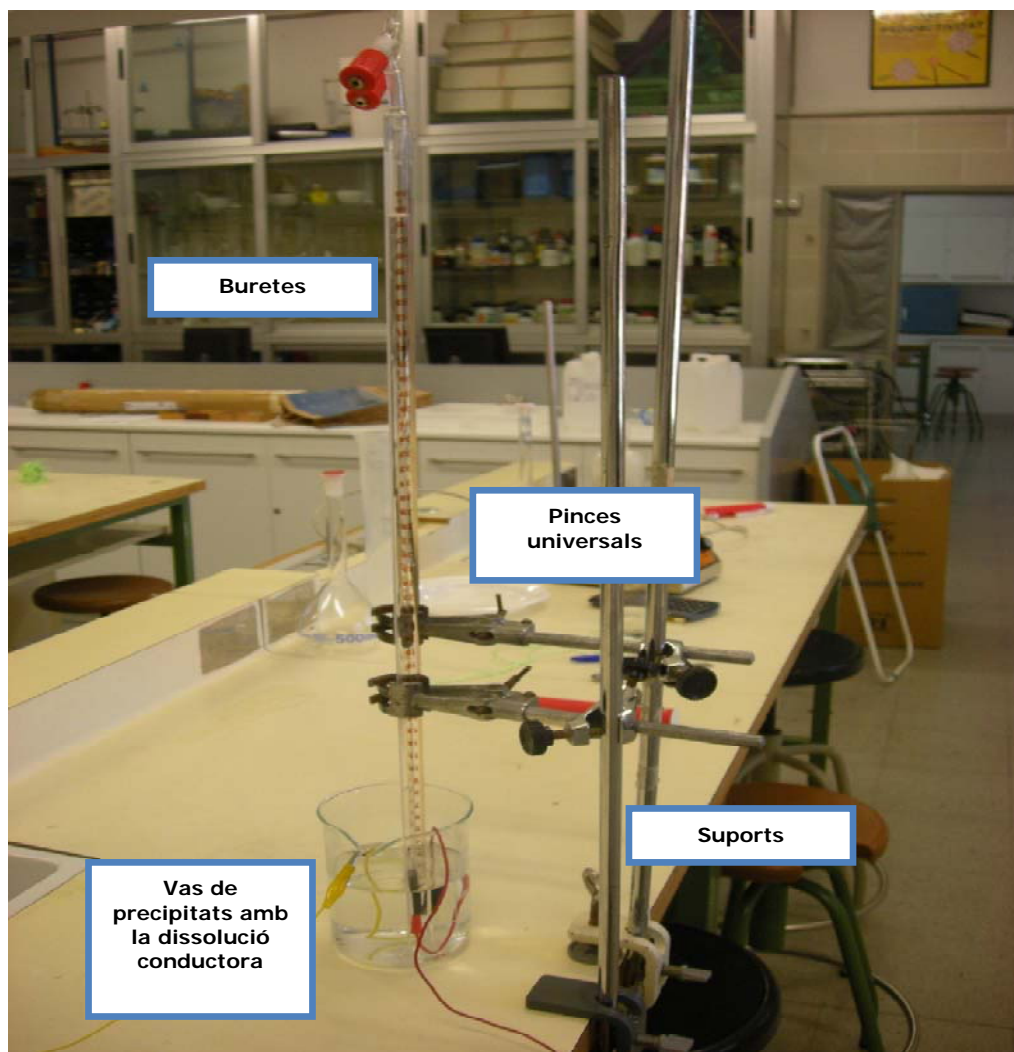


Figura 19: Fotografia del muntatge.

2.1.3.2 Utilatge

- Dos elèctrodes de grafit (es poden extreure d'alguns determinats models de piles, llegiu més avall).
- Dues pinces de cocodrill.
- Cables.
- Aigua destil·lada.
- Hidròxid de sodi (NaOH) o àcid sulfúric (H_2SO_4).
- Sensor de temperatura.
- Sensor de pressió.
- Un vas de precipitats, dues buretes de 50ml, dos suports, dues pinces universals i un parell de nous (tots aquests estris poden ser substituïts per un voltàmetre de Hoffman).
- Una vareta agitadora.

Fabricació dels elèctrodes de grafit

1. Preneu dues peces cilíndriques de grafit. Tal i com ja s'ha dit abans, és recomanable comprar-les en una ferreteria, però també es poden obtenir mostres de menor qualitat desmuntant qualsevol pila de petaca de 4,5V i en algunes piles d'1,5V
2. Foradar amb una broca de 2 mil·límetres les bases d'aquestes.
3. Introduir a pressió a través dels forats a cada peça un cable de punta metàl·lica.

2.1.3.3 Procediments

Aquest apartat presenta d'una manera clara i esquemàtica els procediments que cal seguir per duu a terme aquest mètode. En realitat aquest apartat no aporta res de nou, tret d'algunes recomanacions concretes com ara les característiques de la dissolució que s'ha d'elaborar i el voltatge que se li ha d'aplicar.

1. Preparar el muntatge descrit a l'apartat anterior i reunir tot l'utillatge necessari.
2. Elaborar una dissolució d'aigua i una substància iònica, com ara hidròxid de sodi (NaOH) o àcid sulfúric (H_2SO_4). Es recomana utilitzar una dissolució d'àcid sulfúric 1M en cas de no disposar del voltàmetre de Hoffman. El perquè d'aquesta recomanació serà explicat més endavant.
3. Omplir els cilindres de vidre amb la dissolució. Si s'utilitza el voltàmetre de Hoffman, només cal abocar aquesta a l'interior del cilindre central. Si, per contra, s'està utilitzant el muntatge alternatiu, s'ha de col·locar un succionador a l'extrem lliure de les buretes i accionar-lo fins a que aquestes quedin completament plenes.
4. Posar la font d'alimentació en marxa i esperar que el nivell de dissolució disminueixi fins a arribar a la primera marca de la bureta, per tal que, un cop s'hagi iniciat l'experiment, sigui possible esbrinar la quantitat d'hidrogen obtinguda. Es recomana aplicar el màxim voltatge possible per tal d'agilitzar el procés.
5. Un cop la dissolució arribi a una marca de la bureta, baixar el voltatge de la font d'alimentació. Com més baix sigui, més probabilitats hi haurà que el resultat obtingut s'atansi més al valor real de la constant d'Avogadro. Per contra, la reacció es desenvoluparà més lentament. En les proves realitzades per obtenir els resultats que apareixen més endavant és va treballar amb un voltatge de 3 V (a voltatges més elevats es realitzen reaccions d'oxidació degudes a impureses dels elèctrodes).
6. Apagar la font d'alimentació quan es vulgui donar per finalitzat l'experiment: la durada d'aquest resulta indiferent a l'hora de calcular la constant, tot i que és més probable que el valor obtingut s'atansi més al real com més gran sigui el volum d'hidrogen obtingut.
7. Un cop finalitzat l'experiment, recollir totes les dades necessàries*: la càrrega elèctrica(C), la temperatura (°K), la pressió atmosfèrica (atm), l'alçada de la columna d'aigua (cm H_2O) i el volum d'hidrogen; i calcular la constant d'Avogadro utilitzant la fórmula següent, la qual que ja havia estat presentada anteriorment:

$$N_A = \frac{\text{Número de partícules}}{\text{Número de mols}} = \frac{\text{Càrrega elèctrica(C)} \times \frac{1e^-}{1,602 \times 10^{-19}C} \times \frac{1 \text{ molec } H_2}{2e^-}}{\frac{PV}{RT}}$$

2.1.3.4 Obtenció de les dades emmagatzemades en una consola Multilab

A continuació, es presenta un minimanual que explica com analitzar les dades enregistrades per la consola Multilab, tant les referents a la càrrega elèctrica com les referents a la pressió i a la temperatura.

1. Connectar la consola Multilab a un ordinador, obrir el programa Multilab i preneu a la icona Recolector(1) i seguidament a Descarregar(2). Vegeu la imatge 20.

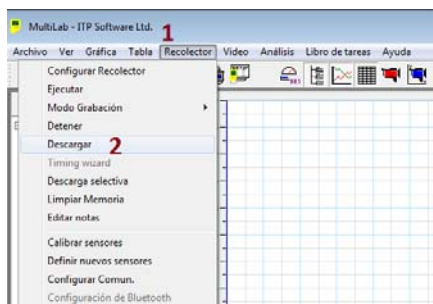



Figura 20: Anàlisi de les dades amb el software Multilab. Pas 1.

2. Premeu la icona Editar Gràfica (, a la barra inferior de la pantalla, i desseleccioneu totes les variables excepte la que voleu estudiar, tal i com es mostra a les dues imatges següents:

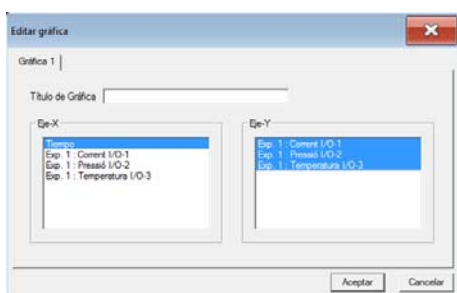


Figura 21: Anàlisi de les dades amb el software Multilab. Pas 2.1.

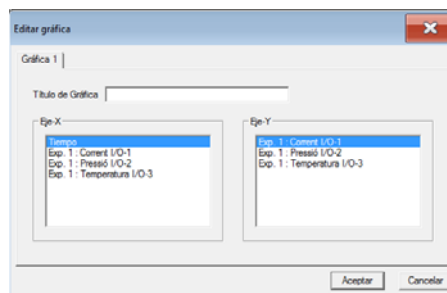



Figura 22: Anàlisi de les dades amb el software Multilab. Pas 2.2.

3. Els passos a seguir a continuació varien segons la variable estudiada:

Càrrega elèctrica

1. Feu clic a la casella Anàlisis, Integral.
2. Premeu de nou la icona Editar Gràfica, i desseleccionar la variable del Corrent, deixant només seleccionada la variable de l'integral.
3. Seleccioneu la icona Mostrar Cursor () i col·loqueu-lo a la punta més elevada de la recta.
4. Apareixerà a la part inferior central de la pantalla una barra amb la que apareix més avall, en la qual s'indica el total de la càrrega elèctrica que s'ha induït a la

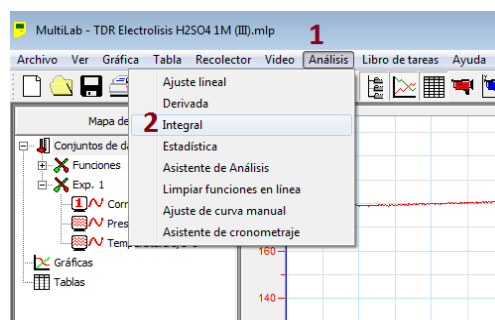


Figura 23: Anàlisi de les dades amb el software Multilab. Pas 3.1.

dissolució. Aquesta dada, expressada en mil·liamperers per segon, s'ha de convertir a Coulombs.

$$X = 1160 \text{ (s)} \quad Y = 217722.304 \text{ (mA*s)}$$

Pressió i temperatura

1. Preneu a Anàlisi, Estadística. El valor que s'ha de prendre a l'hora de realitzar els càlculs és la segona dada que ofereix la taula que apareixerà.

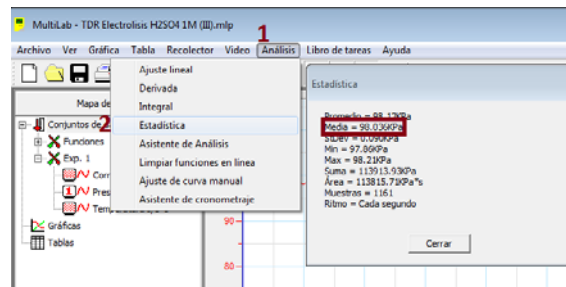


Figura 24: Anàlisi de les dades amb el software Multilab. Pas 3.2

Exemple d'aplicació del mètode

A continuació es calcularà la constant d'Avogadro a partir de les dades obtingudes a la primera pràctica realitzada (dissolució NaOH 0'5M prova I). Les dades obtingudes experimentalment foren les següents:

| Càrrega elèctrica (C) | Volum d'hidrogen (ml) | Alçada de la columna d'aigua (mm) | Temperatura ambiental (°K) | Pressió atmosfèrica (KPa) |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------------------|----------------------------|---------------------------|
| 47'054 | 6,8 | 444 | 301'5 | 101'79 |

$$N_A = \frac{\text{nombre de molècules}}{\text{nombre de mols}}$$

Nombre de molècules

Sabent la càrrega elèctrica que s'ha aplicat durant l'experiment, es pot esbrinar el nombre de molècules alliberades aplicant els següents factors de conversió:

$$\text{Nombre de molècules d'hidrogen} = 47'054(\text{C}) \times \frac{1\text{e}^-}{1,602 \times 10^{-19}\text{C}} \times \frac{1 \text{ molec H}_2}{2\text{e}^-} = 1'4686 \times 10^{20}$$

Nombre de mols

El nombre de mols es calcula a partir de la fórmula enunciada per la Llei dels Gasos Ideals:

$$n = \frac{PV}{RT} \left\{ \begin{array}{l} P_{\text{H}_2} = P_{\text{atm}} - dgh - P_{\text{vapor}} \rightarrow P_{\text{H}_2} = 757'56 - 1 \times 9'8 \times 0'444 - 29'22 = 723'99 \text{ mmHg} = \\ \mathbf{0'95 \text{ atm}} \\ \mathbf{V = 0'0068 \text{ (L)}} \\ \mathbf{R = 0,082 \frac{\text{atm} \times \text{L}}{\text{mols} \times \text{°K}}} \\ \mathbf{T = 28'5^\circ\text{C} + 273 = 301'5^\circ\text{K}} \end{array} \right.$$

$$n = \frac{0'95 \times 0'0068}{0'082 \times 301'5} = 2'6 \times 10^{-4}$$

Finalment, es substitueixen els valors de l'expressió inicial i s'obté el valor de la constant d'Avogadro:

$$N_A = \frac{1'4686 \times 10^{20} \text{ molècules}}{2'6 \times 10^{-4} \text{ mols}} = 5'6 \times 10^{23} \frac{\text{partícules}}{\text{mol}}$$

2.1.4 Resultats obtinguts

Les taules següents mostren les dades que vam obtenir al realitzar aquest experiment al laboratori de l'institut. També s'hi indica el valor de la constant d'Avogadro obtingut a partir d'aquestes. Per tal d'obtenir unes dades prou significatives, es va repetir cada experiment sis vegades. També es va realitzar l'experiment en medis diferents per esbrinar quin era el més adient. Més endavant també trobareu uns gràfics amb on podreu apreciar visualment la qualitat d'aquests resultats.

Dissolució NaOH 0,5M

Enregistrament I

| | | | |
|--------------------|---------|-----------------------------|------------------------------|
| Volum: | 6,8mL | Temperatura: | 301,5 °K |
| Alçada d'aigua: | 444mm | Pressió atmosfèrica: | 101,79 KPa |
| Càrrega elèctrica: | 47,054C | Constant d'Avogadro: | 5,6 x 10²³ |

Enregistrament II

| | | | |
|--------------------|---------|-----------------------------|------------------------------|
| Volum: | 5,5mL | Temperatura: | 302 °K |
| Alçada d'aigua: | 460mm | Pressió atmosfèrica: | 101,79 KPa |
| Càrrega elèctrica: | 37,165C | Constant d'Avogadro: | 5,5 x 10²³ |

Enregistrament III

| | | | |
|--------------------|---------|-----------------------------|------------------------------|
| Volum: | 6,6mL | Temperatura: | 302 °K |
| Alçada d'aigua: | 450mm | Pressió atmosfèrica: | 101,79 KPa |
| Càrrega elèctrica: | 45,053C | Constant d'Avogadro: | 5,5 x 10²³ |

Enregistrament IV

| | | | |
|--------------------|---------|-----------------------------|------------------------------|
| Volum: | 7,4mL | Temperatura: | 302 °K |
| Alçada d'aigua: | 440mm | Pressió atmosfèrica: | 101,69 KPa |
| Càrrega elèctrica: | 50,062C | Constant d'Avogadro: | 5,5 x 10²³ |

Enregistrament V

| | | | |
|--------------------|---------|-----------------------------|------------------------------|
| Volum: | 7,2mL | Temperatura: | 302 °K |
| Alçada d'aigua: | 440mm | Pressió atmosfèrica: | 101,69 KPa |
| Càrrega elèctrica: | 49,050C | Constant d'Avogadro: | 5,4 x 10²³ |

Enregistrament VI

| | | | |
|--------------------|---------|-----------------------------|------------------------------|
| Volum: | 5,8mL | Temperatura: | 302 °K |
| Alçada d'aigua: | 460mm | Pressió atmosfèrica: | 101,69 KPa |
| Càrrega elèctrica: | 38,400C | Constant d'Avogadro: | 5,4 x 10²³ |

Dissolució NaOH 1M

Enregistrament I

| | | | |
|--------------------|---------|-----------------------------|------------------------------|
| Volum: | 9,6mL | Temperatura: | 303 °K |
| Alçada d'aigua: | 380mm | Pressió atmosfèrica: | 97,5 KPa |
| Càrrega elèctrica: | 59,323C | Constant d'Avogadro: | 5,2 x 10²³ |

Enregistrament II

| | | | |
|--------------------|----------|-----------------------------|------------------------------|
| Volum: | 15,6mL | Temperatura: | 303 °K |
| Alçada d'aigua: | 361mm | Pressió atmosfèrica: | 99,59 KPa |
| Càrrega elèctrica: | 106,537C | Constant d'Avogadro: | 5,7 x 10²³ |

Enregistrament III

| | | | |
|--------------------|---------|-----------------------------|------------------------------|
| Volum: | 13,7mL | Temperatura: | 301 °K |
| Alçada d'aigua: | 396mm | Pressió atmosfèrica: | 101,79 KPa |
| Càrrega elèctrica: | 97,825C | Constant d'Avogadro: | 5,7 x 10²³ |

Enregistrament IV

| | | | |
|--------------------|---------|-----------------------------|------------------------------|
| Volum: | 13,5mL | Temperatura: | 301.5 °K |
| Alçada d'aigua: | 360mm | Pressió atmosfèrica: | 101,79 KPa |
| Càrrega elèctrica: | 96,098C | Constant d'Avogadro: | 6,0 x 10²³ |

Enregistrament V

| | | | |
|--------------------|---------|-----------------------------|------------------------------|
| Volum: | 11,1mL | Temperatura: | 301 °K |
| Alçada d'aigua: | 388mm | Pressió atmosfèrica: | 102,2 KPa |
| Càrrega elèctrica: | 98,063C | Constant d'Avogadro: | 7,1 x 10²³ |

Enregistrament VI

| | | | |
|--------------------|---------|-----------------------------|------------------------------|
| Volum: | 10,1mL | Temperatura: | 299,5 °K |
| Alçada d'aigua: | 390mm | Pressió atmosfèrica: | 102,2 KPa |
| Càrrega elèctrica: | 92,550C | Constant d'Avogadro: | 7,2 x 10²³ |

Dissolució NaOH 2M

Enregistrament I

| | | | |
|--------------------|----------|-----------------------------|------------------------------|
| Volum: | 21,8mL | Temperatura: | 302 °K |
| Alçada d'aigua: | 285mm | Pressió atmosfèrica: | 100,73 KPa |
| Càrrega elèctrica: | 155,663C | Constant d'Avogadro: | 5,8 x 10²³ |

Enregistrament II

| | | | |
|--------------------|----------|-----------------------------|------------------------------|
| Volum: | 19,8mL | Temperatura: | 302 °K |
| Alçada d'aigua: | 310mm | Pressió atmosfèrica: | 100,73 KPa |
| Càrrega elèctrica: | 143,717C | Constant d'Avogadro: | 5,9 x 10²³ |

Enregistrament III

| | | | |
|--------------------|----------|-----------------------------|------------------------------|
| Volum: | 20,9mL | Temperatura: | 302 °K |
| Alçada d'aigua: | 280mm | Pressió atmosfèrica: | 101,73 KPa |
| Càrrega elèctrica: | 144,574C | Constant d'Avogadro: | 5,6 x 10²³ |

Enregistrament IV

| | | | |
|--------------------|----------|-----------------------------|------------------------------|
| Volum: | 27mL | Temperatura: | 302 °K |
| Alçada d'aigua: | 234mm | Pressió atmosfèrica: | 101,67 KPa |
| Càrrega elèctrica: | 197,385C | Constant d'Avogadro: | 5,9 x 10²³ |

Enregistrament V

| | | | |
|--------------------|----------|-----------------------------|------------------------------|
| Volum: | 20,9mL | Temperatura: | 303 °K |
| Alçada d'aigua: | 285mm | Pressió atmosfèrica: | 101,67 KPa |
| Càrrega elèctrica: | 155,573C | Constant d'Avogadro: | 6,0 x 10²³ |

Enregistrament VI

| | | | |
|--------------------|----------|-----------------------------|------------------------------|
| Volum: | 28,7mL | Temperatura: | 303 °K |
| Alçada d'aigua: | 208mm | Pressió atmosfèrica: | 97,745 KPa |
| Càrrega elèctrica: | 211,308C | Constant d'Avogadro: | 6,2 x 10²³ |

Dissolució H₂SO₄ 1M

Enregistrament I

| | | | |
|--------------------|----------|-----------------------------|------------------------------|
| Volum: | 15,8mL | Temperatura: | 303 °K |
| Alçada d'aigua: | 357mm | Pressió atmosfèrica: | 97,64 KPa |
| Càrrega elèctrica: | 108,412C | Constant d'Avogadro: | 6,0 x 10²³ |

Enregistrament II

| | | | |
|--------------------|----------|-----------------------------|------------------------------|
| Volum: | 26mL | Temperatura: | 302 °K |
| Alçada d'aigua: | 245mm | Pressió atmosfèrica: | 101,59 KPa |
| Càrrega elèctrica: | 184,972C | Constant d'Avogadro: | 5,8 x 10²³ |

Enregistrament III

| | | | |
|--------------------|----------|-----------------------------|------------------------------|
| Volum: | 30mL | Temperatura: | 294,81 °K |
| Alçada d'aigua: | 210mm | Pressió atmosfèrica: | 98,117 KPa |
| Càrrega elèctrica: | 217,722C | Constant d'Avogadro: | 5,8 x 10²³ |

Enregistrament IV

| | | | |
|--------------------|----------|-----------------------------|------------------------------|
| Volum: | 24,1mL | Temperatura: | 303 °K |
| Alçada d'aigua: | 266mm | Pressió atmosfèrica: | 98,067 KPa |
| Càrrega elèctrica: | 176,217C | Constant d'Avogadro: | 6,1 x 10²³ |

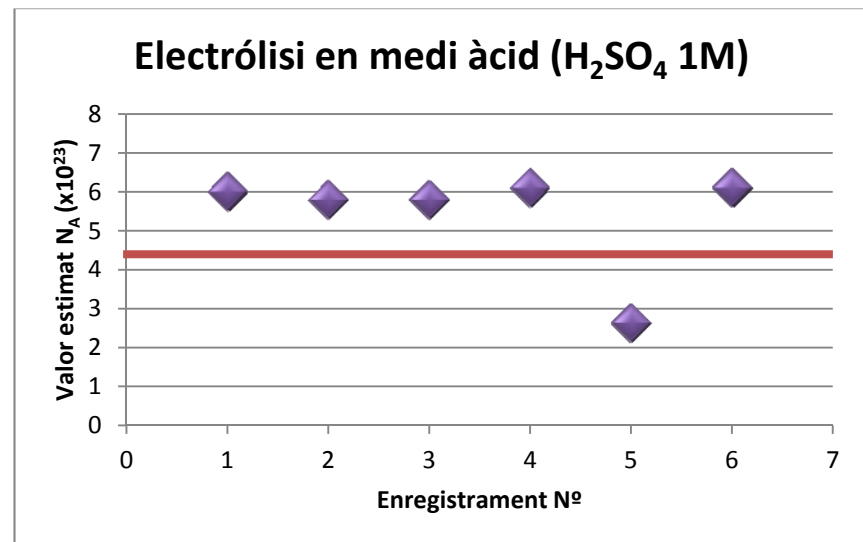
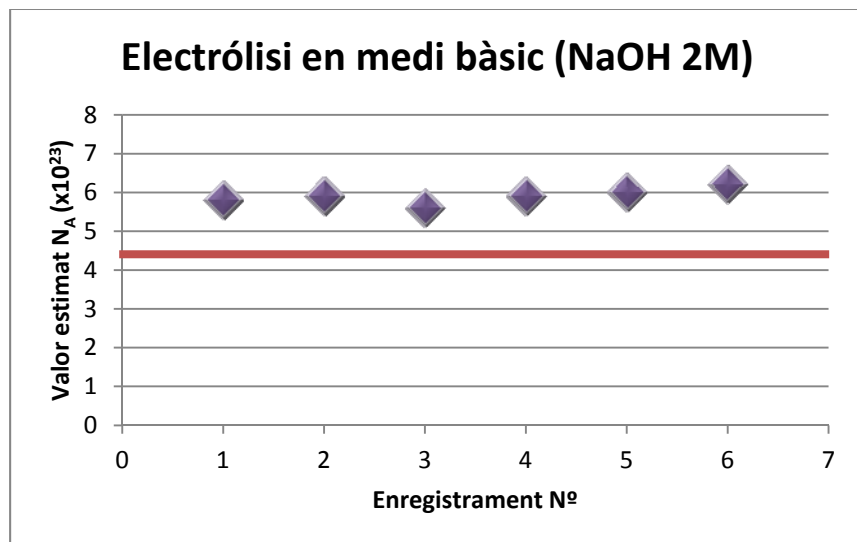
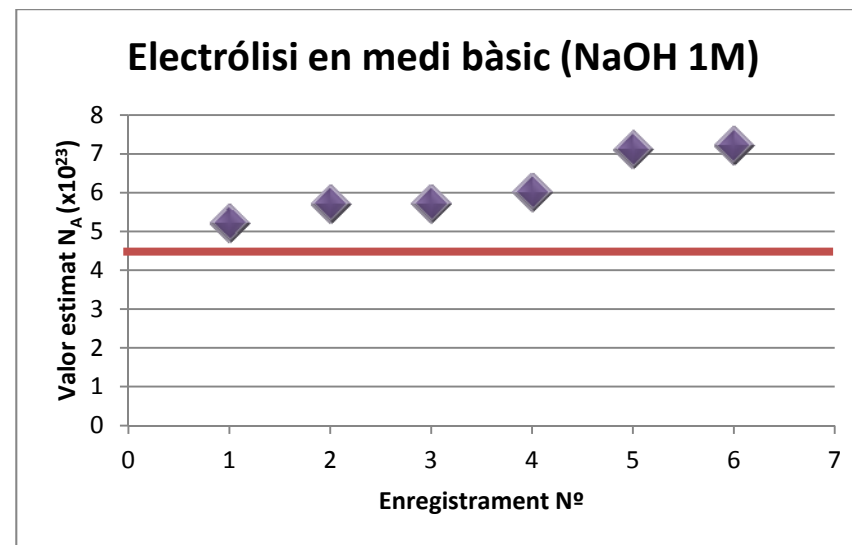
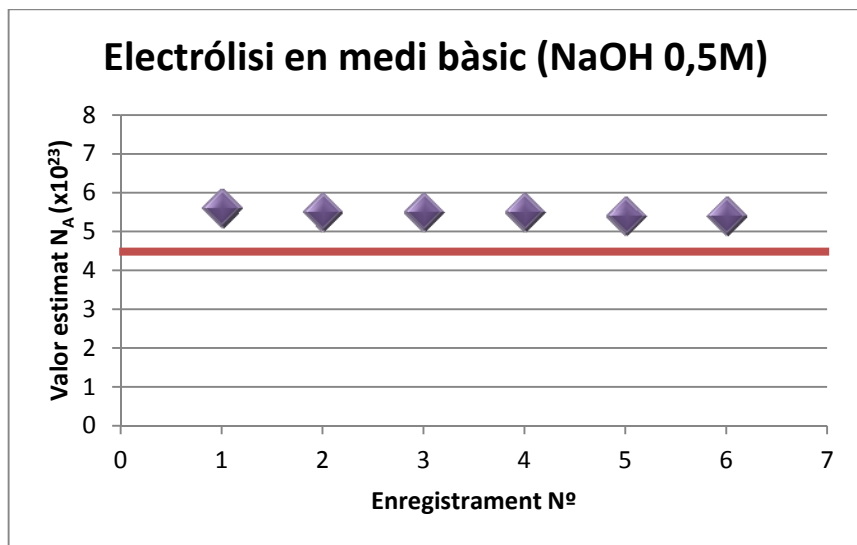
Enregistrament V

| | | | |
|--------------------|----------|-----------------------------|------------------------------|
| Volum: | 9,7mL | Temperatura: | 303 °K |
| Alçada d'aigua: | 419mm | Pressió atmosfèrica: | 101,59 KPa |
| Càrrega elèctrica: | 315,479C | Constant d'Avogadro: | 2,6 x 10²⁴ |

Enregistrament VI

| | | | |
|--------------------|----------|-----------------------------|------------------------------|
| Volum: | 19,8mL | Temperatura: | 303 °K |
| Alçada d'aigua: | 320mm | Pressió atmosfèrica: | 97,774 KPa |
| Càrrega elèctrica: | 143,561C | Constant d'Avogadro: | 6,1 x 10²³ |

RESULTATS OBTINGUTS (PART II)



Nota: La línia vermella indica el valor real de la constant d'Avogadro.

2.1.5 Anàlisi estadístic dels resultats obtinguts

A continuació us presentem un anàlisi estadístic de les dades obtingudes experimentalment. Per entendre els termes matemàtics que s'hi empren, es recomana consultar l'annex número 2 d'aquest treball de recerca. Per fer aquest tractament estadístic, hem agrupat totes les dades enregistrades a cada experiment i hem calculat els seus intervals de confiança. Recordem que aquest anàlisi té com a objectiu determinar si la conductivitat i el caràcter àcid o base del medi on es desenvolupa l'electròlisi afecta als valors estimats de la constant d'Avogadro.

