

Celebrem el Premi Nobel de Química 2019. El desenvolupament de les bateries d'ió liti: de la química d'intercalació al món recarregable

Celebrating the Nobel Prize in Chemistry 2019. The development of Li-ion batteries: From intercalation chemistry to a rechargeable world

M. Rosa Palacín

Institut de Ciència de Materials de Barcelona (ICMAB-CSIC)

ALISTORE European Research Institute

Resum: El Premi Nobel de Química 2019 va ser atorgat a John B. Goodenough, M. Stanley Whittingham i Akira Yoshino pel «desenvolupament de les bateries d'ió liti». L'origen d'aquesta tecnologia és l'estudi dels compostos d'intercalació, que ben aviat van mostrar el seu potencial per a l'emmagatzemament d'energia electroquímica. Malgrat els reptes que va caldre superar, la tecnologia va arribar al mercat el 1990 i no només ha fet possible la revolució de l'electrònica portàtil, sinó que a més avui en dia és essencial en l'electrificació del transport i sembla que en el futur ho serà també en altres camps.

Paraules clau: Bateries, bateries de liti, Premi Nobel de Química.

Abstract: The Nobel Prize in Chemistry 2019 was awarded jointly to John B. Goodenough, M. Stanley Whittingham and Akira Yoshino for the development of lithium-ion batteries. This technology is rooted in the study of intercalation compounds, for which the potential in electrochemical energy storage was soon harnessed. Despite the challenges encountered, the technology reached the market in 1990. Besides powering the revolution in portable electronics, lithium-ion batteries are essential in transport electrification and would seem to have a bright future in alternative applications.

Keywords: Batteries, lithium-ion batteries, Nobel Prize in Chemistry.

Introducció

Una bateria és un dispositiu que converteix energia química en energia elèctrica. Tot i que va ser Benjamin Franklin qui el 1749 va fer servir per primer cop el mot *battery* per anomenar un dispositiu que consistia en ampolles de Leiden (el primer tipus de condensador) connectades en sèrie, després va generalitzar-se i avui en dia es fa servir tant per descriure cel·les electroquímiques connectades com també per descriure'n una de sola. Cada cel·la està formada per un electròlit conductor d'ions i aïllant electrònic i dos elèctrodes que contenen compostos electroactius. Els electrons es transmeten d'un elèctrode a l'altre pel circuit extern i al mateix temps els ions es transporten a través de l'electròlit per compensar la càrrega. Quan un dels materials d'elèctrode s'ha exhaurit, el flux d'electrons s'atura: la bateria s'ha descarregat completament. Si la reacció és reversible, la bateria pot recarregar-se aplicant-hi un corrent extern en sentit invers (vegeu la figura 1). Sovint les bateries recarregables s'anomenen

també *bateries secundàries*, mentre que el terme *bateries primàries* s'aplica a les no recarregables. En principi, els elèctrodes podrien basar-se en qualsevol parell redox, però només unes quantes combinacions han resultat ser viables pràcticament i han arribat a comercialitzar-se a gran escala.

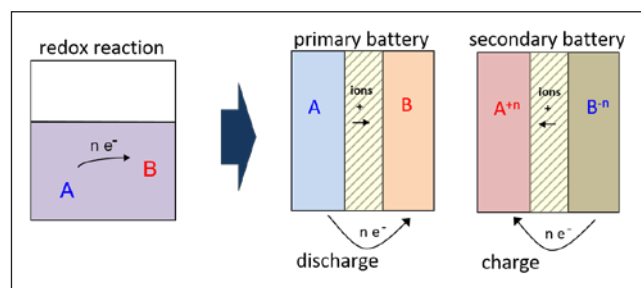


FIGURA 1. Esquema d'una reacció redox i de la descàrrega d'una bateria primària (no recarregable) i la càrrega d'una bateria secundària (recarregable). Adaptat amb permís de la Royal Society of Chemistry (© 2009); per a més detalls, vegeu [1].

La invenció de la primera bateria la devem a Alessandro Volta (figura 2), com a part dels seus esforços per rebatre les teories de Galvani sobre l'origen animal de l'electricitat. Cap a finals de 1799 va poder demostrar que, efectivament, podia generar-se electricitat a partir de dos metalls diferents separats per un medi humit. Va experimentar amb discs de diferents metalls apilats l'un sobre l'altre i separats per una làmina de cartró o roba mullada en aigua salada, i va aconseguir produir electri-

citat. Tot i que aquesta pila només produïa electricitat durant una hora, com a màxim, va representar una revolució científica. Volta va ser convidat a París per l'Institut de França, Napoleó li va donar la Medalla d'Or i Humphry Davy va fer una subscripció popular per poder construir una bateria amb dos mil elements que li va permetre aïllar diversos metalls alcalins emprant mètodes electroquímics. Tot i que l'explicació final del funcionament d'aquest dispositiu no va arribar fins al 1890 amb Nernst, això no va ser problema per començar a aplicar-lo de manera pràctica tan bon punt la millora del disseny ho va permetre, amb la pila Daniell, inventada el 1836 emprant elèctrodes de zinc i coure, que va ser clau en el desenvolupament del telègraf.

