



Foto: Claus Ableiter (Wikipedia)

Prêmio Nobel de Química de 2019 Láurea pelo Desenvolvimento das Baterias de Íons Lítio

Nerilso Bocchi, Sonia R. Biaggio e Romeu C. Rocha-Filho

O Prêmio Nobel de Química de 2019 foi outorgado aos pesquisadores que desenvolveram as baterias de íons lítio. Neste artigo, além de se relatar breves biografias dos laureados, são explicadas as contribuições de cada um deles que levaram à comercialização dessas baterias a partir de 1991.

► Prêmio Nobel, baterias de íons lítio, baterias recarregáveis, compostos de intercalação ◀

320

Recebido em 01/11/2019, aceito em 05/11/2019

Neste ano, o Prêmio Nobel de Química foi outorgado a pesquisadores que se dedicaram a investigar uma versão de bateria recarregável que revolucionou a comunicação e o trabalho em nossa sociedade, desde que ela foi introduzida pela primeira vez no mercado em 1991. Essa bateria, conhecida como *bateria de íons lítio*, fornece maior quantidade de energia se comparada às baterias já existentes e é, ao mesmo tempo, mais leve e miniaturizável, podendo ser utilizada tanto em equipamentos portáteis (celulares, computadores pessoais, equipamentos médicos, etc.) quanto em outros de maior escala, como, por exemplo, os carros elétricos.

Essa premiação ocorre em um momento em que muito se destaca, na mídia nacional e internacional, a importância de se diminuir a emissão de gases oriundos da combustão de derivados de petróleo para tentar controlar o aquecimento global. Nesse aspecto, as baterias recarregáveis são peças fundamentais para o fornecimento de energia limpa, de emissão zero (em princípio), para manter

Essa premiação ocorre em um momento em que muito se destaca, na mídia nacional e internacional, a importância de se diminuir a emissão de gases oriundos da combustão de derivados de petróleo para tentar controlar o aquecimento global.

nosso planeta mais saudável. Ao mesmo tempo, a energia limpa que é gerada por células solares e moinhos de vento pode ser armazenada pelas baterias de íons lítio.

Os laureados com o Prêmio Nobel de Química de 2019 foram os cientistas John B. Goodenough, M. Stanley Whittingham e Akira Yoshino, que, nas décadas de 1970 e 1980, trouxeram inovações à tecnologia conhecida na época

para as baterias de lítio convencionais. Alguns detalhes sobre suas biografias são apresentados no Quadro 1.

Baterias recarregáveis

O emprego dos termos pilha e bateria tem sido feito indistintamente para descrever sistemas eletroquímicos fechados que armazenam e liberam energia. Porém, a rigor, uma “pilha” é um dispositivo que é constituído unicamente de dois eletrodos (condutores de elétrons) separados por um eletrólito (condutor de íons) – as pilhas alcalinas comuns são exemplos disso. Em contrapartida, uma “bateria” refere-se a um conjunto de pilhas que podem ser agrupadas em série ou em paralelo, para um maior fornecimento de potencial ou de corrente, respectivamente (Bocchi *et al.*, 2000).

A seção “Atualidades em Química” procura apresentar assuntos que mostrem como a Química é uma ciência viva, seja com relação a novas descobertas, seja no que diz respeito à sempre necessária revisão de conceitos.

