

PEM – UNIVERSIDADE RWTH AACHEN E HENKEL

REPARAÇÃO DAS BATERIAS DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS PARA **OTIMIZAR O SEU CICLO DE VIDA**

IT'S TIME TO **MOVE** BEYOND

• DOCUMENTO TÉCNICO



ÍNDICE

02 RESUMO



03 INTRODUÇÃO

AUMENTO DA SUSTENTABILIDADE
DE UMA BATERIA



06 REPARAÇÃO DE BATERIAS DE VEÍCULOS ELÉTRICOS

DESAFIOS E SOLUÇÕES



09 ANÁLISE GERAL

A REPARAÇÃO É VIÁVEL
QUANDO COMPARADA COM A
SUBSTITUIÇÃO?



12 CONCLUSÃO E PRÓXIMOS PASSOS



14 CRÉDITOS



RESUMO

Os veículos elétricos a bateria (VEB) destacam-se como instrumentos fundamentais para enfrentar as alterações climáticas, contribuindo substancialmente para a redução das emissões de gases com efeito de estufa nos setores da mobilidade e dos transportes^{1,2}. Devido à grande quantidade de energia necessária para a produção de baterias e as consequentes emissões, coloca-se uma pergunta recorrente sobre se os VEB realmente reduzem as emissões comparativamente aos veículos impulsionados por motores de combustão interna e em que moldes³. Este documento técnico foca-se na demonstração de que a reparação dos módulos de baterias danificados ou envelhecidos prematuramente, como forma de garantir que alcançam a sua vida útil esperada, traz vantagens tanto a nível ambiental como económico comparativamente à substituição e reciclagem completas dos conjuntos de baterias inteiros.

Para uma compreensão profunda da dinâmica de custos e emissões de CO₂ inerentes às baterias para veículos elétricos, o documento começa com uma descrição geral do seu design e ciclo de vida. Além disso, é apresentado um exemplo de reparação de uma bateria através da introdução de um sistema de bateria de referência, baseado numa bateria média de veículo elétrico (VE) de módulos para conjuntos, juntamente com estimativas completas de custos e emissões. Este sistema de referência é utilizado para uma comparação direta entre a reparação e a substituição da bateria, incorporando considerações como a depreciação da bateria, os custos de produção, as emissões e o processo de reciclagem no final da vida útil da bateria.

Os resultados desta análise comprovam que a reparação é uma opção benéfica em muitos casos. Em especial, durante o período de garantia, a reparação é a opção mais eficiente do ponto de vista económico e ambiental. Na verdade, após o final do período de garantia, a reparação continua a ser uma opção viável. Esta alternativa pode tornar-se menos económica apenas pouco antes do final da vida útil da bateria. Considerando a tendência para uma maior integração das células da bateria nos elementos estruturais do veículo, a chamada abordagem "cell-to-X", que complicará a possibilidade de reparação das baterias, os resultados deste estudo devem ser tidos em conta durante o desenvolvimento de novos designs de baterias que garantem uma solução mais económica e ecológica.



A reparação de um conjunto de baterias de um VEB médio através da substituição de módulos individuais para restaurar a sua funcionalidade permite poupar até 77% em custos e até 91% em emissões, comparativamente à substituição por um conjunto novo.

INTRODUÇÃO

AUMENTO

DA SUSTENTABILIDADE

DA BATERIA

A atual arquitetura dominante dos conjuntos de baterias nos veículos elétricos a bateria (VEB) está estruturada à volta de um modelo de módulos para conjuntos (MTP). Nesta disposição, as células individuais, que albergam a capacidade de armazenamento eletroquímico da bateria, são agrupadas em módulos. Assim, estes módulos estão organizados dentro do conjunto de baterias, juntamente com componentes essenciais como o sistema de refrigeração e o sistema de gestão de baterias (BMS).⁴ Os recentes desenvolvimentos da indústria sugerem uma tendência crescente para uma integração mais direta das células de bateria individuais na estrutura do veículo (por exemplo, arquiteturas de célula para conjunto ou de célula para chassis), com o objetivo de melhorar a densidade energética⁵. No entanto, uma vez que estes designs têm atualmente uma participação de mercado limitada, este documento utiliza uma arquitetura MTP convencional como base para a análise.

Se analisarmos a criação de VEB de um ponto de vista ambiental, é evidente que a estrutura de emissões ao longo do ciclo de vida de um VEB é significativamente diferente da dos veículos de combustão interna. As emissões geradas por estes últimos são causadas principalmente pela utilização do automóvel, devido à combustão de combustíveis fósseis. Ainda que produzam potencialmente zero emissões durante a sua utilização, se os VEB utilizarem eletricidade proveniente de fontes renováveis, criam mais emissões durante a produção. A diminuição das emissões na produção de eletricidade e, por conseguinte, a diminuição das emissões durante a respetiva utilização, desvia o foco das emissões na fase de produção dos VEB, tal como analisado neste documento.

No general, as emissões atribuídas aos VEB ao longo do seu ciclo de vida podem ser classificadas em três fases principais: produção, utilização e tratamento posterior à utilização.

A maior parte das emissões em cada uma destas fases está associada à geração de energia elétrica. Em especial, a fonte de eletricidade tem um papel crucial na altura de determinar o impacto ambiental. Em muitos países, uma parte substancial da eletricidade provém de combustíveis fósseis, o que contribui para as emissões de gases com efeito de estufa (GEI).^{7,8}

Ao avaliar a distribuição das emissões a montante dos VEB em função dos seus componentes, o fator mais importante é a bateria, que representa aproximadamente entre 40% e 60% das emissões.

As fontes de emissão provenientes dos conjuntos de baterias apresentam uma variabilidade significativa, dependendo de fatores como a química da célula, o formato e a tecnologia utilizada. No geral, as baterias baseadas em níquel-manganês-cobalto (NMC) tendem a apresentar um perfil de emissões a montante mais pronunciado, particularmente atribuível aos processos de extração e refinação. Por outro lado, as baterias de fosfato de ferro-lítio (LFP) apresentam uma pegada de produção mais elevada, principalmente devido à sua menor densidade energética, o que leva a uma maior intensidade nos processos de fabrico. No entanto, as baterias LFP beneficiam de emissões menores antes da utilização.