El següent avenç significatiu fou l'arribada dels sistemes recarregables, per mitjà de Gaston Planté, que el 1859 inventà les bateries de plom que encara avui en dia es fan servir per arrencar els motors de combustió interna als cotxes convencionals. Aquesta bateria fa servir plom en els dos elèctrodes, un dels quals es basa en el parell redox Pb/Pb(II), i l'altre en el Pb(II)/Pb(IV), i l'electròlit és una dissolució d'àcid sulfúric. Quaranta anys després, Jungner patentà la tecnologia Ni/Cd a Suècia, que fa servir hidròxid de níquel a l'elèctrode positiu i cadmi a l'elèctrode negatiu i un electròlit alcalí, i poc després Edison va desenvolupar un sistema

semblant als Estats Units emprant ferro a l'elèctrode negatiu. Tot i que aquestes darreres tecnologies estan en desús avui dia, per la toxicitat del cadmi i les males prestacions del concepte Ni/Fe, les bateries que s'empenen als vehicles híbrids no endollables en són un concepte derivat (Ni/MH): fan servir un aliatge metàl·lic a l'elèctrode negatiu, que pot formar hidrurs.

En aquesta època, el progrés tecnològic tenia encara un fort component empíric i les millores eren sovint simplement el resultat de molts experiments d'assaig i error; els mecanismes de reacció eren relativament desconeguts. Això no implicava, però, que les aplicacions es multipliquessin. A banda del telègraf, l'automoció fou un dels camps on l'ús de bateries resultava més atractiu. Com a curiositat, el primer vehicle que va sobrepassar el llindar de velocitat dels 100 km/h fou La Jamais Contente el 1899, propulsat per bateries de plom (100 cel·les) que pesaven aproximadament 700 kg, la meitat del pes total del vehicle (vegeu la figura 3). Poc després, Edison també va apostar fermament pel concepte, emprant les bateries Ni/Fe. Malauradament, el progrés en el desenvolupament del motor de combustió interna fou més accelerat que en el camp de les bateries, i el nombre de vehicles elèctrics va anar minvant durant el transcurs del segle xx fins a esdevenir només un concepte testimonial. Altrament, les bateries recarregables van tenir també un mercat significatiu en altres aplicacions: tradicionals, com ara les làmpades de miner (vegeu la figura 3), o bé noves de trinca, com la ràdio.

En paral·lel a aquests desenvolupaments tecnològics, la química anava progressant com a ciència i el nombre d'ele-



FIGURA 2. Imatge d'un prototip de pila de Volta (Tempio Voltiano, Como, Itàlia). Reproduït de https://ca.wikipedia.org/wiki/Pila_voltaica i <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2249821> (GuidoB, CC BY-SA 3.0).



FIGURA 3. Imatge del vehicle elèctric La Jamais Contente, exposat al Saló de l'Automòbil de Barcelona (2011), i d'una làmpada de miner emprada als anys trenta a les mines de Cercs (amb un pes de 2 kg). Fotografies: Martí Ferrer.



ments descoberts no parava d'augmentar. El liti es descobrí el 1818 i no fou aïllat en estat metàl·lic fins tres anys més tard, gràcies als mètodes electroquímics. Donada la seva reactivitat, l'estudi de les seves propietats era complicat i els progressos, lents. El 1913 es va publicar un article en què se'n descrivia la mesura del potencial estàndard, que va permetre determinar que era el metall conegut més electropositiu [2]. Aquesta característica el feia molt atractiu perquè fos emprat com a elèctrode negatiu en bateries, però això implicava una sèrie d'inconvenients pràctics per resoldre, ja que els electròlits aquosos que s'havien fet servir fins aleshores no es podien utilitzar i calien dissolvents estables en contacte amb el liti. L'ús generalitzat de dissolvents orgànics en laboratoris arreu del món no va arribar fins als anys cinquanta, associat al desenvolupament de la indústria química. La recerca en bateries de liti es va dur a terme sobretot als anys seixanta: en va ser una part rellevant la que es va desenvolupar a la NASA i als laboratoris del Govern americà, que no sempre acabava formant part de publicacions científiques, tot i que sovint es patentava. Aquests treballs foren la base de la comercialització de les piles de liti el 1971, primer per l'empresa Matsushita (actualment Panasonic). L'espectre de materials emprats en l'elèctrode negatiu i el mercat van anar creixent: van passar d'emprar-se en aplicacions aeroespacials i en marcapassos a començar-se a fer servir en petits aparells electrònics, com ara les calculadores, els rellotges i les càmeres fotogràfiques [3].