<p>Cockrell School of Engineering, The University of Texas at Austin</p>		<p>John B. Goodenough Nasceu em 1922, em Jena, na Alemanha, de pais americanos. Após se formar em Matemática (1944) pela Universidade de Yale, fez mestrado (1951) e doutorado (1952) na Universidade de Chicago. Em seguida, por 24 anos foi cientista pesquisador e líder de pesquisas no Laboratório Lincoln do Instituto de Tecnologia de Massachussets (MIT), no qual participou de uma equipe multidisciplinar que estabeleceu as bases para o desenvolvimento das memórias de acesso aleatório (RAM, do Inglês: <i>random access memory</i>), fundamentais para os computadores digitais. Nesse período, esteve envolvido com investigações sobre as propriedades de diferentes óxidos de metais de transição, o que seria importante em sua etapa profissional seguinte. Em 1976, aceitou um convite para se tornar professor e líder do Laboratório de Química Inorgânica na Universidade de Oxford, na Inglaterra. Foi aí que o seu grupo de pesquisa demonstrou que cerca de 50% dos íons lítio podiam ser extraídos/inseridos do/no cobaltato de lítio ou niquelato de lítio sem que suas estruturas se deformassem, sendo, portanto, excelentes candidatos a material do catodo de baterias de lítio. Em 1986, ao se aposentar da Universidade de Oxford, ele passou a ser professor nos departamentos de Engenharia Mecânica e de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia Cockrell da Universidade do Texas em Austin, onde continua ativo pesquisando materiais para baterias. Ao ser laureado com o Prêmio Nobel de Química de 2019, aos 97 anos de idade, tornou-se a pessoa mais idosa a receber um prêmio Nobel. Anteriormente, recebeu inúmeros outros prêmios e honrarias, sendo membro da Academia Nacional de Engenharia dos EUA, desde 1976, por “conceber materiais para componentes eletrônicos e explicar as relações entre propriedades, estrutura e química”, e da Academia Nacional de Ciências daquele país desde 2012.</p>
<p>Binghamton University/State University of New York</p>		<p>M. Stanley Whittingham Nasceu em 1941, em Nottingham, Inglaterra. Formou-se em Química (1964) na Universidade de Oxford, onde também fez o mestrado (1967) e o doutorado (1968). Em seguida, de 1968 a 1972, esteve envolvido em pesquisas na área de eletroquímica do estado sólido na Universidade de Stanford. De 1972 a 1984, Whittingham foi cientista pesquisador da empresa Exxon, na qual, na década de 1970, foi pioneiro em investigações sobre o uso de compostos de intercalação como material de catodo para baterias de lítio. Após ser diretor da área de ciências físicas da Schlumberger, a maior empresa prestadora de serviços em campos petrolíferos, em 1984 passou a ser professor de Química, Ciência dos Materiais e Engenharia na Universidade Estadual de Nova Iorque em Binghamton, comumente referida como Universidade de Binghamton. Nessa instituição é o diretor do Centro do Nordeste para Armazenamento Químico de Energia, um centro de pesquisas de fronteira em energia financiado pelo Departamento de Energia do governo dos EUA. Nele, continua liderando, entre outras, pesquisas sobre materiais de intercalação para baterias, com foco em reações de intercalação multieletrônicas que possam aumentar significativamente a capacidade específica ao viabilizar a inserção de vários íons lítio (por exemplo, $\text{LiVOPO}_4/\text{VOPO}_4$, em que o estado de oxidação do vanádio pode variar na faixa de V^{3+} a V^{5+}). Recebeu diversos prêmios e honrarias, sendo membro da Academia Nacional de Engenharia dos EUA desde 2108 “por ter sido pioneiro na aplicação de materiais de intercalação como materiais de armazenamento de energia”.</p>
<p>©2019 Asahi Kasei Corporation</p>		<p>Akira Yoshino Nasceu em 1948, em Suita, Japão. Formou-se em Engenharia (1970) na Universidade de Kyoto, onde também fez o mestrado em Engenharia (1972). Só obteve o seu título de doutor em Engenharia em 2005, na Universidade de Osaka. Ainda em 1972, passou a fazer parte do grupo de pesquisadores da empresa Asahi Kasei, na qual ocupou diversas posições e, desde abril de 2010, é o presidente do Centro de Avaliação e Tecnologia de Baterias de Íons Lítio (LIBTEC), sendo confrade (<i>fellow</i>) honorário da empresa, desde outubro de 2017. Na década de 1980, liderou investigações para criar uma nova bateria recarregável e prática com eletrólito não aquoso, o que levou à concepção da bateria de íons lítio, culminando em um protótipo funcional em 1986, com material de intercalação de carbono (coque) no anodo. Yoshino é professor da Escola de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Universidade Meijo, desde julho de 2017, e mais recentemente (desde junho de 2019) tornou-se professor visitante do Centro de Pesquisa e Educação para Tecnologias Verdes da Universidade Kyushu. Recebeu diversos prêmios e honrarias no Japão e no exterior. Após ser laureado com o prêmio Nobel, suas contribuições à ciência e tecnologia foram reconhecidas novamente com sua admissão à Ordem da Cultura, honraria conferida pelo imperador japonês.</p>

Quando os terminais dos eletrodos de uma pilha ou bateria são conectados a um aparelho elétrico, uma corrente flui pelo circuito externo (vide Figura 1), pois o material de um dos eletrodos (**anodo** ou eletrodo negativo) oxida-se espontaneamente liberando elétrons, enquanto o material do outro eletrodo (**catodo** ou eletrodo positivo) reduz-se espontaneamente utilizando esses elétrons. Um material microporoso, embebido no eletrólito, é utilizado como separador para impedir que ocorra curto-circuito entre os eletrodos.

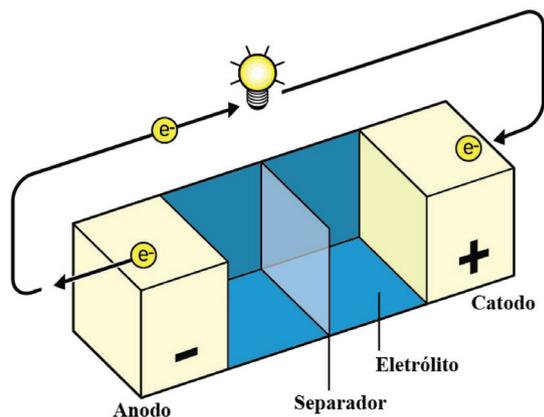


Figura 1: Elementos que definem uma pilha ou bateria em regime espontâneo de descarga: anodo ou eletrodo negativo; catodo ou eletrodo positivo; eletrólito; separador microporoso; circuito externo que permite a utilização do fluxo de elétrons. (Adaptação de figura de ©Johan Jarnestad/Academial Real Sueca de Ciências, 2019).

