

# APLICAÇÃO DO NIÓBIO NAS BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO

## APPLICATION OF NIOBIUM IN LITHIUM ION BATTERIES

**Claudinei Guilherme Hoffmann**

Faculdade Uniamérica Descomplica

Foz do Iguaçu – Paraná

<http://lattes.cnpq.br/2714051820206721>

Profa. Dra. Luciana Paro Scarin Freitas

Faculdade Uniamérica Descomplica

Foz do Iguaçu – Paraná

<http://lattes.cnpq.br/2554057558293125>

Data de Submissão: 30/06/2022

**RESUMO:** O nióbio, descoberto em 1801, mas que foi utilizado somente no século XX, devido a necessidade de melhorar as propriedades mecânicas dos materiais. A aplicação do nióbio à metais confere características como: condutividade térmica e elétrica; maleabilidade; ductilidade; alta resistência ao calor, corrosão e ao desgaste. O armazenamento, com um papel cada vez maior na geração e no consumo de energia elétrica, aprimora cada vez mais as baterias de íons de lítio para carros elétricos. O uso de materiais desenvolvidos com o nióbio permite a geração de baterias mais seguras, de carregamento rápido, com maior vida útil. O nióbio não substituirá o lítio, mas sim outros metais com propriedades parecidas como o níquel e o cobalto. Os estudos objetivam o desenvolvimento de ânodos e cátodos das baterias com aplicação do óxido de nióbio ( $Nb_2O_5$ ). Nos materiais do ânodo, lado negativo da bateria que sofre oxidação, proporciona alta capacidade volumétrica, boa ciclabilidade e performance, normalmente é feito de óxidos metálicos de grafite, titânio e tungstênio. Nos materiais do cátodo, lado positivo da bateria, é o componente que sofre redução, diminui a resistência elétrica, normalmente são feitos de óxidos metálicos de cobalto, ferro, manganês e níquel. Esta aplicação possibilita a comercialização de baterias mais estáveis. As principais vantagens da aplicação do nióbio em baterias são: maior tensão de operação, condutividade eletrônica e iônica, densidade energética e de potência, estabilidade química, vida útil maior e maior segurança. A bateria terá grau mínimo de risco de curto circuito e a maior condutividade térmica que diminui o aquecimento, permitindo maiores densidades de carga e diminuição do tempo de carga. Esse assunto é inovador, os estudos, materiais e publicações utilizados são bem atualizados.

**Palavras-chave:** Nióbio, bateria, ânodos, cátodos.

**ABSTRACT:** Niobium, discovered in 1801, but which was only used in the 20th century, due to the need to improve the mechanical properties of materials. The application of niobium to metals confers characteristics such as: thermal and electrical conductivity; malleability; ductility; high resistance to heat, corrosion and wear. Storage, with an ever-increasing role in the generation and consumption of electrical energy, increasingly improves lithium-ion batteries for electric cars. The use of materials developed with niobium allows the generation of safer, faster-charging batteries with a longer useful life. Niobium will not replace lithium, but other metals with similar properties such as nickel and cobalt. The studies aim at the development of battery anodes and cathodes with application of niobium oxide ( $Nb_2O_5$ ). In the anode materials, the negative side of the battery where the oxidation reaction occurs, provides high volumetric capacity, good cycling and performance, it is usually made of metallic oxides of graphite, titanium and tungsten. In the materials of the cathode, the positive side of the battery, is the component where the reduction reaction occurs, decreases electrical resistance, normally they are made of metallic oxides of cobalt, iron, manganese and nickel. The niobium application makes it possible to sell more stable batteries. The main advantages of applying niobium in batteries are: higher operating voltage, electronic and ionic conductivity, energy and power density, chemical stability, longer service life and greater safety. The battery will have a minimal degree of risk of short circuit and the highest thermal conductivity which decreases heating, allowing for higher charge densities and reduced charging time. This subject is innovative, the studies, materials and publications used are well updated.

**Keywords:** Niobium, battery, anodes, cathodes.

## 1. INTRODUÇÃO

Pelo aumento populacional e de todos os setores produtivos pelo mundo, a demanda pela energia elétrica vem aumentando nos últimos anos. Essa energia é gerada principalmente por fontes não renováveis que liberam gases poluentes, ocasionando problemas ambientais. Com a diminuição das reservas de petróleo e a oscilação do preço, está surgindo um interesse mundial em novas formas de geração de energia.

