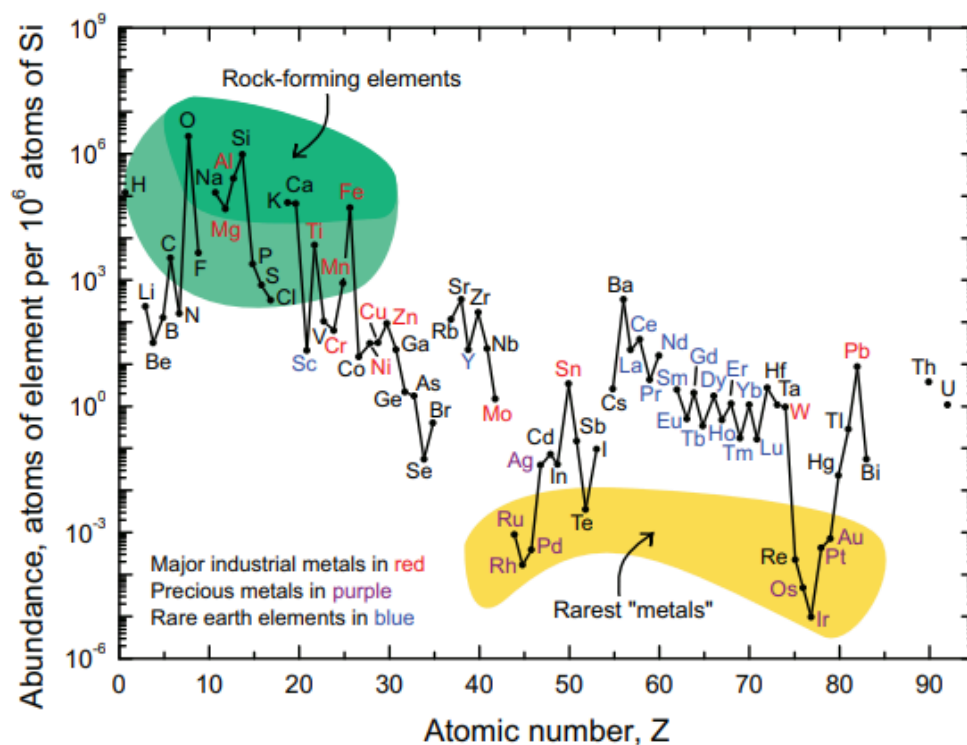


1.2.6 O Lítio Pode Acabar

À medida que o mundo se volta cada vez mais para a eletrificação para se afastar dos combustíveis fósseis, uma questão crucial surgiu: ao resolver uma potencial crise do petróleo, estamos inadvertidamente criando uma futura **crise do lítio**? Se adotarmos baterias de íon-lítio para aplicações em grande escala, como veículos elétricos e armazenamento em rede elétrica, consumiremos os recursos mundiais de lítio a um ritmo insustentável? Esta é uma preocupação válida e significativa que merece uma análise cuidadosa e baseada em dados.

Uma Análise da Abundância Global de Lítio

Para começar a responder a esta pergunta, devemos primeiro entender quanto lítio está realmente disponível. Um gráfico da abundância relativa dos elementos na crosta terrestre, baseado em dados do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS), fornece um ponto de partida claro e factual.



Ao examinar esses dados, um fato surpreendente emerge: **o lítio é entre 20 e 100 vezes mais abundante** do que o **chumbo** ou o **níquel**, dois elementos que formam a base de outras importantes tecnologias de baterias recarregáveis. Apenas sob esta perspectiva, parece haver lítio de sobra, pelo menos em comparação com os materiais nos quais confiamos atualmente.

No entanto, há uma nuance importante. O lítio é um dos elementos quimicamente mais reativos. Como resultado, ele nunca é encontrado na

natureza em sua forma pura e elementar. Em vez disso, existe dentro de compostos estáveis à base de lítio que são encontrados principalmente em vastas salinas, que devem ser mineradas e processadas para extrair o lítio. Também vale a pena notar que outros elementos tóxicos como o cádmio e o mercúrio, que ainda são usados em algumas baterias, são aproximadamente 1.000 vezes *menos* comuns que o lítio, e ainda assim são comercialmente viáveis.

Calculando o Conteúdo de Lítio na Bateria de um Veículo Elétrico

O próximo passo lógico é determinar quanto lítio é realmente necessário para um único veículo elétrico. Para fazer isso, podemos realizar uma análise simples:

Passo 1: Porcentagem de Lítio em uma Única Célula

Vamos usar uma célula de óxido de lítio e cobalto (LCO) como um exemplo representativo.