Baterias recarregáveis são aquelas que podem ser reutilizadas muitas vezes pelos usuários. Isso é possível quando os processos de oxidação e redução que ocorrem nos eletrodos são reversíveis. Como regra geral, como ressaltado por Bocchi *et al.* (2000), uma bateria pode ser considerada recarregável quando é capaz de suportar no mínimo 300 ciclos completos de carregamento e descarregamento, com pelo menos 80 % da sua capacidade de armazenamento de carga elétrica inicial. Em nosso cotidiano, como exemplos mais comuns temos as baterias recarregáveis de chumbo/óxido de chumbo (chumbo/ácido, comumente usada nos automóveis de motor a combustão), de hidreto metálico/óxido de níquel, de sódio/enxofre, de íons lítio, etc.

Essas baterias apresentam diferentes capacidades de armazenamento e fornecimento de carga/energia elétrica (para contextualização, lembre que a carga de um mol de elétrons é $\sim 96,5$ kC). Por exemplo, considerando 1 kg do dispositivo, as atuais baterias chumbo/ácido comerciais podem fornecer até 25 A h (90 kC) de carga elétrica e 50 W h (180 kJ) de energia, enquanto que esses valores chegam a 62,5 A h (225 kC) e 250 W h (900 kJ), respectivamente, para as baterias de íons lítio. Vale lembrar que a *energia específica* (W h kg^{-1}) de um dispositivo eletroquímico é dada pelo produto da *carga elétrica específica*,

Baterias recarregáveis são aquelas que podem ser reutilizadas muitas vezes pelos usuários. Isso é possível quando os processos de oxidação e redução que ocorrem nos eletrodos são reversíveis.

mais frequentemente denominada de *capacidade específica* (A h kg^{-1}), pelo *potencial de célula médio* (V), cujos valores são 2,0 V e 4,0 V para as baterias chumbo/ácido e de íons lítio, respectivamente.

Um breve histórico sobre como surgiram as baterias de íons lítio, o princípio de seu funcionamento e a evolução em tecnologia para garantir maior fornecimento de energia, segurança ao usuário e ao meio ambiente é feito a seguir.

Baterias de lítio e de íons lítio

Em meados do século XX, as limitações das baterias então utilizadas inspiraram a busca por outras configurações que pudessem fornecer maiores valores de capacidade específica e de energia específica e, assim, o lítio tornou-se um alvo importante. Isso porque esse metal apresenta excelentes propriedades para aplicação como um dos eletrodos de bateria: é o mais leve dos metais (densidade $0,53 \text{ g cm}^{-3}$) e seu potencial de eletrodo padrão é bastante negativo ($-3,05 \text{ V vs. EPH}$ – eletrodo padrão de hidrogênio), o que o tornou atraente para ser empregado como anodo em baterias com altos valores de potencial de célula e energia específica. Entretanto, o lítio metálico é muito reativo, não podendo estar em contato com a água ou com o ar. Consequentemente, eletrólitos não aquosos tiveram que ser desenvolvidos.

O princípio de funcionamento das **baterias recarregáveis de lítio** envolve, durante seu descarregamento/carregamento, processos de inserção/extração de íons lítio para/de uma matriz hospedeira (material de eletrodo), também denominada de composto de intercalação (ou inserção). Esse processo de inserção/extração de íons lítio, acompanhado por um fluxo de íons lítio através do eletrólito, decorre de uma reação de redução/oxidação da matriz hospedeira com consumo/liberação de elétrons de/para um circuito externo. Esse conceito foi primeiramente demonstrado por Whittingham, em 1976, para uma bateria recarregável de lítio constituída por um catodo de dissulfeto de titânio (TiS_2), um anodo de lítio metálico (Li) e um eletrólito não aquoso (Whittingham, 1976). A Figura 2 apresenta um esquema dessa primeira versão de uma bateria recarregável de lítio.

O dissulfeto de titânio é um composto de intercalação, já que apresenta estrutura lamelar. Durante o descarregamento (espontâneo) da bateria proposta por Whittingham, ocorre a reação de redução de íons Ti^{4+} para Ti^{3+} e, consequentemente, íons lítio (Li^+) são inseridos entre as camadas de sulfeto na estrutura do composto para a devida compensação de carga elétrica no material. Durante o carregamento (não espontâneo), ocorre o processo inverso, isto é, a reação de oxidação de íons Ti^{3+} para Ti^{4+} com a consequente extração de íons lítio da estrutura do TiS_2 . A manutenção da estrutura lamelar do TiS_2 intata ao longo de vários ciclos de carregamento/descarregamento garante a reversibilidade deste processo. O potencial de célula dessa primeira bateria