2.1.5.1 Electròlisi en medi bàsic (NaOH 0'5M)

| Núm. d'enregistrament | Valor estimat de N_A |
|-----------------------|------------------------|
| 1 | $5,6 \times 10^{23}$ |
| 2 | $5,5 \times 10^{23}$ |
| 3 | $5,5 \times 10^{23}$ |
| 4 | $5,5 \times 10^{23}$ |
| 5 | $5,4 \times 10^{23}$ |
| 6 | $5,4 \times 10^{23}$ |

INTERVAL DE CONFIANÇA (GRAU DE CONFIANÇA DEL 95%)

$$I = [5'4 \times 10^{23}, 5,5 \times 10^{23}]$$

$$\bar{x} = 5,4(8) \times 10^{23}$$

Error relatiu: 8,97%

2.1.5.2 Electròlisi en medi bàsic (NaOH 1M)

| Núm. d'enregistrament | Valor estimat de N_A |
|-----------------------|------------------------|
| 1 | $5,2 \times 10^{23}$ |
| 2 | $5,7 \times 10^{23}$ |
| 3 | $5,7 \times 10^{23}$ |
| 4 | $6,0 \times 10^{23}$ |
| 5 | $7,1 \times 10^{23}$ |
| 6 | $7,2 \times 10^{23}$ |

INTERVAL DE CONFIANÇA (GRAU DE CONFIANÇA DEL 95%)

$$I = [5'6 \times 10^{23}, 6'7 \times 10^{23}]$$

$$\bar{x} = 6,1(5) \times 10^{23}$$

Error relatiu: 2,16%

2.1.5.3 Electròlisi en medi bàsic (NaOH 2M)

| Núm. d'enregistrament | Valor estimat de N_A |
|-----------------------|------------------------|
| 1 | $5,8 \times 10^{23}$ |
| 2 | $5,9 \times 10^{23}$ |
| 3 | $5,6 \times 10^{23}$ |
| 4 | $5,9 \times 10^{23}$ |
| 5 | $6,0 \times 10^{23}$ |
| 6 | $6,2 \times 10^{23}$ |

INTERVAL DE CONFIANÇA (GRAU DE CONFIANÇA DEL 95%)

$$I = [5,8 \times 10^{23}, 6,0 \times 10^{23}]$$

$$\bar{x} = 5,9(0) \times 10^{23}$$

Error relatiu: 1,99%

2.1.5.4 Electròlisi en medi àcid (H_2SO_4 1M)

| Núm. d'enregistrament | Valor estimat de N_A |
|-----------------------|--------------------------|
| 1 | $6,0 \times 10^{23}$ |
| 2 | $5,8 \times 10^{23}$ |
| 3 | $5,8 \times 10^{23}$ |
| 4 | $6,1 \times 10^{23}$ |
| 5 | $2,6 \times 10^{23}$ (*) |
| 6 | $6,1 \times 10^{23}$ |

(*) El valor de l'enregistrament 6 ha estat descartada per allunyar-se massa de la resta de resultats. Aquest mal resultat possiblement fou degut al desenvolupament d'una reacció d'oxidació amb els elèctrodes o de corrosió amb els cables.

INTERVAL DE CONFIANÇA (GRAU DE CONFIANÇA DEL 95%)

$$I = [5,9 \times 10^{23}, 6,1 \times 10^{23}]$$

$$\bar{x} = 5,9(6) \times 10^{23}$$

Error relatiu: 1%

Observació : Experimentalment, s'observa que, a mesura que augmenta la conductivitat del medi on es desenvolupa la reacció de l'electròlisi, els resultats tendeixen a ser més precisos i més fiables. Això s'explica perquè, a més conductivitat en té el medi, més ràpidament es desenvolupa la reacció i, per tant, menys temps tenen els elèctrodes de grafit per reaccionar amb les pinces de cocodril i l'electricitat de la font d'alimentació. Tal i com mostren els resultats, el medi àcid sembla proporcionar millors resultats. Val a dir, però, que comporta un inconvenient: és possible que, durant la realització de l'experiment, si la concentració d'àcid és elevada, aquest reaccioni amb els elèctrodes oxidant-los o bé acabi corroent el plàstic dels cables. Aquests factors poden afectar molt negativament al resultat de l'experiment, tal i com va passar durant l'enregistrament número 5.

2.1.6 Conclusions de l'experiment

En aquest darrer apartat es respondrà, d'una manera breu i directa, a les preguntes que ens varem plantejar a l'inici d'aquesta pràctica. És important fer notar que no s'ha treballat amb prou dades com per poder arribar a unes conclusions definitives i que, per tant, les respostes següents (tret de la primera que es basa en l'estudi estadístic dels resultats obtinguts) tenen un caràcter més aviat orientatiu.

- **Quins són els límits de l'interval que recull els valors estimats de la constant d'Avogadro amb un grau de confiança del 95% per a cada concentració de dissolvent empleada? I els errors relatius?**

2.1.6.1 Electròlisi en medi bàsic

- **NaOH 0'5M:**
 - **Interval de confiança:** $[5'4 \times 10^{23}, 5'5 \times 10^{23}]$
 - **Error relatiu:** 8,97%
- **NaOH 1M:**
 - **Interval de confiança:** $[5'6 \times 10^{23}, 6'7 \times 10^{23}]$
 - **Error relatiu:** 2,16%
- **NaOH 2M:**
 - **Interval de confiança:** $[5'8 \times 10^{23}, 6'0 \times 10^{23}]$
 - **Error relatiu:** 1,99%

2.1.6.2 Electròlisi en medi àcid

- **H₂SO₄ 1M:**
 - **Interval de confiança:** $[5'9 \times 10^{23}, 6'1 \times 10^{23}]$
 - **Error relatiu:** 1%
- **Els resultats obtinguts demostren que, tal i com ja indicava la part teòrica del mètode, el grau d'acidesa del medi on es desenvolupa la reacció d'electròlisi no afecta als valors estimats de la constant d'Avogadro?**

Els resultats obtinguts mostren com a mesura que augmenta la conductivitat del medi on es desenvolupa la reacció de l'electròlisi l'error relatiu dels valors de la constant d'Avogadro estimats disminueix.

- **Quina és el medi més adient per a desenvolupar l'electròlisi de l'aigua per calcular la constant d'Avogadro?**

De les quatre proves realitzades, la desenvolupada en un medi àcid d'àcid sulfúric amb concentració 1M és la que ha ofert els millors resultats: l'error relatiu comès en aquest mètode és el més petit de tots (de l'1%) i el seu interval de confiança és el més estret de tots.

Val a dir, però, que l'electròlisi el medi àcid comporta un inconvenient: és possible que, durant la realització de l'experiment, si la concentració d'àcid és elevada, aquest reaccioni amb les dents de les pinces de cocodrill oxidant-les o bé acabi corroent el plàstic dels cables. Aquests factors poden afectar molt negativament al resultat de l'experiment (vegeu el resultat de l'enregistrament número 5 d'aquest mètode).

EXPERIMENT 2

2.2 Determinació experimental de la constant d'Avogadro a partir de l'electrodeposició del coure

2.2.1 Raonaments teòrics

Aquest segon mètode que us proposem és, bàsicament, una variació de l'anterior (el de l'electròlisi). La idea principal és exactament la mateixa: calcular el nombre d'Avogadro a partir de l'estudi d'una determinada reacció química. Es mesurarà el nombre de partícules despreses i el nombre de mols formats. Dividint la primera dada entre la segona s'obindrà un valor aproximat de la constant d'Avogadro.

En aquest experiment aprofitarem que el transport del corrent elèctric mitjançant electròlits sol anar acompanyat de reaccions químiques en els elèctrodes. En aquest cas, els elèctrodes seran dues làmines de coure i l'electròlit sulfat de coure (II). Perquè hi hagi circulació del corrent elèctric, els dos elèctrodes, càtode i ànode, han d'estar connectats als pols negatiu i positiu d'una font d'alimentació. Seguidament, es connectarà en sèrie un amperímetre (en el nostre cas, hem utilitzat un sensor d'intensitat de corrent). Vegeu la figura següent.

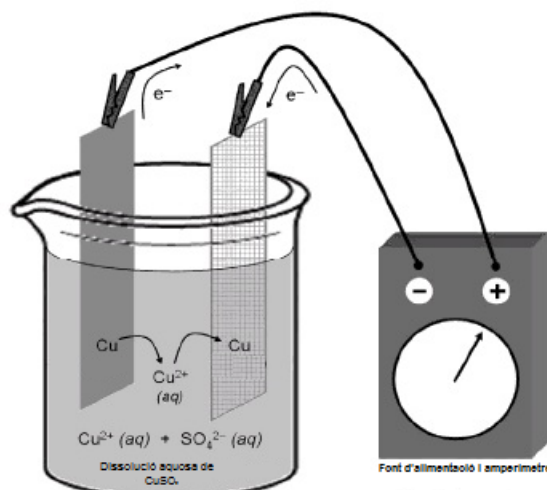


Figura 25: Anàlisi de les dades amb el software Multilab. Pas 3.2

Les reaccions que tindran lloc seran, doncs, les següents:

| Reaccions químiques de l'electrodeposició del coure | |
|---|---|
| Reacció 1: Dissociació del sulfat de coure | $\text{CuSO}_4 \rightarrow \text{Cu}^{2+} + \text{SO}_4^{2-}$ |
| Reacció 2: Oxidació del coure | $\text{Cu} \rightarrow \text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^-$ |
| Reacció 3: Reducció del coure | $\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cu}$ |

El ió Cu (II) es dipositarà al càtode, amb la qual cosa la massa de l'elèctrode augmentarà. Així doncs, mesurant l'elèctrode abans i després d'iniciar l'experiment, podem conèixer la massa de coure dipositada a l'electròde. A partir de la massa molar del coure, doncs, podem esbrinar el nombre de mols dissociats. Vegeu l'expressió matemàtica següent:

$$\text{Nombre de mols de coure} = (\Delta m_{\text{càtode}}) \text{g Cu} \times \frac{1 \text{ mol Cu}}{63,548 \text{ g Cu}}$$

Coneixent la intensitat del corrent elèctric (I), i el temps (t) que ha durat la reacció d'electròlisi, es pot saber la càrrega (Q), que ha circulat en el circuit multiplicant aquestes dues dades. Sabent que al càtode es diposita 1 àtom de coure per cada dos electrons capturats, es pot determinar el nombre d'àtoms de coure que s'han dipositat. Cal tenir en compte que la càrrega de l'electró és $1,602 \times 10^{-19}$ C. Vegeu l'expressió matemàtica següent:

$$\text{Nombre d'àtoms de coure} = (\text{Intensitat} \times \text{temps}) \times \frac{1 \text{ electró}}{1,6022 \times 10^{-19} \text{ C}} \times \frac{1 \text{ àtom de Cu}}{2 \text{ electrons}}$$

Malauradament, és previsible que la intensitat del corrent variï lleugerament durant l'electrodeposició. Per determinar la càrrega, doncs, hauríem de conèixer la intensitat del corrent mitjana, però aquesta dada ens és desconeguda. Així doncs, el que es farà serà enregistrar les dades intensitat-temps mitjançant un sensor que mesurarà el corrent i, posteriorment, utilitzant el software Multilab, representar les dades en un gràfic intensitat-temps com el següent:

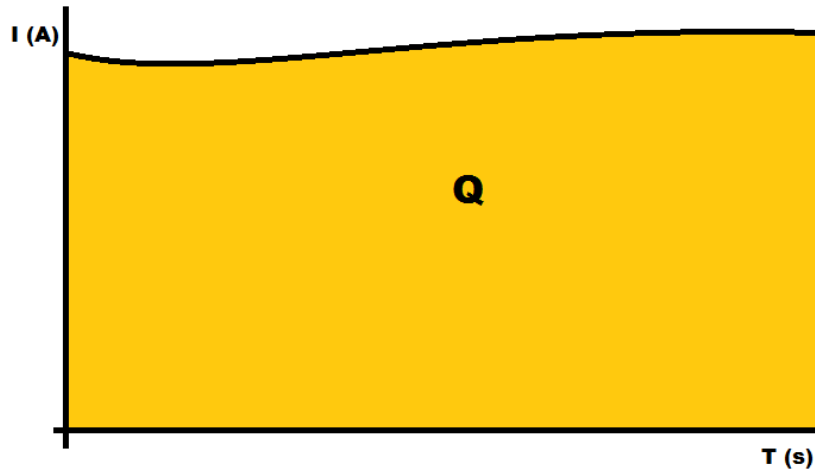


Figura 26: Gràfic intensitat-temps. L'àrea d'aquest es correspon amb el valor total de la càrrega que ha circulat pel circuit.

L'àrea en color és equivalent a la càrrega que ha circulat. Aquesta àrea serà mesurada a partir de la funció integrat que duu incorporat el software Multilab.

$$\text{Àrea} = \text{Càrrega} = \int_{t=0}^{t=t} I \times dt$$

En resum i en conclusió, doncs, el valor de la constant d'Avogadro serà calculat mitjançant l'expressió següent:

$$N_A = \frac{\text{nombre d'àtoms de coure}}{\text{nombre de mols de coure}} = \frac{\int_{t=0}^{t=t} I \times dt \times \frac{1 \text{ electró}}{1,6022 \times 10^{-19} \text{ C}} \times \frac{1 \text{ àtom de Cu}}{2 \text{ electrons}}}{(\Delta m_{\text{càtode}}) \text{g Cu} \times \frac{1 \text{ mol Cu}}{63,548 \text{ g Cu}}}$$

2.2.2 Objectius de la pràctica

A continuació, us presentem un disseny experimental amb el qual podreu posar a la pràctica els raonaments de les pàgines anteriors i, en conseqüència, estimar el valor de la constant d'Avogadro. Hi trobareu, doncs, un protocol força semblant al del mètode anterior, amb un llistat dels diversos estris que necessitareu i els procediments que haureu de seguir, així com diversos esquemes i fotografies que us ajudaran a entre millor el disseny experiment.

A diferència del disseny experimental de la pràctica anterior, aquest ha estat pensat únicament per demostrar que el raonament teòric proposat és correcte i viable, i per obtenir unes dades experimentals que ens serviran per comparar els diferents mètodes proposats al llarg del treball en el darrer apartat d'aquest.

El nostre únic objectiu és, doncs, donar resposta a la pregunta següent:

- **Quins són els límits de l'interval de confiança que recull, amb un grau de confiança del 95%, els valors estimats de la constant d'Avogadro a partir de l'aplicació d'aquest mètode? I el valor de l'error relatiu comès?**

2.2.3 Disseny de l'experiment

2.2.3.1 Descripció de l'experiment

El muntatge consisteix en un circuit elèctric, format per una font d'alimentació i un sensor de corrent elèctric amb capacitat màxima de 2,5A/s connectat a una consola Multilab i el recipient on es realitza la reacció química. Es recomana utilitzar un vas de precipitats amb una capacitat de 250mL. A l'interior d'aquest recipient s'ha d'abocar una dissolució de sulfat de coure (CuSO_4). Es recomana també fer anar una dissolució de 200mL 1M. Finalment, a l'interior d'aquest recipient s'hi haurien de dipositar dues làmines de coure. El recipient on es desenvolupa la reacció està connectat al circuit elèctric mitjançant unes pinces dentades que es col·loquen a les làmines de coure. En cap moment aquestes han d'estar en contacte entre elles. La imatge següent mostra el muntatge a partir el qual es van obtenir les dades que es presentaran més endavant.



Figura 27: Fotografia del muntatge.



2.2.3.2 Utiltatge

- Aigua destil·lada.
- Sulfat de coure (CuSO_4)
- Un vas de precipitats.
- Dues làmines de coure.
- Sensor de corrent.

- Font d'alimentació.
- Pinceres de cocodrill.
- Cables.
- Vareta agitadora.

2.2.3.2 Procediments

1. Prepareu les dissolucions necessàries per realitzar l'experiment: 200mL de sulfat de coure (CuSO_4) 1M i dissolucions d'hidròxid de sodi (NaOH) i d'àcid nítric (HNO_3) diluïdes en aigua destil·lada. Les concentracions d'aquestes dues darreres no tenen importància ja que no intervenen en l'experiment: només s'utilitzen per eliminar les brutícies que hi poden haver a les superfícies de les làmines de coure.
2. Banyeu cada làmina de coure, en primer lloc amb hidròxid de sodi i després amb àcid nítric. Després, renteu-les amb aigua destil·lada.
3. Un cop les làmines de coure s'hagin eixugat, mulleu un paper o un drap amb acetona i fregueu-lo amb les làmines. Això hauria d'acabar de treure els darrers greixos que hi podien haver quedat.
4. Peseu el pes de cada làmina per separat i anoteu quina realitzarà la funció de pol de negatiu i quina de pol positiu.
5. Construïu el muntatge descrit abans. El resultat hauria de ser una cosa semblant al mostrat en la figura 27.
6. Engegueu la font d'alimentació i inicieu l'enregistrament de dades. No és del tot recomanable utilitzar voltatges elevats perquè aquests acostumen a afectar negativament els resultats del l'experiment. Pot provocar que es desenvolupin reaccions d'oxidació en els elèctrodes que no interessin. Un alt voltatge pot provocar, a més, una sobrecàrrega a la font d'alimentació o bé provocar que la intensitat del corrent sigui tant alta que el sensor no sigui capaç de mesurar-la correctament. El voltatge recomanat és d'uns 4,5 Volts.
7. Deixeu que la reacció es desenvolupi tranquil·lament. És un procés més aviat lent. Quan més temps duri la reacció, major serà el nombre de xifres significatives i, en principi, millors seran els resultats. Nosaltres varem deixar que la reacció es desenvolupés durant una mitjana de dues hores i mitja, però és un temps més aviat excessiu. En principi, amb mitja hora hi hauria d'haver més que suficient.
8. A continuació mesureu, de nou, la massa final de cada làmina de coure que estava connectada al pol positiu (el càtode) i descarregueu les dades emmagatzemades a la consola Multilab en un ordinador per tals d'obtenir el valor de la Intensitat del corrent.

Això es fa exactament igual que al mètode anterior: obriu l'arxiu de les dades, preneu la icona *Anàlisi*, situada a la part superior esquerra, i després a la icona *Integral* (vegeu la figura 28). En aquest moment hi haurien d'haver dos gràfiques a la pantalla. Preneu la icona *Editar Gràfica* () i desseleccioneu la gràfica corrent-temps (vegeu les figures 29 i 30). Finalment preneu la icona *Mostrar Cursor* () i col·loqueu-lo a l'extrem més elevat de la gràfica. A la part inferior, apareixerà una funció on s'indicarà el valor del corrent elèctric que s'ha aplicat al muntatge (vegeu la figura 31).

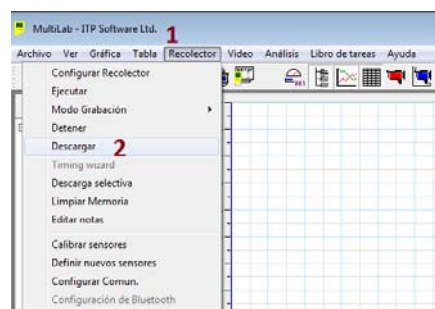


Figura 28: Anàlisi de les dades amb el software Multilab. Passos 1 i 2.

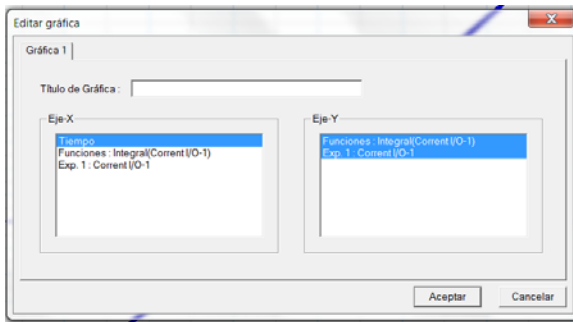


Figura 29: Anàlisi de les dades amb el software Multilab. Pas 3.

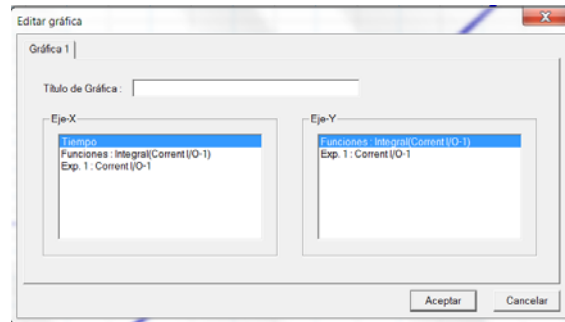


Figura 30: Anàlisi de les dades amb el software Multilab. Pas 4.

$$X = 7548 \text{ (s)} \quad Y = 4195.229 \text{ (A*s)}$$

Figura 31: Funció integral obtinguda. El valor de Y es correspon amb el del la càrrega total que ha circulat.

Exemple d'aplicació del mètode

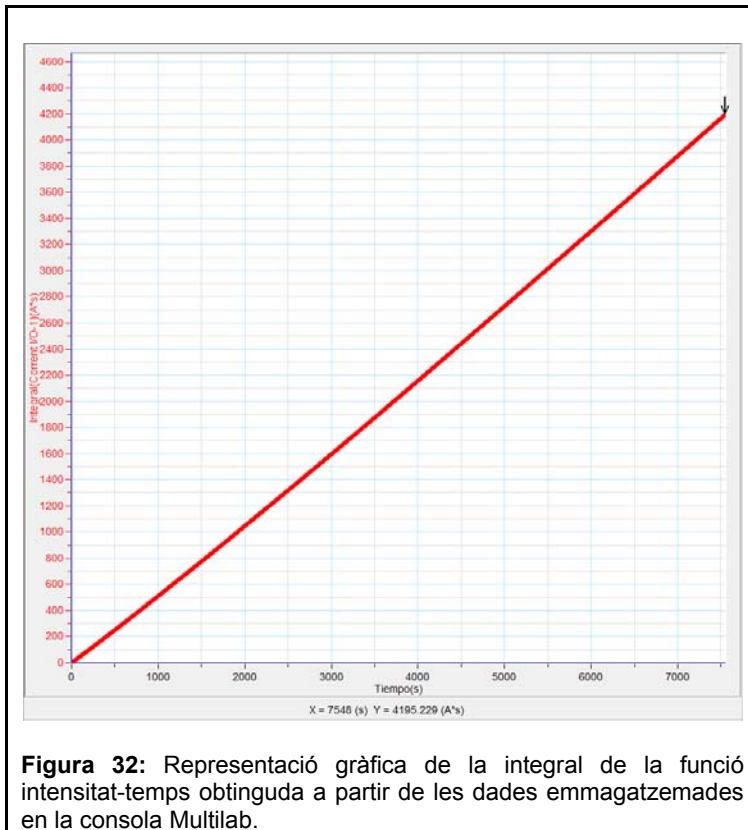
A continuació es calcularà la constant d'Avogadro a partir de les dades obtingudes a la primera pràctica realitzada. L'experiment va tenir una durada de dues hores, cinc minuts i quaranta-cinc segons. La font d'alimentació va funcionar emetent un voltatge situat al voltant de 4V. La massa inicial de làmina connectada al pol positiu era de 22'23g i la final de 20'68g. La làmina situada al pol negatiu inicialment tenia una massa de 30'43g i al final de l'experiment aquesta era igual a 31'77g.

Nombre de mols

$$\Delta m_{\text{càtode}}: (22'23 - 20'68)\text{g} = 1'55\text{g}$$

$$1'55\text{g Cu} \times \frac{1\text{mol Cu}}{63'548\text{g Cu}} = 0'024\text{mols Cu}$$

Nombre de partícules



$$y = Q = 4195,229\text{A/s}$$

Figura 33: Valor de càrrega total aplicada a l'experiment segons el programa Multilab.

$$4195'229\text{ C} \times \frac{1\text{electró}}{1,6022 \times 10^{-19}\text{ C}} \times \frac{1\text{àtom de Cu}}{2\text{ electrons}} = 1,309 \times 10^{22}\text{àtoms Cu}$$

Determinació de la constant d'Avogadro

$$N_A = \frac{\text{Nombre de partícules}}{\text{Nombre de mols}} \rightarrow \frac{1,309 \times 10^{22}\text{àtoms Cu}}{0'023\text{mols Cu}} = 5'76 \times 10^{23} \frac{\text{partícules}}{\text{mol}}$$

2.2.4 Resultats obtinguts

La taula següent mostra les diferents dades experimentals obtingudes a cada enregistrament i el valor estimat de la constant d'Avogadro calculat a partir d'aquestes.

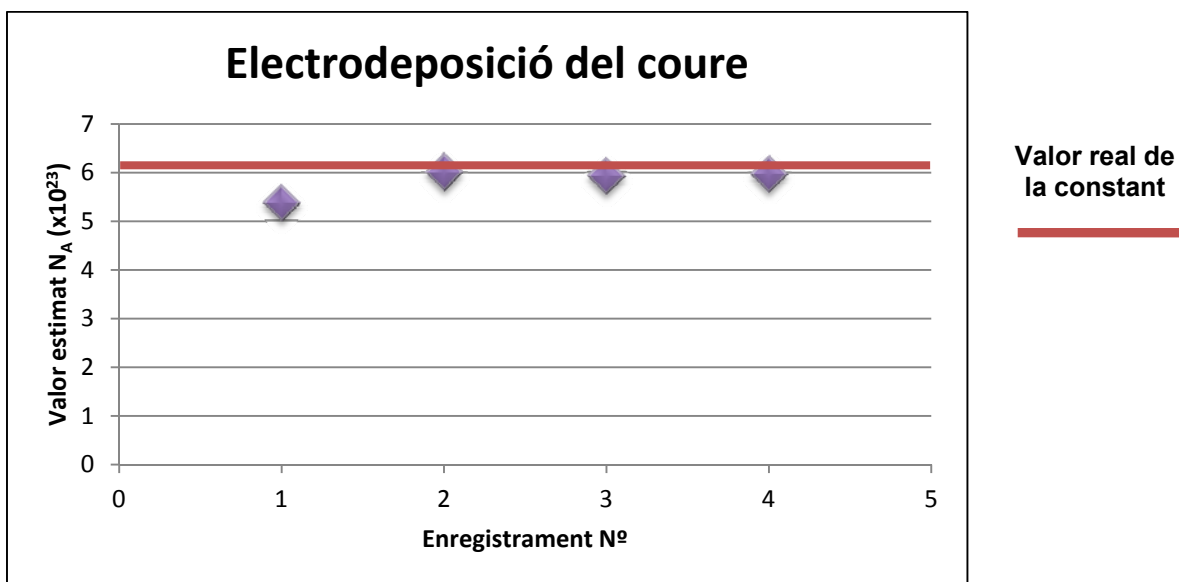
| Núm d'enregistrament | Variació de massa al ànode (g) | Càrrega (C) | Valor N_A estimat |
|----------------------|--------------------------------|-------------|-----------------------|
| 1 | 1,92 | 4.195,23 | $5,37 \times 10^{23}$ |
| 2 | 1,92 | 5.815,87 | $6,01 \times 10^{23}$ |
| 3 | 1,30 | 3.883,54 | $5,92 \times 10^{23}$ |
| 4 | 1,90 | 5.723,02 | $5,97 \times 10^{23}$ |
| 5 (*) | 1,01 | 1.643,84 | $3,23 \times 10^{23}$ |

(*) Les dades de l' enregistrament 5 han estat descartades alhora d'analitzar estadísticament els resultats de l'experiment per allunyar-se molt tant del valor real de la constant d'Avogadro com de la resta de resultats.

2.2.5 Anàlisi estadístic dels resultats obtinguts

A continuació us presentem una gràfica en la qual es mostren els valors estimats de la constant d'Avogadro obtinguts amb aquest mètode i els resultats d'un tractament estadístic realitzat amb la finalitat d'avaluar la viabilitat del mètode. Aquestes dades seran comentades més endavant.

A l'annex número 2 d'aquest treball de recerca trobareu una explicació detallada dels fonaments del tractament estadístic que hem aplicat.



| <u>DADES ESTADÍSTIQUES</u> | <u>INTERVAL DE CONFIANÇA (Grau de confiança del 95%)</u> |
|--|--|
| Mitjana aritmètica: $5,93 \times 10^{23}$ Error relatiu: 1,5% | [$5'44 \times 10^{23}$, $6'41 \times 10^{23}$] |

2.2.6 Conclusions de l'experiment

En aquest darrer apartat es respondrà, d'una manera breu i directa, a les preguntes que ens varem plantejar a l'inici d'aquesta pràctica. És important fer notar que en aquesta pràctica tampoc no s'ha treballat amb prou dades com per poder arribar a unes conclusions definitives.

- Quins són els límits de l'interval de confiança que recull, amb un grau de confiança del 95%, els valors estimats de la constant d'Avogadro a partir de l'aplicació d'aquest mètode? I el valor de l'error relatiu comès?

| Interval de confiança | Error relatiu |
|--|---------------|
| $I = [5'54 \times 10^{23}, 6'10 \times 10^{23}]$ | 3,32% |

Observació: És força probable que els resultats que ofereix aquest mètode siguin millors del que indiquen aquestes estadístiques ja que, com podeu veure a la taula següent, la majoria dels enregistraments (Nº 2, 3 i 4) ofereixen uns resultats excel·lents.

| Núm. d'enregistrament | Valor N_A estimat |
|-----------------------|-----------------------|
| 1 | $5'37 \times 10^{23}$ |
| 2 | $6'01 \times 10^{23}$ |
| 3 | $5'92 \times 10^{23}$ |
| 4 | $5'97 \times 10^{23}$ |
| 5 | $3'23 \times 10^{23}$ |

EXPERIMENT 3

2.3 Determinació experimental de la constant d'Avogadro a partir de l'estudi d'estructures cristal·lines

2.3.1 Raonaments teòrics

Aquest mètode es basa en l'estudi de les estructures atòmiques de diferents minerals mitjançant microscopis de raigs X.

