

# Baterias de íões-lítio: a revolução na mobilidade elétrica?

Attila Gören<sup>1,2</sup>, Carlos M. Costa<sup>1,2</sup>, Senentxu Lanceros-Méndez<sup>1,3,4</sup>

1. Centro/Departamento de Física, Universidade do Minho, 4710-057 Braga, Portugal
2. Centro/Departamento de Química, Universidade do Minho, 4710-057 Braga, Portugal
3. Basque Center for Materials, Applications and Nanostructures (BCMaterials), Edif. Martina Casiano, Pl. 3, Parque Científico UPV/EHU, Barrio Sarriena s/n, 48940 Leioa, Bizkaia, Espanha.
4. IKERBASQUE, Basque Foundation for Science, 48013 Bilbao, Spain

cmscosta@fisica.uminho.pt

## Resumo

As baterias de íões-lítio são um dos sistemas de armazenamento químico de energia mais relevantes da atualidade com aplicação nos mais diversos dispositivos tais como, telemóveis, *smartphones*, computadores portáteis, e mais recentemente nos carros *plug-in* híbridos e elétricos. Comparativamente a outros sistemas destacam-se por serem leves, sem efeito de memória e apresentarem elevada densidade energética, entre outros.

Este artigo apresenta uma análise crítica da aplicação das baterias de íões-lítio à indústria automóvel, o seu contributo numa possível revolução a nível da mobilidade elétrica e uma reflexão sobre as necessidades científico-tecnológicas para os próximos anos. Por fim, faz-se uma análise da importância que as reservas de lítio podem ter para Portugal.

“Energy may be likened to the bending of a cross bow; decision, to the releasing of the trigger”

Sun Tzu (544 a.C. - 496 a.C.), *The Art of War*

## 1. Introdução

O contínuo desenvolvimento tecnológico e a mobilidade da sociedade do século XXI levantam questões de sustentabilidade energética, tanto a nível da sua produção como a nível do seu armazenamento. A energia pode ser produzida de diferentes formas destacando-se atualmente o interesse nas fontes de energia renováveis como, por exemplo, a energia solar, energia eólica e biomassa, entre

outras. Por outro lado, o desenvolvimento de sistemas de armazenamento desta energia é fundamental para que possa ser usada em dispositivos móveis, tais como, telemóveis, *smartphones*, computadores portáteis e carros elétricos.

Ao longo dos anos, foram surgindo diversos tipos de baterias com diferentes metais, como por exemplo, as baterias de níquel-cádmio (Ni-Cd) e as baterias de hidreto metálico de níquel (NiMH). A primeira bateria de íões-lítio foi comercializada em 1991 pela Sony, baseada no trabalho pioneiro de R. Yazami. Este cientista demonstrou que a grafite poderia ser usada como um dos seus componentes, tornando assim as baterias de íões-lítio recarregáveis comercialmente viáveis [1].

O mercado global das baterias recarregáveis para os dispositivos portáteis é atualmente dominado pelas baterias de íões-lítio, com uma quota de mercado de 75 %, sendo previsto um volume de cerca de 55 mil milhões de dólares para 2019. O crescimento do mercado dos carros elétricos é uma das principais razões do aumento da exploração do lítio nos últimos anos, estimando-se que o consumo desta preciosa matéria-prima possa triplicar até ao ano 2020 comparativamente às 7000 toneladas de lítio consumidos no ano de 2011 [2].

Os principais desafios colocados à comunidade científica focam-se no aumento da capacidade energética, da potência, da segurança e da fiabilidade das baterias de íões-lítio de forma a responder satisfatoriamente ao intenso desenvolvimento tecnológico apresentado pelos diversos dispositivos.

## 2. Baterias de íões-lítio

A figura 1 ilustra os dois tipos de funcionamento de uma bateria de íões-lítio: carga e descarga.

Durante o processo de carga, os eletrões deslocam-se do cátodo para o ânodo pelo circuito externo e os iões de lítio atravessam simultaneamente o separador que separa fisicamente os dois elétrodos.