Desta forma, geralmente, as baterias LFP apresentam uma pegada de carbono geral menor por kilowatt/hora (kWh) em comparação com as baterias NMC, embora ambas químicas, partilham semelhanças nos seus perfis de emissões. Na Figura 1 é apresentado um exemplo de perfil de emissão de um conjunto de baterias LFP.

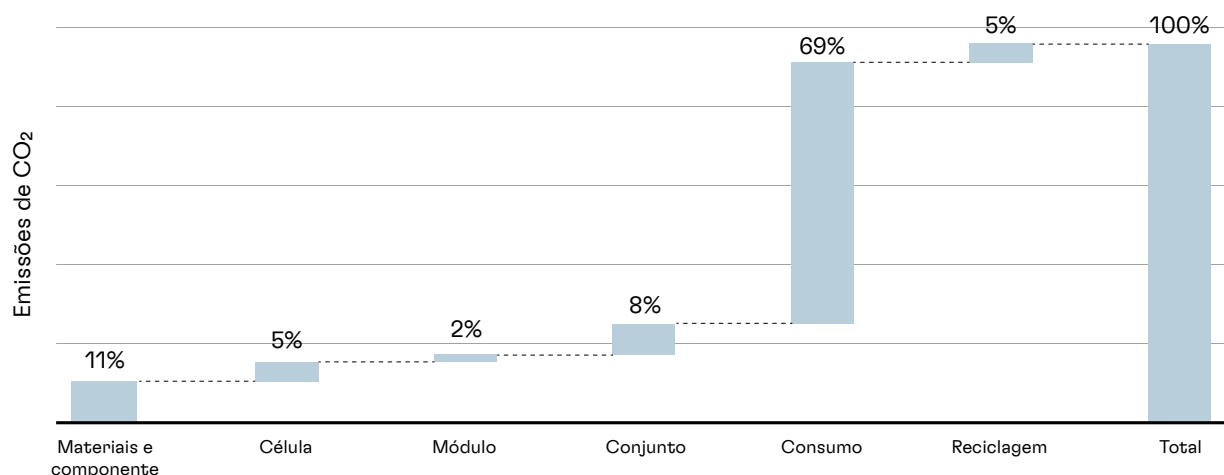


FIGURA 1: Perfil de emissão de um conjunto de baterias LFP por kWh.

Além das emissões, os custos dos VEB são atualmente uma das principais preocupações tanto para os fabricantes de equipamentos originais (OEM) como para os consumidores. Paralelamente à distribuição observada nas emissões de gases com efeito de estufa dos VEB, a bateria constitui uma parte substancial dos custos totais. O custo de uma bateria ascende a aproximadamente 120 €/kWh de teor energético do conjunto. Em especial, as células LFP atuais, quando produzidas numa escala industrial, permitem alcançar, pelo menos, 92 €/kWh.

Devido à influência substancial da bateria e a sua produção nos custos e nas emissões gerais dos veículos elétricos, a ampliação do seu ciclo de vida e a maximização da utilização, tanto do produto como dos seus materiais, podem criar vantagens notáveis para os OEM, os clientes e a sociedade em geral. O objetivo principal é instituir uma economia circular no setor das baterias.

Numa cadeia de abastecimento linear tradicional, os materiais são extraídos dos recursos naturais e são utilizados na produção de produtos consumíveis.

Assim que estes produtos chegam ao seu final de vida útil, são descartados, o que dá lugar a uma perda do seu valor inerente e dos materiais utilizados.

O conceito de economia circular descreve uma mudança do paradigma para uma cadeia de valor, na qual a vida útil dos produtos e dos materiais que a compõem são ampliados ao máximo.⁹ Tal implica a adoção de várias estratégias conhecidas como os “4R”. Na Figura 2, é apresentada uma cadeia de abastecimento de baterias fechada, que engloba as estratégias 4R:

Reparação, reutilização, reparação industrial e reciclagem.

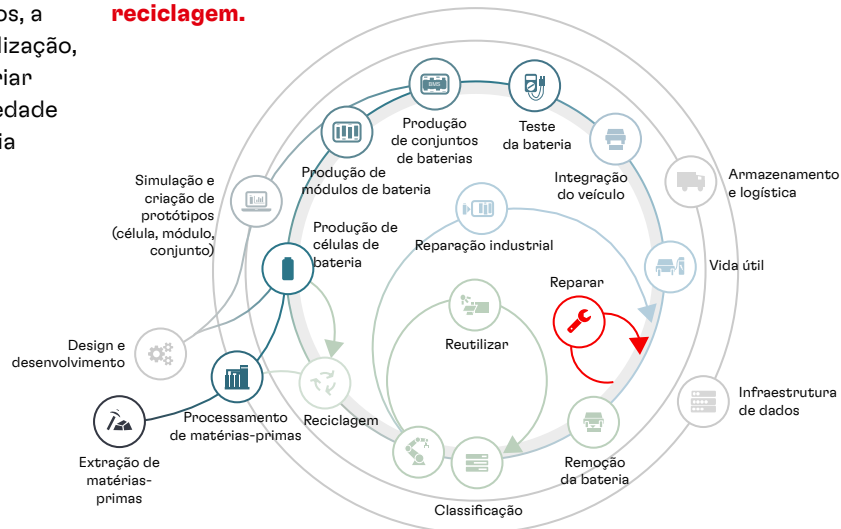


FIGURA 2: Visão esquemática da economia circular para baterias.

Nos parágrafos seguintes são apresentadas e contextualizadas estas estratégias 4R no âmbito das baterias e do seu ciclo de vida.