O Nióbio é um metal que foi descoberto em 1801 por um químico inglês, mas que ganhou relevância somente por volta do século XX. O início da utilização do nióbio, associado à indústria siderúrgica, surgiu da necessidade de

melhorar as propriedades mecânicas, para a produção de automóveis, pontes, navios, na atividade de extração de petróleo, em grandes profundidades e com ambientes agressivos e, em desenvolvimento atualmente para a aplicação do nióbio em componentes eletrônicos e baterias.

Como destaca Badra (2022), a aplicação do nióbio confere ao metal a capacidade de melhorar as propriedades de materiais, tornando-os mais eficientes, apresentando características como:

- Alta condutividade térmica e elétrica;
- Maleabilidade;
- Ductilidade;
- Alta resistência ao calor;
- Alta resistência a corrosão;
- Alta resistência ao desgaste.

Dessa forma, o armazenamento de energia tem ocupado um papel importante na geração e no consumo da energia elétrica. Baterias de íon de lítio vêm recebendo atenção devido a aplicação em carros elétricos.

A cada descoberta sobre a utilização do nióbio, faz com que mudamos nossa visão em relação a este metal e das tecnologias do futuro.

Setores onde há aplicação de nióbio, propiciando importante desenvolvimento tecnológico:

- Na mobilidade o nióbio tem um papel importante para a inovação e o desenvolvimento de materiais para diversas aplicações, mais resistentes, que proporcionem segurança, boa performance, eficiência e maior leveza, característica muito importante na concepção de veículos, melhora a autonomia, com menor consumo de energia.
- Na estrutural o nióbio ajuda a resolver complexos desafios de engenharia, permitindo redução de custos, e agregando eficiência aos materiais. Projetos com tecnologias modernas, permitem estruturas mais leves, compactas e ainda assim com maior segurança, devido à maior resistência e tenacidade.
- Na energia o uso de materiais desenvolvidos com o nióbio permite a geração e consumo de energia limpa, baterias mais seguras, de

carregamento rápido, com maior vida útil, e de soluções de armazenamento mais eficientes.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1. Estudo de referências baseadas em tecnologias com nióbio.**

Este trabalho destaca os principais métodos, conceitos e tecnologias utilizados por alguns pesquisadores, no desenvolvimento de seus conceitos.

Em seu trabalho, Xin et al. (2019), os autores comentam que na tecnologia das principais baterias utilizadas atualmente, encontramos nos cátodos os óxidos com alto teor de níquel nas camadas, que apresentam um bom resultado, com alto fluxo de densidade de energia. No entanto, o alto teor de níquel cria alguns desafios, incluindo alta reatividade superficial e instabilidade estrutural. Através de um método químico, foi realizado revestimento superficial com nióbio. Este tratamento com nióbio não só forneceu uma proteção da superfície, mas também otimizou o comportamento eletroquímico.

Xin et al. (2021), também citam em outro artigo, um cátodo, de óxido de metal em camadas rico em níquel, são os cátodos mais promissores para baterias de íons de lítio da próxima geração em veículos elétricos. Mas, eles perdem mais de 10% de sua capacidade no primeiro ciclo, e a instabilidade estrutural causa a redução da capacidade. O revestimento e a substituição por nióbio são possíveis soluções para resolver esses desafios. Um tratamento de óxido de nióbio, remove as impurezas da superfície formando um revestimento de superfície. A substituição de nióbio estabiliza a estrutura, como evidenciado pela menor evolução de calor no aquecimento, proporcionando melhor estabilidade em ciclos longos com uma retenção de capacidade de 93,2% após 250 ciclos.

Para Griffith et al. (2021), as baterias de íons de lítio são essenciais para a tecnologia de mobilidade elétrica e agora poderão interromper um século de meios de transporte baseado em combustão. A revolução da eletrificação pode eliminar nossa dependência de combustíveis fósseis e possibilitar um futuro de energia limpa, baterias avançadas facilitarão essa transição. No entanto, devido

aos exigentes requisitos de desempenho, custo e segurança, é um desafio implantar produtos em escala industrial. Há perspectivas um novo material de ânodo de bateria de íons de lítio,  $\text{TiNb}_2\text{O}_7$  (TNO). O TNO pretende ser uma alternativa ao grafite ou ao  $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$  com melhor taxa e características de segurança e maior densidade de energia. A alta capacidade do TNO impede a formação de dendritos de lítio e sua estrutura de cristal aberto leva a um desempenho de alta potência.