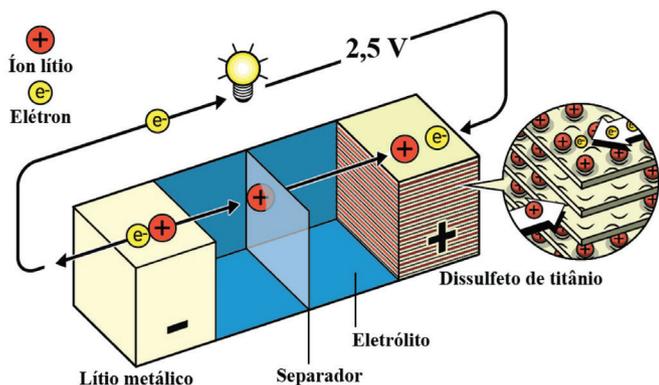


Figura 2: Representação esquemática da bateria de lítio proposta por Whittingham, em 1976, na qual o anodo era lítio metálico, o catodo um monocristal de dissulfeto de titânio (um composto de intercalação), e o eletrólito uma solução de hexafluorofosfato de lítio (LiPF_6) em carbonato de propileno. (Adaptação de figura de ©Johan Jarnestad/Academial Real Sueca de Ciências, 2019).

de lítio proposta por Whittingham, dado pela diferença entre os potenciais de eletrodo dos materiais usados como catodo (TiS_2) e anodo (Li), era da ordem de 2,5 V.

Com a demonstração do conceito de bateria recarregável de lítio usando TiS_2 como catodo, diversos outros sulfetos, selenetos e teluretos foram investigados como material de catodo, ainda na década de 1970, como revisado por Whittingham e Jacobson (1982). Entretanto, a grande maioria desses materiais apresentou valor de potencial de célula

menor que 2,5 V em relação ao anodo de Li em solução não aquosa contendo íons Li^+ . Consequentemente, com o intuito de aumentar a energia específica fornecida por uma bateria de lítio, ou seja, maiores valores de potencial de célula e capacidade específica, diversos pesquisadores, dentre eles Goodenough, estudaram alguns óxidos como material de catodo no início da década de 1980 (Goodenough *et al.*, 1980), e mais extensivamente na década de 1990. Com isso, foram propostas diversas matrizes hospedeiras de óxidos de metais de transição (geralmente com estados de oxidação variados) com estruturas bi e tridimensionais que também permitem a intercalação de íons lítio. Valores de potencial de célula de até cerca de 5 V em relação ao Li/Li^+ foram obtidos, como ilustrado na Figura 3. Dela, por exemplo, pode-se inferir que o cobaltato de lítio, Li_xCoO_2 , originalmente sugerido como possível material de catodo pelo grupo de Goodenough (Mizushima *et al.*, 1980), pode apresentar um potencial de célula de até cerca de 4,5 V e capacidade específica próxima de 150 A h kg^{-1} .

Apesar das baterias recarregáveis de lítio fornecerem altos valores de capacidade específica ao se usar óxidos metálicos como material do catodo, a sua comercialização apresentou problemas devido ao anodo de lítio metálico. Dada a reatividade química desse metal, depósitos não uniformes (dendríticos) de lítio tendem a ser formados durante o carregamento da bateria. Tais depósitos podem provocar o fim da vida da bateria por curto-circuito (dendritos do