Compostos d'intercalació i emmagatzemament d'energia

Als anys seixanta i setanta, els compostos d'intercalació, que contenen ions o molècules hoste en una xarxa amfitriona que manté les seves característiques estructurals, despertaven un gran interès en la comunitat d'especialistes en química inorgànica de l'estat sòlid. El primer compost d'intercalació, tot i que llavors no es va anomenar així, es va descriure el 1840 com a resultat de la reacció del grafit amb l'àcid sulfúric. La química d'intercalació del grafit és molt rica, i aviat es va veure que el procés d'intercalació podia ser també induït electroquímicament [4]. A banda del grafit, diversos sulfurs (MoS_2 , TiS_2) i òxids (MoO_3 , V_2O_5) van resultar que eren xarxes hoste interessants per intercalar-hi tant ions com molècules polars al seu espai de Van der Waals [5].

El seu potencial per a l'emmagatzemament d'energia aviat va ser evident, no només per als científics acadèmics, sinó també per a aquells que treballaven en els laboratoris de recerca americans de les empreses fabricants d'automòbils i les petrolieres, que hi estaven interessades degut als problemes de contaminació i la crisi del petroli.

Tot i que l'interès en el desenvolupament de bateries recarregables de liti era evident, presentava dos inconvenients: trobar un electròlit que permetés l'electrodeposició eficient del

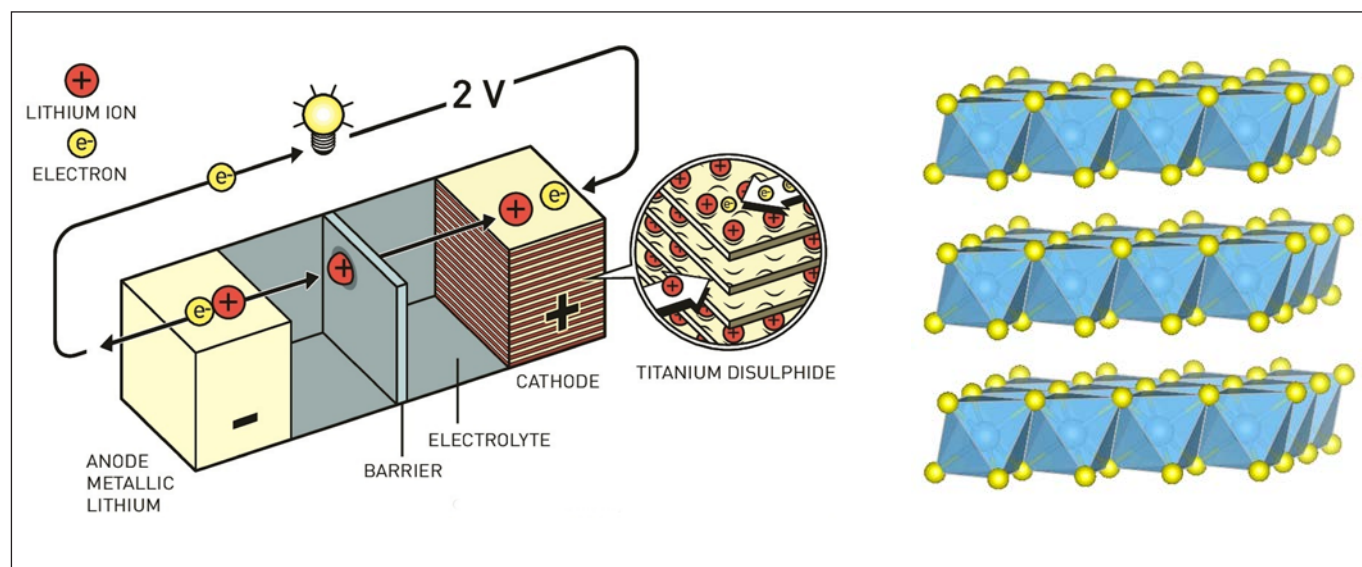


FIGURA 4. A la dreta, esquema de l'estructura cristal·lina del TiS_2 , amb els àtoms de sofre en groc i els àtoms de titani en blau (font: Ashley Black), i, a l'esquerra, de la bateria desenvolupada per M. Stanley Whittingham a Exxon (© Johan Jarnestad / The Royal Swedish Academy of Sciences).

metall i un compost que reaccionés de manera reversible amb els ions liti per emprar-lo com a elèctrode positiu. Mentre que en el primer cas semblava que hi havia diverses possibilitats, com ara el carbonat de propilè o el dioxolà, amb una sal de liti dissolta, en el segon cas la solució arribà a través dels compostos d'intercalació, que, com que es mantenien amb poques modificacions estructurals en intercalar-hi i desintercalar-hi ions, podien suportar molts cicles de càrrega i descàrrega sense degradar-se.

