

Del telègraf elèctric a l'òptic, una història d'anar i tornar

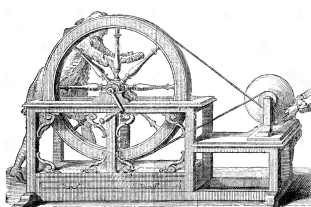
Josep Lluís Doménech
 Doctor en Química

La necessitat d'una comunicació ràpida ha estat present des de sempre, principalment per raons militars, per l'avantatge que suposava poder anticipar-se a les accions de l'enemic. No hi havia massa problema si la distància era curta, però no passava el mateix amb distàncies considerables. Els senyals acústics, de fum, fogueres, banderes o telègrafs hidràulics, usats en l'antiguitat tenien l'inconvenient que sols podien transmetre informació prèviament acordada (així, les campanes tocant a somatent avisaven d'una catàstrofe, però no la concretaven). Durant milers d'anys foren missatgers, a peu o a cavall, els que feren de correus. El resultat era una transmissió lenta. Quan Felip I de Castella concedí en arrendament el servei del correu posà la condició que la correspondència entre Toledo i Brussel·les no havia de tardar més de 14 dies. Amb l'establiment del servei de postes, la velocitat augmentà, però la comunicació continuà sent lenta (de Burgos a Brussel·les una carta havia de tardar no més de 8 dies).

El telègraf elèctric perd la batalla contra el telègraf òptic

La revolució en la comunicació a distància vindria de la mà de l'electricitat. Des de l'antiguitat se sabia de les atraccions i repulsions entre objectes fregats amb seda¹. No obstant això, no seria fins el segle XVIII quan, amb el descobriment de la possibilitat d'emmagatzemar electricitat en quantitats considerables, l'electricitat despertà la curiositat i l'interès de la gent. A la França del segle XVIII foren famosos els espectacles en què **Jean Antoine Nollet** utilitzava una esfera de vidre carregada elèctricament per a sorprendre i divertir la població.

Un aspecte que ben prompte va cridar l'atenció fou la rapidesa amb què es transmetia l'electricitat. En ocasions, Nollet formà cadenes de més de 200 persones amb les mans agafades, i quan tocava una de les persones amb la màquina totes alhora botaven i exclamaven. Aquest fet no passà desapercbut, i alguns l'intentaren utilitzar per transmetre senyals amb rapidesa.

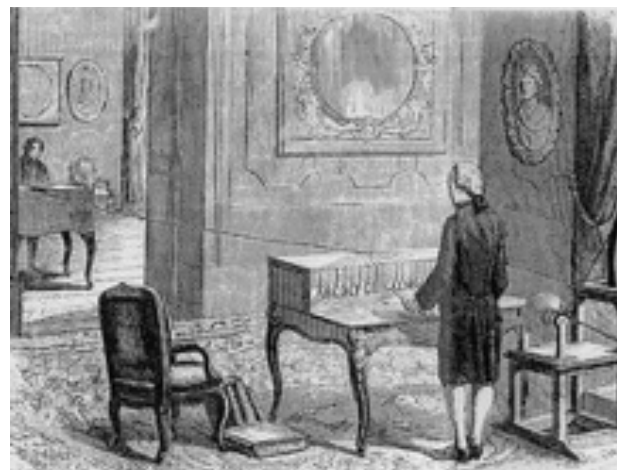


Màquina elèctrica utilitzada per Nollet per a carregar una esfera de vidre. Una esfera de vidre es movia mitjançant una corretja enllaçada a una roda que es feia girar. La fricció de l'esfera amb un coixinet carregava elèctricament l'esfera.

El 1753, un anònim **C. M.**, en una carta a la revista *Scots Magazine* descrivia el que podem considerar el primer telègraf elèctric. Es tractava, segons C. M., d'agafar un manoll de fils d'aram, un per cada lletra de l'alfabet, aïllar-los i estendre'ls horitzontalment en l'aire. Per un extrem, que anomenarem receptor, cada fil estaria pròxim a un petit pèndol. Si per l'altre extrem, l'emissor, amb una màquina electrostàtica tocava successivament els fils corresponents a les lletres d'una paraula, una persona col·locada al receptor reconeixeria la paraula pels pèndols que mostrarien atracció.