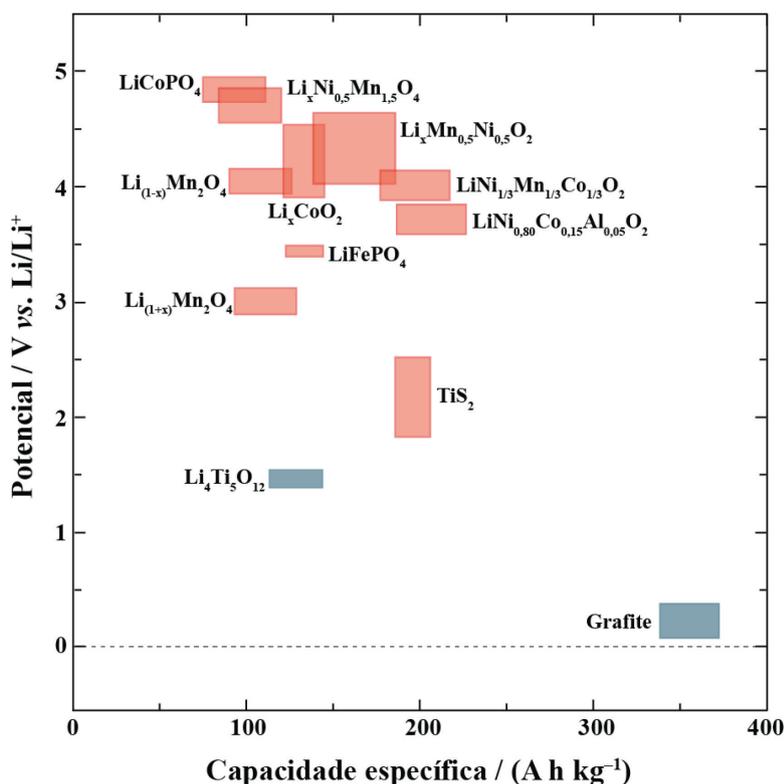


Figura 3: Ilustração esquemática de diferentes materiais de eletrodo em termos de potencial de célula e capacidade específica, que podem ser usados na montagem de baterias de lítio ou de íons lítio: mais positivos (em vermelho) para catodo, e menos positivos (em azul) para anodo. Para melhor clareza da ilustração, nela não foram incluídos o lítio metálico e o coque litiado (Li_xC) por apresentarem altos valores de capacidade específica (3861 A h kg^{-1} e 600 A h kg^{-1} , respectivamente); os valores de potencial de célula desses materiais são 0 V e $\sim 0,4 \text{ V}$ vs. Li/Li^+ . (Adaptação de figura do artigo de Goodenough e Kim, 1980).

depósito atingem o catodo), bem como sérios problemas de segurança devido ao demasiado aquecimento local e a possibilidade de ocorrerem incêndios (Academia Real Sueca de Ciências, 2019).

Essas dificuldades associadas à utilização de lítio metálico como anodo impulsionaram o desenvolvimento das **baterias recarregáveis de íons lítio**, constituídas por compostos de intercalação tanto para o material de catodo como para o material de anodo. Além disso, na década de 1980, a busca pela indústria de eletroeletrônicos no Japão por baterias mais leves e recarregáveis motivou as pesquisas sobre materiais carbonáceos para o anodo.

Nessa época, quando Akira Yoshino pensou em produzir uma bateria recarregável funcional, utilizou Li_xCoO_2 como catodo e testou vários materiais de carbono como anodo. Sabia-se que íons Li^+ poderiam ser intercalados nas camadas moleculares da grafite, mas esta se mostrou instável no eletrólito da bateria (a intercalação concomitante de espécies do eletrólito levava à esfoliação e destruição dos anodos de grafite). Nesse contexto, o grande

As dificuldades associadas à utilização de lítio metálico como anodo impulsionaram o desenvolvimento das baterias recarregáveis de íons lítio, constituídas por compostos de intercalação tanto para o material de catodo como para o material de anodo.

avanzo proposto por Yoshino e colaboradores ocorreu em 1985, quando reduziram eletroquimicamente uma amostra de coque (comumente, um subproduto da indústria de petróleo) e os íons lítio foram atraídos para dentro do material. Na sequência, ao usar o coque litiado como anodo da bateria, os elétrons e os íons lítio fluíram espontaneamente em direção ao óxido de cobalto no catodo, dando origem assim a uma bateria leve, estável, com alta capacidade específica e com um potencial de célula de incríveis 4 V (Yoshino et al., 1985). Os domínios cristalinos do coque teriam sido protegidos da esfoliação pelas regiões amorfas no seu entorno e, assim, os

íons lítio puderam ser intercalados de maneira repetitiva e eficiente no material.

Alguns anos depois, descobriu-se que a grafite também poderia ser utilizada como material de anodo, desde que combinada com um eletrólito adequado (Fong *et al.*, 1990). Ao empregar solventes contendo carbonato de etileno, uma interfase de eletrólito sólido (SEI, do Inglês: *solid electrolyte interphase*) era formada na superfície do anodo de grafite durante os primeiros ciclos de carregamento/descarregamento, a qual passava a proteger o material de carbono da esfoliação e consequente decomposição. Essa descoberta foi rapidamente adotada pela comunidade e, conseqüentemente, uma nova geração de baterias de íons lítio foi desenvolvida, baseada na grafite como material de anodo (baterias com potencial de célula de 4,2 V e energia específica de aproximadamente 150 W h kg^{-1}).

A primeira bateria de íons lítio comercial foi lançada pela Sony em 1991, tendo o cobaltato de lítio (Li_xCoO_2) como material de catodo e grafite litiada (Li_yC) como material de anodo. Essa

estratégia exigiu escolhas cuidadosas de pares de materiais de catodo e anodo da bateria, a fim de se obter um potencial de célula de pelo menos 3 V e uma razoável energia específica, sem aumentar indevidamente sua massa ou seu volume (Manthiram, 2009). Dentre os diversos compostos de intercalação, o cobaltato de lítio (Li_xCoO_2), o niquelato de lítio (Li_xNiO_2), o manganato de lítio ($\text{Li}_x\text{Mn}_2\text{O}_4$), ou combinações destes últimos, bem como o fosfato de lítio e ferro (Li_xFePO_4), com potenciais de célula no intervalo de 3 a 5 V vs. Li/Li^+ (vide Figura 3), são os mais comumente empregados como material de catodo.