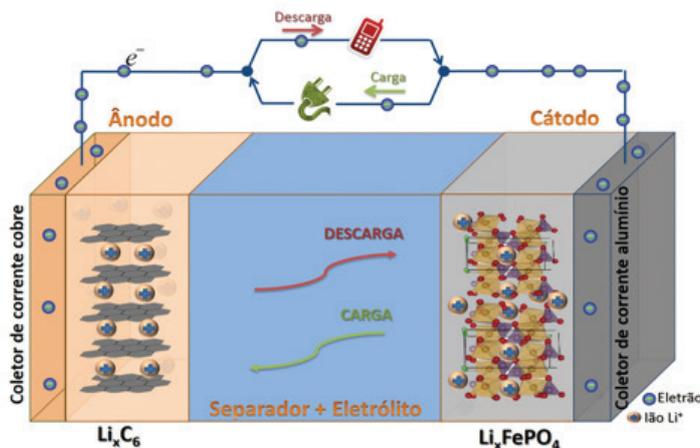
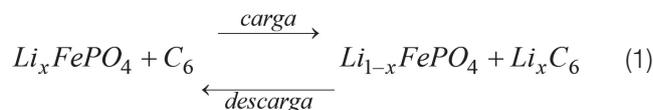


Fig. 1 – Descrição esquemática do funcionamento de uma bateria iões-lítio durante o processo de carga e descarga

Durante o processo de descarga ocorre o movimento inverso, ou seja, os eletrões e os iões deslocam-se do ânodo para o cátodo. O material mais usado para o ânodo é baseado na grafite ( $\text{Li}_x\text{C}_6$ ) e para o cátodo é usado o fosfato de ferro e lítio ( $\text{Li}_{1-x}\text{FePO}_4$ ), sendo a reação eletroquímica global deste sistema representada por [3]:



Outros tipos de baterias baseadas no lítio são as baterias de lítio-ar e lítio-enxofre. Estas baterias apresentam ainda atualmente limitações que, uma vez ultrapassadas, poderão futuramente ser uma alternativa às atuais baterias de iões-lítio [4].

### 3. As baterias e a indústria automóvel

Os carros elétricos *plug-in* híbridos (PHEVs) e os carros elétricos (EVs) prometem um futuro de viagens amigas do ambiente. As baterias que equipam estes carros podem ser carregadas em casa ou no local de trabalho, usando a energia elétrica fornecida por fontes renováveis de energia [5].

As diferentes soluções tecnológicas de baterias disponíveis para o mercado automóvel permitem atingir as metas de redução das emissões de  $\text{CO}_2$  definidas pela União Europeia. Por exemplo, elas preveem que as emissões médias para o parque automóvel novo atinjam um valor de  $130 \text{ g de } \text{CO}_2/\text{km}$ , a partir de 2015 [6].

A diretiva europeia (2006/66/EC) faz a distinção entre as baterias usadas para o arranque, iluminação e ignição

(p.ex: baterias de chumbo) e as baterias usadas para a tração dos veículos elétricos.

Seguidamente são apresentadas as diferentes classes de veículos e as respetivas tecnologias de baterias disponíveis. Posteriormente são analisadas algumas questões práticas do ponto de vista do consumidor com base numa amostra de carros PHEVs e EVs existentes em Portugal.

### 3.1. Classes de veículos

No mercado europeu, verifica-se um aumento contínuo da percentagem dos carros híbridos e elétricos nas diferentes gamas de automóveis disponíveis. A tipologia dos veículos pode ser dividida em 6 categorias e 3 classes.

A bateria de chumbo de 12 V vai continuar a ser a única bateria produzida em massa para os carros convencionais, *Start-Stop* e para o nível básico dos veículos micro-híbridos (classe 1), devido à sua excelente capacidade para o arranque do motor de combustão interna a temperaturas baixas, combinado com o baixo custo e compatibilidade com o sistema elétrico de 12 V dos carros. É de salientar que a reciclagem destas baterias (> 95 %) a nível da Europa as torna de baixo impacto para a saúde humana e para o ambiente. As baterias de chumbo mais avançadas (tecnologia AGM-Absorbent Glass Mat e EFB-Enhanced Flooded Batteries) são utilizadas para satisfazer as exigências complementares dos veículos *Start-Stop* e dos micro-híbridos básicos, permitindo uma redução de consumo de combustível até 10 % no sistema *Start-Stop*.