M. Stanley Whittingham, un jove doctor que treballava als laboratoris de recerca d'Exxon el 1973, contribuï a l'estudi del TiS_2 , interessant per l'estructura laminar i el baix pes fórmula, i va desenvolupar els primers prototips de bateries de liti (vegeu la figura 4), amb un potencial de 2,5 V.

Les prestacions de les primeres cel·les es van mostrar molt bones: el TiS_2 és capaç d'intercalar i desintercalar reversiblement un mol d'ions liti per fórmula unitat (amb la consegüent reducció formal del titani de Ti(IV) a Ti(III)). A més, aquest fet no implicava modificacions estructurals significatives, ni tan sols transicions de fase [6]. Els únics aspectes per millorar continuaven essent l'elèctrode de liti i l'electròlit, ja que no hi havia combinacions totalment satisfactòries. Es van fer assajos amb aliatges entre liti i alumini a l'elèctrode negatiu i amb diverses sals, però, tot i que es va arribar a fer un prototip de 45 Wh que es va presentar el 1977 a Chicago, la companyia només va desenvolupar cel·les més petites perquè s'empressin

en rellotges que es carregaven amb la llum del sol, i que tenen excel·lents prestacions fins i tot després de funcionar durant trenta-cinc anys [7].

Aquests descobriments van generar molt d'interès, i aviat van aparèixer empreses competidores, com ara Moli Energy, al Canadà, que com a alternativa al TiS_2 emprava MoS_2 , que té un cost més baix perquè es troba a la natura. L'interès industrial anava en augment, degut a la revolució en electrònica portàtil que estava començant al Japó i que demanava bateries d'alta densitat d'energia i sense elements tòxics com el plom o el cadmi.

Mentre els productes començaven a arribar al mercat, la recerca continuava, i malgrat que la tecnologia de liti ja es pot considerar fruit del disseny racional i no d'experiments d'assaig i error, la comprensió dels mecanismes encara no era total. Una contribució decisiva arribà a través de John B. Goodenough, físic americà que ocupava la càtedra de química a Oxford, era un gran expert en òxids i havia fet contribucions decisives al camp del magnetisme. Comprengué ben aviat que el potencial de la cel·la de liti ve determinat pel nivell de fermi del material que s'empra com a elèctrode positiu, i que fer servir òxids en lloc de sulfurs hauria de permetre d'augmentar-lo significativament i donar lloc a densitats d'energia molt més grans. L'any 1980 proposà d'emprar, en lloc de TiS_2 , $LiCoO_2$, que donava un potencial de cel·la entorn de 4 V [8] (vegeu la figura 5). Aquest fet posava encara més requeriments a l'elec-

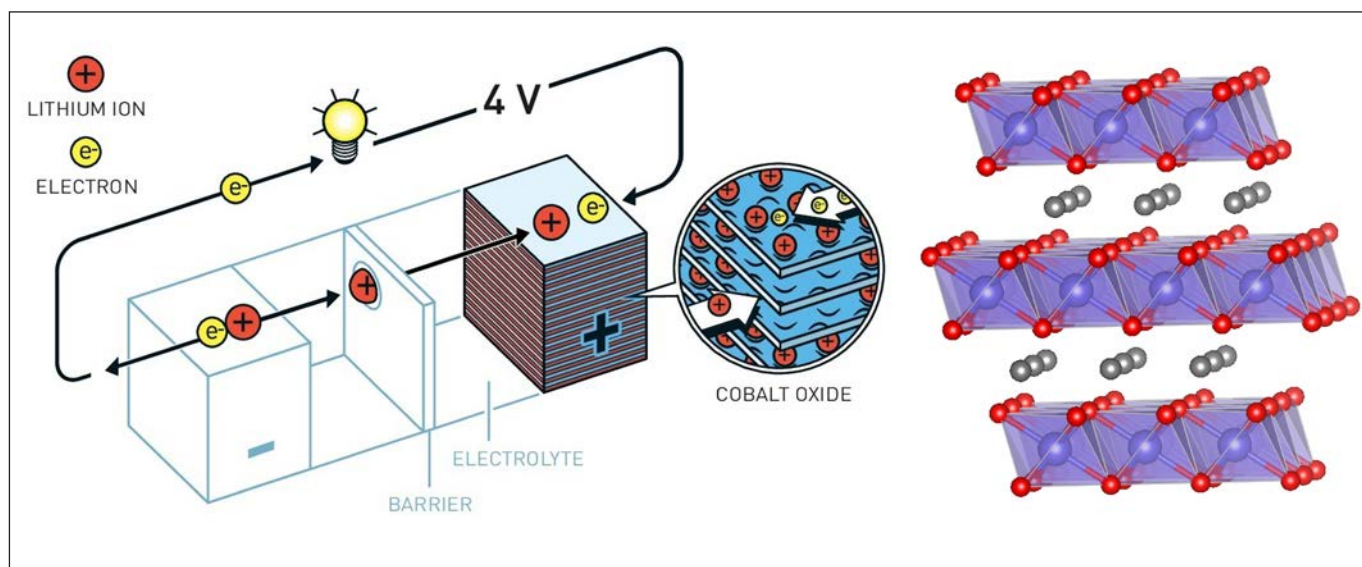


FIGURA 5. A la dreta, esquema de l'estructura cristal·lina del $LiCoO_2$, amb els àtoms d'oxigen en vermell, els àtoms de cobalt en lila i els àtoms de liti en gris (font: Ashley Black), i, a l'esquerra, del concepte de bateria desenvolupat per John B. Goodenough (© Johan Jarnestad / The Royal Swedish Academy of Sciences).