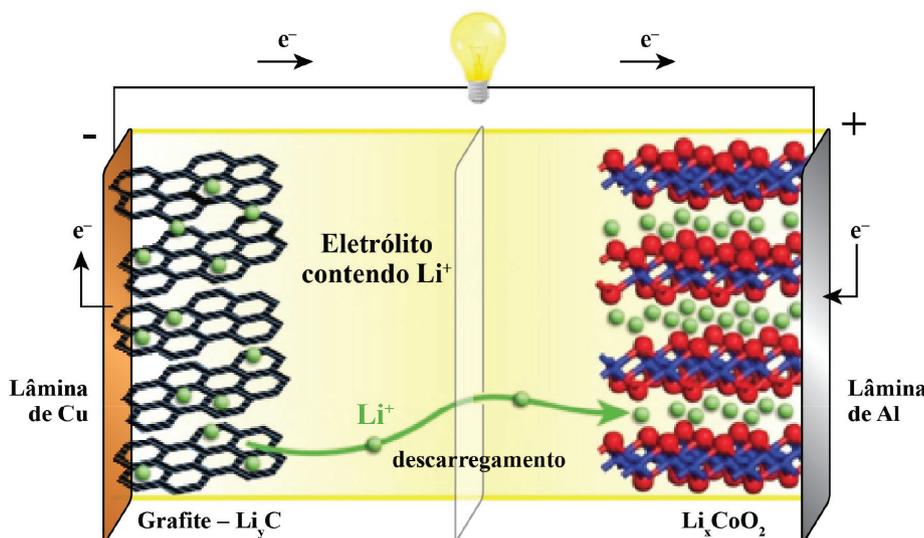
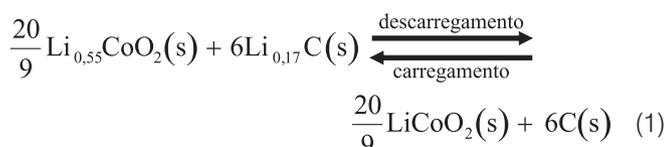


Figura 4: Representação esquemática do processo de descarregamento em uma bateria recarregável de íons lítio que emprega compostos de intercalação como materiais de catodo (Li_xCoO_2 , onde $x = 0,55$) e anodo (grafite – Li_yC , onde $y = 0,17$) – veja a Equação 1. Eletrólito: comumente o hexafluorofosfato de lítio (LiPF_6) dissolvido em uma concentração de 1 mol L^{-1} numa mistura 1:1 (V/V) dos solventes orgânicos carbonato de etileno e carbonato de dimetila. (Adaptação de figura do artigo de Bruce, 2008).

Por outro lado, a grafite e o coque, com baixa densidade e potencial menor que 0,5 V vs. Li/Li⁺, têm sido os materiais mais utilizados como anodo em baterias de íons lítio, como ilustrado na Figura 4. Nesse caso, durante o processo de descarregamento da bateria (processo espontâneo), os íons lítio migram do anodo de grafite litiada (Li_xC) para o catodo de cobaltato de lítio (Li_xCoO₂) através do eletrólito, e os elétrons fluem através do circuito externo. Sendo o material de catodo relativamente estável no eletrólito, essa bateria de íons lítio apresenta um número alto de ciclos repetitivos de carregamento e descarregamento (em torno de 1000 ciclos), com boa manutenção da capacidade específica inicial. A equação química que representa a reação global dessa bateria de íons lítio é (Oldham *et al.*, 2012):



Considerações finais

Não há dúvida que o empenho nas pesquisas sobre os materiais de intercalação para o catodo (lideradas por Whittingham e Goodenough) e sobre os materiais carbonáceos com intercalação de íons Li⁺ para o anodo (lideradas por Yoshino) viabilizou o lançamento comercial das baterias de íons lítio em 1991. O imediato sucesso dessas baterias e posteriores melhorias levaram a sua grande utilização nos dias atuais, trazendo um enorme impacto em nosso mundo e modo de vida, pois estão onipresentes em dispositivos móveis sem fio (celulares, notebooks, etc.). Além disso, estão em veículos elétricos com crescentes autonomias, veículos híbridos, patinetes e ferramentas elétricas, sistemas de armazenamento de energia a bateria (para nivelamento de demanda de energia elétrica ou armazenamento de energia gerada fora de horários de pico), etc.

Entretanto, cabe lembrar que, além de características intrínsecas dos compostos de intercalação usados como materiais de eletrodos, outros quesitos são igualmente importantes para a concepção de uma bateria recarregável de íons lítio de alto desempenho e longa vida útil. Dentre esses quesitos destaca-se o eletrólito empregado nessas baterias. Ele deve apresentar alta condutividade para os

íons lítio e ser isolante eletrônico, a fim de evitar curto-circuito interno. Também deve ter estabilidade química, não reagir com os materiais de eletrodo e os seus riscos de aquecimento e explosão serem mínimos (Manthiram, 2009). Nas últimas décadas, as pesquisas sobre possíveis eletrólitos apresentaram bastante progresso, buscando-se sempre alternativas para melhorar a segurança dos usuários das baterias de íons lítio. Nesse sentido, eletrólitos alternativos têm sido propostos, tais como poliméricos sólidos, poliméricos géis, sólidos inorgânicos, líquidos iônicos e soluções aquosas superconcentradas.