A bateria tem um papel mais ativo nos veículos híbridos-elétricos (incluindo o micro-híbrido avançado, médio-híbrido e 100 % híbrido) (classe 2) ocorrendo o armazenamento da energia durante a travagem. Nos carros 100 % híbridos é possível percorrer curtas distâncias em modo exclusivamente elétrico. A poupança de combustível num carro 100 % híbrido pode chegar aos 40 %. As baterias dos veículos híbridos operam a um nível reduzido de profundidade de descarga (< 5 %) sendo recarregadas frequentemente durante a condução.

Um sistema de controlo adequado na gestão das duas fontes de energia (motor de combustão interna e elétrico) permite, a nível dos carros médio-híbridos, reduzir o consumo de combustível de 10 % a 15 % [7].

Existem diferentes tecnologias de baterias capazes

Classe	Categoria	Nome	Funcionamento/Finalidade
1	1	Motor de combustão interna	A bateria só é usada para o arranque do motor de combustão interna, iluminação e ignição.
	2	Carros <i>Start-Stop</i>	O motor de combustão interna é automaticamente desligado durante a travagem e paragem.
1+2	3	Veículos micro e médio híbridos	O sistema <i>Start-Stop</i> combinado com a travagem regenerativa permite usar a energia gerada para aumentar a aceleração do veículo.
2	4	Veículos 100 % híbridos (HEVs)	Caraterísticas equivalentes ao veículo médio híbrido, mas a energia armazenada na bateria pode também ser usada para conduzir uma curta distância em modo elétrico.
3	5	Veículos elétricos <i>plug-in</i> híbridos (PHEVs)	A bateria é usada como fonte de energia principal para viagens diárias (entre 20 km a 50 km), mas se necessário, o PHEV também funciona em modo híbrido usando o motor de combustão interna. A bateria pode ser carregada a partir da rede pública de eletricidade.
	6	Veículos elétricos (EVs)	Sistema de armazenamento de energia elétrica total. A bateria é usada como única fonte de energia sendo as baterias carregadas a partir da rede pública de eletricidade.

de preencher estas funções em diferentes combinações, sendo as baterias mais utilizadas as de NiMH e as baterias de iões-lítio, para potenciais mais elevados, devido à rápida capacidade de recarga, boa performance de descarga e elevado ciclo de vida. Apesar das baterias de NiMH serem a tecnologia de bateria predominante para os carros 100 % híbridos, a redução de custos dos sistemas de baterias de iões-lítio está a tornar estes sistemas mais competitivos.

Nos veículos elétricos *plug-in* híbridos (PHEVs) e 100 % elétricos (EVs) (classe 3) são instalados sistemas com elevada diferença de potencial (250 V a 500 V) e pelo menos 15 kW h de energia armazenada, de forma a permitir uma autonomia suficiente em modo exclusivamente elétrico, tanto para viagens curtas diárias (20 km - 50 km), para os

PHEVs, ou como fonte única disponível nos EVs (> 100 km). As baterias devem apresentar elevada densidade energética, reduzido tempo de recarga, elevada eficiência, baixa resistência elétrica e um elevado tempo de vida, preferencialmente equivalente à durabilidade do veículo. Uma bateria de um carro elétrico de 1 tonelada deve ter, em média, cerca de 15 kW h de energia armazenada para poder percorrer uma distância de 100 km. A tecnologia das baterias de iões-lítio é a escolha principal como fonte de energia para os carros PHEVs e EVs [8].