Em outro artigo, Griffith et al. (2021), descreve a dopagem do cátodo com nióbio que modifica sua morfologia primária de partículas para permitir uma adaptação precisa de sua microestrutura. O dopante Nb alonga as partículas primárias e as alinha na direção radial, criando uma configuração que efetivamente dissipa a tensão interna abrupta causada pelas transições de fase perto da extremidade da carga. A não formação da cepa interna melhora substancialmente a estabilidade cíclica de longo prazo alcançada pelo cátodo dopado com Nb, ele retém 90% de sua capacidade inicial após 1000 ciclos, enquanto um cátodo não dopado retém 57,3%. Também permite o carregamento rápido, maior número de ciclos. A estratégia simples de introdução de íons Nb, proposta neste artigo, representa uma solução eficaz que garante vida útil, carregamento rápido e segurança da bateria, sem comprometer sua capacidade.

Varela et al. (2002), revisou cátodos a serem empregados em baterias secundárias de lítio. Esses cátodos possuem grande importância tecnológica e científica, especificamente, materiais para cátodos como polímeros condutores eletrônicos (ECP), óxidos de metais de transição (TMO) e nanocompósitos de ECP/TMO. A utilização de um material catódico específico baseia-se em algumas características intrínsecas que melhoram o desempenho da bateria. Assim, são discutidas algumas vantagens e desvantagens desses compostos de inserção, como a capacidade de inserção do lítio, a densidade energética e a ciclabilidade desses materiais.

### **3. O NIÓBIO**

O nióbio é um metal extraído a partir do minério pirocloro, Figura 1, com sua maior reserva em Araxá, MG. Ele tem número atômico 41, pertence ao quinto período da tabela periódica e é um metal de transição. Possui vantagens como alta condutividade térmica e elétrica, ductilidade, maleabilidade, alta resistência ao calor, ao desgaste e à corrosão. Essas características tornam os materiais mais eficientes, por proporcionar o aprimoramento de suas propriedades.

Figura 1: A-Mineral pirocloro, B-Metal nióbio



Fonte: Nióbio do Brasil: Sumário Mineral 2012 – Nióbio

Apesar de toda a discussão sobre o nióbio, este metal não é raro. O minério já foi encontrado em mais de 85 minas que podem ser transformados em nióbio, espalhados pelo mundo todo. O Brasil concentra atualmente 94% das reservas conhecidas e em operação. Poucas minas estão em operação, onde podemos destacar a produção do Brasil com 75% e Canadá com 7%, maiores produtores de nióbio, seguidos por Austrália, Rússia, Dinamarca, países da África e outros países.

Se o nióbio não é raro, porque o Brasil domina a produção deste metal? Um dos motivos é a tecnologia pioneira desenvolvida por uma empresa brasileira, a CBMM, no mercado a mais de 60 anos. Outro motivo é que o mercado ainda é muito pequeno. Somente as reservas da CBMM dariam para suprir o atual consumo por mais de 200 anos.

Como a CBMM nos relata, “A representatividade do Brasil no mercado global se deve ao desenvolvimento deste mercado, liderado por uma empresa

brasileira, que investe há mais de seis décadas em tecnologia e aplicações para produtos de nióbio em diversos setores”.

Um dos setores que o nióbio pode trazer benefícios é o de energia, pois é um elemento muito promissor no segmento das baterias.

O nióbio não substituirá o lítio nas baterias, mas pode reduzir ou substituir a utilização de níquel e cobalto. Há grandes estudos para o desenvolvimento de tecnologias de nióbio aplicadas nos cátodos e nos ânodos das baterias.

Como veremos, existem variações de baterias de lítio, mas com a inserção de nióbio representa segurança, durabilidade e ciclabilidade, com carga e descarga super rápidas, sem perda da vida útil.

#### **4. O NIÓBIO NAS BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO**

Na busca por baterias que entreguem maior potência e possa recarregar mais rápido, pesquisadores se deparam em processos químicos que geram muito calor, encurtando a vida útil das baterias e as vezes até o destruindo.

Óxidos de nióbio ( $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ) têm sido usados como materiais anódicos para reações de intercalação, amplamente utilizados nas baterias de íons de lítio, proporcionando alta capacidade volumétrica, alta capacidade de carga e descarga (ciclabilidade) e performance.