Una mostra qualsevol de qualsevol mineral està formada per la unió d'un elevadíssim nombre de partícules, que adquireixen la forma de cel·les. Les diferents formes que poden adoptar aquestes cel·les s'anomenen reticles espacials. Un reticle espacial és una disposició de punts regular i tridimensional. En total, hi ha 14 tipus de reticles espacials. Els més simètrics d'aquests 14 tipus són els tres reticles cúbics que apareixen representats a la figura següent. Aquestes tres figures resultaran molt útils per descriure un gran nombre de les altres estructures possibles.

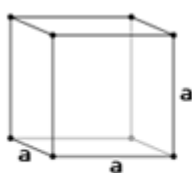


Figura 34: reticle cúbic primitiu

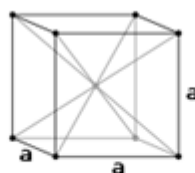


Figura 35: reticle cúbic centrat en el cos

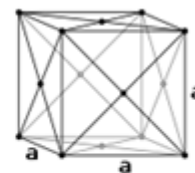


Figura 36: reticle cúbic centrat a les cares

La cel·la unitat d'un reticle espacial s'obté unint vuit punts per constituir un "sòlid" les cares oposades del qual siguin paral·leles. La cel·la unitat del reticle cúbic primitiu és un cub, la del reticle cúbic centrat en el cos és un cub que presenta un punt reticular situat al seu centre i la del reticle cúbic centrat a les cares és un cub que posseeix un punt reticular addicional al centre de cada cara. Aquests coneixements resultaran força útils per comprendre els paràgrafs següents.

Per calcular la constant d'Avogadro, ens interessa esbrinar el nombre de partícules que hi ha a la mostra estudiada. Calculant el volum d'aquesta i dividint-lo entre el volum de la cel·la unitat, obtindrem el nombre de cel·les unitat que conté. Finalment, sabent el nombre de partícules que hi ha cada cel·la, es podrà calcular el nombre de molècules que conté la mostra.

$$\text{Nombre de partícules} = \frac{\text{Volum de la mostra}}{x} \times \frac{1 \text{ cel·la unitat}}{\text{Volum de la cel·la unitat}} \times \frac{? \text{ àtoms de l'espècie estudiada}}{1 \text{ cel·la unitat}}$$

Calcular quantes partícules de cada espècie hi ha en una cel·la resulta una tasca més complicada del que sembla a simple vista. El reticle cúbic primitiu, per exemple, a primer cop d'ull sembla que presenta 8 àtoms en total, un a cada vèrtex, però si hi reflexionem ens adonem de que cadascun d'aquests està compartit amb les altres set cel·les unitat que conflueixen aquest vèrtex. Per aquesta raó es considera que només una octava part de cada punt reticular (de cada vèrtex) pertany a la cel·la. D'aquesta manera, es dedueix que el nombre de punts reticulars (àtoms) associats a la reticle cúbic primitiu és igual a $8 \times (1/8) = 1$. El reticle cúbic centrat en el cos presenta, per contra, dos punts reticulars o àtoms, ja que el punt central

no està compartit amb cap altra cel·la. El reticle cúbic centrat a les cares presenta, a més dels punts reticulars dels vèrtexs, un al centre de cada cara. Aquests, però, estan compartits amb la cel·la continua de manera que només la meitat d'aquest punt pertany a cadascuna. El quadre següent expressa la informació d'aquest paràgraf d'una manera més esquemàtica.

| Tipus de cel·la | Nombre de punts als vèrtexs | Nombre de punts a les cares | Nombre de punts al centre del cub | Total |
|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|-------|
| Cúbica primitiva | $8 \times \frac{1}{8}$ | 0 | 0 | 1 |
| Cúbica centrada en el cos | $8 \times \frac{1}{8}$ | 0 | 1 | 2 |
| Cúbica centrada a les cares | $8 \times \frac{1}{8}$ | $6 \times \frac{1}{2}$ | 0 | 4 |

El volum dels àtoms dels composts dels minerals es determina mitjançant mètodes experimentals força sofisticats basats en l'estudi de la difracció de Raigs X i en l'aplicació de la llei de Bragg. La llei de Bragg fou derivada pels físics britànics William Henry Bragg i el seu fill William Lawrence Bragg al 1913. Tots dos foren guardonats amb el premi Nobel de Física, al 1915, pels seus treballs sobre els estudis de les estructures cristal·lines del clorur de sodi (NaCl), sulfur de zinc (ZnS) i del diamant (C). Aquesta llei permet estudiar les direccions en les quals la difracció de raigs X sobre una superfície d'un cristall produeix interferències constructives.

Els raigs X són un tipus de radiació electromagnètica que conté una elevada quantitat d'energia i longituds d'ones molt curtes i de mateixa fase que els espais atòmics dels sòlids. Quan un feix de llum incideix sobre un material sòlid, una porció d'aquests raigs xoca amb els electrons dels ions que componen les estructures cristal·lines i, en conseqüència, es dispersa en totes les direccions.

Existeixen diferents mètodes per deduir la llei de Bragg. A continuació la deduirem observant un esquema gràfic de com es difracten els raigs X en impactar sobre dos ions. Aquest raonament es coneix amb el nom de Deducció de la Llei de Bragg per diferència de camí òptic. Vegeu la figura 37. Considerem una figura conformada per dos plans d'àtoms separats els uns dels altres per una distància d . Imaginem ara que dos raigs X de igual fase (rajos de color roig i blau a la figura) xoquen amb els àtoms K i P i, en conseqüència, són dispersats en totes direccions. Per a cada direcció, els dos raigs reflectits continuen trobant-se en la mateixa fase i, per tant, es compleix, per a cada pla, que:

$$\overline{QK} - \overline{PR} = \overline{PK} \cos \theta - \overline{PK} \cos \theta = 0$$

Per analitzar els raigs dispersats per àtoms situats en un pla diferent, observarem els raigs de color roig i verd de la figura. Tal i com es pot apreciar, són dispersats pels àtoms K i L, respectivament. Podeu observar que es forma un triangle en el qual es compleix que:

$$\overline{ML} + \overline{LN} = d' \sin \theta - d' \sin \theta$$

Aquest dos raigs estaran en la mateixa fase si la diferència entre els vectors \overline{ML} i \overline{LN} és igual a un nombre enter (n) de longitud d'ona λ . Així doncs, queda demostrat que $n\lambda = 2d'\sin(\theta)$.

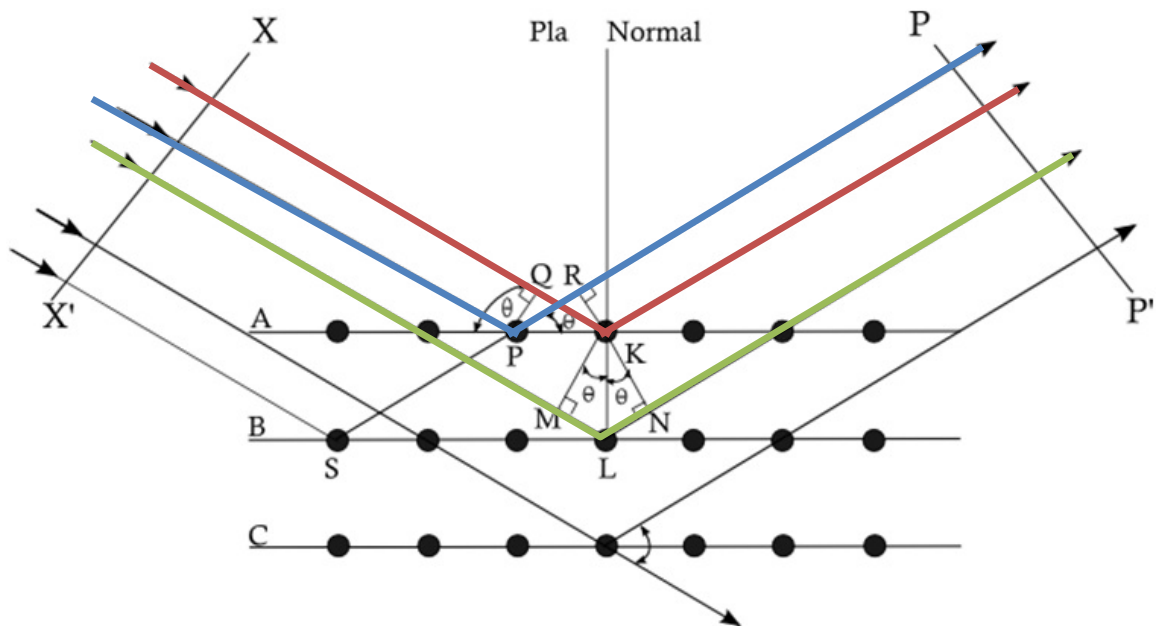


Figura 37: Deducció de la llei de Bragg per diferència de camí òptic.

$$n\lambda = 2d \sin \theta \left\{ \begin{array}{l} n = \text{Nombre enter} \\ \lambda = \text{longitud de l'ona de Raigs X} \\ d = \text{distància entre els plans de la red cristal·lina} \\ \theta = \text{angle entre els raigs incidents i els plans de difracció} \end{array} \right.$$

Aïllant, doncs, el valor de d en la fórmula anterior, es pot esbrinar la longitud de les arestes de les estructures reticulars dels àtoms dels diferents composts. D'altra banda, el tipus de reticle espacial del compost estudiat es determina observant com es difracten els raigs X. Quan dos raigs X no es difracten, vol dir que s'està produint una interferència destructiva. Així doncs, la difracció dels Raigs X de cristalls cúbics, per exemple, està condicionada de la següent manera:

- **Cúbica primitiva:** tots els plans es difracten.
- **Cúbica centrada en el cos:** els índex de Miller (*) dels plànols que es difracten són tots parells o imparells.
- **Cúbica centrada en les cares:** la suma dels índexs de Miller* dels plànols que es difracten és igual a un nombre parell.

(*) **Nota:** Els índex de Miller són uns paràmetres amb valors enters que s'utilitzen en cristal·lografia per designar un sistema de plans cristal·logràfics. Generalment, s'expressen amb les lletres h, k i l.

Evidentment, determinar el volum de la cel·la unitat de cada compost requereix uns mitjans tècnics molt complexos fora del nostre abast. El més recomanable, doncs, és fer una petita recerca bibliogràfica per tal de trobar aquesta dada. En aquest treball de recerca, en unes pàgines més endavant, podreu trobar el volum de les cel·les unitats d'alguns composts. També es recomana consultar un llibre molt útil titulat *Minerales*, editorial Tikal, ISBN 978-84-305-7216-8. És una guia de minerals molt extensa i completa a la qual trobareu totes les dades que necessiteu.

Finalment, un cop sapiguem el nombre de molècules d'una espècie que hi ha la mostra, només ens caldrà dividir-lo entre el nombre de mols que hi ha en aquesta. Aquesta dada es calcula molt senzillament amb el següent factor de conversió (suposarem en un principi que la puresa dels minerals estudiats és del 100%):

$$\text{mols a la mostra} = \text{massa del mineral} \times \frac{1 \text{ mol de compost}}{\text{massa molecular del compost}}$$

La fórmula que proposa aquest mètode és, per tant, la següent:

$$N_A = \frac{\text{volum de la mostra} \times \frac{1 \text{ cel·la unitat}}{\text{volum de la cel·la unitat}} \times \frac{? \text{ àtoms de l'espècie estudiada}}{1 \text{ cel·la unitat}}}{\text{massa del mineral} \times \frac{1 \text{ mol de mineral}}{\text{massa molecular del compost present al mineral}}}$$

Les dades marcades amb color blau s'obtenen experimentalment. Per esbrinar les dades marcades amb color vermell, s'ha de dur a terme una recerca bibliogràfica. A l'apartat següent, hom pot trobar aquesta informació d'alguns dels minerals més comuns i més recomanats per realitzar aquesta pràctica. Les de color verd s'han d'obtenir a partir de les dades trobades durant la recerca bibliogràfica.

2.3.2 Objectius de la pràctica

Tal i com ja s'ha fet en els dos mètodes anteriors, ara, un cop enllestida la part teòrica, us presentem un disseny experimental amb el qual podreu determinar el valor de la constant d'Avogadro a partir dels raonaments de les pàgines anteriors.

És important dir, però, que la nostra intenció no és únicament confirmar la validesa del raonament teòric, sinó que també volem perfeccionar el nostre disseny experimental donant una sèrie de consells a partir de les nostres experiències. Malgrat això, aquest disseny experimental no serà complet del tot, ja que hauria de proporcionar tres dades experimentals: el volum de la cel·la unitat del compost estudiat, i el volum i la massa de la mostra. Tal i com ja s'ha indicat abans, el laboratori del nostre institut no disposa dels mitjans necessaris per determinar la primera d'aquestes dades i, per tant, s'haurà de fer una recerca bibliogràfica per trobar-la. Les dades que intentarem mesurar experimentalment són, doncs, el volum i la massa de la mostra estudiada. El raonament teòric suposa que la puresa de totes les mostres estudiades és del 100% i per tant, per aconseguir uns bons resultats, és important complir aquest principi.

Les dificultats per aconseguir mostres totalment pures i per determinar amb exactitud el volum de mostres minerals amb forma irregular són, doncs, les principals limitacions d'aquest mètode. Una possible solució a aquestes dues dificultats seria utilitzar mostres de materials metàl·lics amb forma regular, en comptes de mostres de minerals, ja que, d'una banda, es facilita notablement la mesura del seu volum, al poder realitzar-se aquesta amb un peu de rei, i de l'altra, resulta més fàcil trobar mostres de metalls totalment pures que no pas de minerals. Així doncs, durant la realització d'aquest mètode també s'intentarà esbrinar si aquesta suposició és certa.

En resum, doncs, els nostres objectius, expressats en forma de pregunta, són els dos següents:

- Quins són els límits de l'interval que recull els valors estimats de la constant d'Avogadro amb un grau de confiança del 95% per a les estimacions realitzades a partir de composts minerals i d'elements metàl·lics? Quin és l'error relatiu comès a cada estimació?
- És cert que la puresa de les mostres d'elements metàl·lics és superior a la dels altres minerals? En cas afirmatiu, comporta aquest fet una millora en l'exactitud dels resultats estimats?

2.3.3 Disseny de l'experiment

2.3.3.1 Utilitatge

Només necessitareu una mostra de mineral de la màxima puresa possible. Es recomana utilitzar un cos metàl·lic de forma regular, ja que així podreu calcular d'una forma especialment senzilla i precisa el volum, la qual cosa us comportarà un millor resultat. L'estructura atòmica d'aquests és, a més, molt més fàcil d'interpretar. Alguns composts amb estructura atòmica cúbica, com ara la galena, la blenda i la pirita ofereixen també uns resultats força notables. Es desaconsella utilitzar minerals amb estructures complicades, com ara, la calcita i el guix.

2.3.3.2 Procediments

1. Peseu el mineral per tal d'esbrinar la seva massa. Es recomana utilitzar una balança electrònica ja que d'aquesta manera obtindreu un bon nombre de xifres significatives.
2. Esbrineu el volum que ocupa el mineral. Us proposem dos mètodes: un de ideat per a cossos amb forma irregular i un altre per a cossos regulars:

Cossos irregulars

Aquest primer mètode està basat en l'anomenat Principi d'Arquímedes, que afirma que "Tot cos submergit en un fluid experimenta una empenta vertical i cap a la superfície igual al pes del fluid que ha desplaçat". El nostre objectiu serà esbrinar el pes del fluid desplaçat i amb aquest, sabent que la massa de l'aigua és 1g/cm^3 , podrem esbrinar el volum del mineral.

Aquest mètode requerirà els estris següents:

- Dos recipients, recomanable de plàstic. Un ha de ser prou gran perquè el mineral es pugui submergir en ell, i l'altre ha de ser més gran que el primer, de manera que es pugui col·locar l'interior d'aquest.
- Comptagotes
- Balança electrònica
- Provena

Els passos que cal seguir, son, llavors, els següents:

- 1) Poseu el recipient petit a l'interior del recipient gran.
- 2) Ompliu el recipient petit amb aigua fins a assolir la seva capacitat màxima, assegurant-vos, fins i tot amb el comptagotes que no es possible afegir-hi ni una gota més. En cas de que, per accident, es vessi una quantitat considerable d'aigua a l'interior del segon recipient, aquest s'hauria de tornar a buidar completament.
- 3) Dipositeu, amb molta cura per tals d'evitar que escatxiu, el mineral a l'interior del recipient petit. Si aquest està fet d'un material fràgil, com ara, de vidre, hauríeu de procurar de lligar la mostra a un fil per tal de fer que la caiguda sigui el més suau possible i evitar el trencament del recipient.

- 4) Retireu el primer recipient de l'interior del segon, tot evitant de nou que es vessi la més mínima quantitat d'aigua.
- 5) Enceneu la balança electrònica, posant-hi una proveta a sobre i pressioneu la tecla Tara. Aboqueu l'aigua del recipient gran a l'interior de la proveta. La balança marcarà el pes del fluid desplaçat. Com que la densitat de l'aigua és 1g/cm^3 , aquest serà igual al seu volum. Tal i com enuncia el Principi d'Arquímedes, aquest volum desplaçat serà igual al volum del mineral.

Cossos regulars

Aquest mètode té un caràcter més senzill que l'anterior, tot i que ahora és també més precís i eficaç. Consisteix, únicament, en esbrinar el volum a partir de formules geomètriques; el volum és igual a l'àrea de la base multiplicada per l'altura. Aquest mètode només requereix un peu de rei.

3. Calculeu la constant d'Avogadro. A la pàgina següent trobareu un exemple resolt.

Exemple d'aplicació del mètode

La forma més senzilla d'entendre aquest mètode és realitzar els càlculs un mateix i, un cop fet això, la part teòrica s'assimila de forma gairebé automàtica. A continuació, calcularem la constant d'Avogadro a partir d'una mostra de mineral de blenda i de les dades experimentals que nosaltres mateixos vam obtenir. L'espècie estudiada serà el zinc. Primerament calcularem el nombre de mols a la mostra, que és el pas més senzill, i després el nombre d'àtoms.

Mols de zinc a la mostra

Massa de la mostra: 89,27g

$$89,27\text{g de blenda}(\text{ZnS}) \times \frac{1\text{ mol de blenda}(\text{ZnS})}{97,445\text{g de blenda}(\text{ZnS})} \times \frac{1\text{ mol de zinc}(\text{Zn})}{1\text{ mol de blenda}(\text{ZnS})} = \mathbf{0,916\text{ mols de zinc}}$$

Partícules de zinc a la mostra

- Volum de la mostra: $20\text{cm}^3 = 2 \times 10^{-5}\text{m}^3$
- Longitud arestes cel·la unitat: $0,541\text{nm}$
- Volum cel·la unitat: $0,158\text{nm}^3 = 1,583 \times 10^{-28}\text{m}^3$
- Àtoms de zinc a la cel·la unitat: 4

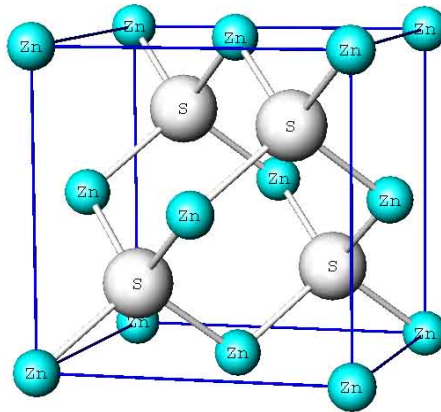




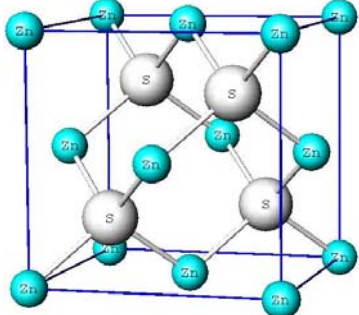
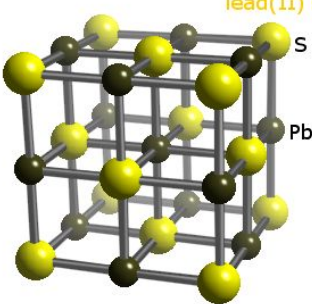
Figura 38: Estructura cristal·lina del sulfur de zinc.

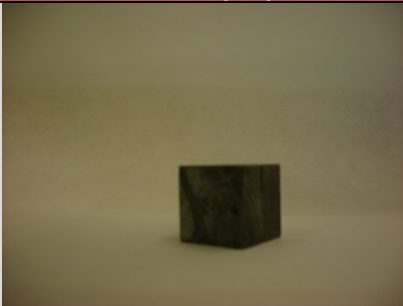
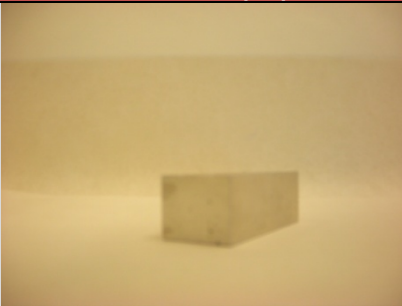
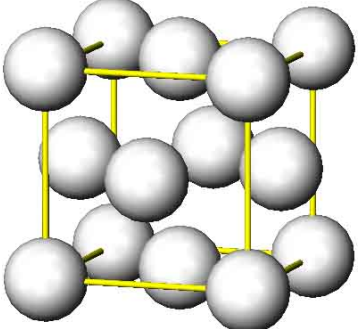
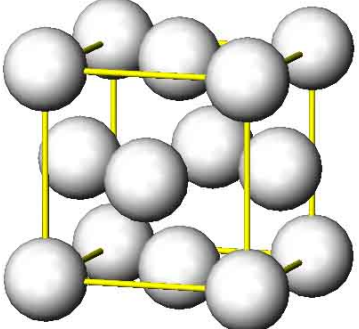
| Nombre de punts als vèrtexs | Nombre de punts a les cares | Nombre de punts al centre del cub | Total |
|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|-------|
| $8 \times \frac{1}{8}$ | $6 \times \frac{1}{2}$ | 0 | 4 |



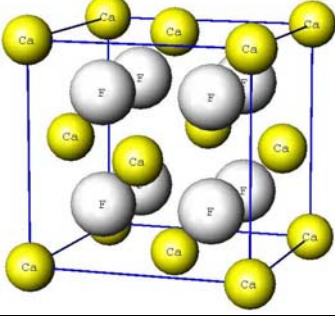
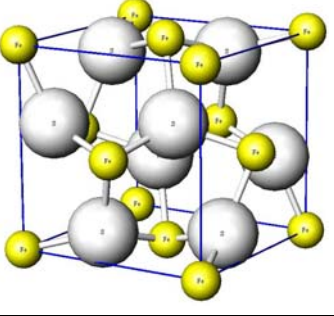
$$2 \times 10^{-5}\text{m}^3 \times \frac{1\text{ cel·la unitat}}{1,583 \times 10^{-28}\text{m}^3} \times \frac{4\text{ àtoms de zinc}}{1\text{ cel·la unitat}} = \mathbf{5,05 \times 10^{23}\text{ àtoms de zinc}}$$



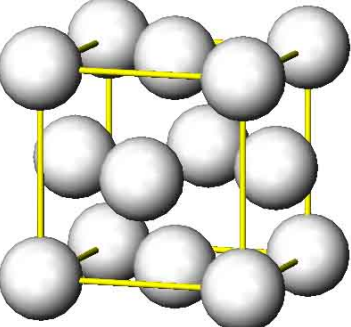
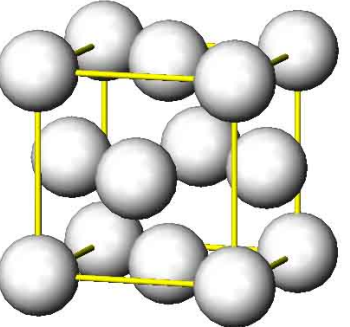
$$N_A = \frac{5,05 \times 10^{23}\text{ àtoms de zinc}}{0,916\text{ mols de zinc}} = \mathbf{5,5 \times 10^{23}}$$

4.3.4 Resultats obtinguts

| Blenda (ZnS) | | Galena (PbS) | |
|---|----------------------|--|-----------------------|
|  | |  | |
|  | |  | |
| Volum: 20cm ³ | Massa: 89,27g | Volum: 10cm ³ | Massa: 73,93g |
| Sistema cristal·lí: cúbic | Massa molar: 97,445g | Sistema cristal·lí: cúbic | Massa molar: 239,265g |
| Longitud aresta: 0,541nm | | Longitud aresta: 0,5936nm | |
| Volum cel·la unitat: 0,158nm ³ | | Volum cel·la unitat: 0,209nm ³ | |
| N_A = 5,5 x 10²³ | | N_A = 6,2 x 10²³ | |

| Ferro (Fe) | | Alumini (Al) | |
|---|----------------------|--|---------------------|
|  | |  | |
|  | |  | |
| Volum: 11,39cm ³ | Massa: 86,96g | Volum: 28,07cm ³ | Massa: 76,11g |
| Sistema cristal·lí: cúbic centrat a les cares | Massa molar: 55,845g | Sistema cristal·lí: cúbic centrat a les cares | Massa molar: 26,98g |
| Longitud aresta: 288,4pm | | Longitud aresta: 404,95pm | |
| Volum cel·la unitat: 2,40 x 10 ⁻²⁹ m ³ | | Volum cel·la unitat: 6,64 x 10 ⁻²⁹ m ³ | |
| N_A = 6,10 x 10²³ | | N_A = 5,98 x 10²³ | |

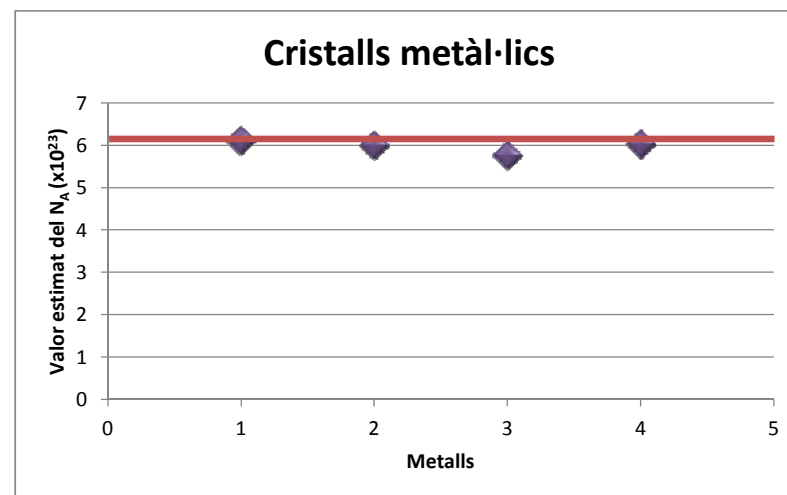
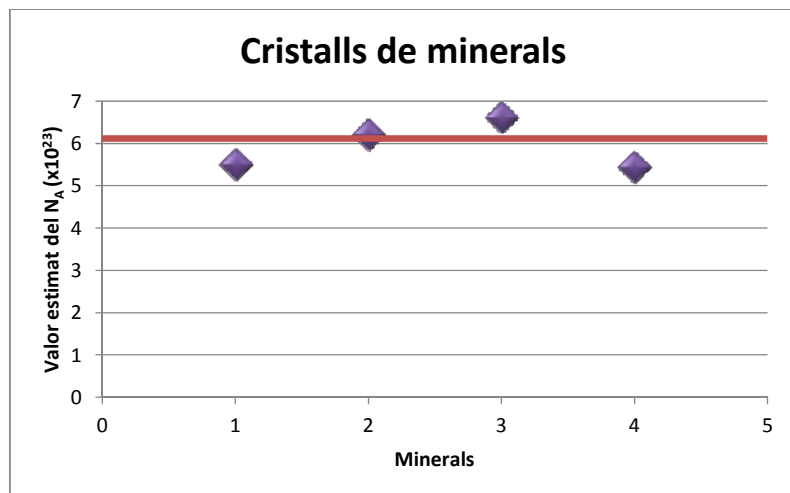
| Fluorita (CaF ₂) | | Pirita (FeS ₂) | |
|---|----------------------|--|-----------------------|
|  | |  | |
|  | |  | |
| Volum: 122,46cm ³ | Massa: 353,79g | Volum: 66,48cm ³ | Massa: 358,06g |
| Sistema cristal·lí: cúbic | Massa molar: 78,075g | Sistema cristal·lí: cúbic | Massa molar: 119,975g |
| Longitud aresta: 5,4626Å | | Longitud aresta: 5,417Å | |
| Volum cel·la unitat: 163,0Å ³ | | Volum cel·la unitat: 159,0Å ³ | |
| N_A = 6,60 x 10²³ | | N_A = 5,43 x 10²³ | |

| Plom (Pb) | | Plata (Ag) | |
|---|---------------------|--|----------------------|
|  | |  | |
|  | |  | |
| Volum: 17,54cm ³ | Massa: 208,5g | Volum: 1,71 cm ³ | Massa: 18,03g |
| Sistema cristal·lí: cúbic centrat a les cares | Massa molar: 207,2g | Sistema cristal·lí: cúbic centrat a les cares | Massa molar: 107,87g |
| Longitud aresta: 495pm | | Longitud aresta: 408,626pm | |
| Volum cel·la unitat: 1,21 x 10 ⁻²⁸ m ³ | | Volum cel·la unitat: 6,82 x 10 ⁻²⁹ m ³ | |
| N_A = 5,74 x 10²³ | | N_A = 6,01 x 10²³ | |

ANÀLISI DELS RESULTATS

A continuació us presentem dues gràfiques en les quals podeu apreciar la qualitat dels resultats dels nostres experiments. A sota d'ells podeu veure diverses dades estadístiques que ajuden a un millor valoració d'aquests. A l'annex número 2 d'aquest treball de recerca trobareu un petit informe que explica la naturalesa del tractament estadístic realitzat.

Les dues gràfiques evidencien que l'anàlisi d'elements metàl·lics permet obtenir uns resultats més precisos i exactes.