REPARAÇÃO:

A reparação implica a retificação de produtos danificados para prolongar a sua vida útil operacional. Pode fazer isto através da substituição de componentes defeituosos ou da reparação dos produtos danificados. No contexto das baterias, os cenários de reparação surgem muitas vezes no contexto dos períodos de garantia ou retirada do mercado para os OEM. Atualmente, é comum substituir todo o conjunto de baterias. No entanto, a não substituição de todo o conjunto de baterias em caso de falhas torna a reparação uma opção potencialmente rentável para ampliar a vida útil de uma bateria.¹⁰

REPARAÇÃO INDUSTRIAL:

A reparação industrial implica recorrer a produtos usados e utilizar peças individuais que ainda funcionam para fabricar produtos novos. Para que este processo seja bem-sucedido, é necessário desmontar o sistema, por exemplo, um conjunto de baterias, e testar os componentes individuais.¹⁰

REUTILIZAÇÃO:

A reutilização implica recorrer a um produto usado e ampliar o seu ciclo de vida utilizando-o numa aplicação diferente. A perda gradual de capacidade de uma bateria ao longo do tempo pode fazer com que não seja adequada para a sua aplicação original, embora permaneça viável para exemplos alternativos.^{10,11}

RECICLAGEM:

A reciclagem representa a última opção para fechar o ciclo de vida de um produto. Durante o processo de reciclagem, o objetivo principal é recuperar materiais do produto para serem utilizados na produção de novas peças. O produto sofre uma perda de função e estrutura e decompõem-se nos seus materiais individuais.^{10,12}

A implementação de processos de reparação eficientes e eficazes pode aumentar significativamente a vida útil dos componentes mais caros e ambientalmente mais problemáticos dos veículos elétricos. Oferecer esta opção aos clientes cria não só um novo fluxo de valor para os OEM como também contribui para a redução dos custos e das emissões. Este artigo centra-se na reparação de baterias defeituosas de VEB através da substituição de módulos individuais. Para que tal seja uma solução viável, é necessário analisar exaustivamente vários fatores que influenciam a capacidade de a bateria ser reparada, como o seu design. É importante destacar que, após a reparação, a norma UE ainda se aplica à bateria reparada.¹³



REPARAÇÃO DE BATERIAS DE VEÍCULOS ELÉTRICOS

PROBLEMAS E SOLUÇÕES

As baterias para veículos elétricos apresentam um potencial significativo para a indústria e a economia, aliado a desafios substanciais relacionados com a sustentabilidade e a dependência de recursos naturais geograficamente limitados. Ao reconhecer estas complexidades, verifica-se uma tendência crescente para a criação de normas oficiais. Além da China, onde as normas referentes ao tratamento das baterias de veículos elétricos no final da sua vida útil já foram estabelecidas há vários anos e a reparação é sem dúvida uma opção viável, a União Europeia (UE) está a atualizar-se. Os seguintes extratos proporcionam uma descrição geral destas normas UE relativas às baterias.

Em 2023, o Parlamento Europeu apresentou a norma 2023/1542 relativa às baterias, impulsionada 2023/1542 pelo Pacto Verde Europeu. Este regulamento define o processo integral de gestão da informação, do manuseamento, das responsabilidades e da sustentabilidade das baterias no mercado europeu. A reparação das baterias de veículos elétricos é abordada especificamente através de vários artigos da norma.¹³

Em primeiro lugar, o regulamento estipula que as baterias reparadas ou substituídas nos VE devem cumprir as mesmas normas e requisitos de segurança que as novas. Esta conformidade é garantida através da possibilidade de realizar verificações e inspeções não destrutivas.¹³

Para facilitar a capacidade de reparação das baterias, a norma exige que as respetivas extração e substituição nos veículos elétricos devam ser realizadas por profissionais independentes. Os fabricantes são obrigados a fornecer informações de diagnóstico pertinente, bem como informações sobre reparação e manutenção, a qualquer interveniente de forma não discriminatória. Além disso, no regulamento, é exigido que a Comissão Europeia promova e ajude no desenvolvimento de normas para técnicas de design e montagem que facilitem a reparação de baterias.^{13,14}

Além das recentes normas da UE sobre baterias, a nova norma EURO 7 propõe estabelecer requisitos mínimos de desempenho para as baterias de VE, tal como mostrado na Figura 3. Para cumprir com estes requisitos, os fabricantes devem garantir que as baterias individuais que ficam abaixo destes limites sejam reparadas ou substituídas. A reparação de baterias individuais que não cumprem estes critérios pode ser uma alternativa prática e rentável comparativamente à substituição de todo o sistema da bateria.¹⁵

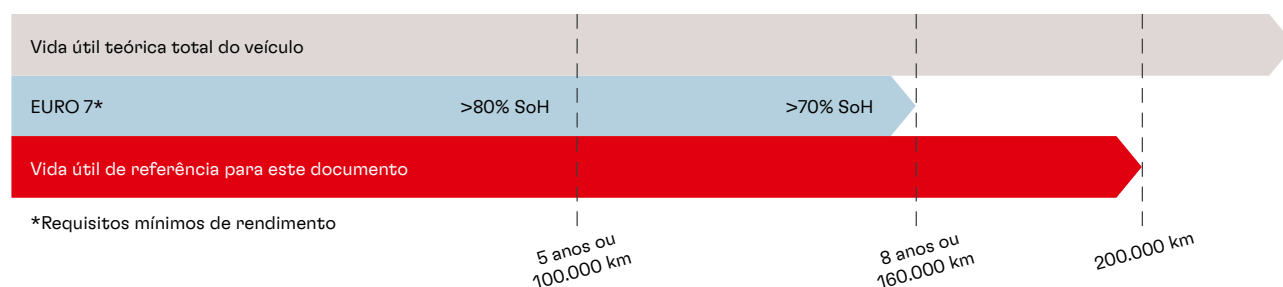


FIGURA 3: Requisitos mínimos de desempenho para baterias de veículos elétricos na norma EURO 7 (15) e vida útil de referência.