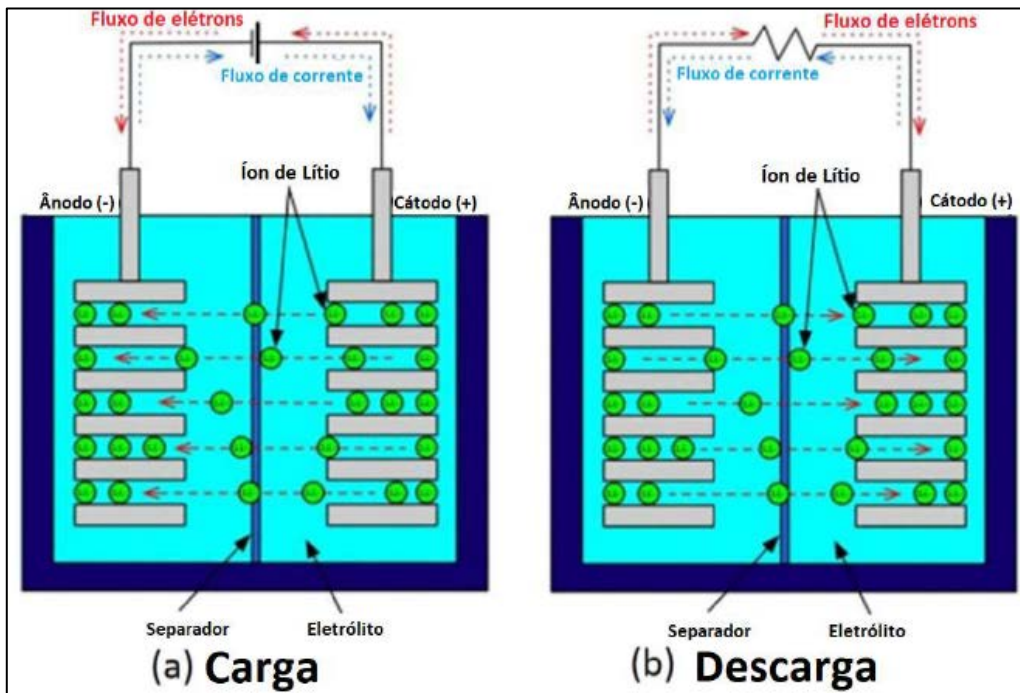
Também pode ser empregada na fabricação de materiais catódicos. A calcinação resulta em um material com potencial aplicação como cátodo em baterias de íon de lítio, proporcionando uma diminuição da resistência elétrica e aumentando a ciclabilidade.

O estudo de materiais catódicos e anódicos contendo óxidos de nióbio possibilitarão a comercialização de baterias mais estáveis, com diminuição do tempo de recarga, para a aplicação em armazenamento de energia.

As baterias de íons de lítio comumente utilizadas em celulares, eletrônicos diversos e até veículos, convertem energia química armazenada em eletricidade, por meio de reações de oxirredução. Durante a descarga da bateria, o deslocamento dos íons de lítio do ânodo (oxidação) para o cátodo (redução) libera energia elétrica para um consumidor externo. Estas reações podem

ocorrer no sentido reverso, possibilitando também a recarga da bateria, como representados na Figura 2.

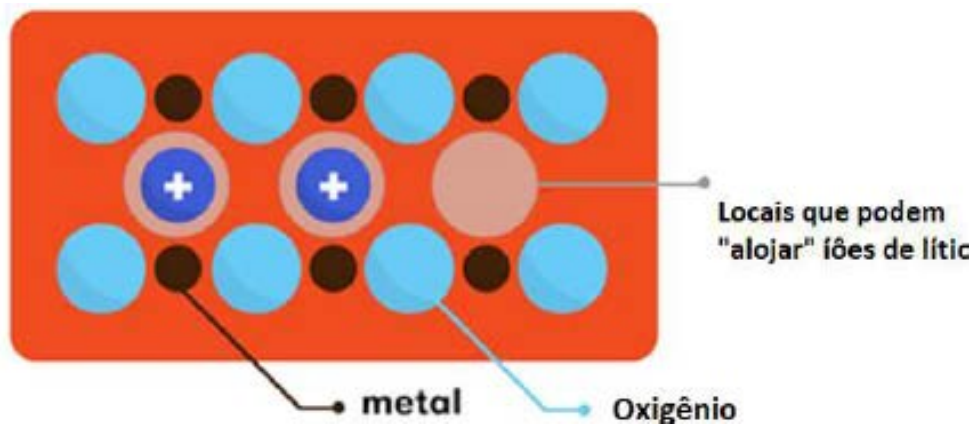
Figura 2: Bateria de íons de lítio



Fonte: Vicente, A. 2019.