LLEGENDA

- Mineral 1: Blenda
- Mineral 2: Galena
- Mineral 3: Fluorita
- Mineral 4: Pirita

— Valor real de la constant

DADES ESTADÍSTIQUES

- Mitjana aritmètica: $5,93 \times 10^{23}$
- Error relatiu: 1,5%

Interval de confiança (Grau de confiança del 95%)

[$5,44 \times 10^{23}$, $6,41 \times 10^{23}$]

DADES ESTADÍSTIQUES

- Mitjana aritmètica: $5,96 \times 10^{23}$
- Error relatiu: 1%

Interval de confiança (Grau de confiança del 95%)

[$5,89 \times 10^{23}$, $6,03 \times 10^{23}$]

LLEGENDA

- Metall 1: Ferro
- Metall 2: Alumini
- Metall 3: Plom
- Metall 4: Plata

— Valor real de la constant

2.3.6 Conclusions de l'experiment

En aquest darrer apartat, es respondrà, d'una manera breu i directa, a les preguntes que ens varem plantejar a l'inici d'aquesta pràctica. D'aquesta manera, pretenem treure algunes conclusions que permetin millorar el nostre disseny experimental.

Objectiu principal

- Quins són els límits de l'interval que recull els valors estimats de la constant d'Avogadro amb un grau de confiança del 95% per a les estimacions realitzades a partir de composts minerals i d'elements metàl·lics? Quin és l'error relatiu comès a cada estimació?

Cristalls de minerals

| Mineral | Blenda (ZnS) | Galena (PbS) | Fluorita (CaF ₂) | Pirita (FeS ₂) |
|------------------------------|----------------------|----------------------|------------------------------|----------------------------|
| Valor N _A estimat | 5,5x10 ²³ | 6,2x10 ²³ | 6,6x10 ²³ | 5,43x10 ²³ |
| Error relatiu | 8,64% | 2,99% | 9,63% | 9,90% |

- Interval de confiança: [5'44x10²³, 6'41x10²³]
- Error relatiu: 1,5%

Cristalls metàl·lics

| Mineral | Ferro (Fe) | Alumini (Al) | Plom (Pb) | Plata (Ag) |
|------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Valor N _A estimat | 6,10x10 ²³ | 5,98x10 ²³ | 5,74x10 ²³ | 6,01x10 ²³ |
| Error relatiu | 1,33% | 0,66% | 4,65% | 0,17% |

- Interval de confiança: [5'89x10²³, 6'03x10²³]
- Error relatiu: 1,0%

Observació: A diferència del que succeeix amb els cristalls metàl·lics, per tals d'aconseguir realitzar una estimació precisa de la constant d'Avogadro amb cristalls de minerals, és necessari fer més d'una prova.

Objectius secundaris

- És cert que la puresa de les mostres d'elements metàl·lics és superior a la dels altres minerals? En cas afirmatiu, comporta aquest fet una millora en la precisió dels resultats de les estimacions?

Com que determinar experimentalment la puresa de cada mostra estudiada seria una tasca massa laboriosa, el que farem serà comparar el valor real de les densitats dels composts i dels elements amb les de les mostres utilitzades. Aquesta valoració serà, doncs, de tipus més aviat qualitatiu –que la densitat real del compost coincideixi exactament amb la de la mostra no vol dir que sigui pura, ja que, per exemple, la densitat d'una cadira de fusta podria coincidir amb la de l'alumini.

Cristalls de minerals

| Tipus de mineral | Densitat del mineral (g/cm ³) | Densitat de la mostra (g/cm ³) | $\frac{\text{densitat mostra} - \text{densitat mineral}}{\text{densitat mineral}} \times 100$ |
|------------------------------|---|--|---|
| Blenda (ZnS) | 4,0 | 4,5 | 11,56 |
| Galena (PbS) | 7,6 | 7,4 | 2,63 |
| Fluorita (CaF ₂) | 3,2 | 2,9 | 9,38 |
| Pirita (FeS ₂) | 5,0 | 5,4 | 8,00 |

Cristalls metàl·lics

| Tipus de mineral | Densitat del mineral (g/cm ³) | Densitat de la mostra (g/cm ³) | $\frac{\text{densitat mostra} - \text{densitat mineral}}{\text{densitat mineral}} \times 100$ |
|------------------|---|--|---|
| Ferro (Fe) | 7,87 | 7,63 | 2,99 |
| Alumini (Al) | 2,70 | 2,71 | 0,42 |
| Plom (Pb) | 11,34 | 11,89 | 4,82 |
| Plata (Ag) | 10,49 | 10,54 | 0,51 |

A nivell qualitatiu, doncs, es pot observar com els resultats són més precisos com major és la puresa de la mostra, la qual cosa té lògica perquè en el nostre raonament teòrics ja havíem establert que aquesta havia de ser la major possible. Es recomana, doncs, utilitzar mostres d'elements metàl·lics amb forma regular ja que, d'una banda, la mesura del seu volum serà més exacta i precisa i, d'altra banda, no és difícil trobar mostres totalment pures. Aquests dos factors influeixen molt positivament en les estimacions de la constant d'Avogadro.

EXPERIMENT 4

2.4 Determinació experimental de la constant d'Avogadro a partir de l'estudi del moviment brownià

2.4.1 Raonaments teòrics

La base teòrica d'aquest mètode per determinar la constant d'Avogadro radica en un estudi realitzat per Albert Einstein sobre un fenomen anomenat moviment brownià. L'any 1785, Jan Ingenhousz, un metge i botànic britànic d'origen neerlandès va observar que, al abocar partícules de carbó sobre un recipient ple d'alcohol, aquestes començaven a desplaçar-se de manera aleatòria sobre la superfície d'aquest líquid. El descobriment d'aquest curiós fenomen, però, s'atribueix al botànic escocès Robert Brown, qui a l'any 1827, va observar exactament el mateix fenomen al deixar caure diversos grans de pol·len sobre d'una gota d'aigua. Aquest fenomen es va anomenar moviment brownià en el seu honor. Durant dècades, la comunitat científica va mostrar-se incapaç de donar una explicació al moviment brownià, tot i que és cert que mai se li va donar gaire importància.

L'any 1905, Albert Einstein va publicar tres articles importantíssims per a la història de la ciència, raó per la qual aquest any és conegut amb el nom d'annus mirabilis ("any meravellós" o "any del miracles", en llatí). El primer d'aquests articles estudiava l'efecte fotoelèctric, el segon va donar una explicació al moviment brownià i en el tercer es formulà la teoria de la relativitat. El primer i el tercer ràpidament eclipsaren al segon a causa de la seva rellevància. Irònicament, l'únic d'aquests articles que resulta rellevant per a aquest treball és el segon article.

Einstein va estudiar el moviment brownià com si es tractés d'un cas de pressió osmòtica a nivell molecular i, combinant la llei de difusió de Stokes amb l'equació de Van't Hoff sobre l'extensió dels gasos ideals amb els treballs de mecànica estadística de Maxwell, va deduir, mitjançant procediments matemàtics força complexos, la fórmula següent:

$$\lambda_x^2 = \frac{t}{N_A} \left(\frac{RT}{3\pi kP} \right)$$

| | |
|---|--|
| } | <ul style="list-style-type: none"> λ_x: distància recorreguda per la partícula t: temps N_A: número d'Avogadro R: constant Universal dels gasos T: temperatura K: viscositat del líquid P: radi de la partícula |
|---|--|

Val a dir que Einstein no va comprovar experimentalment la validesa de la seva fórmula, sinó que va deixar aquesta tasca per a altres científics. Al darrer apartat del seu article, Einstein va manifestar el seu interès per aquesta demostració experimental ja que considerava que, a part de resoldre el que havia estat un enigma per a la comunitat científica durant moltes dècades, s'aconseguiria demostrar de manera definitiva la validesa de la teoria cinètica.

Només tres anys després, Jean Perrin va aconseguir dissenyar un experiment amb el qual va obtenir experimentalment les dades requerides per l'equació d'Einstein i així va dur a terme la que es considera com la primera determinació satisfactòria del valor de la constant d'Avogadro. Perrin va desenvolupar unes tècniques que li van permetre fabricar unes esferes molt petites i de mida uniforme a partir de resina vegetal. Observant el comportament d'aquestes partícules a través d'un microscopi òptic va poder determinar el seu radi (P) i la distància recorreguda (λ_x) en la unitat de temps (t). També va mesurar la temperatura ambiental (T). Així doncs, com que el valor de la constant universal dels gasos (R) ja havia estat calculat i la viscositat del líquid

(k), la qual és en funció de la temperatura, estava tabulada, va poder estimar el valor de número d'Avogadro resolent l'equació:

$$N_A = \frac{t}{\lambda_x^2} \left(\frac{RT}{3\pi kP} \right)$$

Les dades que caldrà determinar experimentalment seran, doncs, la temperatura ambiental, el radi de la partícula estudiada i la distància recorreguda per aquesta en un interval de temps que nosaltres designarem. Ja coneixem els valors de la constant dels gasos i de la viscositat (aquesta varia en funció de la temperatura, consulteu l'annex número 4).

Tal i com ja s'ha indicat, Perrin va calcular el valor de la constant d'Avogadro a partir de l'estudi del moviment brownià que descriuen diverses partícules de plàstic que el mateix va sintetitzar. Va realitzar l'experiment diverses vegades amb partícules de diferents components i de diferents mides. A continuació, us presentem uns resultats parcials dels experiments de Perrin. La figura següent mostra les trajectòries seguides per tres partícules diferents. Trobareu més detalls al peu de la imatge. La temperatura ambient durant la realització de l'experiment era de 17°C.

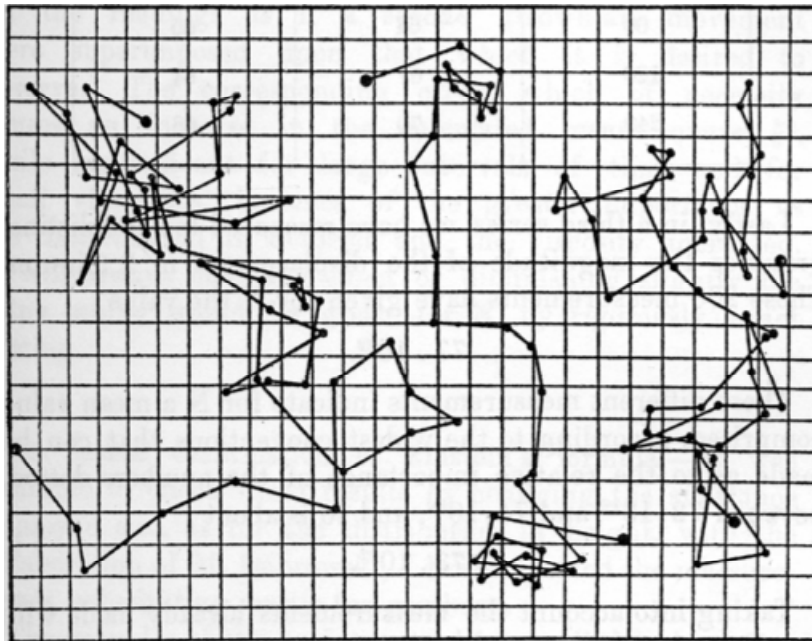


Figura 39: Resultats original de l'experiment que Perrin realitzà al 1915. Podeu observar la trajectòria de tres partícules de radi 0'52 μm que es mouen descrivint un moviment brownià. Els punts assenyalen la posició de cada partícula a la fi de cada interval de 30 segons. 1 cm de la imatge equival a 0'0003125cm reals. Imatge original de Perrin (1915).

Anàlisi del desplaçament de les partícules (de la figura 39)

| Núm. de segment | Distància recorreguda a la imatge (mm) | Distància real recorreguda (cm) |
|-----------------|--|---------------------------------|
| 1 | 38 | $12,3 \times 10^{-4}$ |
| 2 | 20 | $6,5 \times 10^{-4}$ |
| 3 | 16 | $5,2 \times 10^{-4}$ |
| 4 | 18 | $5,8 \times 10^{-4}$ |
| 5 | 32 | $10,4 \times 10^{-4}$ |
| 6 | 10 | $3,2 \times 10^{-4}$ |
| 7 | 14 | $4,5 \times 10^{-4}$ |
| 8 | 12 | $3,9 \times 10^{-4}$ |
| 9 | 18 | $5,8 \times 10^{-4}$ |
| 10 | 12 | $3,9 \times 10^{-4}$ |
| 11 | 23 | $7,5 \times 10^{-4}$ |
| 12 | 32 | $10,4 \times 10^{-4}$ |
| 13 | 5 | $1,6 \times 10^{-4}$ |
| 14 | 24 | $7,8 \times 10^{-4}$ |
| 15 | 14 | $4,5 \times 10^{-4}$ |

| Núm. de segment | Distància recorreguda a la imatge (mm) | Distància real recorreguda (cm) |
|-----------------|--|---------------------------------|
| 16 | 10 | $3,2 \times 10^{-4}$ |
| 17 | 23 | $7,5 \times 10^{-4}$ |
| 18 | 21 | $10,4 \times 10^{-4}$ |
| 19 | 27 | $8,8 \times 10^{-4}$ |
| 20 | 11 | $3,6 \times 10^{-4}$ |
| 21 | 18 | $5,8 \times 10^{-4}$ |
| 22 | 16 | $5,2 \times 10^{-4}$ |
| 23 | 10 | $3,2 \times 10^{-4}$ |
| 24 | 7 | $2,3 \times 10^{-4}$ |
| 25 | 14 | $4,5 \times 10^{-4}$ |
| 26 | 8 | $2,6 \times 10^{-4}$ |
| 27 | 15 | $4,9 \times 10^{-4}$ |
| 28 | 11 | $3,6 \times 10^{-4}$ |
| 29 | 16 | $5,2 \times 10^{-4}$ |
| 30 | 32 | $10,4 \times 10^{-4}$ |

$$\overline{\Delta_{xy}^2} = 39,5 \times 10^{-8} \rightarrow \Delta_x^2 = 19,7 \times 10^{-8} \text{ (Es suposa que } \Delta_x \text{ i } \Delta_y \text{ són iguals)}$$

Les dues taules anteriors mostren les distàncies recorregudes per les partícules a cada interval. És important dir que per mesurar aquestes distàncies es va ampliar la mida de la imatge tres vegades.

Finalment, sabent totes les dades anteriors, Perrin va poder determinar el valor de la constant d'Avogadro:

$$N_A = \frac{t}{\lambda_x^2} \left(\frac{RT}{3\pi kP} \right) = \frac{30}{19,7 \times 10^{22}} \times \frac{8,314 \times 10^7 \times 290}{3\pi \times 0,011 \times 0,52 \times 10^{-4}} = 68,1 \times 10^{22}$$

2.4.2 Objectius de la pràctica

En les pàgines següents trobareu la memòria d'una pràctica que vam realitzar per tals de comprovar si realment els raonaments d'Einstein eren correctes i, en conseqüència, si es pot calcular la constant d'Avogadro a partir de la fórmula que Einstein enuncia. Naturalment, el disseny experimental d'aquesta pràctica és força semblant al que Jean Perrin ideà al 1915 –el qual ja s'ha descrit abans– ja que tots dos es fonamenten en la mateixa base teòrica. És important, però, destacar que hi ha algunes petites diferències: en comptes d'estudiar el comportament de partícules de resina, nosaltres observarem el comportament de determinades partícules de llet suspeses sobre una superfície aquosa. A més, nosaltres podrem fer ús d'un programari informàtic, del qual Perrin no disposava, que ens facilitarà la realització de l'experiment. També és important dir que en aquesta pràctica, a causa de la seva naturalesa, no aplicarem el mateix tractament estadístic que a les anteriors.

Al l'apartat Conclusions comparem els nostres resultats amb els de l'experiment original de Perrin per tals d'avaluar l'eficàcia del nostre disseny experimental.

En resum, doncs, **el nostre objectiu principal és:**

- Dur a terme aquesta pràctica al laboratori de l'institut i, a partir d'una sèrie de resultats experimentals, valorar l'eficàcia del mètode.

I els secundaris són:

- Esbrinar si realitzar l'estudi del moviment de la partícula de llet afecta d'alguna manera als resultats de l'experiment.
- Comparar els resultats del nostre experiment amb els que Jean Perrin va obtenir al 1915.

2.4.3 Disseny de l'experiment

2.4.3.1 Utilitatge

- Un microscopi òptic
- Aigua destil·lada
- Llet
- Portaobjectes i cobreobjectes
- Pipeta Pasteur
- Vas de precipitats
- Flascó rentador
- Esmalt d'ungles
- Ordinador amb el software Motic i Multilab (opcional) instal·lats
- Opcional: paper de ceba, regla i llapis i goma

2.4.3.2 Procediments - Part I: gravació del vídeo

1. Mesureu i anoteu la temperatura ambiental.
2. Prepareu una dissolució d'aigua destil·lada amb llet al 0'2%. L'aigua ha d'actuar com a dissolvent i la llet com a solut.
3. Mitjançant una pipeta Pasteur, agafeu una mostra de la dissolució i deixeu caure una o dues gotes sobre un vidre portaobjectes. Seguidament, col·loqueu-hi un vidre cobreobjectes a sobre. S'ha de procurar que no quedin bosses d'aire atrapades entre els dos vidres. Per evitar que això passi, el vidre cobreobjectes s'ha de deixar caure de cop sobre el portaobjectes. Finalment, segelleu, utilitzant el esmalt d'ungles, la mostra (apliqueu-lo als extrems del vidre cobreobjectes).
4. Ara ja podeu observar amb el microscopi òptic la mostra que heu preparat al pas anterior. Si no esteu familiaritzats amb l'ús d'aquesta eina, podeu consultar el protocol següent, que és l'habitual per observar mostres amb aquest tipus de microscopi. Si hi ha alguna paraula tècnica que es refereix a una peça concreta del microscopi òptic que no coneixeu, podeu consultar també l'annex número d'aquest treball.
 1. Col·loqueu la mostra al centre de la platina i fixeu-la amb les pinces.
 2. Enceneu la font de llum.
 3. Seleccioneu primer l'objectiu de menor nombre d'augment. Com que la mostra és només una gota d'aigua, hauríeu de desplaçar la platina fins a col·locar un dels costats del portaobjectes sota el punt de mira del microscopi. Mitjançant el cargol macromètric, enfoqueu la imatge el millor possible. Per acabar d'enfocar encara millor la imatge, utilitzeu el cargol micromètric.
 4. Un cop hagueu enfocat bé la imatge amb l'objectiu de menor nombre d'augment, canvieu-lo per un altre de major i de nou, en cas de que sigui necessari, enfoqueu la imatge amb els dos cargols.
 5. Repetiu el pas anterior fins a que vegeu la mostra amb objectius de 40 o bé 100 augment (recordeu que els oculars dels microscopis normalment augmenten les

imatges transmeses per aquests 10 vegades més). Cadascun dels objectius ofereix un avantatge i un desavantatge: l'objectiu de 40 augments permet estudiar amb més facilitat el moviment de la partícula –ja és més probable que aquesta no surti del camp de visió del microscopi– però per contra dificulta realitzar una bona medició del radi de la partícula, la qual cosa comporta un error important. L'objectiu de 100 augments comporta justament el contrari. En resum, l'objectiu de 40 augments facilita la realització de la pràctica, però probablement afectarà negativament al resultat de l'experiment. L'objectiu de 100 augments, per contra, oferirà millors resultats, però l'obtenció d'un bon vídeo a partir del qual treballar serà una tasca força difícil.

6. Ara que teniu la imatge ben enfocada, desplaçeu de nou la platina fins a que pugueu observar uns puntets negres movent-se aleatòriament en totes les direccions. Aquest fenomen que podeu observar és el Moviment Brownià.
5. Per estudiar el Moviment Brownià i determinar el valor de la constant d'Avogadro a partir d'ell, haureu de gravar un vídeo. Per fer-ho és recomana utilitzar un programa informàtic anomenat Motic. A continuació es descriuen els passos que cal seguir per fer-ho:
1. Obriu el programa Motic i preneu la icona Captura, situada a la part superior central de la pantalla. A continuació s'obrirà una nova finestra.
 2. Veureu que la nova finestra presenta quatre pestanyes a la part esquerra de la pantalla. Tres d'aquestes pestanyes serveixen per configurar la imatge –feu primer totes les configuracions que considereu necessàries– i la quarta permet capturar imatges i fer vídeos. Quant ja hagueu configurat la imatge i tingueu a la pantalla a diverses partícules que es mouen descrivint un moviment brownià, preneu la icona Gravar. Com més llarga sigui la durada del vídeo, majors seran les probabilitats d'obtenir un bon resultat. El que acostuma a passar, però, és que la partícula surt del camp del microscopi, la qual cosa fa que s'hagi d'aturar l'enregistrament.


2.4.3.2 Procediments - Part II: anàlisi del vídeo



A continuació us proposem dues maneres diferents d'analitzar el vídeo que acabeu d'enregistrar. Tal i com és d'esperar, cadascun d'aquests comporta un avantatge i un desavantatge: el primer que us proposarem permet analitzar el vídeo d'una manera ràpida i senzilla, però és força probable que els seus resultats no siguin tan bons com els que garanteix el segon.

Mètode senzill

1. Obriu el vídeo amb el programa Reproductor de Windows Media i visualitzeu-lo a pantalla completa. A cada cert període de temps –com més llargs, millor– preneu la tecla Imprimir Pantalla i imprimeu la imatge. Procureu mantindre l'escala inicial.
2. Un cop tingueu les imatges impreses, preneu una fulla de paper de ceba i dibuixeu-hi la trajectòria descrita per la partícula.
3. Mesureu i anoteu les distàncies recorregudes per la partícula a cada interval de temps i el radi de la partícula de llet. Amb aquesta dada, ja tindreu totes les necessàries per calcular la constant d'Avogadro. Més endavant s'explicarà com fer-ho.

Mètode matemàtic

1. Executeu el programa informàtic anomenat Multilab.
2. Preneu la pestanya Anàlisi de vídeo () situada a la part superior de la pantalla, després obriu la icona Obrir arxiu de vídeo i seleccioneu aquell que heu enregistrat anteriorment.

- Preneu de nou sobre la pestanya Anàlisi de vídeo i seleccioneu la icona Escala () i establiu-la. Es recomana, per tal de treballar amb unes xifres més còmodes, indicar al programa el valor de la mida aparent i no la real.
- Preneu, aquest cop per darrera vegada, la pestanya Anàlisi de vídeo i seleccioneu l'icona Establir origen (). Col·loqueu l'eix d'ordenades sobre la partícula de llet que estudiareu.
- Feu clic sobre la partícula de llet. Com podeu veure, a la part esquerra de la pantalla s'indica la posició (x,y) de la partícula en aquell moment determinat. La posició de la partícula de llet i la unitat de temps també han variat. Repetiu el procés fins a que el vídeo s'acabi.
- Ara heu d'esbrinar les distàncies recorregudes per la partícula durant cada interval de temps. Per fer-ho, heu d'utilitzar les dades de la taula que heu obtingut i la fórmula següent:

$$\vec{AB} = B(x, y) - A(x_0, y_0)$$

\vec{AB} : vector de l'espai recorregut en l'interval de temps.
 $B(x, y)$: posició final de la partícula.
 $A(x_0, y_0)$: posició inicial de la partícula.

$$d = |\vec{AB}|$$

d : distància recorreguda per la partícula.
 $|\vec{AB}|$: Mòdul del vector (suma dels seus components elevats al quadrat).

Per mesurar el radi de la partícula, hauríeu de fer una captura de la imatge del monitor i imprimir-la a escala real. Mitjançant un regle podreu determinar el radi de la partícula de la imatge i, sabent-ne el nombre d'augments, podreu esbrinar el seu valor real.

Si heu seguit tots els passos anteriors correctament, ara hauríeu de ser capaços d'emplenar la taula següent i estimar el valor de la constant d'Avogadro amb aquestes dades. A la pàgina següent, trobareu un exemple, el qual inclou dades obtingudes al laboratori del nostre institut, de com fer-ho. Es recomana especialment consultar-lo, ja que hi ha un pas que no s'ha matisat prou.

| Durada del interval de temps (s) | Variació real de posició mitjana (cm) | Radi real de la partícula estudiada (cm) | Temperatura ambiental (°K) |
|----------------------------------|---------------------------------------|--|----------------------------|
| | | | |

Exemple d'aplicació del mètode

L'experiment va tenir una durada de 60 segons. La temperatura ambiental era de 20°C. El vídeo va ser gravat amb un microscopi òptic de 1000 augments. Per a l'anàlisi es va mesurar la distància recorreguda per la partícula de llet en cada interval de 20 segons.

Distància recorreguda per la partícula

| Interval | Δ_{xy} imatge (cm) | $(\Delta_{xy} \text{imatge [cm]})^2$ |
|----------|---------------------------|--------------------------------------|
| 1 | 1,2 | 1,44 |
| 2 | 1,0 | 1,0 |
| 3 | 1,0 | 1,0 |

$$\bar{x} = 1,0(7) \text{ cm}$$

MESURES DE DISPERSIÓ

$$\text{Var}(x) = 0,008836$$

$$\sigma_x = 0,094$$

$$\bar{\lambda} = 1,0(7) \text{ cm imatge} \times \frac{1 \text{ cm mida real}}{1000 \text{ cm imatge}} = 0,00107 \text{ cm}$$

Nota important: aquesta distància és la recorreguda tant pel eix X com pel eix Y. La fórmula de moviment brownià està ideada per estudiar el moviment d'una partícula en una única direcció. Per solucionar aquest problema, s'ha d'aplicar el càlcul següent:

$$\lambda_x^2 = \frac{1}{2} \lambda^2 = \frac{0,00107^2}{2} = 0,00000057$$

Radi de la partícula

| Diàmetre partícula a la imatge (cm) | Diàmetre real de la partícula (cm) | Radi real de la partícula (cm) |
|-------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|
| 0,3 | 0,0003 | 0,00015 |

Estimació del número d'Avogadro

Substituint els paràmetres de la fórmula inicial per les dades obtingudes durant la realització de l'experiment, s'obté un valor estimat de la constant d'Avogadro.

$$N_A = \frac{t}{\lambda_x^2} \times \left(\frac{RT}{3\pi kP} \right) \rightarrow N_A = \frac{20}{0,00000057} \times \left(\frac{8,314 \times 10^7 \times [273 + 20]}{3\pi \times 0,01002 \times 0,00015} \right) = 6,0(3) \times 10^{22}$$

2.4.4 Resultats obtinguts

A continuació us presentem els resultats obtinguts. Adjunt a aquest treball de recerca trobareu un DVD amb els dos vídeos que vam gravar al laboratori de l'institut i a partir dels quals varem obtenir les dades experimentals que apareixen en les tres taules següents. El enregistraments números 1 i 2 es corresponen amb el vídeo titulat TDR Moviment Brownià 22 °C, mentre que l'enregistrament Número 3 es correspon amb l'altre vídeo, titulat TDR Moviment Brownià 20 °C.

| Enregistrament número 1 | |
|--|----------------------|
| Temperatura ambiental (°C) | 22 |
| Durada del interval (s) | 5 |
| Desplaçament mitjà real de la partícula en l'eix XY (cm) | 0,00325 |
| Radi real de la partícula (cm) | 0,00009(375) |
| Nombre d'augmentos | 400 |
| Valor estimat N_A | $2,8 \times 10^{21}$ |

| Enregistrament número 2 | |
|--|----------------------|
| Temperatura ambiental (°C) | 22 |
| Durada del interval (s) | 5 |
| Desplaçament mitjà real de la partícula en l'eix XY (cm) | 0,00365 |
| Radi real de la partícula (cm) | 0,00009(375) |
| Nombre d'augmentos | 400 |
| Valor estimat N_A | $2,2 \times 10^{21}$ |

| Enregistrament número 3 | |
|--|----------------------|
| Temperatura ambiental (°C) | 20 |
| Durada del interval (s) | 20 |
| Desplaçament mitjà real de la partícula en l'eix XY (cm) | 0,00107 |
| Radi real de la partícula (cm) | 0,0001(5) |
| Nombre d'augmentos | 1000 |
| Valor estimat N_A | $6,0 \times 10^{22}$ |

Els resultats obtinguts són massa dolents com per aplicar el tractament estadístic habitual.

2.4.6 Conclusions de l'experiment

En aquest darrer apartat es farà una petita valoració d'aquest mètode a partir de la nostres experiències. En conseqüència, s'intentarà esbrinar quina ha estat la causa dels mals resultats i es proposaran possibles solucions.

Objectiu principal

- **Dur a terme aquesta pràctica al laboratori de l'institut i, a partir d'una sèrie de resultats experimentals, valorar l'eficàcia del mètode.**

Els resultats obtinguts amb aquest mètode no són satisfactoris. Cap de les nostres estimacions ha arribat a assolir l'ordre de magnitud correcte. Val a dir que les nostres fonts bibliogràfiques assoleixen uns resultats molt millors, amb errors relatius inferiors al 15%. Aquest fet sembla indicar que el nostre disseny experimental té algunes deficiències. Més endavant analitzarem les possibles causes d'aquest fracàs.

Objectius secundaris

- **Esbrinar si realitzar l'estudi del moviment de la partícula de llet afecta d'alguna manera als resultats de l'experiment.**

Aquests són els resultats obtinguts:

| Número d'augments | 400 augmentes | | 1000 augmentes |
|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Valor N_A estimat | $2,8 \times 10^{21}$ | $2,2 \times 10^{21}$ | $6,0 \times 10^{22}$ |

Malgrat que cap de les estimacions realitzades pot ser considerada com a satisfactòria, es pot apreciar una millora significativa en els resultats del tercer enregistrament, el qual s'ha realitzat observant el moviment de la partícula de llet amb 1000 augmentes. Aquesta millora probablement hagi estat deguda a que, al utilitzar més augmentes, s'ha pogut determinar el radi de la partícula i el desplaçament d'aquesta amb una exactitud major. És important destacar, a més, que els intervals d'aquest enregistrament tenien una durada quatre vegades major que la dels intervals dels altres dos.

Així doncs, sembla ser que l'ús de més augmentes comporta una millora significativa dels resultats, ja que això facilita un registre exacte de les dades experimentals més importants.