OBSTÁCULOS PARA A REPARAÇÃO DE BATERIAS DE VEÍCULOS ELÉTRICOS:

A reparação satisfatória das baterias de veículos elétricos enfrenta os desafios principais relacionados com o design das baterias, a gama diversificada de designs e a falta de instruções de reparação. Os passos-chave do processo, críticos para a realização de reparações rentáveis, incluem o diagnóstico, a desmontagem, a reparação e a remontagem. Devido à grande variedade de designs de baterias, a automatização destes processos é quase inexistente. As tecnologias de união utilizadas durante a montagem inicial da bateria dificultam a remoção não destrutiva dos componentes. Para aceder e substituir componentes dentro do conjunto de baterias, é necessário abrir a tampa do conjunto, o que provoca a destruição da sua vedação. Desta forma, deve ser instalada uma junta nova para garantir a vedação antes que o conjunto de baterias reparado esteja pronto para a sua utilização posterior.¹⁶

Nos exemplos de reparação, um dos componentes críticos é o módulo de bateria. Normalmente, para facilitar a gestão adequada da temperatura, o espaço entre o módulo de bateria e a placa de refrigeração é preenchido com um material termocondutor, habitualmente conhecido como “pasta de dissipação térmica” para baterias MTP. As propriedades adesivas destes materiais podem dificultar a remoção dos módulos individuais.

Depois de extrair o módulo com falha, é necessário limpar qualquer resíduo de pasta de dissipação térmica. Posteriormente, para a instalação do novo módulo, deve ser aplicada uma nova camada de pasta de dissipação térmica para assegurar a gestão do calor original do módulo. Estes passos são parte integral do processo de reparação e contribuem para a complexidade geral dos cenários de reparação do módulo de bateria.¹⁶

Considerando os desafios apresentados pelos obstáculos mencionados anteriormente, existe uma necessidade urgente de desenvolver processos e materiais que garantam uma reparação rentável e ecológica das baterias de veículos elétricos. Dois materiais fundamentais necessários para este objetivo são a junta da caixa da bateria, responsável pela vedação da tampa do conjunto de baterias, e a pasta de dissipação térmica, utilizada entre o módulo de bateria e a placa de refrigeração para facilitar a gestão adequada da temperatura. Os processos correspondentes de desmontagem e montagem de componentes também exigem esforços de desenvolvimento específicos para agilizar e otimizar os procedimentos de reparação.



A HENKEL É PIONEIRA EM SOLUÇÕES DE REPARAÇÃO ESPECÍFICAS PARA VE

A Henkel facilita a reparação de módulos de baterias ao proporcionar duas soluções-chave concebidas para abordar os principais obstáculos encontrados durante o processo de reparação. Quando é diagnosticado que uma bateria possui um módulo com falha e este é removido do veículo, o processo de reparação é iniciado com a descarga do conjunto. Posteriormente, o conjunto é aberto, permitindo aceder ao módulo defeituoso para a sua remoção. Antes de instalar um novo módulo, é necessário preparar a placa de refrigeração na qual vai ser colocado. Tal implica a eliminação completa da pasta de dissipação térmica antiga.

É aplicada uma nova pasta de dissipação térmica na placa de refrigeração limpa. Depois de posicionar o novo módulo na placa de refrigeração, pode montar a tampa. Previamente, prepare a tampa e a caixa removendo a junta antiga e limpando as extremidades da união. Se a junta original for um tipo de junta de cura no local, o produto de reparação pode servir como uma junta nova e ser aplicado entre a tampa e a caixa.

O comprimento depende do design da bateria e normalmente varia entre seis e oito metros. Com a nova junta instalada, pode voltar a montar a caixa. Antes de concluir o processo de reparação, são realizadas inspeções e testes finais, o que permite reinstalar a bateria na sua aplicação. O processo é descrito visualmente com um produto Henkel na Figura 4.

A partir das conclusões obtidas no primeiro capítulo, e reconhecendo a importância de ampliar o ciclo de vida das baterias para o cumprimento da norma UE, justifica-se uma análise mais profunda dos benefícios reais da aplicação das estratégias 4R no âmbito das baterias. A reparação das baterias, em particular, tem o potencial de ser um processo efetivo se forem estabelecidas as condições necessárias. No capítulo seguinte, é apresentado um exemplo de reparação para avaliar o respetivo impacto económico e ambiental no ciclo de vida da bateria.



FIGURA 4: Especificações e aplicação da pasta de dissipação térmica LOCTITE TFX 3010.

ANÁLISE DO CENÁRIO

A REPARAÇÃO

É VIÁVEL

COMPARATIVAMENTE

À SUBSTITUIÇÃO?

Para aprofundar numa análise mais exaustiva dos custos e das emissões associados às baterias, é apresentado um exame detalhado das emissões de GEI do ciclo de vida e os custos do ciclo de vida de um conjunto de baterias ilustrativo. Este conjunto específico serve de referência ao longo deste capítulo, facilitando uma avaliação comparativa das possíveis reduções de custos e emissões através da implementação de estratégias de reparação. As especificações são derivadas do conjunto de baterias europeu médio, apresentado na Figura 5.

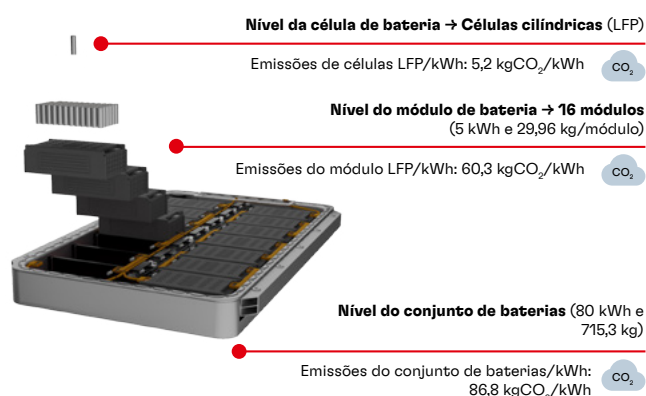


FIGURA 5: Emissões de GEI para produção e materiais ao nível das células, dos módulos e dos conjuntos. É fundamental ter em conta que estes valores podem apresentar variações consideráveis em função da lista de materiais de cada bateria, bem como fatores como o fornecimento de material e a localização da produção.

A tendência atual em relação ao tamanho das baterias provavelmente conduz a uma capacidade média de conjunto de baterias VEB no mercado europeu de aproximadamente 80 kWh distribuídos por 16 módulos¹⁷. Dada a sua notável quota de 66% no mercado chinês de baterias nesse mesmo ano, a bateria química LFP afigura-se como a predominante para os futuros VEB18. Desta forma, o conjunto de baterias de referência é definido com as especificações e as emissões de gases com efeito de estufa e os custos do ciclo de vida são analisados, incluindo o fornecimento de materiais, a produção de células, a produção de módulos, a produção de conjuntos e a utilização e reciclagem. Esta análise abrangente serve de base para uma comparação detalhada entre a reparação e substituição, um tema que é abordado em maior detalhe mais à frente neste artigo.