O cátodo, Figura 3, das baterias de íons de lítio utiliza, tradicionalmente, óxidos metálicos de Cobalto, Níquel, Manganês e Ferro. Já o ânodo, Figura 4, utiliza grafite, sílica e óxidos de titânio.

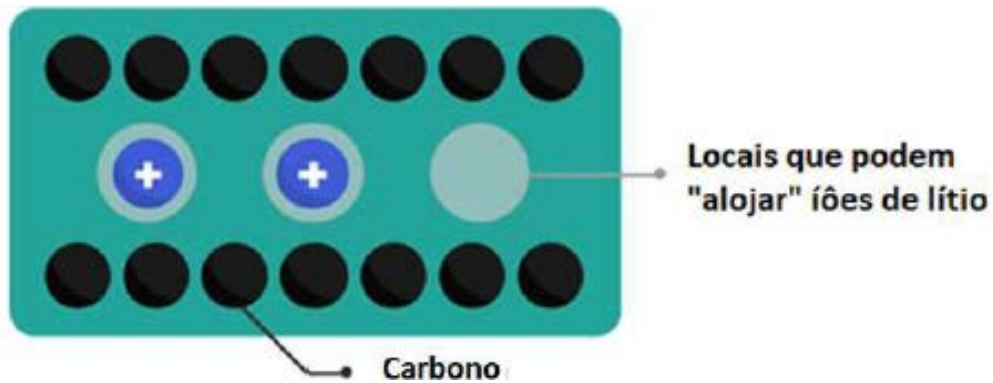
Figura 3: Cátodo (Li-M-O)



Fonte: Vicente, A. 2019.



Figura 4: Ânodo (Grafite)



Fonte: Vicente, A. 2019.

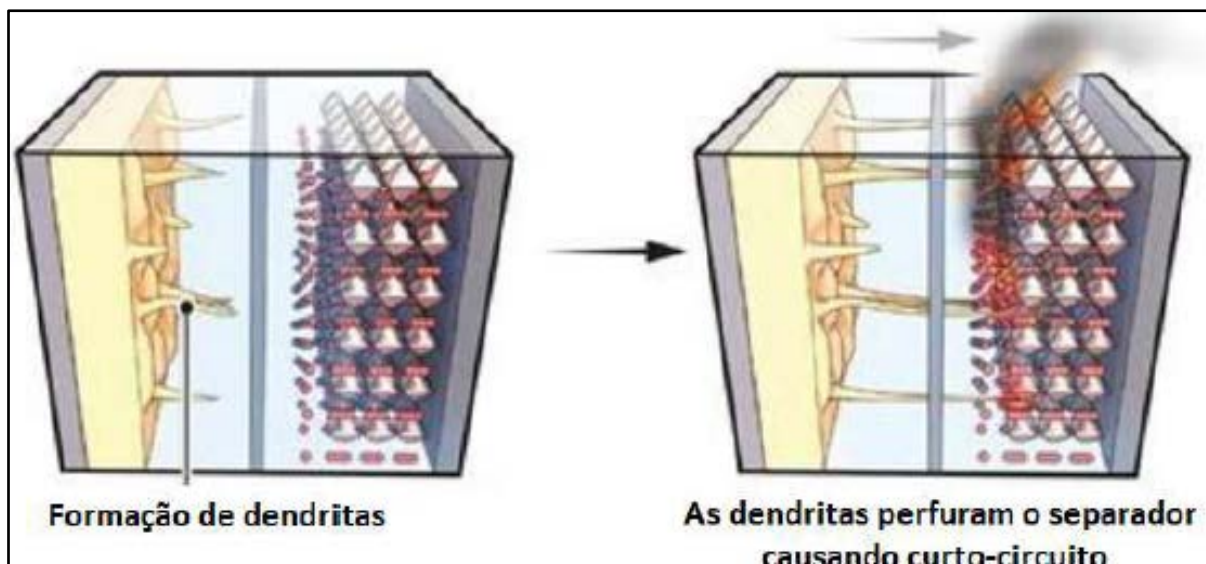
Atualmente o mercado busca alta performance, aumento da vida útil e segurança no emprego das baterias de íons de lítio. O Nióbio tem sido cada vez mais estudado como uma excelente alternativa na composição química destas baterias para atender essa demanda.