Com relação aos materiais dos eletrodos, especial atenção tem sido dada aos materiais nanoestruturados, já que fornecem maior área superficial com caminhos mais curtos para os transportes eletrônico e iônico e, consequentemente, a possibilidade de reações mais rápidas. Com isso, espera-se que muitas outras descobertas importantes em tecnologia de baterias estejam por vir. Ademais, a engenharia envolvida na concepção e fabricação da bateria tem um papel crítico para o seu desempenho global. Por fim, os custos de matéria prima e fabricação, a segurança dos usuários, os aspectos ambientais e de reciclagem também são fatores importantes tanto para a escolha de materiais quanto para a concepção da bateria.

Sem dúvida alguma, as baterias de íons lítio estabeleceram um marco para a consolidação de uma sociedade altamente conectada (sem fio) e cada vez mais livre dos combustíveis fósseis, o que poderá trazer um imenso benefício para a humanidade e para o planeta.

Agradecimentos

Agradece-se o apoio da CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (código de financiamento 001), CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, e FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, por meio de bolsas e auxílios concedidos.

Nerilso Bocchi (bocchi@ufscar.br), **Sônia R. Biaggio** (biaggio@ufscar.br) e **Romeu C. Rocha-Filho** (romeu@ufscar.br), licenciados em Química pela UFSCar, mestres em Físico-Química e doutores em Ciências (Físico-Química) pela USP, são docentes do Departamento de Química da UFSCar, onde são membros do Laboratório de Pesquisas em Eletroquímica (www.ufscar.br/lape). São Carlos, SP – BR.

Referências

ACADEMIA REAL SUECA DE CIÊNCIAS. Scientific background: lithium-ion batteries. NobelPrize.org. Nobel Media AB 2019. Disponível em <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2019/advanced-information>, acessada em outubro de 2019.

BOCCHI, N.; FERRACIN, L. C. e BIAGGIO, S. R. Pilhas e baterias: funcionamento e impacto ambiental. *Química Nova na Escola*, v. 11, p. 3-9, 2000.

BRUCE, P. G. Energy storage beyond the horizon: rechargeable

lithium batteries. *Solid State Ionics*, v. 179, n. 21-26, p. 752-760, 2008.

FONG, R.; SACKEN, U. VON e DAHN, J. R. Studies of lithium intercalation into carbons using nonaqueous electrochemical cells. *Journal of the Electrochemical Society*, v. 137, n. 7, p. 2009-2013, 1990.

GOODENOUGH, J. B. e KIM, Y. Challenges for rechargeable Li batteries. *Chemistry of Materials*, v. 22, n. 3, p. 587-603, 2010.

GOODENOUGH, J. B.; MIZUSHIMA, K. e TAKEDA, T. Solid-solution oxides for storage-battery electrodes. *Japanese Journal of Applied Physics*, v. 19, n. 19-3, p. 305-313, 1980.

MANTHIRAM, A. Materials aspects: an overview. In: *Lithium Batteries Science and Technology*. NAZRI G.A e PISTOIA, G. Eds., Nova Iorque, Springer, 2009. p. 1-41.

MIZUSHIMA, K.; JONES, P. C.; WISEMAN, P. J.; GOODENOUGH, J. B. Li_xCoO_2 ($0 < x < 1$): a new cathode material for batteries of high energy density. *Materials Research Bulletin*, v. 15, n. 6, p. 783-789, 1980.

OLDHAM, K. B.; MYLAND, J. C. e BOND, A. M. *Electrochemical Science and Technology – Fundamentals and Applications*. Chichester: Wiley, 2012. p. 97-99.

WHITTINGHAM, M. S. Electrical energy storage and intercalation chemistry. *Science*, v. 192, n. 4244, p. 1126-1127, 1976.

WHITTINGHAM, M. S. e JACOBSON, A. J. *Intercalation Chemistry*. Nova Iorque: Academic Press, 1982.

YOSHINO, A.; SANECHIKA, K. e NAKAJIMA, T. *Secondary Battery*. Patente japonesa n. 1989293 / Patente americana n. 4668595, 1985.

Para saber mais

ACADEMIA REAL SUECA DE CIÊNCIAS. *They developed the world's most powerful battery*. NobelPrize.org. Nobel Media AB 2019. Disponível em <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2019/popular-information>, acessada em outubro de 2019.