tròlit, que havia de ser estable en un rang de potencial molt gran, però obria la porta a assolir densitats d'energia impen-sables fins llavors. LiCoO_2 té una estructura cristal·lina laminar anàloga a la de TiS_2 ; ambdues estan formades per capes d'oc-taedres (CoO_6 o TiS_6) que comparteixen arestes, i deixen entre elles un espai de Van der Waals on se situen els ions liti. El fet que el compost LiCoO_2 fos estable a l'aire en l'estat litiat obrí també la porta a la possibilitat de fabricar les bateries en estat descarregat, i a un aspecte que en el futur esdevingué crucial: la possibilitat d'emprar un elèctrode negatiu que no con-tingués liti.

El llarg i tortuós camí cap al domini del mercat

A mitjans dels anys vuitanta, les bateries de liti semblava que tenien un futur brillant com a producte comercial per alimentar els ordinadors portàtils i els telèfons mòbils que irrompien amb força al mercat. Però alguns incidents van fer esvair aquestes perspectives. Diversos telèfons mòbils NTT alimentats per bateries Moli van tenir incidents de seguretat: van arribar a explotar, i en un cas van ferir un usuari. La causa en va ser un curtcircuit provocat pel creixement dendrític del liti durant la recàrrega (vegeu la figura 6).

Això va representar la retirada definitiva de la tecnologia del mercat el 1989, de manera que la indústria japonesa cercava desesperadament una tecnologia de bateries segura i no tòxi-

ca, i s'investigaven diverses rutes en paral·lel, una de les quals va culminar amb la comercialització de la tecnologia Ni/MH per Matsushita (ara Panasonic), que encara avui en dia es fa servir en vehicles híbrids no endollables.

En aquesta època, Akira Yoshino era investigador a l'em-presa química Asahi Kasei, i tenia clar que la solució al pro-blema de seguretat de les bateries de liti era substituir el metall a l'elèctrode negatiu. Els esforços arreu per fer servir aliatges no semblaven donar resultat i algunes recerques científiques publicades en què es feien servir compostos d'intercalació tant a l'elèctrode positiu com al negatiu, tot i que interessants, tenien prestacions limitades en termes de densitat d'energia. Yoshino decidí començar a assajar amb materials com ara el poliacetilè o diferents tipus de carbó, i va patentar una bateria que empraria un d'aquests materials com a elèctrode negatiu i LiCoO_2 com a elèctrode positiu [9], motiu pel qual se'l considera l'inventor de la tecnologia d'ió liti (vegeu la figura 7). El 1986 ja van fabricar 200 cel·les i van poder començar a fer assajos de seguretat, que van ser reeixits [10] i els van permetre arribar a un acord amb Sony, que va llançar un projecte a gran escala per optimitzar la tecnologia, a l'èxit del qual va contribuir la seva experiència en la fabricació de cintes magnètiques, que també contenien òxids de metalls de transició. Finalment, el llançament de la tecnologia d'ió liti s'anuncià el febrer de 1990, i ben aviat va arribar al mercat en càmeres de vídeo i altres dispositius que han anat canviant les nostres vides: ordinadors i telèfons portàtils, tauletes, etcètera [11].

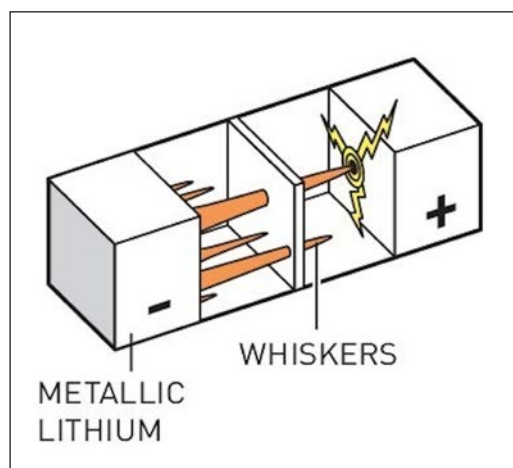


FIGURA 6. Esquema que mostra com el creixement de dendrites a l'elèctrode de liti pot provocar un curtcircuit a la bateria que l'empra. © Johan Jarnestad / The Royal Swedish Academy of Sciences.