No només no hi ha constància que algú portara a la pràctica aquesta idea, sinó que durant 20 anys fou ignorada.

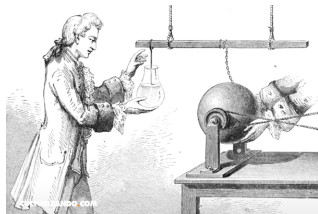
Va ser l'any 1774 quan el ginebrí **George L. Lesage** repregué la construcció d'un telègraf elèctric. El dispositiu proposat per Lesage era semblant al de C. M., encara que a l'extrem receptor els cables estaven submergits en una dissolució acidulada. La detecció de les bombolles de l'hidrogen format per electròlisi identificaven el cable que s'havia electrificat i, per tant, a la lletra a què s'havia de parar atenció (en els altres conductors es formava oxigen, però, com que el volum de l'oxigen és menor que el de l'hidrogen, no hi havia dubtes sobre el fil tocat).



Telègraf elèctric imaginat per Lesage.

Un dispositiu semblant a aquest el presentà el metge català **Francesc Salvà i Campillo** a l'Acadèmia de Ciències de Barcelona el 1795. La novetat del muntatge de Salvà consistia a usar la botella de Leyden en l'emissor i anques de granota com a detectors en el receptor.





El 1746, **Pieter van Musschenbroek**, professor a Leyden, va descobrir el condensador (emmagatzemador de càrrega) en intentar electrizar un objecte que no es descarregara en l'aire, cosa que succeeix habitualment. Com que Musschenbroek sabia que el vidre és pitjor conductor que l'aire, va pensar d'electrizar l'aigua continguda en una botella de vidre (l'aigua estava en contacte, mitjançant un fil metàl·lic, amb la màquina elèctrica en moviment). Accidentalment, Musschenbroek va agafar la botella amb una mà al temps que amb l'altra tocava el tub metàl·lic de la màquina. La commoció que va notar va ser de tal magnitud que va jurar no repetir l'experiència. L'artefacte ha passat a la història amb el nom de **botella de Leyden**.

En diferents llocs es proposaren telègrafs semblants al de Lesage, però en cap lloc s'anà més enllà del paper; ningú no superà la fase del disseny, i això pels problemes associats a l'electricitat estàtica. I és que per a carregar suficientment un objecte no només calien màquines elèctriques ben muntades i ampolles de Leyden de dimensions considerables, així com disposar de temps per a carregar-les, sinó que també els aïllaments havien de ser d'alta qualitat per a evitar la descàrrega. Com es diu en l'Informe de l'Acadèmia de Ciències encarregat pel Ministeri de Foment el 1854 en relació a la implantació de la telegrafia elèctrica:

"...todas estas tentativas, y algunas otras más ó menos ingeniosas, dieron escaso resultado; y así había de acontecer empleando la electricidad estática, que solo se desenvuelve en la superficie de los cuerpos, y tiende constantemente á desprenderse de ella. Despues de 50 años de repetidos y variados ensayos hubo de renunciarse al intento de aplicarla á la telegrafía."

La necessitat però d'una comunicació ràpida, sobretot per part dels revolucionaris francesos que, estant assetjats militarment en diferents fronts, necessitaven coordinar els diferents exèrcits, féu que les mirades es dirigiren cap al telègraf òptic que **Claude Chappe** inventà el 1792.

El telègraf de Chappe consistia en un sistema articulat, en què dos braços estaven connectats a una travessera. Com que cada braç disposava de 7 posicions diferents i 2 la travessera, 98 eren les posicions diferents per a transmetre senyals. Els missatges consistien en números i per a descodificar-los calia disposar dels manuals corresponents. Els manuals constaven de 98 pàgines i cada pàgina de 98 paraules. Cada paraula necessitava per tant de dos números per a identificar-la, el que indicava el número de la pàgina i el que indicava el número de la paraula.

Si els senyals es feien des de punts elevats i s'usaven telescopis acromàtics, es podien construir xarxes telegràfiques amb una separació entre les estacions de 10 a 20 km.