- **Lítio no Eletrodo Positivo:** Com base nos pesos atômicos de seus elementos constituintes, o próprio material LCO é aproximadamente **7% de lítio** por peso. O material ativo do eletrodo positivo compõe menos de um terço do peso total da célula. Portanto, a contribuição de lítio do eletrodo positivo é de cerca de um terço de 7%, ou aproximadamente **2% do peso total da célula**. (Nota: uma célula nova não tem lítio em seu eletrodo negativo).
- **Lítio no Eletrólito:** O eletrólito, que contém um sal à base de lítio como o LiPF_6 , compõe cerca de 10% do peso total da célula. O lítio dentro desse sal de eletrólito representa cerca de 10% do peso do eletrólito. Assim, a contribuição de lítio do eletrólito é de cerca de 10% de 10%, ou **1% do peso total da célula**.
- **Total:** Combinando essas fontes, uma célula de íon-lítio de alta energia contém aproximadamente **3% de lítio** em seu peso total.

Passo 2: Dimensionando para um Pacote de Bateria Completo de VE

Agora podemos dimensionar essa porcentagem para um pacote de bateria completo de um veículo.

- **Peso por Quilowatt-Hora:** Um pacote de bateria de VE típico pesa aproximadamente **7 quilogramas por quilowatt-hora (kg/kWh)** de capacidade de energia.

- **Lítio por Quilowatt-Hora:** O conteúdo de lítio é 3% deste peso, o que equivale a $0,03 \times 7 \text{ kg/kWh} \approx \mathbf{0,2 \text{ kg/kWh}}$.
- **Lítio Total por VE:** Um veículo elétrico de longo alcance com autonomia de 200 milhas (cerca de 320 km) requer aproximadamente um pacote de bateria de **60 kWh**. A quantidade total de lítio necessária é, portanto, de $60 \text{ kWh} \times 0,2 \text{ kg/kWh} = \mathbf{12 \text{ quilogramas de lítio por veículo}}$.

Comparando a Oferta Global com a Demanda Projetada

Com uma estimativa de 12 kg de lítio por VE (um cenário mais pessimista que ignora híbridos plug-in com baterias menores e híbridos convencionais, bem como a reciclagem), podemos agora comparar essa demanda com a oferta global conhecida.

De acordo com os dados do USGS, a oferta disponível conhecida de lítio na Terra é de mais de **200 bilhões de toneladas**.

Um cálculo simples revela a escala deste recurso. Se 1 milhão de VEs requerem 12.000 toneladas de lítio, as 200 bilhões de toneladas disponíveis são mais do que suficientes. Na verdade, mesmo sem qualquer reciclagem, a oferta conhecida é grande o suficiente para que cada ser humano atualmente vivo possua mais de 2.000 veículos elétricos. Com base nisso, não parece haver uma crise de lítio no horizonte.

No entanto, é importante adicionar uma camada de consideração prática a esta análise otimista. A grande maioria do lítio incluído nessa cifra de 200 bilhões de toneladas está dissolvida na água do mar. Embora tecnologicamente possível, extrair lítio da água do mar é atualmente muito difícil e de custo proibitivo. Portanto, embora a oferta total seja imensa, a oferta *facilmente disponível* é menor. Mesmo assim, depósitos de lítio terrestres novos e acessíveis estão sendo continuamente descobertos.

O Verdadeiro Gargalo de Material: A Questão do Cobalto

Se o lítio não é uma grande preocupação, isso significa que a cadeia de suprimentos para baterias de íon-lítio está completamente segura? Não necessariamente. O verdadeiro gargalo potencial reside em outros elementos muito mais raros usados nas células.

O principal elemento de preocupação é o **cobalto**. A maioria dos materiais de eletrodo positivo de alto desempenho, como LCO, NMC e NCA, depende do cobalto. O cobalto é significativamente mais raro que o lítio, e a maior parte da oferta mundial é minerada na República Democrática do Congo, uma região

que tem enfrentado instabilidade política. Essa combinação de escassez e concentração geopolítica torna a cadeia de suprimentos de cobalto um ponto de preocupação muito mais realista do que a do lítio.

Felizmente, existem soluções claras para este problema potencial. A indústria está ativamente se movendo em direção a químicas que reduzem ou eliminam o cobalto. Os cátodos de NMC e NCA já usam significativamente menos cobalto do que o LCO puro, e químicas livres de cobalto, como o **fosfato de ferro e lítio (LFP)** e o **óxido de lítio e manganês (LMO)**, são alternativas maduras e viáveis.

Conclusão: Uma Visão Otimista do Fornecimento de Materiais

Em resumo, a noção de uma "crise do lítio" iminente não parece ser apoiada pelos dados sobre a abundância global de elementos. Uma análise simples mostra que a oferta total de lítio é mais do que suficiente para atender à demanda projetada para veículos elétricos e outras aplicações em grande escala, mesmo antes de considerar o imenso impacto da reciclagem.

Embora existam preocupações mais realistas em relação à escassez e à estabilidade da cadeia de suprimentos de outros elementos como o cobalto, a versatilidade da química de íon-lítio oferece uma solução. A existência de materiais de cátodo alternativos e de alto desempenho que não dependem desses elementos raros significa que existem caminhos claros para garantir uma cadeia de suprimentos estável e sustentável para baterias por muito tempo no futuro. Em última análise, as perspectivas para o fornecimento de material para células de íon-lítio permanecem bastante otimistas.