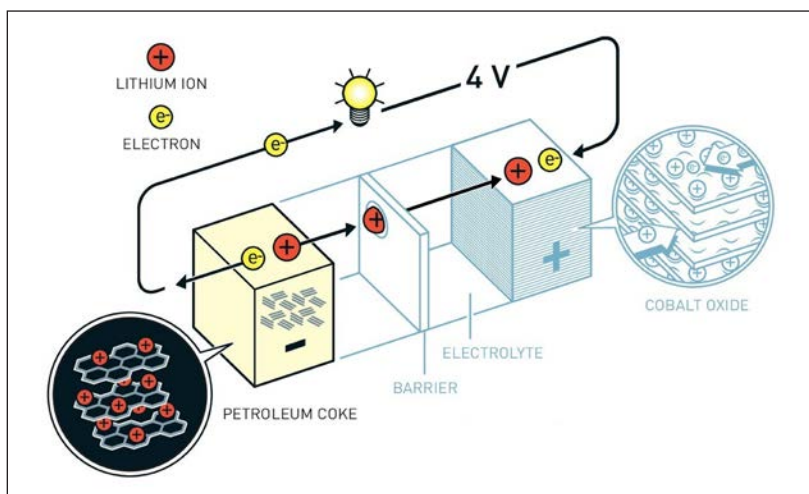


FIGURA 7. Esquema del concepte de bateria desenvolupat per Akira Yoshino. © Johan Jarnestad / The Royal Swedish Academy of Sciences.

Situació actual i perspectives de futur

Les prestacions de les bateries d'ió liti han anat millorant gràcies tant a la millora en l'enginyeria del producte com a la química de materials. S'han desenvolupat altres materials per a l'elèctrode positiu, com ara LiMn_2O_4 i LiFePO_4 , recerca que també devem a John B. Goodenough, així com derivats de LiCoO_2 on una part del cobalt s'ha substituït per níquel i manganès, per millorar-ne la capacitat i abaixar-ne el preu [12].

En el cas de l'elèctrode negatiu, la majoria de bateries comercials continuen emprant grafit, tot i que en alguns casos es fa servir $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$, que té una capacitat més baixa i un potencial més alt que penalitzen la densitat d'energia de la cèl·lula, però té una cinètica de reacció molt ràpida, fet que comporta que les bateries puguin carregar-se i descarregar-se a intensitats més elevades. Els elèctrodes negatiu i positiu estan formats per làmines metàl·liques de coure i alumini, respectivament, que actuen com a col·lectors de corrent, sobre els quals s'ha dipositat una suspensió del material actiu i additius, principalment negre de carbó, per augmentar-ne la conductivitat electrònica, i un polímer, per millorar l'adhesió i les propietats mecàniques. El separador és una làmina de polímer porós impregnada de l'electròlit (normalment, una dissolució de LiPF_6 en una barreja de carbonat d'etilè i carbonat de dimetil). Amb la millora de la tecnologia, els compo-

nents inerts (col·lectors de corrent, separador) s'han anat fent més prims, cosa que ha permès també d'augmentar la densitat d'energia [13].

Avui en dia, les bateries d'ió liti són omnipresents. El 2018 se'n van comercialitzar prou per emmagatzemar més de 160 000 MWh d'energia, amb un mercat entorn dels 30 000 milions d'euros [15]. Són un producte madur que ha permès la revolució electrònica que ha canviat la nostra manera de comunicar-nos, i està ampliant el seu camp d'aplicació a la mobilitat elèctrica o l'emmagatzemament d'energia renovable. Això representa també un canvi d'escala: es passa dels aproximadament 10 Wh de l'única cèl·lula que alimenta un telèfon mòbil als 50-100 Wh d'algunes cèl·lules connectades que alimenten dispositius una mica més grans, els kWh dels vehicles elèctrics i els MWh de la bateria que Tesla ha instal·lat a Austràlia i que està inscrita al llibre Guinness com la més gran del món. Les aplicacions a una escala més gran impliquen l'ús de diversos mòduls de cèl·lules, controlats per un «cervell» electrònic (*battery management system*), i també requeriments més estrictes en termes de cost, seguretat i durada, que fan que el desenvolupament tecnològic sigui crucial. A més a més, plantegen també la necessitat de tenir protocols de reciclatge eficients tant econòmicament com mediambientalment.