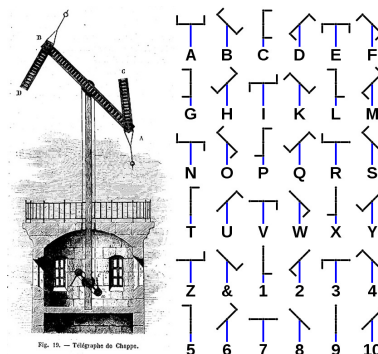
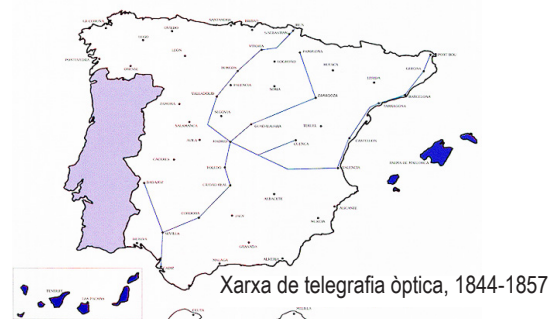


Fig. 15. — Télégraphe de Chappe.
Telègraf de Chappe.

Un indicador de la importància adquirida pel telègraf de Chappe és que a França, a mitjans del s. XIX, la longitud de les línies telegràfiques era d'uns 5000 km. L'invent francès tingué repercussió per quasi tot Europa i també en la costa atlàntica dels EUA.

Encara que amb un cert retard, Espanya s'incorporà a aquest procés en la dècada de 1840, i això en un moment en què la telegrafia elèctrica ja estava sent implantada a Anglaterra i França. La raó per la qual s'hi elegí el telègraf de Chappe fou que els cables telegràfics eren bastant més vulnerables que no les torres telegràfiques i les autoritats espanyoles volien assegurar la comunicació.

Tot i l'endarreriment, en 10 anys es construí una xarxa tan extensa com la que havia aconseguit França en 50 anys.



Retorn al telègraf elèctric

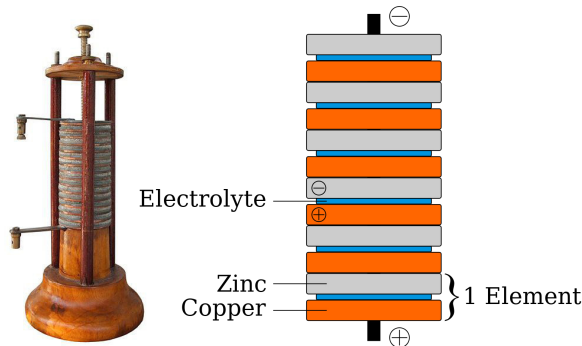
En els distints llocs en què s'implantà, el telègraf de Chappe experimentà modificacions en els dispositius usats per a transmetre els missatges, però mai no es pogué superar la limitació que suposava la necessitat de visibilitat de les torres. La comunicació nocturna era impossible i també en cas de pluja, boira, o en la mar.

La millora, a principis del s. XIX, en la comprensió dels fenòmens elèctrics, i la invenció de nous aparells portà els enginyers a fixar-se novament en l'electricitat.

Pila elèctrica

Un dels avanços el proporcionà en 1799 Alessandro Volta, professor de Física a Pavia, en inventar la pila elèctrica. A diferència de la botella de Leyden on l'electricitat emmagatzemada es descarrega d'una sola vegada, en la pila s'aconsegueix un corrent elèctric de manera contínua. La pila proporcionava una diferència de potencial de 0,75 V.

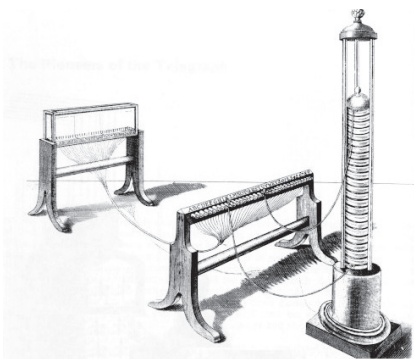




La **pila de Volta** està formada per un disc de coure en contacte amb un de zinc, separat d'un altre parell igual mitjançant un drap mullat en aigua salada; la repetició d'aquests parells forma la pila. Els discs dels extrems constitueixen els elèctrodes.