Os resultados, com valores relativos e absolutos, são apresentados na Tabela 1. Esta apresentação disponibiliza uma compreensão subtil da estrutura de custos e emissões dos VEB.

Passo do ciclo de vida	Custo (€)	Emissões (kgCO ₂ e)	Percentagem do custo total	Percentagem das emissões totais
Célula LFP	7600	4176	65	16
Módulo LFP	800	651	7	2
Conjunto LFP	2000	2117	17	8
Consumo	/	18 575	/	69
Reciclagem LFP	1360	1307	11	5
Total	11 760	26 827	100	100

TABELA 1: Custos e emissões totais do conjunto de baterias de referência (6). Os resultados baseiam-se numa produtividade de 200 000 km, um consumo elétrico de 20 kWh/100 km, perdas de carga adicionais que dão lugar a uma utilização total de 42 800 kWh durante a vida útil, 300 g de CO₂e/kWh de eletricidade e emissões de reciclagem, segundo Van Hoof et al., 2023. (19) Os pressupostos de custos são realizados de acordo com os preços do mercado e cálculos internos que apresentam como resultado custos de reciclagem de 17 €/kWh por conjunto LFP.

Este documento técnico baseia-se em situações de falha ou baixo desempenho presentes em módulos individuais ou múltiplos. Embora seja pouco provável que uma destas falhas de bateria dê origem ao mau funcionamento de um automóvel para o cliente individual, em maior escala, é uma ocorrência comum para as oficinas de reparação e os OEM²⁰. As considerações críticas sobre a reparação giram principalmente em torno de aspetos económicos e ambientais, assumindo-se que a capacidade de as baterias serem reparadas já está garantida. Os custos associados à reparação incluem a desmontagem e montagem dos componentes do conjunto, a incorporação de novos módulos integrados e a utilização de produtos específicos para a reparação, como LOCTITE TFX 3010 e LOCTITE ESB 5100.

Depois, estes custos são comparados com a substituição de todo o conjunto de baterias. Pressupõe-se que a estrutura de custos no momento da falha do módulo e a sua possível reparação é consistente com os capítulos anteriores deste documento.

As emissões associadas ao processo de reparação seguem uma estrutura semelhante. Ainda que a necessidade de energia durante a desmontagem e montagem manuais seja insignificante, as emissões da reparação são quantificadas tendo em consideração as emissões dos produtos e módulos de reparação. Estas emissões são comparadas posteriormente com as produzidas, caso seja realizada uma substituição de um conjunto de baterias completo. Na Figura 6, são apresentadas as poupanças de custos e de emissões entre a reparação e a substituição para dois exemplos de reparações dentro e fora do período de garantia.