- **Comparar els resultats del nostre experiment amb els que Jean Perrin va obtenir al 1915**

A diferència de nosaltres, Perrin va aconseguir fer estimacions força acurades del valor real de la constant d'Avogadro a partir de la fórmula del moviment brownià. La principal diferència entre el seu disseny experimental i el nostre és la durada total de l'enregistrament i dels intervals. Perrin també va ser capaç d'expressar el radi de la partícula amb una xifra significativa més que nosaltres, per la qual cosa és de suposar que disposava d'un mètode més exacte per mesurar tant el radi de la partícula com la distància recorreguda per aquesta.

Així doncs, aquests fets semblen confirmar les conclusions a les quals ja havíem arribat anteriorment: per aconseguir fer estimacions més exactes de la constant d'Avogadro a partir de l'estudi del moviment brownià caldria augmentar la durada dels intervals i aconseguir determinar amb més exactitud el radi de la partícula de llet. Malauradament, aquest dos problemes tenen solucions incompatibles: si volem augmentar la durada dels intervals hem de reduir el nombre d'augmentes del microscopi per tals d'augmentar el nostre camp de visió i, en conseqüència, reduir les probabilitats de la partícula de llet s'escapi, mentre que per determinar amb més exactitud el radi de la partícula, el que hem de fer és augmentar el nombre d'augmentes.

EXPERIMENT 5

2.5 Determinació experimental de la constant d'Avogadro a partir de l'estudi de capes monomoleculares d'àcids grassos

2.5.1 Raonaments teòrics

Abans de res, és important dir que els raonaments que utilitza aquest mètode són bàsicament estimacions i simplificacions i que, per tant, els resultats que aportarà tendiran a ser molt inexactes i imprecisos. De fet, es diu que aquest mètode, més que per fer una estimació del valor de la constant d'Avogadro, serveix per demostrar que aquest número té un grau de magnitud enorme.

El mètode és fonamenta en el caràcter amfipàtic de les molècules d'àcids grassos. Es diu que una molècula té un comportament amfipàtic quant presenta, en la seva estructura molecular, una part molt hidròfila i alhora una altra molt hidròfuga. Vegeu la figura següent:

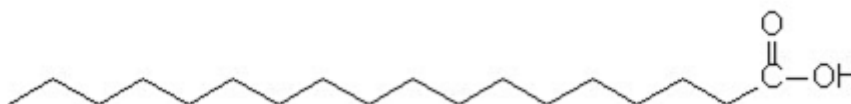


Figura 40: Estructura molecular de l'àcid esteàric, un exemple d'àcid gras.

Les molècules amfipàtiques per excel·lència són els àcids grassos. Els àcids grassos són un tipus de molècules lipídiques formades per una llarguíssima cadena hidrocarburada ($\text{CH}_3\text{--}[\text{CH}_2]_n\text{--}$) que presenta en un dels seus extrems un grup àcid (--COOH). Així doncs, la cadena llarga té un comportament hidròfug (i per tant, lipòfil) perquè és apolar. El grup àcid, per contra, és molt polar, i per tant, té un caràcter hidròfil. Els àcids grassos es classifiquen en saturats i insaturats, segons el tipus d'enllaços que presenten els àtoms de carboni: els saturats només presenten enllaços simples i els insaturats un o més enllaços dobles o triples.

Aquest mètode proposa deixar caure unes poques molècules d'un àcid gras dins d'un recipient ple d'aigua. El mètode preveu que les molècules d'àcid gras s'expandiran per la superfície de l'aigua formant una capa finíssima amb un gruix igual a la llargada d'una molècula. Vegeu la figura següent.

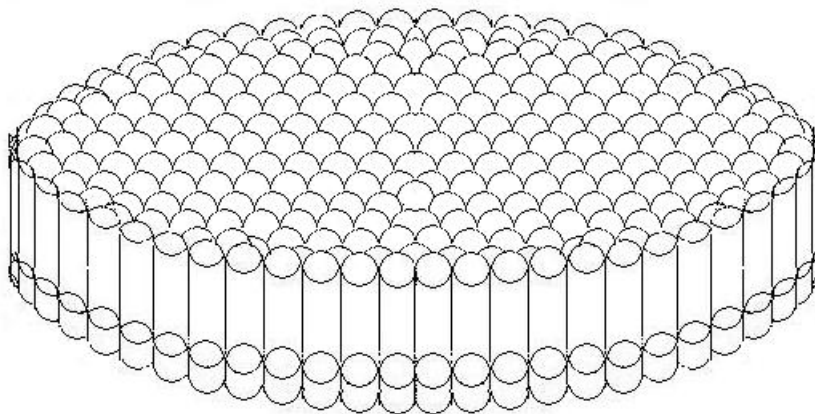


Figura 41: Distribució de les molècules d'un àcid gras en posar-se en contacte amb la superfície de l'aigua. Els grups àcids es posen en contacte amb les molècules d'aigua mentre que els àtoms de carboni intenten allunyar-se d'aquestes el màxim possible. També es formen ponts d'hidrogen entre les cadenes hidrocarbures.

El plantejament teòric d'aquest mètode requereix fer alguna cosa per tals d'evitar que les molècules de l'àcid gras s'acumulin les unes sobre les altres. Per aquesta raó, es recomana preparar una dissolució amb una concentració molt baixa d'un àcid gras qualsevol amb un líquid volàtil però alhora insoluble en aigua, com per exemple el pentà o l'hexà. També es pot utilitzar, tot i que és menys recomanable, alcohol solubles en aigua com l'etanol. D'aquesta manera, en posar-se en contacte amb l'aigua, les molècules del àcid gras s'estendran i no es col·locaran les unes sobre les altres, mentre que el dissolvent s'evaporarà al cap d'uns quants segons.

El que proposa aquest mètode per estimar la constant d'Avogadro consisteix en calcular el volum de les molècules que formen la monocapa. Sabent, doncs, el volum d'una molècula individual d'àcid gras i el volum que ocupa un mol d'aquest, es podrà esbrinar el valor del número d'Avogadro realitzant una simple regla de tres. En principi, aquest mètode es pot realitzar amb qualsevol àcid gras. Nosaltres hem utilitzat àcid esteàric, ja que el seu preu era força assequible. Aquest aspecte serà tractat amb detall més endavant.

1 àtom d'àcid gras → volum d'un àtom d'àcid gras
X àtoms d'àcid gras → volum d'un mol d'àcid gras

$$N_A = \frac{\text{volum}_{\text{mol d'àcid gras}}}{\text{volum}_{\text{àtom d'àcid gras}}}$$

La solució d'aquesta regla de tres indicarà el nombre d'àtoms de carboni que hi ha en un mol (el N_A).

La dada que cal determinar experimentalment és, doncs, el volum d'un àtom d'àcid gras. Com que la monocapa té, en principi, un espessor de només una molècula, el seu gruix serà igual a la longitud de la molècula. Aquesta dada, però, contínuament sent massa petita com per ser mesurada directament. El que recomana aquest mètode és calcular-la a partir de l'àrea i el volum de la monocapa. Vegeu l'expressió matemàtica següent.

$$\text{volum} = \text{àrea}_{\text{base}} \times \text{altura} \rightarrow \text{altura} = \frac{\text{volum}}{\text{àrea}_{\text{base}}}$$

Per esbrinar l'àrea de la monocapa, el mètode proposa suposar que la taca d'àcid esteàric és totalment circular i mesurar-ne el radi. L'àrea serà igual a aquest radi elevat al quadrat i multiplicat per π . La millor manera de determinar el volum d'àcid esteàric abocat a la superfície és mitjançant el factor de conversió següent:

$$\text{Número de gotes de dissolució abocades} \times \frac{1 \text{ cm}^3 \text{ de dissolució}}{? \text{ gotes de dissolució}} \times \frac{? \text{ g d'àcid esteàric}}{1 \text{ cm}^3 \text{ dissolució}} \times \frac{1 \text{ cm}^3 \text{ d'àcid esteàric}}{? \text{ g d'àcid esteàric}}$$

Per tal d'aconseguir els millors resultats possibles, hauríeu de procurar obtenir experimentalment tots els paràmetres del factor de conversió anterior. La primera fracció del factor es correspon amb la concentració de la dissolució; la segona, amb la densitat de la dissolució, i la tercera, amb la densitat de l'àcid esteàric.

Finalment, ja podeu calcular el valor de la constant d'Avogadro. El que heu de fer a continuació és seguir els raonaments que hem fet fins aquí a la inversa: a partir del volum i de l'àrea de la monocapa, calculeu en seu espessor o alçada. Com ja sabeu, aquest espessor és igual a la longitud de la molècula de l'àcid gras empleat. Ara suposeu que aquesta molècula té forma esfèrica o cúbica (aquest aspecte també serà estudiat amb més detall més endavant) i calculeu-ne el volum. Finalment, dividiu el volum d'un mol d'àcid gras (aquest es determina a partir de la massa molar i de la densitat de l'àcid gras) entre el d'un àtom per obtenir el valor estimat de la constant d'Avogadro. Vegeu les expressions matemàtiques següents:

$$N_A = \frac{\text{volum}_{\text{mol d'acid gras}}}{\text{volum}_{\text{àtom d'acid gras}}} \left\{ \begin{array}{l} \text{volum}_{\text{mol d'acid gras}} = \text{massa molar} \times \text{densitat} \\ \text{volum}_{\text{àtom d'acid gras}} = \left(\frac{\text{volum}_{\text{monocapa}}}{\text{àrea}_{\text{monocapa}}} \right)^3 \text{ o bé } \frac{4}{3} \pi \times \left(\frac{\text{volum}_{\text{monocapa}}}{2} \right)^3 \end{array} \right.$$

2.5.2 Objectius de la pràctica

A continuació, us oferim un disseny experimental basat en el raonament anterior. És important insistir que l'objectiu principal d'aquesta pràctica, a diferència de les quatre anteriors, no és fer una determinació precisa del valor de la constant d'Avogadro, sinó únicament demostrar que aquesta té un ordre de magnitud enorme. Més endavant, a l'apartat Conclusions, assenyalarem quines són les principals deficiències d'aquest mètode, tant de la base teòrica com de la part pràctica.

La bibliografia consultada per dissenyar aquest experiment ofereix diverses tècniques amb petites variacions que es poden aplicar durant la realització de la pràctica. En concret en presenta les tres següents:

- Afirma que es pot considerar que la molècula d'àcid gras té forma esfèrica o cúbica.
- Recomana utilitzar àcid oleic com a solut, tot i que també indica que es pot utilitzar àcid esteàric, i pentà com a dissolvent, tot i que també diu que l'etanol servirà.

Observar experimentalment com afecten aquestes variacions al valor estimat de la constant d'Avogadro era, doncs, en principi, l'altre objectiu secundari d'aquesta pràctica. Malauradament, el preu de l'àcid oleic i del pentà és elevat i, sabent que, a causa de les múltiples estimacions realitzades en la part teòrica, els resultats no serien gaire bons, es va considerar que no era convenient adquirir aquest dos productes. Així doncs, el que es farà a l'apartat Conclusions serà una predicció sobre com serien els resultats si s'utilitzés àcid oleic i pentà, a partir dels resultats obtinguts al realitzar aquesta pràctica amb àcid esteàric i etanol, comparant les seves propietats químiques. Per tals de comprovar si és millor considerar que la molècula d'àcid gras té forma esfèrica o cúbica es realitzaran els càlculs de les dues maneres diferents i després es compararan els resultats. Resolent aquestes dues qüestions, es pretén perfeccionar el disseny experimental.

En resum, doncs, el nostre **objectiu principal** és:

- Dur a terme aquesta pràctica al laboratori de l'institut i, a partir d'una sèrie de resultats experimentals, valorar l'eficàcia del mètode.

I els **objectius secundaris** són donar resposta a les preguntes següents:

- Varia molt el resultat si en comptes de considerar que una molècula d'àcid esteàric té forma cúbica considerem que és esfèrica? I si, durant la realització de l'experiment, en comptes d'utilitzar àcid esteàric i etanol utilitzem àcid oleic i pentà?
- Aquest mètode acostuma a presentar resultats amb marges d'error enormes. Quins són els factors que provoquen aquest fet?

2.5.3 Disseny de l'experiment

2.5.3.1 Utilatge

- Aigua (pot ser de l'aixeta), àcid esteàric i etanol
- Recipient poc profund amb una superfície aproximada de 40x30cm
- Gases fines de cotó prou grans com per cobrir tota la superfície del recipient
- Pols de talc
- Bureta d'un 1ml i un succionador
- Provena
- Balança electrònica

2.5.3.2 Procediments

1. Ompliu amb aigua el recipient, deixant un marge d'aproximadament 1cm a la vora.
2. Cobriu el recipient amb la gasa de cotó, formant així una mena de filtre o colador rudimentari.
3. Seguidament, escampeu els pols de talc sobre el recipient fins a que es constitueixi una capa molt fina sobre la superfície de l'aigua. D'aquesta manera, gràcies a l'acció de la gasa de cotó, el talc es distribuirà de la manera més uniforme possible.
4. Aboqueu al centre del recipient, i des d'una altura aproximada de 5cm, una gota de dissolució d'àcid esteàric ($C_{18}H_{36}O_2$) i etanol amb una concentració de $2,5 \times 10^{-3}$ g/ml. Al final d'aquest treball, hom pot trobar un protocol que explica com preparar dissolucions d'aquest tipus.
5. Espereu uns quants minuts, fins a que l'etanol s'evapori i permeti que l'àcid esteàric formi una taca circular a la superfície de pols. Quan aquest aparegui, mesureu el seu diàmetre. És força probable que la gota que es formi no sigui un cercle perfecte. En cas aquest, haureu de repetir tots els passos anteriors.

Advertència: Si s'espera més temps del compte, la taca també s'acabarà deformant i haureu de tornar a començar de nou.



Figura 42: Taca formada sobre la superfície del pols de talc.

Amb aquest darrer pas, finalitza la part experimental. Per calcular la constant d'Avogadro, però, tal i com ja s'ha indicat a la part teòrica, necessitareu obtenir dues dades més: el volum que ocupa una gota de la dissolució i la densitat d'aquesta. Aquestes dades les podreu esbrinar fàcilment de la manera següent:

- **Volum d'una gota:** empleneu una bureta d'1mL amb la dissolució. Poc a poc, buideu-la de gota en gota i aneu comptant quantes d'aquestes es deixen anar. Finalment, dividiu el nombre de gotes entre 1 i obtindreu el volum que ocupa cadascuna en mL.

- **Densitat de la dissolució:** Encegueu la balança electrònica, col·loqueu-hi una proveta a sobre i pressioneu la tecla Tara. Seguidament, aboqueu la dissolució a l'interior de la proveta i anoteu la massa que marqui la balança i el volum que indiquen les marques de la proveta. La densitat l'obtindreu dividint la primera dada entre la segona.

Arribat aquest punt i obtingudes totes les dades, ja hauríeu de ser capaços de calcular la constant d'Avogadro. A continuació trobareu un exemple amb dades experimentals reals.

Exemple d'aplicació del mètode

Aquest exemple resolt utilitza dades empíriques reals obtingudes al laboratori del nostre institut. Aquestes dades es corresponen, en concret, amb la primera prova realitzada. En total es va deixar caure una gota de dissolució sobre la superfície de l'aigua. La taca que es va formar tenia un radi de un centímetre. Seguint els protocols proposats a l'apartat anterior, es va determinar que cada gota abocada ocupava un volum de 0'033ml, i que la densitat del àcid esteàric era igual a 0'66g/cm³. La concentració de la dissolució empleada era de 2'5g/L.

Càlcul del volum d'un mol d'àcid esteàric

$$volum_{molar} = 284,48g \text{ d'àcid esteàric} \times \frac{1cm^3}{0,66g \text{ d'àcid esteàric}} = 433,66cm^3$$

Càlcul del volum d'un àtom d'àcid esteàric

Segons base teòrica d'aquest mètode, el volum d'un àtom d'àcid esteàric és igual al cub de l'alçada de la monocapa o bé a quatre terços d'aquesta elevada al cub i multiplicada per π (depèn de si considerem que l'àtom té forma cúbica o esfèrica). En aquest exemple resolt, un cop haguem determinat l'espessor de la monocapa, mostrarem totes dues opcions.

$$1 \text{ gotes de dissolució abocades} \times \frac{1cm^3 \text{ de dissolució}}{30 \text{ gotes de dissolució}} \times \frac{0'25g \text{ d'àcid esteàric}}{100cm^3 \text{ dissolució}} \times \frac{1cm^3 \text{ d'àcid esteàric}}{0'66g \text{ d'àcid esteàric}} = 1,27 \times 10^{-4} \text{ mL d'àcid esteàric}$$

$$\text{àrea}_{monocapa} = \pi \times l^2 = \pi cm^2$$

$$volum_{monocapa} = \text{Àrea}_{monocapa} \times h_{monocapa} \rightarrow$$

$$h_{monocapa} = \frac{Volum_{monocapa}}{\text{Àrea}_{monocapa}} = \frac{1,27 \times 10^{-4} cm^3}{\pi cm^2} = 4,043 \times 10^{-5} cm$$

| Si considerem que l'àtom té forma cúbica... | Si considerem que l'àtom té forma esfèrica... |
|---|---|
| $volum_{àtom} = (4,043 \times 10^{-5})^3 = 6,606 \times 10^{-14} cm^3$ | $volum_{àtom} = \frac{4}{3} \pi (4,043 \times 10^{-5})^3 = 2,77 \times 10^{-13} cm^3$ |
| $N_A = \frac{Volum_{mol}}{Volum_{àtom}} = \frac{433,66cm^3}{6,606 \times 10^{-14} cm^3} = 6,6 \times 10^{15}$ | $N_A = \frac{Volum_{mol}}{Volum_{àtom}} = \frac{433,66cm^3}{2,77 \times 10^{-13} cm^3} = 1,57 \times 10^{15}$ |

2.5.4 Resultats obtinguts

Aquí teniu les dades experimentals de la resta d'enregistraments. Com podeu veure, els resultats obtinguts són pèssims, però estan dins dels marges esperats. Cal recordar que la base teòrica conté moltes simplificacions i que, a més, les dificultats per mesurar correctament les dades experimentals són enormes. Aquests aspectes seran comentats amb més detall a l'apartat de la valoració del mètode.

| Núm. d'enregistrament | Núm. de gotes abocades | Radi de la monocapa (cm) | Valor estimat N_A |
|-----------------------|------------------------|--------------------------|----------------------|
| 1 | 1 | 1,0 | $6,6 \times 10^{15}$ |
| 2 | 1 | 0,7 | $7,7 \times 10^{14}$ |
| 3 | 1 | 0,6 | $2,1 \times 10^{14}$ |
| 4 | 1 | 0,7 | $7,7 \times 10^{14}$ |
| 5 | 1 | 0,5 | $1,0 \times 10^{14}$ |

A causa de la mala qualitat de les estimacions i de la gran dispersió entre elles, no realitzarem cap tractament estadístic ni farem cap gràfic.

2.5.5 Conclusions de l'experiment

Objectiu principal

- **Dur a terme aquesta pràctica al laboratori de l'institut i, a partir d'una sèrie de resultats experimentals, valorar l'eficàcia del mètode.**

La taula següent mostra els resultats obtinguts a partir d'aquest mètode, utilitzant àcid esteàric com a solut i etanol com a dissolvent i considerant que les molècules d'àcid esteàric tenen forma cúbica. Els resultats són pèssims i evidencien que aquest no és un mètode eficaç per estimar el valor de la constant d'Avogadro.

| Núm. d'enregistrament | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Valor N_A estimat | $6,6 \times 10^{15}$ | $7,7 \times 10^{14}$ | $2,1 \times 10^{14}$ | $7,7 \times 10^{14}$ | $1,0 \times 10^{14}$ |

Objectius secundaris

- **Varia molt el resultat si, en comptes de considerar que una molècula d'àcid esteàric té forma cúbica, considerem que és esfèrica? I si, durant la realització de l'experiment, en comptes d'utilitzar àcid esteàric i etanol, utilitzem àcid oleic i pentà?**

| Núm d'enregistrament | Forma cúbica | Forma esfèrica |
|----------------------|----------------------|----------------------|
| 1 | $6,6 \times 10^{15}$ | $1,6 \times 10^{15}$ |
| 2 | $7,7 \times 10^{14}$ | $1,8 \times 10^{14}$ |
| 3 | $2,1 \times 10^{14}$ | $7,3 \times 10^{13}$ |
| 4 | $7,7 \times 10^{14}$ | $1,8 \times 10^{14}$ |
| 5 | $1,0 \times 10^{14}$ | $2,5 \times 10^{13}$ |

La taula anterior mostra els valors estimats de la constant d'Avogadro, considerant que les molècules d'àcid esteàric tenen forma cúbica o esfèrica. Malgrat que tots dos resultats són pèssims, les primeres estimacions ofereixen millors resultats.

Aquesta pràctica no s'ha realitzat amb àcid oleic i pentà i, per tant, només podem preveure els efectes que aquests productes tindrien en els resultats estimats a partir de la comparació de les seves propietats químiques amb les dels productes utilitzats. El pentà té un punt d'ebullició més baix que l'etanol i, a més, és soluble en aigua. L'àcid oleic, a diferència de l'àcid esteàric, és líquid a temperatura ambient. Així doncs, sembla ser que l'àcid oleic i el pentà faciliten la distribució homogènia de les molècules d'àcid gras i, en conseqüència, haurien d'oferir millors resultats.

- **Aquest mètode acostuma a presentar resultats amb marges d'error enormes. Quins són els factors que provoquen aquest fet?**

Tota determinació experimental està sotmesa sempre a un marge d'error, que pot ser més o menys gran. Si a aquest error li sumen les importants deficiències del raonament teòric i del disseny experimental, a més de les grans dificultats que sorgeixen alhora de mesurar la dada experimental més important, és natural que s'obtinguin uns resultats tan pèssims.

Les deficiències del raonament teòric radiquen en les dues estimacions que es realitzen: la primera suposa que la taca formada per l'àcid gras té un gruix d'una única molècula i, la segona, que aquestes molècules tenen forma cúbic o esfèrica. Evidentment, aquestes estimacions no són gaire rigoroses i comporten un error important, ja que, de fet, són els principals fonaments de la base teòrica.

El disseny experimental que us hem proposat fa ús d'uns productes químics no idonis. Així doncs, el dissolvent utilitzat, l'etanol, és soluble en aigua, la qual cosa dificulta la distribució uniforme de les molècules de l'àcid gras sobre la superfície de l'aigua, i, a més, triga més temps en evaporar-se que el pentà. L'àcid esteàric, per l'altra banda, és sòlid a temperatura ambient, mentre que el producte recomanat per la bibliografia, l'àcid oleic, és líquid. El darrer error important radica en les dificultats sorgides alhora de mesurar el radi de la monocapa, la forma de la qual, a més, mai és totalment circular. La realització d'aquest mètode, doncs, comporta un gran nombre d'errors molt greus, de difícil solució, que afecten molt negativament als resultats.

3. Conclusions

| | |
|----------------------------|----|
| 3.1 Valoracions prèvies | 81 |
| 3.2 Avaluació dels mètodes | 82 |
| 3.3 Conclusions finals | 83 |

3.1 Valoracions prèvies

En aquest darrer apartat, exposarem, les nostres conclusions i farem una valoració sobre l'eficàcia per determinar una valor exacte i precís de la constant d'Avogadro dels mètodes presentats. Aquest apartat està dividit en tres subapartats. Els dos primers estan escrits amb un estil molt directe de pregunta i resposta. En el primer apartat es fa un resum de les nostres investigacions sobre la història de la constant d'Avogadro i el segon indica breument quin dels mètodes presentats ofereix millors resultats. Val a dir que les preguntes que es plantegen i es responen són aquelles que us vam presentar a l'inici d'aquest treball. Finalment, el tercer subapartat consisteix en un informe força complet que valora l'eficàcia dels mètodes explicats a partir dels resultats experimentals obtinguts.

3.1.1 La constant, al descobert

- **Quan va ser formulada la constant d'Avogadro?**

La constant d'Avogadro té els seus orígens en l'anomenada Hipòtesis d'Avogadro, avui en dia convertida en llei. Aquesta, enunciada per Amadeo Avogadro a l'any 1811, afirma que:

“Dos volums iguals de diferents substàncies gasoses, mesurats en mateixes condicions de pressió i volum, contenen el mateix nombre de partícules”.

Així doncs, la comunitat científica va referir-se a “La Gran K” com el número de partícules que hi havia en un centímetre cúbic de qualsevol gas en condicions normals de pressió i temperatura. No va ser fins a l'any 1915, gairebé un segle després, quan es va proposar el nom i definició actuals.

- **Quan va ser el seu valor estimat per primer cop? Qui ho va fer?**

El primer intent per determinar el valor de la constant d'Avogadro fou realitzat a l'any 1865 pel químic austríac Johann Josef Loschmidt. El mètode utilitzat per Loschmidt estava basat en tot un seguit de simplificacions i deduccions lògiques i, en conseqüència, el resultat obtingut distava molt del valor real, i només va servir per constatar que el nombre K tenia un ordre de magnitud enorme.

La primera determinació satisfactòria fou realitzada, a l'any 1915 pel cèlebre experimentalista francès Jean Perrin. Podeu consultar els resultats dels seus experiments a la pàgina 50 d'aquest treball de recerca. Resulta interessant dir que, arran de la publicació d'aquests resultats, Perrin va proposar una nova magnitud fonamental: el mol. Un mol és la quantitat de matèria d'una substància pura qualsevol en la qual hi ha K molècules. Perrin va proposar, a més, batejar el nombre K amb el nom de Constant d'Avogadro, com a reconeixement per al cèlebre matemàtic.

- **Com han evolucionat els mètodes emprats per la comunitat científica per determinar experimentalment el valor de la constant d'Avogadro, des de principis del segle XX fins a l'actualitat?**

A partir de principis de segle XX, l'aparició de nous mètodes per determinar el valor de la constant d'Avogadro va esdevenir un fet usual. Fins al 1924, la majoria d'aquests estaven basats en estudis dels moviments atòmics i moleculars sobre medis gasosos i líquids. Entre 1924 i 1951 la forma més habitual de determinar experimentalment el valor de la constant d'Avogadro era mitjançant l'estudi de les longituds d'ones de raigs X. Des de 1951 fins a l'actualitat els mètodes per excel·lència han estat aquells basats en l'estudi de les estructures cristal·lines dels àtoms a partir d'observacions realitzades amb microscopi de raigs X.

3.2 Avaluació dels mètodes

- **Quins mètodes podem utilitzar per estimar el valor de la constant d'Avogadro amb els mitjans dels quals disposa el laboratori del nostre institut?**

Actualment es coneixen més de vuitanta mètodes diferents per determinar experimentalment el valor de la constant d'Avogadro. Naturalment, dins d'aquesta gran varietat, hi ha alguns que tenen un caràcter força complex mentre que d'altres són més senzills i alguns ofereixen millors resultats que altres. En aquest treball de recerca hem recollit els més coneguts i els que hem considerat més adients per ser reproduïts en una laboratori d'un institut de secundària. En total, hem presentat els cinc següents:

- Determinació experimental de la constant d'Avogadro a partir de l'electròlisi de l'aigua.
 - Determinació experimental de la constant d'Avogadro a partir de l'electrodeposició del coure.
 - Determinació experimental de la constant d'Avogadro a partir de l'estudi d'estructures cristal·lines.
 - Determinació experimental de la constant d'Avogadro a partir de l'observació del moviment brownià.
 - Determinació experimental de la constant d'Avogadro a partir de l'estudi de capes monomoleculares d'àcids grassos.
- **De tots els mètodes que hem provat, quin ofereix els resultats més exactes? I els més precisos? Quins és el mètode més viable?**

Dels cinc mètodes realitzats al laboratori, dos –la determinació experimental de la constant d'Avogadro a partir de l'estudi de capes monomoleculares d'àcids grassos i la determinació experimental de la constant d'Avogadro a partir de l'observació del Moviment Brownià – han ofert uns resultats no satisfactoris, mentre que els altres tres– determinació experimental de la constant d'Avogadro a partir de l'electròlisi de l'aigua, la determinació experimental de la constant d'Avogadro a partir de l'electrodeposició del coure, i la determinació experimental de la constant d'Avogadro a partir de l'estudi d'estructures cristal·lines – han ofert un resultats magnífics. Vegeu la taula següent.

| Mètode | Interval de confiança (grau de confiança del 95%) | Error relatiu |
|---|--|---------------|
| Determinació experimental de la constant d'Avogadro a partir de l'electròlisi de l'aigua (*) | $[5,9 \times 10^{23}, 6,1 \times 10^{23}]$ | 1% |
| Determinació experimental de la constant d'Avogadro a partir de l'electrodeposició del coure. | $[5,89 \times 10^{23}, 6,03 \times 10^{23}]$ | 1% |
| Determinació experimental de la constant d'Avogadro a partir de l'estudi d'estructures cristal·lines (**) | $[5,54 \times 10^{23}, 6,10 \times 10^{23}]$ | 3,32% |

(*) Resultats de l'electròlisi en medi àcid (H₂SO₄ [1M])
 (**) Resultats de l'estudi de cristalls metàl·lics

Així doncs, els mètodes que ofereixen millors resultats són el primer i el tercer de la taula, amb una exactitud i precisió gairebé idèntica.

3.3 Conclusions finals

La constant d'Avogadro és una de les constants fonamentals més importants de la ciència, doncs d'ella depèn directament la definició de la magnitud fonamental mol, la qual és, alhora, una de les bases de la química moderna. Al llarg d'aquest treball de recerca hem recollit, explicat i descrit alguns dels mètodes existents per determinar experimentalment el valor d'aquesta constant. En concret, ens hem centrat en aquells que eren especialment coneguts i que alhora es podien dur a terme al laboratori del nostre institut de secundària. A continuació us presentem un breu informe que pretén resumir tot el contingut d'aquest treball de recerca.