Pel que fa al telègraf, la pila de **Volta** suposà un salt respecte al generador electrostàtic. Així, mentre que amb l'electricitat estàtica es treballava amb tensions elevades, de l'ordre dels quilovolts, en la pila la tensió era d'unes desenes de volts, cosa que a més de facilitar l'aïllament dels cables, feia més difícil la descàrrega a través de l'aire; un altre avantatge era la facilitat de recàrrega, i també que s'aconseguia un corrent elèctric continuat.

El 1804, el metge Salvà presentava a l'Acadèmia de Ciències de Barcelona un model de telègraf en què substituïa la botella de Leyden de la proposta de 1795 per la pila de Volta. La formació dels gasos a partir de la descomposició electrolítica de l'aigua permetia detectar el cable al qual s'havia connectat un pol de la pila. El 1809, **Samuel Thomas von Sömmering** portà a la pràctica el disseny de Salvà.



Telègraf electroquímic de Sömmering.

Malgrat l'avanç, la pila de Volta presentava problemes. Així, a més de curtcircuitar-se fàcilment, la tensió es reduïa dràsticament quan el drap separador se secava; encara que, en relació a l'ús en telegrafia, el principal inconvenient de la pila provenia del fet que la intensitat del corrent produït disminuïa amb rapidesa, mentre que per a un bon funcionament es requereix un corrent constant. La causa de la disminució són les bombolles dels gasos formats que, en acumular-se en els discs metàl·lics, dificulten el corrent a causa de la poca conductivitat.

Encara que es proposaren diferents maneres de superar aquesta dificultat, la solució definitiva l'aportà, el 1836, **John F. Daniell**, professor del

King's College, en construir una pila en què, a més de no formar-se gasos, proporcionava un corrent constant durant alguns dies. Els elèctrodes de la pila eren tubs de coure i de zinc introduïts en una dissolució de sulfat de coure, el primer, i en aigua acidulada el segon; les dissolucions estaven separades per una membrana porosa que sols deixava passar alguns ions.

Una unitat de la pila proporciona una diferència de potencial d'1,10 V. En funció de la separació entre emissor i receptor s'usaven més o menys piles. A títol orientatiu val a dir que per a distàncies d'uns 100 km calien unes 30 unitats.

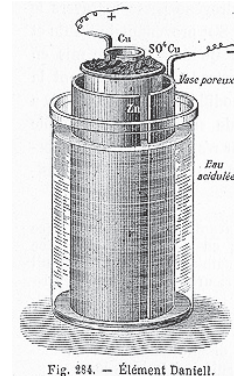


Fig. 284. — Élément Daniell.

La **pila de Daniell** constava de dos vasos, un exterior de vidre, i un interior de placa porosa. Entre els dos vasos hi havia aigua acidulada, i a l'interior del porós una dissolució saturada de sulfat de coure. En la dissolució acidulada s'introduïa un cilindre de zinc (per tal d'impedir la reacció del Zn amb l'àcid de la dissolució s'utilitzava zinc amalgamat), i en la dissolució de sulfat de coure un tub de coure. El propòsit del material porós és permetre el pas d'alguns ions, de manera que siga possible el corrent, però sense que les dissolucions de sulfat de coure i d'aigua acidulada es barregen. Per a mantenir el corrent constant la dissolució de CuSO_4 ha d'estar sempre saturada i per això en la part superior del vas porós es col·loca un recipient foradat que conté cristalls d'aquesta sal que es dissolen a mesura que la pila estava en funcionament.

La vida de la pila augmentà quan se substituï l'aigua acidulada per una dissolució de sulfat de zinc. La pila de Daniell fou usada en telegrafia fins la dècada de 1870 i això per la seua seguretat i baix cost. Posteriorment, s'usaren piles que proporcionaven una major diferència de potencial o que eren més simples.