Os carros PHEVs e EVs atualmente fabricados são equipados com sistemas de baterias de iões-lítio, devido a sua elevada densidade energética (~ 110 kW h/kg) e rápida capacidade de recarga. As baterias de iões-lítio apresentam densidade energética mais elevada entre os sistemas recarregáveis existentes, podendo atingir até 20000 vezes a capacidade nominal quando sujeitas a descargas até 5 %

e efetuar cerca de 3000 ciclos completos até atingir 80 % da sua capacidade total residual. Os custos atuais das baterias de iões-lítio oscilam entre 400 - 800 €/kW h prevendo-se a redução de custo para 300 - 450 €/kW h até 2022.

### 3.2. Os carros PHEVs e EVs em Portugal

No ano 2016, foram vendidos 4293 veículos híbridos e elétricos. Desses, 756 veículos são 100 % elétricos, o

que representa um aumento de 17 % face a 2015 [9].

Na tabela 2, são apresentados, a título informativo, três modelos e as respetivas características das versões PHEVs e EVs disponíveis no mercado português. Para informações atualizadas sobre mobilidade elétrica podem ser consultados os sites: [www.uve.pt](http://www.uve.pt) e <http://www.zeev.pt>.

**Tabela 2** – Características principais das baterias de iões-lítio de carros PHEVs e EVs

Modelo	Bateria (kW h)	Massa (kg)	Autonomia real (km)	Consumo médio (kW h /100 km)	Custo €/(100 km)*
Toyota Prius (PHEV)	8,8	120	~ 50	~ 18	3,6
Tesla S (EV)	90	540	~ 400	~ 22,5	4,5
Renault ZOE (EV)	40	305	~ 280	~14	2,8

\* Considerando que o valor da energia elétrica é aproximadamente 0,20 €/(kW h), obtém-se, por exemplo, para o Toyota Prius:  $\text{Custo} = 18 \text{ kW h} / (100 \text{ km}) \times 0,20 \text{ €} / (100 \text{ kW h}) = 3,6 \text{ €} / (100 \text{ km})$ .

A maior parte dos fabricantes de automóveis PHEVs e EVs oferece uma garantia de 8 anos e/ou 160000 km para as baterias, sendo a autonomia máxima baseada no teste NEDC (*New European Driving Cycle*) que permite determinar o consumo de combustível, emissão de gases, consumo de energia elétrica e autonomia dos carros elétricos, entre outros parâmetros.

É possível carregar a bateria com 0 % de emissão de CO<sub>2</sub> se for escolhido, por exemplo, o plano de energia “Eletricidade Verde” da EDP, uma vez que a energia elétrica é exclusivamente produzida por fontes renováveis de energia. Destaca-se também a poupança a nível do consumo de combustível: percorrer 100 km com um carro elétrico fica por metade do preço quando comparado com um carro equivalente a gasolina. Além disso a manutenção de um carro elétrico é bastante mais económica porque os motores elétricos têm uma peça única em movimento, o rotor, comparativamente às centenas partes que se movimentam num motor a gasolina. Um sistema com poucas partes em movimento reduz drasticamente os custos de manutenção e aumenta a longevidade [10].

### 4. Lítio em Portugal

A importância que as baterias de iões-lítio têm nos dispositivos portáteis e no futuro da mobilidade

elétrica (HEVs, PHEVs e EVs) obriga a uma análise das reservas de lítio existentes no planeta Terra. Portugal é o país da União Europeia com as maiores reservas de lítio, ficando apenas atrás das reservas mundiais existentes nos Estados Unidos da América, Argentina, Austrália, Canadá, Chile, China, Brasil e Zimbábue [11].

Portugal poderá ocupar um lugar destacado a nível desta matéria-prima porque 24 % da produção mundial de lítio é consumido na Europa e só 2 % da produção mundial é atualmente fornecida por pequenas minas em Portugal [12]. O mercado de lítio é relativamente suscetível a interrupção do fornecimento desta matéria-prima uma vez que 90 % da produção mundial de lítio é controlada por apenas 4 empresas. É de destacar também que 80 % da produção atual de baterias de iões-lítio é realizada por 4 empresas situadas na Ásia [12].