#### 4.1. Ânodos

O ânodo é o lado negativo da bateria, sofre oxidação porque perde elétrons. Normalmente, o ânodo das baterias de íons de lítio é feito de óxidos metálicos de grafite, titânio e tungstênio.

Grafite: As baterias de íons de lítio compõem tradicionalmente ânodos de grafite. Quando há a necessidade de carga rápida e densidade de corrente elevada, ocorre nesse material a formação de dendritas de lítio metálico, como visto na Figura 5, que faz encurtar a vida útil da bateria. As dendritas perfuram o separador, causando curto-circuito entre o cátodo e o ânodo, podendo levar a incêndios e explosões.

Figura 5: Formação de dendritas na bateria de íons de lítio



Fonte: Vicente, A. 2019.

Outro processo que influencia na performance e redução da vida útil da bateria é a intercalação de íons de lítio na estrutura da grafite (alternância, variação), gerando expansão volumétrica, podendo danificá-la.

- LTO – ( $\text{Li}_2\text{TiO}_3$  e  $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ ), Titanato de lítio: este óxido substituiu a grafite muito antes da descoberta do Óxido de nióbio. Por volta de 1980, o titanato de lítio começou a ser usado no anodo das baterias de íons de lítio, e já propiciou melhorias significativas de desempenho.

Entre as melhorias realizadas e criadas pela CBMM, está a adição do óxido de nióbio ( $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ), na composição química dos ânodos, para a criação de novos óxidos metálicos:

- LNO – Niobato de Lítio (Dopagem e Recobrimentos);
- NWO – ( $\text{Nb}_{16}\text{W}_5\text{O}_{55}$ ), Óxido de Nióbio e Tungstênio;
- NTO – ( $\text{TiNb}_2\text{O}_7$ ), Óxidos de nióbio e titânio: Composição química em teste nos ânodos, é a combinação que está apresentando o melhor desempenho em baterias de íons de lítio, comparado com os principais ânodos utilizados atualmente como mostrado na Figura 6. É feito através da aplicação de um ânodo de óxido de nióbio-titânio, que tem o dobro da capacidade volumétrica dos anodos à base de grafite, com carregamento ultrarrápido de 90% da bateria, em apenas 6 minutos. Isso permite maior autonomia dos veículos elétricos, podendo chegar a mais de 300 km.

Figura 6: Diferencial Técnico do NTO

Anode Comparison	Graphite	LTO~LLTO	TNO
Capacity	372	175	388
Voltage	0.1	1.5	1.6
Density	2.3	3.5	4.3
Safety	–	++	++
Charging rate	–	++	++

Fonte: Vicente, A. 2019.

## 4.2. Cátodos

O cátodo é o lado positivo da bateria, é o componente que sofre redução por ganhar elétrons. Normalmente, o cátodo das baterias de íons de lítio é feito de óxidos metálicos de cobalto, ferro, manganês e níquel.

- LCO – Óxido de lítio cobalto: Baterias que contenham este óxido no cátodo têm a maior densidade energética. É encontrada na maioria dos eletrônicos. Desvantagem: possui instabilidade térmica;
- LFP – Fosfato de lítio ferro: Proporciona à bateria boa estabilidade térmica e longo ciclo de vida. Desvantagem: baixa densidade de energia;
- LFMP – Fosfato de lítio ferro manganês;
- LMO – Óxido de lítio manganês: Tem estabilidade térmica e diminui a resistência interna. Desvantagem: capacidade menor e vida útil mais curta;
- LNMO – Óxido de lítio níquel manganês;
- NCM – Óxido de níquel cobalto manganês: baixa resistência interna, alta taxa de carga, boa estabilidade e segurança;
- NCA – Óxido de níquel cobalto alumínio.