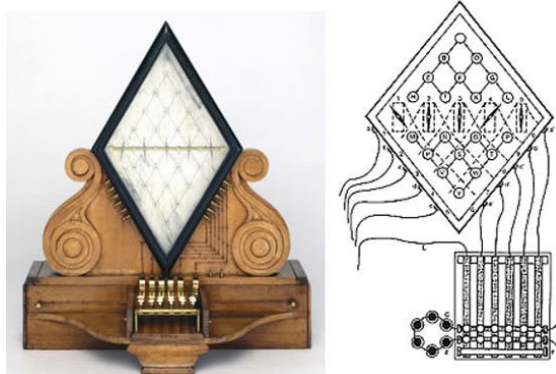
Electroimant

La pila simplificava la part emissora del telègraf però també calia simplificar la part receptora, i és que la detecció electroquímica dels senyals que proposava Salvà era lenta i delicada. La millora vingué de la mà del descobriment que el 1820 va fer **Hans Christian Oersted**, professor de Física a Copenhagen, ja que el corrent elèctric desvia una agulla imantada situada en les proximitats. L'efecte augmenta si formen una bobina que enrotlle el cable i situem l'agulla a l'interior.



El mateix 1820, el francès **André Marie Amper ** feu  s de la descoberta d'Oersted per a proposar un telègraf en què l'emissor estava constituït per una pila, el receptor per agulles imantades (cadascuna amb un car cter), i fils conductors (tants com caràcters anaven a usar-se). Els fils eren d'anada i tornada, i per sota cadascun es col·locava una agulla. Per a transmetre una lletra, l'emissor connectaria els borns de la pila als extrems del cable corresponent; el receptor identificaria la lletra a partir de l'agulla desviada.

El 1837, els britànics **Charles Wheatstone** i **William F. Cooke** patentaren un telègraf amb cinc cables conductors. L'aparell constava de cinc agulles verticals per les proximitats de les quals passaven els conductors. La direcció de les agulles indicava la lletra transmesa. Polsant les tecles pertinents en l'emissor s'aconseguia desviar en el receptor l'agulla desitjada en la direcció desitjada.



Telègraf i esquema del telègraf de Cooke i Wheatstone.

Tot i la reducció aconseguida, un muntatge amb cinc fils era encara massa complicat. La transmissió de codis, i no de lletres, permet  finalment utilitzar només un fil. El codi que es va imposar fou el proposat per l'inventor nord-americà **Samuel F. Morse** el 1838.

Un altre inconvenient dels telègrafs basats en la desviació d'agulles imantades era que no quedava registre del senyal transm s, cosa que impedia comprovar l'exactitud del missatge realitzat. Per al registre del senyal  s feu  s de l'electroimant descobert pel britànic **William Sturgeon**, el 1824. Sturgeon observ  que quan es feia circular corrent per un cable que enrotllava en espiral una barra de ferro dolç en forma de ferradura s'aconseguia, des del primer moment, un imant poderós. Les propietats com a imant desapareixien en el moment en què deixava de circular el corrent.

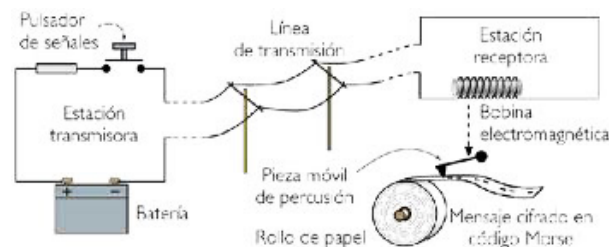


Esquema original de l'electroimant presentat per Sturgeon.

 s aix  que si en el receptor se situava un petit punxó de ferro en les proximitats d'un electroimant, en passar el corrent, el punxó es mouria i podria deixar un senyal en impactar sobre un suport blanc.

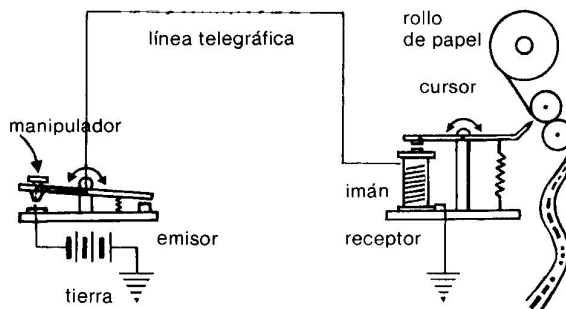
La connexió a terra

Una vegada simplificats l'emissor i el receptor resta el cable conductor que els comunica. La circulació de corrent exigeix un camí tancat i la manera més senzilla d'aconseguir-ho és mitjançant un cable de tornada. La primera línia telegr fica als EUA, línia que connectava Washington i Baltimore, i que fou construïda per Morse el 1844, constava de dos cables, un d'anada i l'altre de tornada.