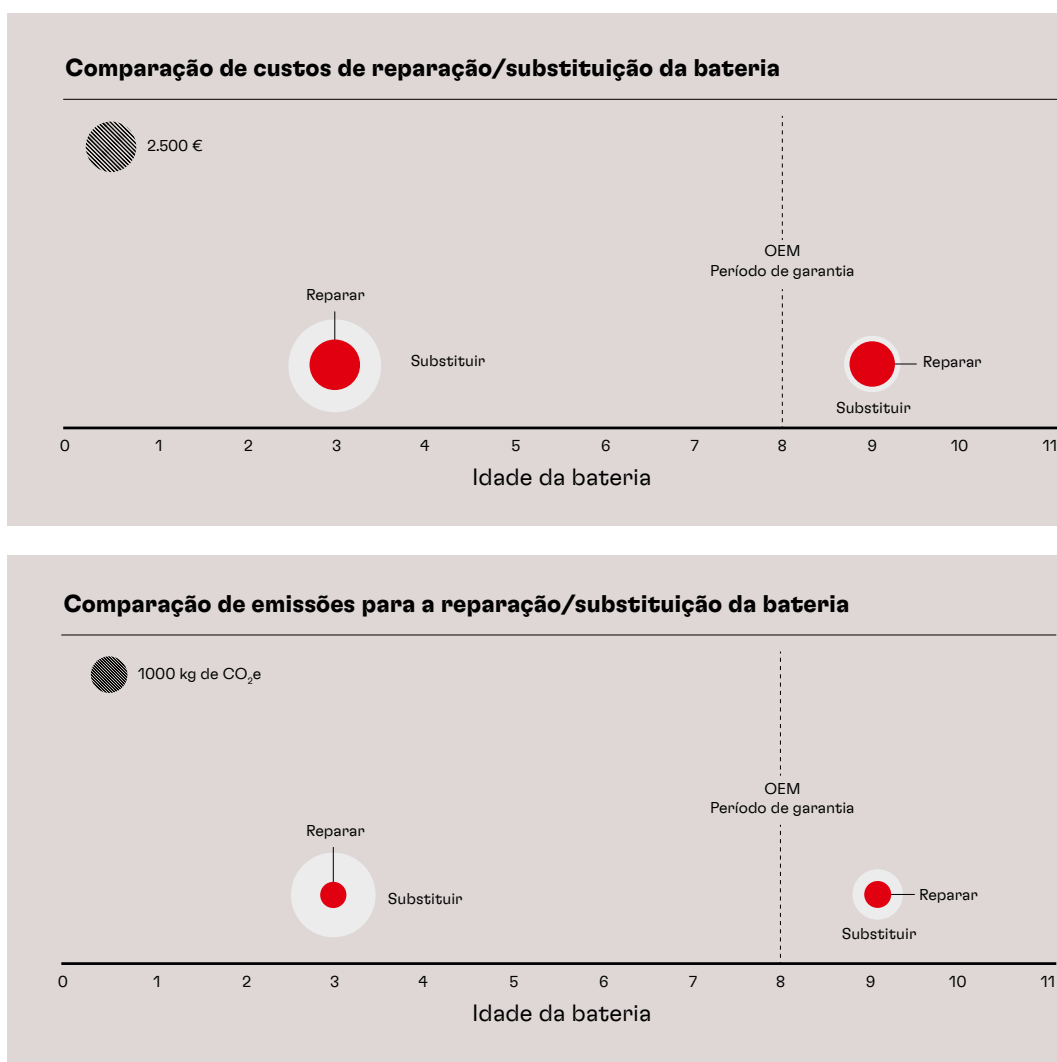
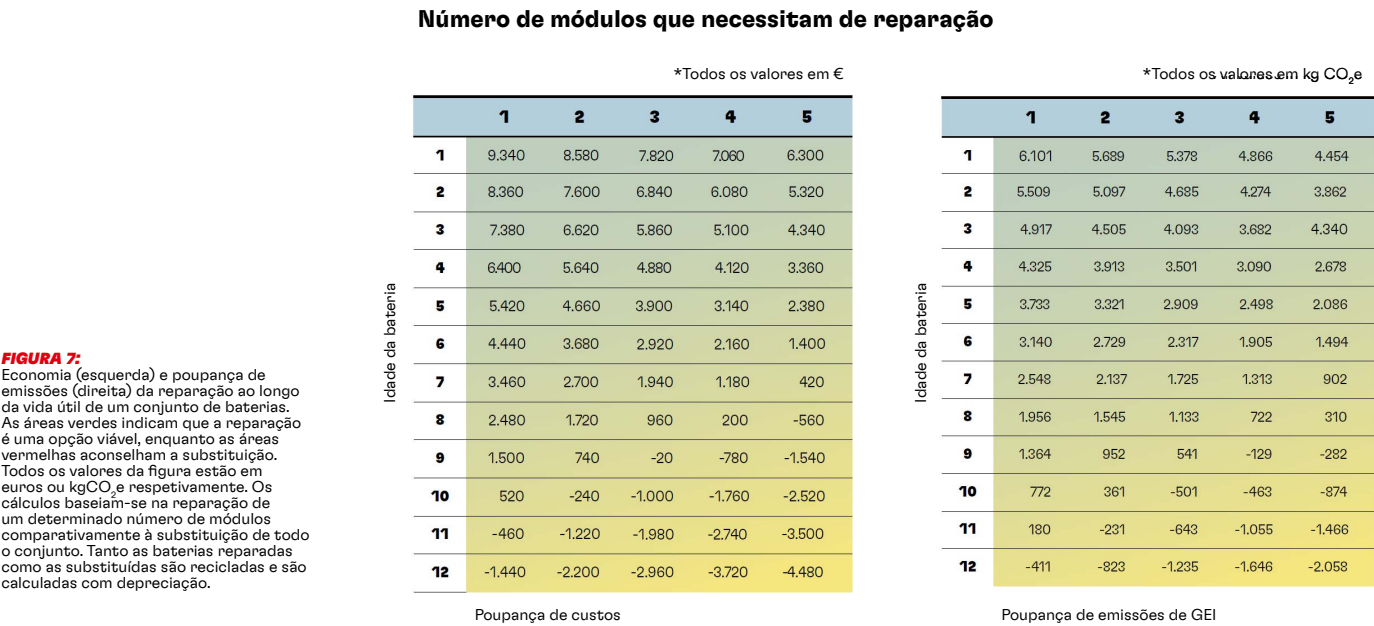


FIGURA 6: Exemplo de poupança através da reparação de uma bateria de veículo elétrico comparativamente à substituição em dois momentos diferentes durante a vida útil da bateria: após 3 anos: poupança de custos: 7380 €; poupança de emissões: 4917 kgCO₂e; após 9 anos: poupança de custos: 1500 €; poupança de emissões: 1394 kgCO₂e.



Na Figura 7, os resultados dos cálculos e os pressupostos analisados nos capítulos anteriores são apresentados através de uma estrutura matricial. Um aspeto essencial destes cálculos é o tempo de depreciação predeterminado para um conjunto de baterias novo, estabelecido nos 12 anos e 200 000 km (a vida útil das baterias de 12 anos é uma estimativa. Tal pode variar para cima ou para baixo, afetando de forma semelhante a economia da reparação. Isto significa que a reparação é a opção económica a longo prazo, partindo do princípio que a vida útil da bateria é superior). Otimização do ciclo de vida da bateria de veículo elétrico através da reparação da bateria neste caso. Convém referir que os módulos novos para reparações não têm um período de depreciação. Estes são utilizados unicamente para o cumprimento da vida útil prevista de doze anos. Desta forma, os valores seguintes apresentam a poupança em custos e emissões em função do momento da reparação e da quantidade de módulos que requerem atenção.



Os valores mostram o limite de depreciação da bateria após o qual a reparação se torna económica e ambientalmente insustentável. Além disso, estas representações ilustram o número potencial de módulos que poderiam ser reparados de forma viável num cenário vantajoso tanto do ponto de vista económico como ambiental. Em especial, a capacidade de configuração desta matriz permite realizar ajustes em função de períodos distintos de depreciação, o que influencia a viabilidade da reparação em períodos maiores ou mais curtos.

A escolha da reparação ao invés da substituição dos módulos de bateria oferece claras vantagens, impulsionadas pela utilização otimizada da vida útil concebida da bateria. Embora o conjunto de baterias original, com módulos reparados individualmente, requeira uma reciclagem completa no final da sua vida útil, este método apresenta exigências de reciclagem adicionais e uma vida útil mais curta para os conjuntos de baterias substituídos, o que proporciona benefícios notáveis para a reparação.

A análise revela que a reparação das baterias MTP continua a ser económica e benéfica para o ambiente quase até ao final da sua vida útil de doze anos. Num cenário em que um módulo defeituoso requer atenção após cinco anos, optar pela reparação pressupõe uma poupança de custos de mais

de 5000 € e reduz as emissões em mais de 3,5 toneladas de CO₂.

Com base em pressupostos realistas, a reparação é a opção mais sensata do ponto de vista económico e ambiental, especialmente durante os períodos de garantia estabelecidos nas normas UE e especificados pelos fabricantes de equipamentos originais (OEM). A reparação demonstra ser mais pragmática que a substituição direta da bateria, em particular para reparações de módulos individuais.