BOCCHI, N.; ROCHA-FILHO, R. C. e BIAGGIO, S. R. Veículos elétricos: perspectivas de uso de baterias de íons lítio. IN: VELLOSO, J. P. R. (Org.). *Estratégia de Implantação do Carro Elétrico no Brasil*. Rio de Janeiro: Instituto Nacional de Altos Estudos, INAE - Forum Nacional, 2010, v. 1, p. 158-180. Disponível em <http://www.provedor.nuca.ie.ufrj.br/eletrobras/estudos/veloso1.pdf>, acessada em outubro de 2019.

BRASIL. MINISTÉRIO DA DEFESA. *Seminário Sobre Acumuladores de Energia* (3 e 4 de outubro de 2018). Apresentações diversas, algumas específicas sobre as baterias de íons lítio. Disponíveis em <https://www.defesa.gov.br/ciencia-e-tecnologia/semin%C3%A1rio-acumuladores-de-energia>, acessada em outubro de 2019.

BUSNARDO, N. G.; PAULINO, J. F. e AFONSO, J. F. Recuperação de cobalto e de lítio de baterias íon-lítio usadas. *Química Nova*, v. 30, n. 4, p. 995-1000, 2007.

CETEM – CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL. *III Seminário Sobre Lítio-Brasil: Desafios para o Desenvolvimento da Cadeia de Lítio no País*. Apresentações diversas, algumas específicas sobre as baterias de íons lítio. Disponíveis em <https://www.cetem.gov.br/iii-seminario-litio-brasil>, acessada em outubro de 2019.

GOODENOUGH, J. B. How we made the Li-ion rechargeable battery. *Nature Electronics*, v. 1, n. 1, p. 587-603, 2010.

PERES, B. A. e BERTUOL, D. A. Reciclagem de baterias de íons de lítio de aparelhos celulares: recuperação do solvente orgânico do eletrólito através da adsorção em carvão ativado. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental REGET/UFES*, v. 5, n. 5, p. 850-856, 2012.

PESQUERO, N. C.; BUENO, P. R.; VARELA, J. A.; LONGO, E. Materiais cerâmicos de inserção aplicados a baterias de íons lítio. *Cerâmica*, v. 54, n. 330, p. 233-244, 2008.

ROCCO, A. M. Carros elétricos e as baterias de íon-lítio: estado atual de desenvolvimento e perspectivas tecnológicas. IN: VELLOSO, J. P. R. (Org.). *Estratégia de Implantação do Carro Elétrico no Brasil*. Rio de Janeiro: Instituto Nacional de Altos Estudos, INAE - Forum Nacional, 2010, v. 1, p. 192-213. Disponível em <http://www.provedor.nuca.ie.ufrj.br/eletrobras/estudos/veloso1.pdf>, acessada em outubro de 2019.

SANTOS, C. A. L. Baterias de íons lítio para veículos elétricos. *Revista IPT | Tecnologia e Inovação*. v. 2, n. 9, p. 62-82, 2018. Disponível em <http://revista.ipt.br/index.php/revistaIPT/article/download/71/81>, acessada em outubro de 2019.

SILVA, R. G.; AFONSO, J. C. e MAHLER, C. F. Lixiviação ácida de baterias íon-lítio. *Química Nova*, v. 41, n. 5, 581-586, 2018.

TORRESI, R. M. Projeto de carro elétrico, à base de baterias de íon-lítio – Uma fonte de energia eficiente e renovável para veículos elétricos. IN: VELLOSO, J. P. R. (Org.). *Estratégia de Implantação do Carro Elétrico no Brasil*. Rio de Janeiro: Instituto Nacional de Altos Estudos, INAE - Forum Nacional, 2010, v. 1, p. 143-157. Disponível em <http://www.provedor.nuca.ie.ufrj.br/eletrobras/estudos/veloso1.pdf>, acessada em outubro de 2019.

VARELA, H.; HUGUENIN, F.; MALTA, M. e TORRESI, R. M. Materiais para cátodos de baterias secundárias de lítio. *Química Nova*, v. 25, n. 2, p. 287-199, 2002. Disponível em http://quimicanova.sbg.org.br/imagebank/pdf/Vol25No2_287_16.pdf, acessada em outubro de 2019.

WHITTINGHAM, M. S. History, evolution, and future status of energy storage. *Proceedings of the IEEE*, v. 100, n. especial do centenário, p. 1518-1534, 2012.

YOSHINO, A. The birth of the lithium-ion battery. *Angewandte Chemie, International Edition in English*, v. 51, n. 54, p. 5798-5800, 2012.

Na Internet

<https://batteryuniversity.com>

Abstract: *The Nobel Prize in Chemistry 2019 – Laurel for the Development of Lithium-Ion Batteries*. The Nobel Prize in Chemistry 2019 was awarded to the researchers who developed lithium-ion batteries. In this paper, besides reporting brief biographies of the laureates, the contributions of each one of them that led to the commercialization of these batteries starting in 1991 are explained.

Keywords: Nobel prize, lithium-ion batteries, rechargeable batteries, intercalation compounds.