Esquema de la línia telegr fica de dos cables.

Tanmateix, en aquell moment a Europa les línies ja eren de només un fil, i aix  perquè s'usava la connexió a terra per a tancar el circuit. El 1838, **Carl A. Steinheil**, professor a la Universitat de Munich, intent  utilitzar els dos rails d'un ferrocarril com els conductors d'anada i tornada d'un telègraf, però li result  impossible: el corrent passava d'un rail a l'altre. Steinheil conclugu  que la terra podia funcionar com a retorn. A més, constat  que la transmissió millora si tant el cable d'eixida de la bobina com el connectat al pol lliure de la pila es connecten a xapes metàl·liques soterrades (la transmissió s'afavoria en augmentar la superfície de les xapes i la humitat del terreny).



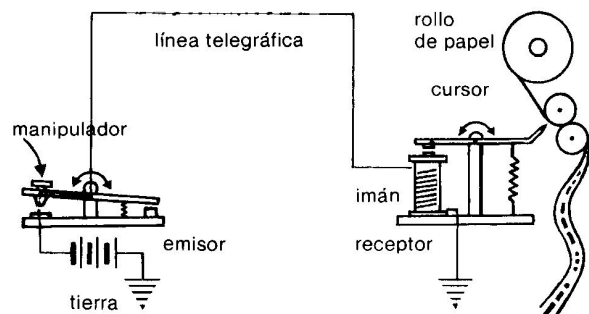
Alguns consideren que aquest és el descobriment que ha contribuït en major mesura al desenvolupament del telègraf i aix  per l'estalvi econòmic que suposa.

Descripció del telègraf

Amb les millores introduïdes passem al disseny del telègraf. En la figura hem representat



l'esquema bàsic. En l'emissor, connectem un born de la pila a terra, i l'altre a un interruptor. De l'interruptor ix un cable que va a parar a un electroimant; a l'eixida, el cable va a parar al terra. A prop de la bobina hi ha un cursor (un sistema articulad amb un punxó) que en moure's pot pressionar una tira de paper en moviment.



Esquema del telègraf tipus Morse.

Quan polsem l'interruptor tanquem el circuit i circula el corrent. L'electroimant, en atraure la peça metàl·lica de la part esquerre del cursor, eleva la part dreta, i el punxó pressiona la tira de paper. Si el paper o el punxó estan impregnats de tinta, quedarà un senyal sobre el paper. Segons la durada de la pulsació la línia impresa serà més o menys llarga.

En el codi Morse per a indicar les lletres i nombres s'usen dos senyals: el punt (una pulsació) i la ratlla (tres vegades més llarga que el punt). La longitud de l'espai entre les lletres d'una paraula és de tres punts i entre paraules de 7 punts.

A	· -	J	· - - -	S	· · ·	2	· - - - -
B	- · · ·	K	- · -	T	-	3	· · · - -
C	- · · · ·	L	· · · ·	U	· · -	4	· · · · -
D	- · ·	M	- -	V	· · · -	5	· · · · ·
E	·	N	- ·	W	· - -	6	- · · · ·
F	· · · ·	O	- - -	X	- · · ·	7	- · · · ·
G	- · ·	P	· · · ·	Y	- · - -	8	- · · · ·
H	· · · ·	Q	- · - -	Z	- · · ·	9	- · - - -
I	· ·	R	· · ·	1	· - - - -	0	- - - - -

Codi morse internacional.

Com veiem es tracta d'un disseny senzill. Els problemes tornen a sorgir quan passem a la realització pràctica. En aquesta fase s'han de prendre decisions crítiques sobre, per exemple, el tipus de pila a utilitzar, així com el nombre de piles necessàries perquè el senyal arribe al receptor, el material del cable (tenint present la conductivitat, pes per unitat de longitud, inalterabilitat química, tensió que pot suportar, etc.), l'aïllament dels cables, la rendibilitat econòmica, la viabilitat pràctica, etc. Com veiem aspectes que necessiten d'un estudi rigorós en el qual no entrarem ací.