L'objectiu d'aquest informe és fer una valoració objectiva de les qualitats de cadascun dels mètodes per determinar experimentalment la constant d'Avogadro que han estat proposats al llarg d'aquest treball de recerca. Aquest anàlisi està basat en les experiències que hem adquirit al realitzar-los al laboratori de [REDACTED]. Aquest informe es centra bàsicament en descriure tres aspectes de cada mètode: el grau de complexitat de la base teòrica, el grau de dificultat que comporta la realització del experiment i la validesa dels resultats. Aquest treball de recerca inclou, doncs, cinc mètodes diferents per estimar el valor de la constant d'Avogadro:

- Determinació experimental de la constant d'Avogadro a partir de l'electròlisi de l'aigua.
- Determinació experimental de la constant d'Avogadro a partir de l'electrodeposició del coure.
- Determinació experimental de la constant d'Avogadro a partir de l'estudi d'estructures cristal·lines.
- Determinació experimental de la constant d'Avogadro a partir de l'observació del Moviment Brownià.
- Determinació experimental de la constant d'Avogadro a partir de l'estudi de capes monomoleculares d'àcids grassos.

A continuació valorarem breument cadascun d'aquests mètodes per separat.

- **Determinació experimental de la constant d'Avogadro a partir de l'electròlisi de l'aigua**

L'adjectiu que descriu millor el raonament d'aquest mètode és pragmàtic. Parteix de la base que la constant d'Avogadro indica el número de molècules que hi ha en un mol i aleshores idea un experiment en el qual pugui determinar, mitjançant vies independents, el número de molècules i de mols que hi ha en una substància. És un raonament força senzill i elemental que tothom que tingui uns coneixements bàsics de química pot comprendre sense cap dificultat.

La facilitat amb que es pot realitzar aquest experiment és potser el seu major encant. L'utilitat requerit és molt accessible i no especialment car: els estris de laboratori (vas de precipitats, buretes, provetes i nous i pinces) es poden trobar en qualsevol laboratori d'un institut de secundària, de manera que els productes químics (hidròxid de sodi i àcid sulfúric). La principal dificultat sorgiria alhora d'aconseguir els elèctrodes de grafit, però, com ja s'ha indicat, aquests també es poden obtenir a partir de piles cilíndriques.

Per posar a provar aquest mètode s'ha realitzat un total de divuit electròlisis en medi bàsic amb diferents concentracions i unes altres sis electròlisis en un medi d'àcid sulfúric 1M. Un cop realitzats els càlculs pertinents, s'han agrupat els valors estimats segons les característiques del medi empleat i hem calculat els intervals de confiança corresponents. El grau de confiança seleccionat és del 95%. D'acord amb els nostres càlculs, l'interval de confiança de l'electròlisi en un medi bàsic (NaOH) es compren entre $5,4 \times 10^{23}$ i $5,5 \times 10^{23}$ en una concentració de 0,5M; entre $5,6 \times 10^{23}$ i $6,7 \times 10^{23}$, en una concentració d'1M, i entre $5,8 \times 10^{23}$ i $6,0 \times 10^{23}$, en una concentració de 2M. El mateix interval de confiança de l'electròlisi en medi àcid (H_2SO_4) amb una concentració d'1M es situa entre $5,9 \times 10^{23}$ i $6,1 \times 10^{23}$. Així doncs, els resultats obtinguts són excel·lents, si es té en compte el caràcter rudimentari de l'utilitatge empleat. Totes les proves han demostrat ser exactes. Els marges de confiança són força estrets, a excepció de la prova

realitzada en un medi bàsic d'hidròxid de sodi 1M. També s'ha pogut observar que, a mesura que augmenta la conductivitat del medi, la reacció es desenvolupa més ràpidament i el grau d'exactitud dels resultats millora.

En resum i en conclusió, l'estudi de l'electròlisi de l'aigua resulta ser un molt bon mètode per determinar experimentalment el valor de la constant d'Avogadro. A causa de la seva senzillesa, tant pràctica com teòrica, resulta ideal per ser realitzat als laboratoris dels instituts d'ensenyament secundari. Els tres adjectius que millor el defineixen són: senzill, pràctic i eficaç.

- **Determinació experimental de la constant d'Avogadro a partir de l'electrodeposició del coure**

Aquest segon mètode és molt semblant a l'anterior, ja que tots dos parteixen d'una base teòrica molt semblant. La principal diferència es que el primer estudia una reacció d'electròlisi i aquest estudia una reacció d'electrodeposició. Així doncs, la base teòrica d'aquest mètode és lleugerament més senzilla, al no incloure reactius en estat gasós. El disseny experimental d'aquest mètode és també igual de senzill que el del mètode anterior. L'utilitatge requerit no és car i es pot obtenir fàcilment.

Els resultats obtinguts són lleugerament pitjors als obtinguts a partir de l'estudi de la reacció d'electròlisi, tot i que és important remarcar que tampoc són definitius perquè no s'han realitzat suficients enregistraments. Així doncs, dels cinc enregistrament, tres ens varen oferir uns resultats magnífics molt exactes i amb errors relatius inferiors al 1%. Un altre enregistrament va estimar el valor de la constant d'Avogadro amb un error relatiu situat als voltants del 10%. Respecte al darrer, ens va oferir un resultat pèssim.

En conclusió aquest mètode, a nivell teòric, és lleugerament més senzill que el l'electròlisi de l'aigua, però sembla ser que ofereix uns resultats lleugerament menys exactes.

- **Determinació experimental de la constant d'Avogadro a partir de l'estudi d'estructures cristal·lines.**

Aquest tercer mètode per calcular la constant d'Avogadro es basa en l'estudi de les estructures cristal·lines de diferents elements metàl·lics i composts. La seva base teòrica és força més complicada que la dels dos mètodes anteriors. Aquesta es fonamenta en el concepte de cel·les unitats i en la determinació experimental del seu volum. Comprendre el 100% de la base teòrica sense cap mena de coneixement previ és bastant complicat, però les idees principals es poden entendre fàcilment.

El disseny experimental que us hem proposat en aquest treball per realitzar aquesta pràctica és el més senzill de tots –només cal aconseguir un metall o bé un mineral com més pur millor– i mesurar-ne la massa i el volum. Val a dir, però, que aquest disseny és incomplet, ja que no proposa cap mètode per determinar experimentalment el volum de les cel·les unitats. Malauradament, això no es pot fer amb els mitjans que disposa el laboratori del nostre institut.

Tots els resultats obtinguts amb aquest mètode són magnífics, amb errors relatius situats tots per sota del 10%. Cal destacar especialment els resultats obtinguts a partir de l'estudi d'elements metàl·lics, els quals han comportat errors relatius, en la seva majoria, inferiors al 1% i han estat especialment precisos.

- **Determinació experimental de la constant d'Avogadro a partir de l'observació del moviment brownià**

Aquest quart mètode es basa en un estudi realitzat per Albert Einstein al any 1905 sobre un fenomen anomenat moviment brownià. La seva base teòrica, és doncs, aquest mateix estudi. Per tals de comprendre els raonaments que s'hi desenvolupen, es requereixen uns coneixements matemàtiques que no entren dins del temari de segon de batxillerat. En aquest treball, ens hem dedicat només al punt més important: la formula matemàtica final.

El disseny experimental d'aquest mètode és el més complicat de dur a terme de tots: requereix un microscopi òptic, amb tots els seus complements (vidres portaobjectes i cobreobjectes, una micropipeta i esmalt d'ungles per segellar la mostra), i un concret software informàtic (el programa Motic). La principal complicació consisteix en aconseguir enregistrar un vídeo que mostri el moviment d'una partícula de llet amb suficients augments com per poder mesurar amb exactitud el seu radi r , alhora, que aquesta es mantingui durant un període de temps considerable dins del camp de visió.

Els resultats que nosaltres hem obtingut experimentalment no han estat gaire satisfactoris (el millor resultat era exactament deu vegades més petit que el valor real de la constant d'Avogadro) però les nostres fonts bibliogràfiques indiquen que aquest mètode hauria de proporcionar uns resultats amb uns errors relatius situats al voltant del 15%.

- **Determinació experimental de la constant d'Avogadro a partir de l'estudi de capes monomoleculares d'àcids grassos**

Aquest darrer mètode, a diferència dels anteriors, no es proposa fer una determinació exacta del valor real de la constant d'Avogadro, sinó simplement demostrar experimentalment que aquest número té un ordre de magnitud enorme. Així doncs, la seva base teòrica conté diverses simplificacions i aproximacions que afecten molt negativament els resultats. Val a dir que aquest fet no dificulta la seva comprensió, que no resulta gaire difícil.

El grau de dificultat que comporta la realització de l'experiment no és proporcional a la qualitat dels resultats; és a dir, es requereix és equiparable als dels dos primers mètodes proposats per tals d'obtenir uns resultats que s'allunyen fins i tot deu ordres de magnitud del valor real de la constant. Aquests resultats tan pèssims són provocats per determinades deficiències de la base teòrica, tot i que també és cert que durant la realització de l'experiment també es produeixen errors importants.

- **Conclusions finals**

En conclusió, doncs, dels cinc mètodes proposats, tres —el mètode de l'electròlisi de l'aigua, el de l'electrodeposició del coure, i el basat en l'estudi d'estructures cristal·lines— ofereixen uns resultats excepcionals. El mètode de les capes monomoleculares d'àcids grassos, per contra, presenta uns resultats pèssims, però cal recordar que l'objectiu principal d'aquest mètode no és determinar amb precisió el valor exacte de la constant d'Avogadro. El darrer mètode, el basat en l'estudi del moviment brownià, ofereix uns resultats pitjors del que haurien de ser i creiem que això és provocat per deficiències en el disseny experimental.

Així doncs, de entre els tres millors mètodes, el disseny experimental del mètode basat en l'estudi d'estructures cristal·lines és el més senzill, però s'ha de recórrer a la recerca bibliogràfica per tal d'obtenir determinades dades importants. Els altres dos mètodes permeten obtenir al laboratori de l'institut totes les dades importants. En conclusió, no és pot afirmar amb objectivitat quins dels tres és el millor, tot i que tenen característiques diferents, perquè tots tres ofereixen uns resultats esplèndids.

4. Referències documentals

- Avogadro's Number
http://www2.ohlone.edu/people/jklent/labs/101A_labs/Avogadro.pdf
- Barceinas Sánchez i A. Juárez Hernández. Ciencia e ingeniería de los materiales.
<http://prof.usb.ve/hreveren/capitulo3.pdf>
- Centre de Documentació i Experimentació en Ciències i Tecnologia. Com es pot calcular la constant d'Avogadro?
http://phobos.xtec.cat/cdec/images/stories/WEB_antiga/recursos/pdf/TPQ/08_avogadro.pdf
- Chemistry M01A Laboratory Manual pp. 24 Experiment #5: Determination of Avogadro's Number from Electrodeposition of Copper
http://sunny.moorparkcollege.edu/~chemistry/Chemistry_1A_labs/experiment_five.pdf
- Christopher Trinh Measuring Avogadro's Number Using Brownian Motion
<http://ugastro.berkeley.edu/~ctrinh/papers/bio.pdf>
- Cusialls, Anicet Determinem la constant d'Avogadro. Diari Segre 21 de febrer de 1991
- Fitxes de seguretat
<http://www.insht.es/portal/site/Insht/menuitem.a82abc159115c8090128ca10060961ca/?vgnnextoid=4458908b51593110VgnVCM100000dc0ca8c0RCRD>
- Gillespe-Homphreys-Baird-Robinson. Química. Editorial Reverté S.A. Barcelona
- Herbert H. Deruyter, Waterloo Collegiate Institute, 300 Hazel Street, Waterloo ON N2L 3P2
Lewis J. Brubacher, Department of Chemistry, University of Waterloo, Waterloo ON N2L 3G1
High school students calculate Avogadro's constant using video projection of Brownian motion in milk
http://www.chem13news.uwaterloo.ca/issues/353/Page3_7from%20Jan_2008_Number%20353.pdf
- IUPAC Compendium of Chemical Terminology Avogadro constant
<http://old.iupac.org/goldbook/A00543.pdf>
- La constante de Avogadro y el volumen de las moléculas
[http://depa.pquim.unam.mx/amyd/archivero/Practica9ConstantedeAvogadro\(Volumenmoleculas\)_9986.pdf](http://depa.pquim.unam.mx/amyd/archivero/Practica9ConstantedeAvogadro(Volumenmoleculas)_9986.pdf)
- Lew Brubacher An experiment to measure Avogadro's constant Repeating Jean Perrin's confirmation of Einstein's Brownian motion equation Chemistry Department, University of Waterloo
http://www.chem13news.uwaterloo.ca/issues/339/may06_2006_page_14.pdf
- Mana, Giovanni. An accurate determination of the Avogadro constant by counting the atoms in a ^{28}Si crystal
http://arxiv.org/PS_cache/arxiv/pdf/1010/1010.2317v1.pdf
- Minerale. Editorial Tiral. Madrid Barcelona

- Ronald Fox, Theodore Hill. An Exact Value for Avogadro's Number American Scientist.
<http://www.americanscientist.org/issues/pub/an-exact-value-for-avogadros-number/5>
- S. Ramasesha Experimental determination of the Avogadro Constant
<http://www.ias.ac.in/resonance/januaryissue/79-87.pdf>
- Taula de pressió de vapor
http://www.vaxasoftware.com/doc_edu/qui/pvh2o.pdf
- Taula de t-student
<http://dpinto.cs.buap.mx/pln/Autumn2010/tstudenttable.pdf>
- Taula de viscositat de l'aigua
http://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=tabla%20de%20viscosidad%20del%20agua&source=web&cd=2&ved=0CDUQFjAB&url=http%3A%2F%2Fwww.gae.ucm.es%2Ffisatom%2Fdocencia%2Fbio0001%2Fdoc%2Fanexos.doc&ei=Y1_6Tp-wK8SBhQffkOi3AQ&usq=AFQjCNHGdEXjAmwoKREI6DI1F1SjQjGpw
- University of Massachusetts. Boston Chemistry 117 Laboratory. Avogadro's number
<http://alpha.chem.umb.edu/chemistry/ch117/117%20labs/lab3AvogadroSum2011.pdf>

4. Annexos

| | |
|--|-----|
| Annex 1 – Preparació de dissolucions | 87 |
| Annex 2 – Tractament estadístic de les dades | 91 |
| Annex 3 – El microscopi òptic | 95 |
| Annex 4 – Propietats de l'aigua en funció de la seva temperatura | 98 |
| Annex 5 – Taula de pressió de vapor | 99 |
| Annex 6 – Determinació experimental de la constant d'Avogadro a partir del recompte d'àtoms de ^{28}Si | 100 |
| Annex 7 – Fitxes de seguretat | 105 |

Annex 1. Preparació de dissolucions

Moltes de les pràctiques proposades en aquest treball de recerca requereixen la preparació de dissolucions amb concentracions diferents. Aquest annex ensenya, d'una manera senzilla com obtenir les preparacions químiques requerides per poder realitzar alguns dels experiments.

Una preparació està formada per dos elements: el solut, que es presenta en menor quantitat, i el dissolvent, que es presenta en major. Existeixen diverses formes d'expressar el grau de concentració, però en aquest treball només se'n han utilitzat dues: el tant per cent en massa i la molaritat.

El tant per cent en massa s'obté dividint la massa del solut entre la massa del dissolvent i multiplicant el quocient per cent. La molaritat es calcula dividint el nombre de mols de solut entre els litres de dissolvent. Vegeu el quadre següent:

$$\text{Percentatge en massa(\%)} = \frac{\text{massa del solut}}{\text{massa de la dissolució}} \times 100$$

$$\text{Molaritat(M)} = \frac{\text{mols de solut}}{\text{litres de dissolució}}$$

Per calcular les quantitats que s'han de barrejar, per tant, només s'ha de resoldre una equació de primer grau, tot i que de vegades es requereix la utilització de diversos factors de conversió per tals d'expressar les xifres amb les magnituds correctes.

És possible preparar dissolucions a partir d'altres dissolucions de concentració major. En aquests casos, les quantitats s'obtenen mitjançant una fórmula matemàtica que diu que la molaritat de la dissolució inicial multiplicada pel seu volum ha de ser igual a la molaritat de la dissolució que es vol preparar multiplicada pel seu volum (aquesta operació és, de fet, una regla de tres).

$$M_1 V_1 = M_2 V_2$$

Malgrat que les quantitats que cal afegir per preparar cada substància acostumen a variar molt, els passos que cal seguir en cada cas són gairebé sempre els mateixos. A continuació, s'explicarà el procediment general que cal seguir per preparar una dissolució sabent-ne el tant per cent en massa, una dissolució sabent la molaritat desitjada i disposant del solut en estat sòlid, i una dissolució sabent la concentració molar que es vol obtenir a partir d'una altra dissolució, que són els casos amb què hom es pot trobar alhora de realitzar alguna de les pràctiques explicades en aquest treball.

Preparació de dissolucions a partir del tant per cent en massa

Utilitatge

- Balança electrònica
- Cullereta
- Vas de precipitats
- Proveta
- Flascó rentador
- Solut i dissolvent

Procediments

1. Calcular les quantitats de cada espècia necessària. Per fer-ho, nosaltres decidirem el volum de dissolució que necessitem i, a partir d'aquesta dada, calcularem la massa de solut necessària. Això es fa mitjançant l'expressió matemàtica ja mostrada anteriorment. En alguns casos (quant el dissolvent no és aigua, ja que la densitat d'aquesta és 1g/cm^3) s'ha de saber la densitat de la dissolució per utilitzar un factor de conversió que transformi els grams de dissolució en L. L'equació matemàtica que s'utilitza normalment, és, per tant, la següent:

$$\text{volum de la dissolució} \times \text{densitat de la dissolució} \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) \times \frac{\text{solut (g)}}{\text{dissolució (g)} (\% \text{ en massa})} = \text{solut necessari}$$

2. Col·locar el vas de precipitats sobre la balança electrònica i prémer la tecla Tara, de manera que aquesta indiqui 0 grams. Seguidament, abocar al seu interior la quantitat de solut requerida per preparar la dissolució. Paral·lelament, omplir la proveta la quantitat de dissolvent requerida.
3. Finalment, abocar el dissolvent a l'interior del vas de precipitats.

Preparació de dissolucions sabent la concentració molar i disposant del solut en estat sòlid

Utilitatge

- Matràs aforat
- Proveta
- Vas de precipitats
- Balança electrònica
- Vareta agitadora
- Flascó rentador

Procediments

1. Calcular les quantitats de cada espècia necessària. Això es fa mitjançant l'expressió matemàtica ja mostrada a la pàgina anterior. L'expressió matemàtica que s'utilitza normalment és la següent:

$$1\text{L dissolució} \times M \text{ dissolució} \times \frac{\text{massa molar del solut}}{1 \text{ mols solut}} = ? \text{ grams de solut}$$

On l'incògnita acostumen a ser els grams de solut, que s'obtenen aplicant el factor de conversió.

1. Prendre la balança electrònica, col·locar-hi el vas de precipitats a sobre i engegar-la. Acte seguit, abocar-hi els grams de solut que indiquin els càlculs.
2. Abocar una mica d'aigua destil·lada a l'interior del vas fins a que tot el solut estigui dissolt.
3. Abocar aquesta dissolució a l'interior del matràs aforat. Mitjançant el flascó rentador, abocar-hi aigua fins a que aquesta arribi al límit marcat per l'osca.
4. Sacsar bé la dissolució.

Preparació de dissolucions sabent la concentració molar a partir d'una altra dissolució de concentració major

Utillatge

- Balança electrònica
- Cullereta
- Vas de precipitats
- Matràs Erlenmeyer
- Flascó rentador
- Proveta graduada
- Dissolució de concentració major

Procediments

1. Calcular el volum de la dissolució inicial requerit mitjançant l'expressió matemàtica següent:

$$M_1 V_1 = M_2 V_2$$

on l'incògnita sempre és el volum de la primera dissolució. S'obté resolent l'equació de primer grau.

2. Abocar la tants mil·lilitres de dissolució inicial com siguin necessaris a l'interior de la proveta graduada. Seguidament, buidar la proveta a l'interior del matràs aforat.
3. Finalment, abocar dissolvent a l'interior del recipient fins assolir el volum desitjat.

Annex 2. Tractament estadístic de les dades

Durant la realització d'aquest treball de recerca, es van obtenir experimentalment un nombre considerable de resultats numèrics. L'anàlisi d'aquests resultats requeria l'aplicació d'un tractament estadístic prou rigorós. Existeixen dos tipus de mètodes estadístics: els basats en estimacions i els basats en intervals. Es va considerar que el més pràctic seria treballar amb els del segon tipus –amb marges de confiança, en concret– ja que els de l'altre tipus no resulten tan eficaços a l'hora de treballar amb dades tan grans i de comparar mètodes tan diferents entre si. En aquest annex, doncs, s'explicarà com s'han tractat estadísticament els resultats obtinguts a partir de cada mètode, en què consisteix aquesta anàlisi i com s'ha d'interpretar.

Un interval de confiança és una expressió del tipus $[\theta_1, \theta_2]$ on θ és el paràmetre que es vol determinar. Aquest interval ve acompanyat d'un altre paràmetre que indica el grau de certesa de l'estimació. Els valors que limiten l'interval s'obtenen mitjançant la fórmula següent:

$$I = \left[\bar{x} - \frac{t \times S}{\sqrt{N}}, \bar{x} + \frac{t \times S}{\sqrt{N}} \right] \left\{ \begin{array}{l} \bar{x}: \text{mitjana aritmètica} \\ N: \text{número de dades enregistrades } (\sum_{i=1}^k f_i) \\ t: \text{distribució de } t\text{-student} \\ S: \text{desviació típica} \end{array} \right.$$

La mitjana aritmètica és una mesura estadística de dispersió que expressa el valor mitjà dels resultats obtinguts. Es calcula mitjançant la fórmula següent:

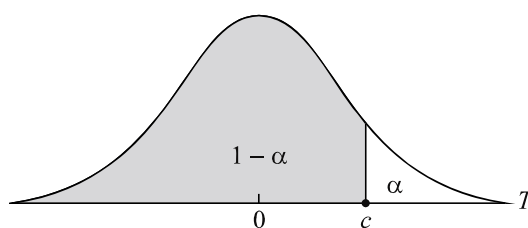
$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^k x_i f_i}{N}$$

La desviació típica és una mesura estadística de dispersió que s'obté calculant l'arrel quadrada de les desviacions de cada dada de la sèrie. Com més pròxim és el seu valor a 1, menys discrepàncies hi ha entre els components de la sèrie. La desviació típica es pot obtenir mitjançant qualsevol de les dues fórmules següents (ambdues són equivalents):

$$(\sigma_x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x})^2 f_i}{N}} \quad (\sigma_x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k x_i^2 f_i}{N} - \bar{x}^2}$$

La darrera dada que es necessita per calcular els paràmetres de l'interval de confiança, és la distribució de t-student. Aquesta dada s'obté consultant una taula de distribució de t-student com la que apareix a la pàgina següent. De tots els valors matemàtics que hi apareixen, cal triar aquell que es correspongui amb les característiques de l'estudi que es vol realitzar: les files indiquen els graus de llibertat –s'ha de triar aquella que sigui igual al número de dades enregistrades– i les columnes indiquen els graus de confiança –s'ha de triar aquell que s'adapti a les intencions de la persona que realitza l'estudi. Si hom tria, per exemple, un grau de confiança del 80%, això voldrà dir que hi haurà un 80% de probabilitats de que el resultat correcte es trobi entre els dos paràmetres que limiten l'interval. L'interval de confiança és, per tant, més ample com més petit és el grau de confiança i més estret com més gran és el grau de confiança.

Més endavant, després de la taula de distribució de t-student, trobareu un exemple d'anàlisi estadístic d'aquest tipus.

TAULA DE LA DISTRIBUCIÓ DE t -Student

| | 1 - α | | | | | | | |
|----------|--------------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| r | 0.75 | 0.80 | 0.85 | 0.90 | 0.95 | 0.975 | 0.99 | 0.995 |
| 1 | 1.000 | 1.376 | 1.963 | 3.078 | 6.314 | 12.706 | 31.821 | 63.657 |
| 2 | 0.816 | 1.061 | 1.386 | 1.886 | 2.920 | 4.303 | 6.965 | 9.925 |
| 3 | 0.765 | 0.978 | 1.250 | 1.638 | 2.353 | 3.182 | 4.541 | 5.841 |
| 4 | 0.741 | 0.941 | 1.190 | 1.533 | 2.132 | 2.776 | 3.747 | 4.604 |
| 5 | 0.727 | 0.920 | 1.156 | 1.476 | 2.015 | 2.571 | 3.365 | 4.032 |
| 6 | 0.718 | 0.906 | 1.134 | 1.440 | 1.943 | 2.447 | 3.143 | 3.707 |
| 7 | 0.711 | 0.896 | 1.119 | 1.415 | 1.895 | 2.365 | 2.998 | 3.499 |
| 8 | 0.706 | 0.889 | 1.108 | 1.397 | 1.860 | 2.306 | 2.896 | 3.355 |
| 9 | 0.703 | 0.883 | 1.100 | 1.383 | 1.833 | 2.262 | 2.821 | 3.250 |
| 10 | 0.700 | 0.879 | 1.093 | 1.372 | 1.812 | 2.228 | 2.764 | 3.169 |
| 11 | 0.697 | 0.876 | 1.088 | 1.363 | 1.796 | 2.201 | 2.718 | 3.106 |
| 12 | 0.695 | 0.873 | 1.083 | 1.356 | 1.782 | 2.179 | 2.681 | 3.055 |
| 13 | 0.694 | 0.870 | 1.079 | 1.350 | 1.771 | 2.160 | 2.650 | 3.012 |
| 14 | 0.692 | 0.868 | 1.076 | 1.345 | 1.761 | 2.145 | 2.624 | 2.977 |
| 15 | 0.691 | 0.866 | 1.074 | 1.341 | 1.753 | 2.131 | 2.602 | 2.947 |
| 16 | 0.690 | 0.865 | 1.071 | 1.337 | 1.746 | 2.120 | 2.583 | 2.921 |
| 17 | 0.689 | 0.863 | 1.069 | 1.333 | 1.740 | 2.110 | 2.567 | 2.898 |
| 18 | 0.688 | 0.862 | 1.067 | 1.330 | 1.734 | 2.101 | 2.552 | 2.878 |
| 19 | 0.688 | 0.861 | 1.066 | 1.328 | 1.729 | 2.093 | 2.539 | 2.861 |
| 20 | 0.687 | 0.860 | 1.064 | 1.325 | 1.725 | 2.086 | 2.528 | 2.845 |
| 21 | 0.686 | 0.859 | 1.063 | 1.323 | 1.721 | 2.080 | 2.518 | 2.831 |
| 22 | 0.686 | 0.858 | 1.061 | 1.321 | 1.717 | 2.074 | 2.508 | 2.819 |
| 23 | 0.685 | 0.858 | 1.060 | 1.319 | 1.714 | 2.069 | 2.500 | 2.807 |
| 24 | 0.685 | 0.857 | 1.059 | 1.318 | 1.711 | 2.064 | 2.492 | 2.797 |
| 25 | 0.684 | 0.856 | 1.058 | 1.316 | 1.708 | 2.060 | 2.485 | 2.787 |
| 26 | 0.684 | 0.856 | 1.058 | 1.315 | 1.706 | 2.056 | 2.479 | 2.779 |
| 27 | 0.684 | 0.855 | 1.057 | 1.314 | 1.703 | 2.052 | 2.473 | 2.771 |
| 28 | 0.683 | 0.855 | 1.056 | 1.313 | 1.701 | 2.048 | 2.467 | 2.763 |
| 29 | 0.683 | 0.854 | 1.055 | 1.311 | 1.699 | 2.045 | 2.462 | 2.756 |
| 30 | 0.683 | 0.854 | 1.055 | 1.310 | 1.697 | 2.042 | 2.457 | 2.750 |
| 40 | 0.681 | 0.851 | 1.050 | 1.303 | 1.684 | 2.021 | 2.423 | 2.704 |
| 60 | 0.679 | 0.848 | 1.046 | 1.296 | 1.671 | 2.000 | 2.390 | 2.660 |
| 120 | 0.677 | 0.845 | 1.041 | 1.289 | 1.658 | 1.980 | 2.358 | 2.617 |
| ∞ | 0.674 | 0.842 | 1.036 | 1.282 | 1.645 | 1.960 | 2.326 | 2.576 |

Exemple

Aquest exemple tracta un problema en el qual es posen en pràctica totes les fórmules presentades dues pàgines enrere. Amb la seva senzillesa, es pretén facilitar el procés de comprensió i assimilació de la informació anterior. Suposem que es vol determinar el pes d'un mineral. Per fer-ho, vuit persones han mesurat, amb balances electròniques i cadascuna de forma independent, la massa d'aquest. La taula següent mostra els resultats obtinguts:

| Núm. d'enregistrament | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Pes (g) | 12'43 | 12'45 | 12'44 | 12'43 | 12'44 | 12'42 | 12'45 | 14'32 |

Volem obtenir un interval de confiança amb un grau de confiança del 95%. El primer que cal calcular primer, és, doncs, la mitjana aritmètica del resultats.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^k x_i f_i}{N} \rightarrow \bar{x} = \frac{12'43+12'45+12'44+12'43+12'44+12'42+12'45+14'32}{8} = 12'67$$

Ara calculem la desviació típica.

| x_i | x_i^2 |
|--------------|---------|
| 12'43 | 154'50 |
| 12'45 | 155'00 |
| 12'44 | 154'75 |
| 12'43 | 154'50 |
| 12'44 | 154'75 |
| 12'44 | 154'75 |
| 12'45 | 155'00 |
| 14'32 | 205'06 |
| $\sum x_i^2$ | |
| = 1288'31 | |

$$\text{Var}(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k x_i^2 f_i}{N} - \bar{x}^2} \rightarrow \text{Var}(x) =$$

$$\sqrt{\frac{1288'31}{8} - 160'53} = 0'7132$$

Seguidament, consultem la taula de distribució de t-student per esbrinar el valor de t. Cal recordar que tenim 7 graus de llibertat. Com que és un nombre de dades petit, li restarem una unitat alhora de fer els càlculs: ($r = N-1 = 8-1 = 7$). Volem un grau de confiança del 95%.

| r | 0.75 | 0.80 | 0.85 | 0.90 | 0.95 | 0.975 | 0.99 | 0.995 |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| 1 | 1.000 | 1.376 | 1.963 | 3.078 | 6.314 | 12.706 | 31.821 | 63.657 |
| 2 | 0.816 | 1.061 | 1.386 | 1.886 | 2.920 | 4.303 | 6.965 | 9.925 |
| 3 | 0.765 | 0.978 | 1.250 | 1.638 | 2.353 | 3.182 | 4.541 | 5.841 |
| 4 | 0.741 | 0.941 | 1.190 | 1.533 | 2.132 | 2.776 | 3.747 | 4.604 |
| 5 | 0.727 | 0.920 | 1.156 | 1.476 | 2.015 | 2.571 | 3.365 | 4.032 |
| 6 | 0.718 | 0.906 | 1.134 | 1.440 | 1.943 | 2.447 | 3.143 | 3.707 |
| 7 | 0.711 | 0.896 | 1.119 | 1.415 | 1.895 | 2.365 | 2.998 | 3.499 |
| 8 | 0.706 | 0.889 | 1.108 | 1.397 | 1.860 | 2.306 | 2.896 | 3.355 |
| 9 | 0.703 | 0.883 | 1.100 | 1.383 | 1.833 | 2.262 | 2.821 | 3.250 |
| 10 | 0.700 | 0.879 | 1.093 | 1.372 | 1.812 | 2.228 | 2.764 | 3.169 |

Finalment, ja coneixem totes les dades per calcular els paràmetres que limiten l'interval de confiança.

$$\mathbf{I} = \left[\bar{x} - \frac{t \times S}{\sqrt{N}}, \bar{x} + \frac{t \times S}{\sqrt{N}} \right] \rightarrow \mathbf{I} = \left[12'67 - \frac{1'895 \times 0'7132}{\sqrt{8}}, 12'67 + \frac{1'895 \times 0'7132}{\sqrt{8}} \right] \rightarrow$$
$$\mathbf{I} = [12'19, 13'15]$$

L'interval de confiança és, doncs, $\mathbf{I} = [12'19, 13'15]$; és a dir, hi ha un 95% de probabilitats de que el valor real de la massa del mineral sigui més petit que 12'19g i més gran que 13'15g.