Entre os desenvolvimentos feitos pela CBMM, estão a dopagem e recobrimento destes cátodos tradicionais, com nióbio, para melhorar a

performance das baterias de íons de lítio, os quais trouxeram os seguintes benefícios:

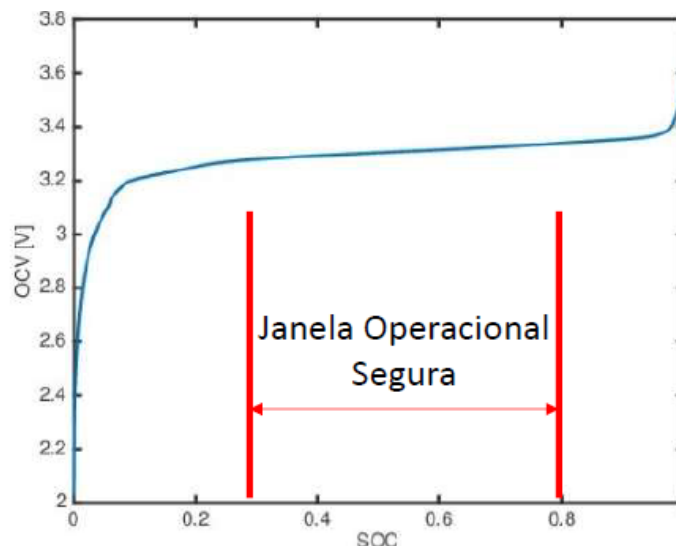
- Minimizar a dissolução de metais pelo eletrólito;
- Minimizar a formação de oxigênio durante redução do cátodo;
- Aumentar a condutividade elétrica dos cátodos.

### 4.3. Melhorias no Estado de carga

O *state of charge* (SOC) é o nível de carga de uma bateria em relação a sua capacidade. Sua unidade é apresentada em pontos percentuais, onde 0% é indicação de bateria vazia, e 100% bateria cheia.

Para as baterias de íons de lítio com ânodo de grafite, a janela operacional segura para o SOC ficará entre 30% e 80%, como mostra a Figura 7. Isto implica que, para a bateria de íon de lítio com ânodo de grafite, a capacidade útil será limitada em torno dos 50% de sua capacidade total. Obedecendo o convencional para uma janela operacional segura, 30% deve ser considerado bateria vazia e 80% bateria cheia.

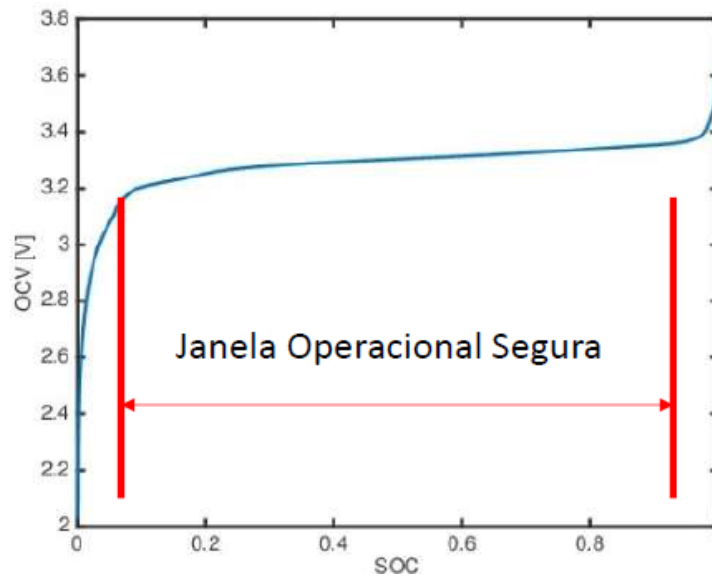
Figura 7: SOC bateria com ânodo de grafite



Fonte: Vicente, A. 2019.

Para as baterias de íons de lítio com ânodo de óxidos de nióbio, a janela operacional segura para o SOC pode expandir-se até a faixa de 5% e 95%, como mostra a Figura 8. Com isso a capacidade útil alcança os 90% de sua capacidade total, agora 10% passa a ser considerado bateria vazia e 95% bateria cheia.

Figura 8: SOC bateria com ânodo de nióbio



Fonte: Vicente, A. 2019.