QUÍMICA DE LA PILA

Pila de Volta (de Cu i Zn)

Un element de la pila està format per dos discs, un de coure i l'altre de zinc, separats per un drap mullat en aigua acidulada. Quan posem en contacte els discs el moviment de difusió, en la interfase, entre els ions Zn^{2+} i Cu^{2+} de cada disc és insignificant. Els electrons però poden passar lliurement d'un metall a l'altre, i això ocorre fins assolir-se un equilibri en què el Cu s'ha carregat negativament, i el Zn positivament.

Quan entre els discs posem el drap amerat d'aigua salada (ions Na^+ , ions Cl^- i H_2O), i els connectem amb un cable conductor, els ions Cl^- es mouen cap el disc de Zn (que presenta una càrrega positiva) i els ions Na^+ cap el de Cu (carregat negativament). En l'extrem del Zn, electrons dels ions Cl^- deixen electrons (electrons que compensen els que han eixit pel cable), procés que representem: $2 Cl(s) \rightarrow Cl_2(g) + 2 e^-$.

En el disc de Cu ocorre el procés: $2 H_2O(l) + 2 e^- \rightarrow 2 OH^-(aq) + H_2(g)$, de manera que els electrons que arriben al disc pel cable es compensen pels que són capturats per l'aigua. Els gasos formats, Cl_2 i H_2 , s'adherixen als discs i, en ser mals conductors, dificulten les semireaccions. El fenomen se'n diu polarització de l'elèctrode i el resultat és un augment de la resistència interna de la pila.

Pila de Daniell (elèctrodes: Zn en una dissolució de $ZnSO_4$ i Cu en una dissolució de $CuSO_4$)

En la làmina de zinc hi ha ions Zn^{2+} i electrons, i en la dissolució aquosa, a més d'aigua, ions SO_4^{2-} i ions Zn^{2+} . En la interfase no es poden intercanviar electrons ni ions SO_4^{2-} però sí ions Zn^{2+} . El resultat és que el metall queda amb càrrega negativa i la dissolució amb càrrega positiva. D'una manera semblant, també làmina de Cu aporta ions Cu^{2+} a la dissolució de $CuSO_4$, encara que en menor quantitat que en el cas del Zn. Quan posem en contacte les làmines metàl·liques, electrons es mouen en la direcció Zn-Cu. Com a resultat, en el vas del coure, ions Cu^{2+} de la dissolució de $CuSO_4$ es dipositen sobre el Cu, en un procés que esquematitzem: $Cu^{2+}(aq) + 2 e^- \rightarrow Cu(s)$. Els electrons que entren al coure metàl·lic pel cable conductor són compensats per l'entrada d'ions Cu^{2+} de la dissolució. El resultat és un augment del gruix del tub de coure.

En l'elèctrode de Zn, l'eixida d'electrons es compensada per l'aportació d'ions Zn^{2+} a la dissolució acidulada: $Zn(s) \rightarrow Zn^{2+}(aq) + 2 e^-$, cosa que fa disminuir el gruix de la làmina de Zn. L'augment de càrrega positiva d'aquesta dissolució, així com l'augment de càrrega negativa en la dissolució de $CuSO_4$ és compensada pel fet que els ions SO_4^{2-} es mouen des d'aquesta dissolució a la de $ZnSO_4$ (la membrana porosa deixa passar els ions SO_4^{2-} però no els Zn^{2+}). La disminució d'ions Cu^{2+} i SO_4^{2-} en el vas porós fa disminuir el corrent i, per a mantenir-lo, cal afegir $CuSO_4$.

Notes

1. Tots hem constatat l'atracció notada pels cabells i per objectes lleugers quan els hem aproximat una peça de plàstic fregada amb llana.
2. La pila de Volta mostrava, per primera vegada, la connexió entre l'electricitat i les reaccions químiques.
3. Val a dir que el descobriment mostrarà la connexió entre dos camps del coneixement, l'electricitat i el magnetisme, que fins llavors havien de ser vists com a distints. Des d'aleshores allò més correcte és parlar de l'electromagnetisme.