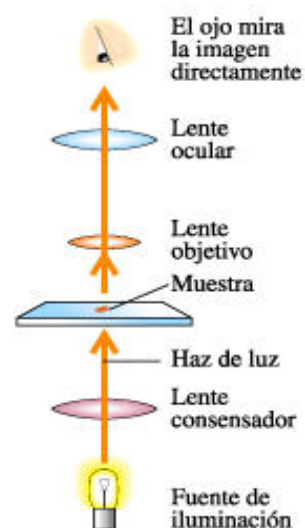
Annex 3. El microscopi òptic

El mètode del moviment brownià requereix l'ús d'un microscopi òptic. Per utilitzar aquesta eina de forma correcta es requereixen tot un conjunt de coneixements tècnics no gaire complexos però sí força importants. Anteriorment ja s'han descrit els procediments que cal seguir per utilitzar correctament un microscopi òptic. En aquest annex, doncs, ens centrarem en explicar altres aspectes de caràcter més secundari dels microscopis òptics, com ara el funcionament, quins són els seus elements més importants.

Història i funcionament dels microscopis òptics

Els primers prototips de microscopis òptics van aparèixer cap al segle XVII gràcies als treballs que Van Leeuwenhoek, un ric comerciant holandès. Mitjançant diferents tipus de lents, va ésser capaç d'elaborar microscopis senzills que van arribar a tenir fins a 200 augments.

Els microscopis òptics d'avui en dia són una mica més complexos i poden arribar fins als 1000 augments. El seu poder de resolució és de $0,2\mu\text{m}$. Són uns sistemes constituïts per dues lents d'augment, anomenades ocular i objectiu, que fan servir els fotons de la llum visible per fer observacions. Els rajos de llum lluminosos, que precedeixen d'una font d'il·luminació, travessen l'aire, incideixen sobre la preparació i després arriben a la lent frontal de l'objectiu passant per l'aire. Aquesta lent frontal recull els rajos lluminosos, que han sofert múltiples refraccions, i en projectar-los cap a l'ocular, augmenta la imatge de l'objecte rebuda i, després, l'ocular la torna a augmentar. Vegeu la imatge I.



Imatge I: Recorregut de la llum a través d'un microscopi òptic.

Elements d'un microscopi òptic

Els elements que formen els microscopis òptics actuals s'acostumen a classificar, segons la seva funció, en tres grups diferents: la part mecànica, encarregada sobretot de sostenir tota l'estructura; la part òptica, formada pels elements més importants del microscopi (l'ocular, l'objectiu i el condensador) i fonamental per la formació de les imatges, i, finalment, els elements d'il·luminació, que són els encarregats d'aportar la llum necessària per observar la mostra. A continuació explicarem quins són els elements més importants de cadascuna d'aquestes parts.

Part mecànica

- **El peu:** suport gruixut, generalment de forma rectangular, sobre el qual descansa tota l'estructura del microscopi. Acostuma a presentar al seu interior un sistema d'il·luminació elèctrica.
- **El braç:** és una peça metàl·lica que uneix el peu amb la part superior. És el lloc adequat per on agafar el microscopi.
- **La platina:** és una peça fixada al braç generalment quadrada i de color negre sobre la qual es col·loca la preparació. És possible desplaçar la platina mitjançant unes rodes anomenades comandaments d'enfocament.
- **El revòlver portaobjectius:** és una peça metàl·lica circular que presenta roscats als diferents objectius, que acostumen a ser tres o quatre. La seva forma permet que canviar molt fàcilment d'objectiu.

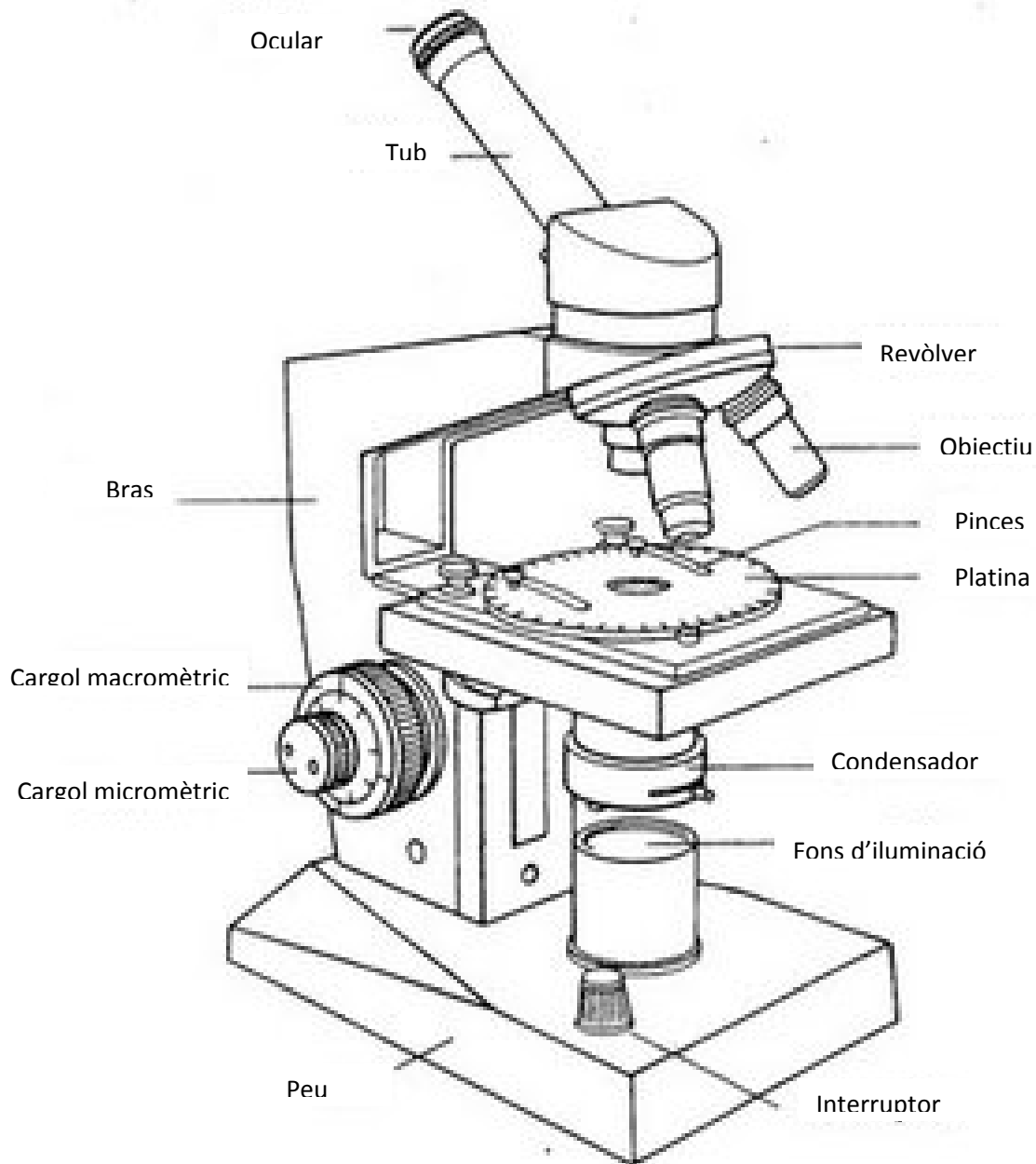
- **El tub:** és una peça metàl·lica, cilíndrica i buida, encaixada al prisma, que presenta a l'ocular enganxat al seu extrem. L'ocular és pot canviar fàcilment ja que no s'enrosca, sinó que s'introdueix.
- **Els dispositius d'enfoc:** són dos cargols coaxials situats a ambdós costats de la base del braç. Permeten situar la platina més a prop i més lluny de l'objectiu. Hi ha dos diferents: el macromètric, que és de pas ràpid, i el micromètric, que permet realitzar un ajust amb més precisió de l'enfocament.

Part òptica

- **Els objectius:** són les lents que van roscades sobre el revòlver portaobjectius. El seu nombre d'augment, que generalment depèn de la mida de la lent frontal (com més petita és, més augment té la l'objectiu), apareix indicat al damunt seu. Són les lents principals del microscopi, ja que són les encarregades de formar la imatge augmentada. La qualitat d'un microscopi ve donada, per tant, per la qualitat dels seus objectius.
- **Els oculars:** són les lents situades a l'extrem superior del tub i s'encarreguen d'augmentar una altra cop la imatge formada per l'objectiu. L'observador ha de mirar la preparació a través d'aquestes lents. Igual que els objectius, porten gravat a la part superior el nombre d'augment que utilitzen.
- **El condensador:** és l'element òptic encarregat d'il·luminar la preparació correctament. Per fer-ho, presenta unes lents que concentren tots els rajos de llum que arriben de la font d'il·luminació cap a la preparació. Normalment presenta, a més, un diafragma semblant al que utilitzen les màquines fotogràfiques, que pot obrir-se i tancar-se gradualment per regular la quantitat de llum que hi entra.

A la pàgina següent, podreu trobar un dibuix esquemàtic d'un microscopi òptic en el qual podreu reconèixer visualment aquests elements.

Les parts del microscopi òptic



| <u>Elements mecànics</u> | <u>Dispositius d'enfocament</u> | <u>Focus d'il·luminació</u> | <u>Elements òptics</u> |
|---|--|---|--|
| El peu El braç La platina El carro mòbil El revòlver El tub portaoculars | El cargol macromètric El cargol micromètric | Font d'il·luminació elèctrica Regulador d'intensitat | Els objectius Els oculars El condensador El diafragma |

Annex 4. Propietats de l'aigua en funció de la seva temperatura

Propietats del aigua en funció de la seva temperatura

| Temperatura T [°C] | Densidad pagua [Kg/m ³] | Calor específico Cp [J/kg.K] | Viscosidad μ [Pa.s] | Tensión superficial. σ _{agua} [N/m] |
|--------------------------|---|------------------------------------|---------------------------|--|
| 0 | 999.8 | 4217.6 | 1793x10 ⁻⁶ | 0.07564 |
| 10 | 999.7 | 4192.1 | 1307x10 ⁻⁶ | 0.07423 |
| 20 | 998.2 | 4181.8 | 1002x10 ⁻⁶ | 0.07275 |
| 30 | 995.6 | 4178.4 | 797.7x10 ⁻⁶ | 0.07120 |
| 40 | 992.2 | 4178.5 | 653.2x10 ⁻⁶ | 0.06960 |
| 50 | 988.1 | 4180.6 | 547.0x10 ⁻⁶ | 0.06794 |
| 60 | 983.2 | 4184.3 | 466.5x10 ⁻⁶ | 0.06624 |
| 70 | 977.8 | 4189.5 | 404.0x10 ⁻⁶ | 0.06447 |
| 80 | 971.8 | 4196.3 | 354.4x10 ⁻⁶ | 0.06267 |
| 90 | 965.3 | 4205.0 | 314.5x10 ⁻⁶ | 0.06080 |
| 100 | 958.4 | 4215.9 | 281.8x10 ⁻⁶ | 0.05891 |

Annex 5. Taula de pressió de vapor

| Temperatura °C | Pressió (mmHg) |
|----------------|----------------|
| 0,0 | 4,6 |
| 5,0 | 6,5 |
| 10,0 | 9,2 |
| 12,5 | 10,9 |
| 15,0 | 12,8 |
| 15,5 | 13,2 |
| 16,0 | 13,6 |
| 16,5 | 14,1 |
| 17,0 | 14,5 |
| 17,5 | 15,0 |
| 18,0 | 15,5 |
| 18,5 | 16,0 |
| 19,0 | 16,5 |
| 19,5 | 17,0 |
| 20,0 | 17,5 |
| 20,5 | 18,1 |
| 21,0 | 18,6 |
| 21,5 | 19,2 |
| 22,0 | 19,8 |
| 22,5 | 20,4 |
| 23,0 | 21,1 |
| 23,5 | 21,7 |
| 24,0 | 22,4 |
| 24,5 | 23,1 |
| 25,0 | 23,8 |
| 26,0 | 25,2 |
| 27,0 | 26,7 |
| 28,0 | 28,3 |
| 29,0 | 30,0 |
| 30,0 | 31,8 |
| 35,0 | 42,2 |
| 40,0 | 55,3 |
| 50,0 | 92,5 |
| 60,0 | 149,4 |
| 70,0 | 233,7 |
| 80,0 | 355,1 |
| 90,0 | 525,8 |
| 95,0 | 633,9 |
| 100,0 | 760,0 |

Annex 6. Determinació experimental de la constant d'Avogadro a partir del recompte d'àtoms de ^{28}Si .

Aquest annex és una traducció d'un article científic de publicació molt recent en el qual es descriu un mètode utilitzat per científics professionals per determinar el valor de la constant d'Avogadro. Aquest mètode, és, de fet, una versió completa del mètode basat en l'estudi de les estructures cristal·lines. Aquests científics, a diferència de nosaltres, han determinat experimentalment absolutament tots els paràmetres i, a més, amb una exactitud gairebé absoluta. En aquest article es fa ús de conceptes molt complexos.

Abstract

La constant d'Avogadro relaciona les propietats atòmiques i macroscòpiques de la matèria. En aquest article presentarem un nou mètode per a la determinació del valor d'aquesta constant a partir del recompte del nombre d'àtoms presents en dues esferes quasi perfectes de silici formades de forma gairebé exclusiva per àtoms d'isòtop ^{28}Si . Aquest experiment va permetre determinar la massa molar del silici amb una exactitud sense precedents. El valor de la constant d'Avogadro obtingut ($N_A=6,02214084114 \times 10^{23}$) actualment representa la dada experimental més idònia per elaborar la necessària redefinició de quilogram.

Introducció

Una de les millors maneres que hi ha per posar a prova els nostres coneixements i les capacitats de la nostra tecnologia consisteix en intentar determinar, amb la màxima exactitud possible, els valors de les constants fonamentals. La determinació de la constant d'Avogadro representa un repte singular, de caràcter més èpic, doncs relaciona les dades macroscòpiques amb les microscòpiques. Una altra motivació important per a la realització d'aquest experiment ha estat la necessitat d'establir una nova definició de la magnitud quilogram. Com que sembla ser que aquesta nova definició estarà molt estretament relacionada amb la constant de Planck, el món científic està molt interessat en obtenir tantes vies independents per esbrinar el valor d'aquesta com sigui possible i, precisament, la determinació de la constant d'Avogadro és una d'aquestes vies.

El grau d'incertesa del quilogram(kg) és en principi igual a 0, però recentment s'ha comprovat que el cos utilitzar com a referència universal per a aquesta magnitud varia la seva massa en aproximadament $50\mu\text{g}$ cada 100 anys. Tal i com ja s'ha dit anteriorment, actualment s'estan desenvolupant diversos experiments per solucionar aquest problema. Els més prometedors són dos: el primer consisteix en la Balança de Watt, i pretén calcular el valor de la constant de Planck a partir de la comparació virtual d'energies mecàniques i elèctriques. El segon és el presentant en aquest article i consisteix en la determinació del valor de la constant d'Avogadro a partir del recompte presents en dues quasi perfectes esferes de silici d'una massa d'1kg cadascuna. L'element utilitzat és el silici, perquè, a part de ser un dels materials millor coneguts, es pot manipular fàcilment per obtenir mostres pures formades per cristall perfectes.

Des del 1998, s'ha observat experimentalment l'existència d'un error relatiu del $1,2 \times 10^{-6}$ al comparar els valors de les constant de Planck i d'Avogadro. Aleshores es va atribuir aquest error a l'existència de diferents isòtops dins de les estructures cristal·lines del silici. Aquest experiment es va idear amb l'objectiu d'evitar aquest error, i per aquesta raó les mostres de silici estudiades foren fortament enriquides amb àtoms d'isòtop ^{28}Si .

El projecte començà al 2004 amb l'enriquiment per centrifugació del gas tetrafluorur de silici (SiF_4) a la Oficina Central de Disseny de Maquinària de Construcció a Sant Petersburg.

Posteriorment, un sistema policristal·lí en forma d'esfera amb una massa de 5kg fou creat mitjançant un procés químic de deposició vaporosa al Institut Químic de Substàncies d'Alta Puresa de l'Acadèmia Russa de les Ciències, situat a la ciutat de Nizhny-Novgorod (vegeu la imatge 1). Paral·lelament, una altra esfera en principi idèntica fou creada pel Institut de Creació de Cristalls a Berlín. Aquestes esferes varen ser anomenades AVO28-S5 i AVO28-S8, respectivament. Finalment, les dues esferes foren polides al Centre Austràlia per a la Precisió Òptica.



Imatge 1: Procés de purificació d'una de les dues esferes de silici fabricades expressament per a aquest experiment.

Anàlisi de les esferes

El valor de la constant d'Avogadro va ser determinat matemàticament a partir de la fórmula següent:

$$N_A = \frac{\text{Nombre de partícules}}{\text{Nombre de mols}} = \frac{nM}{\rho_0 a_0^3}$$

}

n: Nombre d'àtoms en una cel·la unitat de silici

M: Massa molar del silici

ρ_0 : Densitat del silici

a_0^3 : Volum d'una cel·la unitat

A partir de l'estudi de les dues esferes de silici foren determinades totes les dades requerides per poder aplicar aquesta fórmula. El nostre objectiu era, doncs, aconseguir aquestes quatre dades amb el màxim grau d'exactitud possible per tals d'obtenir bons resultats. En els paràgrafs següents s'explicarà detalladament com ho varem fer, però abans cal fer referència a l'aspecte més important del nostre experiment: les precaucions que varem prendre per assegurar-nos de la puresa de les esferes.

Imperfecions

La superfície de les esferes fou purificada mitjançant la tècnica de la zona fosa que consisteix en fer fondre, generalment mitjançant càrregues electromagnètiques, la superfície d'un metall per tals d'afavorir la seva recristal·lització. Inevitablement, l'ús d'aquesta tècnica va comportar l'acumulació de petites agrupacions d'àtoms de carboni, d'oxigen i de bor, a més del sorgiment de petits espais buits, a la superfície de les esferes. Aquest fet, lògicament, va comportar una variació de la massa de les dues mostres. Per tals d'aplicar les correccions necessàries, les concentracions d'aquestes imperfecions foren mesurades mitjançant tècniques de raigs infrarojos i estudiant mitjançant càlculs espectroscòpics la vida dels positrons. Amb els resultats obtinguts es va elaborar la taula següent (els buits amb diàmetres superiors als 40nm foren exclosos).

| Defecte | AVO28-S5 | AVO28-S8 | XINT |
|--------------|----------|----------|----------|
| Carboni | 0,43(9) | 1,85(20) | 0,99(12) |
| Oxigen | 0,21(7) | 0,40(13) | 0,36(4) |
| Bor | 0,014(5) | 0,04(2) | 0,005(2) |
| Espais buits | 0,33(10) | 0,33(10) | 0,33(10) |

Concentració de punts defectuosos a les esferes de silici i en l'interferòmetre de raigs X (XINT) (llegiu més endavant). Unitat: 10^{15}cm^{-3} .

Estudi de les propietats geomètriques de les esferes

A partir de material de les dues esferes, es va crear un interferòmetre de raigs X (objecte capaç de mesurar amb gran precisió longituds d'ones). Així doncs, a partir de les dades de la taula anterior i mitjançant la fórmula següent, es van poder calcular les variacions que les contaminacions havien causat en superfície de les esferes:

$$a(S) = (1 + \sum_i \beta_i \Delta N_i) \times a_0(\text{XINT})$$

$a(S)$: Àrea de l'esfera analitzada
 $a_0(\text{XINT})$: Paràmetre geomètric del interferòmetre
 i : Concentració de punts defectuosos (Vegeu la taula anterior)
 β_i : Coeficient de defecte
 $(\beta_C = -6,9(5) \times 10^{24} \text{cm}^3, \beta_O = -4,4(2) \times 10^{24} \text{cm}^3 \text{ i } \beta_B = -5,6(2) \times 10^{24} \text{cm}^3)$
 ΔN_i : Diferència de concentració de defectes entre l'esfera i l'interferòmetre

| Paràmetres | Unitat | AVO28-S5 | AVO28-S8 |
|--------------------------------------|---------------|----------|----------|
| Massa de la superfície de l'esfera | μg | 224(15) | 215(15) |
| Grossor de la superfície de l'esfera | nm | 2,91(30) | 2,72(28) |
| Dèficit de massa | μg | 9,3(6) | 23,7(4) |

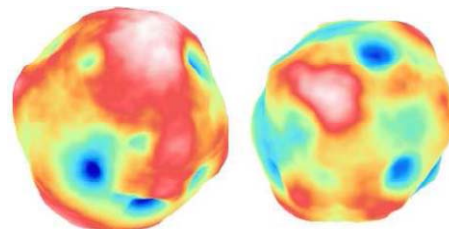
Un cop aplicades les correccions, doncs, es va poder determinar experimentalment les proporcions de les estructures cristal·lines que composaven les dues esferes mitjançant tècniques basades en els treballs de Max von Laue. Un cop fets els càlculs, es va constatar que tots els valors obtinguts en cada esfera coincidien amb les de l'altra en les xifres significatives. Cap prova realitzada donà indicis d'imperficcions a l'interior de les esferes.

Determinació de la superfície de les esferes

Les esferes de silici, tal i com s'havia previst, estaven recobertes per una capa d'òxid. Un conjunt d'anàlisis basats en cristal·lografies de raigs X varen indicar, a més, la presència de contaminacions imprevistes de silicats de coure i de níquel a les superfícies de les esferes. Per tals d'eliminar aquestes contaminacions, doncs, es va aplicar un complex tractament químic a les dues esferes i, de nou, mitjançant tècniques de raigs X, es va determinar la superfície de cadascuna de les esferes.



Imatge II: Mapes topogràfics del grossor de les capes de diòxid de silici (SiO_2). L'esfera de l'esquerra és l'anomenada AVO28-S5 i la de la dreta, AVO28-S8. El color blau indica un gruix de 2,0nm i el groc de 4,5nm.



Imatge III: Mapes topogràfics del diàmetre de les esferes de silici. Els colors indiquen les desviacions respecte al valor mitjà del diàmetre. El color blau més fosc indica una desviació de -63nm i el roig una de 37nm. La distància mitjana de pol a pol a l'esfera de l'esquerra (AVO28-S5) és igual a 97nm, mentre que a la de la dreta (AVO28-S8) és de 89nm.

Els dos apartats següents estan destinats a explicar com foren calculats els valors de la massa i del volum de les esferes de silici. Dividint, doncs, la primera d'aquestes dades entre la segona, s'obtingué un valor molt precís de la densitat del silici.

Determinació de la massa de les esferes

La massa de les esferes fou determinada mitjançant una balança electrònica de gran precisió. Posteriorment, les dades foren corregides aplicant les variacions imprevistes causades per la contaminació de les esferes. El valor d'aquestes variacions fou calculat mitjançant la fórmula següent:

$$\Delta m = V \sum_i (m_i - m_{28}) N_i$$

$\left\{ \begin{array}{l} \Delta m: \text{Dèficit de massa causa per les contaminacions} \\ V: \text{Volum de l'esfera de silici} \\ m_{28}: \text{Massa del } ^{28}\text{Si} \\ m_i: \text{Suma de les masses del } ^{28}\text{Si i de les imperfeccions} \\ N_i: \text{Concentració d'imperfeccions (vegeu la taula 2 de la pàgina anterior).} \end{array} \right.$

Els resultats obtinguts foren comparats amb els prototips Pt-Ir del Institut Nacional de Metrologia del Japó, del Institut Alemany de la República Federal d'Alemanya i de l'Oficina Internacional de Pesos i Masses. Els resultats foren excel·lents i demostraren que les mesures realitzades tenien un grau de precisió de fins a 5 μ g. Podeu consultar el seu valor a la taula que apareix a la pàgina següent.

Determinació del volum de les esferes

El volum de les esferes fou determinat mitjançant tècniques d'interferometria òptica. Per tals d'aconseguir uns resultats exactes, cada prova es realitzà dues vegades amb dos interferòmetres de Fizeau diferents. Com que les esferes eren gairebé perfectes, el volum de l'esfera hauria de ser igual a quatre terços de πr^3 . Així doncs, es va realitzar la mesura dels diàmetre diverses vegades i es calculà la mitjana. Vegeu les figures II i III. Com podeu veure, la superfície tenia un caràcter relativament irregular que podia afectar negativament als resultats. Mitjançant diverses correccions realitzades a partir de l'estudi de la reflexió de la llum en aquestes esferes l'error fou minimitzat.

Determinació de la massa molar del silici

La massa molar del silici es calcula mitjançant la fórmula següent:

$$M = \sum_n M(^n\text{Si})x_n = \frac{\sum_n M(^n\text{Si})R_{\frac{n}{m}}}{\sum_n R_{\frac{n}{m}}}$$

$\left. \begin{array}{l} n: \text{massa molar del isòtop } ^n\text{Si.} \\ x_n: \text{fracció molar del isòtop } ^n\text{Si.} \\ R_{n/m}: x_n/x_m \end{array} \right\}$

El mètode més habitual per separar els isòtops que componen una mostra d'un element és a partir de l'estudi del espectre d'emissió del tetraclorur de silici (SiF₄). Un anàlisi realitzat a la Universitat de Varsòvia basat en l'estudi de l'espectre d'absorció atòmica electrotèrmica del silici va evidenciar que per cada 45 mil·ligrams de cristall d'un determinat isòtop de silici que es sintetitzava apareixien 7 micrograms de silici natural (amb isòtops diferents). Aquest error era massa gran com per poder utilitzar aquest mètode en el nostre experiment. L'Institut de Recursos Minerals de la Acadèmia Xinesa de la Ciència Xinès realitzà també un anàlisi semblant, però en comptes d'utilitzar tetraclorur de silici (SiF₄) va emprar pentafluorur de brom (BrF₅). No hi hagueren sorpreses i la contaminació de les mostres continuà sent un problema.

Així doncs, l'obtenció de dues mostres formades exclusivament per només un determinat tipus d'isòtop va resultar ser un gran repte.

Per superar aquestes dificultats es va haver de dissenyar un nou mètode. Aquest nou mètode permet determinar la composició isotòpica exacta d'una substància – i, conseqüentment, la massa molar – d'un cristall de silici a partir de l'estudi de la seva composició isotòpica. Mitjançant uns procediments força complexos, es determina la proporció d'àtoms de ^{30}Si i ^{29}Si que hi ha a la mostra i, així doncs, es pot determinar indirectament el nombre d'àtoms de ^{28}Si . De forma paral·lela l'Institut de Física Microscòpica de l'Acadèmia Russa de la Ciència va determinar la mateixa dada a partir de l'estudi del espectre d'un ió secundari. Aquestes dos mètodes s'anomenen, respectivament, Multicollector Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer (MC-ICP-MS) i Secondary Ion Mass spectrometre (SIMS).

Determinació del N_A

Finalment, ara que ja hem obtinguts totes les dades experimentals que necessitàvem (les quals teniu arreplegades a la taula següent), estem en posició de calcular la constant d'Avogadro. Vegeu la darrera fila de la taula següent.

| Paràmetres | Unitat | AVO28-S5 | AVO28-S8 |
|---------------------|----------------------------|-----------------|-----------------|
| Superfície (A0) | pm | 543,0996234(19) | 543,0996184(19) |
| Massa (m) | g | 1000,087559(15) | 1000,064540(15) |
| Volum (V) | cm ³ | 431,059060(12) | 431,049112(12) |
| Densitat (ρ) | kg/m ³ | 2320,070847(74) | 2320,070990(76) |
| Massa molar (M) | g/mol | 27,97697017(16) | 27,97697025(19) |
| N_A | 10^{23} mol^{-1} | 6,02214093(21) | 6,02214075(22) |

Així doncs, fent la mitjana d'aquests dos valors, podem afirmar que el valor de la constant d'Avogadro és igual a :

$$N_A = 6,02214084(18) \times 10^{23} \text{ g/mol.}$$

Amb un error relatiu del $3 \times 10^{-8} \%$.