Na natureza, o lítio é encontrado na forma iónica univalente livre, [Li<sup>+</sup>], sendo em Portugal proveniente essencialmente de depósitos de pegmatito. No caso destes depósitos, extraem-se mais de 150 minerais de lítio destacando-se entre eles a espodumena, lepidolite, petalita, ambligonita, entre outros. Da espodumena deriva o lítio metálico e o carbonato de lítio (Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>). Os maiores depósitos de lítio

localizam-se a norte (Serra d'Arga, Barroso-Alvão) e no centro de Portugal (Guarda, Gouveia).

## 5. Considerações finais e o futuro...

O desenvolvimento de baterias tecnologicamente avançadas baseia-se em conhecimentos científicos de diferentes áreas, ocupando a Física um papel relevante nas áreas de materiais (propriedades físico-químicas), termodinâmica (transferência/dissipação de calor, equações de difusão de calor, etc.), eletricidade (gestão eficiente dos ciclos de carga/descarga para aumentar a longevidade das mesmas, etc.) e também em fenómenos de difusão e transferência de massa. Além disso, a simulação computacional a diferentes escalas, desde a micro à nano-escala, permite obter uma previsão das propriedades dos materiais ativos e da performance da bateria baseada nas equações que governam o seu funcionamento.

É indubitável que a tecnologia das baterias de iões-lítio revolucionou o mundo tecnológico, tendo aplicação em telemóveis, câmaras, computadores portáteis, e outros. No que diz respeito a mobilidade elétrica (HEVs, PHEVs e EVs), as baterias de iões-lítio apresentam-se como um sistema fiável de armazenamento de energia. Atualmente o mundo móvel elétrico depende das baterias de iões-lítio que é a tecnologia-base e peça-chave desta nova mobilidade [10].

Quando as baterias de iões-lítio foram lançadas em 1991, apresentavam o dobro da densidade energética (W h/kg) comparativamente à tecnologia disponível (NiMH, Ni-Cd) e os melhoramentos contínuos nos últimos 25 anos triplicaram este valor. O preço das baterias de iões-lítio diminuiu drasticamente na última década e continua a diminuir mais rapidamente do que era expectável [10].

Será que as baterias de iões-lítio irão provocar uma revolução a nível da mobilidade, semelhante àquela que aconteceu nos dispositivos eletrónicos? Parece claro que os carros elétricos baseados em baterias de iões-lítio são para ficar e são competitivos com os carros a gasolina para percursos de longa distância (táxis). Por exemplo o custo total estimado por milha, considerando o tempo de vida total do veículo e um percurso anual de 112 000 km, é de 0,40 \$/milha para o Toyota Prius (hybrid) e de 0,26 \$/milha para o Tesla Model 3 (EV).

Os carros HEVs, PHEVs e EVs vão continuar a conquistar o mercado automóvel devido aos contínuos melhoramentos a nível da relação custo-benefício e contínuas pressões regulamentares, sendo previsto uma quota de mercado de 20 % – 35 %, em 2030.

A indústria global das baterias vai, nos próximos anos, trabalhar no sentido de melhorar o desempenho, custo, integração do sistema, processos de produção, segurança e reciclabilidade das baterias de iões-lítio. Todas estas áreas precisam de contínuo desenvolvimento para melhorar a integração dos carros elétricos no mercado automóvel.

No entanto, a substituição dos carros a gasolina por carros elétricos, conforme aconteceu com o telemóvel/smartphone que substituiu o telefone fixo, vai exigir uma nova geração de baterias cujo desempenho seja várias vezes melhor do que o das baterias de iões-lítio atuais [10].

As reservas e a extração rentável do lítio (e seus derivados) são uma oportunidade estratégica para o crescimento económico de Portugal, podendo-se tornar um dos fornecedores principais desta matéria-prima a nível da Europa. Elas abrem também a possibilidade de atrair investimento de grandes empresas de componentes de automóveis para produção de baterias de iões-lítio em Portugal.