Donat que aplicacions diverses tenen requisits diferents, és previsible que en el futur es desenvolupin encara més variants diferents de la tecnologia d'ió liti, adaptades *ad hoc* a cada

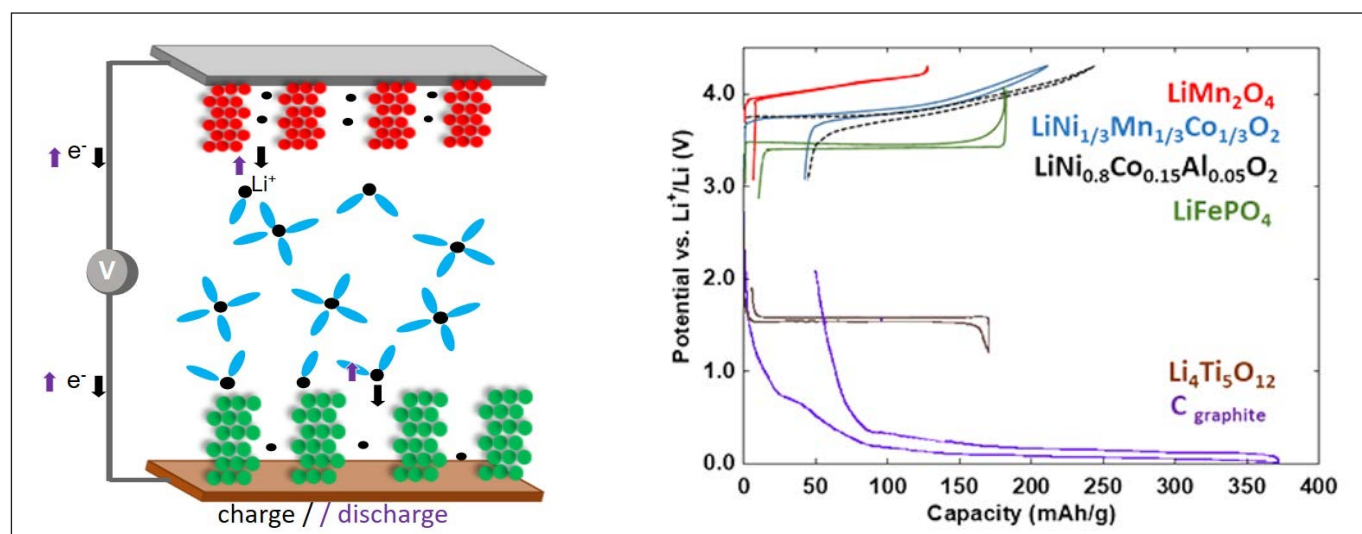


FIGURA 8. Esquema del funcionament d'una bateria d'ió liti emprant compostos d'intercalació com a elèctrodes positiu (vermell) i negatiu (verd); els ions liti es mostren en negre i les molècules de dissolvent de l'electròlit, en blau. Es mostra també la corba de potencial respecte a la capacitat específica dels materials d'elèctrode que es fan servir més habitualment a les bateries comercials. Reproduït amb permís de la Royal Society of Chemistry (© 2018); per a més detalls, vegeu [14].

cas. En el cas de les aplicacions a la xarxa elèctrica, en què la densitat d'energia de les bateries és menys important perquè no s'han de moure, la clau serà poder arribar a vides molt llargues (idealment, més de cinquanta anys) i a un cost baix emprant materials abundants. En aquest sentit, la tecnologia d'ió sodi sembla una opció interessant per tenir en compte. En aplicacions en què la densitat d'energia és clau, la revolució vindria del desenvolupament de la tecnologia de liti metàl·lic, però els entrebancs derivats de la formació de dendrites encara no s'han resolt. Una possibilitat seria fer servir electròlits sòlids, però això no evita completament el creixement dendrític i el transport d'ions a través d'interfícies sòlides no és fàcil d'optimitzar. Altres conceptes, com les cel·les Li/S o Li/aire (Li/O₂), són també interessants, però plantegen reptes rellevants, com la solubilitat dels ions polisulfur formats per reducció del sofre, o la reactivitat dels radicals formats per reducció de la molècula d'oxigen i la complexitat dels processos catalítics que cal tenir en compte en un elèctrode d'oxigen reversible. Altres conceptes, com l'ús d'elèctrodes de metalls lleugers diferents del liti i que poden arribar a estats d'oxidació més elevats (magnesi, calci, alumini), no són tampoc fàcils de desenvolupar. Tots ells, però, necessiten la recerca fonamental, en què la química i l'electroquímica de l'estat sòlid exerceixen un paper clau [16].