Fichas Internacionales de Seguridad Química

ACIDO ESTEARICO(puro)

ICSC: 0568



ACIDO ESTEARICO(puro)
 Acido n-octanodecanoico
 $C_{18}H_{36}O_2/CH_3(CH_2)_{16}COOH$
 Masa molecular: 284.5

N° CAS 57-11-4
 N° RTECS W12800000
 N° ICSC 0568

| TIPOS DE PELIGRO/ EXPOSICION | PELIGROS/ SINTOMAS AGUDOS | PREVENCION | PRIMEROS AUXILIOS/ LUCHA CONTRA INCENDIOS |
|--|---|--|--|
| INCENDIO | Combustible. | Evitar las llamas. | Polvo, agua pulverizada, espuma, dióxido de carbono. |
| EXPLOSION | | | |
| EXPOSICION | | -EVITAR LA DISPERSION DEL POLVO! | |
| • INHALACION | | Extracción localizada. | Aire limpio, reposo. |
| • PIEL | | Guantes protectores. | Quitar las ropas contaminadas. Aclarar y lavar la piel con agua y jabón. |
| • OJOS | | Gafas de protección de seguridad. | Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad), y proporcionar asistencia médica. |
| • INGESTION | | No comer, ni beber, ni fumar durante el trabajo. | Enjuagar la boca. Provocar el vómito (-UNICAMENTE EN PERSONAS CONSCIENTES!). |
| DERRAMAS Y FUGAS | ALMACENAMIENTO | ENVASADO Y ETIQUETADO | |
| Barrer la sustancia derramada e introducirla en un recipiente; si fuera necesario, humedecer el polvo para evitar su dispersión. | Mantener bien cerrado. | | |
| VEASE AL DORSO INFORMACION IMPORTANTE | | | |
| ICSC: 0568 | Preparada en el Contexto de Cooperación entre el IPCS y la Comisión de las Comunidades Europeas © CCE, IPCS, 1994 | | |

Fichas Internacionales de Seguridad Química

ACIDO ESTEARICO(puro)

ICSC: 0568

D
A
T
O
S
I
M
P
O
R
T
A
N
T
E
S

ESTADO FISICO; ASPECTO

Cristales blancos o polvo, de olor característico.

PELIGROS FISICOS

Es posible la explosión del polvo si se encuentra mezclado con el aire en forma pulverulenta o granular.

PELIGROS QUIMICOS

La sustancia es un ácido débil. Reacciona con bases, oxidantes y agentes reductores.

LIMITES DE EXPOSICION

TLV (como TWA) (como estearatos): 10 mg/m³ A4 (ACGIH 1997-1998).

VIAS DE EXPOSICION

La sustancia se puede absorber por inhalación del aerosol y por ingestión.

RIESGO DE INHALACION

La evaporación a 20°C es despreciable; sin embargo, se puede alcanzar rápidamente una concentración molesta de partículas en el aire cuando se dispersa.

EFFECTOS DE EXPOSICION DE CORTA DURACION

La inhalación del polvo puede originar neumonitis química.

EFFECTOS DE EXPOSICION PROLONGADA O REPETIDA

PROPIEDADES FISICAS

Punto de ebullición (se descompone): 376°C
Punto de fusión: 69-72°C
Densidad relativa (agua = 1): 0.94-0.83
Solubilidad en agua: Ninguna.

Presión de vapor, Pa a 174°C: 133
Densidad relativa de vapor (aire = 1): 9.8
Punto de inflamación: 196°C
Temperatura de autoignición: 395°C

DATOS AMBIENTALES

NOTAS

Los efectos de la exposición de ésta sustancia no han sido investigados.

Código NFPA: H 1; F 1; R 0;

INFORMACION ADICIONAL

FISQ: 5-004 ACIDO ESTEARICO(puro)

ICSC: 0568

ACIDO ESTEARICO(puro)

© CCE, IPCS, 1994

NOTA LEGAL IMPORTANTE:

Ni la CCE ni la IPCS ni sus representantes son responsables del posible uso de esta información. Esta ficha contiene la opinión colectiva del Comité Internacional de Expertos del IPCS y es independiente de requisitos legales. La versión española incluye el etiquetado asignado por la clasificación europea, actualizado a la vigésima adaptación de la Directiva 67/548/CEE traspuesta a la legislación española por el Real Decreto 363/95 (BOE 5.6.95).

Fichas Internacionales de Seguridad Química

ACIDO SULFURICO

ICSC: 0362



ACIDO SULFURICO

Aceite de vitriolo

H_2SO_4

Masa molecular: 98.1

Nº CAS 7664-93-9
 Nº RTECS WS5600000
 Nº ICSC 0362
 Nº NU 1830
 Nº CE 016-020-00-8



| TIPOS DE PELIGRO/ EXPOSICION | PELIGROS/ SINTOMAS AGUDOS | PREVENCION | PRIMEROS AUXILIOS/ LUCHA CONTRA INCENDIOS |
|------------------------------|---|---|---|
| INCENDIO | No combustible. Muchas reacciones pueden producir incendio o explosión. Desprende humos (o gases) tóxicos o irritantes en caso de incendio. | NO poner en contacto con sustancias inflamables. NO poner en contacto con combustibles. | NO utilizar agua. En caso de incendio en el entorno: polvo, AFFF, espuma, dióxido de carbono. |
| EXPLOSION | Riesgo de incendio y explosión en contacto con bases, sustancias combustibles, oxidantes, agentes reductores, agua. | | En caso de incendio: mantener fríos los bidones y demás instalaciones rociando con agua pero NO en contacto directo con agua. |
| EXPOSICION | | ¡EVITAR LA FORMACION DE NIEBLA DEL PRODUCTO! ¡EVITAR TODO CONTACTO! | ¡CONSULTAR AL MEDICO EN TODOS LOS CASOS! |
| • INHALACION | Corrosivo. Sensación de quemazón, tos, dificultad respiratoria, dolor de garganta. | Ventilación, extracción localizada o protección respiratoria. | Aire limpio, reposo, posición de semiincorporado, respiración artificial si estuviera indicada y proporcionar asistencia médica. |
| • PIEL | Corrosivo. Dolor, enrojecimiento, quemaduras cutáneas graves. | Guantes protectores y traje de protección. | Quitar las ropas contaminadas, aclarar la piel con agua abundante o ducharse y proporcionar asistencia médica. |
| • OJOS | Corrosivo. Dolor, enrojecimiento, quemaduras profundas graves. | Pantalla facial o protección ocular combinada con la protección respiratoria. | Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad) y proporcionar asistencia médica. |
| • INGESTION | Corrosivo. Dolor abdominal, sensación de quemazón, vómitos, colapso. | No comer, ni beber, ni fumar durante el trabajo. | Enjuagar la boca, dar a beber agua abundante, NO provocar el vómito y proporcionar asistencia médica. |

DERRAMAS Y FUGAS

ALMACENAMIENTO

ENVASADO Y ETIQUETADO

Recoger el líquido procedente de la fuga en recipientes herméticos, NO absorber en serrín u otros absorbentes combustibles. (Protección personal adicional: traje de protección completa incluyendo equipo autónomo de respiración).

Separado de sustancias combustibles y reductoras, oxidantes fuertes, bases fuertes y alimentos y piensos (véanse Notas). Puede ser almacenado en contenedores de acero inoxidable (véanse Notas).

Envase irrompible; colocar el envase frágil dentro de un recipiente irrompible cerrado. No transportar con alimentos y piensos. símbolo C
R: 35
S: (1/2-)26-30-45
Clasificación de Peligros NU: 8
Grupo de Envasado NU: II
CE:



VEASE AL DORSO INFORMACION IMPORTANTE

ICSC: 0362

Preparada en el Contexto de Cooperación entre el IPCS y la Comisión de las Comunidades Europeas © CCE, IPCS, 1994

Fichas Internacionales de Seguridad Química

ACIDO SULFURICO

ICSC: 0362

D
A
T
O
S
I
M
P
O
R
T
A
N
T
E
S

ESTADO FISICO; ASPECTO

Líquido higroscópico, incoloro, aceitoso e inodoro.

PELIGROS FISICOS

PELIGROS QUIMICOS

Por combustión, formación de humos tóxicos de óxidos de azufre. La sustancia es un oxidante fuerte y reacciona violentamente con materiales combustibles y reductores. La sustancia es un ácido fuerte, reacciona violentamente con bases y es corrosiva para la mayoría de metales más comunes, originando hidrógeno (gas inflamable y explosivo). Reacciona violentamente con agua y compuestos orgánicos con desprendimiento de calor (véanse Notas). Al calentar se forman humos (o gases) irritantes o tóxicos (óxido de azufre).

LIMITES DE EXPOSICION

TLV (como TWA): 1 mg/m³ (ACGIH 1993-1994).

TLV (como STEL): 3 mg/m³ (ACGIH 1993-1994).

VIAS DE EXPOSICION

La sustancia se puede absorber por inhalación del aerosol y por ingestión.

RIESGO DE INHALACION

La evaporación a 20°C es despreciable; sin embargo, se puede alcanzar rápidamente una concentración nociva de partículas en el aire por pulverización.

EFFECTOS DE EXPOSICION DE CORTA DURACION

La sustancia es corrosiva de los ojos, la piel y el tracto respiratorio. Corrosiva por ingestión. La inhalación del aerosol de la sustancia puede originar edema pulmonar (véanse Notas).

EFFECTOS DE EXPOSICION PROLONGADA O REPETIDA

Los pulmones pueden resultar afectados por la exposición prolongada o repetida al aerosol de esta sustancia. Si las exposiciones al aerosol de esta sustancia son repetidas o prolongadas existe el riesgo de presentar erosiones dentales.

PROPIEDADES FISICAS

Punto de ebullición (se descompone): 340°C

Punto de fusión: 10°C

Densidad relativa (agua = 1): 1.8

Solubilidad en agua: Miscible

Presión de vapor, kPa a 146°C: 0.13

Densidad relativa de vapor (aire = 1): 3.4

DATOS AMBIENTALES

Esta sustancia puede ser peligrosa para el ambiente; debería prestarse atención especial a los organismos acuáticos.



NOTAS

Los síntomas del edema pulmonar no se ponen de manifiesto, a menudo, hasta pasadas algunas horas y se agravan por el esfuerzo físico. Reposo y vigilancia médica son por ello, imprescindibles. NO verter NUNCA agua sobre esta sustancia; cuando se deba disolver o diluir, añadirla al agua siempre lentamente. Almacenar en un área con suelo de hormigón resistente a la corrosión.

Ficha de emergencia de transporte (Transport Emergency Card): TEC (R)-10B
Código NFPA: H 3; F 0; R 2; W

INFORMACION ADICIONAL

FISQ: 3-011 ACIDO SULFURICO

ICSC: 0362

ACIDO SULFURICO

© CCE, IPCS, 1994


**NOTA LEGAL
IMPORTANTE:**

Ni la CCE ni la IPCS ni sus representantes son responsables del posible uso de esta información. Esta ficha contiene la opinión colectiva del Comité Internacional de Expertos del IPCS y es independiente de requisitos legales. La versión española incluye el etiquetado asignado por la clasificación europea, actualizado a la vigésima adaptación de la Directiva 67/548/CEE traspuesta a la legislación española por el Real Decreto 363/95 (BOE 5.6.95).

© INSHT

Fichas Internacionales de Seguridad Química

| | |
|-------------------------|-------------------|
| ETANOL (ANHIDRO) | ICSC: 0044 |
| Octubre 2000 | |

| | |
|--|---|
| Alcohol etílico | |
| CAS: 64-17-5 RTECS: KQ6300000 NU: 1170 CE Índice Anexo I: 603-002-00-5 CE / EINECS: 200-578-6 | $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH} / \text{C}_2\text{H}_6\text{O}$ Masa molecular: 46.1 |
|  | |

| TIPO DE PELIGRO / EXPOSICIÓN | PELIGROS AGUDOS / SÍNTOMAS | PREVENCIÓN | PRIMEROS AUXILIOS / LUCHA CONTRA INCENDIOS |
|------------------------------|--|---|--|
| INCENDIO | Altamente inflamable. | Evitar las llamas, NO producir chispas y NO fumar. NO poner en contacto con oxidantes fuertes. | Polvo, espuma resistente al alcohol, agua en grandes cantidades, dióxido de carbono, |
| EXPLOSIÓN | Las mezclas vapor/aire son explosivas. | Sistema cerrado, ventilación, equipo eléctrico y de alumbrado a prueba de explosión. NO utilizar aire comprimido para llenar, vaciar o manipular. | En caso de incendio: mantener fríos los bidones y demás instalaciones rociando con agua. |

| EXPOSICIÓN | PELIGROS AGUDOS / SÍNTOMAS | PREVENCIÓN | PRIMEROS AUXILIOS / LUCHA CONTRA INCENDIOS |
|-------------------|---|---|--|
| Inhalación | Tos. Dolor de cabeza. Fatiga. Somnolencia. | Ventilación, extracción localizada o protección respiratoria. | Aire limpio, reposo. |
| Piel | Piel seca. | Guantes de protección. | Quitar las ropas contaminadas. Aclarar y lavar con agua y jabón. |
| Ojos | Enrojecimiento. Dolor. Quemazón. | Gafas ajustadas de seguridad. | Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad), después proporcionar asistencia médica. |
| Ingestión | Sensación de quemazón. Dolor de cabeza. Confusión. Vértigo. Pérdida del conocimiento. | No comer, ni beber, ni fumar durante el trabajo. | Enjuagar la boca. Proporcionar asistencia médica. |

| | |
|---|---|
| DERRAMES Y FUGAS | ENVASADO Y ETIQUETADO |
| Ventilar. Eliminar toda fuente de ignición. Recoger, en la medida de lo posible, el líquido que se derrama y el ya derramado en recipientes herméticos. Eliminar el residuo con agua abundante. | Clasificación UE Símbolo: F R: 11 S: (2-)7-16 Clasificación NU Clasificación de Peligros NU: 3 Grupo de Envasado NU: II |

| | |
|---|--|
| RESPUESTA DE EMERGENCIA | ALMACENAMIENTO |
| Ficha de emergencia de transporte (Transport Emergency Card): TEC (R)-30S1170. Código NFPA: H 0; F 3; R 0; | A prueba de incendio. Separado de oxidantes fuertes. |

| | | | | | | |
|---|---|---|--|---|--|---|
| IPCS International Programme on Chemical Safety |  WHO |  ILO |  UNEP |  |  MINISTERIO DE TRABAJO E INMIGRACIÓN |  INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD E HIGIENE EN EL TRABAJO |
| Preparada en el Contexto de Cooperación entre el IPCS y la Comisión Europea © IPCS, CE 2005 | | | | | | |

VÉASE INFORMACIÓN IMPORTANTE AL DORSO

Fichas Internacionales de Seguridad Química

ETANOL (ANHIDRO)**ICSC: 0044**

DATOS IMPORTANTES

ESTADO FÍSICO; ASPECTO:

Líquido incoloro, de olor característico.

PELIGROS FÍSICOS:

El vapor se mezcla bien con el aire, formándose fácilmente mezclas explosivas.

PELIGROS QUÍMICOS:

Reacciona lentamente con hipoclorito cálcico, óxido de plata y amoníaco originando peligro de incendio y explosión. Reacciona violentamente con oxidantes fuertes tales como ácido nítrico, nitrato de plata, nitrato de mercurio o perclorato magnésico, originando peligro de incendio y explosión.

LÍMITES DE EXPOSICIÓN:

TLV: 1000 ppm (como TWA), A4 (no clasificable como cancerígeno humano) (ACGIH 2004).
MAK: 500 ppm; 960 mg/m³; Categoría de limitación de pico: II(2),
Cancerígeno: categoría 5, Mutágeno: categoría 5, Riesgo para el embarazo: grupo C (DFG 2004).

VÍAS DE EXPOSICIÓN:

La sustancia se puede absorber por inhalación del vapor y por ingestión.

RIESGO DE INHALACIÓN:

Por evaporación de esta sustancia a 20°C se puede alcanzar bastante lentamente una concentración nociva en el aire.

EFFECTOS DE EXPOSICIÓN DE CORTA DURACIÓN:

La sustancia irrita los ojos. La inhalación de altas concentraciones del vapor puede originar irritación de los ojos y del tracto respiratorio. La sustancia puede afectar al sistema nervioso central.

EFFECTOS DE EXPOSICIÓN PROLONGADA O REPETIDA:

El líquido desengrasa la piel. La sustancia puede afectar al tracto respiratorio superior y al sistema nervioso central, dando lugar a irritación, dolor de cabeza, fatiga y falta de concentración. Ver Notas.

PROPIEDADES FÍSICAS

Punto de ebullición: 79°C

Punto de fusión: -117°C

Densidad relativa (agua = 1): 0,8

Solubilidad en agua: miscible

Presión de vapor, kPa a 20°C: 5,8

Densidad relativa de vapor (aire = 1): 1,6

Densidad relativa de la mezcla vapor/aire a 20°C (aire = 1): 1,03

Punto de inflamación: 13°C c.c.

Temperatura de autoignición: 363°C

Límites de explosividad, % en volumen en el aire: 3.3-19

Coeficiente de reparto octanol/agua como log Pow: -0.32

DATOS AMBIENTALES

NOTAS

El consumo de etanol durante el embarazo puede afectar al feto. La ingesta crónica de etanol puede causar cirrosis hepática. El punto de inflamación de la disolución acuosa al 50% es 24°C. Esta ficha ha sido parcialmente actualizada en abril de 2005: ver Límites de exposición.

INFORMACIÓN ADICIONAL

Límites de exposición profesional (INSHT 2011):

VLA-ED: 1000 ppm; 1910 mg/m³

Notas: Esta sustancia tiene prohibida total o parcialmente su comercialización y uso como fitosanitario y/o biocida.

Nota legal

Esta ficha contiene la opinión colectiva del Comité Internacional de Expertos del IPCS y es independiente de requisitos legales. Su posible uso no es responsabilidad de la CE, el IPCS, sus representantes o el INSHT, autor de la versión española.

Fichas Internacionales de Seguridad Química

HIDRÓXIDO DE SODIO ICSC: 0360 Mayo 2010

CAS: 1310-73-2 Sosa caústica
 NU: 1823 Hidrato de sodio
 CE (Índice Anexo I): 011-002-00-6 Sosa
 CE / EINECS: 215-185-5 NaOH
 Masa molecular: 40.0



| TIPO DE PELIGRO / EXPOSICIÓN | PELIGROS AGUDOS / SÍNTOMAS | PREVENCIÓN | PRIMEROS AUXILIOS / LUCHA CONTRA INCENDIOS |
|------------------------------|--|---|---|
| INCENDIO | No combustible. El contacto con la humedad o con el agua, puede generar calor suficiente para provocar la ignición de materiales combustibles. | NO poner en contacto con el agua. | En caso de incendio en el entorno: usar un medio de extinción adecuado. |
| EXPLOSIÓN | Riesgo de incendio y explosión en contacto con: (ver Peligros Químicos). | NO poner en contacto con materiales incompatibles. (Ver Peligros Químicos). | |
| EXPOSICIÓN | | ¡EVITAR LA DISPERSIÓN DEL POLVO! ¡EVITAR TODO CONTACTO! | ¡CONSULTAR AL MÉDICO EN TODOS LOS CASOS! |
| Inhalación | Tos. Dolor de garganta. Sensación de quemazón. Jadeo. | Extracción localizada o protección respiratoria. | Aire limpio, reposo. Proporcionar asistencia médica. |
| Piel | Enrojecimiento. Dolor. Graves quemaduras cutáneas. Ampollas. | Guantes de protección. Traje de protección. | Quitar las ropas contaminadas. Aclarar la piel con agua abundante o ducharse durante 15 minutos como mínimo. Proporcionar asistencia médica. |
| Ojos | Enrojecimiento. Dolor. Visión borrosa. Quemaduras graves. | Pantalla facial o protección ocular combinada con protección respiratoria. | Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad), después proporcionar asistencia médica. |
| Ingestión | Dolor abdominal. Quemaduras en la boca y la garganta. Sensación de quemazón en la garganta y el pecho. Náuseas. Vómitos. Shock o colapso. | No comer, ni beber, ni fumar durante el trabajo. | Enjuagar la boca. NO provocar el vómito. Dar a beber un vaso pequeño de agua, pocos minutos después de la ingestión. Proporcionar asistencia médica inmediatamente. |

| DERRAMES Y FUGAS | ENVASADO Y ETIQUETADO |
|---|---|
| Protección personal: traje de protección química, incluyendo equipo autónomo de respiración. NO permitir que este producto químico se incorpore al ambiente. Barrer la sustancia derramada e introducirla en un recipiente de plástico. Recoger cuidadosamente el residuo y trasladarlo a continuación a un lugar seguro. | No transportar con alimentos y piensos. Clasificación UE Símbolo: C R: 35 S: (1/2)-26-37/39-45 Clasificación NU Clasificación de Peligros NU: 8 Grupo de Envasado NU: II Clasificación GHS Peligro Nocivo en caso de ingestión. Provoca graves quemaduras en la piel y lesiones oculares. Puede provocar irritación respiratoria. |
| RESPUESTA DE EMERGENCIA | ALMACENAMIENTO |
| Código NFPA: H3; F0; R1 | Separado de alimentos y piensos, ácidos fuertes y metales. Almacenar en el recipiente original. Mantener en lugar seco. Bien cerrado. Almacenar en un área sin acceso a desagües o alcantarillas. |

Preparada en el Contexto de Cooperación entre el IPCS y la Comisión Europea © CE, IPCS, 2010

IPCS
 International
 Programme on
 Chemical Safety



VÉASE INFORMACIÓN IMPORTANTE AL DORSO

HIDRÓXIDO DE SODIO**ICSC: 0360****DATOS IMPORTANTES****ESTADO FÍSICO; ASPECTO**

Sólido blanco e higroscópico, en diversas formas

PELIGROS QUÍMICOS

La disolución en agua es una base fuerte que reacciona violentamente con ácidos y es corrosiva con metales tales como: aluminio, estaño, plomo y cinc, formando gas combustible (hidrógeno - ver FISQ:0001). Reacciona con sales de amonio produciendo amoníaco, originando peligro de incendio. El contacto con la humedad o con el agua genera calor. (Ver Notas).

LÍMITES DE EXPOSICIÓNTLV: 2 mg/m³ (Valor techo) (ACGIH 2010).

MAK: 1lb (no establecido pero hay datos disponibles) (DFG 2009).

VÍAS DE EXPOSICIÓN

Efectos locales graves

RIESGO DE INHALACIÓN

Puede alcanzarse rápidamente una concentración nociva de partículas suspendidas en el aire cuando se dispersa.

EFFECTOS DE EXPOSICIÓN DE CORTA DURACIÓN

La sustancia es corrosiva para los ojos, la piel y el tracto respiratorio. Corrosivo por ingestión.

EFFECTOS DE EXPOSICIÓN PROLONGADA O REPETIDA

El contacto prolongado o repetido con la piel puede producir dermatitis.

PROPIEDADES FÍSICAS

Punto de ebullición: 1388°C

Punto de fusión: 318°C

Densidad: 2.1 g/cm³

Solubilidad en agua, g/100 ml a 20°C: 109 (muy elevada).

DATOS AMBIENTALES

Esta sustancia puede ser peligrosa para el medio ambiente. Debe prestarse atención especial a los organismos acuáticos.

NOTAS

El valor límite de exposición laboral aplicable no debe ser superado en ningún momento por la exposición en el trabajo. NO verter NUNCA agua sobre esta sustancia; cuando se deba disolver o diluir, añadirla al agua siempre lentamente. Otro n° NU: NU1824 Disolución de hidróxido de sodio, clasificación de peligro 8, grupo de envasado II-III.

INFORMACIÓN ADICIONAL

Límites de exposición profesional (INSHT 2011):

VLA-EC: 2 mg/m³**NOTA LEGAL**

Esta ficha contiene la opinión colectiva del Comité Internacional de Expertos del IPCS y es independiente de requisitos legales. Su posible uso no es responsabilidad de la CE, el IPCS, sus representantes o el INSHT, autor de la versión española.

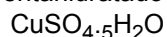
Fichas Internacionales de Seguridad Química

SULFATO DE COBRE (II) (Pentahidratado)

ICSC: 1416



Sal de cobre (II) pentahidratado del ácido sulfúrico



Masa molecular: 249.7

Nº CAS 7758-99-8

Nº RTECS GL8900000

Nº ICSC 1416

Nº CE 029-004-00-0

| TIPOS DE PELIGRO/ EXPOSICION | PELIGROS/ SINTOMAS AGUDOS | PREVENCION | PRIMEROS AUXILIOS/ LUCHA CONTRA INCENDIOS |
|------------------------------|---|--|--|
| INCENDIO | No combustible. En caso de incendio se desprenden humos (o gases) tóxicos e irritantes. | | En caso de incendio en el entorno: están permitidos todos los agentes extintores. |
| EXPLOSION | | | |
| EXPOSICION | | ¡EVITAR LA DISPERSION DEL POLVO! | |
| • INHALACION | Tos. Dolor de garganta. | Extracción localizada o protección respiratoria. | Aire limpio, reposo. |
| • PIEL | Enrojecimiento. Dolor. | Guantes protectores. | Aclarar la piel con agua abundante o ducharse. |
| • OJOS | Enrojecimiento. Dolor. Visión borrosa. | Pantalla facial, o protección ocular combinada con la protección respiratoria. | Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad), después proporcionar asistencia médica. |
| • INGESTION | Dolor abdominal. Sensación de quemazón. Diarrea. Náuseas. Shock o colapso. Vómitos. | No comer, ni beber, ni fumar durante el trabajo. Lavarse las manos antes de comer. | NO provocar el vómito. Dar a beber agua abundante. Proporcionar asistencia médica. |

| DERRAMES Y FUGAS | ALMACENAMIENTO | ENVASADO Y ETIQUETADO |
|--|----------------|--|
| Barrer la sustancia derramada e introducirla en un recipiente; si fuera necesario, humedecer el polvo para evitar su dispersión. NO permitir que este producto químico se incorpore al ambiente. (Protección personal adicional: respirador de filtro P2 contra partículas nocivas). | Bien cerrado. | NU (transporte): No clasificado. CE: símbolo Xn símbolo N R: 22-36/38-50/53 S: 2-22-60-61 |



VEASE AL DORSO INFORMACION IMPORTANTE

ICSC: 1416

Preparada en el Contexto de Cooperación entre el IPCS y la Comisión Europea © CE, IPCS, 2003

Fichas Internacionales de Seguridad Química

SULFATO DE COBRE (II) (Pentahidratado)

ICSC: 1416

| | | |
|--|--|--|
| D A T O S I M P O R T A N T E S | <p>ESTADO FISICO; ASPECTO Sólido azul en diversas formas.</p> <p>PELIGROS QUIMICOS La sustancia se descompone al calentarla intensamente, produciendo humos tóxicos y corrosivos, incluyendo óxidos de azufre. La disolución en agua es un ácido débil. Ataca a muchos metales en presencia de agua.</p> <p>LIMITES DE EXPOSICION TLV (como cobre): 1 mg/m³ (como TWA) (ACGIH 2003). MAK (como cobre): 0.1 (l) mg/m³; Categoría de limitación de pico: II(2); Riesgo para el embarazo: grupo D (DFG 2004)</p> | <p>VIAS DE EXPOSICION La sustancia se puede absorber por inhalación del aerosol y por ingestión.</p> <p>RIESGO DE INHALACION La evaporación a 20°C es despreciable; sin embargo, se puede alcanzar rápidamente una concentración nociva de partículas en el aire al dispersar, especialmente en estado de polvo.</p> <p>EFFECTOS DE EXPOSICION DE CORTA DURACION La sustancia irrita severamente los ojos y la piel. El aerosol irrita el tracto respiratorio. Corrosivo por ingestión. Si se ingiere, la sustancia puede causar efectos en sangre, hígado y riñón, dando lugar a anemia hemolítica, disfunción renal y hepática.</p> <p>EFFECTOS DE EXPOSICION PROLONGADA O REPETIDA Los pulmones pueden resultar afectados por la exposición prolongada o repetida del aerosol. La sustancia puede afectar al hígado, cuando se ingiere.</p> |
|--|--|--|

| | | |
|---------------------|---|---|
| PROPIEDADES FISICAS | Punto de fusión (se descompone): 110°C Densidad: 2.3 g/cm ³ | Solubilidad en agua, g/100 ml a 0°C: 31.7 |
|---------------------|---|---|

| | |
|-------------------|--|
| DATOS AMBIENTALES | La sustancia es muy tóxica para los organismos acuáticos. En la cadena alimentaria referida a los seres humanos tiene lugar bioacumulación, por ejemplo en peces. Se aconseja firmemente impedir que el producto químico se incorpore al ambiente. |
|-------------------|--|

NOTAS

Se indica el punto de fusión aparente originado por pérdida del agua de cristalización.

INFORMACION ADICIONAL

| | |
|--|--|
| Los valores LEP pueden consultarse en línea en la siguiente dirección: http://www.mtas.es/insht/practice/vlas.htm | Última revisión IPCS: 2001 Traducción al español y actualización de valores límite y etiquetado: 2003 |
|--|--|

| | | |
|-------------------|------------------|---|
| ICSC: 1416 | © CE, IPCS, 2003 | SULFATO DE COBRE (II) (Pentahidratado) |
|-------------------|------------------|---|

| | |
|------------------------|---|
| NOTA LEGAL IMPORTANTE: | Esta ficha contiene la opinión colectiva del Comité Internacional de Expertos del IPCS y es independiente de requisitos legales. Su posible uso no es responsabilidad de la CE, el IPCS, sus representantes o el INSHT, autor de la versión española. |
|------------------------|---|