Nos primeiros 80% da vida útil de um conjunto de baterias, a reparação é quase exclusivamente a opção mais económica e ecológica comparativamente à substituição da bateria.

CONCLUSÃO E PRÓXIMOS PASSOS

Com base nas descobertas obtidas na investigação apresentada neste documento técnico, a reparação de baterias de veículos elétricos afigura-se como um elemento-chave no desenvolvimento de uma economia circular eficiente para os sistemas de baterias. A possível redução do impacto ambiental, obtida através da diminuição das emissões de gases com efeito de estufa e a utilização prudente dos recursos, juntamente com a criação de novas fontes de rendimento, faz da reparação de baterias uma perspetiva interessante para as diversas partes interessadas ao longo da cadeia de valor das baterias. Em números, a reparação de um conjunto de baterias de um VEB médio através da substituição de módulos individuais para restaurar a sua funcionalidade permite poupar até 77% em custos e até 91% em emissões, comparativamente à substituição por um conjunto novo. Conforme descrito no Capítulo 4, a reparação de baterias defeituosas individuais, em especial ao nível do módulo, é predominantemente viável para os OEM durante os períodos de garantia, mas também é uma opção benéfica em muitos casos para os proprietários após o final do período de garantia.

No entanto, para realizar reparações económicas e ecológicas, é necessário abordar os desafios-chave descritos no Capítulo 3. Fundamentalmente, a facilidade de reparação das baterias depende do design e dos materiais utilizados na sua construção, o que requer produtos e processos que facilitem uma desmontagem e montagem rápidas sem comprometer a integridade do sistema. Os passos críticos no processo de reparação, conforme ilustrado, incluem a abertura do conjunto de baterias, a extração do módulo de bateria com a remoção da pasta de dissipação térmica antiga, a aplicação de uma nova camada de pasta de dissipação térmica, a instalação de uma nova junta para a tampa da bateria e o fecho posterior do conjunto de baterias.

Este estudo argumenta convincentemente a favor da reparação de conjuntos de baterias e demonstra que, na maioria dos cenários, representa uma estratégia benéfica do ponto de vista económico e ambiental. A reparação não só prolonga a vida útil da bateria, mas também garante a

conformidade dos requisitos da garantia, contribuindo, assim, positivamente para a sustentabilidade dos veículos elétricos.

Os resultados sublinham a importância de integrar considerações sobre a capacidade das baterias serem reparadas no desenvolvimento de novas gerações, influenciando significativamente o design. É fundamental avaliar cuidadosamente aspetos como as possíveis limitações à capacidade de reparação associadas à implementação de arquiteturas cell-to-X (CTX). Em última instância, o estudo defende a escolha do compromisso mais económico e ambientalmente sustentável ao longo de todo o ciclo de vida de um conjunto de baterias, colocando a reparação em primeiro lugar das considerações.



LOCTITE

A segurança rodoviária está intrinsecamente ligada à segurança do trabalhador. Ao tornarmos as nossas soluções mais seguras, utilizando materiais avançados, criamos ainda mais valor.

A nossa pasta de dissipação térmica LOCTITE TFX 3010 oferece os mais elevados padrões de primeiros equipamentos. É um produto sem silicone, de fácil aplicação e manuseamento mais seguro, com uma classificação de risco inferior à dos produtos atuais de clientes utilizados para esta aplicação.



CRÉDITOS

PEM | UNIVERSIDADE RWTH AACHEN

A Cátedra de Engenharia de Produção de Componentes de Mobilidade Elétrica (PEM) da Universidade RWTH Aachen foi fundada em 2014 pelo professor Achim Kampker e está no ativo há vários anos no campo da tecnologia de produção de baterias de íões de lítio. A PEM abrange todos os aspetos do desenvolvimento, da produção e da reciclagem de células e sistemas de baterias. Graças a inúmeros projetos industriais com empresas de todas as fases da cadeia de valor e a sua participação destacada em prestigiados projetos de investigação, a PEM disponibiliza uma ampla experiência.

WWW.PEM.RWTH-AACHEN.DE

HENKEL ADHESIVE TECHNOLOGIES

Com uma sólida trajetória de mais de 145 anos, a Henkel está na vanguarda na reinvenção e melhoria da vida quotidiana. Hoje e para as gerações futuras. Através das marcas e tecnologias inovadoras e sustentáveis da Henkel, em todos os seus equipamentos por todo o mundo.

A Henkel ocupa posições de liderança no setor dos adesivos industriais com uma carteira de adesivos, vedantes e revestimentos de elevado desempenho.

WWW.HENKEL-ADHESIVES.COM

AUTORES

PEM | UNIVERSIDADE RWTH AACHEN:

Prof. Dr. Eng. **Achim Kampker**
Professor universitário e fundador da Cátedra

Prof. Dr. Eng. Dipl. eng. empresarial **Heiner Hans Heimes**
Professor universitário e membro da Direção do Instituto

Moritz Frieges, M. Sc.
Engenheiro-chefe de sistemas de propulsão: economia circular e materiais

Domenic Klohs, M. Sc.
Líder de grupo em tecnologia de baterias e ciclo de vida

Valentin Mussehl, M. Sc.
Investigador associado em tecnologia de baterias e ciclo de vida

Lucca Groß, M. Sc.
Investigador associado em tecnologia de baterias e ciclo de vida

Henkel:

David Cazorla
Responsável global de reparação e manutenção de veículos

Micheal Hajj
Responsável global de engenharia de aplicações, reparação e manutenção de veículos

Sören Brockmann
Responsável geral do mercado pós-venda de mobilidade elétrica, reparação e manutenção de veículos

Dra. Katherine Zhang
Responsável geral de engenharia de aplicações em mobilidade elétrica, reparação e manutenção de veículos

Frank Wingerter
Gestor geral de desenvolvimento de negócios, reparação e manutenção de veículos