Referències i altres fonts

- [1] PALACÍN, M. R. «Recent advances in rechargeable battery materials: A chemist's perspective». *Chem. Soc. Rev.* [en línia], 38 (2009), p. 2565-2575. <<https://doi.org/10.1039/B820555H>>.
- [2] LEWIS, G. N.; KEYES, F. G. «The potential of the lithium electrode». *J. Am. Chem. Soc.* [en línia], 35 (1913), p. 340-344. <<https://doi.org/10.1021/ja02193a004>>.
- [3] WINTER, M.; XU, K. «Before Li ion batteries». *Chem. Rev.* [en línia], 118 (2018), p. 11433-11456. <<https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00422>>.
- [4] HOFMANN, U.; RÜDORFF, W. «The formation of salts from graphite by strong acids». *Trans. Faraday Soc.* [en línia], 34 (1938), p. 1017-1021. <<https://doi.org/10.1039/TF9383401017>>.
- [5] WHITTINGHAM, M. S. «Chemistry of intercalation compounds: metal guests in chalcogenide hosts». *Prog. Solid State Chem.* [en línia], 12 (1978), p. 41-99. <[https://doi.org/10.1016/0079-6786\(78\)90003-1](https://doi.org/10.1016/0079-6786(78)90003-1)>.
- [6] WHITTINGHAM, M. S. «Electrical energy storage and intercalation chemistry». *Science*, 192 (1976), p. 1126-1127. DOI: 10.1126/science.192.4244.1126.
- [7] PEREIRA, N.; AMATUCCI, G. G.; WHITTINGHAM, M. S.; HAMLIN, R. «Lithium-titanium disulfide rechargeable cell performance after 35 years of storage». *J. Power Sources* [en línia], 280 (2015), p. 18-22. <<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.01.056>>.
- [8] MIZUSHIMA, K.; JONES, P. C.; WISEMAN, P. J.; GOODENOUGH, J. B. «Li_xCoO₂ (0 < x ≤ 1): A new cathode material for batteries of high energy density». *Mat. Res. Bull.* [en línia], 15 (1976), p. 783-789. <[https://doi.org/10.1016/0025-5408\(80\)90012-4](https://doi.org/10.1016/0025-5408(80)90012-4)>.
- [9] YOSHINO, A.; SANECHIKA, K.; NAKAJIMA, T. «Secondary battery». United States Patent 4,668,595 (26 maig 1987).
- [10] YOSHINO, A. «The birth of the lithium-ion battery». *Angew. Chem. Int. Ed.* [en línia], 51 (2012), p. 5798-5800. <<https://doi.org/10.1002/anie.201105006>>.
- [11] *The Nobel Prize in Chemistry 2019. Advanced information* [en línia]. <<https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2019/advanced-information/>> [Consulta: 29 octubre 2019].
- [12] TARASCON, J. M. «The Li-ion battery: 25 years of exciting and enriching experiences». *Electrochem. Soc. Interface*, 25 (2016), p. 79-83. DOI: 10.1149/2.F08163if.
- [13] BLOMGREN, G. E. «The development and future of Lithium ion batteries». *J. Electrochem. Soc.*, 164 (2017), p. A5019-A5025. DOI: 10.1149/2.0251701jes.
- [14] PALACÍN, M. R. «Understanding ageing in Li-ion batteries: a chemical issue». *Chem. Soc. Rev.* [en línia], 47 (2018), p. 4924-4933. <<https://doi.org/10.1039/C7CS00889A>>.
- [15] PILLOT, C. «The rechargeable battery market and main trends 2018-2020». Presentació a *International Battery Seminar and Exhibit* (Fort Lauderdale, EUA, 25 març 2019).
- [16] PLACKE, T.; KLOEPSCH, R.; DÜHNER, S.; WINTER, M. «Lithium ion, lithium metal, and alternative rechargeable battery technologies: The odyssey for high energy density». *J. Solid State Electrochem.* [en línia], 21 (2017), p. 1939-1964. <[https://doi.org/10.1016/0022-4596\(79\)90189-0](https://doi.org/10.1016/0022-4596(79)90189-0)>.



M. R. Palacín

M. Rosa Palacín és llicenciada en química per la Universitat Autònoma de Barcelona (UAB, 1991) i obtingué el doctorat en química en el pla de ciència de materials per la mateixa universitat l'any 1995. Després d'una estada postdoctoral a la Universitat de Picardia Jules Verne (Amiens, França), es reincorporà a l'Institut de Ciència de Materials de Barcelona (ICMAB-CSIC), on actualment és professora d'investigació. Tota la seva carrera científica s'ha centrat en l'estudi dels materials per a bateries recarregables, tant en tecnologies comercials (níquel o ió liti) com emergents (ió sodi), i fins i tot en nous conceptes basats en altres metalls (magnesi, calci). Ha liderat diversos projectes de recerca nacionals i internacionals amb finançament tant públic com industrial. Va ser codirectora científica de l'institut europeu virtual de recerca en el camp de les bateries ALISTORE-ERI (2010-2017), i actualment és membre de la Junta de Govern de Batteries Europe ETIP i presidenta de la International Battery Association. Ha contribuït a diversos comitès d'experts tant a Europa com als Estats Units, i ha escrit articles de revisió en revistes com *Chemical Reviews*, *Chemical Society Reviews* o *Science*. És també coautora de més de cent trenta articles científics i coinventora de vuit patents, la majoria de les quals en cotitularitat entre el Consell Superior d'Investigacions Científiques (CSIC) i Toyota Motor Europe. Ha aconseguit un notable reconeixement internacional en el seu camp de recerca, i ha impartit un gran nombre de conferències convidades i plenàries en diversos congressos del camp de la química, la ciència de materials i la tecnologia de bateries.