## Agradecimentos

Aos colegas do Centro de Física da Universidade do Minho e do BCMaterials no âmbito do Electroactive Smart Materials (<https://www.facebook.com/electroactivesmg>) pelas interessantes discussões, trabalho conjunto e excecional ambiente. Agradecemos à Fundação para a Ciência e a Tecnologia pelo apoio através do projeto estratégico UID/FIS/04650/2013 e UID/QUI/00686/2013 (incluindo os fundos FEDER através do Programa COMPETE 2020 e Fundos Nacionais), projeto PTDC/CTM-ENE/5387/2014 e as bolsas SFRH/BD/90313/2012 (AG) e SFRH/BPD/112547/2015 (CMC). Também se agradece o apoio financeiro do Departamento da Indústria do Governo Basco ao abrigo dos Programas ELKARTEK e HAZITEK.

## Referências

1. J. Nunes-Pereira, C.M. Costa, S. Lanceros-Méndez, “Polymer composites and blends for battery separators: State of the art, challenges and future trends”. *Journal of Power Sources* 281: p. 378-398 (2015).
2. L. Talens Peiró, G. Villalba Méndez, R.U. Ayres, “Lithium: Sources, Production, Uses, and Recovery Outlook”, *JOM* 65(8): p. 986-996 (2013).
3. A. Gören, C. M. Costa, M. M. Silva, S. Lanceros-Méndez, “State of the art and open questions on cathode preparation based on carbon coated lithium iron phosphate”, *Composites Part B: Engineering* 83: p. 333-345 (2015).
4. G. Pistoia, “Lithium-Ion Batteries: Advances and Applications”, Elsevier Science (2013).
5. J. Jaguemont, L. Boulon, Y. Dubé, “A comprehensive review of lithium-ion batteries used in hybrid and electric vehicles at cold temperatures”. *Applied Energy*, 164: p. 99-114 (2016).
6. Conselho da União Europeia, P.E., Regulamento (CE) n. o 443/2009 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 23 de Abril de 2009.
7. P. Miller, “Automotive Lithium-Ion Batteries, State of the art and future developments in lithium-ion battery packs for passenger car applications”. *Johnson Matthey Technol. Rev.*, 59(1): p. 4 (2015).
8. C. Capasso, O. Veneri, “Experimental analysis on the performance of lithium based batteries for road full electric and hybrid vehicles”. *Applied Energy* 136: p. 921-930 (2014).
9. Associação Automóvel de Portugal, (<http://www.acap.pt/pt/home>).
10. G. Crabtree, E. Kocs, B. Tillman, “Where is transportation going?” *Europhysics News*, 48(3): p. 21-25 (2017).
11. A. Chagnes, J. Swiatowska, “Lithium Process Chemistry: Resources, Extraction, Batteries, and Recycling”, Elsevier Science (2015).
12. Europe, I.i.; (<https://www.dakotaminerals.com.au/lithium/lithium-in-europe>).



**Attila Gören** licenciou-se em Física e Química (ensino) em 1998, finalizou o mestrado em Física (ensino de) em 2007 e obteve o grau de Doutor em Física em 2017, na Universidade do Minho, Braga, Portugal. O seu trabalho de investigação está focado em sistemas de armazenamento de energia – baterias de ião-lítio. É professor de Física e Química no Agrupamento de Escolas de Real – Braga.



**Carlos M. Costa** licenciou-se em Física em 2007, finalizou o mestrado em Engenharia de Materiais em 2007 e obteve o grau de Doutor em Física em 2014 na Universidade do Minho, Braga, Portugal. Atualmente, é investigador na mesma Universidade e o seu trabalho está focado no desenvolvimento de compósitos poliméricos avançados e novos materiais e formulações para aplicações de armazenamento de energia.



**Senentxu Lanceros-Méndez** é Ikerbasque Professor e Director científico do BCMaterials, Basque Center for Materials, Applications and Nanostructures, Leioa, Espanha, e Professor Associado do Departamento de Física da Universidade do Minho, Portugal (em licença). O seu trabalho está focado na área de materiais inteligentes e funcionais para sensores e atuadores, energia e aplicações biomédicas.