REFERÊNCIAS

1. Deutsche Umwelthilfe, "What is the environmental impact of electric cars?: Factsheet," Sustainability, 2023.
2. Kampker, A. e Heimes, H. H., "Elektromobilität," Springer Berlin Heidelberg, Berlín, Heidelberg, 2024, 724 págs.
3. Heimes, H. H., Kampker, A., Offermanns, C., Vienenkötter, J., Frank, M., Robben, T., Klohs, D., Cattani, N. S., Lackner, N., Christen, N., Kreisköther, K., Deutschens, C., Kreisköther, K. e Fluchs, S., "Elektromobilität als Schlüsseltechnologie der Mobilitätswende," Elektromobilität, A. Kampker e H. H. Heimes, eds., Springer Berlin Heidelberg, Berlín, Heidelberg, 2024, págs. 39–62.
4. Prof. Dr. Eng. Dipl. eng. empresarial Heiner Hans Heimes, Benjamin Dorn, M., Daniel Neb, M., Henning Clever, M. S., Artur Scheibe, M. S., Dr. Sarah Michaelis e Jörg Schütrumpf, "Produktionsprozess eines Batteriemoduls und Batteriepacks," 2023.
5. Achim Kampker, Heiner Heimes, Benjamin Dorn, Christian Offermanns, Moritz Friege, Sarah Wennemar, Daniel Neb, Niklas Kissler, Marcel Drescher, Jonas Gorsch, Benedikt Späth, Nikolaus Lackner, Wolfgang Bernhart, Jan-Philipp Hasenberg, Tim Hotz, D. G., Konstantin Knoche, Iskender Demir e Timur Achmadeev, "Battery Monitor 2023: The value chain between economy and ecology," 2023, 36 pp.
6. PEM Universidad RWTH Aachen, "PEM Internal Calculations".
7. Degen, F., Winter, M., Bendig, D. e Tübke, J., "Energy consumption of current and future production of lithium-ion and post lithium-ion battery cells", Nat Energy, V. 8, N.º 11, 2023, págs. 1284–1295.
8. Degen, F. e Schütte, M., "Life cycle assessment of the energy consumption and GHG emissions of state-of-the-art automotive battery cell production", Journal of Cleaner Production, V. 330, 2022, p. 129798.
9. Ellen MacArthur Foundation, "What is a circular economy?," <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview>.
10. Ellen MacArthur Foundation, "The technical cycle of the butterfly diagram", 2022, <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/articles/the-technical-cycle-of-the-butterfly-diagram>.
11. Heimes, H. H., Kampker, A., Offermanns, C., Vienenkötter, J., Maltoni, F., Cattani, N. S., Christen, N. e Kreisköther, K., "Potenziale von Second-Use-Anwendungen für Lithium-Ionen-Batterien," Elektromobilität, A. Kampker e H. H. Heimes, eds., Springer Berlin Heidelberg, Berlín, Heidelberg, 2024.
12. Heimes, H. H., Kampker, A., Offermanns, C., Vienenkötter, J., Maltoni, F., Cattani, N. S., Christen, N. e Kreisköther, K., "Recycling von Lithium-Ionen-Batterien", Elektromobilität, A. Kampker e H. H. Heimes, eds., Springer Berlin Heidelberg, Berlín, Heidelberg, 2024, págs. 687–704.
13. Parlamento Europeu e o Conselho da União Europeia, Norma (UE) 2023/1542 do Parlamento Europeu e do Conselho do 12 de julho de 2023 relativa às baterias e aos resíduos de baterias, que modifica a Diretiva 2008/98/CE e a Norma (UE) 2019/1020 e revoga a Diretiva 2006/66/CE: relativa às baterias e os resíduos de baterias, que modifica a Diretiva 2008/98/CE e a Norma (UE) 2019/1020 e revoga a Diretiva 2006/66/CE", 2023.
14. Battery Pass consortium, "Battery Passport Content Guidance: Achieving compliance with the EU Battery Regulation and increasing sustainability and circularity.," 2023.
15. Comissão Europeia, "Proposal for a regulation of the european parliament and of the council: on type-approval of motor vehicles and engines and of systems, components and separate technical units intended for such vehicles, with respect to their emissions and battery durability (Euro 7) and repealing Regulations (EC) No 715/2007 and (EC) No 595/2009", 2023.
16. Klohs, D., Offermanns, C., Heimes, H. e Kampker, A., "Automated Battery Disassembly—Examination of the Product- and Process-Related Challenges for Automotive Traction Batteries", Recycling, V. 8, N.º 6, 2023, p. 89.
17. PEM Universidade RWTH Aachen, "base de datos de baterías".
18. Sybil Pan, Zihao Li e Yiwen Ju, "LFP batteries extend dominance over NCM batteries in China," 2023, <https://www.fastmarkets.com/insights/lfp-batteries-extend-dominance-over-ncm-batteries-china/>.
19. van Hoof, G., Robertz, B., e Verrecht, B., "Towards Sustainable Battery Recycling: A Carbon Footprint Comparison between Pyrometallurgical and Hydrometallurgical Battery Recycling Flowsheets," Metals, V. 13, No. 12, 2023, p. 1915.
20. Kampker, A., Heimes, H. H., Offermanns, C., Frank, M., Klohs, D., e Nguyen, K., "Prediction of Battery Return Volumes for 3R: Remanufacturing, Reuse, and Recycling," Energies, V. 16, No. 19, 2023, p. 6873.

CONTACTO

Henkel Ibérica Portugal Unipessoal LDA

Rua Dom Nuno Álvares Pereira, n.º 4 e 4ª
Polígono das Actividades Económicas
Parque do Oriente, Bloco 1/2
2695-167 Bobadela, Lisboa
Portugal

next.henkel-adhesives.com/pt

Departamento técnico

Tel. **+34 93 290 49 05**

tecnico.industria@henkel.com

Apoio ao cliente

Tel. **+351 800 600 222**
(Extensão 2704 / 2706)

csxportugal@henkel.com

Salvo indicado em contrário, todas as marcas utilizadas neste documento são marcas comerciais e/ou marcas comerciais registadas da Henkel e/ou das suas filiais nos E.U.A.
© 2025 Henkel AG & Co. KGaA. Todos os direitos reservados



Henkel Adhesive Technologies



next.henkel-adhesives.com/pt