#### 4.4. Benefícios do uso de nióbio em baterias de íons de lítio

As principais vantagens da aplicação do nióbio em baterias são:

- Maior tensão de operação,
- Condutividade eletrônica e iônica elevadas,
- Maior densidade energética, que permite uma maior autonomia quando aplicada em veículos elétricos;
- maior densidade de potência, permitindo uma recarga mais rápida, menos de 10 minutos;
- Maior estabilidade química
- Maior vida útil, maior durabilidade quando comparada com as tecnologias atuais;
- Maior segurança.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O grande interesse despertado pelo nióbio nos últimos anos, fez com que áreas de pesquisa de empresas privadas e governamentais investissem na

aplicação deste metal, para melhoria das propriedades dos materiais. Se usados em ligas metálicas, trazem resistência mecânica, maleabilidade e condutividade. E se usados como componentes anódicos ou catódicos, atingem maior densidade energética, maior estabilidade química, maior vida útil e segurança.

Este levantamento destacou a evolução das baterias através da descoberta de novos componentes químicos, mais adequados para a aplicação em baterias, fornecendo maior segurança que é a maior preocupação em relação a estes dispositivos atualmente. Vimos que os óxidos de nióbio proporcionam ligas metálicas com melhorias nas propriedades dos materiais. Pela melhoria na condutividade elétrica, conseguimos uma bateria com grau mínimo de risco de curto circuito e a maior condutividade térmica diminui o aquecimento, o que permite maiores densidades de carga e diminuição do tempo de carga.

O tema sobre utilização do nióbio em baterias não é muito referencialmente difundido. Por se tratar de um tema novo, o material e as publicações utilizadas são bem recentes, permitindo trazer informações bem atualizadas.

## REFERÊNCIAS

BRADA, M. **O que são as baterias de nióbio?** Canal Solar, 2022. Disponível em: <<https://canalsolar.com.br/o-que-sao-as-baterias-de-niobio/>>. Acesso em: 17 abr. 2022.

GRIFFITH, K. J. ET AL. **Microstructure Engineered Ni-Rich Layered Cathode for Electric Vehicle Batteries.** Wiley Online Library, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/aenm.202100884>>. Acesso em: 19 abr. 2022.

GRIFFITH, K. J. ET AL. **Titanium Niobium Oxide: From Discovery to Application in Fast-Charging Lithium-Ion Batteries.** ACS PUBLICATIONS, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.0c02955>>. Acesso em: 18 abr. 2022.

**Nióbio - Entenda um pouco mais sobre esse metal descoberto no início de 1800.** IDM BRASIL, 2019. Disponível em: <<https://idmbrasil.org.br/item/niobio-entenda-um-pouco-mais-sobre-esse-metal-descoberto-no-inicio-de-1800/44/>>. Acesso em: 02 mai. 2022.

**Nióbio: Propriedades e uso – Entrevista com Eduardo Ribeiro (2017).** CBMM, 2017. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=09zOLcl8obs>>. Acesso em: 06 abr. 2022.

**O QUE É O NIÓBIO.** CBMM, 2021. Disponível em: <<https://cbmm.com/pt/Niobio>>. Acesso em: 11 abr. 2022.

**SUMÁRIO MINERAL 2012 – NIÓBIO.** NIÓBIO DO BRASIL, 2012. Disponível em: <<https://niobiodobrasil.blogspot.com/2013/01/sumario-mineral-2012.html>>. Acesso em: 02 mai. 2022.

VARELA, H. et al. **Materiais para cátodos de baterias secundárias de lítio.** Química Nova, 2002. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0100-40422002000200017>>. Acesso em: 2 jun. 2022.

VICENTE, A. **O Nióbio nas baterias de íons de lítio.** ResearchGate, 2019. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/335128690\\_O\\_Niobio\\_nas\\_baterias\\_de\\_ions\\_de\\_litio](https://www.researchgate.net/publication/335128690_O_Niobio_nas_baterias_de_ions_de_litio)>. Acesso em: 12 abr. 2022.

XIN, F. ET AL. **Li–Nb–O Coating/Substitution Enhances the Electrochemical Performance of the LiNi<sub>0.8</sub>Mn<sub>0.1</sub>Co<sub>0.1</sub>O<sub>2</sub> (NMC 811) Cathode.** ACS PUBLICATIONS, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/acsami.9b09696>>. Acesso em: 18 abr. 2022.

XIN, F. ET AL. **What is the Role of Nb in Nickel-Rich Layered Oxide Cathodes for Lithium-Ion Batteries?** ACS PUBLICATIONS, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/acscenergylett.1c00190>>. Acesso em: 18 abr. 2022.